

不同冷冻温度对汤圆粉团品质的影响

马骏骅, 陆益钡, 王燕, 陈书洁, 杜童申, 杨留明, 杨华

Effects of Different Freezing Temperatures on the Quality of Rice Dumpling Dough

MA Junhua, LU Yibei, WANG Yan, CHEN Shujie, DU Tongshen, YANG Liuming, and YANG Hua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022080312>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冻结方式对凡纳滨对虾贮藏中组织冰晶及品质的影响

Effect of different freezing methods on the ice crystals and quality of white shrimp(*Penaeus Vannamei*) in the storage

食品工业科技. 2018, 39(5): 280-286 <https://doi.org/>

沙棘原浆冷冻浓缩工艺的响应面优化

Optimization of sea buckthorn juice freeze concentration process

食品工业科技. 2018, 39(1): 143-148,155 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.01.027>

不同温度液氮速冻对斑点叉尾品质的影响

Effect of Liquid Nitrogen Quick Freezing at Different Temperatures on the Quality of Channel Catfish

食品工业科技. 2019, 40(3): 261-267 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.03.041>

党参药材不同干燥方法水分动态过程模拟与分析

Modelling and analysis of the moisture dynamic process of Codonopsis Radix with different drying methods

食品工业科技. 2017(07): 245-249 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.07.040>

超声结合超高压预处理对冻干草莓片品质的影响

Effect of Ultrasound and Ultrahigh Pressure Pretreatment on Quality of Freeze-dried Strawberry Slices

食品工业科技. 2020, 41(14): 15-21,28 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.14.003>

低场核磁共振分析猪肉宰后成熟过程中的水分变化

Analysis of moisture changes of pork during postmortem aging by low-field NMR

食品工业科技. 2017(22): 66-70 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.22.014>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马骏骅, 陆益钡, 王燕, 等. 不同冷冻温度对汤圆粉团品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(23): 29–36. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080312

MA Junhua, LU Yibei, WANG Yan, et al. Effects of Different Freezing Temperatures on the Quality of Rice Dumpling Dough[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(23): 29–36. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080312

· 研究与探讨 ·

不同冷冻温度对汤圆粉团品质的影响

马骏骅¹, 陆益钡¹, 王 燕², 陈书洁³, 杜童申¹, 杨留明¹, 杨 华^{1,*}

(1. 浙江万里学院生物与环境学院, 浙江宁波 315100;

2. 宁波海关技术中心, 浙江宁波 315048;

3. 宁波万力食品有限公司, 浙江宁波 315300)

摘 要: 为探究不同冷冻温度对汤圆粉团品质的影响, 本文以汤圆粉团为对象, 研究-20、-30、-80、-196 ℃ (液氮) 冷冻对汤圆粉团质构特性、失水率、色泽等理化指标的影响。并结合 NMR、MRI、SEM 等分析手段研究汤圆粉团的水分分布状态及微观结构变化。结果表明, 冷冻温度越低, 冻结速率越快。随着冷冻温度的降低, 汤圆粉团的失水率、透光率显著 ($P<0.05$) 改善, 白度变化无显著差异 ($P>0.05$), 质构变化幅度较小。在超低温冷冻下, 汤圆粉团的微观结构更为完整。在冷冻过程中, 汤圆粉团内部水分状态发生改变, 自由水、多层水转变为结合水, 液态水分子减少, 氢质子密度降低。结合实际情况, 冷冻温度低于-30 ℃ 可显著改善汤圆粉团的品质。

关键词: 汤圆粉团, 冷冻温度, 水分, 冰晶

中图分类号: TS205.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)23-0029-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080312

本文网刊:



Effects of Different Freezing Temperatures on the Quality of Rice Dumpling Dough

MA Junhua¹, LU Yibei¹, WANG Yan², CHEN Shujie³, DU Tongshen¹, YANG Liuming¹, YANG Hua^{1,*}

(1. College of Biology and Environment, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China;

2. Ningbo Customs Technology Center, Ningbo 315048, China;

3. Ningbo Wanli Food Co., Ltd., Ningbo 315300, China)

Abstract: To investigate the effects of different freezing temperatures on the quality of rice dumpling dough, this paper investigated the effects of freezing at -20, -30, -80, -196 ℃ (liquid nitrogen) on the physicochemical indexes of rice dumpling dough, such as texture characteristics, water loss rate and color. The water distribution and microstructures of rice dumpling dough were studied by NMR, MRI, SEM and other analytical techniques. The results showed that the lower the freezing temperature, the faster the freezing rate. With the decrease of freezing temperature, the water loss rate and light transmittance of rice dumpling dough improved significantly ($P<0.05$), and there was no significant difference ($P>0.05$) in whiteness, and the magnitude of textural changes was small. The microstructure of the rice dumpling dough was more complete at ultra-low temperature freezing. During the freezing process, the internal water state of the rice dumpling dough was changed, free water and multilayer water were transformed into bound water, liquid water molecules were reduced, and hydrogen proton density was decreased. Combined with the actual situation, the freezing temperature below -30 ℃ could significantly improve the quality of rice dumpling dough.

Key words: rice dumpling dough; freezing temperature; moisture; ice crystals

收稿日期: 2022-08-31

基金项目: 宁波市重点研发计划项目 (2022Z175); 宁波市公益项目 (2021S046, 202002N3114); 浙江省一流学科“生物工程”学生创新项目 (CX2020016)。

作者简介: 马骏骅 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与加工工程, E-mail: moyixiaotian@163.com。

* 通信作者: 杨华 (1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: yanghua@zwwu.edu.cn。

