

马佳佳, 孙灵湘, 黄桂丽, 等. 采后流通温度对精品包装苏州青感官及内在品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(1): 218-228.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.01.025

采后流通温度对精品包装苏州青感官及内在品质的影响

马佳佳, 孙灵湘, 黄桂丽, 全鑫瑶, 隋思瑶, 王毓宁

(江苏太湖地区农业科学研究所, 江苏 苏州 215105)

摘要: 为进一步明确采后流通影响精品包装叶菜品质的温度和关键环节, 以苏州青为试验对象, 模拟产地处理→贮藏/流通→配送末端→货架的流通过程, 研究苏州青在流通过程中呼吸代谢、外观、质地、风味、滋味及营养物质含量的变化。结果表明, 与常温(20.0℃)流通相比, 低温(5.0℃)流通抑制了苏州青的总呼吸速率与糖酵解途径(Embden-Meyerhof-Parnas, EMP)、三羧酸循环(Tricarboxylic acid cycle, TCA)途径的呼吸速率, 保持了其苦味、涩味, 并具有较高的甜味氨基酸含量增幅, 延缓了其组织剪切力、咸味的上升及叶绿素含量的损失。综合分析可知, EMP途径是苏州青模拟流通条件下的呼吸主路径, 各呼吸代谢路径对流通温度存在差异化响应, 货架1d是总呼吸以及EMP、TCA途径呼吸的转折点, 流通贮藏是影响苏州青剪切力和整体挥发性气味的重要环节。真空预冷环节可以延缓苏州青质地变化, 也会造成叶绿素a损失。研究结果可为精品包装苏州青的流通温度控制提供理论依据和数据支撑。

关键词: 温度; 流通环节; 苏州青; 品质

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)01-0218-11

Effect of postharvest circulation temperature on sensory and internal qualities of boutique packaging pakchoi

MA Jia-jia, SUN Ling-xiang, HUANG Gui-li, QUAN Xin-yao, SUI Si-yao, WANG Yu-ning

(Taihu Research Institute of Agricultural Sciences, Suzhou 215105, China)

Abstract: In order to further clarify the temperature and key links of postharvest circulation affecting the qualities of high-quality packaged leafy vegetables, this study took pakchoi as the experimental object to simulate the circulation procedure including origin treatment, storage/circulation, distribution end and shelf. The changes of respiratory metabolism, appearance, texture, flavor, taste and nutrient content of pakchoi during circulation were studied. The results showed that compared with normal temperature (20.0℃) circulation, low temperature (5.0℃) circulation inhibited respiration rates of the total pathway, embden-meyerhof-parnas (EMP) pathway and tricarboxylic acid cycle (TCA) pathway of pakchoi, maintained the bitterness, astringency and higher sweet amino acid growth rate of pakchoi, and delayed the rise of tissue shear force, saltiness and the loss of chlorophyll. Comprehensive analysis showed that EMP was the main respiratory pathway of pakchoi under simulated circulation conditions. Each respiratory metabolic pathway had differential response to circulation temperature. The first shelf day was the turning point of total respiration pathway, EMP pathway and TCA pathway. The circulation storage was an important link affecting the shear force and overall volatile odor of pakchoi. The vacuum precooling ring could delay the texture change of pakchoi, but it

would cause a certain loss of chlorophyll a. These results can provide a theoretical basis and data support for the temperature control of circulation mode in boutique packaging pakchoi.

Key words: temperature; circulation link; pakchoi; quality

收稿日期: 2022-05-10

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(20)1008]; 江苏省农业重大技术协同推广计划项目(2021-ZYXT-02-3); 苏州市农业科学院基金项目(21010)

作者简介: 马佳佳(1989-), 女, 江苏启东人, 硕士, 助理研究员, 研究方向为农产品加工及贮藏工程。(E-mail) mjj20120326@163.com

通讯作者: 王毓宁, (E-mail) wyn705@163.com

苏州青(*Brassica chinensis* L.)为青梗型不结球

白菜的一个主要种类,其品质优良,色绿鲜嫩,口感软糯,含有丰富的维生素和矿物质等营养物质,作为长江中下游地区春夏季蔬菜市场供应的叶菜品种之一^[1],苏州青也是苏南地区市民餐桌上不可或缺的叶菜。苏州青叶片面积大,植株含水量高,呼吸和蒸腾作用强,在高温季节种植的苏州青从采收到流通过程中易出现叶片萎蔫、脱帮、黄化、腐烂等外形和感官问题^[2],随之带来的是营养品质下降等问题。此外,由于叶菜生产具有较强的生产地域性和季节性,同时运输过程中冷链普及率低,导致采后货架期较短。因此,在实际生产过程中,如何做好采收-流通-销售环节的保鲜技术衔接工作,对提升叶菜贮运品质、减少采后损耗具有决定性作用。

流通环境温度及流通时长对叶菜的货架品质有较大影响^[3],但是流通过程与品质变化之间的关系并未完全被揭示。真空预冷能有效抑制青菜感官品质的下降^[4],具有减缓总叶绿素含量损失和呼吸速率变化、缓解腐烂等作用,在小苣荬、西兰花、菜用大豆等作物上的应用效果明显^[5]。微孔包装通过改变孔的数量,弹性调节气体中水蒸气的渗透量以减少营养物质的损耗,从而延长果蔬的保鲜期,在果蔬领域是一种保持新鲜的技术^[6-7],适用于呼吸速率较大的鲜切耐二氧化碳果蔬^[8-9]的保鲜,贮藏有效期可达 50 d^[10]。目前,关于冷链流通过程中温度变化对水产品的影响有较多研究^[11],国外主要研究鲜切蔬菜在冷链流通过程中品质及微生物生长的变化^[12],关于整个流通过程中温度控制对绿叶菜品质的影响尚鲜见系统的研究。

本研究拟模拟苏州青的产地处理→贮藏/流通→配送末端→货架的流通过程,分析温度、流通环节与苏州青品质变化间的相关性。通过对其流通过程中不同途径呼吸速率、感官指标、营养指标进行测定,研究采后苏州青感官品质和内在品质的变化规律,分析采后生理代谢与营养成分变化之间的关系,旨在找出流通过程中影响叶菜品质的关键环节,以期对苏州青采后的商品化处理提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

