

草莓液氮速冻特性及营养品质的研究

王喜芳¹, 李保国¹, 朱珩²

(1.上海理工大学, 上海 200093; 2.上海普莱克斯工业气体有限公司, 上海 201204)

摘要: **目的** 探究草莓的液氮速冻工艺特性。**方法** 利用自行研制的液氮喷雾式速冻装置, 温度设置在 $-40\sim-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 以 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为间距进行草莓液氮速冻实验, 并检测、分析不同冻结温度条件下的草莓冻结速率、失水率、色差、Vc含量和花青素含量等指标。**结果** 随着冻结温度的降低, 草莓冻结时间缩短, 冻结速率由 9.75 cm/h 提高到 20.00 cm/h , 但当冻结温度低于 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 继续降低冻结温度, 其冻结速率增幅减小。随着冻结温度的降低, 液氮速冻后草莓的失水率、Vc含量、花青素含量和总酚含量呈现增大趋势, 但增幅逐渐变小。**结论** 液氮速冻草莓采用 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结温度进行速冻时, 既可保证草莓快速冻结, 又可最大程度地保留草莓的营养品质。

关键词: 草莓; 喷雾式; 液氮速冻; 品质

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)23-0062-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.011

Quick-frozen Characteristics and Nutritional Quality of Strawberries in LN₂-spraying Freezer

WANG Xi-fang¹, LI Bao-guo¹, ZHU Hang²

(1.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2.Shanghai Praxair for Industrial Gas Co., Ltd., Shanghai 201204, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the characteristics of strawberries' liquid nitrogen (LN₂) quick freezing process. The LN₂ quick-frozen strawberries experiment was conducted at the temperatures ranging from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ with $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ interval by means of a self-made LN₂-spraying quick freezing device. The indexes of strawberries including freezing rate, water loss rate, chromatic aberration, contents of vitamin C and anthocyanin, etc. under different freezing temperatures were tested and analyzed. The freezing time was shortened and the freezing rate was increased from 9.75 cm/h to 20.00 cm/h with the reduction of freezing temperature. When the freezing temperature was lower than $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, the increase of freezing rate decreased as the temperature continued to reduce. Water loss rate, Vc, anthocyanin and total phenolics of LN₂ quick-frozen strawberries showed an increasing tendency with the reduction of freezing temperature, but the rate of increase was gradually decreased. The LN₂ quick-frozen process of strawberries at $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ can ensure the rapid freezing and maximally retain nutritional quality of the strawberries.

KEY WORDS: strawberry; spraying; LN₂ quick-frozen; quality

草莓属蔷薇科浆果,富含碳水化合物、膳食纤维、微量元素及天然抗氧化剂等人体必需的营养物质,其中Vc含量约为 $50\sim 160\text{ mg/100 g}$,比西红柿高3~5倍,比柑桔高10~20倍,具有很高的营养价值^[1-2]。草莓还含有丰富的花青素和酚类化合物等抗氧化物质,具有预防癌症、心血管疾病和其他慢性病的作用^[3]。

由于草莓表皮脆弱,采后呼吸强度较高^[4],在常温条件下仅能存放1~2 d便开始腐烂^[5],因此,草莓通常经过冷冻处理后加工成草莓酱、草莓汁、草莓罐头和草莓干等^[6]。冻结过程对细胞壁、胞间层和原生质体会造成不可逆转的结构损伤,从而导致草莓细胞结构的破坏和营养物质的流失^[7]。Delgado 和

收稿日期: 2018-07-04

基金项目: 上海市联盟计划 (LM201826); 普莱克斯项目 (3A308014)

