DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2016.04.037

包装方式对西兰花物流保鲜品质的影响

Effects of packing ways on logistics preservation quality of broccoli

闫凯亚[1,2,3]　何叶子[1,2,3]　张　敏[1,2,3]

YAN Kai-ya[1,2,3]　*HE Ye-zi*[1,2,3]　*ZHANG Min*[1,2,3]

(1. 西南大学食品科学学院,重庆　400715;2. 农业部农产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室(重庆),重庆　400715;3. 重庆市特色食品工程技术研究中心,重庆　400715)

(1. *College of Food Science, Southwest University, Chongqing* 400715, *China*; 2. *Mimnistry of Agriculture, Chongqing Special Food Programme and Technology Research Center, Chongqing* 400715, *China*; 3. *Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Argo-products on Storage and Preservation (Chongqing), Chongqing* 400715, *China*)

摘要:为减少蓄冷剂用量,研究普通聚乙烯(polyethylene,PE)包装袋与微孔 PE 包装袋协同蓄冷剂的复合保鲜技术对西兰花物流保鲜品质的影响。结果表明:放入 4 袋蓄冷剂组比不放蓄冷剂组保鲜效果要好,而放入 2 袋蓄冷剂结合 PE 包装袋优于 4 袋蓄冷剂组,2 袋蓄冷剂结合 PE 微孔袋包装的效果最佳。说明 PE 包装袋特别是 PE 微孔袋的协同使用可以弥补蓄冷剂用量减少后温度升高带来的保鲜品质下降问题,为解决目前蓄冷剂用量过大导致的成本升高难题提供了新的思路。

关键词:西兰花;泡沫箱;蓄冷剂;物流模拟;微孔包装袋;保鲜

Abstract: In order to reduce use level of coolant, effects of the coordination of coolant with ordinary polyethylene (polyethylene, PE) packing bag or micro-perforated PE packing bag on logistics preservation quality of broccoli were studied. Results revealed that regarding preservation quality of broccoli, foam boxes with 4 bags of coolant is better than that without coolant, while foam boxes coordinated of 2 bags of coolant and PE packing bag does better than that with 4 bags of coolant. Broccoli packed with 2 bags of coolant and micro-perforated packing bag has the highest quality among them. The results show that coordination of coolant with ordinary packing bag and micro-perforated packing bag can improve preservation quality in condition of higher temperature caused by reduced use level of coolant. The research results provide a new idea for the low-cost preservation technology of broccoli.

Keywords: broccoli; foam boxes; coolant; logistics simulation; micro-perforated bag; preservation

西兰花(broccoli),别名青花菜、绿菜花、嫩茎花椰菜等,属十字花科芸苔属甘蓝变种,富含蛋白质、糖、脂肪、维生素和胡萝卜素,其营养价值居同类蔬菜之首,具有抗癌解毒、延缓衰老等保健功效[1]。然而,西兰花采后呼吸代谢旺盛,在贮藏和流通过程中常温放置 3～4 d[2] 即发生褪绿黄化、褐变、腐烂、品质劣变等问题,严重影响其营养价值和商品价值。中国因冷链设施不足,技术推广滞后,果蔬冷链流通率仅为 5%。当前西兰花低温物流运输主要采用泡沫箱加冰的运输方式,即西兰花放置于加冰泡沫箱中进行运输,通过冰块降温达到保鲜效果。陈维信等[3]研究了荔枝常温下泡沫箱加冰的保鲜效果,表明泡沫箱加冰的运输方式能降低贮藏环境温度,抑制果实呼吸,从而达到保鲜目的。然而,泡沫箱加冰的运输方式加冰比例大(冰重∶果重约为 3∶7),物流成本高。微孔包装袋利用微孔调节包装袋内气体的比例和湿度,减少挥发性代谢产物的积累,延长果蔬贮藏期[4-6]。Lucera A 等[7]使用微孔包装袋包装鲜切西兰花,以无包装、普通 PVC 保鲜袋包装作对照,结果表明微孔包装下的西兰花品质较好,具有更长货架期。Rai R 等[8]用不同微孔数的聚丙烯包装袋包装西兰花,分析了西兰花贮藏过程中颜色指标变化,结果表明 4 个微孔的包装袋的气调环境对于减缓西兰花的颜色变化最为有效。目前有关泡沫箱流通过程中通过协同其他保鲜技术减少蓄冷剂用量,从而降低成本的研究未见报道。本试验拟研究普通包装袋与微孔包装袋协同蓄冷剂的复合保鲜技术对西兰花物流保鲜品质的影响,以减少蓄冷剂用量,降低贮运成本。