汤圆起源于宁波,是中国传统小吃,备受广大人群的喜爱。目前对于汤圆的研究主要集中在汤圆原料成分创新,改良剂添加以及贮藏条件等研究上^[1]。通过改变汤圆的原料,可以生产出不同口味的汤圆。孔欣欣等^[2]研制了一款水晶桂花速冻汤圆,该汤圆外形美观,风味独特,具有较好的营养价值。王绍文^[3]研究表明添加新型复合改良剂的糯米粉在影响糯米粉糊化特性方面具有积极作用且改善了汤圆的品质。潘治利等^[4]研究发现,不同的冻藏温度对汤圆的含水率、质构和微观结构都有不同的影响。冷冻食品在冻结期间由于干耗、冰晶生长及脂肪氧化等问题,会导致产品的品质下降,且在加工储藏过程中,易发生蛋白质变性、淀粉重结晶等一系列与水分有关的化学变化^[5-7]。汤圆在冻结过程中,内部水分子发生相变,游离水、结合水等转变成冰晶,冰晶的形状与大小对汤圆品质起重要作用^[8]。冰晶的生长、水分的迁移、重结晶等会造成淀粉颗粒的破损及表皮的裂纹,降低汤圆的食用品质。有研究报道水分迁移致使破损淀粉的非结晶部分进行重结晶,且由无序转变为有序结构,同时自由水含量增多,严重降低了组织结构的稳定性^[9]。而汤圆在冻结过程中,起初的冷冻温度较为关键,对冰晶的形成具有决定性作用^[10]。如今,大多数的研究主要集中在汤圆的低温贮藏条件上,而对汤圆的冻结过程研究相对较少。为了提升汤圆的品质,使得汤圆在冻结过程中形成的冰晶尽可能不破坏汤圆的内部组织结构,因此研究不同冷冻温度对汤圆粉团的品质调控具有一定意义。

本文以实验室自制配方的汤圆粉团为对象,设置不同冷冻温度,通过测定其质构特性、色泽等理化指标并结合 NMR、MRI、SEM 等分析手段研究汤圆粉团的水分分布状态、微观结构变化等,揭示冷冻温度对其品质变化的影响及冻结过程中水分状态的分布情况。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

水磨糯米粉 宁波市江北五桥粮油有限责任公司;红薯淀粉、小麦淀粉、娃哈哈纯净水 购于当地超市;鱼源抗冻蛋白(简称抗冻蛋白,AFPs) 河南亿勤生物科技有限公司。

TA-XT Plus 物性分析仪 美国 FTC 公司;JE103 电子天平 上海浦春有限公司;721G 紫外分光光度计 上海菁华科技仪器有限公司;SEM7 冷场高分辨扫描电镜 日本电子株式会社;Micro MR20-025V 核磁共振分析仪 上海纽迈电子科技有限公司;T40W-PT 超低温温度计 wifi 记录仪 华汉维有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 汤圆粉团制作方法 汤圆粉团采用实验室自制配方(糯米粉+红薯淀粉+小麦淀粉+鱼源抗冻蛋白(AFPs))。参照陈瑾^[11]的方法,将原料粉与纯净水混

合,调制面团得到含水量为 45% 的面团。静置 5 min 平衡水分,称量分块,搓圆粉团(为了减少馅料对感官评价等主观指标的影响,因此不包制)。

1.2.2 汤圆粉团的煮制方法 设置电磁炉功率为 1600 W,将水煮沸后,取 5 个汤圆粉团为一组放入 500 mL 沸水中煮制至汤圆粉团浮起。

1.2.3 实验设计 将制作完成的汤圆粉团分别在 -20、-30、-80 °C 冰箱及液氮(-196 °C)中冻结,将超低温温度 wifi 记录仪尖端置于汤圆粉团中心,直至温度降至 -18 °C 后测定透光率、失水率、质构、色泽等理化特性。根据冷冻曲线可知各温度冷冻至 -18 °C 的时间,设定不同的间隔时间检测汤圆粉团中的水分状态及分布。-20 °C 低温冰箱:0、10、20、40、60、100、140 min;-30 °C 低温冰箱:0、10、20、30、40、50 min;-80 °C:0、5、10、15、20 min;液氮(-196 °C)冻结:0、10、20、30、40 s。

1.2.4 冷冻曲线的测定 将制作好的汤圆粉团分别置于各低温冰箱与液氮(浸没)内进行冷冻,将超低温温度 wifi 记录仪尖端放于汤圆粉团的中心部位,每隔 1 s 记录下汤圆粉团的中心温度,得到冻结曲线,计算各温度冷冻至 -18 °C 的时间、速率等^[12]。参考 Olivera 等^[13],冻结速率按照公式(1)计算, T_2 为样品冻结初始温度, T_1 为样品冻结终点温度(-18 °C), (t_2-t_1) 是冻结所需时间, v 是冷冻速率。

$$v = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1} \quad \text{式 (1)}$$

1.2.5 汤圆粉团的品质测定方法

1.2.5.1 透光率的测定 按照 1.2.2 煮制汤圆粉团,将汤圆粉团捞起,锅中的汤水冷却至室温,转移到 500 mL 容量瓶并定容至刻度线。将蒸馏水作为对照,使用紫外分光光度计在 620 nm 处测定其透光率。

1.2.5.2 失水率的测定 对冷冻前的汤圆粉团质量进行称量,再称量经冷冻后的汤圆粉团质量。两者差值即为汤圆粉团损失的水分。按公式(2)计算失水率。

$$\xi(\%) = (X - X_1) / X \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式(2)中: X -冷冻前汤圆粉团的质量,g; X_1 -冷冻后汤圆粉团的质量,g; ξ -速冻汤圆粉团的失水率,%。

1.2.5.3 质构特性(TPA)测定 参考朱津津等^[14]的方法并略作修改,将煮制后的汤圆粉团放置于容器中,1 min 后用质构仪进行 TPA 测试。采用 P/25 探头,应变力为 0.1 N,测试速度为 60 mm/min,形变量为 60%,室温下完成测定。

1.2.5.4 色泽测定 参考陈瑾^[11]的方法并略作修改,使用色差仪进行色泽测定。使用标准比色白板校正仪器,将煮制后的汤圆粉团沥干水分放置于载物台,且完全覆盖感光口,进行测定,记录下 L^* 、 a^* 、 b^* 值。平行三组,取平均值为结果,白度计算公式参照 Parraravivat 等^[15]的方法。其中, L^* :亮度;+ a^* :偏红,- a^* :偏绿;+ b^* :偏黄,- b^* :偏蓝。

$$W=100-\sqrt{(100-L^*)^2+(a^*)^2+(b^*)^2}$$

式 (3)