作者简介: 王喜芳 (1993—), 女, 上海理工大学博士生, 主攻农产品冷冻冷藏与保鲜技术。

通信作者: 李保国 (1961—), 男, 博士, 上海理工大学教授、博导, 主要研究方向为食品加工新技术。

Rubiolo^[8]利用电镜 (SEM) 观察不同冻结速度下的草莓微观结构发现, 冻结速度越快, 冻结过程中对草莓微观结构的损伤越小, 因此, 近年来液氮速冻因其冻结速度快、解冻后食品质量高等特点, 逐渐成为单体速冻食品的主要工业冻结方法之一^[9]。梁亚星等^[10]采用自制的液氮喷雾式食品流态化速冻机对青刀豆进行速冻实验, 通过观察冻结青刀豆复温后的电镜照片, 分析了不同冻结温度下速冻过程中冰晶生长对青刀豆品质的影响, 发现相对较低的冷风温度能够使物料很快通过最大冰晶生成区, 对细胞结构破坏较小。徐振立等^[11]将西兰花进行液氮流态化速冻, 随着冷风温度的降低, 西兰花的冻结时间缩短, 但缩短幅度逐渐减小, 当冷风温度低于-40℃后, 冻结时间曲线变化趋于稳定。张庆刚等^[12-14]对蓝莓进行了液氮流态化速冻研究, 发现不同的冻结温度和风速对蓝莓相关品质指标有显著影响, 与冰箱冻结相比, 液氮速冻后的蓝莓可冻藏更长的时间。樊建等分别对白灵菇^[15]、松茸^[16]进行了液氮速冻实验研究, 分析了风速、筛板与层高对液氮流态化过程的影响, 但涉及速冻后物料品质 (失水率、维生素 C 等理化指标) 的数据较少。

上述研究表明液氮速冻在农产品中的应用具有一定优势, 同时也显示了速冻过程中存在着各种各样的影响因素 (例如, 冻结温度、风速、层高等)。目前关于草莓速冻的研究多集中于预处理方法对其速冻后储藏品质的影响。鞠国泉等^[17]研究了经乳酸钙处理后的速冻草莓贮藏期的品质变化规律, 结果表明, 通过乳酸钙预处理后的草莓速冻后冻藏可以保持较好的品质。张延琦等^[18]的研究结果表明, 采用氯化钙 (质量分数为 0.5%) + 柠檬酸 (质量分数为 0.9%) 联合预处理后, 草莓经速冻后可以保持较高的品质。鞠临子等^[19]对草莓进行渗透处理, 经速冻、解冻后, 可提高草莓硬度、减少汁液流失、延缓 Vc 含量降低。胡丽菊等^[20]研究表明, 经质量分数为 20% 的糖溶液预处理 20 min, 草莓的 Vc 损失率最小; 用质量分数为 3% 的 CaCl₂ 溶液预处理 15 min 可明显提高草莓的硬度, 并减少汁液流失。上述研究表明预处理可以使草莓速冻后在冻藏期间保持较好的品质, 但是并未涉及速冻工艺对速冻后草莓营养品质保留的研究。文中采用自制的液氮喷雾式速冻装置对草莓进行速冻实验, 检测对比不同冻结温度下草莓的冻结速率、失水率、色差、Vc 含量和花青素含量等多项指标, 分析冻结温度对草莓品质的影响规律, 以期对草莓液氮速冻的实际应用提供理论参考。

1 实验

1.1 材料与试剂

草莓 (奶油型) 由上海市青浦草莓园提供, 成熟

度为七八成, 且无病虫害及机械损伤、形状大小基本一致。

实验所用的试剂主要有 2,6-二氯酚、草酸、盐酸、甲醇等, 均为分析纯。

1.2 仪器与设备

仪器和设备主要有 YP20002 型电子天平, 上海光大医疗仪器有限公司; WZB 45 型手持式折光仪, 上海仪电物理光学仪器有限公司; DM 6801A 型高精度数显热电偶测温仪, 深圳市驿生胜利科技有限公司; UV-1200 型紫外可见分光光度计, 上海美谱达仪器有限公司; CR-400 色差计, 上海柯尼卡美能达有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 实验装置

实验所用液氮喷雾式速冻装置见图 1, 主要由保温箱体和金属软管连接的液氮罐等 2 部分组成。其工作原理为: 接通电源, 按冻结工艺的要求设定保温箱内温度; 启动装置, 同时打开液氮阀, 液氮由喷嘴喷入箱内, 迅速蒸发使箱体内部快速降温; 当箱体内部温度降到设定温度后, 将摆放有物料的筛板放入箱体内, 低温空气在风机的对流作用下与物料换热, 使其迅速降温冻结。