苏州青于 2021 年 6 月下旬在苏州市吴中区临湖镇生产基地采收,并于采收后 0.5 h 内运至实验室内,

挑选大小均一、无黄叶和病虫害的植株作为试验材料。

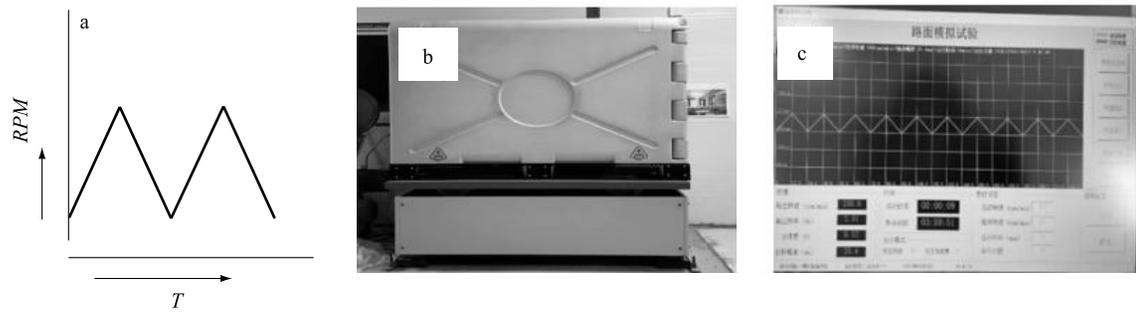
95%乙醇、氟化钠、丙二酸、磷酸三钠均为分析纯,产自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

CR400 色差仪,产自日本柯尼卡美能达公司;TMS-PRO 质构仪,产自美国 FTC 公司;Checkmate3 顶空气体分析仪,产自丹麦 Mocon 公司;PEN3 电子鼻,产自德国 AIRSENSE 公司;TU-1900 紫外分光光度计,产自北京普析通用仪器有限责任公司;ZX-LZ-03 模拟振动平台,产自济南展新有限公司;VCE-10 真空预冷机,产自上海锦立保鲜科技有限公司;Oxytherm+R 液相氧电极,产自英国汉莎科技集团有限公司;LA8080 全自动氨基酸分析仪,产自日本日立公司;SA402B 味觉分析系统,产自日本 INSENT 公司。

1.3 材料处理

试验分 2 批进行,分别为常温 $[(20.0\pm 0.5)^\circ\text{C}]$ 流通和低温 $[(5.0\pm 0.5)^\circ\text{C}]$ 流通。每批苏州青的处理量为 10 kg,模拟“产地处理(真空预冷)→流通贮藏→精品包装→配送末端→货架”的流通过程。常温流通的具体设置:苏州青从产地采收后运至配送中心,运输过程中的参数参照平台自带的模拟路面试验软件设置,其中启动转速为 150 r/min,结束转速为 200 r/min,输出功率为 2.51~3.29 Hz,加速度为 0.32~0.57 g,路程时间设计为 6 h,运行时间为 36 min,运行次数为 10 次,操作装备和程序如图 1 所示。运输结束后,于次日上午将苏州青贮藏于恒温箱(25 $^\circ\text{C}$)内,然后进行精品包装,包装材料规格为 30 cm \times 25 cm,包装容量为 (250 ± 2) g,包装材质为双向拉伸的聚丙烯微孔防雾袋(厚度为 25 μm),膜的 O_2 、 CO_2 渗透系数分别为 $453.68 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})$ 、 $1\ 515.45 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})$,微孔孔径约为 140 μm ,孔数为 4 个。完成包装后由配送中心运至消费端,运输过程的参数同上,路程时间设计为 4 h,运行时间为 24 min,运行次数为 10 次。到达消费端后保证货架存放时间为 2 d,贮藏期、货架期与流通期的温度保持一致。低温流通的具体设置:产地采收苏州青后先进行真空预冷,参数参考安容慧等^[4]的报道,其中初始温度设为 23~24 $^\circ\text{C}$,终了温度设为 7.0 $^\circ\text{C}$,为了阻止水分损失,补水量设为 5%,运行时间设为 20 min。除流通温度外,其余程序与参数同常温流通。在每个流通环节结束后取样测定。



a:路面模拟测试模式(T 表示时间, RPM 表示转速);b:模拟运输试验台装备;c:模拟路面试验操作界面。

图1 模拟运输试验装备与操作界面

Fig.1 Simulated transport test equipment and operation interface

1.4 测定指标及方法

1.4.1 总呼吸速率与各呼吸途径呼吸速率的测定

参考潘俨等^[13-14]的方法,将叶片切成大小为3 mm×3 mm的叶块后,称取0.25 g放入氧电极仪的反应室内,加入2 ml饱和蒸馏水,反应温度设为(25.0±0.1)℃,再分别加入100 μl 10 mmol/L NaF、100 μl 50 mmol/L丙二酸、100 μl 10 mmol/L Na₃PO₄作为糖酵解(EMP)、三羧酸循环(TCA)、磷酸戊糖(PPP)途径的专一性抑制剂。每次先测定总呼吸速率(反应时间为5 min),然后分别加入抑制剂(均为1 min)测定剩余呼吸速率,被抑制呼吸速率=基础呼吸速率-剩余呼吸速率,单位为nmol/(g·min),每个流通环节测定3次,取其平均值。

1.4.2 剪切力的测定 每个流通环节均选取10株样品,每株样品去除4张叶片,参考孙灵湘等^[15]的测定方法,在剪切模式下,测定速度设为30 mm/min,用切刀探头在根茎端自下往上去除叶片的位置进行切断,所得剪切力即为苏州青的最大剪切力,取其平均值。

1.4.3 外观色泽的测定 每个流通环节均选取10张叶片,用经白板校准后的色差计进行测量,测量孔避开主叶脉,读取叶片的红绿值(a^*),取平均值。

1.4.4 整体挥发性风味的测定 称取50 g样品(整株)于1 L烧杯中,于25℃覆膜密封60 min,待测。手动进样,采样间隔为1 s,微调时间为10 s,预采样时间为5 s,清洗时间为60 s,数据采集时间为60 s,数据采集流量为300 ml/min。每个流通环节设3个平行,取传感器在54~56 s时获得的稳定信号进行分析。

1.4.5 滋味指标(苦味、涩味、鲜味、咸味及回味)的测定 味觉测试参照文献^[16]的方法,样品前处理方法:取20 g样品(整株),加入60 ml蒸馏水,榨汁

45 s后过滤待测。电子舌检测条件:用30 mmol/L KCl与0.3 mmol/L酒石酸溶液配成Reference溶液(人工唾液)作为参比溶液。将传感器置于参比溶液中归零30 s,随后开始进行味觉指标的测定,测试时间为30 s,测试完毕后用参比溶液清洗3 s,再次进行测试。每个样品重复测定4次,取后3次的结果作为测试结果。

1.4.6 叶绿素a、叶绿素b、叶黄素和类胡萝卜素含量的测定 参考安容慧等^[4]的方法,其中叶绿素提取过程略有改动。称取0.25 g叶片样品,加入10 ml 95%乙醇,避光常温浸提24 h,过滤后取上清液待测。