1.2.5.5 汤圆粉团的扫描电镜分析 参考潘治利等^[4]的方法并略作修改,对冻结后的汤圆粉团进行冷冻干燥,取截面,对样品观察面进行喷金处理,并用双面胶将其固定在样品台上,进行扫描电镜观察拍照。

1.2.5.6 汤圆粉团水分分布的测定 参考白洁^[16]的方法并略作修改。将样品放置于永久磁场射频线圈的中心,进行 CPMG 脉冲序列扫描。且利用反演拟合软件进行反演,得到 T_2 。汤圆粉团的 CPMG 实验采用的参数: TD=60018, NS=8, TW=1200 ms, P2=22 us, TE=0.3 ms, NECH=1000, 利用仪器自带的程序 T2-InvfitGeneral 反演拟合软件进行反演,得到 T_2 弛豫图谱。

1.2.5.7 汤圆粉团冻结过程中水分变化成像测定 参考吴西芝等^[17]的方法,检测得到成像图。参数设置: 重复时间 TR=200 ms, 回波时间 TE=18.2 ms, 单次试验扫描次数 AVERAGE=6, 将得到汤圆粉团的 T2-加权灰度图后进行伪彩处理。

1.3 数据处理

所有数据均取平均值(平行组 $n\geq 3$), 采用 GraphPad 软件作图, SPSS Statistics 软件进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 冷冻曲线的测定

食品的冻结主要分为三个阶段^[18]。第一阶段: 由食品的初始温度降至冻结点温度, 此时放出的热量为显热, 此热量较小, 因此这部分的曲线较陡。第二阶段: 食品从冻结点降至 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 此时食品放出大量的潜热, 大部分水已结成冰, 冻结过程中的大部分热量在此时放出, 因此在该阶段, 降温速度较慢, 曲线相对平缓。第三阶段: 食品从 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右温度继续降至储藏温度。此时放出的热量由两部分组成, 一部分由于食品中冰的继续降温, 另一部分是由于少量残余的水分继续冻结成冰, 因此该阶段的曲线走势也较为陡。图 1 为冷冻粉团各温度的冷冻曲线, 由图可知, 随着冷冻温度越低, 从食品初始温度降至 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$

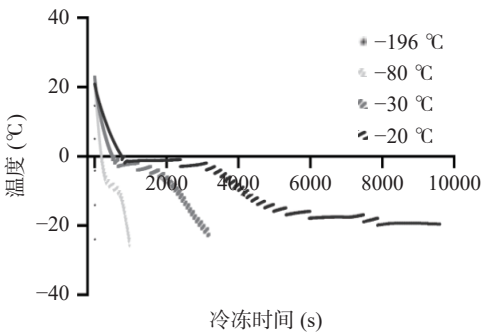


图 1 汤圆粉团在不同温度下的冷冻曲线
Fig.1 Freezing curve of rice dumpling dough at different temperatures

所需时间越短, $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (液氮) 冷冻过程中, 降温幅度最大且速度最快。

由表 1 可知, 冷冻温度越低, 通过最大冰晶生成带的时间则越短。通过最大冰晶生成带的时间与生成的冰晶数量、体积等息息相关。时间越短则生成的冰晶数量越多、体积小且分布均匀, 能有效减少水分迁移现象发生。时间越长则反之, 冰晶生长的速度快于冰核生成的速度, 体积增大, 冰晶的膨胀易导致淀粉颗粒的损伤与蛋白质变性, 进而影响食品品质, 破坏组织结构, 使汤圆表皮开裂。如表 1 所示, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冷冻, 冻结时间最长为 117.22 min, 通过最大冰晶形成带的时间为 60.29 min, 冻结速率为 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$; $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冷冻, 冻结时间为 46.75 min, 通过最大冰晶形成带的时间为 21.33 min, 冻结速率为 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$; $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冷冻, 冻结时间较短为 14.80 min, 通过最大冰晶形成带的时间为 5.02 min, 冻结速率为 $2.68\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$; 液氮冷冻下, 温度骤降, 变化过快, 由于温度检测器灵敏度有限无法测得精确时间, 因此通过多次试验得到大致冻结时间 $<0.9\text{ min}$, 通过最大冰晶形成带时间 $<0.6\text{ min}$, 冻结速率无法精确计算。根据冻结速率可分为三类^[19-20], 分别为慢速冻结 ($0.02\sim 0.20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$)、商业冻结 ($0.2\sim 0.83\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) 和快速冻结 ($>0.83\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$)。由此可见, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冷冻属于商业冻结, -30 、 -80 、 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ (液氮) 属于快速冻结。骆丽君^[12]研究了不同温度下熟面冻结的冷冻速率, 其研究中 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下冻结属于慢速冻结, -30 、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冻结属于商业冻结, -60 、 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下属于快速冻结。两种米面食品相同温度下冷冻速率不同可能是由于汤圆中含有 AFPs, 能够良好地修饰冰晶形状、抑制重结晶, 降低汤圆中水分的流动性, 提高汤圆中的微晶数量和低温稳定性^[21]。顾玲^[22]研究了不同原料粉制成的速冻汤圆粉团在相同温度下的冷冻曲线, 结果表明纯糯米粉冻结最慢、其次是杂粮粉汤圆, 最快的是添加了复合添加剂的汤圆, 原因是杂粮粉吸水能力强, 而添加剂会吸附水分使未冻结相粘度上升, 并减少了溶质分子的自由体积, 降低了冰晶的线生长率, 与本实验中 AFPs 的添加试验结果基本吻合。

表 1 不同冷冻温度下汤圆粉团的冻结时间与速率

Table 1 Freezing time and rate of rice dumpling dough at different freezing temperatures

冷冻温度 ($^{\circ}\text{C}$)	冻结时间 (min)	通过最大冰晶形成带时间 (min)	冻结速率 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
-20	117.22 $\pm$ 10.47 ^d	60.29 $\pm$ 2.49 ^d	0.34 $\pm$ 0.03 ^c
-30	46.75 $\pm$ 1.18 ^c	21.33 $\pm$ 0.84 ^c	0.85 $\pm$ 0.03 ^b
-80	14.80 $\pm$ 0.59 ^b	5.02 $\pm$ 0.97 ^b	2.68 $\pm$ 0.11 ^a
-196(液氮)	<0.9 ^a	<0.6 ^a	-