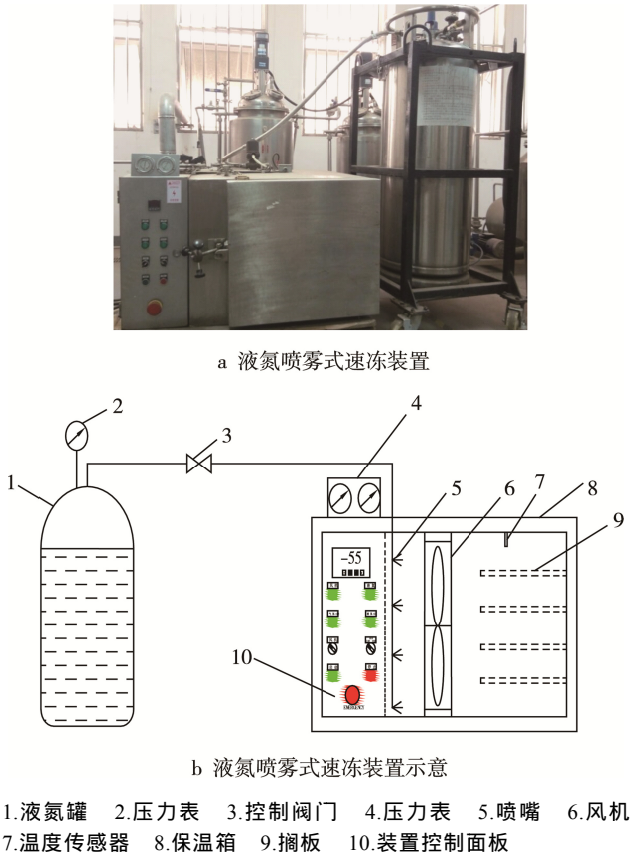


图 1 液氮喷雾式速冻装置
Fig.1 LN₂-spraying quick freezing device

1.3.2 实验设计

将选出的草莓样品编号分成1—8组,每组样品质量为1 kg。第1组作为空白对照,不做处理;第2—7组进行液氮速冻实验,设定冻结温度为 $-40\sim-70\text{ }^{\circ}\text{C}$,间隔 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。启动装置,当箱内温度达到设定温度时,将草莓迅速放进保温箱。用热电偶温度采集仪监测草莓的中心和表面温度,取草莓迎风面和背风面表皮下约3 mm处温度的平均值作为草莓表面温度。草莓摆放方式及温度监测点位置见图2,●为温度监测点。每间隔30 s记录1次草莓的表面温度(t_{s1} 和 t_{s2})和中心温度(t_c),当草莓中心温度达到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,实验结束。

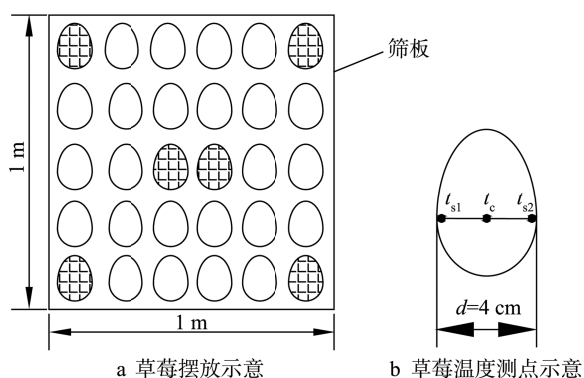


图2 草莓摆放和温度测点示意

Fig.2 Schematic diagram for distribution and temperature measuring point of strawberries

1.4 检测指标及方法

1.4.1 冻结速率

冻结速率 v 按照文献^[21]提出的计算方法进行计算。

$$v = \frac{\delta_0}{\tau_0} \quad (1)$$

式中: δ_0 为食品表面与热中心的最短距离 (cm), 取 $\delta_0 = d/2$, $d = 4\text{ cm}$; τ_0 为食品表面达 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至中心温度达初始冻结点以下 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所需的时间 (h)。

1.4.2 失水率

失水率 w 测定采用称量法。

$$w = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_0 为样品原质量 (g); m_1 为冻结后质量 (g)。

1.4.3 色泽的测定

采用色差仪测定草莓的 L 、 a 和 b 值, 其中 L 值为亮度指数, 从黑 ($L=0$) 到亮 ($L=100$) 的变化; a 值代表颜色从绿色 ($-a$) 到红色 ($+a$) 的变化, b 值代表颜色从蓝色 ($-b$) 到黄色 ($+b$) 的变化^[22]。色差综合偏差量 ΔE 的计算^[23]见式 (3)。

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (3)$$

式中: L 为处理样品的亮度; L_0 为新鲜样品的亮度; a 为处理样品的红度; a_0 为新鲜样品的红度; b 为处理样品的黄度; b_0 为新鲜样品的黄度。