1.4.7 游离氨基酸含量的测定 参考GB 5009.124-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》,将叶片冻样送至欧陆分析技术服务(苏州)有限公司进行检测,16种游离氨基酸含量均采用酸水解法测定。

1.5 数据处理

用Excel 2010整理试验数据和绘图,测定数据用“平均值±标准差”表示,用SAS 9.4统计分析软件对结果进行数据统计和方差分析(ANOVA),用Duncan's多重比较法进行显著性分析。主成分分析(Principal component analysis, PCA)由电子鼻自带的软件进行。

2 结果与分析

2.1 采后流通温度对苏州青微孔包装内气体含量的影响

对精品包装后处于配送期至货架期的苏州青微孔包装内的气体含量进行监测,由表1可以看出,在20.0℃流通温度下,苏州青在货架存放1 d时微孔包装内的O₂、CO₂含量高于配送结束时和在货架存

放 2 d 时微孔包装内的 O₂、CO₂ 含量,此时包装内 O₂ 与 CO₂ 的体积比接近 1 : 1;苏州青在货架存放 2 d 时,包装内形成低氧量、高二氧化碳含量的微环境, O₂ 含量与 CO₂ 含量尚未达到平衡。在 5.0 °C 流通温度下,苏州青在配送后包装袋内的 O₂、CO₂ 含量高于货架期的 O₂、CO₂ 含量,货架存放 1 d、2 d 的 O₂、CO₂ 含量变化不显著。流通结束后, O₂ 的消耗量和 CO₂ 的积累量是常温流通的 1/3 左右。

表 1 5.0 °C、20.0 °C 流通温度下货架环节苏州青包装内 CO₂ 和 O₂ 气体含量

Table 1 The contents of CO₂ and O₂ in packaging during distribution and shelf at 5.0 °C and 20.0 °C

时间	20.0 °C 时的气体含量 (%)		5.0 °C 时的气体含量 (%)	
	O ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂
配送前	20.90±0a	0d	20.90±0a	0d
配送结束	16.57±0.12b	3.10±0.14c	17.68±0.17b	2.38±0.13c
货架存放 1 d	9.97±0.30c	8.27±0.17b	15.63±0.40c	3.95±0.23b
货架存放 2 d	3.29±0.15d	12.63±0.15a	15.66±1.34c	4.40±0.80a

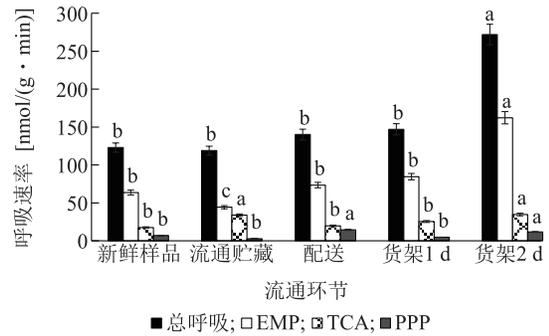
同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 采后流通温度对苏州青总呼吸速率以及 EMP、TCA、PPP 途径呼吸速率的影响

呼吸是一个复杂的能量代谢过程,调控途径包括糖酵解、三羧酸循环主路径以及磷酸戊糖途径等支路径^[13]。由图 2、图 3 可以看出,苏州青的总呼吸和糖酵解途径呼吸对于不同流通环节的响应变化明显,呼吸速率排序为总呼吸>糖酵解途径呼吸>三羧酸循环途径呼吸>磷酸戊糖途径呼吸。

由图 2 可以看出,在 20.0 °C 流通温度下,流通过程中苏州青各呼吸代谢途径的呼吸速率总体呈上升趋势。在货架存放 2 d 时,总呼吸以及 EMP、TCA、PPP 途径的呼吸速率均升高,分别为新鲜样品的 2.2 倍、2.5 倍、2.0 倍、1.7 倍,且多数显著 ($P < 0.05$) 高于其他流通过程。植物叶片的呼吸趋势与跃变型果实的相似之处是会出现呼吸高峰^[17],这与侯建设等^[18]研究得出的小白菜在采后第 4 d 出现呼吸高峰并进入衰老阶段的时间点一致。

由图 3 可以看出,进入流通过程后,苏州青总呼吸和 EMP 途径的呼吸速率呈波动下降趋势,TCA 途径的呼吸速率先上升后下降,PPP 途径的呼吸速率处于缓慢上升趋势;苏州青货架存放 2 d 时,总呼吸、EMP 途径的呼吸速率显著 ($P < 0.05$) 低于其他流通环

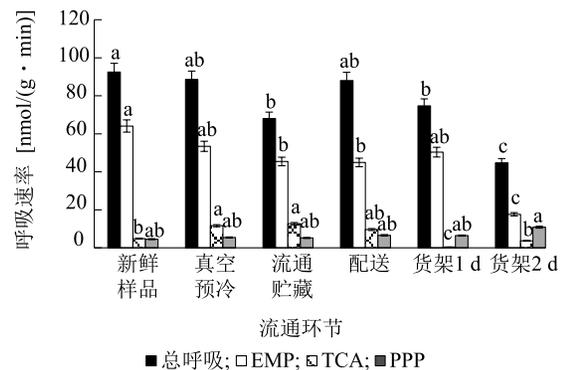


同一途径的不同流通环节对应的柱上标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。EMP:糖酵解途径呼吸;TCA:三羧酸循环呼吸;PPP:磷酸戊糖途径呼吸。

图 2 20.0 °C 流通温度下不同流通环节苏州青总呼吸、糖酵解途径、三羧酸循环、磷酸戊糖途径呼吸速率的变化

Fig.2 Changes of respiratory rate of total respiration pathway, embden-meyerhof-parnas (EMP) pathway, tricarboxylic acid cycle (TCA) pathway and pentose phosphate pathway (PPP) of pakchoi in different circulation links at 20.0 °C

节,TCA 途径的呼吸速率低于真空预冷、流通贮藏环节,PPP 途径的呼吸速率高于其他流通环节的呼吸速率,此时总呼吸、EMP 途径、TCA 途径的呼吸速率分别降至新鲜样品的 48.4%、27.5%、76.2%。



同一途径的不同流通环节对应的柱上标有不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。EMP:糖酵解途径呼吸;TCA:三羧酸循环呼吸;PPP:磷酸戊糖途径呼吸。

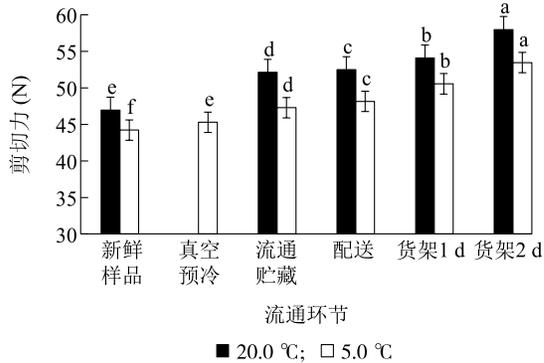
图 3 5.0 °C 流通温度下不同流通环节苏州青总呼吸与糖酵解途径、三羧酸循环、磷酸戊糖途径呼吸速率的变化

