



许可,邱国栋,李星科,等.冻藏时间对面团水分物态变化及品质特性的影响[J].轻工学报,2021,36(1):9-16.

XU K, QIU G D, LI X K, et al. Effect of frozen storage time on water transformation and quality characteristics of dough[J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(1): 9-16. DOI: 10.12187/2021.01.002

中图分类号: TS201.1 文献标识码: A 文章编号: 2096-1553(2021)01-0009-08

冻藏时间对面团水分物态变化及品质特性的影响

Effect of frozen storage time on water transformation and quality characteristics of dough

许可¹, 邱国栋¹, 李星科^{1,2,3}, 王宏伟^{1,2,3}, 刘兴丽^{1,2,3},
张艳艳^{1,2,3}, 张华^{1,2,3}

XU Ke¹, QIU Guodong¹, LI Xingke^{1,2,3}, WANG Hongwei^{1,2,3}, LIU Xingli^{1,2,3},
ZHANG Yanyan^{1,2,3}, ZHANG Hua^{1,2,3}

1. 郑州轻工业大学 食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 食品生产与安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001;
3. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室, 河南 郑州 450001

1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. He'nan Collaborative Innovation Center of Food Production and Safety, Zhengzhou 450001, China;
3. He'nan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou 450001, China

关键词:

冷冻面团; 水分分布;
热力学特性; 质构特性;
主成分分析

Key words:

frozen dough;
water distribution;
thermal characteristics;
texture characteristics;
principal component
analysis

摘要:研究了不同冻藏时间(0 d、10 d、20 d、30 d)对面团中可冻结水含量(F_w)、水分分布及存在状态、热力学特性和质构特性的影响,并通过主成分分析和相关性分析探究它们之间的相关性。结果表明:随着冻藏时间的延长,面团的水分物态发生了显著改变, F_w 、强结合水含量(A_{21})和自由水含量(A_{23})增加,弱结合水(T_{22})和自由水(T_{23})的横向弛豫时间均向左偏移;冻藏后面团的热稳定性(T_0 、 T_c 和 ΔH)提高,硬度和黏附性和咀嚼性增加,内聚性降低;冻藏期间面团内部水分物态和热力学特性的变化会引起面团质构特性 PC1 变化值的提高,从而导致面团品质劣变。

收稿日期:2020-09-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0400604-02);河南省自然科学基金项目(182300410067);郑州市重大科技专项项目(188PCXZX805)

作者简介:许可(1995—),女,河南省信阳市人,郑州轻工业大学硕士研究生,主要研究方向为食品工程。

通信作者:张华(1975—),男,河南省郑州市人,郑州轻工业大学教授,博士,主要研究方向为速冻食品加工与安全控制。

Abstract: The effects of different freezing storage time (0 d, 10 d, 20 d, 30 d) on the water content (F_w), water distribution and existence state, thermodynamic characteristics and texture characteristics in the dough were studied. And the correlation between them was explored through principal component analysis and correlation analysis. The results showed that the moisture state of the dough changed significantly with the increase of the frozen storage time. F_w , strongly-bound water content (A_{21}) and free water (A_{23}) increased, the lateral relaxation time of weakly-bound water (T_{22}) and free water (T_{23}) in the dough shifted to the left. After frozen storage, the thermal stability (T_o , T_c and ΔH) of the dough was improved, the hardness, gumminess and chewiness were increased, and the cohesiveness was reduced. The change of the internal moisture and thermal characteristics of the dough during the frozen storage period caused the improvement of the change value of the dough texture properties PC1, which represented the dough quality deteriorated.