色泽测定时, 随机从每组中挑选 10 个样品, 测定草莓的 L 、 a 和 b 值, 结果取平均值, 用以反映不同处理方法下草莓的色泽差异。

1.4.4 草莓营养指标的测定

Vc 含量采用 2,6-二氯酚靛酚法测定; 可溶性固形物采用手持式折光仪测定, 通过折光率来测定其浓度; 根据总酚物质和花青素甲醇提取液的吸收光谱特性, 再利用紫外可见分光光度计在特定波长下测定其吸光度值, 最后与标准曲线比较计算总酚和花青素的含量。

2 结果与分析

2.1 不同冻结温度对冻结速率和冻结时间的影响

草莓液氮速冻的冻结速率曲线见图3。图3中小写字母 a—g 表示具有显著性差异 ($p < 0.05$)。由图3可知, 冻结温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 冻结速率为 9.75 cm/h ; 随着冻结温度降至 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冻结速率变为 14.87 cm/h , 提高了 19.44% ; 当依次降至 -55 , -60 , -65 , $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 对应的冻结速率分别为 17.02 , 18.36 , 19.21 , 20.00 cm/h , 分别提高了 14.46% , 7.90% , 4.60% , 4.10% 。分析可知, 随着冻结温度的降低, 冻结速率提高, 但冻结速率增幅却逐渐降低。这是由于降低冻结温度, 增大了草莓与周围冷空气的温差, 加快了传热速度, 因此随着冻结温度的降低, 草莓的冻结速率逐渐提高。此外, 草莓速冻降温不仅取决于冻结温度, 还取决于草莓内部的导热能力, 当冻结温度降低到一定程度时, 温差带来的传热动力受到了草莓自身导热能力的限制, 所以冻结速率的增幅逐渐减小。

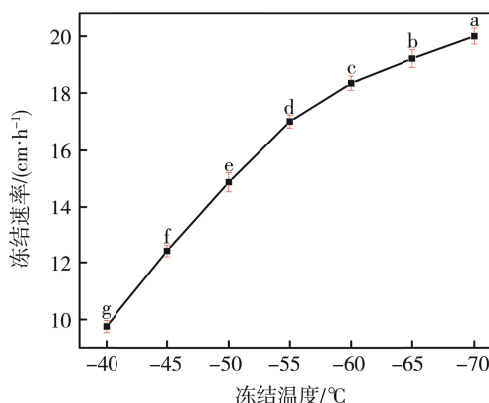


图3 不同冻结温度下草莓的冻结速率

Fig.3 Freezing rate of strawberries under different freezing temperatures

不同冻结温度下草莓液氮速冻曲线见图 4。可以看出，刚开始草莓快速降温，在-1~-3℃之间曲线变化平缓，此段降温速率恒定，不随冻结温度的降低而变化，并占据了整个冻结过程的较长时间，但不同的冻结温度对应的此阶段时间不同，冻结温度越低，该时段越短。此外，产品内部的水分冻结成冰晶主要在此温度段内完成，因此该温度段被称为最大冰晶生成带^[10]。显然，通过此阶段的时间越短，草莓细胞间隙中生成的冰晶颗粒越小，对细胞结构的破坏就越小。由图 4 可知，冻结温度由-40℃依次降低至-70℃时，对应通过最大冰晶生成带的时间分别为 10.6、8.6、7.1、6.1、5.0、4.1、3.5 min，依次缩短的比例为 18.9%、17.4%、14.1%、13.1%、9.4%、4.2%，可见降低冻结温度，速冻草莓通过最大冰晶生成带的时间缩短幅度逐渐变小。综上，建议采用-55℃冻结温度速冻草莓。

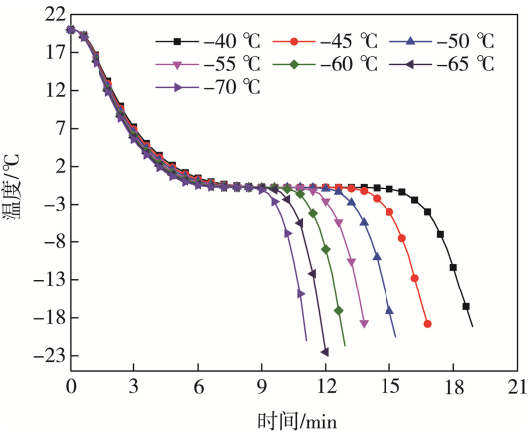


图 4 不同冻结温度下草莓液氮速冻冻结曲线
Fig.4 Freezing curve of LN₂ quick-frozen strawberry under different freezing temperatures

2.2 不同冻结温度对草莓色泽的影响

对照组鲜草莓及液氮速冻后各组草莓色差的测定结果见表 1。与对照组相比，-40~-70℃冻结温度下液氮速冻草莓的 *L* 值显著下降 ($p<0.05$)，*a* 值、*b*