Fig.3 Changes of respiratory rate of total respiration pathway, embden-meyerhof-parnas (EMP) pathway, tricarboxylic acid cycle (TCA) pathway and pentose phosphate pathway (PPP) of pakchoi in different circulation links at 5.0 °C

2.3 采后流通温度对苏州青剪切力的影响

萎蔫和质地特性的丧失是绿叶菜变质的表现之

一,剪切力是衡量叶菜新鲜度的指标之一^[15]。由图4可以看出,随着流通的进行,苏州青的剪切力总体呈升高趋势。相较于新鲜样品,苏州青在20.0℃流通温度下流通贮藏期、配送期、货架1 d、货架2 d的剪切力增幅分别为11.0%、11.8%、15.2%、23.5%,在5℃流通温度下真空预冷期、流通贮藏期、配送期、货架1 d、货架2 d的剪切力增幅分别为2.4%、6.9%、8.9%、14.3%、20.9%。苏州青的剪切力在不同流通环节之间的差异显著($P < 0.05$),流通贮藏环节是常温与低温流通背景下苏州青剪切力增幅最大的环节,而且通过真空预冷环节,明显延缓了苏州青组织剪切力的增加,保持了组织的质地和嫩度。



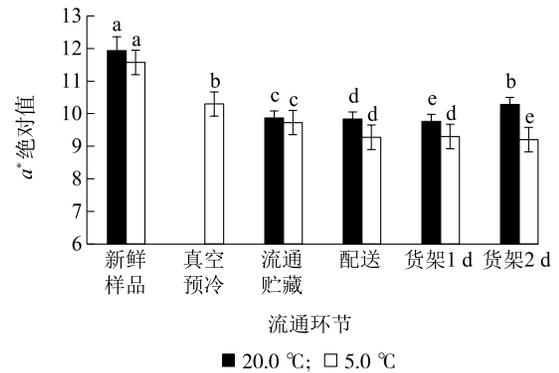
同一温度、不同流通环节对应的柱上标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图4 20.0℃和5.0℃流通温度下流通环节苏州青剪切力的变化

Fig.4 Change of shear force of pakchoi in circulation at 5.0 °C and 20.0 °C

2.4 采后流通温度对苏州青外观色泽 a^* 的影响

色差仪中的 a^* 即红绿值,其绝对值越大,表明叶片的颜色越绿,外观色泽的保持效果越好。由图5可以看出,在20.0℃流通温度下,苏州青叶片的 a^* 随着流通过程的推进先表现出下降趋势,流通贮藏期、配送期、货架1 d、货架2 d时的 a^* 与新鲜样品比降幅依次是17.1%、17.4%、18.0%、13.6%,在货架存放2 d a^* 出现上升趋势,可能与包装袋内 CO_2 含量增加相关。在5.0℃流通温度下,苏州青叶片的 a^* 处于下降趋势,与新鲜样品相比,真空预冷期、流通贮藏期、配送期、货架1 d、货架2 d时的下降幅依次是11.0%、15.9%、19.8%、19.6%、20.5%。不同环节之间苏州青叶片的 a^* 绝对值整体表现出显著差异($P < 0.05$)。从配送环节至货架存放2 d,5.0℃流通温度下的 a^* 损失率高于20.0℃流通温度,可能与预冷后叶片失水有关。



同一温度、不同流通环节对应的柱上标有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

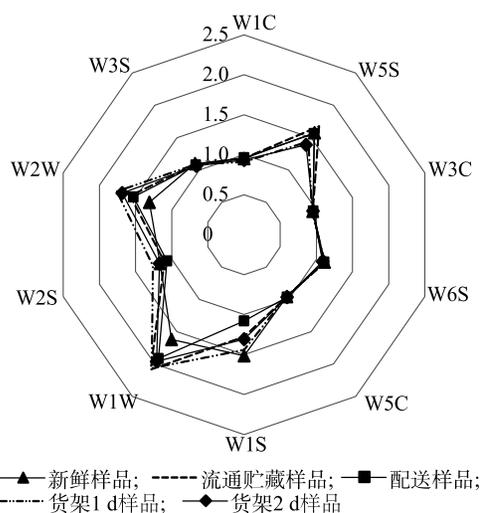
图5 20.0℃和5.0℃流通温度下流通环节苏州青叶片 a^* 的变化

Fig.5 Change of a^* value of pakchoi in circulation at 5.0 °C and 20.0 °C

2.5 采后流通温度对苏州青整体挥发性气味的影响

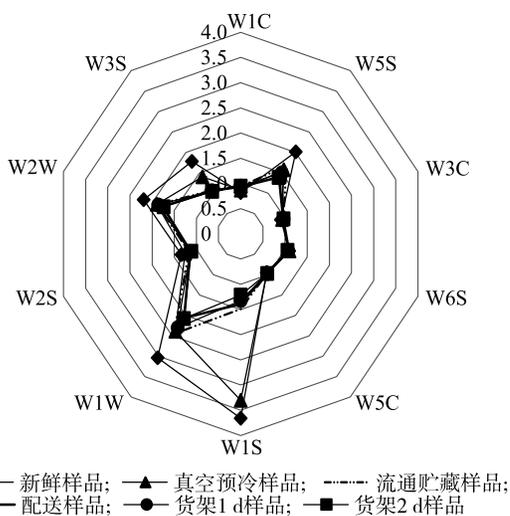
如图6、图7所示,在20.0℃和5.0℃流通温度下,所有样品的W1C、W3C、W5C传感器的响应值小于1.0,其他7种传感器的响应值均高于1.0。不同流通过程中响应值变化较为明显的传感器集中在W5S(对氮氧化物灵敏)、W1S(对甲烷灵敏)、W1W(对硫化物灵敏)和W2W[对有机硫化物(芳香成分)灵敏]。在20.0℃流通过程后,样品的W5S、W1S传感器响应值分别比新鲜样品降低了11.9%、13.6%,W1W、W2W传感器的响应值分别比新鲜样品升高了21.0%、28.7%。在5.0℃流通过程后,样品的W5S、W1S、W1W、W2W传感器响应值均比新鲜样品降低,分别降低了31.3%、66.7%、31.7%、20.6%,由此可见,在5.0℃流通过程后苏州青的风味释放明显受到抑制。

