

流态冰预冷处理对西兰花品质及生理的影响

刘瑶¹, 左进华¹, 高丽朴¹, 史君彦¹, 孙文^{1,2}, 闫志成¹, 王清¹, 隋媛²

(1. 北京市农林科学院蔬菜研究中心, 农业部蔬菜产后处理重点实验室, 果蔬农产品保鲜与加工北京市重点实验室, 农业部华北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室, 农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京 100097)

(2. 重庆文理学院特色植物研究院, 经济植物生物技术重庆市重点实验室, 重庆特色植物产业 2011 协同创新中心, 重庆 402160)

摘要: 本实验为了探究流态冰预冷处理对西兰花贮藏品质的影响, 以西兰花为实验材料, 将其用流态冰预冷处理后, 待温度降至 $0\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后于货架温度($20\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$)贮藏。测定贮藏期间西兰花的黄化指数、感官评分、叶绿素、硫代葡萄糖苷、抗氧化酶活性等生理指标, 探究流态冰预冷处理对西兰花货架期品质的影响。结果表明: 流态冰预冷技术可以快速将西兰花降温至 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 降温时间缩短至 4 h; 在贮藏第 3 d, 经过流态冰处理的西兰花, 叶绿素和维生素 C(Vc)含量高于 CK 组 2 倍, 丙二醛(MDA)含量高于 CK 组 1 倍, 可溶性固形物(TSS)和硫代葡萄糖苷含量均处于较高水平, 保持了西兰花的营养品质; 贮藏第 3 d, 过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性, 分别提高了 32%、23%和 64%, 增强了其抗氧化酶活性。故流态冰预冷处理可有效维持西兰花的贮藏品质。

关键词: 流态冰; 预冷; 西兰花; 采后生理; 货架期

文章编号: 1673-9078(2019)04-77-86

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.4.012

Effect of Slurry Ice Precooling Treatment on Quality of Broccoli

LIU Yao¹, ZUO Jin-hua¹, GAO Li-pu¹, SHI Jun-yan¹, SUN Wen^{1,2}, YAN Zhi-cheng¹, WANG Qing¹, SUI Yuan²

(1. Vegetable Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Key Laboratory of the Vegetable Postharvest Treatment of Ministry of Agriculture, Beijing Key Laboratory of Fruits and Vegetable Storage and Processing, Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (North China), Ministry of Agriculture; Key Laboratory of Urban Agriculture (North), Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China)

(2. Chongqing Key Laboratory of Economic Plant Biotechnology, Collaborative Innovation Centre of Special Plant Industry in Chongqing, Institute of Special Plants, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract: To study the effect of slurry ice precooling treatment on broccoli, slurry ice were used to treat broccoli, then stored at $20\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ after cooled to $0\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sensory index, yellow index, chlorophyll, glucosinolate and antioxidant enzyme activities were periodically measured to evaluate the storage quality. The experimental results showed that slurry ice precooling technology can quickly reduce the temperature of broccoli to $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ and reduce the cooling time to 4 h. On the third day, the contents of chlorophyll and vitamin C (Vc) in broccoli treated with flowing ice were 2 times higher than those in CK group, and the content of MDA was 1 times higher than that in CK group; the contents of soluble solids (TSS) and glucosinolate were both in high level, maintaining the nutritional quality of broccoli; and the activity of CAT, POD, APX increased by 32%, 23% and 64%, respectively. Thus, slurry ice precooling treatment could maintain the storage quality and prolonging the shelf life of broccoli.

Key words: slurry ice; precooling; broccoli; post-harvest physiology; shelf life

收稿日期: 2018-11-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400901); 国家大宗蔬菜产业体系建设项目(CARS-23-E02); 北京市农林科学院青年基金项目(201709); 北京市农林科学院果蔬保鲜与加工创新团队项目(JNKST201602); 北京市农林科学院创新能力建设专项(20180705)

作者简介: 刘瑶(1994-), 女, 硕士, 研究方向: 农产品贮藏与保鲜

通讯作者: 王清(1979-), 女, 副研究员, 研究方向: 农产品贮藏与保鲜;

共同通讯作者: 隋媛(1984-), 女, 副教授, 研究方向: 水果采后病理

西兰花(*Brassica oleracea* L. var. *italica* Planch.)俗称青花菜, 原产于意大利, 是甘蓝的一种变种^[1], 其叶子较大, 主茎顶端形成肥大的花球, 为绿色或紫绿色。西兰花不仅含有丰富的蛋白质、脂肪、碳水化合物、维生素、矿物质等营养成分, 还含有酚类、黄酮类等活性物质, 这些活性物质对人体清除自由基具有十分重要的作用^[2], 同时西兰花中还含有硫代葡萄糖苷及其衍生物萝卜硫素, 具有抗癌、防癌的功效^[3]。

但由于西兰花在采后呼吸代谢较为旺盛,通常 20~25 °C 常温放置 1~2 d^[4],就会导致花蕾松散,叶绿素快速降解而引起西兰花的萎蔫和黄化,营养成分损耗等问题^[5],严重影响西兰花的食用品质和商品价值。所以如何安全有效的延长西兰花货架期,保持其营养价值对西兰花产业的发展具有重要意义。

将采收后的西兰花预冷、降温可以有效维持西兰花采后品质,延长其货架期。目前国内的西兰花预冷普遍采用冷库静置冷却技术,但冷库预冷时,库内冷气、循环不畅,预冷时间会长达 11 h,过长的预冷时间导致西兰花在预冷期间失水较严重、色泽变暗、营养成分流失^[6]。其他预冷方式还有:压差预冷技术、真空预冷技术和减压冷藏技术。王灵桥等^[6]研究了压差预冷技术对西兰花品质的影响,经过 5 h 将西兰花降至 0 °C,大大缩减了冷库预冷时间。刘芬^[7]运用真空预冷技术延长西兰花保质期,确定了西兰花真空预冷的最佳条件为:真空度 200 Pa、处理时间 40 min、处理量 200 g、喷水量 5%,可将西兰花温度降至 4.2 °C。胡欣^[8]运用减压冷藏技术,可延长西兰花的冷藏时间,且保持商品品质。但压差预冷技术和减压冷藏技术的预冷时间过长、设备占用面积大、设备造价高^[9],真空预冷技术虽然预冷时间缩短,但不能对西兰花进行大批量预冷处理,对实际生产产生较大困扰,所以需要一种新技术既可以快速大批量预冷西兰花,又可以减少预冷损耗。流态冰预冷技术,可以较好的解决上述问题,延长西兰花货架期,保持其商品品质。