值显著增加 ($p<0.05$)，分析原因可能是由于在速冻过程中，草莓发生了非酶促褐变反应，草莓的亮度下降而引起 *L* 值不同程度的降低；此外，草莓中的花青素可能发生氧化反应，从而使草莓中的红色素含量增加，草莓的 *a* 值增加红度变大；而 *b* 值的显著增加，可能是由于速冻过程中草莓中的蓝色素发生了酶促降解反应，速冻后草莓趋向变黄引起的。随着冻结温度的降低，冻结速率加快，使草莓很快达到了冻藏温度，从而减少了氧化、酶促降解和非酶促褐变反应时间，由此减少了显色物质的损失，所以冻结温度越低，草莓冻结后的色泽越接近鲜果。

表 1 不同冻结温度对草莓色泽的影响
Tab.1 Effect of different freezing temperatures on strawberry color

冻结温度/℃	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	Δ <i>E</i>
未冻结	48.36 ^a	24.56 ^h	21.43 ^e	0
-40	42.53 ^h	29.41 ^a	23.15 ^a	7.78
-45	42.86 ^g	28.52 ^b	22.13 ^b	6.81
-50	43.24 ^f	27.46 ^c	21.65 ^c	5.89
-55	43.68 ^e	26.12 ^d	21.54 ^d	4.93
-60	44.57 ^d	26.01 ^e	21.52 ^d	4.06
-65	45.21 ^c	25.87 ^f	21.48 ^{de}	3.41
-70	46.35 ^b	25.49 ^g	21.45 ^e	2.21

注：同列上标不同小写字母 (a—g) 表示具有显著性差异 ($p<0.05$)

2.3 不同冻结温度对草莓理化指标的影响

草莓液氮速冻后的理化指标检测结果见表 2。由表 2 可知，在草莓液氮速冻的 7 组实验中，失水率在 0.72%~2.85%，差别较大 ($p<0.05$)；可溶性固形物的含量在 10.8%左右，受冻结温度的影响不大。选取 Vc、总酚、失水率及花青素等 4 项指标进行一元二次回归拟合，分析液氮速冻温度对其影响规律。

分别以 Vc、总酚、失水率及花青素等 4 项指标为 *Y* 值，冻结温度为 *X*，利用逐步回归方法，求得回

表 2 草莓液氮喷雾式速冻品质指标检测结果
Tab.2 Quality indexes test results of strawberries' LN₂-spraying quick freezing

冻结温度/℃	失水率/%	Vc 含量/ (mg·(100 g) ⁻¹)	总酚含量/ (mg·g ⁻¹)	花青素含量/ (mg·(100 g) ⁻¹)	可溶性 固形物/%
未冻结	0 ^h	84.12±0.01 ^a	4.26±0.01 ^a	41.35±0.01 ^a	11.2±0.1 ^a
-40	0.72±0.01 ^g	81.74±0.02 ^h	3.32±0.04 ^g	34.01±0.03 ^h	10.1±0.1 ^d
-45	1.21±0.02 ^e	81.89±0.01 ^g	3.43±0.01 ^f	34.56±0.06 ^g	10.3±0.1 ^{cd}
-50	0.88±0.03 ^f	82.73±0.03 ^f	3.56±0.02 ^e	35.02±0.04 ^f	10.6±0.3 ^{bc}
-55	1.84±0.01 ^d	83.68±0.01 ^b	3.68±0.04 ^d	35.78±0.02 ^e	10.8±0.1 ^{ab}
-60	2.23±0.02 ^c	83.56±0.05 ^c	3.71±0.02 ^{cd}	37.86±0.01 ^d	10.9±0.1 ^{ab}
-65	2.71±0.01 ^b	83.47±0.02 ^d	3.75±0.01 ^{bc}	39.32±0.04 ^c	11.0±0.1 ^{ab}
-70	2.85±0.02 ^a	83.25±0.04 ^e	3.80±0.03 ^b	40.47±0.03 ^b	11.0±0.3 ^{ab}

注：同列上标不同小写字母表示具有显著性差异 ($p<0.05$)