作为一种多元统计分析技术,主成分分析已被广泛应用于农产品品质差异分析中^[19]。电子鼻通过对苏州青中挥发性成分的分析,能够预测不同流通过程的差异。由图8、图9可以看出,20.0℃流通温度下的主成分贡献率为85.0%,5.0℃流通温度下的主成分贡献率为99.3%,能够充分反映样品的整体信息,不同流通过程的差异主要体现在第1主成分上。图8中在20.0℃流通温度下,新鲜样品和货架1 d的样品对应的区域部分重叠,说明整体风味存在共性,不能有效区分差异;在5.0℃流通温度下,苏州青样品无交叉地分布在不同区域,说明经过不同流通过程后,苏州青的挥发性组分发生了较大



W1C:对芳香成分灵敏;W5S:对氮氧化合物灵敏;W3C:对氨基和芳香成分灵敏;W6S:对氢化物灵敏;W5C:对短链烷烃芳香成分灵敏;W1S:对甲烷灵敏;W1W:对硫化物灵敏;W2S:对乙醇灵敏;W2W:对芳香成分和有机硫化物灵敏;W3S:对烷烃灵敏。数据为10个传感器的响应值。

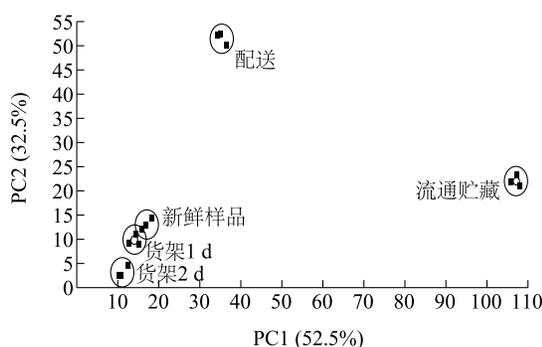
图6 20.0 °C流通温度下流通环节苏州青的整体挥发性气味
 Fig.6 Overall volatile odor of pakchoi in circulation at 20.0 °C



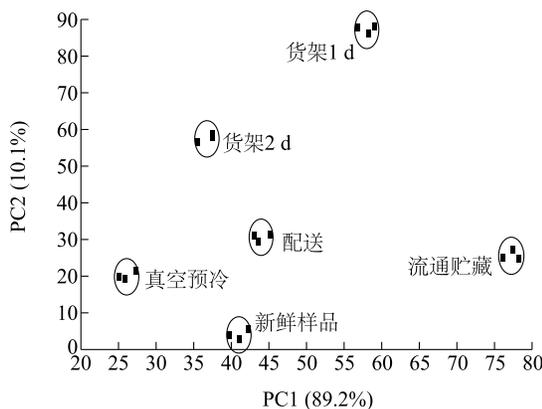
W1C:对芳香成分灵敏;W5S:对氮氧化合物灵敏;W3C:对氨基和芳香成分灵敏;W6S:对氢化物灵敏;W5C:对短链烷烃芳香成分灵敏;W1S:对甲烷灵敏;W1W:对硫化物灵敏;W2S:对乙醇灵敏;W2W:对芳香成分和有机硫化物灵敏;W3S:对烷烃灵敏。数据为10个传感器的响应值。

图7 5.0 °C流通温度下流通环节苏州青的整体挥发性气味
 Fig.7 Overall volatile odor of pakchoi in circulation at 5.0 °C

差异。PCA结果显示,5个环节中流通贮藏环节明显地与其他流通环节区分开,由此判定流通贮藏环节是影响苏州青风味的重要环节。



PC1:主成分1;PC2:主成分2。
 图8 20.0 °C流通温度下苏州青风味的主成分分析结果
 Fig.8 Principal component analysis of pakchoi flavor in circulation at 20.0 °C



PC1:主成分1;PC2:主成分2。
 图9 5.0 °C流通温度下苏州青风味的主成分分析结果
 Fig.9 Principal component analysis of pakchoi flavor in circulation at 5.0 °C

2.6 采后流通温度对苏州青滋味特征的影响

利用电子舌系统评价 20.0 °C、5.0 °C 流通温度下苏州青样品之间的滋味特征差异。如表 2 所示,与新鲜样品相比,20.0 °C 流通温度下的苏州青滋味指标发生明显改变,其滋味指标在流通前后有显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 差异,流通后鲜味、苦味、涩味、苦味回味、涩味回味与流通前相比降幅依次是 7.2%、42.1%、55.9%、58.3%、67.3%,咸味提高了 50.9%。在 5 °C 流通温度下,苏州青的滋味指标变化幅度小,只有鲜味在流通后与流通前相比降低了 15.5%,与新鲜样品有显著差异 ($P<0.05$)。可以看出,低温流通保持了苏州青的苦味、涩味,延缓了咸味的上升,而常温流通对苏州青鲜味的保留效果优于低温流通。

表2 苏州青在流通后的滋味特征变化

Table 2 Changes in taste characteristics of pakchoi after circulation

滋味指标	无味点	20.0 °C 常温流通		5.0 °C 低温流通	
		流通前	流通后	流通前	流通后
苦味	0	10.88±0	6.30±0.14 **	5.27±0.18	5.26±0.18
涩味	0	7.23±0	3.19±0.12 **	2.54±0.15	2.52±0.14
苦味回味	0	5.15±0	2.15±0.14 **	2.02±0.22	2.13±0.21
涩味回味	0	3.33±0	1.09±0.11 **	0.95±0.11	0.96±0.11
鲜味	0	6.43±0	5.97±0.00 *	4.71±0.03	3.98±0.03 *
丰富性	0	12.57±0	11.51±0.02 *	11.82±0.06	11.82±0.10
咸味	-6	9.70±0	14.64±0.02 **	23.35±0.02	23.34±0.02

无味点指参比溶液的输出值,咸味的无味点为-6。*、** 分别表示相同流通温度下流通后与流通前相比差异显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$)。

2.7 采后流通温度对苏州青叶绿素 a、叶绿素 b、叶黄素和类胡萝卜素含量的影响

叶绿素降解、叶片黄化是最明显的绿叶菜衰老特征,保持叶绿素的含量水平是保持苏州青感官品质的直接方法^[10]。绿叶菜的外观绿色主要由脂溶性色素呈现,包括叶绿素类、类胡萝卜素类化合物。叶绿素 a、b 是植物叶绿素循环中的 2 个重要产物^[20]。绿叶蔬菜富含叶黄素,不仅是一种天然的抗氧化剂,而且具有多种生物活性功能^[21]。由图 10、图 11 可以看出,不同流通温度下苏州青叶片中的叶绿素 a 含量显著($P<0.05$)高于叶绿素 b、类胡萝卜素与叶黄素含量。由图 10 可以看出,与新鲜样品相比,流通结束后 20.0 °C 流通温度下的苏州青叶片叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、叶黄素含量的降幅分别是 19.3%、28.0%、22.8%、24.0%。在货架存放 2 d 后,苏州青叶片中的 4 种脂溶性色素含量均出现了上升,与外观变化一致。叶片叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、叶黄素含量在不同流通环节间表现出显著差异($P<0.05$),各流通环节的总含量排序为货架存放 2 d>流通贮藏>配送>货架存放 1 d。