0 引言

冷冻面团是指以面粉为主要原料,经过揉制加工形成面胚后,速冻形成的面制品半成品。冷冻面团需在低温下冻藏,待需要时解冻,经过后续加工工艺制成目标面制品成品^[1]。近年来,冷冻面团以其安全、方便、成本低等优点受到业界广泛关注,逐渐成为面制品(面包、馒头、饺子等)工业标准化和规模化生产的关键技术手段^[2-3]。然而,研究表明,面团在冻藏过程中会产生一系列不良的变化,具体表现为硬度增大、发酵时间延长、气体滞留性差、体积缩小等,这会导致产品品质劣变,进而制约冷冻面制品的发展。究其原因,主要是由面团内部水分含量、水分存在状态、水分分布等水分物态变化造成的^[4-5]。面团在冻藏过程中,其内部水分的迁移和冰晶的重结晶可破坏面筋蛋白、淀粉等大分子聚合物的组织结构,从而对面制品的物化性质、质构特性、感官品质等产生影响^[6-8]。

目前,研究人员对面团及其加工制品在冻藏期间品质劣变的机制已做了大量研究,主要集中在面筋蛋白结构转变和酵母活性降低方面^[9-10]。P. Wang等^[9]研究冷冻馒头品质变化发现,面筋大分子聚合物的解聚会导致冷冻面团弹性和气体保持能力减弱,这也是造成冷冻馒头品质下降的重要原因。杨静洁等^[10]研究不同冻藏温度下面团中蛋白质结构变化发现,随

着贮藏温度的降低,冷冻面团中单体蛋白、游离巯基、 β -折叠和无规则卷曲含量降低, α -螺旋和谷蛋白大聚体含量增加,且谷蛋白大聚体的聚合程度增加;较低的冻藏温度能降低非发酵面团中蛋白的解聚程度,对稳定面团的质构特性具有积极作用。此外,酵母的发酵产气能力将直接影响冷冻面团的品质。Y. He等^[11]研究表明,随着冻藏时间的延长,酵母细胞的总量和活性逐渐降低,低温甚至会导致酵母细胞死亡,其产气能力逐渐下降,最终影响冷冻面团及其制品的品质。上述冷冻面团的发酵特性和面筋网络结构的破坏源于自由水形成的冰晶及重结晶,即冷冻面团内的水分状态及分布是导致冷冻面团品质劣变的根本原因,因此,研究冷冻食品中水分物态的变化情况非常必要。

为了探究冷冻面团水分物态变化对其品质特性的影响,研究人员采用核磁共振波谱(NMR)和差示扫描量热(DSC)技术对其进行了初步分析^[12-13],但相关研究并不深入,尤其是对冷冻面团水分分布、冰晶形成及其质构特性相关性的研究较少。鉴于此,本文拟以小麦粉制作的面团为研究对象,将面团置于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下分别冻藏处理0 d、10 d、20 d和30 d,研究面团冻藏过程中可冻结水含量(F_w)、水分分布及存在状态、热力学特性和质构特性的变化规律,并通过主成分分析和相关性分析探究它们之间的相关性,以期建立一种简便的冷冻面团品质衡量方

式,为面团冻藏期间的品质调控提供理论依据,为实现冷冻面团工业化的快速发展提供技术支持.

1 材料与amp;方法

1.1 实验材料

精制小麦粉(蛋白质质量分数为 11.1%),河南金苑粮油有限公司产.

1.2 主要仪器与设备

HA-3480AS 型和面机,克莱美斯机电科技(深圳)有限公司产;HWS-080 型恒温恒湿培养箱,上海精宏试验设备有限公司产;BCD-278TAJ 型冷藏柜,海尔电器有限公司产;NMI20 型低场核磁共振分析仪,上海纽迈电子科技有限公司产;DSC Q2000 型差示扫描量热仪、TA.XTplus 型质构仪,美国 TA 公司产.

1.3 实验方法

1.3.1 冷冻面团的制作 根据 Y. L. Jiang 等^[14]的方法,并稍作修改.将 400 g 小麦粉与 200 mL 蒸馏水混合后,置于和面机中搅拌 10 min;待面团成型后,将其压至厚度(5 mm)均匀,置于聚乙烯袋中,在 -80 ℃ 条件下速冻,使面团中心温度快速(< 30 min)降至 -18 ℃;再转置于 -18 ℃ 的冰箱中分别冻藏 10 d、20 d、30 d,以不进行冻藏处理的冷冻面团为对照(冻藏 0 d).根据冻藏时间的不同,冻藏处理后的样品分别被命名为 D-0、D-10、D-20 和 D-30.