归方程如下所示。

$$1) \text{ 失水率 } (\%)。 \\ Y=0.0006X^2-0.0160X-0.8264 \quad (p<0.05) \quad (4)$$

$$2) \text{ Vc 含量 } (\text{mg}/100 \text{ g})。 \\ Y=-0.0041X^2-0.5134X+67.5214 \quad (p<0.05) \quad (5)$$

$$3) \text{ 总酚含量 } (\text{mg}/\text{g})。 \\ Y=-4.4286X^2-0.0646X+1.4357 \quad (p<0.01) \quad (6)$$

$$4) \text{ 花青素 } (\text{mg}/100 \text{ g})。 \\ Y=0.0051X^2+0.3306X+39.0679 \quad (p<0.05) \quad (7)$$

根据回归方程, 得出 Y 对 X ($-70 \sim -50 \text{ } ^\circ\text{C}$) 的影响规律曲线, 见图 5 和图 6。

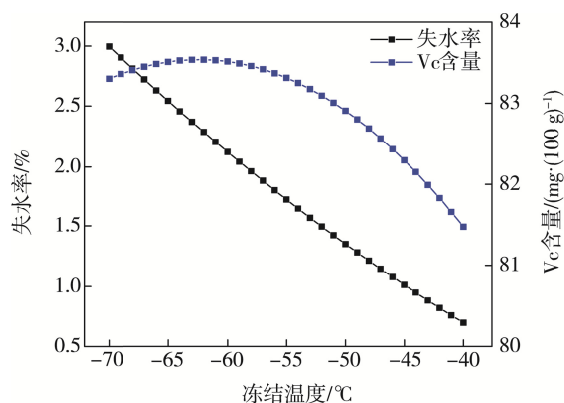


图 5 液氮喷雾式速冻冻结温度对 Vc 和失水率的影响
Fig.5 Effect of LN_2 -spraying quick-freezing temperatures on the Vc and water loss rate

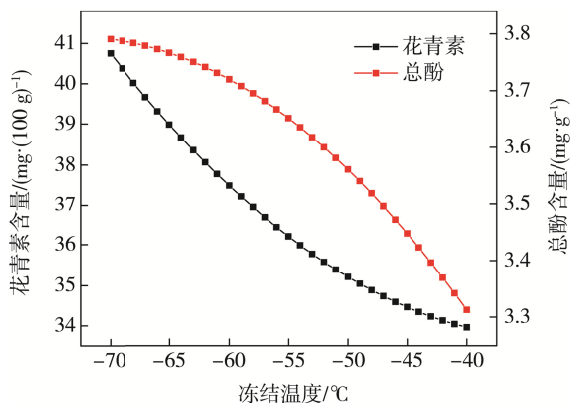


图 6 液氮喷雾式速冻冻结温度对花青素、总酚含量的影响
Fig.6 Effect of LN_2 -spraying quick-freezing temperatures on the anthocyanins and total phenolics

2.3.1 不同冻结温度对 Vc 和失水率的影响

由图 5 可看出, 随着冻结温度的降低, 液氮速冻草莓的 Vc 含量逐渐升高, 当冻结温度低于 $-55 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时, Vc 含量基本稳定在 $83.68 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 左右。这可能是 Vc 具有热敏感性, 冻结温度高对应的草莓冻结速率小, 草莓降温慢, 因此, 相对于低冻结温度 ($-70 \text{ } ^\circ\text{C}$), 高冻结温度 ($-40 \text{ } ^\circ\text{C}$) 增加了 Vc 分解的时间。综上, 冻结温度越低越有利于保留草莓的 Vc 含量。此外, 随着冻结温度的降低, 草莓液氮速冻后的失水率呈现增大的趋势 (见图 5)。这主要是因为冻结温度降低

时, 加大了冻结温差, 导致草莓的换热强度提高, 且在风机的对流作用下加快了草莓水分的蒸发, 从而使草莓在速冻过程中失水量增大。

2.3.2 不同冻结温度对花青素和总酚含量的影响

由花青素的回归方程 ($p<0.05$) 和总酚含量的回归方程 ($p<0.01$) 可得到冻结温度对花青素和总酚含量影响, 见图 6。由图 6 可看出, 在 $-70 \sim -40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 之间, 随着冻结温度的升高, 花青素含量逐渐减少。这主要是因为低温环境下, 多酚氧化酶依然存在一定的活性^[6], 因此在速冻的过程中, 草莓中花青素会发生氧化和酶促反应。当冻结温度高时, 冻结速率低, 从而延长了氧化和酶促反应时间, 因此草莓中花青素的含量有所降低。此外, 随着冻结温度的升高, 草莓总酚含量整体呈下降趋势。据报道^[3], 草莓中酚类物质 (如天竺葵色素、鞣花酸、对香豆酸、槲皮素等) 的稳定性较差, 在冻结过程中易被破坏而分解, 因此速冻后草莓中总酚含量减少。在 $-70 \sim -55 \text{ } ^\circ\text{C}$ 冻结温度区间, 随着冻结温度的降低, 总酚含量增加幅度变缓, 说明仅依靠降低冻结温度来提高草莓速冻后总酚含量的作用有限, 因此还需结合其他影响因素进行分析。

