



鲜切花气调保鲜技术研究进展

雷浩, 郭海霞, 程倩, 孙静*

扬州大学园艺园林学院, 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏扬州225009

*通信作者(jingsun@yzu.edu.cn)

摘要: 气调技术是最先进的保鲜技术之一, 但是在鲜切花保鲜上应用较少。本文介绍了国内外气调保鲜技术发展现状, 归纳总结切花气调中的影响因素: 温度、气体成分、包装材料, 概述了气调保鲜对鲜切花鲜重损失率、花青素含量、呼吸速率和切花真菌病害4个方面的影响, 并且对鲜切花气调技术应用前景进行了探讨和展望。

关键词: 气调库; 气调包装; CO₂; O₂; 鲜切花

Research progress of fresh-cut flower controlled atmosphere technology

LEI Hao, GUO Haixia, CHENG Qian, SUN Jing*

College of Horticulture and Landscape Architecture of Yangzhou University, Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology, Yangzhou, Jiangsu 225009, China

*Corresponding author (jingsun@yzu.edu.cn)

Abstract: Controlled atmosphere technology is one of the most advanced preservation technologies, but it is less used in fresh cut flowers preservation. This paper introduces the development and status of controlled atmosphere preservation technology at home and abroad. The factors affecting the gas conditioning of cut flowers are summarized, including temperature, gas composition and packaging material. The effects of controlled atmosphere preservation on the fresh weight loss rate, anthocyanin content, respiration rate and fungal disease of cut flowers are summarized. And the application prospect of cut flower atmosphere adjustment technology is discussed and prospected.

Key words: air-conditioned cold store; controlled atmosphere packaging; carbon dioxide; oxygen; cut flower

近年来, 中国切花产业发展迅速, 拥有完备的花卉产业链和亚洲最大的花卉交易市场。此外我国花卉资源丰富, 新品种培育能力强。据中国花卉协会《2020年我国花卉进出口数据分析报告》, 我国是花卉进出口大国, 2020年我国花卉进出口贸易总额6.22亿美元(<https://www.forestry.gov.cn/hhxx/5150/20211124/102231470665542.html>)。切花进出口贸易额占花卉进出口贸易总额的25.28%, 仅次于盆花(<https://www.forestry.gov.cn/hhxx/276/20220721/090145766569970.html>)。但切花货架期短成为贮

藏过程中的重要问题, 贮藏保鲜方式不当会导致切花提前衰败, 从而导致20%商品切花损失在贮藏阶段前(李芬和祝剑峰2020)。完整的冷链运输体系能减少切花在运输中的损耗。但国内的切花冷链物流体系还不成熟, 运输成本较高, 制约切花产业发展。相比荷兰和日本只有2%的切花长途运输

收稿 2022-08-06 修定 2023-01-19

资助 江苏现代农业产业技术体系建设项目(JATS[2022]043和JATS[2022]489)和江苏省农业科技自主创新项目[CX(23)-3134]。

损耗率, 我国的切花长途运输损耗率高达30% (李莹2021)。故切花保鲜技术对切花产业的发展极为重要, 目前主要的切花保鲜方式有保鲜剂应用技术(纪佳慧等2021)、冷藏保鲜技术(王一楠2021)和气调保鲜技术(Bishop等2007)。

切花保鲜技术一直在发展, 人们一直在尝试使用非化学、环保的方式。气调是目前较为先进的保鲜技术, 它是一种更加环保安全的保鲜方式(吴宪玲等2021)。气调是指改变环境中几种气体的浓度, 减少呼吸消耗, 并抑制其他生理代谢过程, 进一步延缓切花衰老, 延长切花寿命的一种贮藏方法(蔡继业等2022)。目前气调的途径主要有两种: 一种是人工气调, 另一种是自发气调(程诚等2005)。目前在生产中应用的气调技术都是在这两条基本的气调途径上衍生出来的。

1 气调保鲜技术的发展历史

1.1 气调技术的发展

气调技术发展大致可以分为3个阶段, 第一阶段: 气调研究萌芽阶段, 以自发气调为主, 只在大宗果蔬上实现了商业化。第二阶段: 通过气体发生器和检测器精准调控库内气体变化。第三阶段: 气调技术逐步向低温气调技术、超低氧气调技术的方向发展(沈丽和刘艳2009)。

现在气调技术研究有2个新的方向, 一个是利用可降解材料的自发气调包装; 另一个是气调技术与其他保鲜技术协同的复合气调技术。同时气调技术也在向简易、经济和易运输等方向发展(周会玲2001)。

1.1.1 国外气调技术的发展

最早对气调技术的研究可追溯到1821年, 英国人Berard发现贮藏中的水果能够通过呼吸自发降氧从而延长贮藏时间(关文强等2003)。1927年, Kidd和West证明了低温下提高CO₂浓度, 降低O₂浓度有利于苹果贮藏。1929年世界上第一座苹果气调库在英国建立(Beaudry 1999)。1933年美国进行气调实验, 于1941年发表报告, 正式提出气体贮藏(controlled atmosphere, CA)技术。但由于在这样时期的气调库对气体调控能力有限, 降氧主要靠向库内充入N₂实现, 成本高。因此当时的大多数气

调库还是通过植物自身呼吸调控。

1962年, 美国发明燃烧洗涤式气体发生器(胡红生2002), 它以丙烷为原料, 使空气中氧气含量降低, 真正拥有了对气体成分调控的能力。此外降氧设备在不断发展, 利用制氮设备制备的氮气来置换气调库内的氧气成为现代气调库降氧最常用的方法。制氮设备有: PSA变压制氮机、中空纤维膜制氮机、分子筛气调机和脱氧机(刘海东2008)。

1978年, 英国出现了超低氧气调, 他们将O₂浓度降低2%甚至更低的程度(陈永春2011)。有研究表明超低氧气调可以减轻园艺产品贮藏期间受到的低温损害(Poirier等2020)。于是, 气调技术开始向着超低氧的方向发展。本世纪以来, 传感器技术发展成熟, 具备了低氧胁迫检测能力, 由此发展出能够避免超低氧胁迫的动态气调技术。

由于单一的保鲜技术不能满足保鲜需求。除低温之外, 气调保鲜又结合其他保鲜技术发展出了复合气调技术(王云舒2016)。气调包装和2.0 kGy辐射共同处理下, 藏红花的贮藏寿命可达60 d (Jouki和Khazaei 2013)。气调结合乙烯抑制剂1-MCP处理下提高了‘Mcintosh’苹果的硬度, 减弱了苹果内部乙烯的生成(Deell等2016)。在切花领域气调技术研究一直在探索, Bishop等(2007)尝试将交互式气调包装(modified interactive packaging, MIP)用于康乃馨和玫瑰保鲜。Poonsri (2021)在兰花上进行气调包装的研究上取得进展, 发现5% CO₂+2% O₂适合兰花气调保鲜, 且聚丙烯(polypropylene, PP)包装效果较好。

1.1.2 国内气调技术的发展

我国虽然自改革开放后才开始引入大量国外成熟的气调保鲜技术, 但是气调保鲜技术在我国很早就已经开始使用了, 唐代利用密封的瓷罐和竹筒将荔枝等不耐贮鲜果运输到了长安, 就是利用气调技术在中国早期运用的体现(庄虚之1994)。1978年, 在北京建立了我国第一座实验性贮藏库; 1994年, 在北京建成了我国第一座百吨级果蔬气调库(胡红生2002)。在80年代国内推行一种大帐气调的贮藏方式, 这是一种投资小、效果好的简易气调库(段眉会和朱建斌2013a)。其主要利用制氮设备降低环境中氧气含量。当O₂浓度过低或CO₂

浓度过高时,用空压机抽出气体,再向其内部充入 N_2 来调整 CO_2 和 O_2 浓度达到指定参数(段眉会和朱建斌2013b)。我国引入国外先进的气调技术后,气调技术也得到了发展。中国科学院兰州化学物理研究所开发了FC-8布基硅橡胶膜材料(孙晓娜2019),并将其嵌合在塑料膜上运用于气调中。硅胶膜材料透气性强于塑料膜,且 CO_2 透过率高于 O_2 ,这有利于排出过多的 CO_2 和吸收外界 O_2 ,降低园艺产品无氧呼吸损害(陈小红2010)。硅窗气调在大蒜(郭媛丽2019)上应用较多,在苹果(宋春华等2018)、梨(殷磊等2018)和蓝莓(杨相政等2020)等的采后保鲜上都有不错的效果。

1998年,山东省果树研究所研制了新型柔性气调库。柔性气调的特点是气调库的气密结构与隔热保温结构可以全部分离或部分分离成独立结构,可随机调节变动,库的密封空间及门、观察窗口等都是可变、可调的,以其自身的柔性化解库内的压力变化,不需要配置压力平衡装置(鲁墨森和王淑贞2005)。

臭氧有很好的杀菌作用,它与气调结合,在绿芦笋(王晓等2021)、平菇(宁明岸等2020)和草莓(赵晓丹等2015)上都取得不错的效果。气调结合冰温

贮藏技术能很好地保持‘红富士’苹果的品质(赵猛等2010)。

1.2 人工气调

1.2.1 人工气调库

人工气调是依靠气调设备快速调节库内气体成分的气调方式。人工气调库为了不受外界环境的影响对库体气密性、隔热防潮的能力都有很高的要求。装配式、砖混式与夹套式气调库是气调库库体3种主要类型。装配式库体是新建气调库最常用的结构(郭晓光2001),因为采用的聚氨酯或聚苯乙烯夹心彩钢板隔热性能好、防潮、气密性好。

