



苏盼盼,乔靖玥,张宇,等. 面团发酵中淀粉水合能力变化对馒头品质的影响[J]. 轻工学报,2025,40(4): 60-68.
SU P P, QIAO J Y, ZHANG Y, et al. Effects of starch hydration dynamics during dough fermentation on steamed bread quality[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(4): 60-68.
DOI: 10.12187/2025.04.007

面团发酵中淀粉水合能力变化对馒头品质的影响

苏盼盼^{1,2}, 乔靖玥^{1,3}, 张宇⁴, 申慧珊^{1,2,3}, 张艳艳^{1,2,3}, 刘兴丽^{1,2}, 张华^{1,2,3},
王宏伟^{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. 冷链食品加工与安全控制教育部重点实验室 郑州轻工业大学, 河南 郑州 450001;
3. 中原食品实验室 郑州轻工业大学, 河南 漯河 462300;
4. 内江市农业科学院, 四川 内江 641000

摘要: 从不同发酵时间(0 min、30 min、60 min、90 min 和 120 min)的小麦面团中提取淀粉,考查该淀粉水合能力的变化,并将其与谷朊粉复配制备重组面团,分析其对重组面团水分分布、微观结构及所制馒头比容、质构特性和感官品质的影响规律,研究面团发酵过程中淀粉水合能力变化对馒头品质的影响。结果表明:随着发酵时间的延长,淀粉的吸水能力和溶解度均呈上升趋势,而膨胀度呈先上升后降低趋势,且在发酵时间为 60 min 时达到最大值,为 7.05 g/g;重组面团强结合水(A_{21})和自由水(A_{23})分布比例均逐渐降低,弱结合水(A_{21})分布比例逐渐升高,即重组面团内部紧密结合的强结合水逐渐转化为弱结合水;重组面团的面筋网络结构变得更加均匀且连续,淀粉颗粒紧密地填充其中,当发酵时间为 60 min 时,淀粉颗粒紧密均匀地嵌入膜状面筋基质中,形成有序的淀粉-面筋蛋白复合体系;重组馒头的比容、弹性和回复性均呈先增大后减小的趋势,而硬度和咀嚼性均呈先减小后增大的趋势,当发酵时间为 60 min 时,重组馒头的比容和质构特性均较好,感官评价总分最高,为 79.4 分。因此,适度发酵能够增强淀粉的水合能力,有利于改善馒头的品质。

关键词: 面团发酵;水合能力;淀粉;馒头;品质

中图分类号: TS201.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2025)04-0060-09

0 引言

粉、水、酵母菌等为原料,通过调制、揉混、成型、发酵、熟制等工艺加工制作而成,具有光滑蓬松、食用方便、营养丰富、口感独特等优点,深受消费者青

馒头是中国传统的发酵面制品,主要以小麦

收稿日期:2024-11-07;修回日期:2025-02-13;出版日期:2025-08-15

基金项目:河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(2024GGJS078);河南省重点研发项目(231111113200);河南省高校科技创新团队项目(23IRTSTHN029)

作者简介:苏盼盼(2003—),女,陕西省渭南市人,郑州轻工业大学硕士研究生,主要研究方向为淀粉基米面食品加工。
E-mail:1798376140@qq.com

通信作者:王宏伟(1988—),男,河南省周口市人,郑州轻工业大学副教授,博士,主要研究方向为淀粉基米面食品加工。
E-mail:hwwang@zzuli.edu.cn

睐^[1]。发酵作为馒头制作过程中的关键步骤,不仅可赋予馒头膨松的结构和独特的风味,还可通过微生物代谢所产生的有机酸、淀粉酶等产物调控面团内部特征组分的结构和理化特性,从而改变馒头的品质和口感^[2-3]。目前,有关发酵面团内部面筋网络结构的变化影响其终产品加工和品质特性的研究较多。例如,陈佳芳等^[4]研究发现,胞外多糖乳酸菌发酵可改善面团内部面筋网络结构,进而提高面团持气率及面包比容;刘长虹等^[5]研究发现,面团发酵过程中,过度发酵会阻碍面筋蛋白分子内部二硫键的形成,进而破坏面筋网络结构的稳定性,致使面团的持气能力和膨松度减弱;D. D. Xie 等^[6]研究发现,外源面筋蛋白所形成的网络结构能显著改善发酵玉米面团及其制品的持气能力和比容。上述研究表明,面团发酵过程中,其内部面筋网络结构的形成及稳定性可显著影响发酵面制品的持气能力、口感、比容等。

淀粉作为发酵面团中的关键组分(占干重的63%~75%),其内部组分特性的变化如何影响面制品品质仍有待深入研究。已有研究^[7]表明,发酵处理可破坏淀粉的结晶结构、层状结构、颗粒形貌等,从而提升其糊化黏度,并弱化其凝胶强度。例如,曹龙奎等^[8]研究发现,经乳酸菌发酵后,淀粉颗粒表面出现明显的侵蚀现象,结晶结构被破坏,糊化黏度显著增加;马蕾等^[9]研究发现,发酵处理会破坏淀粉的结晶结构和层状结构,导致糊化黏度增加,进而影响淀粉的胶凝特性。目前,有关面团发酵过程中淀粉组分特性变化对面制品品质的影响的研究仍相对较少。