1.3.2 冷冻面团 F_w 的测定 根据 J. Mi 等^[15]的方法,并稍作修改.采用差示扫描量热仪测定冷冻面团中的 F_w .从冷冻面团中心取出 25 mg 样品密封在铝锅中,并将空铝盘作为空白对照.首先将样品以 10 ℃/min 的速率从 20 ℃ 冷冻至 -30 ℃ 并保持 2 min,然后以 10 ℃/min 的速率将其加热至 20 ℃. F_w 的计算公式如下:

$$F_w = \Delta H_{F_w} / \Delta H_o \times 100\%$$

其中, ΔH_{F_w} 是样品的冰熔化焓/(J · g⁻¹),冰熔

化的潜热 $\Delta H_o = 334$ J/g.

1.3.3 冷冻面团水分分布的测定 利用低场核磁共振波谱(LF-NMR)技术测量不同冻藏时间面团的横向弛豫时间,探究面团冻藏期间内部水分分布及迁移情况.根据李银丽^[16]的方法,并稍作改动.切取冷冻面团条(0.8 cm × 0.8 cm × 3.0 cm)放入样品管中,置于永久磁场射频线圈的中心位置,运用核磁共振分析中的 GPMG 序列对面团样品进行信息采集.测试参数设定如下:温度 -18 ℃,共振频率 18 MHz,回波个数(TW) 2000^[2],采样数(TD) 144 044,弛豫时间点数 100,重复扫描次数(NS) 16.

1.3.4 冷冻面团热力学特性参数的测定 根据 T. W. Zhu 等^[5]的方法,并稍作修改.采用差示扫描量热仪对样品进行热力学特性分析.从冷冻面团的中心位置取样 25 mg,放入铝盒(液盒)中铺平,然后使用压片机密封,并制作一个空盒为空白对照.设置测量程序为:起点温度 20 ℃,保持 1 min,然后以 10 ℃/min 的速率升温至 120 ℃,由此获得样品糊化时的起始温度(T_o)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)和糊化焓值(ΔH).

1.3.5 冷冻面团质构特性参数的测定 取不同冻藏时间处理的面团,在温度为 30 ℃、湿度为 80% 的恒温恒湿箱中解冻后,将面片置于沸水中加热 8 min,随后于 20 ℃ 蒸馏水中冷却 2 min;沥干面片表面水分,切取长、宽均为 2 cm 的样品置于质构仪的载样台中央,选取 P/50 探头进行样品质构特性参数的测定,从质构仪的测定结果可得硬度、黏附性、内聚性、回复性、弹性等参数值.质构仪基本参数设定为:TPA 模式,测试前、中、后速率均为 1.0 mm/s,样品变形量 70%,触发力 5 g,两次压缩停顿时间 5 s,每组样品平行 5 次,去除最大值和最小值后取平均值.

1.4 数据处理与分析

上述实验均重复进行 3 次,结果以(平均

值 ± 标准差)表示. 使用 SPSS 和 Origin8.5 软件进行数据分析及作图, 单因素方差分析通过 Duncan 多重比较法进行显著性检验 ($P < 0.05$). 使用 SPSS 对冷冻面团的 5 个质构特性进行主成分分析, 得到原始数据的特征值、贡献率及累积贡献率, 并对特征值大于 1 的主成分进行主成分提取^[14].

2 结果与分析

2.1 冻藏时间对冷冻面团 F_w 的影响

表 1 为不同冻藏时间下冷冻面团中 F_w 的测定结果. 由表 1 可知, 随着冻藏时间的延长, 冷冻面团中的 F_w 逐渐增加, 即自由水含量不断减少. 其中, 冻藏 10 d 样品的 F_w 比冻藏 0 d 的提高了 5.9%; 冻藏 20 d 样品的 F_w 比冻藏 10 d 的提高了 22.5%; 冻藏 30 d 样品的 F_w 比冻藏 20 d 的提高了 5.1%. 冻藏时间能够显著增加冷冻面团中的 F_w , 这可能缘于冰晶的成核动力学变化, 即冻藏期间, 随着水分的迁移与冰晶的生成, 面团内部或面筋网络间隙中的水分发生了重新分布, 冰晶的体积不断增大^[17], 使 F_w 增加.