人工气调库完整体系如图1所示,能够监测库内环境因素变化并且及时调整库内温度、湿度、 CO_2 和 O_2 浓度(丁树东等2019)。气调系统是气调库的关键所在,由气体调节设备、压力平衡系统和管道系统三部分组成(黄仲兴2013)。气体发生装置、气体检测设备和气体脱除设备构成了气体调控体系,实现了对气调库内 O_2 和 CO_2 浓度的调控(宿广汀和王素荣2011)。当园艺产品入库,气调库需要快速降氧达到抑制呼吸代谢的效果。气调库快速降氧主要的方式有2种,一种是通过高温催化丙烷反应,消耗 O_2 产生 CO_2 ;另一种方式是用制氮设备

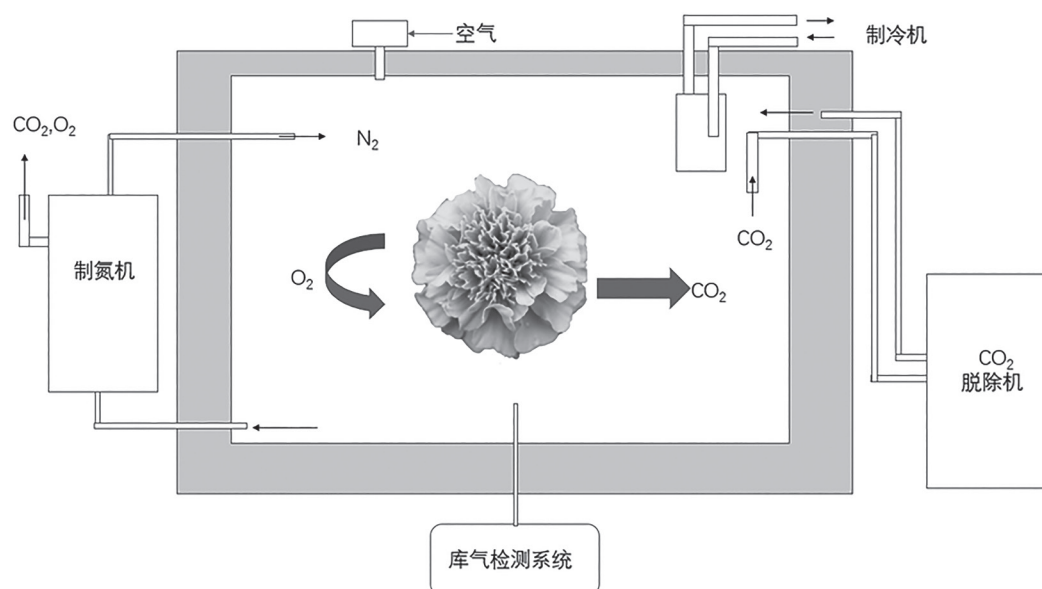


图1 人工气调库结构

Fig. 1 Structure of air-conditioned cold store

制备 N_2 再大量充入库内置换库中氧气, 实现快速降氧(张晓兰2000)。燃烧法降氧会产生大量的 CO_2 , 需要额外通过 CO_2 脱除设备脱除后才可使用, 在现代气调库已经很少使用。制氮设备分为两类, 一类是PSA变压制氮机、中空纤维膜制氮机、分子筛气调机为代表的高压制氮模式; 另一种是负压真空制氮模式, 如脱氧机或吸氧机(赵猛等2010)。由于园艺产品自发呼吸会产生 CO_2 , 较高的 CO_2 浓度会产生损害, 二氧化碳脱除设备可以利用活性炭吸附多余的 CO_2 , 再将吸附后的气体充入库房循环使用(郭晓光和管大勇2003), 减少损害发生。

1.2.2 动态人工气调技术

通过传感器能够监测环境中园艺产品的贮藏状况, 并能判断其是否受到低氧胁迫。动态气调(dynamic controlled atmosphere, DCA)技术的目的是达到园艺产品能承受的最低的氧气浓度, 同时避免无氧呼吸产生的危害(廖梓懿2021)。目前, 动态气调技术中使用的传感器有3种: 叶绿素荧光传感器、呼吸商传感器和乙醇传感器。叶绿素荧光传感器是检测叶绿素荧光参数值(chlorophyll fluorescence, CF), 来确定环境中是否存在低氧胁迫。 O_2 浓度升高降低了叶绿素荧光参数值, 可以缓解低氧胁迫(Prange等2002)。呼吸商传感器包括 CO_2 和 O_2 传感器, 通过检测 O_2 和 CO_2 浓度测定呼吸商(respiratory quotient, RQ), 来确定是否达到无氧呼吸临界点(Mditshwa 2018)。乙醇传感器是通过测定园艺产品的乙醇(ethanol, ET)含量, 检测无氧呼吸水平, 通过调节 O_2 浓度使乙醇浓度保持在一个安全的水平(廖梓懿2021)。基于这三种传感器, 动态气调技术可以分为3类: DCA-CF、DCA-RQ和DCA-ET。

2001年在荷兰鹿特丹的ISHS CA研讨会上首次提出将叶绿荧光应用于果蔬保鲜中, 并于2003—2004年在美国华盛顿州和意大利南蒂罗尔的储存季节首次被商业化采用(Prange等2013)。DCA-CF已在超过15个国家的1 200个储藏室中被商业化用于苹果和梨(Prange等2013)。DCA-CF能有效控制苹果表面烫伤(Mditshwa等2017), 维持苹果硬度(Zanella和Rossi 2015)。但是叶绿荧光参数受园艺产品成熟度影响植物衰老过程中叶绿素会降解。在切花菊中不同部位叶片的叶绿荧光变化也不同。

这些因素会导致DCA-CF对最低氧的估计产生偏差。

呼吸商传感器包括 CO_2 和 O_2 传感器, 分别用于感应园艺产品贮藏库中的 CO_2 和 O_2 , 来确定是否达到无氧呼吸临界点(Mditshwa 2018)。园艺产品呼吸正常时, 消耗的 O_2 与 CO_2 相等, RQ为1。氧气浓度超过厌氧补偿点, RQ会升高。在‘Granny Smith’苹果中发现DCA-RQ处理下果实内部乙醇浓度低, 表明在发酵损伤前能检测到低氧胁迫(Bessemans等2016)。RQ过高, 园艺产品的品质会下降, 到RQ 1.5时, 苹果果实硬度较高, 乙烯释放量低。但是到RQ 2.0时, 果实硬度与CK无显著差异。DCA-RQ受到温度影响较大, ‘Galaxy’苹果在DCA-RQ 1.3时温度上升 $0.5^{\circ}C$, 内源乙烯和乙醇含量降低, 果实硬度提高(Anese等2019)。

乙醇传感器能使园艺产品释放出乙醇含量, 检测其无氧呼吸水平, 然后通过调节 O_2 浓度使乙醇浓度保持在一个安全的水平(廖梓懿2021)。乙醇释放通常会出现在呼吸跃变之前, 以检测到乙醇为植物受到低氧胁迫的标准。乙醇是发酵产物, 但是被证明低浓度发酵乙醇对苹果无害, 在切花保鲜剂中也证明乙醇有一定保鲜效果(张燕宜等2020)。尽管已经被荷兰用于贮藏‘Elstar’苹果, 但目前对于DCA-ET研究依旧较少。

1.3 自发气调

自发气调包装(modified atmosphere packaging, MAP)技术是一种鲜切花包装技术, 包装袋中的 O_2 和 CO_2 浓度维持在一个适合贮藏的浓度。包装内气体浓度变化受两方面影响, 一方面来自植物自发呼吸; 另一方面由于包装材料具有透气性, 使内外气体间发生交换(张岩等2021), 形成的包装内气体变化过程如图2。自发气调包装又可分为被动自发气调包装和主动自发气调包装(员丽苹2019)。被动自发气调包装是通过植物自身呼吸降低 O_2 浓度。包装材料对 O_2 和 CO_2 有不同的透过率, 通过与外界气体发生交换来维持包装内部气体成分稳定(Soltani等2015)。主动自发气调是人为向气调包装中充入 CO_2 和 O_2 , 使气体浓度快速达到合适范围(Rodov等2007)。自发气调的关键是控制气调的参数, 即包装内 CO_2 和 O_2 的气体浓度。

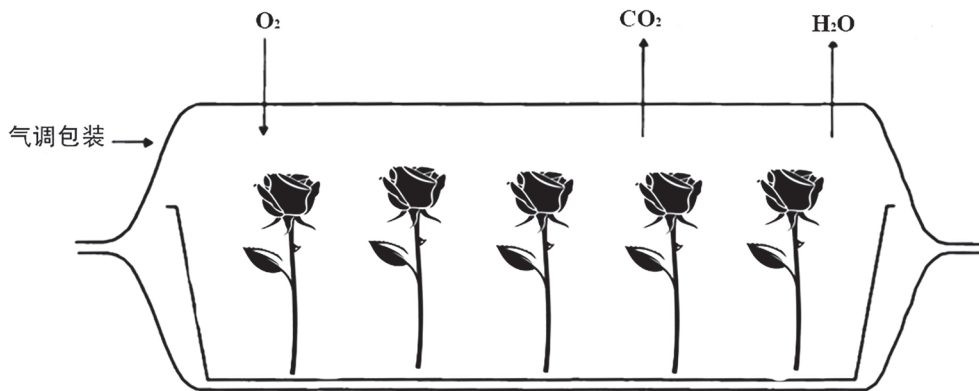


图2 气调包装及其内部的呼吸代谢过程

Fig. 2 Controlled atmosphere packaging and its internal respiratory metabolism process