流态冰(Slurry ice)也称流体冰,作为一种全新的冷却(致冷)介质,其成冰技术与传统的制冰技术完全不同。它不是直接将水结冰成冰块,而是将无机物的水溶液(如海水)冷却到一定的温度,使水从溶液结晶析出,从而形成细小的球状冰晶(直径通常只有 0.2~0.8 mm)^[10,11],其特点是冰体可流动,冰晶细小圆滑,无尖棱^[12]。流态冰预冷时,其冰晶迅速全方位包裹蔬菜而达到快速均匀降温的效果,预冷速率是普通冰预冷的 3~5 倍;同时,由于其冰晶结构特性,填充至蔬菜时可保护蔬菜产品免受机械损伤^[13]。流态冰预冷技术可快速、有效除去田间热^[14],保持蔬菜品质,延长货架期。目前流态冰技术在海产品中应用广泛,如高萌等^[14,15]研究流态冰对鲈鱼保鲜,王强等^[16]以南美白对虾为研究对象研究流态冰对南美白对虾感官、理化及质构特性影响等,以上实验表明,流态冰处理海产品可延长其保质期。本实验采用流态冰技术将西兰花预冷至 0±1 °C 后,于 20±1 °C 货架贮藏,研究流态冰预冷处理对西兰花品质的影响,为其保鲜提供参考理论。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

采用由北京天安公司顺义区基地,采收的品种为“优秀”的西兰花为实验材料,采收当天运回实验室,并挑选无机械伤、无病虫害、成熟度一致的完好西兰花作为实验试材;食盐选取由中盐北京市盐业公司生产的深井岩盐。

UV-1800 紫外分光光度计,日本京都岛津公司;D-37520 台式冷冻高速离心机, Thermo Fisher Scientific; WZY-1 温度记录仪,北京天建华科技发展有限公司; HW-SY11-K 型电热恒温水浴锅,北京市长风仪器仪表公司; IKA A11 basic 分析研磨机,德国;流态冰制冰机,弗格森公司。

1.2 试验方法

将挑选好的无机械损伤的西兰花随机装入两个泡沫箱(泡沫箱尺寸为 545 mm×410 mm×270 mm,并提前在底部打若干小洞)中,每箱随机装入西兰花 16~20 颗(总重量约 9 kg),选取其中 3 颗在花茎部位插入温度计。向其中一箱西兰花中倒入 10 kg~15 kg 制备的流态冰(加冰量没过西兰花最益),将西兰花箱放入零度库中,观察西兰花温度,当花茎温度降至 0±1 °C 后,将西兰花从箱中取出,每 3 颗用 0.04 mm PE 袋折口包装,放入温度为 20±1 °C 的库中贮藏,作为流态冰处理组;另一箱直接放入零度库中进行贮藏,当花茎温度降至 0±1 °C 时,放入 20±1 °C 冷库中贮藏,每 3 颗用 0.04 mm PE 袋折口包装,作为 CK 组。分别取流态冰处理组和 CK 组降至 0 °C 的西兰花作为初值,之后每 24 h 取一次样,每个处理组取 3 颗西兰花的花球组织进行取样、观察及品质指标测定,样品用液氮冷冻,然后放于 -80 °C 的冰箱中保存,用于生理指标的测定。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 西兰花温度变化曲线

随机选取 3 颗西兰花,分别在花茎位置插入温度计,温度计每 5 min 记录温度,观测在预冷降温过程中西兰花的温度变化。

1.3.2 西兰花感官指数

西兰花感官评定标准如下表,选十人建立评分小组,按照感官评定表中的色泽、气味、组织状态、腐败情况和花蕾开放程度逐项对西兰花进行评分,实验结果取平均值,当感官评分低于 5 分时,西兰花基本失去商品性,评判标准如表 1 所示^[17]。

表 1 西兰花感官指数评分

Table 1 The sheet sensory index score of broccoli

评分	色泽	气味	组织状态	腐败情况	花蕾开放程度
9	花球整体鲜绿	特有清香味	花球组织紧密	无腐烂	花蕾无开放
7	≤1/10 花蕾变黄	轻度清香味	花球组织致密, 硬挺	≤1/20 花蕾出现斑点	<1/10 花蕾开放
5	1/10~3/10 花蕾变黄	无清香味	花球外延稍软, 中心组织疏松	1/20~1/10 花蕾出现斑点	1/10~3/10 花蕾开放
3	3/10~5/10 花蕾变黄	轻度异味	花球萎蔫>5/10	1/10~2/10 花蕾出现斑点	3/10~5/10 花蕾开放
1	>5/10 花蕾变黄	明显腐臭味	花球全部萎蔫	>2/10 花蕾出现斑点	>5/10 花蕾开放

1.3.3 西兰花黄化指数

西兰花的黄化指数的测定参照 Olarte 等^[18]颜色评价标准和 Pen 等^[19]褐变指数标准略做改动。当西兰花黄化指数大于 4 时, 认定为黄化严重, 不具备商品价值。西兰花的黄化指数评定标准见表 2。

表 2 西兰花黄化指数评分

Table 2 The sheet yellow level index score of broccoli

评分	黄化指数评分标准
0	为深绿色, 颜色一致, 无黄化
2	为绿色, 点黄化, (所有黄化面积之和<总花球面积的 1/10)
4	轻微黄化 (1/10<黄化面积<1/5)
6	中度黄化 (1/5<黄化面积<1/4)
8	为中度-严重黄化 (1/4<黄化面积<1/2)
10	严重黄化 (黄化面积>1/2)

1.3.4 西兰花色差值的测定

色差值测定采用 CR-400 全自动测色色差计测定, 每组选取 3 颗西兰花, 在西兰花花球上用记号笔划 5 个标记圈 (直径 10 mm), 作为测定色差的专用测点, 每 1 d 对固定的点进行测定, 得到 L , a^* , b^* 值, 取平均值。其中 L 值为亮度指数, 表示西兰花的新鲜程度的改变^[17], a^* 值负值绝对值越大, 表明样品越绿; b^* 值表示由黄 (正值) 向蓝 (负值) 渐变, 正值越大, 表示颜色越偏向于黄色^[20]。

1.3.5 西兰花维生素 C 含量的测定

维生素 C (Vc) 含量采用采用钼酸铵比色法^[21]。取西兰花花球组织 1 g, 加入 5 mL 草酸-EDTA 溶液匀浆, 于 4 °C 13000 r/min 离心 20 min, 收集 2 mL 上层清液, 向收集的清液中加入 3 mL 草酸-EDTA、0.5 mL 偏磷酸乙酸、1 mL 5% 硫酸、2 mL 5% 钼酸铵, 将混合液摇匀后置于 80 °C 蒸馏水中保温 10 min, 冷却后定容至 10 mL, 测定其在 760 nm 处的吸光值。

1.3.6 西兰花叶绿素含量的测定

叶绿素含量测定采用 Deng 等^[22]的方法稍作修改, 用丙酮:乙醇 (2:1) 提取液对西兰花花球组织进行叶绿素提取, 测定样品在 645 nm 和 663 nm 处吸光值。

1.3.7 西兰花丙二醛含量的测定

丙二醛 (MDA) 含量测定采用采用硫代巴比妥酸法^[23]。取西兰花花球组织 1 g, 用 5 mL 100 g/L 三氯乙酸 (TCA) 提取, 将提取液和提取物置于 4 °C 13000 r/min 离心 20 min, 准确量取 2 mL 上层清液, 并向其中加入 2 mL 6.7 g/L 的硫代巴比妥酸 (TBA) 煮沸 20 min, 测定其在 450、532、600 nm 处的吸光值。