基金项目:重庆社会事业与民生保障科技创新专项(编号:cstc2015shmszx80036);国家级大学生创新创业训练计划项目(编号:201510635021)

作者简介:闫凯亚,女,西南大学在读本科生。

通讯作者:张敏(1975—),男,西南大学副教授,硕士。E-mail:zmqx123@163.com

收稿日期:2016-02-03

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

西兰花:供试品种为优秀,购于重庆市北碚菜市场;

PE 包装袋:宽 30 cm×长 40 cm,双面厚 60 μm,O_2 渗透系数为 2.25×10^{-3} $cm^3/(m^2\cdot d\cdot Pa)$,$CO_2$ 渗透系数为 7.13×10^{-3} $cm^3/(m^2\cdot d\cdot Pa)$,石家庄市长安区网诺包装材料公司;

泡沫箱:材质为聚苯乙烯,42 cm×320 cm×220 cm,厚 2 cm,市售;

蓄冷剂:400 mL 注水冰袋,南京苏味源生物科技有限公司;

Triton X-100:化学纯,成都市科龙化工试剂厂;

碘化钾、可溶性淀粉、冰乙酸、无水乙酸钠、聚乙二醇 6000、聚乙烯吡咯烷酮、邻苯二酚:分析纯,成都市科龙化工试剂厂。

1.1.2 主要仪器设备

无线温度计:W159 型,上海吉煜实业有限公司;

人工气候箱:RXZ-800B 型,宁波东南仪器有限公司;

手持折射仪:WZ-113 型,北京万成北增精密仪器有限公司;

可见分光光度计:722 型,上海菁华科技仪器有限公司;

电导率仪:DDS-307A 型,上海仪电科学仪器股份有限公司;

台式高速冷冻离心机:H1650R 型,长沙湘仪离心机仪器有限公司;

紫外分光光度计:UV-2450 型,日本岛津公司。

1.2 方法

1.2.1 样品处理方法 通过前期试验比较不同打孔数目与孔径大小对西兰花物流保鲜效果的影响,得出包装袋的最佳打孔参数:孔数为 6 个,孔径为 280 μm,在对应西兰花花蕾处的包装袋上打孔。挑选新鲜、无机械损伤、色泽均匀、无病虫害、成熟度适宜的西兰花,随机分为 4 组,每组 8 颗,重约 4 kg,分装于 4 个泡沫箱中,分别进行如下处理:

A. 不加蓄冷剂,西兰花无包装袋包装;

B. 4 袋蓄冷剂,泡沫箱内壁 4 个内表面各固定一袋,西兰花无包装袋包装;

C. 2 袋蓄冷剂,泡沫箱内壁前后 2 个内表面各固定一袋,西兰花用普通包装袋包装;

D. 2 袋蓄冷剂,泡沫箱内壁前后 2 个内表面各固定一袋,西兰花用微孔包装袋包装。

将泡沫箱密封后置于温度 25 ℃,湿度 90%~95%的人工气候箱中,每个处理 3 个重复。0 d 时的测定值在处理前测得。贮藏期间每天取样,连续5 d。测定泡沫箱内的温度、失重率、Vc 含量、叶绿素、相对电导率、PPO 活性、感官品质等相关指标。

1.2.2 泡沫箱内温度变化测定 用无线温度计测定,将子机放入泡沫箱,保证子机在各个箱内位置一致且泡沫箱密封良好,每小时记录一次主机读数,测量结果作为箱内温度,共记录 48 h。

1.2.3 失重率测定 称重法。失重率按式(1)计算:

$$W=\frac{m_0-m_1}{m_0}\times100\%\ ,\qquad(1)$$

式中:

W——失重率,%;

m_0——贮藏前的西兰花重量,g;

m_1——贮藏后的西兰花重量,g。

1.2.4 V_C 含量测定 采用碘酸钾滴定法[9]。

1.2.5 叶绿素含量测定 采用分光光度计测定[10]10。

1.2.6 相对电导率测定 采用电导仪测定[10]10-11。

1.2.7 PPO 提取及活性测定 参照文献[11]。取 1.0 g 西兰花花芽组织于研砵中,加 5 mL 提取缓冲液(1 mmol PEG、4% PVPP 和 1% Triton X-100),在冰浴中研磨成浆。于 4 ℃、12 000 r/min 离心 30 min,收集上清液即为酶提液。向试管中加入 0.05 mol/L pH 5.5 的乙酸缓冲液 4.0 mL,50 mmol/L邻苯二酚溶液 1.0 mL,酶提取液 0.1 mL。以蒸馏水为参比,在波长 420 nm 处测吸光度值,以每克果蔬样品在 470 nm 处每秒钟吸光度变化值增加 0.01 为一个 PPO 活性单位。