本图改自 Soltani 等(2015)一文。

1.3.1 微孔气调包装

植物呼吸速率快, O_2 消耗快, 包装膜材料透气效果差, 容易形成低氧胁迫。需要包装中内外气体交换更快, 因此微孔气调包装自然成为合适的一种包装方式(胡红艳和卢立新2008)。微孔包装是自发气调保鲜的一种类型, 通过改变微孔参数调节包装内气体浓度变化, 建立更合适的 CO_2/O_2 浓度比(孝培培2016), 有利于降低环境湿度, 减少不利气体的积累, 从而达到延长保鲜期的目的。微孔气调体系中影响气体交换的因素可以分为2个方面: 一个是原本材料的透气性, 另一个与微孔参数有关。微孔气调可以通过改变微孔的数量孔径大小来适应植物不同的速率。呼吸微孔膜制备方法可分为5类: 无机填料高聚物拉伸技术、半结晶高聚物拉伸技术、机械穿孔技术、化学泡发技术和相分离技术(李家政2007)。鲜切榴莲用PET/PE复合膜包装, 发现微孔包装的果实硬度较无孔的更高(Boonthanakorn等2020)。微孔包装(microporous packaging, MPFP)处理的葡萄腐烂率低, 香气相关 $VvLOX$ 和 $VvHPV$ 基因上调。

1.3.2 微环境气调

随着气调技术逐渐成熟, 由于现阶段园艺产品保鲜水平不能满足需求, 因此在传统气调技术体系的基础上进行了改良。箱式气调是基于气调库和气调包装技术发展出的新气调方式。气调箱气密性优于保鲜膜自发气调包装, 且箱体结构坚

固便于冷链运输(李天元2016)。微环境气调就是从传统箱式气调基础上衍生的一种新型气调保鲜技术(张鹏等2020)。将挥发性气体引入气调保鲜中, 可以调控果蔬和切花采后生理, 解决品质劣化问题, 延长保鲜期(张鹏等2020)。这些可挥发气体都有相应的功能。1-甲基环丙烯(1-MCP)是一种有效的乙烯抑制剂, 它通过结合乙烯受体, 可以降低乙烯生成速率, 延缓园艺产品衰老(张鹏等2022)。另有研究表明适量的NO可以减轻褐化, 降低呼吸, 提高低温抗性(吴忠红2021)。 O_3 与 ClO_2 有较好的杀菌效果, 可以有效灭杀灰霉菌, 减少腐败(顾宁等2011; Admane等2018)。此外这些可挥发气体与传统的 O_2 和 CO_2 可以协同作用。其中1-MCP在鲜切花保鲜应用最多, 其通常被缓释为气体充入气调包装中。在月季采收后用 $10 \mu L \cdot L^{-1}$ 1-MCP处理能延长月季的瓶插寿命(Huang等2017)。同样1-MCP处理金鱼草、康乃馨和香水百合, 并结合气调包装能显著延长保鲜寿命(Kou等2012; Xue等2013)。

1.3.3 人工气调和自发气调比较

气调可以分为人工气调和自发气调。2种气调方式在生产中使用情况不同, 各有偏重, 无法相互替代。从贮藏应用、经济成本和运输应用三方面对比2种气调方式(表1)。

用人工气调优势在于完备的环境监测系统并监测到园艺产品状态, 例如通过检测呼吸商判断园艺产品是否处于低氧胁迫(Thewes等2019)。自

表1 2种气调方式比较
Table 1 Comparison of two controlled atmosphere methods

气调方法	气调贮藏应用	经济成本	国内运输应用
人工气调	气体监测系统完备,能及时调控 大宗产品长期贮藏	建造成本高; 管理人员综合素质要求高	气调集装箱
自发气调	暂时没有及时监测气体能力	成本低; 管理人员综合素质要求低	箱式气调包装

发气调在智能自发气调包装技术(陈昌杰2020)成熟之前还不能做到,但是自发气调包装在鲜切果蔬保鲜上有很广泛的应用(濮艳清2020)。

2种气调方式保鲜效果都优于普通冷藏保鲜,但是气调库的前期投入较高。建一座千吨级的气调库需要320~420万元左右,人工气调库通常推荐苹果、梨等气调技术完备,产销量大,整体进出的大宗产品(鲁墨森2003)。销售期长,不耐长期贮藏的园艺产品更加适合选用冷藏库配合自发气调包装的模式,这种模式更加经济。人工气调库管理也是一种成本,人工气调库管理团队需要掌握农业、制冷、特种气体制备和电子信息等相关领域的技术,根据不同的对象制定相配套的操作流程(徐庆磊2001)。这就导致了气调库在国内保鲜占比少,在陕西省气调库只占全部贮藏库的5.56%,而且面临气调库被当成机械冷库的情况(魏延安等2022)。自发气调库的管理就相对简单一点。

国内农产品运输主要依靠于公路和铁路运输,少量空运。我国冷链流通率最高为水产品(41%),果蔬最低只有22%(胡皓琼2022)。气调保鲜运输是基于冷链运输前提下,国内气调运输还很少。集装箱式气调库是移动气调发展的新趋势,国外已经有成熟的产品(张川2020),杨双桥等(2017)设计船用气调集装箱。但是气调集装箱依旧面临气调设备占空间太大、实际库容小的问题。宁波市农业科学研究院还开发杨梅气调保鲜箱,并且用于实际生产(蒋巧俊等2015),进一步改良有望实现杨梅72 h常规物流的跨省运销。

2 鲜切花气调影响因素

影响鲜切花气调的主要有温度、气体成分和气调包装材料3个方面因素。

2.1 温度对气调的影响

低温贮藏是最安全有效的保温方式,我国冷链物流发展很快,至2020年冷库面积达到了952.26 m²(闫国琦2021)。低温环境下,切花呼吸代谢水平降低,微生物活动受到抑制,贮藏时间有所延长(郭韬2012)。^{‘雪峰’和‘桃花飞雪’芍药从蕾期采下后放在2℃贮藏,可达60 d (王荣花等2006)。}

温度升高,气孔会逐渐张开,水分蒸腾加剧(苏文华和张光飞2002)。非洲菊贮藏温度升高5℃,鲜重损失率提高,瓶插期吸水率降低(Patel和Singh 2008)。在一定范围内,温度变化与呼吸速率呈正相关,温度升高呼吸速率加快,O₂消耗量增加,会引发无氧呼吸(张华俊等2003)。同样温度对膜材料的透气性有影响,温度越高,薄膜透气性越强(李霞等2010)。低温会对切花产生冷害,非洲菊在1℃下贮藏4 d,瓶插寿命减少50%(常大伟和谢晶2008)。气调贮藏能降低膜脂过氧化程度,减轻低温伤害(李云华2008)。

2.2 气体成分对气调的影响

气体成分是影响植物生长的因素之一,CO₂和O₂直接参与植物的代谢活动中。设施栽培中施CO₂气体肥能明显增加作物产量,马铃薯施1 800 μL·L⁻¹ CO₂肥后产量增加25.45%(杨小华等2019)。切花离开母体后,无法利用根系吸收养分,但是生命活动还在继续。为维持生命活动,切花通过有氧呼吸途径将有机物分解为水和CO₂,释放能量。

在气调保鲜中,普遍采取低浓度O₂和高浓度CO₂的组合。低氧可以抑制呼吸作用和好氧菌的生长,但O₂浓度过低会诱导无氧呼吸(周婧琦等2021)。无氧呼吸产生的乙醇、乙醛会对园艺产品产生毒害(张艳艳等2013; 章康艺等2021),且无法抑制厌氧菌繁殖(戚行江等2003)。因为低浓度O₂

气调会产生以上提及的弊端,所以科研工作者尝试研究在气调中使用高浓度O₂。1996年英国学者Day首次在鲜切水果中使用高氧气调包装(王生有2014)。高浓度的氧气同样会抑制呼吸,杨梅在纯氧下贮藏12 d后呼吸强度降低50%以上(Yang等2009)。并且高浓度氧气对抑制组织褐变有效,鲜切莴苣在80% O₂下贮藏10 d,导致多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活性下降和组织褐变(Heimdahl等1995)。在高浓度氧气环境中,葡萄柚、柠檬呼吸速率增加(Kader和Ben 2000)。

CO₂直接参与切花代谢活动,是光合作用重要的原料。高浓度CO₂能诱导气孔关闭,减少水分蒸发(Driesen等2020)。但是高浓度CO₂也被认为是产生褐变的原因之一,学界广泛认可自由基学说(王超2021)。也有研究发现在高浓度CO₂处理下,苹果表面会出现褐色斑点。在高浓度CO₂诱导的厌氧代谢中,会产生异味,影响园艺产品的感官品质。用20%的CO₂处理10 d,薄荷会产生明显的异味。

2.3 气调包装材料对气调的影响

在自发气调过程中也发现,气调包装材料对气调效果有影响。气调中常用的包装材料是石油基塑料材料,如聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)和聚乙烯(polyethylene, PE)等。硅橡胶材料、生物可降解材料、微孔薄膜材料这三类材料在气调中也有应用(董同力嘎等2020)。