1.3.8 西兰花相对电导率的测定

相对电导率的测定采用 DDS-11A 电导率仪测定, 称取西兰花花球 1.0 g, 置于 50 mL 三角瓶中, 加蒸馏水 40 mL, 采用 DDS-11A 电导率仪测定 10 min 后电导率 P_1 , 沸水浴 10 min, 冷却后加水至原刻度电导率 P_2 ^[24]。

$$\text{相对电导率}(\%) = P_1/P_2 \times 100$$

1.3.9 西兰花可溶性固形物 (TSS) 含量的测定

可溶性固形物 (TSS) 含量采用手持阿贝折光仪进行测定。

1.3.10 西兰花硫代葡萄糖苷含量的测定

硫代葡萄糖苷含量采用分光光度法进行测定, 运用 3,5-二硝基水杨酸法测定西兰花花球在 530 nm 处的吸光值。

1.3.11 西兰花抗氧化酶活性的测定

过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 含量均参照曹建康^[25]的方法测定, 分别测定西兰花花球组织在: 470、240、290 nm 处的吸光值。

1.4 数据分析与处理

基础数据整理采用 Excel 2010 统计分析软件, 所有数据为 3 次重复实验的平均值和标准误差, 利用 Origin 9.0 分析与作图, 利用 IBM SPSS Statistics 22 软件对数据进行差异显著性检验 ($p < 0.05$ 为差异显著; $p < 0.01$ 为差异极显著)。

2 结果与分析

2.1 流态冰处理西兰花温度变化曲线

流态冰预冷技术可以在食品加工、贮藏、运输以及销售等多种环节应用,其中就包括食品的快速降温,该技术将海产品从 27 °C 降温至 1 °C 仅需 5 min^[12],同时,蔬果冷却时间也可大幅度减少^[26]。如图 1 所示,流态冰预冷处理的西兰花经过 3.8 h,从初温 25.6 °C 降温至 0.4 °C,而 CK 组经过冷库预冷的西兰花,从初温 25.6 °C 降至 2 °C,要经过 19.5 h,冷库预冷过程中西兰花花球冻伤面积较大,腐烂率较高。经过流态冰预冷的西兰花降温时间可缩短 15.7 h,并使其内部温度保持在 0.4 °C。快速降温可以维持西兰花的品质,防止西兰花冻伤造成的快速腐烂,延长其保鲜期。经过流态冰预冷的西兰花,其降温速率快,降温时间短,可以一定程度减小西兰花冻伤,保持其货架期商品品质。

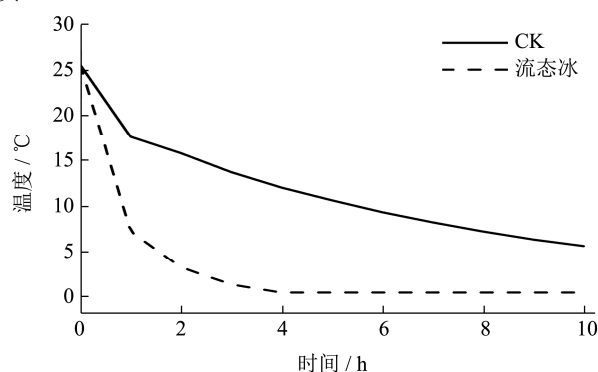


图 1 西兰花温度曲线

Fig.1 The temperature curve of broccoli

2.2 流态冰处理对西兰花感官指数的影响

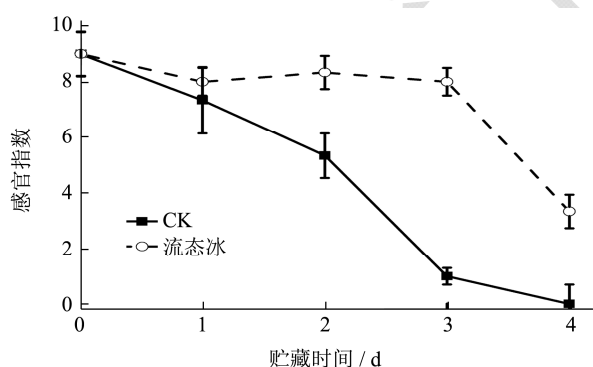


图 2 流态冰对西兰花感官指数的影响

Fig.2 Effect of slurry ice on Sensory index of broccoli

感官指数的评定可以最直观地判断出蔬菜的新鲜程度^[27],如图 2 所示,为西兰花贮藏期间感官指数的变化。在贮藏期间,西兰花的感官评分始终呈现下降趋势,但流态冰处理组的感官指数始终高于 CK 组,且在第 2 d 后,流态冰处理组与 CK 组差异极其显著 ($p<0.01$)。贮藏第 3 d,CK 组的西兰花评分低于 3 分,彻底失去商品价值,但流态冰处理组的西兰花评

分仍较高,具有商品价值,表明流态冰处理可以延长西兰花的货架期,维持其贮藏品质。

2.3 流态冰处理对西兰花黄化指数的影响

随着贮藏时间的延长,西兰花会产生萎蔫和黄化,此过程中营养成分流失。由图 3 可知,随着贮藏时间的延长,西兰花黄化指数上升,CK 组的西兰花黄化指数始终高于流态冰处理组,且在第 2 d 后,差异极其显著 ($p<0.01$)。20 °C 贮藏条件下,CK 组的西兰花黄化速度较快,贮藏第 2 d,商品价值降低,第 3 d,彻底失去商品价值。流态冰处理组的西兰花,第 3 d 花球仍为深绿色,具有较高商品价值,说明,流态冰处理可以延长西兰花货架期至第 3 d,且具有良好的护色效果,有效延缓西兰花的黄化速率。

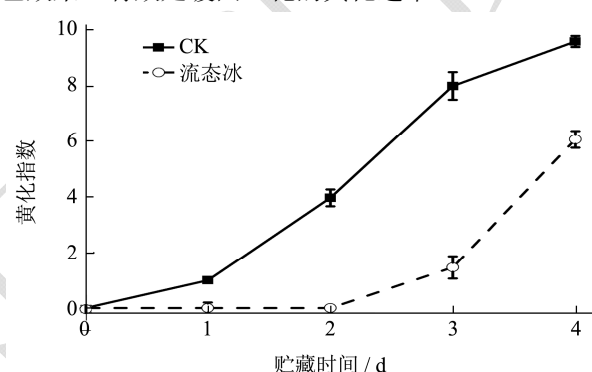
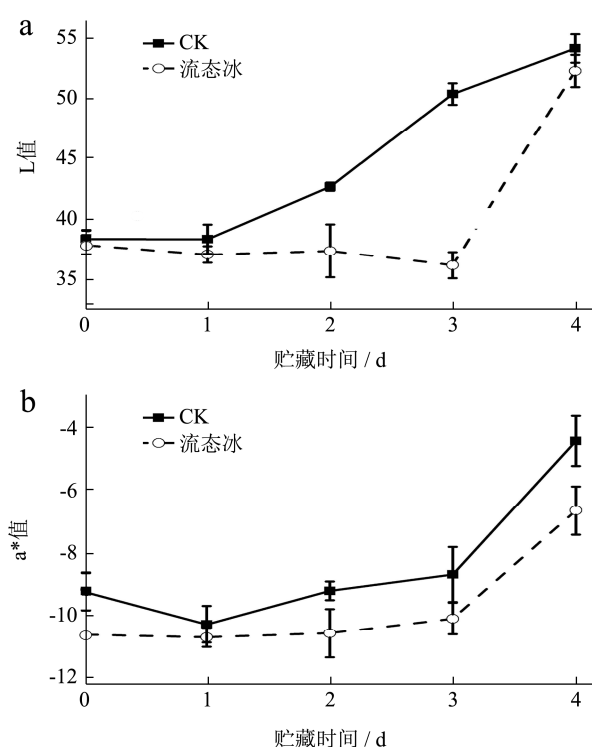