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 不同冷冻温度对汤圆粉团品质的影响

2.2.1 不同冷冻温度对汤圆粉团透光率的影响 不

同冷冻温度对汤圆粉团透光率的影响如图 2 所示。液氮及 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冷冻后的汤圆粉团经煮制后汤汁透光率较高,与 -30 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻有显著差异($P<0.05$)。说明煮制后汤圆粉团表皮掉粉率较少,可能是由于超低温冻结,粉团内形成均匀细小的冰晶对淀粉颗粒无明显损伤,而使破损淀粉率降低,煮制时流入汤汁中的粉质颗粒较少,汤汁较为清澈,提高了食用品质。黄忠民等^[23]发现低温冰箱冻结、螺旋隧道冻结和液氮冻结这 3 种不同冻结方式对汤汁透光率有显著影响,液氮冻结下汤汁中沉淀物最少,透光率最高,品质最好,而冻结温度较高的低温冰箱冻结煮制时掉粉情况严重,导致透光率最低,与本实验结果相符。

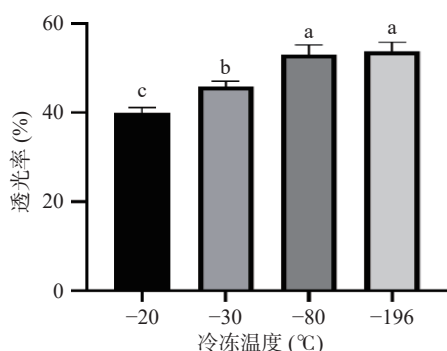


图 2 冷冻温度对汤圆粉团透光率的影响

Fig.2 Effect of freezing temperature on light transmittance of rice dumpling dough

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$);图 3~图 5 同。

2.2.2 不同冷冻温度对汤圆粉团失水率的影响 图 3 为不同冷冻温度下汤圆粉团失水率的变化。如图所示,经 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻后的失水率为 1.202%, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下失水率为 1.199%,无明显差异($P>0.05$)。 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、液氮下的失水率分别为 0.757%、0.157%,有显著差异($P<0.05$)。由此可知,失水率随着冷冻温度的降低而减少,在超低温下,失水率极低。失水率主要表征冷冻过程中水分的散失,冷冻过程中汤圆粉团水蒸气压处于饱和,冻藏环境水蒸气压处于不饱和,由此产生的水蒸气压差,使得冰晶升华。而超低温可能对水分子的束缚能力较大,抑制了水分迁移,减少冰晶的升华,降低了干耗损失,因此失水率较小。黄忠民等^[23]

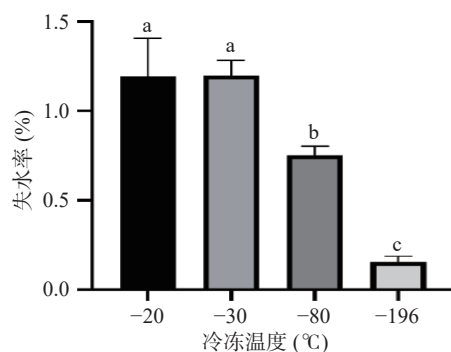


图 3 冷冻温度对汤圆粉团失水率的影响

Fig.3 Effect of freezing temperature on water loss rate of rice dumpling dough

研究了普通低温冰箱、螺旋隧道冻结与液氮冻结等方式对速冻汤圆品质的影响,其失水率大小排序为低温冰箱冻结>螺旋隧道冻结>液氮冻结,从温度梯度上,与本实验结论相符。骆洋翔^[24]研究了 -5 、 -15 、 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏对速冻汤圆失水率的影响,结果表明失水率随温度降低而减小, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏温度相对较高,样品内外温度梯度较大,水分子移动强,与本次结果一致。

2.2.3 不同冷冻温度对汤圆粉团质构特性的影响

图 4 为不同冷冻温度对汤圆粉团弹性、胶黏性、咀嚼性的影响。由图可知,各冷冻温度对汤圆粉团质构特性无明显规律影响。弹性:液氮冷冻条件下弹性较大与 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 组有显著差异($P<0.05$),其余组间无显著差异($P>0.05$);胶黏性:液氮、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻后的汤圆胶黏性较大, -30 、 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷冻下胶黏性较小且组间无显著差异;咀嚼性:液氮冷冻后的汤圆咀嚼性较大,与其余组有显著差异($P<0.05$)。Selomulyo 等^[25]研究指出冻结过程中冰晶越大,对面团组织结构破坏性越

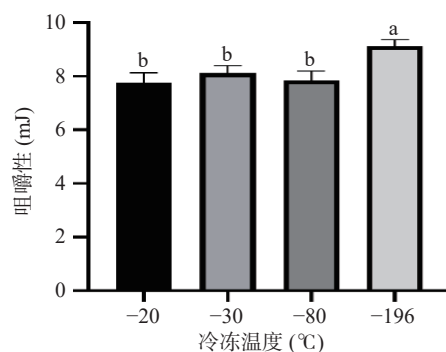
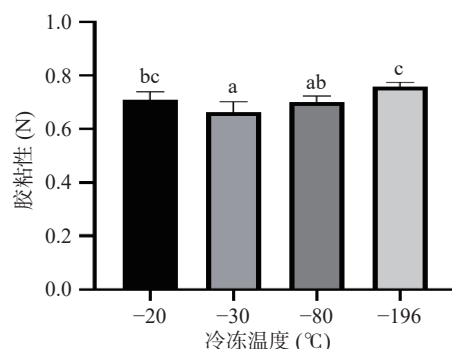
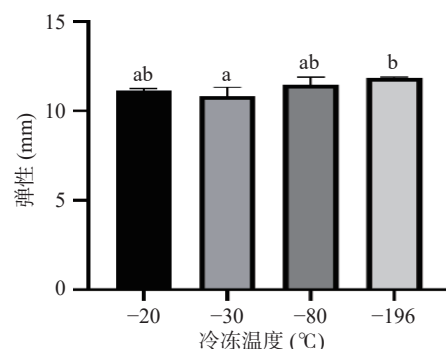