影响气调效果的主要是材料的透气性。气调包装材料主要考虑氧气透过率(Oxygen transmittance, OTR)、CO₂透过率(CO₂ transmittance, CTR)和水蒸气透过率(water vapor transmittance, WTR),和不同材料的透气的比率。在5℃下用PP、高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)和低密度聚乙烯(LDPE) 3种不同包装气调贮藏非洲菊7 d, PP包装鲜重损失率最低,瓶插期吸水量最高为123 mL (Patel和Singh 2008)。但是石油基材料透气性较差,以最常用3种材料PVC、LDPE和PP。3种材料都选用50 μm厚度的包装, O₂透过率PVC>LDPE>PP, 最高为2 659.59 cm³·m⁻²·h⁻¹·MPa⁻¹; CO₂透过率PVC>LDPE>PP, 最高为16 223.54 cm³·m⁻²·h⁻¹·MPa⁻¹ (Murmu和Mishra 2017)。硅橡胶材料透气性好,对CO₂的透过性是PE的200倍左右,这利于排出过多的CO₂。

微孔膜的透气性更好,但是具体效果取决于微孔的孔径和数目。生物可降解材料是目前农业生产中的研究热门,一类是从植物中提取出的天然高分子材料;另一类是人工合成材料,如聚乳酸(poly-lactic acid, PLLA)、聚己内酯(polycaprolactone, PCL)和聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯(polybutylene adipate terephthalate, PBAT)等。生物可降解材料有很好的水蒸气透过率,有利于抑制微生物生长。PCL膜处理能够降低大叶菠菜的失重率(成培芳等2018)。生物可降解材料有良好的透水性,但生产成本低,因此未来多采用共聚或共混的工艺将其掺入其他材料中增强透水性。PLLA和PLC通过共聚法获得了兼具强度和透气性的材料,在草莓保鲜中使用复合材料比使用单一PLLA材料更晚发霉(李晓芳2017)。

气调包装的厚度会对气调效果产生影响,康乃馨用0.05和0.07 mm 2种不同厚度的PE包装,发现0.07 mm PE包装效果更好,贮藏时间可达56 d (Lee等2006)。

3 气调贮藏对鲜切花保鲜质量的影响

3.1 气调对鲜切花鲜重含量的影响

水分占鲜切花鲜重的70% (何生根1997)。切花失水的主要途径是蒸腾作用(林晓辉2019)。脱落酸(abscisic acid, ABA)能抑制切花气孔开放,100 μmol·L⁻¹ ABA处理后的气孔开放程度和失水率明显低于未处理组(Huang等2018)。对于观赏花卉鲜重降低是对其价值的巨大挑战,因为切花组织失水,会直接表现在外观上。切花严重失水会表现萎蔫,这意味着切花的实际观赏寿命即将结束(Dias等2017)。

气调保鲜能够抑制气孔开放,降低鲜重损失率。正常大气环境下金盏菊3 d内鲜重降低10%,10 d内降低30%。但是微孔膜包装的金盏菊最终只降低了7% (Fadda等2020)。不同气调处理间鲜重变化也不同,在5%的CO₂浓度下兰花鲜重30 d后降低13.67%。在10% CO₂的环境下兰花只能贮藏20 d,鲜重降低在18.92% (Poonsri 2021)。

3.2 气调对鲜切花花青素含量的影响

花色是切花最重要的观赏属性之一,植物花青素在组织中积累形成花色(陈叶清2017)。在很

多植物中低温可以诱导花青素的合成, 牡丹4℃下贮藏后花瓣花青素苷含量增加(牡丹妮等2016)。

在兰花气调30 d后, 花青素含量达到 $31.4 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (Poonsri 2021)。而在正常大气环境下第15天花青素含量下降到 $21.5 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。切花花青素含量变化受到乙烯影响, 乙烯能够促进葡萄的花青素积累(孙田雨2018), 但是在部分切花如矮牵牛、石斛兰和香石竹中却表现出抑制花青素积累。在乙烯处理后的牡丹中, 牡丹花青素合成相关基因*PsMYB2*、*PsWD40-1*、*PsWD40-2*、*PsbHLH1*和*PsbHLH3*相对表达量低, 花青素含量降低(高树林等2015)。气调能抑制乙烯合成, 在兰花气调贮藏期间, 与乙烯合成直接相关的ACC合酶和ACC氧化酶活性降低, 乙烯合成受到抑制(Poonsri 2020)。但也有花青素含量与乙烯生成呈正相关的情况。月季切花在喷施1-MCP和气调包装组合处理下, 比对照乙烯生成量高峰延后15 d出现, 且同一天花青素含量上升到达顶峰(Huang等2017)。

3.3 气调对鲜切花呼吸速率的影响

呼吸代谢是植物重要的代谢过程, 为采后切花生命活动提供能量。植物呼吸可分为有氧呼吸和无氧呼吸2种形式, 由低氧诱导的无氧呼吸会影响内含物质的含量(张艳艳等2013)。在向气调包装中充5 min 2个大气压的 CO_2 , 10 d后切花菊呈现腐烂(章康艺等2021)。

呼吸速率是反应呼吸代谢水平的指标之一。乙烯敏感型切花呈现与果实呼吸相似的呼吸跃变现象(高俊平等1997)。呼吸跃变通常出现在切花的盛开期, 呼吸速率快速升高。气调处理不能阻止呼吸跃变的出现, 只能延后呼吸高峰出现的时间, 抑制呼吸代谢水平。在气调处理后的兰花(Poonsri 2021)、百合(Akbudak等2005)和食用西葫芦花(Cefola等2015)中都表现出呼吸速率降低, 同时可以观察到呼吸速率升高延后。气调处理兰花后12 d内, 其呼吸速率稳定下降, 贮藏结束前出现上升, 相比对照呼吸速率上升延迟3 d (Poonsri 2021)。

3.4 气调对鲜切花真菌病害的影响

切花被真菌侵染后, 侵染的组织上会出现褐色的腐烂和灰色的霉层(韩洋琳等2021)。灰霉菌的孢子对低温有很强的适应能力, 普通的低温保

鲜法不能抑制孢子的生长和繁殖(张双艳等2019)。目前灰霉病的防治依旧是以化学药剂为主。 SO_2 在控制灰霉病上很有效, 商业上也大量采用贮藏前 SO_2 熏蒸方式。但是 SO_2 会造成空气污染, 并且连续使用杀菌剂会有灰霉菌抗药性提升、防治效果下降的风险, 欧美国家限制 SO_2 使用(Nigro等2006; Romanazzi等2012)。目前科研工作者们想要寻找一种绿色环保、有效的替代方法。高浓度 CO_2 熏蒸结合气调是一个可替代的方法。40% CO_2 熏蒸葡萄48 h后气调贮藏, 7周后灰霉病发病率从100%降到7.4% (Teles等2014)。^{‘雪崩’}月季在20% CO_2 气调处理后, 灰霉病的发病率显著低于对照组(Dias等2017)。高浓度 CO_2 环境下其他真菌生长也受到抑制, 在8% O_2 和10% CO_2 环境下樱桃上青霉菌生长受到抑制(Serradilla等2013)。在黄瓜上采用3% O_2 、7% CO_2 贮藏5 d内变形假单胞菌仅增加了 $0.48 \lg \text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ 少于对照5 d内的增长量 $1.46 \lg \text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ (魏亚博等2020)。

4 展望

气调是一项先进的技术, 为保鲜行业创造了一种绿色高效的保鲜方式。气调保鲜技术能够在具体的问题时替换传统不安全的保鲜方式, 例如 SO_2 熏蒸消毒被替换成了高浓度 CO_2 熏蒸结合气调保鲜。传统气调技术还有不完善的地方, 还需要和其他保鲜技术配合。现代气调更加智能化, 利用传感器技术可实时监控气调库中的温度、湿度和气体成分。但是其成本高, 能耗大, 部分地区气调库造价 $1.5 \text{万元}\cdot\text{m}^{-2}$ (刘新美和孙璐2020), 在国内气调库还未能大面积推广。但是电子商务和冷链物流兴起会带动气调库的推广与应用。气调领域的技术也在不断更新, 在原有气调中可以加入1-MCP、 ClO_2 、 O_3 (万永红2020)等。国内气调技术推广需要将专利成果转变为成熟的商品。面对不同鲜切花种类, 气调的温度、湿度和气体浓度都不相同的问题, 这还需要科研工作者的不断攻关。

在花卉保鲜中气调使用率远低于果蔬和大宗粮食作物。果蔬上的动态人工气调技术、微环境气调包装等最先进的气调保鲜技术还未在切花保鲜上大规模推广。目前气调技术也只在兰花、菊花、

月季、康乃馨等少部分花卉上使用。国内的鲜切花气调技术发展还需要引进国外相关的气调技术以及不断对切花气调工艺进行研究。在切花领域的气体技术多数还停留在研究最佳气体组分和自发气调包装的研究中。切花零售还依旧是切花销售的主体,小型气调库和气调包装是国内切花销售的最佳气调方式。气调技术配合切花零售还有不足,目前缺少一种适合放置在货架上的小型气调包装。这一技术在鲜切果蔬上有应用(梁惜雯2020),但切花上还缺少相关研究。月季、菊花、康乃馨等切花实现了周年供应、销路广。能够减少切花在运输过程中损耗的集装箱式气调库和箱式自发气调包装都很适合这类切花;类似芍药、牡丹等每年花期相对固定的切花需要建立气调库或者利用气调包装结合冷藏技术延长切花贮藏期,减少贮藏期的切花损耗。应对不同需求,箱式气调包装技术是都能满足切花运输和短期贮藏的要求。部分切花销售期长,无法做到整进整出,也不适合气调库贮藏,箱式气调包装每个都是独立的,入库出库都很方便,也能用于运输中。综上所述箱式气调包装更适合在大多数切花上推广。