图 3 流态冰对西兰花黄化指数的影响

Fig.3 Effect of slurry ice on yellow index of broccoli

2.4 流态冰处理对西兰花色差值的影响



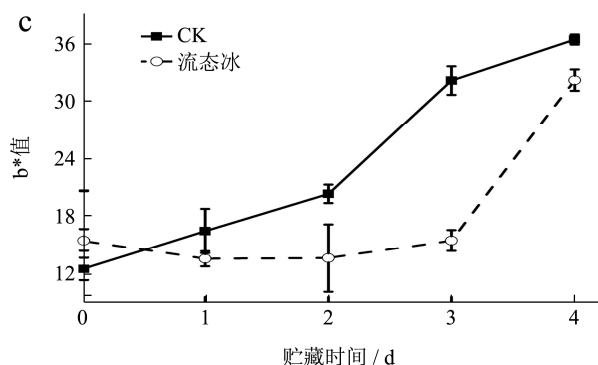


图4 流态冰对西兰花色差值的影响

Fig.4 Effect of slurry ice on color spinach of broccoli

色差值以数值的形式可以直观的反映出蔬菜在贮藏过程中颜色的变化,西兰花采后会随着贮藏时间的延长而脱绿黄化,因此采用 L 值、 a^* 值和 b^* 值来反映西兰花的新鲜程度以及保绿程度^[6]。如图 4 所示,西兰花在贮藏过程中, L 值、 a^* 值和 b^* 值均呈上升趋势,且 CK 组始终高于对照组。 L 值代表明暗程度,贮藏 1 d 后,CK 组的 L 值快速上升,且在第 2 d 和第 3 d 呈极显著差异 ($p<0.01$),表明 CK 组的西兰花随着贮藏时间的延长,新鲜度逐渐下降,而流态冰处理组的西兰花贮藏第 3 d 还保持较高品质。 a^* 值为负表示绿色, b^* 值为正表示黄色,正值越大颜色越黄^[28]。随着贮藏时间的延长, a^* 值和 b^* 值均呈现升高的趋势,表明西兰花花球开始变黄,但 CK 组始终高于流态冰处理组,说明 CK 组西兰花的黄化较为严重,品质较差。结果表明,流态冰处理可以延缓西兰花采后黄化,维持其较高贮藏品质。

2.5 流态冰处理对西兰花维生素 C (Vc) 含量的影响

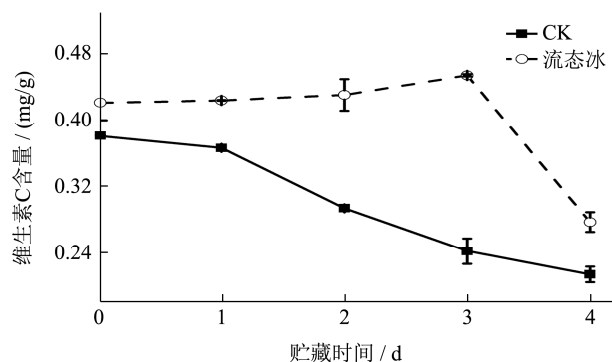


图5 流态冰对西兰花维生素 C 含量的影响

Fig.5 Effect of slurry ice on vitamin C content of broccoli

维生素 C 是蔬菜的重要营养物质之一,可以消除果蔬正常代谢所产生的自由基,保护细胞组织完整,从而延缓果蔬的衰老^[29]。由图 5 可知,流态冰处理组

和 CK 组西兰花的 Vc 含量呈逐渐下降趋势,流态冰处理组西兰花,在贮藏前 3 d 的 Vc 含量变化较小,于第 3 d 达到最高值 0.45 mg/g,此时花球鲜绿,商品价值极好,第 4 d, Vc 含量快速下降,说明流态冰处理后的西兰花贮藏前 3 d 商品品质较好。CK 组西兰花在贮藏 1 d 后, Vc 含量快速下降,且与流态冰处理组差异极显著 ($p<0.01$),贮藏第 3 d,流态冰处理组西兰花的 Vc 含量是 CK 组的 2 倍,结果表明,流态冰预冷处理可以延缓西兰花 Vc 含量的下降,保持其营养品质,延缓衰老。

2.6 流态冰处理对西兰花叶绿素含量的影响

西兰花中含有大量的叶绿素,但随着贮藏时间的延长,叶绿素降解,西兰花褪绿黄化,严重影响西兰花的感官品质^[30]。如图 6 所示,流态冰处理组和 CK 组西兰花叶绿素含量总体呈下降趋势,CK 组贮藏前 3 d,叶绿素快速降解,到第 3 d 完全失去商品价值,西兰花黄化极严重。流态冰处理组贮藏前 3 d,叶绿素含量下降较缓慢,与 CK 组相比差异显著 ($p<0.05$),第 3 d 仍具有商品性。贮藏第 3 d,流态冰处理组西兰花的叶绿素含量为 0.47 mg/g,是 CK 组叶绿素含量的 2.9 倍,含量较高。结果表明,流态冰处理可以延缓西兰花货架期间叶绿素含量的下降,维持西兰花的花球鲜绿。

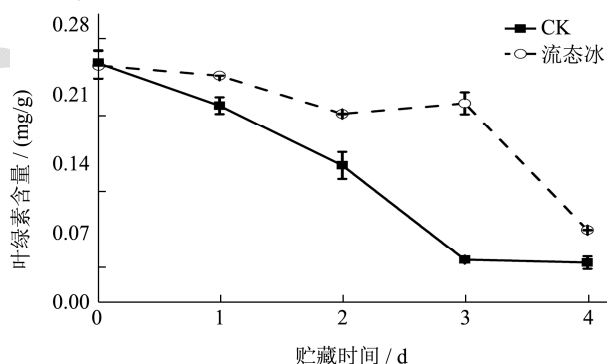


图6 流态冰对西兰花叶绿素含量的影响

Fig.6 Effect of slurry ice on Chlorophyll content of broccoli

2.7 流态冰处理对西兰花丙二醛 (MDA) 含量的影响

丙二醛 (MDA) 含量的变化是判断细胞膜损伤的重要指标之一,MDA 可加剧植物细胞膜质的损伤,加快细胞的衰老^[12],从而使蔬菜失去商品价值。如图 7 所示,在贮藏期内,MDA 含量呈上升趋势,CK 组西兰花的 MDA 含量始终高于流态冰处理组,呈显著差异 ($p<0.05$)。贮藏第 4 d,流态冰处理组和 CK 组