2.2 冻藏时间对冷冻面团水分分布的影响

水分的含量、分布、与其他组分的结合程度对冷冻面团的品质及最终产品的品质均有重要影响^[18]. 冷冻面团的 T_2 反演图谱能反映水分在面团中与亲水物质的结合程度, 峰的弛豫时间越短, 表明水分与面筋蛋白或淀粉结合越紧密^[19]. 不同冻藏时间对冷冻面团弛豫时间的影响如图 1 所示, 其中, 面团在 1.00 ~ 1 000.00 ms 内分布有 3 个峰, 代表面团中水分存在的 3 种相态, 分别为强结合水 (T_{21} , 0.01 ~ 1.00 ms)、弱结合水 (T_{22} , 1.00 ~ 50.00 ms) 和自由水 (T_{23} , 50.00 ~ 200.00 ms). 由图 1 可以看出, T_{22} 为主峰, 这表明冷冻面团的水分分布以 T_{22} 为主. 随着冻藏时间的延长, 面团中 T_{22} 和 T_{23} 的横向弛

豫时间都出现一定程度的向左偏移, 且冻藏时间越长, 变化趋势越明显. 这说明冻藏期间面团中水分自由度降低, 与其他组分结合更加紧密. 不同冻藏时间下冷冻面团的水分分布状态见表 2. 由表 2 可知, 随着冻藏时间的延长, 面团中强结合水含量 (A_{21}) 和自由水含量 (A_{23}) 上升, 而弱结合水含量 (A_{22}) 下降, 其中冻藏时间为 30 d 时, A_{21} 和 A_{23} 分别上升了 29.23% 和 90.00%, A_{22} 下降了 3.36%. 这一方面可能是因为在冻藏期间, 水分重新分布, 冷冻面团中淀粉和蛋白质互相竞争水分子, 导致结合水与各组分结合更加紧密; 另一方面, 由于水分的迁移, 部分水分析出形成冰晶, 随着冰晶的形成与增长, A_{23} 逐渐增加, 最终导致冻藏期间 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 3 种状态

表 1 不同冻藏时间下冷冻面团中 F_w 的测定结果

Table 1 The measurement results of freezable water content in frozen dough under different

frozen storage time		%
样品	F_w	
D-0	16.43 ± 0.25 ^d	
D-10	17.35 ± 0.15 ^e	
D-20	21.25 ± 0.53 ^b	
D-30	22.33 ± 0.38 ^a	

注: 同一列中不同小写字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$), 下同.

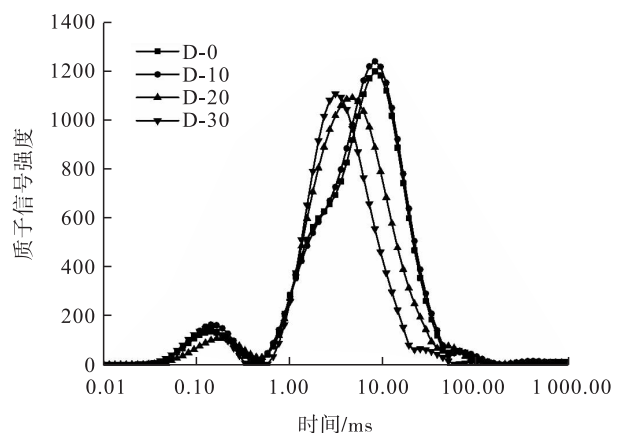


图 1 不同冻藏时间对冷冻面团弛豫时间的影响

Fig. 1 Effect of different frozen storage time on relaxation time of frozen dough

水分的相互转换.