参考文献(References)

- Admane N, Genovese F, Altieri G, et al (2018). Effect of ozone or carbon dioxide pre-treatment during long-term storage of organic table grapes with modified atmosphere packaging. *LWT-Food Sci Technol*, 98: 170–178
- Akbudak B, Eris A, Kucukahmetler O (2005). Normal and modified atmosphere packaging storage of lisianthus (*Lisianthus grandiflorum*) grown in saline conditions. *N Z J Crop Hortic*, 33 (2): 185–191
- Anese RD, Brackmann A, Wendt LM, et al (2019). Interaction of 1-methylcyclopropene, temperature and dynamic controlled atmosphere by respiratory quotient on 'Galaxy' apples storage. *Food Packag Shelf Life*, 20: 100246
- Beaudry RM (1999). Effect of O₂ and CO₂ partial pressure on selected phenomena affecting fruit and vegetable quality. *Postharvest Biol Technol*, 15 (3): 293–303
- Bessemans N, Verboven P, Verlinden BE, et al (2016). A novel type of dynamic controlled atmosphere storage based on the respiratory quotient (RQ-DCA). *Postharvest Biol Technol*, 115: 91–102
- Bishop C, Gash AJ, Mathas E, et al (2007). Use of modified packaging with cut flowers. *Acta Hortic*, 755: 515–518
- Boonthanakorn J, Daud W, Aontee A, et al (2020). Quality preservation of fresh-cut durian cv. 'Monthong' using micro-perforated PET/PE films. *Food Packag. Shelf Life*, 23: 100452
- Cai JY, Fang XJ, Han YC, et al (2022). Effect controlled atmosphere storage on postharvest preservation of Dongkui bayberry. *Acta Agric Zhejiangensis*, 34 (2): 352–359 (in Chinese with English abstract) [蔡继业, 房祥军, 韩延超等(2022). 气调贮藏对东魁杨梅品质的影响. *浙江农业学报*, 34 (2): 352–359]
- Cefola M, Amodio ML, Colelli G (2015). Extending postharvest life of ready-to-use zucchini flowers: effects of the atmosphere composition. *Acta Hortic*, 1141: 123–130
- Chang DW, Xie J (2008). Effects of cold storage on vase life of cut gerbera. *J Refrig*, 29 (1): 59–62 (in Chinese with English abstract) [常大伟, 谢晶(2008). 冷藏工艺对非洲菊切花瓶插寿命的影响. *制冷学报*, 29 (1): 59–62]
- Chen CJ (2020). Introduction of intelligent packaging. *Plast Packag*, 30 (1): 37–40 (in Chinese with English abstract) [陈昌杰(2020). 智能包装简介. *塑料包装*, 30 (1): 37–40]
- Chen XH (2010). Study on the storage of *Artemisia selen-gensis* by using MAP (modified atmosphere packing) with silicon gum film window (dissertation). Wuhan: Huazhong Agricultural University (in Chinese with English abstract) [陈小红(2010). 藜蒿硅窗气调保鲜研究(学位论文). 武汉: 华中农业大学]
- Chen YC (2011). Ultra-low oxygen modulated storage technology. *Xinjiang Farm Res Sci Technol*, 34 (6): 59 (in Chinese) [陈永春(2011). 超低氧气调贮藏技术. *新疆农垦科技*, 34 (6): 59]
- Chen YQ (2017). Clone, expression patterns of key structural genes in anthocyanin synthesis pathway of *NELUMBO NUCIFERA* (dissertation). Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese with English abstract) [陈叶清(2017). 荷花花青素苷合成关键结构基因的克隆及其时空表达模式研究(学位论文). 南京: 南京农业大学]
- Cheng C, Zhang HP, Sun JL (2005). Methods of fresh cut flowers preservation and utilization. *World Agric*, (7): 43–45 (in Chinese) [程诚, 张虎平, 孙军利(2005). 鲜切花保鲜利用的方法. *世界农业*, (7): 43–45]
- Cheng PF, Dong TLG, Chun Y, et al (2018). Effect of poly (ϵ -caprolactone) modified atmosphere packaging film on postharvest quality of spinach. *Food Mach*, 34 (2): 133–137 (in Chinese with English abstract) [成培芳, 董同力嘎, 春艳等(2018). 聚己内酯自发气调包装薄膜对菠菜贮藏品质的影响. *食品与机械*, 34 (2): 133–137]
- Deell JR, Lum GB, Ehsani-Moghaddam B (2016). Effects of multiple 1-methylcyclopropene treatments on apple fruit quality and disorders in controlled atmosphere storage.

- Postharvest Biol Technol, 111: 93–98
- Dias GM, Santos LG, Cia P, et al (2017). Controlled atmosphere and refrigerated storage in cut roses ‘Avalanche’. *Ornam Hortic*, 23 (3): 363–369
- Ding SD, Li YJ, Kong DQ (2019). The present situation of modern controlled atmosphere storage of fruits and vegetables. *China Fruit Veget*, 39 (12): 12–17 (in Chinese with English abstract) [丁树东, 李艳杰, 孔瑞琪(2019). 现代果蔬气调贮藏库及其应用现状. *中国果菜*, 39 (12): 12–17]
- Dong TLG, Zhang L, Hu J, et al (2020). Application and research progress of silicone rubber, biodegradable, and microporous materials in modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *J Innr Mongolia Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 41 (6): 96–100 (in Chinese with English abstract) [董同力嘎, 张靳, 胡健等(2020). 硅橡胶材料、生物可降解材料和微孔材料在果蔬气调保鲜中的应用与进展. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 41 (6): 96–100]
- Driesen E, Van den Ende W, De Proft M, et al (2020). Influence of environmental factors light, CO₂, temperature, and relative humidity on stomatal opening and development: a review. *Agron Sustainable Dev*, 10 (12): 1975
- Du DN, Zhang C, Gao SL, et al (2016). Effect of low temperature on flower color and anthocyanin biosynthesis in tree peony (*Paeonia suffruticosa*) ‘Luoyang Hong’ cut flower. *J Plant Genet Resour*, 17 (2): 295–302 (in Chinese with English abstract) [牡丹妮, 张超, 高树林等(2016). 低温对牡丹切花花色和花青素苷合成的影响. *植物遗传资源学报*, 17 (2): 295–302]
- Duan MH, Zhu JB (2013a). Practical technology of kiwifruit storage preservation (1)—problems existing in the Stor Proc. *Practic Technol Inform Fruit Trees*, 2013 (5): 43–44 (in Chinese) [段眉会, 朱建斌(2013a). 猕猴桃贮藏保鲜实用技术(一)——贮藏过程中存在的问题. *果树实用技术与信息*, 2013 (5): 43–44]
- Duan MH, Zhu JB (2013b). Kiwifruit storage and preservation technology (3)—plastic tent artificial air conditioning storage. *Practic Technol Inform Fruit Trees*, 2013 (9): 40–43 (in Chinese) [段眉会, 朱建斌(2013b). 猕猴桃贮藏保鲜实用技术(三)——塑料大帐人工气调贮藏. *果树实用技术与信息*, 2013 (9): 40–43]
- Fadda A, Palma A, Azara E, et al (2020). Effect of modified atmosphere packaging on overall appearance and nutritional quality of pot marigold held at 5°C. *Food Res Int*, 134: 109248
- Gao JP, Zhang XH, Hang MJ, et al (1997). Ethylene changes in cut rose during flowering and senescence agent. *Acta Hortic Sin*, (3): 69–73 (in Chinese) [高俊平, 张晓红, 黄绵佳等(1997). 月季切花开花和衰老进程中乙烯变化类型初探. *园艺学报*, (3): 69–73]
- Gao SL, Zhang C, Du DN (2015). Effect of glucose and ethylene on flower color and anthocyanin biosynthesis in tree peony ‘Luoyanghong’ cut flower. *Acta Hortic Sin*, 42 (7): 1356–1366 (in Chinese with English abstract) [高树林, 张超, 牡丹妮等(2015). 乙烯和葡萄糖处理对‘洛阳红’牡丹切花花色和花青素苷合成的影响. *园艺学报*, 42 (7): 1356–1366]
- Gu N, Hu SQ, Chi ZC, et al (2011). Study on inactivation of inoculated rot of pathogens on grape and preservation by chlorine dioxide gas. *Food Res Dev*, 32 (10): 148–151 (in Chinese with English abstract) [顾宁, 胡双启, 池致超等(2011). 气体ClO₂对葡萄致腐菌的杀菌及保鲜效果研究. *食品研究与开发*, 32 (10): 148–151]
- Guan WQ, Hu YF, Li XH (2003). Controlled and modified atmosphere storage of fresh fruit and vegetable. *Stor Proc*, (6): 3–5 (in Chinese with English abstract) [关文强, 胡云峰, 李喜宏(2003). 果蔬气调贮藏研究与应用进展. *保鲜与加工*, (6): 3–5]
- Guo T (2012). Study on fresh-keeping of cut gerbera flower and measurements of physiological index (dissertation). Changsha: Hunan Agricultural University (in Chinese with English abstract) [郭韬(2012). 非洲菊低温贮藏保鲜及部分生理指标的测定(学位论文). 长沙: 湖南农业大学]
- Guo XG (2001). Brief introduction of fresh-keeping warehouse and supporting equipment for fruit and vegetable. *Shanxi Fruits*, (1): 31–32 (in Chinese) [郭晓光(2001). 果蔬气调保鲜库及配套设备简介. *山西果树*, (1): 31–32]
- Guo XG, Guan DY (2003). CA Storage room and CA storage equipment. *China Fruit Veget*, (3): 25–26 (in Chinese with English abstract) [郭晓光, 管大勇(2003). 气调库及气调库设备. *中国果菜*, (3): 25–26]
- Guo YL (2019). Effects of silicon window air conditioning film combination with different preservatives on the quality of fresh garlic during storage (dissertation). Jinzhong, Shanxi: Shanxi Agricultural University (in Chinese with English abstract) [郭媛丽(2019). 硅窗气调膜结合不同保鲜剂对鲜蒜贮藏期间品质的影响(学位论文). 山西晋中: 山西农业大学]
- Han YL, Li SS, Yuan WB, et al (2021). Identification of pathogenicity and fungicide resistance of *Botrytis cinerea* on rose in Yunnan. *J South Agric*, 52 (9): 2489–24976 (in Chinese with English abstract) [韩洋琳, 李思思, 袁文斌等(2021). 云南地区月季灰霉菌致病力及抗药性鉴定. *南方农业学报*, 52 (9): 2489–2497]
- He SG (1997). The physiological and biochemical basis of cut flowers. *Plant Physiol Commun*, (1): 66–70 (in Chinese with English abstract) [何生根(1997). 切花品质的生理生化基础. *植物生理学通讯*, (1): 66–70]
- Heimdal H, Kühn BF, Poll L, et al (1995). Biochemical chang-