1.2.8 感官指标 参照文献[12]。感官评定小组由 5 人组成,主要从总体评价、花球颜色、花蕾开放程度、气味 4 个方面进行评定,满分为 9 分,评分标准见表 1。

表 1 各项指标的评分标准

Table 1 Sensory evaluation standard

得分	总体评价	颜色	花蕾开放程度	气味
9	极好,无任何缺陷	深绿	花蕾无开放	清香,固有香味
7	有小缺陷,但不明显	浅绿	1/4 花蕾开放	无清香味
5	一般,有轻微缺陷	黄绿色	1/2 花蕾开放	无清香味,轻度异味
3	差,影响销售	浅黄色	3/4 花蕾开放	有异味
1	极差,不可用	完全变黄	花蕾完全开放	明显腐臭味

1.3 数据处理

采用 SPSS 7.0 软件进行数据的差异显著性分析,利用 Origin 7.5 软件进行绘图分析。

2 结果与分析

2.1 泡沫箱内的温度变化

由图 1 可知,贮藏期间,B、C、D 组泡沫箱内温度随贮藏时间延长先迅速下降再缓慢上升,均在 3 h 时降至最低温度,约 35 h 后恢复至常温。加入 4 袋蓄冷剂的 B 组泡沫箱温度最低且温度回升缓慢,最低温度达到 7.1 ℃,能维持箱内平均温度 20 ℃以下达 27 h;加入两袋蓄冷剂的 C、D 组泡沫

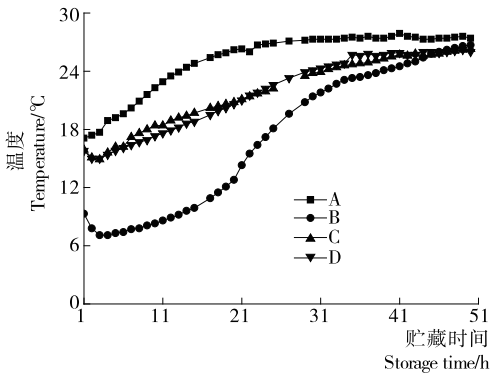

图 1　西兰花贮藏期间泡沫箱内温度变化

Figure 1　Changes of the temperature in the bubble box during storage

箱最低温度达到 14.9 ℃,可维持箱内平均温度 20 ℃以下 16～19 h;对照组温度迅速回升,在 18 h 后恢复至常温并维持在 27 ℃左右。不同蓄冷剂用量对到达最低温度所需时间和恢复至常温所需时间的影响不大,但会影响所达到的最低温度,这与蓄冷剂冷能缓慢释放的因素有关,与陈维信等[3]关于泡沫箱加蓄冷剂的箱内温度变化的研究结果一致。

2.2　包装方式对西兰花失重率的影响

由图 2 可知,各组西兰花失重率随着贮藏时间的延长呈上升趋势。贮藏至第 4 天,C、D 组西兰花失重率分别为 0.91%,1.09%,均极显著地($P<0.01$)低于 A 组(3.27%)和 B 组(3.24%)。呼吸作用引起的糖类的分解和蒸腾作用引起的水分流失是导致西兰花失重的主要原因。C、D 组的失重率一直维持在较低的水平,主要与包装袋维持适宜的气体环境,降低西兰花的呼吸速率和蒸腾作用有关;同时,D 组失重率略高于 C 组,主要是由于打孔引起包装内水分的散失[6],加速了西兰花的失水而导致的,这也与 Jia Cheng-guo 等[13]的研究结果一致。相同贮藏时间,A 组失重率略高于 B 组,这是由于 4 袋蓄冷剂降低了箱内平均温度,西兰花蒸腾作用和呼吸作用强度降低,水分蒸发和干物质消耗均减缓,故失重率较小[14]。