2.3 冻藏时间对冷冻面团热力学特性的影响

表3为不同冻藏时间对冷冻面团热力学特性的影响.由表3可知,冷冻面团的 T_o 、 T_c 和 $\Delta T(T_o - T_c)$ 均有所提高,表明冻藏处理导致面团内部结构发生了改变,最终导致冷冻面团的热稳定性提高,且随着冻藏时间的增加,该趋势更加明显.这可能是由于冻藏期间水分的物态变化造成面筋蛋白结构被破坏和解聚,使蛋白质分子的氨基酸侧链残基暴露,导致其在加热过程中容易形成淀粉-蛋白复合物^[20-22],进而提高了面团的热稳定性.

面团的 ΔH 主要受其内部淀粉分子有序化程度的影响.与未经冻藏处理的面团相比,冻藏处理能够提高面团的 ΔH ,并且随着冻藏时间的延长,冷冻面团的 ΔH 呈现逐渐增大的趋势,由0.63 J/g增至1.22 J/g,这与W. Lu等^[23]的研究结果一致.淀粉通常在玻璃化转变温度(T_g)下,其分子链处于被“冻结”状态,然而本研究中面团冻藏温度(-18℃)高于 T_g ,淀粉分子链的侧基、支链和链节仍具有一定的可移动能力,即冻藏期间冰晶的形成和增长产生的微机械力促进了淀粉链的重排^[17],使其形成更加有

序的分子结构,从而导致面团的 ΔH 增加.

2.4 冻藏时间对冷冻面团质构特性的影响

表4为不同冻藏时间对冷冻面团质构特性的影响.由表4可知,冻藏处理可显著影响面团的硬度、弹性、内聚性、黏附性和咀嚼性,并导致其质构品质发生劣变.经冻藏处理后,面团的硬度有所提高,其中D-30的硬度(15 739 N)显著高于对照组(12 892 N),一方面可能是由于冷冻面团在加热过程中形成了较多的淀粉-蛋白复合物,使面团膨胀程度下降;另一方面,面团中的淀粉分子链在冻藏过程中会发生重排,淀粉分子结构的有序化程度提高,使面团的刚性提高,进而呈现较高的硬度值^[16].咀嚼性是指将食物咀嚼到可以吞咽状态时所需的能量,通过面团硬度值和弹性值计算,其变化趋势与硬度基本相同.经过30 d的冻藏处理,冷冻面团的内聚性降低了0.028,这可能是由于面团在冻藏过程中,水分物态(F_w 、水分分布及状态)变化破坏了面筋网络结构的完整性,使其形成较为松散的面团结构体系,从而使其内聚性降低.此外, F_w 的增加和水分的迁移可使冷冻面团内的淀粉颗粒裸露,在蒸煮过程中接触更多的水分子,发生较高度度的糊化膨胀,最终引起

表2 不同冻藏时间下冷冻面团的水分分布状态

Table 2 The water distribution of frozen dough under different frozen storage time

样品	T_{21}/ms	T_{22}/ms	T_{23}/ms	$A_{21}/\%$	$A_{22}/\%$	$A_{23}/\%$
D-0	0.147 ± 0.011 ^a	8.111 ± 0.000 ^a	65.793 ± 0.000 ^a	0.065 ± 0.005 ^b	0.922 ± 0.005 ^a	0.010 ± 0.000 ^c
D-10	0.143 ± 0.020 ^a	7.759 ± 0.610 ^a	66.221 ± 9.219 ^a	0.068 ± 0.004 ^b	0.912 ± 0.006 ^a	0.013 ± 0.002 ^{bc}
D-20	0.165 ± 0.026 ^a	4.382 ± 0.787 ^b	50.746 ± 11.545 ^b	0.069 ± 0.016 ^b	0.906 ± 0.018 ^{ab}	0.016 ± 0.003 ^b
D-30	0.142 ± 0.014 ^a	3.433 ± 0.408 ^c	29.556 ± 4.368 ^c	0.084 ± 0.007 ^a	0.891 ± 0.008 ^b	0.019 ± 0.001 ^a

表3 不同冻藏时间对冷冻面团热力学特性的影响

Table 3 Effect of different frozen storage time on thermal characteristics of frozen dough