- es and sensory quality of shredded and MA-packaged iceberg lettuce. *J Food Sci Tech Mys*, 60 (6): 1265–1268
- Hu HQ (2022). China's cold chain logistics industry "counterattack" the way. *China Shipp Gazette*, (37): 28–30 (in Chinese) [胡皓琼(2022). 我国冷链物流业的“逆袭”之道. *中国航务周刊*, (37): 28–30]
- Hu HS (2002). Study on automatic control system of sir-conditioned fresh storage (dissertation). Hefei: Anhui Agricultural University (in Chinese with English abstract) [胡红生(2002). 气调保鲜贮藏库自动控制系统的研究(学位论文). 合肥: 安徽农业大学]
- Hu HY, Lu LX (2008). Design of modified-atmosphere package with micro-hole film for fruits and vegetables. *Packag Eng*, 29: 171–173 (in Chinese with English abstract) [胡红艳, 卢立新(2008). 微孔膜果蔬气调包装设计方法研究. *包装工程*, 29: 171–173]
- Huang S, Gong B, Wei F (2017). Pre-harvest 1-methylcyclopropene application affects post-harvest physiology and storage life of the cut rose cv. Carola. *Hortic Environ Biotechnol*, 58: 144–151
- Huang X, Lin S, He S, et al (2018). Characterization of stomata on floral organs and scapes of cut 'Real' gerberas and their involvement in postharvest water loss. *Postharvest Biol Technol*, 142: 39–45
- Huang ZX (2013). Composition and application of controlled atmosphere cold storage. *J Changzhou Coll Inf Technol*, 12: 27–29 (in Chinese with English abstract) [黄仲兴(2013). 气调保鲜冷库之构成及其应用. *常州信息职业技术学院学报*, 12: 27–29]
- Ji JX, Chen K, Li YL, et al (2021). Effect of fresh-cut flower preservative on bottle life of rose. *Contemp Hortic*, 44: 48–50 (in Chinese) [纪佳慧, 陈凯, 李漪琳等(2021). 鲜切花保鲜剂对月季瓶插寿命的影响. *现代园艺*, 44: 48–50]
- Jiang QJ, Zheng YH, Xu J, et al (2015). Research progress on gas storage and transport packaging of Chinese bayberry fruit. *Food Mach*, 31: 261–265 (in Chinese with English abstract) [蒋巧俊, 郑永华, 徐静等(2015). 杨梅气调贮藏及运输包装研究进展. *食品与机械*, 31: 261–265]
- Jouki M, Khazaei N (2013). Effects of low-dose gamma-irradiation and modified atmosphere packaging on shelf-life and quality characteristics of saffron (*Crocus sativus* Linn) in Iran. *Food Sci Biot*, 22: 687–690
- Kader AA, Ben YS (2000). Effects of superatmospheric oxygen levels on postharvest physiology and quality of fresh fruits and vegetables. *Postharvest Biol Technol*, 20: 1–13
- Kou L, Turner ER, Luo YG (2012). Extending the shelf life of edible flowers with controlled release of 1-methylcyclopropene and modified atmosphere packaging. *J Food Sci*, 77: S188–S193
- Lee KM, Kim DJ, Nam YK (2006). Extending storage period of cut carnation desio using different plastic films through modified atmosphere packaging. *Flower Res J*, 14: 75–80
- Li F, Zhu JF (2020). Study on fresh-keeping technology of cut flowers. *Rural Econ Sci-Technol*, 31: 70–71 (in Chinese) [李芬, 祝剑峰(2020). 切花保鲜技术研究. *农村经济与科技*, 31: 70–71]
- Li JZ (2007). Preparation method and application of micro-porous films for preservation of agricultural products. *Stor Proc*, 7: 25–27 (in Chinese with English abstract) [李家政(2007). 微孔保鲜膜制备方法与应用. *保鲜与加工*, 7: 25–27]
- Li TY (2016). The study on storage microenvironment gas regulation of fesh-keeping on berry (dissertation). Dalian, Liaoning: Dalian Polytechnic University [李天元(2016). 贮藏微环境气体调控保鲜浆果的技术研究(学位论文). 辽宁大连: 大连工业大学]
- Li X, Wang XY, Wang J (2010). Effects of temperature on gas permeability of films for modified atmosphere packaging. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 41: 113–116 (in Chinese with English abstract) [李霞, 王相友, 王娟(2010). 温度对气调包装薄膜透气性的影响. *农业机械学报*, 41: 113–116]
- Li XF (2017). The regulation on gas permeability of poly (L-lactic acid) based on equilibrium modified atmosphere packaging of strawberry (dissertation). Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University (in Chinese with English abstract) [李晓芳(2017). 基于草莓自发气调包装的聚乳酸薄膜的气体透过性的调节(学位论文). 呼和浩特: 内蒙古农业大学]
- Li Y (2021). Investigation and analysis on the management and consumption of cut flowers in Xi'an (dissertation). Xianyang, Shanxi: Northwest A&F University (in Chinese with English abstract) [李莹(2021). 西安市切花经营与消费现状调查与分析(学位论文). 陕西咸阳: 西北农林科技大学]
- Li YH (2008). Effect of MAP, IW and Harpin on chilling injury of plum fruit and its partial mechanism (dissertation). Lanzhou: Gansu Agricultural University (in Chinese with English abstract) [李云华(2008). 限气包装、间歇升温 and Harpin 浸泡对李果实冷害的影响及部分机理(学位论文). 兰州: 甘肃农业大学]
- Liang XW, Gu ST, Jiang AL, et al (2020). Research progress in application of modified atmosphere packaging in freshcut fruits and vegetables. *Packag Eng*, 41: 8–13 (in Chinese with English abstract) [梁惜雯, 顾思彤, 姜爱丽等(2020). 自发气调在鲜切果蔬包装中的应用研究进展. *包装工程*, 41: 8–13]
- Liao ZY (2021). Study on dynamic controlled atmosphere preservation technology of 'CuiXiang' Kiwifruit (dissertation).