图 4 冷冻温度对汤圆粉团质构特性的影响

Fig.4 Effect of freezing temperature on texture characteristics of rice dumpling dough

强,严重影响淀粉与水的结合作用,造成样品弹性、回复性降低。液氮冻结下冰晶形成小且均匀,弹性较大,与其结论一致。黄忠民等^[23]研究发现,液氮冻结的汤圆弹性要显著大于低温冰箱冻结和螺旋隧道冻结,与本实验结果相一致。

2.2.4 不同冷冻温度对汤圆粉团白度的影响 不同冷冻温度对汤圆粉团白度的影响如图 5 所示。混料粉制成汤圆粉团白度值较高,表皮白皙透亮,各冷冻温度对其色泽无明显影响,其结果无显著差异($P>0.05$)。淀粉的老化会对色泽造成重要影响,老化严重时,汤圆表皮泛黄,影响食用品质,但本实验中由于冷冻温度较低,不易发生老化现象,因此白度不受冷冻温度的影响,推测可能与原材料有关。据研究,馒头白度与储藏温度有关,在 $-10\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随温度升高而降低^[26]。其原因可能是由于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,淀粉老化速率上升,对白度产生影响,这与本实验设置温度有较大的出入,因此结果不同。

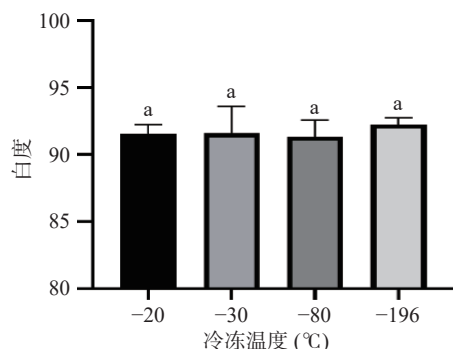


图 5 冷冻温度对汤圆粉团白度的影响

Fig.5 Effect of freezing temperature on whiteness of rice dumpling dough

2.2.5 不同冷冻温度对汤圆粉团微观特性的影响

冷冻温度对汤圆粉团微观特性的影响如图 6 所示。

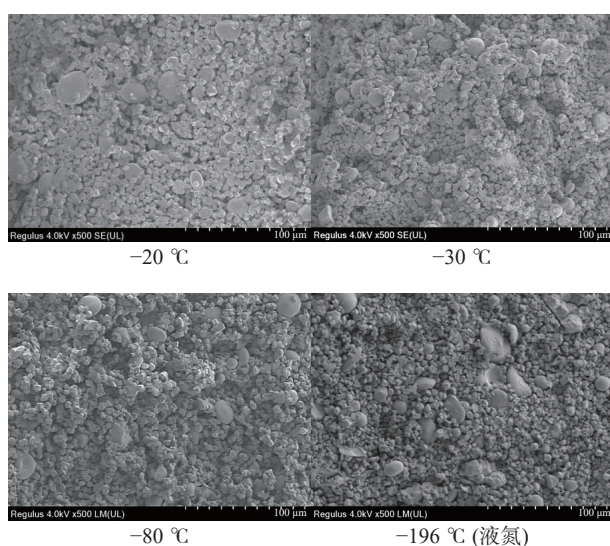


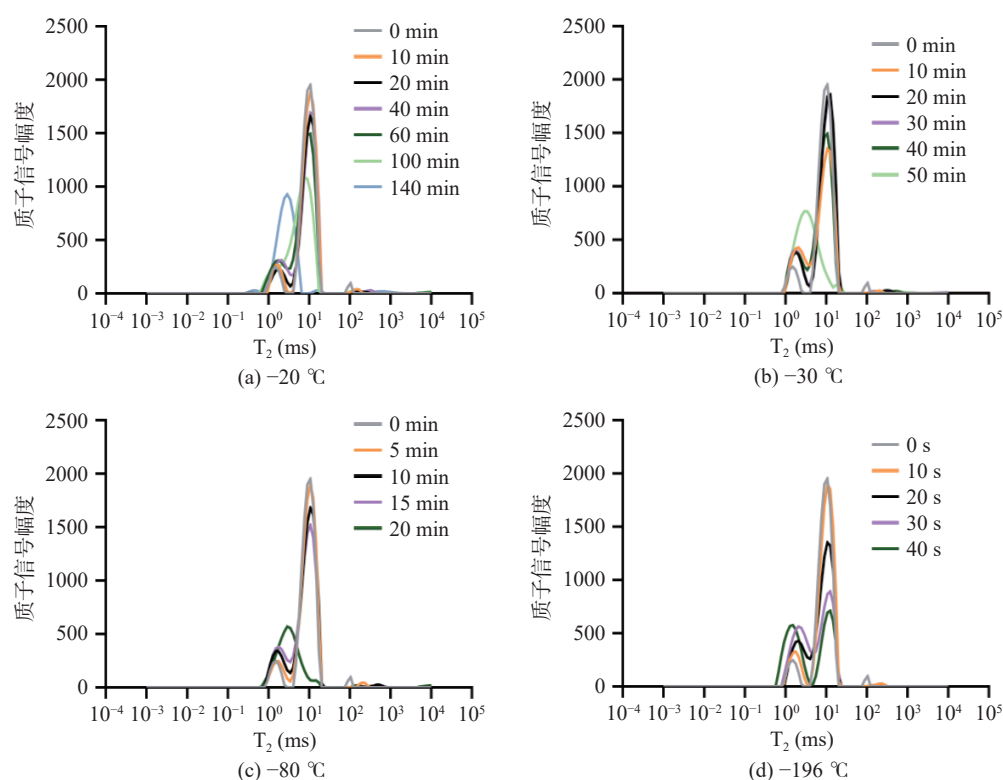
图 6 冷冻温度对汤圆粉团微观特性的影响(500×)

Fig.6 Effect of freezing temperature on the microscopic characteristics of rice dumpling dough (500×)