样品	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
D-0	58.89 ± 0.12 ^a	67.20 ± 0.07 ^a	77.36 ± 0.22 ^b	18.47 ± 0.37 ^b	0.63 ± 0.03 ^d
D-10	59.16 ± 0.16 ^a	66.12 ± 0.51 ^a	77.97 ± 0.19 ^b	18.81 ± 0.57 ^b	0.75 ± 0.02 ^c
D-20	59.09 ± 0.18 ^a	66.28 ± 0.63 ^a	79.97 ± 0.25 ^a	20.88 ± 0.43 ^a	1.03 ± 0.04 ^b
D-30	59.02 ± 0.28 ^a	65.71 ± 0.63 ^b	80.43 ± 0.15 ^a	21.41 ± 0.73 ^a	1.22 ± 0.02 ^a

表4 不同冻藏时间对冷冻面团质构特性的影响

Table 4 Effect of different frozen storage time on texture characteristics of frozen dough

样品	硬度/N	弹性/(g·s ⁻¹)	内聚性	黏附性	咀嚼性	PC1 变化值
D-0	12 892 ± 44 ^d	0.694 ± 0.028 ^a	0.669 ± 0.008 ^a	8623 ± 98 ^c	5984 ± 229 ^b	-1.173 ± 0.605 ^d
D-10	13 851 ± 176 ^c	0.697 ± 0.002 ^a	0.655 ± 0.001 ^a	9077 ± 108 ^b	6327 ± 82 ^b	-0.294 ± 0.258 ^c
D-20	14 564 ± 138 ^b	0.721 ± 0.013 ^a	0.650 ± 0.002 ^b	9472 ± 113 ^b	6828 ± 45 ^a	0.543 ± 0.076 ^b
D-30	15 739 ± 66 ^a	0.711 ± 0.002 ^a	0.641 ± 0.008 ^b	10 090 ± 171 ^a	7169 ± 139 ^a	1.387 ± 0.033 ^a

面团黏附性的提高^[24]。

面团的质构特性是评价其品质优劣的一个重要分析指标,在一定范围内能较好地反映面团的品质特性^[25]。本研究采用主成分分析法将面团5个质构特性(硬度、弹性、内聚性、黏附性和咀嚼性)的参数值进行简化,提取主成分因子以表征冷冻面团的综合质构特性^[26-27]。主成分的特征值及贡献率见表5。由表5可知,PC1的贡献率为75.084%,可以代表全部原始信息的75.084%,即解释了总变异的75.084%(超过70%),可以较全面地反映冷冻面团质构特性的大部分原始信息,故将冷冻面团样本质构特性的多变量简化为一个主成分(PC1)作为综合评价指标。面团分别经冻藏处理10 d、20 d和30 d后,PC1的变化值分别为-0.294、0.543和1.387,均显著高于对照组(-1.173)($P < 0.05$)。这表明,冻藏处理会破坏面团组织结构,影响面团的品质。

表5 主成分的特征值及贡献率

Table 5 Eigenvalues and contribution rates of principal components

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
PC1	3.754	75.084	75.084
PC2	0.913	18.270	93.354
PC3	0.332	6.640	99.994
PC4	0	0.004	99.998
PC5	0	0.002	100

为了更好地了解面团冻藏期间的品质变化过程,本文采用相关性分析研究各测量参数对面团品质的影响^[14]。表6为冷冻面团质构特性与 F_w 、水分分布、热力学特性之间的相关分析。由

表6可知,PC1与 F_w 呈显著正相关(0.964^{*}),与 A_{22} 呈显著负相关(-0.985^{*}),与 A_{23} 呈极显著正相关(1.000^{**})。由此可知,面团中的 F_w 及水分分布状态可显著影响面团的质构特性。此外,PC1还与冻藏面团的热力学特性(T_c , 0.966^{*}; ΔH , 0.988^{*})显著相关,面团的 ΔH 与 F_w (0.988^{*})及水分分布状态(A_{22} , -0.968^{*}; A_{23} , 0.990^{*})也显著相关。以上结果表明,面团中面筋蛋白与淀粉的相互作用及水分的迁移情况均影响了面团的质构特性。因此,通过衡量冷冻面团内部水分的物态变化及面团热力学特性转变情况,可为面团冻藏期间的品质变化提供依据。