西兰花的MDA含量差异极显著($p<0.01$),达到峰值,分别为0.00659 nmol/g和0.0101 nmol/g,此时西兰花细胞膜损伤严重,西兰花失去商品价值。结果表明,在货架期内,流态冰预冷处理西兰花可以抑制MDA含量的升高,延缓西兰花的衰老。

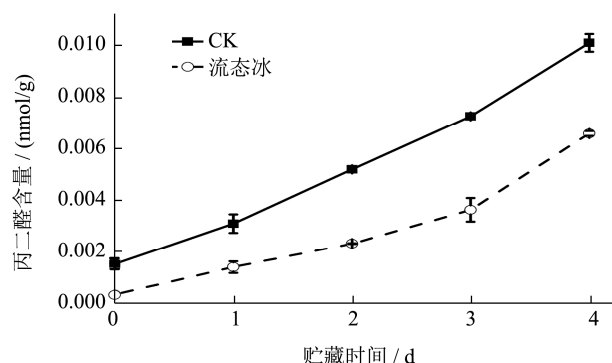


图7 流态冰对西兰花丙二醛含量的影响

Fig.7 Effect of slurry ice on MDA content of broccoli

2.8 流态冰处理对西兰花相对电导率的影响

蔬菜的相对电导率是在逆境条件下,评定其细胞受损程度的重要指标之一^[31]。由图8可知,西兰花在20℃条件下贮藏,流态冰处理组和CK组的西兰花相对电导率不断升高,在贮藏末期,流态冰处理和CK组的相对电导率分别升高了0.012%和0.197%,说明运用流态冰对西兰花进行预冷处理后,再货架贮藏可以有效抑制西兰花相对电导率的升高,维持细胞的完整性,延缓蔬菜的衰老。

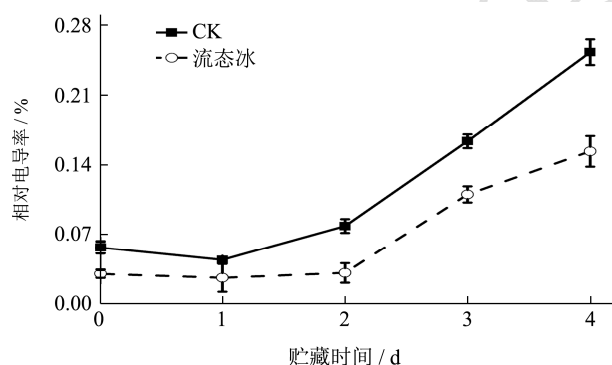


图8 流态冰对西兰花相对电导率的影响

Fig.8 Effect of slurry ice on relative electrical conductivity of broccoli

2.9 流态冰处理对西兰花可溶性固形物(TSS)含量的影响

含量的影响

可溶性固形物(TSS)主要是可溶性糖,可参与果蔬的呼吸代谢,因此可溶性固形物含量的高低受代谢活动的影响,可以直接反映西兰花的品质和商品价值,

是判断西兰花贮藏效果的重要指标^[32]。如图9所示,流态冰处理组和CK组的TSS含量呈先上升,后下降的趋势,但流态冰处理组西兰花的TSS含量始终高于CK组。西兰花的TSS含量在贮藏前2d,呈现上升趋势,可能由于西兰花花球在贮藏期间失水所引起的,在贮藏第2d,流态冰处理组和CK组西兰花TSS含量达到最高值,分别增加了0.57%和1.2%,说明,CK组失水较为严重。贮藏2d后,流态冰处理组和CK组西兰花的TSS含量均下降,这可能与西兰花自身呼吸有关,西兰花呼吸消耗自身能量^[33],导致TSS含量大幅度下降,贮藏第4d,TSS含量达到最低值,分别为6.6%和9.2%,此时CK组仍低于流态冰处理组。实验表明,流态冰处理可以抑制西兰花TSS含量的下降,延缓采后衰老。

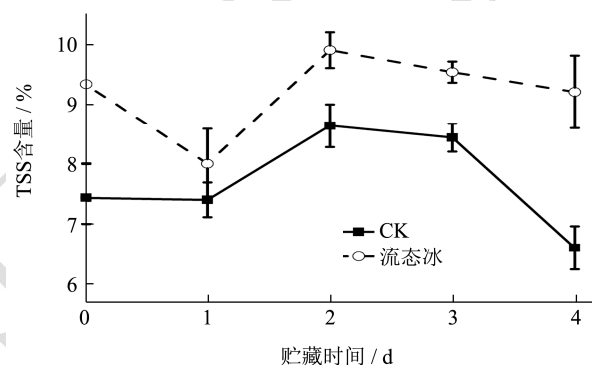


图9 流态冰对西兰花可溶性固形物的影响

Fig.9 Effect of slurry ice on TSS content of broccoli

2.10 流态冰处理对西兰花硫代葡萄糖苷含量的影响

的影响

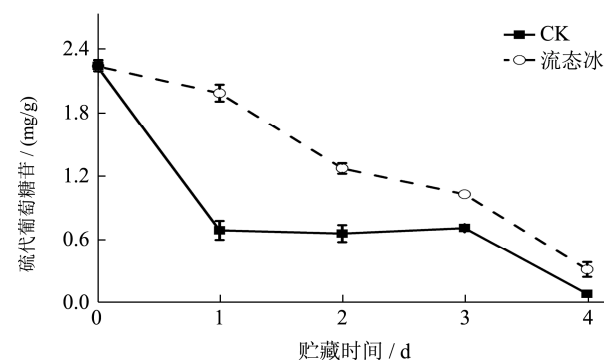


图10 流态冰对西兰花硫代葡萄糖苷含量的影响

Fig.10 Effect of slurry ice on glucosinolate content of broccoli

西兰花中含有硫代葡萄糖苷,其在芥子酶的作用下的水解产物具有很强的抗癌、防癌的作用^[34]。由图10所示,西兰花的硫代葡萄糖苷含量在贮藏期间持续下降,CK组西兰花在贮藏末期,硫代葡萄糖苷含量极少,此时已完全失去其营养价值。在贮藏期间,流

态冰处理组的硫代葡萄糖苷含量始终高于 CK 组,且在贮藏第 1 d 后呈显著差异 ($p<0.05$)。贮藏末期,流态冰处理组和 CK 组的硫代葡萄糖苷含量分别下降了 1.93 mg/g 和 2.16 mg/g,实验结果表明,流态冰预冷处理可以有效延缓西兰花在货架期间硫代葡萄糖苷的降解,维持其营养品质。

2.11 流态冰处理对西兰花过氧化物酶 (POD)