3 结语

文中利用液氮喷雾式速冻装置对草莓进行速冻研究, 分析了不同的冻结温度对草莓冻结速率、色泽、失水率、Vc 及花青素等指标的影响, 得到以下结论。

1) 降低液氮速冻草莓的冻结温度, 可提高其冻结速率, 缩短冻结时间, 但当冻结温度低于 $-55 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时, 继续降低冻结温度, 冻结速率和冻结时间变化幅度变小。

2) 通过对失水率、Vc、花青素和总酚等理化指标的回归分析得出冻结温度对上述指标影响显著。冻结温度越低, 草莓中 Vc、花青素和总酚的保留率越高。然而, 仅靠单一地降低冻结温度, 并不能较好地缩小各项理化指标与鲜果的差距, 具体的影响机理还需进一步研究。

3) 综合分析研究结果, 采用 $-55 \text{ } ^\circ\text{C}$ 液氮速冻草莓, 既可使草莓实现快速冻结, 又能最大限度地保留草莓的营养物质。

参考文献:

- [1] PENG J, WANG S Y, WANG C Y, et al. Effect of Cultural System and Storage Temperature on Antioxidant Capacity and Phenolic Compounds in Strawberries[J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 262—270.
- [2] 严灿. 草莓采后全程冷链保鲜技术研究[D]. 上海:

- 上海海洋大学, 2016.
- YAN Can. Study on Cold Chain Preservation of Post-harvest Strawberry[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [3] OSZMIAN'SKI J, WOJDYLO A, KOLNIAK J. Effect of L-ascorbic Acid, Sugar, Pectin and Freeze-thaw Treatment on Polyphenol Content of Frozen Strawberries[J]. LWT-food Science and Technology, 2009, 42(2): 581—586.
- [4] ABD-ELHADY M. Effect of Citric Acid, Calcium Lactate and Low Temperature Pre-freezing Treatment on the Quality of Frozen Strawberry[J]. Annals of Agricultural Sciences, 2014, 59(1): 69—75.
- [5] 刘菲, 张伟. 草莓贮存保鲜技术的研究进展[J]. 包装工程, 2016, 37(5): 103—109.
- LIU Fei, ZHANG Wei. Research Progress in Strawberry Storage Preservation Technology[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(5): 103—109.
- [6] HOLZWARTH M, KORHUMMEL S, CARLE R, et al. Evaluation of the Effects of Different Freezing and Thawing Methods on Color, Polyphenol and Ascorbic Acid Retention in Strawberries (*Fragaria*×*Ananassa* Duch.)[J]. Food Research International, 2012, 48(1): 241—248.
- [7] BUGGENHOUT S V, MESSAGIE I, MAES V, et al. Minimizing Texture Loss of Frozen Strawberries: Effect of Infusion with Pectinmethylesterase and Calcium Combined with Different Freezing Conditions and Effect of Subsequent Storage/Thawing Conditions[J]. European Food Research & Technology, 2006, 223(3): 395—404.
- [8] DELGADO A E, RUBIOLO A C. Microstructural Changes in Strawberry after Freezing and Thawing Processes[J]. LWT-food Science and Technology, 2005, 38(2): 135—142.
- [9] 余世锋. 液氮速冻技术在食品中应用的研究进展[J]. 食品工业, 2013, 34(1): 150—153.
- YU Shi-feng. Research Progress of the Application of Liquid Nitrogen Quick Freezing Technology in Foods[J]. The Food Industry, 2013, 34(1): 150—153.
- [10] 梁亚星, 陶乐仁, 习德成, 等. 基于液氮喷雾式食品流态化速冻机的青刀豆速冻实验研究[J]. 工程热物理学报, 2006(S2): 37—40.
- LIANG Ya-xing, TAO Le-ren, XI De-cheng, et al. Experimental Analysis of Fast Freezing Green Beans on LN₂-spraying Fluidized Freezer[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006(S2): 37—40.
- [11] 徐振立, 陶乐仁, 谷宇海, 等. 西兰花液氮流态化速冻的实验研究及理论分析[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(2): 49—51.
- XU Zhen-li, TAO Le-ren, GU Yu-hai, et al. Experimental Research and Theoretical Analysis about LN₂-spraying Fluidized Quick Freezing of Broccoli[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(2): 49—51.
- [12] 张庆钢, 陶乐仁, 邓云, 等. 蓝莓液氮式流态化速冻工艺研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(16): 217—222.
- ZHANG Qing-gang, TAO Le-ren, DENG Yun, et al. Study on Quick Freezing Blueberries on LN₂-spraying Fluidized Freezer[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(16): 217—222.
- [13] 张庆钢, 陶乐仁, 邓云, 等. 蓝莓不同冻结方式下工艺特性及贮藏品质的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(4): 348—351.
- ZHANG Qing-gang, TAO Le-ren, DENG Yun, et al. Study of Process Characteristics and Storage Quality of Blueberries under Different Frozen Ways[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(4): 348—351.
- [14] 张庆钢, 陶乐仁, 邓云, 等. 蓝莓流态化速冻工艺及贮藏品质变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(12): 171—176.
- ZHANG Qing-gang, TAO Le-ren, DENG Yun, et al. Process and Storage Quality of Quick Freezing Blueberries in LN₂-spraying Fluidized Freezer[J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(12): 171—176.
- [15] 樊建, 赵天瑞, 覃宇悦, 等. 白灵菇液氮速冻工艺研究[J]. 食品工业科技, 2008(5): 238—240.
- FAN Jian, ZHAO Tian-rui, QIN Yu-yue, et al. Study on Freezing Technology of *Pleurotus Nebrodensis* by Liquid Nitrogen Quick Freezing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008(5): 238—240.
- [16] 樊建, 赵天瑞, 曹建新, 等. 液氮速冻松茸工艺研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(1): 126—129.
- FAN Jian, ZHAO Tian-rui, CAO Jian-xin, et al. Technology for Quick Freezing *Tricholoma Matsutake* with Liquid Nitrogen[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2008, 30(1): 126—129.
- [17] 鞠国泉, 鞠临子, 赵士豪, 等. 乳酸钙处理对速冻草莓品质的影响研究[J]. 农产品加工, 2015(13): 5—7.
- JU Guo-quan, JU Lin-zi, ZHAO Shi-hao, et al. Effects of Calcium Lactate on the Quality of Quick-frozen Strawberry[J]. Farm Products Processing, 2015(13): 5—7.
- [18] 张延琦, 赵金红, 倪元颖. 不同预处理方式对速冻草莓冻藏品质的影响[J]. 食品工业, 2016(5): 145—150.
- ZHANG Yan-qi, ZHAO Jin-hong, NI Yuan-ying. Effect of Different Pre-treatment on the Quality of Frozen Strawberry[J]. The Food Industry, 2016(5): 145—150.

- [19] 鞠临子, 鞠国泉, 刘月英, 等. 速冻草莓渗透处理工艺的研究[J]. 食品研究与开发, 2015(13): 54—57.
JU Lin-zi, JU Guo-quan, LIU Yue-ying, et al. Study on the Infiltrating Process Technology of Quick-frozen Strawberry[J]. Food Research and Development, 2015(13): 54—57.
- [20] 胡丽菊, 孟宪军, 孙希云, 等. 不同预处理方式对冻藏草莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 293—296.
HU Li-ju, MENG Xian-jun, SUN Xi-yun, et al. Effect of Different Pretreatments on the Quality of Frozen Strawberries[J]. Food Science, 2014, 35(22): 293—296.
- [21] 侯佰慧, 张维悦, 夏杨毅, 等. 冻结速率对鸡汤理化及流变特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(2): 81—86.
HOU Bai-hui, ZHANG Wei-yue, XIA Yang-yi, et al. Effect of Different Freezing Rates on the Quality of Chicken Soup[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(2): 81—86.
- [22] 刘雪梅, 孟宪军, 李斌, 等. 不同解冻方法对速冻草莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 276—281.
LIU Xue-mei, MENG Xian-jun, LI Bin, et al. Effects of Different Thawing Methods on Quality Characteristics of Quick-frozen Strawberries[J]. Food Science, 2014, 35(22): 276—281.
- [23] KIM S H, CHOI Y J, LEE H, et al. Physicochemical Properties of Jujube Powder from Air, Vacuum and Freeze Drying and Their Correlations[J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2012, 55(2): 271—279.