2.3　包装方式对西兰花 Vc 含量的影响

V_C是植物细胞内重要的自由基清除剂,在贮藏过程中果蔬的 Vc 含量会因本身较强的抗氧化活性而易氧化损失[15]。由图 3 可知,各组西兰花 Vc 含量随贮藏时间延长呈下降趋势。贮藏第 1 天,B 组 Vc 含量最高,是因为该组添加 4 袋蓄冷剂,降温效果好,试验前期温度更低,Vc 更稳定而不易分解[16]。新鲜西兰花 Vc 含量为 19.14 mg/100 g,贮藏至第 4 天时,A 组的 Vc 含量降到 10.12 mg/100 g,C、D 组 Vc 含量分别降为 14.45,15.72 mg/100 g,与 A 组的差异均达到显著水平($P<0.05$)。整体来看,相同时期,C、D 组 Vc 含量高于 B 组,B 组 Vc 含量高于 A 组,这是因为随着呼吸作用的进行,C、D 组包装袋内形成高 CO_2 浓度、低 O_2 浓度的微环境[17-18]抑制果蔬的代谢作用,减少自由基的产生,延缓衰老,从而使 Vc 含量的降解有所减缓[19-20]。

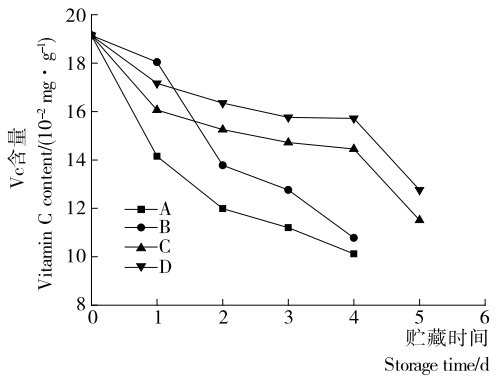

图 3　西兰花贮藏期间 Vc 含量的变化

Figure 3　Changes of vitamin C content of broccoli during storage

2.4　包装方式对西兰花叶绿素含量的影响

由图 4 可知,各组西兰花叶绿素含量随贮藏时间的延长呈下降趋势,B、C、D 组的叶绿素含量在相同贮藏时间均高于 A 组。贮藏至第 4 天,A 组叶绿素含量为 37.07 mg/100 g,显著($P<0.05$)低于 B、C、D 组,其中 C、D 组叶绿素含量分别为 69.04,60.00 mg/100 g,极显著($P<0.01$)地高于 B 组(50.90 mg/100 g)。C 组叶绿素含量显著高于 D 组($P<0.05$),这可能是因为普通包装袋透气性差,与微孔包装袋相比,其中的高浓度 CO_2 和低浓度 O_2 微环境抑制了部分叶绿素的降解[21]。Serrano M 等[17]研究表明,无孔包装袋比微孔

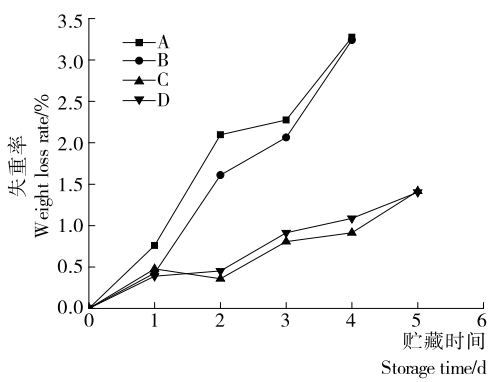

图 2　西兰花贮藏期间失重率的变化

Figure 2　Changes of weight loss rate of broccoli during storage

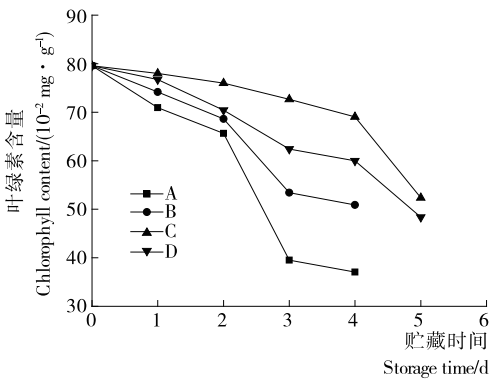

图 4　西兰花贮藏期间叶绿素含量的变化

Figure 4　Changes of chlorophyll content of broccoli during storage

包装袋更有效地保持西兰花贮藏过程中的叶绿素含量，与本试验研究结果一致。同时，叶绿素的降解与西兰花的失重率变化趋势相一致，但二者之间的关系尚不清楚。此外，叶绿素降解也与西兰花内部的过氧化物酶、超氧化物歧化酶、脂质过氧化作用等具有一定关系[22]。