- tation). Xianyang, Shanxi: Northwest A&F University (in Chinese with English abstract) [廖梓懿(2021). ‘翠香’猕猴桃大帐动态气调保鲜技术研究(学位论文). 陕西咸阳: 西北农林科技大学]
- Lin XH (2019). Characterization of stomata in cut carnations and their responses to light (dissertation). Guzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering (in Chinese with English abstract) [林晓辉(2019). 香石竹切花的气孔特征及其光响应研究(学位论文). 广州: 仲恺农业工程学院]
- Liu HD (2008). Technique of saving energy and reducing consumption of modified-atmosphere warehouse. *Stor Proc*, (4): 56 (in Chinese with English abstract) [刘海东(2008). 气调库节能降耗的途径. *保鲜与加工*, (4): 56]
- Liu XM, Sun L (2020). Development status and prospect of controlled atmosphere storage. *Chin Fruit Veget*, 40: 10–13 (in Chinese with English abstract) [刘新美, 孙璐(2020). 我国气调贮藏技术在果蔬上的应用现状及展望. *中国果菜*, 40: 10–13]
- Lu MS (2003). Selection and construction technology of cold storage and air conditioning storage. *Agric Knowl*, (17): 48–49 (in Chinese) [鲁墨森(2003). 冷库与气调库的选建技术. *农业知识*, (17): 48–49]
- Lu MS, Wang SZ (2005). Construction and application of flexible air conditioning depot. *Deciduous Fruits*, (2): 34–36 (in Chinese) [鲁墨森, 王淑贞(2005). 柔性气调库的建造和应用. *落叶果树*, (2): 34–36]
- Mditshwa A (2018). Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apples-A review. *Food Packag Shelf Life*, 16: 59–68
- Mditshwa A, Fawole OA, Vries F, et al (2017). Repeated application of dynamic controlled atmospheres reduced superficial scald incidence in ‘Granny Smith’ apples. *Sci Hortic*, 220: 168–175
- Murmu SB, Mishra HN (2017). Engineering evaluation of thickness and type of packaging materials based on the modified atmosphere packaging requirements of guava (Cv. Baruipur). *Lwt-Food Sci Technol*, 78: 273–280
- Nigro F, Schena L, Ligorio A (2006). Control of table grape storage rots by pre-harvest applications of salts. *Postharvest Biol Technol*, 42: 142–149
- Ning MY, Shi JY, Wang Q (2020). Effect of ozone combined with low temperature self-conditioning packaging on storage quality of oyster mushroom. *North Hortic*, (21): 80–85 (in Chinese) [宁明岸, 史君彦, 王清(2020). 臭氧结合低温自发气调包装对平菇贮藏品质的影响. *北方园艺*, (21): 80–85]
- Patel T, Singh A (2009). Effect of different modified atmosphere packaging (MAP) films and cold storage temperatures (5, 10 and 15°C) on keeping quality of gerbera (*Gerbera jamesonii*) flowers. *Acta Hortic*, 847: 353–358
- Poirier BC, Mattheis JP, Rudell DR (2020). Extending ‘Granny Smith’ apple superficial scald control following long-term ultra-low oxygen controlled atmosphere storage. *Postharvest Biol Technol*, 161: 111062
- Poonsri W (2020). Effect of modified and controlled atmosphere storage on enzyme activity and senescence of *Dendrobium* orchids. *Heliyon*, 6: e05070
- Poonsri W (2021). Effects of high CO₂ and low O₂ on biochemical changes in cut *Dendrobium* orchids. *Heliyon*, 7: e06126
- Prange RK, DeLong JM, Leyte JC, et al (2002). Oxygen concentration affects chlorophyll fluorescence in chlorophyll-containing fruit. *Postharvest Biol Technol*, 24: 201–205
- Prange RK, Wright AH, DeLong JM, et al (2013). History, current situation and future prospects for dynamic controlled atmosphere (DCA) storage of fruits and vegetables, using chlorophyll fluorescence. *Acta Hortic*, 1012: 905–915
- Pu YQ (2020). Research on high-quality short-term fresh-keeping packaging technology of fresh-cut fruits and vegetables (dissertation). Wuxi, Jiangsu: Jiangnan University (in Chinese with English abstract) [濮艳清(2020). 鲜切果蔬高品质短期保鲜包装工艺研究(学位论文). 江苏无锡: 江南大学]
- Qi XJ, Wang LP, Liang SM, et al (2003). Study on the mycoflora in bayberry (*Myrica rubra*) fruits treated by controlled atmosphere storage. *Acta Agric Zhejiangensis*, 15: 30–32 (in Chinese with English abstract) [戚行江, 王连平, 梁森苗等(2003). 杨梅气调贮藏保鲜后果实真菌区系研究. *浙江农业学报*, 15: 30–32]
- Rodov V, Horev B, Goldman G, et al (2007). Model-driven development of microperforated active modified-atmosphere packaging for fresh-cut produce. *Acta Hortic*, 746: 83–88
- Romanazzi G, Lichter A, Gabler FM, et al (2012). Recent advances on the use of natural and safe alternatives to conventional methods to control postharvest gray mold of table grapes. *Postharvest Biol Technol*, 63: 141–147
- Serradilla MJ, del Carmen Villalobos M, Hernández A, et al (2013). Study of microbiological quality of controlled atmosphere packaged ‘Ambrunés’ sweet cherries and subsequent shelf-life. *Int J Food Microbiol*, 166: 85–92
- Shen L, Liu Y (2009). The principle and application of an atmosphere-controlled storage room. *Logist Technol*, 28: 225–226 (in Chinese with English abstract) [沈丽, 刘艳(2009). 气调库原理与应用. *物流技术*, 28: 225–226]
- Soltani M, Alimardani R, Mobli H, et al (2015). Modified atmosphere packaging: a progressive technology for shelf-

- life extension of fruits and vegetables. *J Appl Packag Res*, 7: 2
- Song CH, Zheng XC, Liu YQ (2018). Study on silicon window controlled atmosphere storage Fuji apple. *J Agric Univ Hebei*, 41: 64–69 (in Chinese with English abstract) [宋春华, 郑学超, 刘亚琼等(2018). 富士苹果硅窗气调贮藏保鲜研究. *河北农业大学学报*, 41: 64–69]
- Su GT, Wang SR (2011). Automatic control system of carbon dioxide and oxygen concentrations in air conditioned storehouse. *Packag Food Mach*, 29: 68, 69–71 [(in Chinese with English abstract) [宿广汀, 王素荣(2011). 气调库中二氧化碳和氧气浓度的自动控制系统. *包装与食品机械*, 29: 68, 69–1]
- Su WH, Zhang GF (2002). The effect of soil and air temperature on photosynthesis and transpiration of *Primula sinopurpurea*. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 22: 824–830 (in Chinese with English abstract) [苏文华, 张光飞(2002). 土壤温度与气温对紫花雪山报春光合作用和蒸腾作用的影响. *西北植物学报*, 22: 824–830]
- Sun TY (2018). The mechanism underlying the regulation of ABA on grape coloring via ethylene and sugar signaling (dissertation). Tai'an, Shangdong: Shandong Agricultural University (in Chinese with English abstract) [孙田雨(2018). ABA通过乙烯和糖信号调控葡萄着色的机理(学位论文). 山东泰安: 山东农业大学]
- Sun XN (2019). Development and application of odified atmosphere packing bags with silicon rubber window of fresh-cut vegetables (dissertation). Taian, Shangdong: Shandong Agricultural University (in Chinese with English abstract) [孙晓娜(2019). 四种鲜切蔬菜硅窗自发电调包装袋研制及应用研究(学位论文). 山东泰安: 山东农业大学]
- Teles CS, Benedetti BC, Gubler WD (2014). Prestorage application of high carbon dioxide combined with controlled atmosphere storage as a dual approach to control *Botrytis cinerea* in organic 'Flame Seedless' and 'Crimson Seedless' table grapes. *Postharvest Biol Technol*, 89: 32–39
- Thewes FR, Brackmann A, Neuwald DA (2019). Dynamics of sugars, anaerobic metabolism enzymes and metabolites in apples stored under dynamic controlled atmosphere. *Sci Hortic*, 255: 145–152
- Wan YH (2020). Study on shelf-keeping effect of CO₂ gas regulator combined with ClO₂ on broccoli (dissertation). Shenyang: Shenyang Agricultural University (in Chinese with English abstract) [万永红(2020). CO₂气体调节剂结合ClO₂对西兰花常温保鲜效果的研究(学位论文). 沈阳: 沈阳农业大学]
- Wang C (2021). Effects of low O₂ and high CO₂ treatment on postharvest browning of Hanfu and Golden delicious apples (dissertation). Jinzhou, Liaoning: Bohai University (in Chinese with English abstract) [王超(2021). 低O₂、高CO₂处理对寒富和金冠苹果采后贮藏褐变的影响(学位论文). 辽宁锦州: 渤海大学]
- Wang RH, Zhao HJ, Pang RQ, et al (2006). Effects of low temperature storage on senescence physiology of cut flowers of *Paeonifloria lactiflora*. *J Northwest A&F Univ (Nat Sci Ed)*, 34: 55–59, 68 (in Chinese with English abstract) [王荣花, 赵海军, 庞冉琦等(2006). 低温贮藏对芍药切花衰老生理的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 34: 55–59, 68]
- Wang SY (2014). Effects of high O₂ atmospheric packaging on postharvest physiology and quality in pitayas (dissertation). Nanchang, Jiangxi: Jiangxi Agricultural University (in Chinese with English abstract) [王生有(2014). 高氧气调包装对火龙果采后生理及品质的影响(学位论文). 江西南昌: 江西农业大学]
- Wang X, Zhang GQ, Liu CX, et al (2021). Ozone combined with modified atmosphere packaging on fresh-keeping effects of fresh-cut green asparagus. *Acta Agric Shanghai*, 37: 118–122 (in Chinese with English abstract) [王晓, 张国强, 刘晨霞等(2021). 臭氧结合气调保鲜鲜切绿芦笋的研究. *上海农业学报*, 37: 118–122]
- Wang YN (2021). Summary of main types of fresh cut flowers and their preservation techniques. *Contemp Hortic*, 44: 191–193 (in Chinese with English abstract) [王一楠(2021). 鲜切花主要种类及其保鲜技术综述. *现代园艺*, 44: 191–193]
- Wang YS (2016). Microenvironment atmosphere box on research of sweet cherry and mango preservation effect (dissertation). Shenyang: Shenyang Agricultural University [王云舒(2016). 微环境气调箱对甜樱桃和芒果保鲜效果的研究(学位论文). 沈阳: 沈阳农业大学]
- Wei YA, Yang JW, Pang YL (2022). Investigation and thinking on fruit storage industry in Shaanxi province. *Chin Fruit Veget*, 42: 78–84 (in Chinese with English abstract) [魏延安, 杨建伟, 庞玉荣(2022). 陕西省果品贮藏业发展现状及对策分析. *中国果菜*, 42: 78–84]
- Wei YB, Zheng YY, Zhao XY, et al (2020). Effect of controlled atmosphere storage on the quality of fresh-cut cucumber and inhibition on *Pseudomonas plecoglossicida*. *Food Ferment Ind*, 46: 180–186 (in Chinese with English abstract) [魏亚博, 郑鄢燕, 赵晓燕等(2020). 气调箱贮藏对鲜切黄瓜品质的影响及对假单胞菌的抑制作用. *食品与发酵工业*, 46: 180–186]
- Wu XL, Li XM, Zhou XT (2021). Application of air conditioning packaging technology in food packaging. *Agric Sci Technol Equip*, (6): 86–87 (in Chinese with English abstract) [吴宪玲, 李晓敏, 周雪婷(2021). 气调包装技术在食品包装中的应用. *农业科技与装备*, (6): 86–87]
- Wu ZH (2021). Mechanism of NO delaying rachis browning