活性的影响

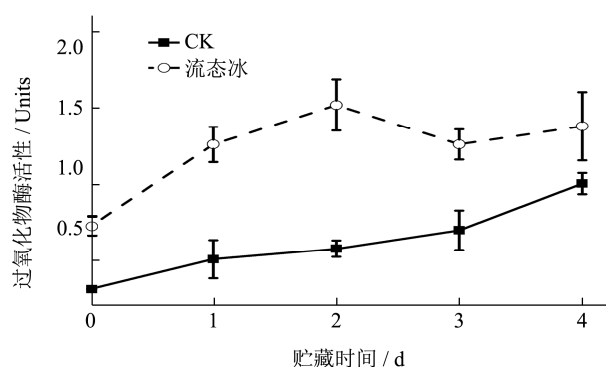


图 11 流态冰对西兰花过氧化物酶活性的影响

Fig.11 Effect of slurry ice on POD activity of broccoli

POD 活性可作为果蔬成熟和衰老的一个指标,可通过参与反应,减轻活性氧自由基对西兰花细胞组织的损伤^[35]。如图 11 所示,在西兰花货架贮藏期间,POD 活性逐渐升高,呈上升趋势,但流态冰处理组的 POD 活性始终高于 CK 组,贮藏末期,流态冰处理组比 CK 组西兰花的 POD 活性高 37%,说明,经过流态冰预冷处理可以促进西兰花衰老过程中活性氧自由基的产生,CK 组经过冷库降温的西兰花虽然 POD 活性也在升高,但仍低于流态冰处理组。实验表明,流态冰处理可以延缓西兰花采后衰老,维持其外观品质和营养品质。

2.12 流态冰处理对西兰花过氧化氢酶 (CAT)

活性的影响

西兰花体内积累的过氧化氢 (H_2O_2) 可以直接或间接导致细胞膜脂质过氧化损害,从而加速植物细胞的衰老与死亡。过氧化氢酶 (CAT) 可以加速植物体内积累的 H_2O_2 分解,从而降低对西兰花可能造成的伤害,延缓西兰花采后的衰老^[36]。由图 12 可知,西兰花在贮藏期间,CAT 活性总体呈现升高趋势,但 CK 组始终低于流态冰处理组,且呈极显著差异 ($p<0.01$),贮藏第 1 d,CK 组大幅度下降,可能是由于降温期间 CK 组西兰花冻伤,细胞膜受损严重,导

致 CAT 活性下降。贮藏末期,流态冰处理组 CAT 活性与初值相比升高了 5%,CK 组与初值相比降低了 6%,CK 组的 CAT 活性明显低于处理组,实验表明,流态冰处理可以维持西兰花较高的 CAT 活性,延缓花体的衰老。

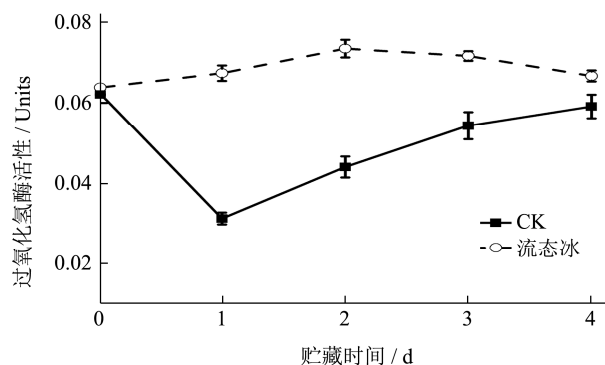


图 12 流态冰对西兰花过氧化氢酶活性的影响

Fig.12 Effect of slurry ice on CAT activity of broccoli

2.13 流态冰处理对西兰花抗坏血酸过氧化物

酶 (APX) 活性的影响

APX 是以抗坏血酸为电子供体的专一性强的过氧化物酶,催化抗坏血酸与 H_2O_2 发生氧化还原反应,以使抗坏血酸氧化形成单脱氢抗坏血酸,提高西兰花细胞的抗氧化还原系统,以保护细胞^[37]。由图 13 所示,西兰花在货架期间,APX 活性呈先下降,后小幅度上升趋势。流态冰处理组在第 2 d 活性达到最低值 0.025 U/(g·min),CK 组在贮藏第 3 d 活性达到最低值 0.021 U/(g·min),之后 APX 活性均上升。由于西兰花在衰老过程中产生过多自由基^[38],导致在贮藏期间 APX 有小幅度上升。实验表明,流态冰处理可以抑制 APX 活性的降低,延缓西兰花的衰老。

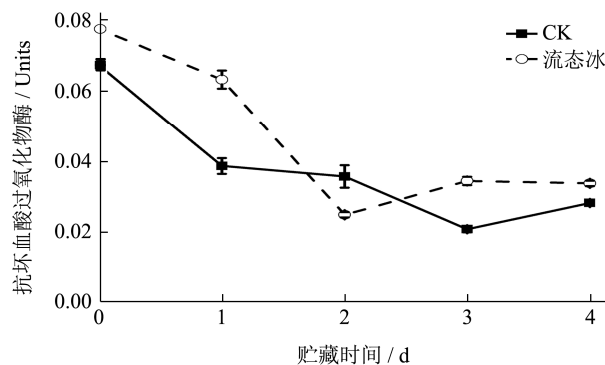


图 13 流态冰对西兰花抗坏血酸过氧化物酶活性的影响

Fig.13 Effect of slurry ice on APX activity of broccoli

3 结论

3.1 西兰花不仅食用口感极佳,还含有丰富的蛋白

质、脂肪、碳水化合物、维生素、矿物质、硫代葡萄糖苷及其衍生物萝卜硫素等营养成分,同时还含有酚类、黄酮类等活性物质^[2],深受广大消费者的喜爱,但西兰花货架期较短,通常为 1~2 d^[39]。因而寻求一种简单高效又无污染的方法,延长西兰花采后货架期具有重要意义。流态冰因其独特的水流动性和冰冷却性,在冷藏保鲜方面具有较为独特的优势^[40],因此可用于西兰花预冷技术中^[41],延长西兰花的货架期,延缓其采后衰老。

3.2 运用流态冰预冷技术,可以缩短西兰花的降温时间,经过 3.8 h 可将西兰花温度降至 0.4 °C,而冷库预冷 19.5 h,才能将其温度降至 2 °C。流态冰处理可以大大缩短西兰花的降温时间,防止在降温期间,西兰花营养物质的流失和冷冻伤所引起的快速黄化腐烂。

3.3 流态冰预冷处理的西兰花与冷库预冷相比,处理组的西兰花可延长货架期至 3 d,贮藏第 3 d 的西兰花花球鲜绿、花球组织紧密、无腐烂,而冷库预冷的西兰花贮藏第 3 d,花球黄化、完全失去商品价值。流态冰预冷西兰花,在货架期间,其色度改变较小,黄化较弱,同时,可延缓西兰花叶绿素含量和 Vc 含量的降解,贮藏第 3 d,处理组西兰花叶绿素和 Vc 分别比 CK 组高 0.31 mg/g 和 0.21 mg/g,保持了西兰花的外观品质。