由图 11 可以看出,在 5.0 °C 流通温度下,与新鲜样品相比,流通结束后苏州青叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、叶黄素含量的损失率依次为 11.5%、8.7%、10.7%、18.7%,与常温流通相比,低温流通明显抑制了叶绿素类、类胡萝卜素类化合物的降解,与刘玉军等^[22]的研究结果(4 °C 条件可有效延缓生菜、油麦菜和茼蒿等植物叶绿素的降解和叶片的黄化)一致。苏州青叶片中的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素与叶黄素含量在 5.0 °C 低温流通下各流通环节的排序大致表现为流通贮藏>配送和

货架>真空预冷,由色素含量的变化趋势看出,真空预冷环节加快了叶绿素 a 的降解。

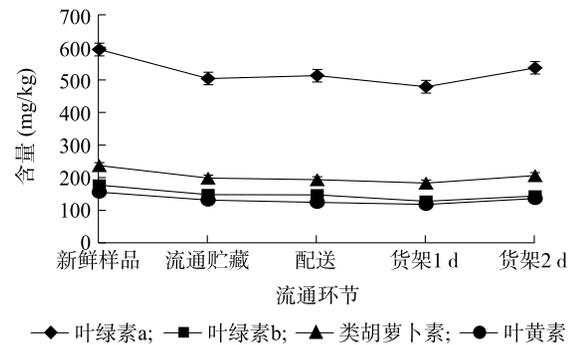


图 10 20.0 °C 流通温度下流通环节苏州青叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶黄素和类胡萝卜素含量的变化

Fig.10 Changes of the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, lutein and carotenoid of pakchoi in circulation at 20.0 °C

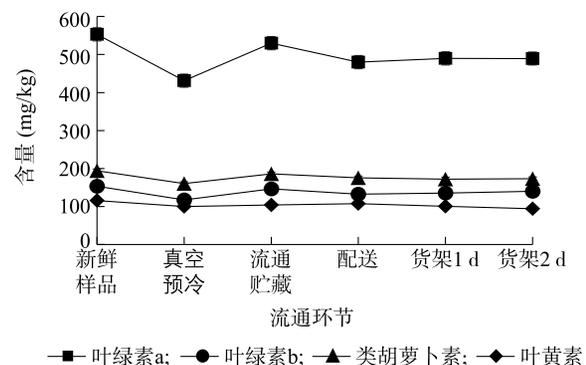


图 11 5.0 °C 流通温度下流通环节苏州青叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶黄素和类胡萝卜素含量的变化

Fig.11 The changes of the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, lutein and carotenoid of pakchoi in circulation at 5.0 °C

2.8 采后流通温度对苏州青中游离氨基酸含量的影响

叶类蔬菜除了含有人体必需的8种氨基酸外,精氨酸、组氨酸含量也较高,此外还含有鲜味氨基酸及药用氨基酸^[23]。如表3所示,苏州青在不同温度下流通后,除甲硫氨酸外,15种游离氨基酸含量均有不同程度的升高。在20.0℃流通下,苏州青中天冬氨酸、谷氨酸、丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、组氨酸、精氨酸含量的增

幅高于5.0℃流通,苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、脯氨酸4种氨基酸含量的变化相反,其中5.0℃流通下苏州青脯氨酸含量的变化最明显,增幅达112.50%。总氨基酸含量的增幅不受流通温度影响,低温流通后,总必需氨基酸含量的增幅有所下降,总非必需氨基酸含量的增幅上升,总药用氨基酸、总鲜味氨基酸、总苦味氨基酸含量的增幅均低于20.0℃流通温度,总甜味氨基酸含量的增幅远高于20.0℃流通温度。

表3 苏州青在流通后的游离氨基酸含量变化

Table 3 Changes in free amino acid content of pakchoi after circulation

氨基酸种类	20.0℃常温流通			5.0℃低温流通		
	流通前质量分数 (%)	流通后质量分数 (%)	流通后增幅 (%)	流通前质量分数 (%)	流通后质量分数 (%)	流通后增幅 (%)
天冬氨酸(Asp)	0.168±0.009	0.233±0.022**	38.69	0.189±0.021	0.252±0.020**	33.33
苏氨酸(Thr)	0.085±0.001	0.106±0.008*	24.71	0.086±0.001	0.136±0.010**	58.14
丝氨酸(Ser)	0.082±0.001	0.110±0.009*	34.15	0.088±0.001	0.133±0.008*	51.14
谷氨酸(Glu)	0.194±0.015	0.301±0.015**	55.15	0.238±0.018	0.304±0.014**	27.73
甘氨酸(Gly)	0.092±0.002	0.119±0.008*	29.35	0.105±0.008	0.142±0.010*	35.24
丙氨酸(Ala)	0.098±0.004	0.133±0.023*	35.71	0.112±0.011	0.149±0.007*	33.04
缬氨酸(Val)	0.101±0.014	0.146±0.006*	44.55	0.116±0.010	0.163±0.009*	40.52
异亮氨酸(Ile)	0.068±0.001	0.092±0.003*	35.29	0.084±0.004	0.100±0.016*	19.05
亮氨酸(Leu)	0.253±0.048	0.299±0.054*	18.18	0.238±0.025	0.256±0.053*	7.56
酪氨酸(Tyr)	0.142±0.008	0.158±0.008*	11.27	0.107±0.006	0.112±0.009	4.67
苯丙氨酸(Phe)	0.111±0.019	0.125±0.005*	12.61	0.107±0.006	0.114±0.023	6.54
赖氨酸(Lys)	0.094±0.003	0.131±0.021*	39.36	0.108±0.005	0.147±0.009*	36.11
组氨酸(His)	0.033±0.001	0.054±0.001*	63.64	0.047±0.001	0.059±0.001*	25.53
精氨酸(Arg)	0.105±0.008	0.135±0.021*	28.57	0.135±0.005	0.154±0.023*	14.07
脯氨酸(Pro)	0.103±0.008	0.104±0.006	0.97	0.064±0.002	0.136±0.011**	112.50
甲硫氨酸(Met)	<0.005	<0.005	/	<0.005	<0.005	/
TAA	1.729±0.142	2.246±0.210**	29.90	1.824±0.124	2.357±0.198**	29.22
EAA	0.745±0.087	0.953±0.098*	27.92	0.786±0.067	0.975±0.119*	24.05
NAA	0.984±0.055	1.293±0.112*	31.40	1.038±0.057	1.382±0.079*	33.14
MAA	1.085±0.105	1.435±0.134*	32.26	1.204±0.089	1.469±0.166*	22.01
FAA	0.362±0.024	0.534±0.037*	47.51	0.427±0.039	0.556±0.034*	30.21
SAA	0.554±0.019	0.703±0.075*	26.90	0.563±0.028	0.843±0.033*	49.73
BAA	0.671±0.091	0.851±0.090*	26.83	0.727±0.051	0.846±0.123*	16.37