2.5 包装方式对西兰花相对电导率的影响

相对电导率用来衡量细胞膜的相对透性，其值越高，细胞膜完整性遭到破坏的程度越大，细胞受伤害和果蔬的衰老程度越大。由图 5 可知，各组西兰花的相对电导率随贮藏时间的延长呈上升趋势。贮藏初期，由于采割过程使西兰花组织受到损伤，细胞内电解质外渗，电导率迅速升高；随着愈伤组织的形成，组织内失水和电解质的外渗得到了控制，电导率上升缓慢；随着贮藏时间的延长，西兰花的衰老进程加快，电导率又开始迅速升高[23]。B 组西兰花在贮藏前 3 d，相对电导率始终高于 A 组，第 4 天时与 A 组接近一致。相同贮藏时间 C、D 组相对电导率均低于 A 组和 B 组，贮藏至第 3 天时差异达到显著水平（$P<0.05$）；贮藏至第 4 天，D 组相对电导率低于 C 组，差异达到显著水平（$P<0.05$）。总体来看，普通包装袋和微孔包装袋均能有效抑制西兰花相对电导率的升高，维持细胞膜的相对完整性和稳定性，抑制西兰花的衰老进程。

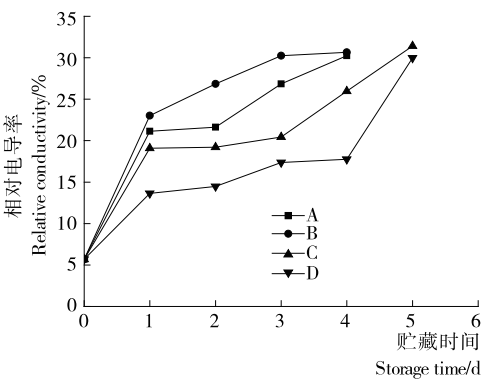

图 5 西兰花贮藏期间相对电导率的变化

Figure 5 Changes of relative conductivity of broccoli during storage

2.6 包装方式对西兰花 PPO 活性的影响

在 PPO 作用下酚类物质氧化形成褐色的醌类物质，所以 PPO 是引起果蔬酶促褐变的主要原因。由图 6 可知，贮藏期间 PPO 活性先下降后回升再下降，可能是西兰花采摘过程中的机械损伤胁迫，使贮藏初期 PPO 活性较大[24]；随着贮藏时间的延长，西兰花适应了环境，其 PPO 活性降低，延缓了衰老速度；贮藏后期，西兰花衰老加速，PPO 活性增加。A、B、C 组西兰花在贮藏至第 2 天时第一次出现 PPO 活性最小值点，而 D 组在第 3 天时第一次出现 PPO 活性最小值点，由此可知，微孔包装袋包装贮藏能够延缓 PPO 活性最小值的出现时间，从而延缓西兰花的衰老[25]。贮藏至第 3 天，各组西兰花 PPO 活性及大小关系分别为 A 组（0.45 U/g·FW）＞B 组（0.30 U/g·FW）＞C 组（0.25 U/g·FW）＞D 组（0.11 U/g·FW），可见，普通包装袋和微孔包装袋均能使 PPO 活性得到抑制，从而减轻西兰花的酶促褐变[26]。

2.7 包装方式对西兰花感官品质的影响

由图 7 可知，各组西兰花的感官品质指标随贮藏时间的延长均呈下降趋势，在前 3 d 下降趋势平缓，但从第 4 天开始，西兰花感官品质变化较大。贮藏至第 4 天，A 组西兰花已经出现花球开放并变黄、有明显腐臭味等现象；B 组西兰花花球开放，呈浅黄色，有异味，A、B 组均失去商品价值；而 C、D 组仍维持较高的感官品质，具有一定的商品价值。