3.4 流态冰预冷处理西兰花的 MDA、相对电导率下降缓慢,与 CK 组相比细胞受损程度较低。经过处理的西兰花硫代葡萄糖苷、Vc、TSS 含量要明显高于 CK 组,表明流态冰处理可维持西兰花在货架期间较高的营养品质,减少营养成份的流失。

3.5 与冷库预冷相比,流态冰处理可以增强西兰花 POD、CAT、APX 活性,清除西兰花衰老过程中产生的过氧化氢酶,维持较高的抗氧化能力,清除活性氧自由基对西兰花的伤害^[42],从而延长其货架期,保持其商品价值。

参考文献

- [1] Volden J, Bengtsson G B, Wicklund T. Glucosinolates, L-ascorbic acid, totalphenols, anthocyanins, antioxidant capacities and colour in cauliflower (*Brassica oleracea* L. ssp. *Botrytis*) effects of longterm freezer storage [J]. Food Chemistry, 2009, 112(4): 967-976
- [2] 吴广辉,毕韬韬.西兰花营养价值及深加工研究进展[J].农产品加工,2015,21:61-63
WU Guang-hui, BI Tao-tao. Advances innutritional value and deep processing of broccoli [J]. Farm Products Processing, 2015, 21: 61-63
- [3] Tilaar W, Ashari S, Yanuwadi B, et al. Synthesis of sulfuraphane during the formation of plantlets from broccoli (*Brassica oleracea* Lvaritalica) in vitro [J]. International Journal of Engineering and Technology, 2012, 3: 1-5
- [4] 李宁,阎瑞香,张娜.LED 复合光处理对西兰花低温保鲜效果的影响[J].华北农业学报,2015,30(1):188-193
LI Ning, YAN Rui-xiang, ZHANG Na. Effect of LED composite light on preservation of broccoli during cold storage [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2015, 30(1): 188-193
- [5] 伍新龄,张娜,张晓洁,等.LED 红蓝复合光间歇照射对西兰花贮藏品质的影响[J].保鲜与加工,2015,15(5):6-10
WU Xin-ling, ZHANG Na, ZHANG Xiao-jie, et al. Effect of red and blue LED light intermittent irradiation on quality of broccoli during cold storage [J]. Storage and Process, 2015, 15(5): 6-10
- [6] 王灵桥,应铁进,沈国岩,等.西兰花压差预冷技术和设施研究[J].中国农机化,2004,4:48-50
WANG Ling-qiao, YING Tie-jin, SHEN Guo-yan, et al. Study on the technique and equipment for forced-air precooling of broccoli [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2004, 4: 48-50
- [7] 刘芬.青花菜真空预冷工艺及保鲜效果的研究[D].杭州:浙江大学,2010
LIU Fen. The research on vacuum pre-cooling technology and fresh-keeping impact for broccoli [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010
- [8] 胡欣,张长峰,郑先章.减压冷藏技术对鲜切果蔬保鲜效果的研究[J].保鲜与加工,2012,12(6):17-20,24
HU Xin, ZHANG Chang-feng, ZHENG Xian-zhang. Effects of hypobaric cold storage technology on preservation of fresh-cut fruits and vegetables [J]. Storage and Process, 2012, 12(6): 17-20, 24
- [9] Thompson K A.(ed). Fruits and Vegetables: Harvesting, Handling and Storage [M]. UK: Wiley-Blackwell, 2003
- [10] 黄成,刘曦,林仕,等.刮削法流态冰制取技术的研究现状[C]//福建省制冷学会 2016 年学术年会论文集,2016:184-189
HUANG Cheng, LIU Xi, LIN Shi, et al. Currentresearchstatus of Theice Slurry Generation Basedonscraper Type [C]// Proceedings of Fujian Refrigeration Society 2016 Annual Conference, 2016: 184-189
- [11] 刘圣春,王飞波,孙志利.流化冰技术及其在食品保鲜等领域的应用[C]//中国制冷学会 2009 年学术年会论文集,2009,

- 511-516
LIU Sheng-chun, WANG Fei-bo, SUN Zhi-li. Slurry Ice Technology and Its application in the Field of Food Preservation and Thers [C]// Proceedings of the 2009 Annual meeting of the Chinese Society of Refrigeration, 2009, 511-516
- [12] 冯家敏,张宾,蒋林珍,等.流化冰结合防黑剂、抑菌剂对南美白对虾的保鲜效果[J].食品科学,2016,37(2):244-249
FENG Jia-min, ZHANG Bin, JIANG Lin-zhen, et al. Quality preservation of fresh shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by employment of slurry ice in combination with bacteriostatic agent and melanosis inhibitor [J]. Food Science, 2016, 37(2): 244-249
- [13] Kauffeld M, Wang M J, Goldstein V, et al. Ice slurry applications [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(8): 1491-1505
- [14] 高萌,张宾,邓尚贵,等.流化冰对于鲑鱼的保鲜效果研究[J].海洋与海沼,2014,45(5):1023-1029
GAO Meng, ZHANG Bin, DENG Shang-gui, et al. Effect of ice slurry on preservation of skipjack tuna [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2014, 45(5): 1023-1029
- [15] 高萌,张宾,邓尚贵,等.流化冰保鲜对鲑鱼蛋白质功能特性的影响[J].食品科学,2014,35(22):304-309
GAO Meng, ZHANG Bin, DENG Shang-gui, et al. Effect of slurry ice treatment on functional properties of muscle proteins of skipjack tuna [J]. Food Science, 2014, 35(22): 304-309
- [16] 王强,张宾,马路凯,等.流化冰保鲜对冰鲜南美白对虾品质的影响[J].现代食品科技,2014,30(10): 134-140
WANG Qiang, ZHANG Bin, MA Lu-kai, et al. Effect of slurry ice treatment on the quality of fresh *Litopenaeus vannamei* [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(10): 134-140
- [17] 张娜,阎瑞香,关文强,等.LED 单色红光对西兰花采后黄化抑制效果的影响[J].光谱学与光谱分析,2016,36(4):955-959
ZHANG Na, YAN Rui-xiang, GUAN Wen-qiang, et al. Effects of red light-emitting diode (LED) on the postharvest yellowing change of broccoli [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(4): 955-959
- [18] Olarte C, Sanz S, J. Federico Echávarri, et al. Effect of plastic permeability and exposure to light during storage on the quality of minimally processed broccoli and cauliflower [J]. LWT - Food Science and Technology, 2009, 42(1):402-411
- [19] Pen L T, Jiang Y M. Effects of chitosan coating on shelf life and quality of fresh-cut Chinese water chestnut [J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(3): 359-364
- [20] 史君彦,王清,高丽朴,等.1-MCP 处理对油菜贮藏品质影响的研究[J].食品研究与开发,2017,38(23):188-192
SHI Jun-yan, WANG Qing, GAO Li-pu, et al. Effect of 1-MCP treatment on storage quality of pak choy [J]. Food Research and Development, 2017, 38(23): 188-192
- [21] 张洪军,潘艳娟,王建清.大蒜/肉桂精油复配 PE 膜对双孢菇的保鲜研究[J].包装与食品机械,2015,33(4):21-25
ZHANG Hong-jun, PAN Yan-juan, WANG Jian-qing. Study on agaricus bisporus fresh-keeping effect by garlic/cinnamon essential oil compound pe film [J]. Packaging and Food Machinery, 2015, 33(4): 21-25
- [22] 刘婧,郑秋丽,左进华,等.低温预贮对青尖椒采后冷害的影响[J].现代食品科技,2018,34(2):205-211
LIU Jing, ZHENG Qiu-li, ZUO Jin-hua, et al. Effects of low temperature prestorage on the postharvest chilling injury of green pepper [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(2): 205-211
- [23] 徐冬颖,史君彦,郑秋丽,等.臭氧处理对菠菜采后保鲜效果的影响[J].北方园艺,2018,12:125-130
XU Dong-ying, SHI Jun-yan, ZHENG Qiu-li, et al. Effect of ozone on postharvest storage quality of spinach [J]. Northern Horticulture, 2018, 12: 125-130
- [24] 林本芳,鲁晓翔,李江阔,等.冰温结合 1-MCP 贮藏对西兰花品质及生理的影响[J].食品工业科技,2013,12:304-311
LIN Ben-fang, LU Xiao-xiang, LI Jiang-kuo, et al. Effect of controlled freezing point storage combined with 1-MCP on quality and physiology of Broccolis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 12: 304-311
- [25] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007
CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Study on Physiology and Biochemistry of fruits and vegetables after Harvest [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007
- [26] T W Davies. Slurry ice as a heat transfer fluid with a large number of application domains [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28: 108-114
- [27] 徐东颖,刘婧,左进华,等.茉莉酸甲酯处理对运输振动后尖椒贮藏品质的影响[J].现代食品科技,2018,34(9):70-76
XU Dong-ying, LIU Jing, ZUO Jin-hua, et al. Effect of methyl jasmonate treatment on quality of postharvest pepper subjected vibration during transportation [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(9): 70-76
- [28] 尹攀攀,肖丽霞,胡花丽,等.不同温度条件下 6-苄氨基嘌呤对采后西兰花货架寿命的影响[J].江苏农业科学,2017,