3 结论

本文通过研究小麦粉面团冻藏过程中 F_w 、水分分布及存在状态、热力学特性和质构特性的变化规律发现,面团在冻藏期间,水分的物态形式发生了显著改变,表现为 F_w 增加,且随着冻藏时间的延长,面团内 T_{22} 和 T_{23} 的横向弛豫时间均向左偏移,面团内水分自由度降低, A_{21} 增加;水分物态(F_w 、水分分布和状态)变化可提高面团的热稳定性(T_o 、 T_c 和 ΔH),而这可能与面团受热糊化时淀粉-蛋白复合物的形成有关;此外,冻藏处理可提高面团的硬度、黏附性和咀嚼性,降低其内聚性,从而导致面团品质下降;通过主成分分析提取面团质构综合评价指标PC1,继而采用相关性分析发现,水分的物态形式和面团的热力学特性与PC1显著相关。本研究建立了一种简单的冷冻面团品质衡

表6 冷冻面团质构特性与 F_w 、水分分布、热力学特性之间的相关分析

Table 6 Correlation analysis among texture characteristics, freezable water content, water status and thermal characteristics of frozen dough

项目	PC1	T_{21}	T_{22}	T_{23}	A_{21}	A_{22}	A_{23}	T_o	T_p	T_c	ΔT	ΔH	F_w
PC1	1	0.084	-0.949	-0.925	0.878	-0.985*	1.000**	0.369	-0.894	0.966*	0.955*	0.988*	0.964*
T_{21}		1	-0.298	0.042	-0.342	0.085	0.084	0.140	0.197	0.312	0.307	0.148	0.295
T_{22}			1	0.933	-0.795	0.907	-0.952*	-0.166	0.708	-0.994**	-0.999**	-0.984*	-0.998**
T_{23}				1	-0.947	0.946	-0.929	0.004	0.731	-0.907	-0.925	-0.956*	-0.923
A_{21}					1	-0.944	0.880	0.061	-0.815	0.778	0.788	0.873	0.794
A_{22}						1	-0.985*	-0.308	0.912	-0.917	-0.910	-0.968*	-0.920
A_{23}							1	0.359	-0.890	0.967*	0.957*	0.990*	0.966*
T_o								1	-0.628	0.275	0.202	0.245	0.234
T_p									1	-0.759	-0.723	-0.816	-0.747
T_c										1	0.997**	0.986*	0.999**
ΔT											1	0.985*	0.999**
ΔH												1	0.988*
F_w													1

注: *表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, **表示在 $P < 0.01$ 水平上极显著相关。

量方式,可为调控冷冻面团的品质变化提供新思路。

参考文献:

- [1] 李素云,李星科,张华,等. 大米多肽对冷冻面团发酵特性及馒头品质的影响[J]. 食品与发酵工业,2020,46(8):162.
- [2] ŞİMŞEK S T. Evaluation of partial-vacuum baking for gluten-free bread: Effects on quality attributes and storage properties[J/OL]. Journal of Cereal Science, 2020, 9 [2020 - 01 - 06]. https://schlr.cnki.net/Detail/index/SJES_01/SJES00D792D594250FCB35DEA9039D1F103F.
- [3] 任顺成,马瑞萍,韩素云. 木聚糖酶对冷冻面团和馒头品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2013(12):17.
- [4] TAO H, WANG P, WU F F, et al. Effect of freezing rate on rheological, thermal and structural properties of frozen wheat starch[J]. Rsc Advances, 2016, 6:97907.
- [5] ZHU T W, ZHANG X, LI B, et al. Effect of interesterified blend-based fast-frozen special fat

on the physical properties and microstructure of frozen dough [J]. Food Chemistry, 2019, 272: 76.