$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻结处理后,汤圆粉团表皮出现了细小的孔洞,淀粉颗粒间结构分散,可能是由于冻结过程中产生了大量冰晶且体积较大,汤圆粉团表皮组织被破坏。 -30 、 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下冷冻后的汤圆粉团观察面淀粉颗粒完整,连接较为紧凑且无明显孔缝,可能是由于冷冻速率增快,未形成具有破坏性的大冰晶,结构组织较为完整。液氮冷冻下,冷冻速率过快,冰晶快速通过最大冰晶生成带,粉团内部淀粉颗粒排布紧密、且相对平整,结构组织致密,优于前者组。刘燕^[27]研究了液氮、螺旋隧道、 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱三种不同温度冻结对鱼丸内部冰晶的分布情况,结果表明液氮冻结组冰晶颗粒小,为杆状,分布均匀,其余两组形成的冰晶均大小不一且分布散乱,侧面反映了对组织的破坏程度大,与本实验结果基本一致。有研究报道,冻藏温度越高且时间越久,淀粉颗粒个体越易出现差异,破损淀粉嵌入组织结构,严重影响食品质构特性^[28]。

2.2.6 不同冷冻温度对汤圆粉团水分分布的影响

在汤圆冻结过程中内部水分发生变化,冰晶的产生会影响汤圆的质量。而低场核磁共振技术能够在不损伤组织的情况下,直观地表现出水分状态,能够有效反映水分迁移情况。图 7 表示汤圆粉团在不同冷冻温度下 T_2 图谱的变化,由图 7 可知 T_2 图谱中主要有 3 个特征峰。 T_{21} 代表结合水,能与蛋白质大分子表面极性基团相紧密结合^[29]。 T_{22} 代表多层水,能与粉团中糖类、淀粉等组分相结合,其结合力较弱但强于自由水^[30]。 T_{23} 代表自由水,不与任何组分相结合,流动性最强^[31]。由图 7 可知,汤圆 T_{21} 幅度峰值随着冷冻时间的增加而增大, T_{22} 幅度峰值随着冷冻时间增加而减小, T_{23} 自由水在未冷冻时具有较小幅度峰值,后续随着冷冻时间增加不断减小趋于为 0。信号幅度降低说明水分活度下降,自由水被冻结转换为多层水,多层水迁移转变为结合水,使得 T_{21} 增大, T_{22} 、 T_{23} 减小,该结果与白洁^[16]研究一致。可能是由于在水分冻结过程中,多层水遇冷转变为过冷水,过冷水的流动性类似于同大分子物质相结合的水,弛豫性质相同,故而导致多层水迁移转变为结合水。从图中可以看出在不同冷冻温度下冷冻时间最长时,液氮 40 s 时其 T_{21} 大于其余 3 组。可能是由于液氮冷却过程快,时间短,外部温度较低,而内部温度分布不均匀引起,内部温度均匀稳定性低于低温冰箱冷冻。且当每组冷冻时间最长时,冷冻温度越低, T_{22} 越小,可能是已转为冰晶的多层水由于低温造成不同程度的冷冻干耗,温度越低,干耗损失越大。有研究表明面团中深层结合水的含量增大有利于抑制冷冻面团中冰晶的生成,能有效提高生产质量^[17]。有相关文献报道水分迁移与温度波动有较大关联,温度发生波动变化使得结合水氢键不再牢固,结合水向多层水迁移,多层水则向自由水方向迁移使得冰晶生长,汤圆粉团失水率增大,干耗加重^[4]。

图7 不同冷冻温度条件下 T_2 弛豫图谱随冷冻时间的变化Fig.7 Changes in T_2 relaxation spectra with freezing time under different freezing temperature conditions

2.2.7 不同冷冻温度下汤圆粉团水分冻结成像变化

图8 为不同冷冻温度过程中水分冻结成像的变

化。由于不同温度中心点到达 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间不一致,因此其选取时间间隔点也有所不同。MRI(核磁