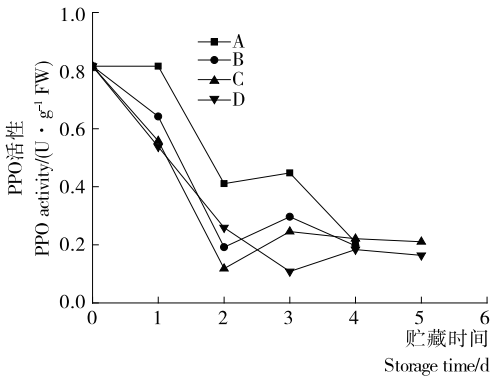

图 6 西兰花贮藏期间 PPO 活性的变化

Figure 6 Changes of PPO activity of broccoli during storage

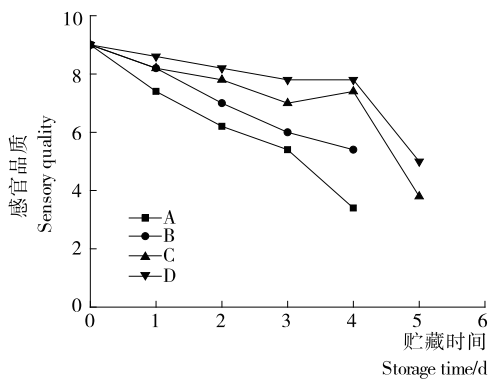

图 7 西兰花贮藏期间感官品质的变化

Figure 7 Changes of sensory quality of broccoli during storage

3 结论

在泡沫箱物流运输中，未放入蓄冷剂的西兰花仅在 2 d 内能保持较好的品质，4 袋蓄冷剂的西兰花保鲜期为 3 d，而 2 袋蓄冷剂复合 PE 包装袋或 PE 微孔包装袋的在 4 d 内仍能保持较好的品质，其中 PE 微孔包装组保鲜效果最佳。这说明在减少蓄冷剂数量，降低材料及物流成本情况下，复合采用 PE 包装袋或者微孔 PE 包装袋不但不会降低保鲜品质，还能延长保鲜期，这为目前蓄冷剂用量过大导致的成本升高难题提供了新的解决思路。

然而试验结果中保鲜期仍有较大提升空间，应进一步研究协同使用采后生理调控技术和病害控制技术等其他保鲜技术，延长西兰花的保鲜期，更好地平衡品质保持和成本控制的关系。

参考文献

[1] 叶保华，赵继承，朱胜龙，等. 鲜切西兰花贮藏保鲜技术研究[J]. 包装与食品机械，2009，27(3)：18-21.

[2] 张怡，关文强，张娜，等. 温度对西兰花抗氧化活性及其品质指标影响[J]. 食品研究与开发，2011，32(8)：156-161.

[3] 陈维信，吴振先，苏美霞，等. 荔枝常温下泡沫箱加冰保鲜研究[J]. 广东农业科学，2000(3)：27-28.

[4] 荆红彭，张旭，关文强，等. 不同温度下微孔膜包装青毛豆的保鲜效果研究[J]. 食品工业科技，2015，36(3)：334-339.

[5] 于江，袁艳，夏业鲍. 青椒打孔膜包装的研究[J]. 包装工程，2008，29(12)：98-100.

[6] Hussein Z，Caleb O J，Jacobs K，et al. Effect of perforation-mediated modified atmosphere packaging and storage duration on physicochemical properties and microbial quality of fresh minimally processed 'Acco' pomegranate arils[J]. LWT-Food Science and Technology，2015，64(2)：911-918.

[7] Lucera A，Costa C，Mastromatteo M，et al. Fresh-cut broccoli florets shelf-life as affected by packaging film mass[J]. Journal of Food Engineering，2011，102(2)：122-129.

[8] Rai R，Jha S N，Wanjari O D，et al. Chromatic changes in broccoli (Brassica oleracea italica) under modified atmospheres in perforated film packages[J]. Food Science and Technology International，2009，15(4)：387-395.

[9] 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，2007：37-39.

[10] 林本芳. 生物保鲜剂对西兰花贮藏生理及保鲜效果的研究[D]. 天津：天津商业大学，2013.

[11] Oms-Oliu G，Aguilo-Aguayo I，Martin-Belloso O，et al. Effects of pulsed light treatments on quality and antioxidant properties of fresh-cut mushrooms (Agaricus bisporus)[J]. Postharvest Biology and Technology，2010，56(3)：216-222.

[12] 徐斐燕. 鲜切西兰花的保鲜技术研究[D]. 杭州：浙江大学，2006：32-33.

[13] Jia Cheng-guo，Xu Chao-jiong，Wei Jia，et al. Effect of modified atmosphere packaging on visual quality and glucosinolates of broccoli florets[J]. Food Chemistry，2009，114(1)：28-37.