TAA:总氨基酸含量,EAA:总必需氨基酸含量,NAA:总非必需氨基酸含量,MAA:总药用氨基酸(天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、甲硫氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、精氨酸)含量,FAA:总鲜味氨基酸(天冬氨酸、谷氨酸)含量,SAA:总甜味氨基酸(苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸、赖氨酸、脯氨酸)含量,BAA:总苦味氨基酸(缬氨酸、甲硫氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、精氨酸)含量。“/”表示苏州青中的甲硫氨酸含量低于检测限,故不纳入计算。*、**分别表示相同流通温度下流通后与流通前相比差异显著($P<0.05$)、极显著($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 采后流通温度对精品包装苏州青呼吸代谢途径的影响

流通温度是影响叶菜采后商品化处理与流通呼吸代谢途径和品质变化的重要环境因子之一,不同流通模式包含的环节不同,采后预冷、商品化处理、运输等环节的时长会影响生鲜产品的周转速率,进而影响整条供应链的流通效率^[24]。温度会对绿叶菜呼吸代谢产生影响,进而导致精品包装内外气体交换量不同,流通过程的气体条件极大地影响了叶菜品质^[25]。微孔薄膜作为气调包装中渗透性良好的包装材料之一,能够弹性调节气体、水蒸气的渗透量,以维持保鲜效果,有效控制叶菜流通过程中由呼吸产生的有害代谢物质。在相同孔数的包装条件下,不同流通温度的苏州青表现出了差异化响应,低温流通的苏州青呼吸代谢较弱,表现在货架存放1 d后,包装内 O_2 、 CO_2 含量处于动态平衡状态,常温流通的苏州青货架存放2 d后的气体变化趋势仍然明显,需要进一步观察研究。为了营造适宜叶菜呼吸的包装内的平衡气体成分,应选择适用于不同温度的微孔参数的自发气调包装材料。

糖酵解、三羧酸循环、磷酸戊糖途径是植物的有氧呼吸代谢途径^[26],根据苏州青在流通环节各途径的呼吸速率变化,推测EMP是模拟运输条件下的呼吸主路径。苏州青进入流通程序后,总呼吸与EMP途径的呼吸速率均下降,TCA途径的呼吸速率出现了上升,PPP途径的呼吸速率在常温流通条件下下降而在低温流通条件下上升,各呼吸代谢路径对环境温度的敏感性和适应性不同,最终呈现为苏州青非对称的成熟衰老的差别^[27]。EMP、TCA共同组成葡萄糖氧化的重要途径,TCA途径的代谢强度与EMP途径间的差异是由于不同流通模式带来的环境改变容易对下游呼吸路径的代谢反应产生影响。苏州青在货架存放2 d时总呼吸以及EMP、TCA、PPP途径的呼吸速率均出现了较大变化,常温流通下因出现呼吸高峰,各途径的呼吸速率均上升,也可能是由于升高的二氧化碳含量会影响呼吸代谢的调节机制,具体指向糖酵解途径、三羧酸循环与磷酸戊糖途径^[28]。在低温流通下,总呼吸、EMP途径的呼吸速率出现大幅下降,主要是低温抑制代谢的结果,PPP途径的呼吸速率增强可能是受次生代谢产物

响应低温逆境的影响,进一步说明低温环境能更好地保持苏州青在流通过程中的品质。

3.2 采后流通温度对精品包装苏州青感官品质的影响

叶菜的质地和外观色泽可作为判断蔬菜质量、新鲜度的参数,是影响消费者接受度的重要指标^[29],流通贮藏环节是苏州青在常温流通与低温流通过程中产生剪切力差异最大的环节,配送和货架过程逐渐抵消了温度带来的质地区别。真空预冷环节可以快速除去高温季节叶菜采后的田间热^[5],但该过程会触发 a^* 和叶绿素含量的急剧下降,可能与真空预冷过程中水分快速蒸发引起的叶片瞬时缺水造成原有叶绿素的加速分解有关,也可能由于在真空预冷等低温胁迫下,叶片中发生光化学反应,生成大量 O_2^- 、 $O_2^{\cdot-}$ 在叶片中的积累加速了叶绿素降解^[20]。通过对苏州青在流通环节中整体挥发性成分的检测发现,主要是W5S、W1S、W1W和W2W传感器读数发生了变化,表明硫化物、芳香化合物和氮氧化化合物的贡献率是导致苏州青香味存在差异的主要原因^[30]。电子鼻PCA结果显示,流通贮藏环节是区别于整个流通过程的主要环节,低温缩小了流通贮藏环节的苏州青样品与新鲜样品之间的差异。综合苏州青的质地与整体挥发性风味的变化得出,流通贮藏环节受到温度调控的影响较为明显。在常温流通下的苏州青的四味(苦味、涩味、鲜味、咸味)变化较大,在低温流通环境中仅鲜味有所减弱,因此有待进一步研究其含氮化合物、有机酸等含量的变化。

3.3 采后流通温度对精品包装苏州青内在品质的影响

在20.0℃流通温度下,货架2 d的苏州青外观 a^* 、叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素、叶黄素含量均出现了上升,可能与包装内呈现低氧含量高二氧化碳含量的微环境有关, CO_2 富集后参与了叶绿素生物合成,增加了叶绿素含量^[31]。Lu等^[32]研究发现,用15% CO_2 处理柑橘通过对其色素代谢的影响改善了果实的外观,参与叶绿素代谢和产生叶黄素的基因表达量上调,解释了叶绿素和类胡萝卜素含量的增加。为在流通过程中保持细胞膜的完整性和蛋白质的稳定性,苏州青在流通以后15种游离氨基酸含量增加。在流通过程中为应对低温引起的渗透胁迫,促使积累产生大量甜味氨基酸(苏氨酸、脯氨酸

等),尤其是脯氨酸,在能量库调节细胞氧化还原势和植物抗逆性过程中起到重要作用^[33]。根据流通过氨基酸与滋味特征的变化趋势来看,作为呈味物质之一的游离氨基酸(α -氨基酸)含量变化不能完全说明其滋味特征,可能还存在 β -氨基酸、 γ -氨基酸、核苷酸、糖苷类物质等,如黑芥子苷是十字花科植物重要的次生代谢物,是苦味的来源^[34],可能参与了苏州青的滋味组成,滋味呈现的具体成分构成有待进一步研究和构建。