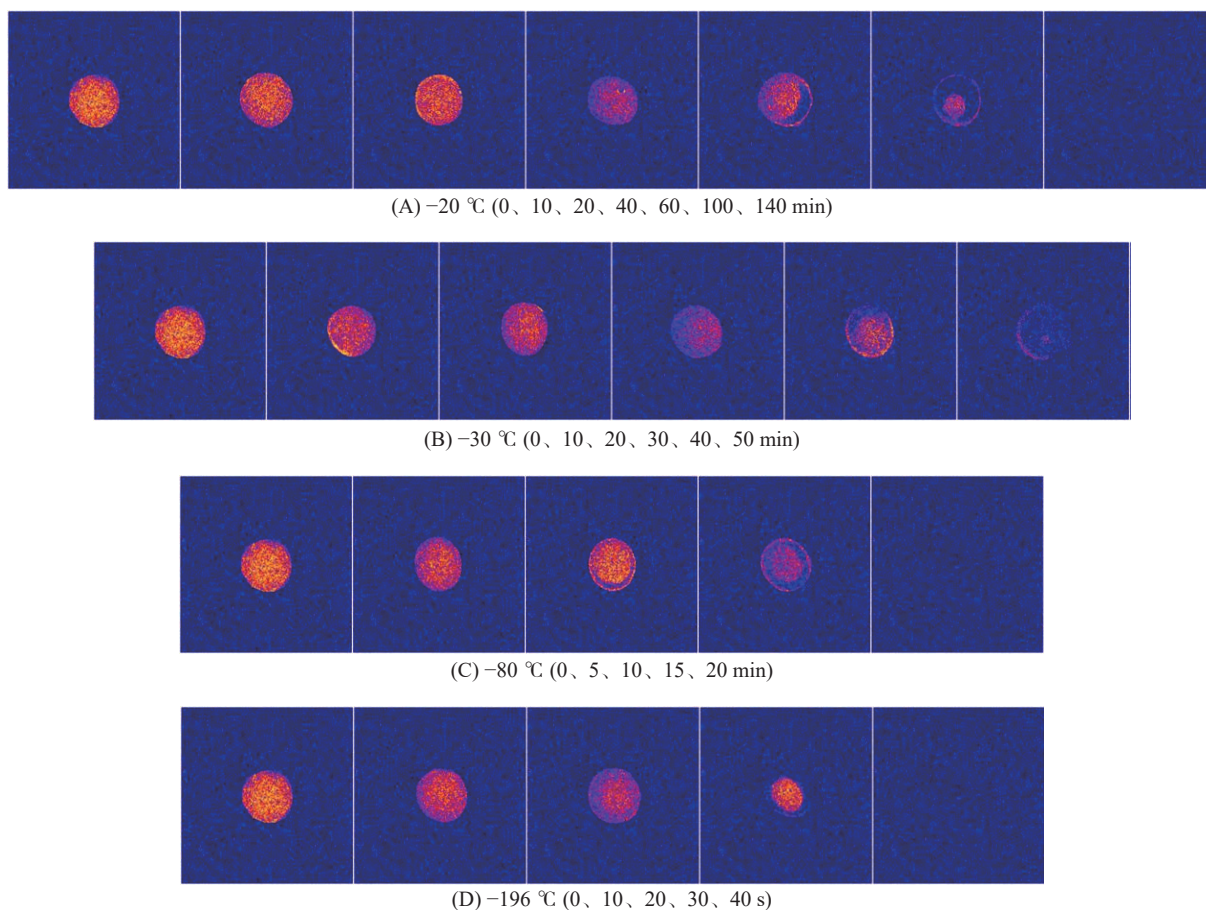


图8 不同冷冻温度下汤圆粉团水分冻结成像的变化

Fig.8 Changes of water freezing imaging of rice dumpling dough at different freezing temperatures

共振成像)技术可以在不损坏样品组织的情况下, 准确地反映出其水分的分布。如图所见, 测定了各温度下不同阶段汤圆粉团的氢质子密度图像($^1\text{H MRI}$), 图像彩色区域越亮说明信号越强, 氢质子密度较高, 反之则信号较弱且密度低。由图可知, 水分在冻结过程中并非均匀有规律。冷冻前期, 汤圆粉团未冻结, 图像中彩色明显, 充满了液态可移动的水分子。冷冻中期, 彩色逐渐消失, 水分子从外部开始冻结, 图中外圈有彩色存在可能是由于检测过程需要一定时间, 导致外部表皮开始融化。冷冻后期几乎检测不到信号, 图中亮色消失, 说明汤圆粉团中几乎没有液态水分子存在。观察图 8A~图 8C 可知, 冷冻时间相同均为 20 min 时, 温度越低则冻结效果越好, 氢质子密度低。该检测结果揭示了冻结过程中微观上水分的分布情况, 对探讨冰晶分布对速冻食品的影响有一定意义。吴西芝等^[17]运用 MRI 图像显示了面团的解冻过程, 温度过低检测不到信号, 图像接近全黑色, 未有亮色在其中, 随着温度上升直至完全解冻, 白色越来越鲜明, 氢质子自由度增大, 与本实验图像规律一致。孟可心^[32]研究了亚冻结温度对面团水分分布的影响, 研究表明亚冻结温度(-9、-12 °C)面团的氢质子密度图像较其余温度(4、0、-3、-6 °C)面团的亮度低, 与本实验相同冷冻时间下温度越低氢质子密度越低的结论基本一致。

3 结论

由本实验可知, 不同冷冻温度对汤圆粉团品质有一定的影响。冷冻温度越低, 冻结速率越快, 失水率越低, 透光率越高, 白度无明显变化, 质构变化较小。从微观角度, 与低温冰箱相比液氮冻结下整体最为完整, 淀粉颗粒连接紧凑, 受冰晶影响小。在冷冻过程中, 水分活度下降, 自由水被冻结转换为多层水, 多层水迁移转变为结合水, T_{21} 增大, T_{22} 、 T_{23} 减小。且冷冻时间越长, 液态水分子越少, 氢质子密度越低。综上所述, 冻结效果优劣排序为: 液氮>-80 °C>-30 °C>-20 °C。液氮作为一种新型冷冻技术, 目前广泛应用于食品保藏中且效果较好, 但由于其成本较高, 应用的食物种类较少。从实际应用考虑, 初始冷冻温度应不高于-30 °C, 由此可改善汤圆冻藏过程中的裂变情况。本文可为速冻米面制品冷冻保藏提供一定理论支持。

参考文献

- [1] 岳彩虹, 何秀丽, 黄太金, 等. 速冻汤圆的研究现状及发展趋势[J]. *农产品加工*, 2021(1): 75-77, 82. [YUE C H, HE X L, HUANG T J et al. Research status and development trend of quick frozen rice dumpling[J]. *Agrotechny*, 2021(1): 75-77, 82.]
- [2] 孔欣欣, 郭楠楠. 水晶桂花速冻汤圆配方的研制[J]. *食品与发酵科技*, 2017, 53(1): 115-119. [KONG X X, GUO N N. Preparation of crystal osmanthus quick frozen rice dumpling formula[J]. *Food and Fermentation Technology*, 2017, 53(1): 115-119.]
- [3] 王绍文. 复合食品改良剂对不同糯米粉糊化特性及汤圆品质的影响[J]. *粮食与食品工业*, 2016, 23(2): 66-69. [WANG S