[14] 郭玉花，黄震，滕立军，等. 新鲜菠菜的纳米活性气调包装研究[J]. 食品与机械，2009，25(4)：167-170.

[15] 甄天元，彭晓蓓，李文香，等. 丁香提取液对鲜切西兰花保鲜效果的影响[J]. 食品科学，2011，32(10)：279-282.

[16] 张文婷，赵武奇，鲁晓翔，等. 四种物流贮藏温度对圣女果品质的影响[J]. 食品工业科技，2015，36(5)：329-333.

[17] Serrano M，Martinez-Romero D，Guillen F，et al. Maintenance of broccoli quality and functional properties during cold storage as affected by modified atmosphere packaging[J]. Postharvest Biology and Technology，2006，39(1)：61-68.

[18] 杨静. 微孔包装袋内外气体传送机理的研究[D]. 天津：天津科技大学，2012：43-44.

[19] 赵鑫，高美须，沈月，等. 包装材料与乙烯吸收剂，1-MCP 组合处理对延长银白杏贮藏期的影响[J]. 中国食品学报，2015，15(7)：103-109.

[20] 王鹏跃，陈忠秀，庞林江. 气调包装对椪柑贮藏及保鲜效果的影响[J]. 食品与机械，2014，30(6)：124-127.

[21] 杨静，张蕾. 打孔包装对西兰花品质的影响[J]. 包装工程，2012，33(3)：31-34.

[22] Toivonen P M A，Sweeney M. Differences in chlorophyll loss at 13 degrees C for two broccoli (Brassica oleracea L.) cultivars associated with antioxidant enzyme activities[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，1998，46(1)：20-24.

[23] 孔凡春. MAP 保鲜特色果蔬的研究[D]. 北京：中国农业大学，2004：25-26.

[24] 徐斐燕，蒋高强，陈健初. 臭氧在鲜切西兰花保鲜中应用的研究[J]. 食品科学，2006，27(5)：254-257.

[25] 郭园园，鲁晓翔，李江阔，等. 自发气调包装对青皮核桃采后生理及品质的影响[J]. 食品科学，2014，35(4)：205-209.

[26] 庞坤，胡文忠，姜爱丽，等. 鲜切苹果贮藏期间生理生化变化的影响[J]. 食品与机械，2008，24(1)：50-54.

(上接第 102 页)

有一定的规律性和通用性，但预测结果是理想条件下得到的，因而有一定的适用范围。如果超过这个范围，本计算模型的预测结果就很难达到理想的结果。这个范围还有待深入研究。对任何一个动态系统进行预测，都会受到一些不确定的外界因素的影响，因此预测的结果仅具有参考价值，今后研究中要加强多因素条件下的监测和实验验证，才能使得预测结果更加精确。

参考文献

[1] 刘艳敏，吴拥军，王亚娟，等. 贵州油辣椒挥发性风味物质分析[J]. 食品科学，2013，34(20)：221-227.

[2] 蔡子金，李军庆，张庆文，等. CFD 在搅拌罐性能研究和生化过程放大中的应用[J]. 食品与机械，2013，29(6)：108-112.

[3] 杜飞龙，李少波，何玲. 卧式组合搅拌槽内固液混合物多相流模拟分析[J]. 食品与机械，2013，29(5)：111-114.

[4] 吕帅，张裕中. 高粘稠物料在灌装阀体内的流动状态分析[J]. 包装工程，2012，33(15)：10-15.

[5] 朱进林，谢晶，王金锋，等. CFD 预测不同进风方向对蒸发式冷凝器流场的影响[J]. 食品与机械，2015，31(3)：87-92

[6] 戴猷元，余立新. 化工原理[M]. 北京：清华大学出版社，2010：38-40.

[7] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京：清华大学出版社，2003：6.

[8] Ling J，Skudarnov P V，Lin Cheng-xian，et al. Numerical investigations of liquid-solid slurry flows in a fully developed turbulent flow region [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow，2003，24(3)：389-398.

[9] Skudarnov P V，Lin Cheng-xian，Ebadian M A. Double-species slurry flow in a horizontal pipeline [J]. Journal of Fluids Engineering，2004，126(1)：125-132.

[10] Lin Cheng-xian，Ebadian M A. A numerical study of developing slurry flow in the entrance region of a horizontal pipe [J]. Computer & Fluids，2008，37(8)：965-974.