4 结论

通过模拟运输试验软件设计苏州青在5.0℃、20.0℃下从产地处理→贮藏/流通→配送末端→货架的流通过程,流通贮藏环节是决定苏州青质地、整体挥发性风味、呼吸代谢的关键环节。苏州青在20.0℃下流通要考虑包装货架时间对外观色泽 a^* 值、叶绿素含量的影响和呼吸高峰出现的时间节点控制;在5.0℃下流通要考虑预冷环节引起的外观色泽 a^* 值下降和叶绿素含量损失的问题,以及预冷以后配送过程对呼吸速率产生的负影响。

流通中苏州青游离氨基酸含量增加,低温流通下甜味氨基酸含量的增长速率显著高于药用、鲜味及苦味氨基酸含量的变化,且保持了苦味、涩味,明显延缓了咸味的上升,但对鲜味的保留效果要低于常温流通。综合以上结果,在苏州青等叶菜的流通过程中,主要应加强对预冷环节的衔接、贮藏环节的控制管理以及货架包装材料的选择。为保证绿叶菜在流通过程中的感官及营养品质,应合理控制流通温度,缩短流通链条。

参考文献:

- [1] 朱燕芬,王若莺,徐 溟. 苏南地区冬季臺用苏州青新组合品种比较试验[J]. 上海蔬菜, 2021(2):4-5, 19.
- [2] 杜 磊. 低温加湿保鲜对叶菜类蔬菜贮藏品质的影响[J]. 广东蚕业, 2020, 54(5):47-48, 137.
- [3] AMBUKO J, WANJIRU F, CHEMINING' WA G N, et al. Preservation of postharvest quality of leafy amaranth (*Amaranthus* spp.) vegetables using evaporative cooling[J]. Journal of Food Quality, 2017(4):1-6.
- [4] 安容慧,周宏胜,罗淑芬,等. 真空预冷及不同流通方式对上海青货架品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(13):241-248.
- [5] 鲁 玲,康宁波,刘贵珊,等. 真空预冷结合微孔膜包装对鲜枸杞贮藏品质的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10):245-252.
- [6] 董同力嘎,张 靳,胡 健,等. 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[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2020, 41(6):96-100.
- [7] QU P, ZHANG M, FAN K, et al. Microporous modified atmosphere packaging to extend shelf life of fresh foods: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(1):51-65.
- [8] 伍 丹. 预处理结合微孔气调包装对鲜切茄子和橙子保鲜效果的研究[D]. 无锡:江南大学, 2021.
- [9] BAHAREH S, NASER S, MOHAMMAD J V, et al. The combined impact of calcium lactate with cysteine pretreatment and perforation-mediated modified atmosphere packaging on quality preservation of fresh-cut 'Romaine' lettuce[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(3):715-723.
- [10] 王晓芸. 微孔保鲜膜在蔬菜包装上的应用研究[D]. 天津:天津科技大学, 2015.
- [11] 蓝蔚青,刘 琳,肖 蕾,等. 温度波动对大目金枪鱼低温流通期间品质变化的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(11):205-212.
- [12] 刘 慧,吕真真,杨文博,等. 不同模拟流通温度对桃果实硬度和糖酸品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(9):199-205.
- [13] 潘 俨,车凤斌,董成虎,等. 模拟运输振动对新疆杏呼吸途径和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):325-331.
- [14] 史青纯. 外源水杨酸处理对采后黄冠梨果实呼吸途径的影响[D]. 保定:河北农业大学, 2009.
- [15] 孙灵湘,孙 华,王毓宁,等. 油蔬两用型油菜不同采摘期下油菜薹的品质变化研究[J]. 农产品质量与安全, 2021(2):74-79.
- [16] 马佳佳,隋思瑶,孙灵湘,等. 微孔自发气调包装对冠玉枇杷的保鲜效果[J]. 现代食品科技, 2020, 36(11):137-146, 187.
- [17] 程 曦. 控温包装在莴笋尖常温物流过程中的保鲜机理及优化研究[D]. 重庆:西南大学, 2017.
- [18] 侯建设,席巧芳,余 挺,等. 温度、机械伤和采收期对小白菜的采后生理的影响[J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(10):40-44.
- [19] 郭家刚,杨 松,丁思年,等. 基于气相离子迁移谱的不同产地生姜挥发性有机物指纹图谱分析[J]. 食品科学, 2021, 42(24):236-241.
- [20] 闫志成. LED白光照射对采后小白菜贮藏品质的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2019.
- [21] 郭 静,胡 坦,潘思轶. 食品运载体系包埋叶黄素的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(1):313-320.
- [22] 刘玉军,徐桂燕,王 英,等. 贮藏温度对叶菜类蔬菜采后品质的影响[J]. 中国果菜, 2021, 41(3):1-6.
- [23] 陈宏靖,阳丽君,宋 涛. 闽产7种叶菜氨基酸组成分析及营养评价[J]. 海峡预防医学杂志, 2021, 27(1):8-11.
- [24] 朱雪丽. 甜樱桃流通过程中影响保鲜效果的主要因素及对策[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4):202-206.
- [25] MAHAJAN P V, PATHAK N, BOVI G G, et al. Recent advances on packaging and storage technologies for the preservation of fresh produce[J]. Innovative Food Processing Technologies, 2021, 1:1-21.
- [26] 高红豆,胡文忠,管玉格,等. 采后果蔬呼吸代谢途径及其调控

- 研究进展[J].包装工程,2021,42(15):30-38.
- [27] 潘 俨. 库尔勒香梨果实发育及采后糖代谢与呼吸代谢关系的研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.
- [28] MATHOOKO F M. Regulation of respiratory metabolism in fruits and vegetables by carbon dioxide [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1996, 9(3): 247-264.
- [29] LIMANTARAA L, DETTLING M, INDRAWATIA R, et al. Analysis on the chlorophyll content of commercial green leafy vegetables [J]. *Procedia Chemistry*, 2015(14):225-231.
- [30] SONG J X, CHEN Q Q, BI J F, et al. GC/MS coupled with MOS e-nose and flash GC e-nose for volatile characterization of Chinese jujubes as affected by different drying methods[J]. *Food Chemistry*, 2020(331): 127201.
- [31] SONG H X, LI Y L, XU X Y, et al. Analysis of genes related to chlorophyll metabolism under elevated CO₂ in cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 261(3):108988.
- [32] LU Y T, LI D, LI L, et al. Effects of elevated CO₂ on pigment metabolism of postharvest mandarin fruit for degreening [J]. *Food Chemistry*, 2020(318):126462.
- [33] 徐 海, 宋 波, 顾宗福, 等. 热胁迫对不结球白菜生理指标的影响[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(13): 138-143.
- [34] 刘明春. 榨菜加工过程中挥发性风味物质的形成及变化研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

(责任编辑:徐 艳)