- W. Effects of compound food modifiers on gelatinization characteristics of different glutinous rice flour and quality of rice dumpling[J]. *Grain and Food Industry*, 2016, 23(2): 66-69.]
- [4] 潘治利, 骆洋翔, 艾志录, 等. 不同冻藏温度条件下速冻汤圆品质变化及其机制[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(21): 304-310. [PAN Z L, LUO Y X, AI Z L, et al. Quality change and mechanism of quick frozen rice dumpling under different freezing storage temperatures[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2018, 34(21): 304-310.]
- [5] 王盼, 张坤生, 任云霞. 速冻水饺贮存过程中品质变化研究[J]. *食品研究与开发*, 2012, 33(12): 197-201. [WANG P, ZHANG K S, REN Y X. Study on quality changes of quick-frozen dumplings during storage[J]. *Food Research and Development*, 2012, 33(12): 197-201.]
- [6] 潘治利, 黄忠民, 王娜, 等. BP 神经网络结合有效积温预测速冻水饺变温冷藏货架期[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(22): 276-281. [PAN Z L, HUANG Z M, WANG N, et al. Prediction of the shelf life of quick-frozen dumplings under variable temperature storage using BP neural network combined with effective accumulated temperature[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 276-281.]
- [7] LAI L S, KOKINI J L. The effect of extrusion operating conditions on the on-line apparent viscosity of 98% Amylopectin (Amioca) and 70% Amylose (Hylon 7) corn starches during extrusion[J]. *Journal of Rheology*, 1990, 34(8): 1245-1266.
- [8] OLAFSDOTTIR G, LAUZON H L, MARTINSDOTTIR E, et al. Evaluation of shelf life of Superchilled Cod (*Gadus morhua*) fillets and the influence of temperature fluctuations during storage on microbial and chemical quality indicators[J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71(2): S97-S109.
- [9] 宋宏光, 刘长虹. 馒头贮存过程中理化指标变化的研究[J]. *粮油加工与食品机械*, 2005(2): 70-72. [SONG H G, LIU C H. Study on changes of physical and chemical indexes of Mantou during storage[J]. *Grain and Oil processing and Food Machinery*, 2005(2): 70-72.]
- [10] 金枝, 关志强, 李敏. 预冷温度对冰温罗非鱼片品质的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(9): 135-140, 180. [JIN Z, GUAN Z Q, LI M. Effect of pre cooling temperature on the quality of chilled tilapia fillets[J]. *Food and Machinery*, 2019, 35(9): 135-140, 180.]
- [11] 陈瑾. 速冻汤圆品质与糯米粉粉质相关性及其糯米粉配粉研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023. [CHEN J. Study on the correlation between the quality of quick frozen rice dumpling and glutinous rice flour and the Blending of glutinous rice flour [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.]
- [12] 骆丽君. 冷冻熟面加工工艺对其品质影响的机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [LUO L J. Study on the mechanism of the effect of processing technology on the quality of frozen cooked noodle [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]
- [13] OLIVERA D F, SALVADORI V O. Effect of freezing rate in textural and rheological characteristics of frozen cooked organic pasta[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 90(2): 271-276.
- [14] 朱津津, 潘治利, 谢新华, 等. 汤圆 TPA 质构特性测试条件的优化[J]. *食品科学*, 2013, 34(6): 171-174. [ZHU J J, PAN Z L, XIE X H, et al. Optimization of testing conditions for texture characteristics of quick frozen rice dumpling TPA[J]. *Food Science*, 2013, 34(6): 171-174.]
- [15] PATTARAVIVAT J, MORIOKA K, SHIROSAKI M, et al. Effect of washing conditions on the removal of lipid from the Fatty Fish Escolar (*Lepidocybium flavobrunneum*) meat[J]. *Journal of*

Biological Sciences, 2008, 8(1): 47-52.

- [16] 白洁. 低温条件下汤圆粉团中水分状态及品质变化研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013. [BAI J. Study on water state and quality change of rice dumpling flour at low temperature[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013.]
- [17] 吴酉芝, 刘宝林. NMR 分析冷冻面团在低温下的水份特性[J]. 制冷学报, 2013, 34(1): 97-102. [WU Y Z, LIU B L. NMR analysis of the moisture characteristics of frozen dough at low temperatures[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(1): 97-102.]
- [18] 刘朝华. 形状规则食品冻结过程的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005. [LIU C H. Research on the freezing process of regularly shaped food[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.]
- [19] 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.
- [20] BROWN M H. Microbiological aspects of frozen foods [M]. Food Freezing: Today and Tomorrow, 1991: 15-25.
- [21] 娄爱华, 杨沁泉. 添加剂对冷冻水饺品质的影响[J]. 食品工业科技, 2004(8): 73-74. [LOU A H, YANG M Q. Effect of additives on the quality of frozen dumplings[J]. Science and Technology of Food Industry, 2004(8): 73-74.]
- [22] 顾玲. 速冻汤圆粉团品质改良的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [GU L. Study on quality improvement of quick-frozen rice dumpling dough[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]
- [23] 黄忠民, 赵蒙蛟, 黄婉婧, 等. 不同冻结方式对汤圆品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 44-48. [HUANG Z M, ZHAO M J, HUANG W Q, et al. Effects of different freezing methods on quality characteristics of rice dumpling[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(6): 44-48.]
- [24] 骆洋翔. 速冻汤圆贮藏及流通过程中品质变化及货架期预测研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019. [LUO Y X. Study on quality change and shelf life prediction of quick frozen rice dumpling during storage and circulation[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019.]
- [25] SELOMULYO V O, ZHOU W. Frozen bread dough: Effects of freezing storage and dough improvers[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 45(1): 1-17.
- [26] 裴艳花. 馒头白度研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011. [CHANG Y H. Study on whiteness of Mantou[D]. Zhengzhou: Henan Technology University, 2011.]
- [27] 刘燕. 液氮沉浸式冻结对鱼丸品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017. [LIU Y. Effect of liquid nitrogen immersion freezing on the quality of fish balls[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017.]
- [28] 任欣, 李小婷, 沈群. 冷冻贮藏环境对速冻水饺皮品质特性的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 263-271. [REN X, LI X T, SHEN Q. Effect of freezing storage environment on quality characteristics of quick-frozen dumpling skin[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2014, 30(6): 263-271.]
- [29] 肖东, 周文化, 陈帅, 等. 亲水多糖对鲜湿面货架期内水分迁移及老化进程的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 298-303. [XIAO D, ZHOU W H, CHEN S, et al. Effects of hydrophilic polysaccharides on water migration and aging process of fresh and wet noodles during shelf life[J]. Food Science, 2016, 37(18): 298-303.]
- [30] SONG P, YANG T, WANG C, et al. Analysis of moisture changes during rice seed soaking process using low-field NMR[J]. Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31: 279-84.
- [31] CHENG S, ZHANG T, YAO L, et al. Use of low field-NMR and MRI to characterize water mobility and distribution in Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) during drying process[J]. Drying Technology, 2017, 36.
- [32] 孟可心. 面团亚冻结贮藏品质变化与水分迁移机制研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2021. [MENG K X. Study on the quality changing and water migration mechanism of dough in subfreezing preservation[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2021.]