- 45(22):225-228
- YIN Pan-pan, XIAO Li-xia, HU Hua-li, et al. Effect of -6-benzyl aminopurine on shelf life of postharvest broccoli at different temperatures [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(22): 225-228
- [29] 王云香,王清,高丽朴,等.外源 NO 处理对黄瓜采后生理特性的影响[J].北方园艺,2018,18:109-113
- WANG Yun-xiang, WANG Qing, GAO Li-pu, et al. Effects of NO on postharvest physiological characteristics of cucumber [J]. Northern Horticulture, 2018, 18: 109-113
- [30] 刘琪,周兵,欧雅文,等.气体结合高静压对预制西兰花品质及货架期的影响[J].中国食物与营养,2017,23(1):30-34
- LIU Qi, ZHOU Bing, OU Ya-wen, et al. Effect of gas combined with high hydrostatic pressure on quality and shelf-life of pre-broccoli [J]. Food and Nutrition in China, 2017, 23(1): 30-34
- [31] Zhu J J, Li Y R, Liao J X. Involvement of anthocyanins in the resistance to chilling-induced oxidative stress in *Saccharum officinarum* L. leaves [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 73: 427-433
- [32] 陈豫,胡伟,王宇,等.模拟运输振动胁迫对宜宾茵红李生理生化变化的影响[J].食品工业科技,2017,38(11):309-313
- CHEN Yu, HU Wei, WANG Yu, et al. Effect of simulating transportation vibration stress on changes of physiology and biochemistry of "Yinhong" plum [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(11): 309-313
- [33] 钱骅,陈美龄,陈斌,等.鲜切西兰花减压预处理的保鲜研究[J].中国野生植物资源,2018,37(3):8-14
- QIAN Ye, CHEN Mei-ling, CHEN Bin, et al. Effect of hypobaric pretreatments on preservation of fresh cut broccoli [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2018, 37(3): 8-14
- [34] 王建华,张振超,毛忠良,等.西兰花硫代葡萄糖苷及其降解产物与育种研究进展[J].江西农业学报,2010,22(12):53-55
- WANG Jian-hua, ZHANG Zhen-chao, MAO Zhong-liang, et al. Research progress in glucosinolates and their degradation products and glucosinolates-rich breeding of broccoli [J]. Acta Agriculture Jiangxi, 2010, 22(12): 53-55
- [35] 史君彦,王清,高丽朴,等.变温处理对豇豆采后生理特性的影响[J].北方园艺,2017,22:132-137
- SHI Jun-yan, WANG Qing, GAO Li-pu, et al. Effects of change temperature treatment on cowpea physiological property [J]. Northern Horticulture, 2017, 22: 132-137
- [36] 丁天,史君彦,王清,等.水杨酸对青椒抗冷性的影响[J].北方园艺,2014,9:154-158
- DING Tian, SHI Jun-yan, WANG Qing, et al. Effect of salicylic acid on chilling resistance of green pepper [J]. Northern Horticulture, 2014, 9: 154-158
- [37] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48: 909-930
- [38] 郑小林,陈燕,敬国兴,等.草酸处理对芒果采后果实 ASA-GSH 循环系统的影响[J].园艺学报,2011,38(9):1633-1640
- ZHENG Xiao-lin, CHEN Yan, JING Guo-xing, et al. Effects of oxalic acid treatment on ASA-GSH Cycle in mango fruit during storage at room temperature [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2011, 38(9): 1633-1640
- [39] 尚海涛,林旭东,俞静芬,等.不同运输方式对西兰花物流品质的影响[J].食品工业科技,2016,37(20):322-324,330
- SHANG Hai-tao, LIN Xu-dong, YU Jing-fen, et al. Effect of different modes of transport on logistics quality of broccoli [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(20): 322-324, 330
- [40] 蓝蔚青,车旭,许巧玲,等.银杏叶提取液与竹醋液流化冰对鲳鱼冰藏期间品质变化的影响[J].食品科学,2017,38(23):249-256
- LAN Wei-qing, CHE Xu, XU Qiao-ling, et al. Effect of slurry ice made with *Ginkgo biloba* leaf extract or bamboo vinegar on the quality of pomfret (*Pampus argenteus*) during Ice Storage [J]. Food Science, 2017, 38(23): 249-256
- [41] T W Davies. Slurry ice as a heat transfer fluid with a large number of application domains [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28: 108-114
- [42] 史君彦,王清,高丽朴,等.充氮包装对平菇采后贮藏品质和生理变化的影响[J].食品研究与开发,2018,39(2):198-202
- SHI Jun-yan, WANG Qing, GAO Li-pu, et al. Effect of nitrogen-filled packaging on postharvest storage quality and physiological changes of *Pleurotus ostreatus* [J]. Food Research and Development, 2018, 39(2): 198-202