- [6] CHANG X H, HUANG X Y, TIAN X Y, et al. Dynamic characteristics of dough during the fermentation process of Chinese steamed bread [J]. Food Chemistry, 2020, 312:126050.
- [7] 叶晓枫,赵黎平,曹蓉,等. 冷冻非发酵面团冻藏过程中化学成分及物理特性的变化[J]. 食品科学,2014(6):219.
- [8] 张华,袁博,赵琼,等. 冻藏对小麦 A 链、B 链淀粉理化性质及热力学特性的影响[J]. 中国粮油学报,2015,30(11):54.
- [9] WANG P, LEE T C, XU X, et al. The contribution of glutenin macropolymer depolymerization to the deterioration of frozen steamed bread dough quality [J]. Food Chemistry, 2016, 211: 27.
- [10] 杨静洁,张波,张影全,等. 冻藏时间对非发酵面团流变特性及蛋白结构的影响[J]. 中国粮油学报,2020(8):15.
- [11] HE Y, GUO J, REN G, et al. Effects of konjac

- glucomannan on the water distribution of frozen dough and corresponding steamed bread quality [J]. *Food Chemistry*, 2020, 330:127243.
- [12] ZHU T W, ZHANG X, LI B, et al. Effect of interesterified blend-based fast-frozen special fat on the physical properties and microstructure of frozen dough [J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 76.
- [13] CHANG X H, HUANG X Y, TIAN X Y, et al. Dynamic characteristics of dough during the fermentation process of Chinese steamed bread [J]. *Food Chemistry*, 2020, 312:126050.
- [14] JIANG Y L, ZHAO Y M, ZHU Y F, et al. Effect of dietary fiber-rich fractions on texture, thermal, water distribution, and gluten properties of frozen dough during storage [J]. *Food Chemistry*, 2019, 297:124902.
- [15] MI J, LIANG Y, LU Y M, et al. Influence of acetylated potato starch on the properties of dumpling wrapper [J]. *Industrial Crops and Products*, 2014, 56:113.
- [16] 李银丽. 超声辅助冷冻对面团加工品质的影响及其作用机制研究[D]. 郑州:郑州轻工业大学, 2019.
- [17] WANG H W, XU K, LIU X L, et al. Understanding the structural, pasting and digestion properties of starch isolated from frozen wheat dough [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 111:106168.
- [18] WANG S, LI C, ZHANG X, et al. Retrogradation enthalpy does not always reflect the retrogradation behavior of gelatinized starch [J]. *Entific Reports*, 2016, 6:20965.
- [19] 张永春, 余世锋, 郑喜群. 低温冻融处理对糯性玉米淀粉颗粒结构特性的影响[J]. *食品科技*, 2014, 39(10):178.
- [20] 王振兴. 淀粉-蛋白-胶复合物的制备和性质研究[D]. 南昌:南昌大学, 2008.
- [21] 琚长霄. 胶原蛋白与淀粉作用产物及其消化特性的研究[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [22] LI H T, LI Z, FOX G P, et al. Protein-starch matrix plays a key role in enzymic digestion of high-amylose wheat noodle[J/OL]. *Food Chemistry*, 2020, 336 [2020 - 08 - 01]. <https://schlr.cnki.net/Detail/index/SJPDLAST/SJPD-0919031D50156D75C5C02A16319E5978>.
- [23] LU W, GRANT L A. Role of flour fractions in breadmaking quality of frozen dough [J]. *Cereal Chemistry*, 1999, 76(5):663.
- [24] 王正德, 金玉红, 杜金华. 豌豆分离蛋白对小麦粉面团特性及挂面品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(3):21.
- [25] MARTINS R B, NUNES M C, FERREIRA L M M, et al. Impact of acorn flour on gluten-free dough rheology properties [J]. *Foods*, 2020, 9(5):560.
- [26] 公艳, 熊双丽, 彭凌, 等. 响应面-主成分分析法优化马铃薯挂面工艺[J]. *食品工业科技*, 2017(23):143.
- [27] GUILLEN-CASLA V, ROSALES-CONRADO N, LEON-GONZALEZ M E, et al. Principal component analysis (PCA) and multiple linear regression (MLR) statistical tools to evaluate the effect of E-beam irradiation on ready-to-eat food [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2011, 24(3):456.