- of grape postharvest storage based on RNA-seq technique (dissertation). Shihezi, Xinjiang: Shihezi University (in Chinese with English abstract) [吴忠红(2021). 基于RNA-seq技术解析NO延缓葡萄果梗采后褐变的作用机理(学位论文). 新疆石河子: 石河子大学]
- Xiao PP (2016). Application of micro-perforated film on the packaging of fruits and vegetables which are resistance to CO₂ (dissertation). Tianjin: Tianjin University of Science and Technology (in Chinese with English abstract) [孝培培(2016). 微孔包装膜在三种耐二氧化碳果蔬保鲜上的应用(学位论文). 天津: 天津科技大学]
- Xu QL (2001). The present situation and some problems should be paid attention to during construction of gas adjusted storehouse in our country. *Refrig Air-Cond*, 1: 12–13 (in Chinese) [徐庆磊(2001). 我国气调库建设的现状及建设气调库时应注意的几个问题. 制冷与空调, 1: 12–13]
- Xue WW, Suh JK, Li HW (2013). Effects of modified atmosphere packaging and storage conditions on freshness maintenance of cut flowers of oriental lily ‘Activa’. *Acta Horti*, 1002: 381–387
- Yan GQ (2021). Analysis on the development status and countermeasures of cold chain logistics in China. *Logist Eng Manage*, 43: 36–38 (in Chinese with English abstract) [闫国琦(2021). 我国冷链物流的发展现状及对策分析. 物流工程与管理, 43: 36–38]
- Yang SQ, Yu XR, Ma LJ, et al (2017). Design method of the controlled atmosphere container for shipment. *Ship Sci Technol*, 39: 82–86 (in Chinese with English abstract) [杨双桥, 于献榕, 马丽君等(2017). 船舶用气调保鲜集装箱的设计. 舰船科学技术, 39: 82–86]
- Yang XH, Wu J, Chen GX, et al (2019). Effects of increasing application CO₂ on potato tuber yield and dry matter under three-film mulching cultivation. *Shandong Agric Sci*, 51: 98–101 (in Chinese with English abstract) [杨小华, 吴静, 陈广侠等(2019). 增施CO₂对马铃薯三膜覆盖栽培块茎产量和干物重的影响. 山东农业科学, 51: 98–101]
- Yang XZ, Wang D, Wu MY, et al (2020). Effect of pre-cooling combined with silicon gum film modified atmosphere packaging on storage quality of blueberry. *Chin Fruits*, (2): 49–52 (in Chinese with English abstract) [杨相政, 王达, 吴茂玉等(2020). 预冷结合硅窗气调包装对蓝莓贮藏期品质的影响. 中国果树, (2): 49–52]
- Yang ZF, Zheng YH, Cao SF (2009). Effect of high oxygen atmosphere storage on quality, antioxidant enzymes, and DPPH-radical scavenging activity of chinese bayberry fruit. *J Agric Food Chem*, 57: 176–181
- Yin L, Liu YQ, Li DW (2018). Effect of critical ice temperature combined with silicon window on Yali pear storage. *Food Sci Technol*, 43: 33–37 (in Chinese with English abstract) [殷磊, 刘亚琼, 李大伟等(2018). 鸭梨临界冰温硅窗气调贮藏保鲜品质研究. 食品科技, 43: 33–37]
- Yuan LP (2019). Effects of O₂/CO₂ active modified atmospheres packaging on quality of garlic bolts (dissertation). Zibo, Shangdong: Shandong University of Technology (in Chinese with English abstract) [员丽苹(2019). O₂/CO₂主动自发气调对蒜薹保鲜效果的影响(学位论文). 山东淄博: 山东理工大学]
- Zanella A, Rossi O (2015). Post-harvest retention of apple fruit firmness by 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment or dynamic CA storage with chlorophyll fluorescence (DCA-CF). *Eur J Horti Sci*, 80: 11–17
- Zhang C, Liu ZY, Si CQ (2020). Research and discussion on controlled atmosphere refrigerated device with moving functions for storing fruit and vegetable. *J Refrig Technol*, 43: 12–16 (in Chinese with English abstract) [张川, 刘忠宇, 司春强(2020). 移动式果蔬气调冷藏装置的研发探讨. 冷藏技术, 43: 12–16]
- Zhang HJ, Yang CQ, Liu Y (2003). Summarizing of refrigerating system on air-adjust storeroom and air-adjust store. *Low Temp Spec Gases*, 21: 6–9 (in Chinese with English abstract) [张华俊, 严彩球, 刘勇等(2003). 气调贮藏及气调库制冷系统综述. 低温与特气, 21: 6–9]
- Zhang KY, Yu S, Lou TT (2021). Effect of cold storage and carbon dioxide on cut chrysanthemum. *Hortic Seed*, 41: 22–25 (in Chinese with English abstract) [章康艺, 余莎, 楼恬恬等(2021). 冷藏充二氧化碳对切花菊的影响. 园艺与种苗, 41: 22–25]
- Zhang P, Yu HT, Li CY, et al (2022). Effects of micro-environmental atmosphere on the quality of blueberries based on the principal component analysis. *Food Ferment Ind*, 48: 186–194 (in Chinese with English abstract) [张鹏, 于弘弢, 李春媛等(2022). 基于主成分分析的微环境气调对蓝莓贮藏后货架品质的影响. 食品与发酵工业, 48: 186–194]
- Zhang P, Zhu WY, Li JK (2020). Research progress of micro-environment gas regulation in preservation of fruits and vegetables. *Packag Eng*, 41: 1–10, 239 (in Chinese with English abstract) [张鹏, 朱文月, 李江阔等(2020). 微环境气体调控在果蔬保鲜中的研究进展. 包装工程, 41: 1–10, 239]
- Zhang SY, Meng J, Han YL, et al (2019). Isolation and identification of gray mold pathogens on roses in Yunnan area. *J Zhejiang Univ (Agric Life Sci)*, 45: 692–698 (in Chinese with English abstract) [张双艳, 孟静, 韩洋琳等(2019). 云南地区月季灰霉病原菌的分离鉴定. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 45: 692–698]
- Zhang XL (2000). Several ways of atmosphere control in CA cold storage. *Packag Food Mach*, 18: 33–34 (in Chinese

- with English abstract) [张晓兰(2000). 气调库中的几种气调方法. 包装与食品机械, 18: 33–34]
- Zhang Y, Lu FF, Zhang HY, et al (2021). Research progress on respiratory rate in spontaneous modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *J Food Saf Qual*, 12: 7105–7111 (in Chinese with English abstract) [张岩, 卢芳芳, 张海燕等(2021). 果蔬自发气调包装中呼吸速率研究进展. 食品安全质量检测学报, 12: 7105–7111]
- Zhang YY, Chen K, Yu N (2013). Influence of different concentrations of CO₂ and O₂ treatments on anaerobic respiration metabolism from Hami jujube. *Sci Technol Food Ind*, 34: 315–318, 323 (in Chinese with English abstract) [张艳艳, 陈恺, 于宁(2013). 不同浓度CO₂及O₂处理对哈密大枣无氧呼吸代谢的影响. 食品工业科技, 34: 315–318, 323]
- Zhang YY, Chen MY, Huang YP, et al (2020). Effect of different concentration of ethanol on *Dianthus japonicus* cut flowers. *Southeast Hortic*, 8: 7–12 (in Chinese with English abstract) [张燕宜, 陈敏怡, 黄燕平等(2020). 不同浓度乙醇对日本石竹切花的保鲜效果. 东南园艺, 8: 7–12]
- Zhao M, Wang L, Li C, et al (2010). Study on ice-temperature CA storage of Red Fuji Apple. *Stor Proc*, 10: 46–50 (in Chinese with English abstract) [赵猛, 王亮, 李超等(2010). 冰温气调对红富士苹果贮藏效果的影响. 保鲜与加工, 10: 46–50]
- Zhao XD, Fu DQ, Li Y (2015). Effect of O₃ treatment combined with atmosphere control (CA) on the storage quality of strawberry. *Food Sci Technol*, 40: 24–28 (in Chinese with English abstract) [赵晓丹, 傅达奇, 李莹(2015). 臭氧结合气调冷藏对草莓保鲜品质的影响. 食品科技, 40: 24–28]
- Zhou HL (2001). Study on the development of air-conditioned storage. *North Hortic*, (5): 31–34 (in Chinese with English abstract) [周会玲(2001). 气调贮藏发展的研究. 北方园艺, (5): 31–34]
- Zhou JQ, Xu J, Che YH, et al (2021). Effects of composite modified atmosphere packaging on anaerobic respiration metabolism of garlic bulbs. *Stor Proc*, 21: 22–27 (in Chinese with English abstract) [周婧琦, 许建, 车玉红等(2021). 复合气调包装对大蒜鳞茎无氧呼吸代谢的影响. 保鲜与加工, 21: 22–27]
- Zhuang XZ (1994). Research on fresh-keeping method of fresh litchi transported North in Tang Dynasty. *Southwest Hortic*, (3): 17–19 (in Chinese with English abstract) [庄虚之(1994). 唐代北运鲜荔枝的保鲜方法考证. 四川果树, (3): 17–9]