淀粉对食品品质的贡献程度主要依赖于其在水中的理化特性,包括水合能力、热性能、糊化行为、凝胶化行为等,这些理化特性的变化可显著影响面团或面制品的品质^[10]。水合能力作为淀粉理化特性形成的基础,可显著调控面团的水合作用,进而影响面团的延展性及面制品的品质^[11]。此外,淀粉的水合能力还可通过调节面团内部水分的分布和动态迁移影响面制品热加工过程中的质地和最终口感^[12-13]。因此,深入探究发酵过程中淀粉水合能力的变化对面团或面制品品质的影响具有重要意义。然而,当前研究^[14-16]广泛聚焦于发酵过程

中淀粉的结构、糊化行为及热性能变化,针对淀粉水合能力的变化如何影响面制品加工品质的研究仍较少。

基于此,本文拟从不同发酵时间的面团中提取淀粉,分析该淀粉吸水能力、溶解度和膨胀度的变化,继而将其与外源面筋蛋白谷朊粉复配制备重组面团,研究其对重组面团内部水分分布、微观结构及所制馒头比容、质构特性和感官品质的影响规律,以期阐明面团发酵过程中淀粉水合能力变化对馒头品质的影响机制,为发酵面制品的高品质生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

精制小麦粉(水分含量 10.4%、灰分含量 0.5%、蛋白质含量 12.8%、淀粉含量 76.3%),河南金苑粮油有限公司;高活性干酵母,安琪酵母股份有限公司;谷朊粉(食品级),美国 Sigma 公司;NaOH(分析纯),天津市大茂化学试剂厂。

1.2 主要仪器与设备

AL204 型分析天平,上海梅特勒-托利多仪器有限公司;HWS-080 型发酵培养箱,上海精宏试验设备有限公司;HA-3480AS 型和面机,克莱美斯机电科技(深圳)有限公司;HD400 型固体核磁共振仪,德国 Bruker 公司;Regulus 8100 型高分辨率冷场发射扫描电镜,日本日立公司;INVIA 型显微共聚焦激光拉曼光谱仪,美国 Renishaw 公司;TA.XT.Plus 型质构仪,美国 TA 公司;LGJ-10 型真空冷冻干燥仪,河南兄弟仪器设备有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 发酵淀粉提取 称取 300 g 精制小麦粉(干基),依次加入小麦粉质量 45%的水和 1.5%的高活性干酵母后,置于和面机中,于 120 r/min 条件下搅拌 10 min;将混合均匀的面团经压片机由上至下辊压 6 次,揉混整型后,置于温度为 30 ℃、相对湿度为 80%的发酵培养箱中,分别发酵 0 min、30 min、60 min、90 min 和 120 min。参照王宏伟等^[17]的方法提取发酵淀粉,具体如下:在发酵后的面团中加入 1100 mL 蒸馏水,不断揉搓得到淀粉悬浮液;将淀粉悬浮液

过 100 目筛后倒入烧杯中,于 4000 r/min 条件下离心 15 min,弃去上清液,将白色沉淀物转移至烧杯中,加入质量分数为 0.1% 的 NaOH 溶液,搅拌 30 min 后,将溶液 pH 值调至 7,再重复上述离心操作 2 次;取出沉淀物,置于 45 ℃ 烘箱中干燥 24 h,粉碎过 100 目筛,即得发酵淀粉。依据发酵时间的不同,将发酵淀粉分别命名为 FJDF-0 min、FJDF-30 min、FJDF-60 min、FJDF-90 min 和 FJDF-120 min。

1.3.2 发酵淀粉吸水能力测定 参照 S. Sonkar 等^[18]的方法,具体如下:准确称取 1.0 g 发酵淀粉(干基,记为 m),将其加入 10 mL 蒸馏水中,充分搅拌 30 min 后,于 4000 r/min 条件下离心 20 min,弃去上清液,用滤纸吸去沉淀物多余水分,称其质量,记为 m_1 。按下式计算发酵淀粉的吸水能力。

$$\text{吸水能力} = \frac{m_1}{m}$$

1.3.3 发酵淀粉溶解度和膨胀度测定 参照张华等^[19]的方法,具体如下:将 1.0 g 发酵淀粉(干基,记为 M)加入 20 mL 蒸馏水中,在 75 ℃ 水浴锅中持续振荡加热 30 min,待其冷却后,于 5000 r/min 条件下离心 15 min,将上清液倒入已烘干至恒重的铝盒中,再放入 103 ℃ 烘箱中烘干至恒重,称其质量,记为 M_1 ,将沉淀物质量记为 M_2 ,分别按下式计算发酵淀粉的溶解度和膨胀度。

$$\text{溶解度} = \frac{M_1}{M} \times 100\%$$

$$\text{膨胀度} = \frac{M_2}{M - M_1}$$

1.3.4 重组面团制备 参照《粮油检验 小麦粉馒头加工品质评价》(GB/T 35991—2018)^[20]中的方法,并稍作修改。将发酵淀粉与谷朊粉按照质量比 85:15 混合均匀,获得重组粉;将重组粉、高活性干酵母、蒸馏水按照质量比 200:3:90 进行混合,在和面机中搅拌 10 min 后,置于温度 30 ℃、相对湿度 80% 条件下发酵 30 min,即得重组面团。根据淀粉发酵时间的不同,将重组面团分别命名为 D-0 min、D-30 min、D-60 min、D-90 min 和 D-120 min。

1.3.5 重组面团水分分布测定 参照王宏伟等^[21]的方法,并稍作修改。利用固体核磁共振仪中的 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 脉冲序列测定重

组面团的自旋-自旋弛豫时间(T_2)。测定参数如下:共振频率 18 MHz,温度 -18 ℃,回波个数(TW) 2000 个,采样点数(TD) 144 044 点,扫描次数(NS) 16 次。

1.3.6 重组面团微观结构观察 参照 Z. Davoudi 等^[22]的方法,具体如下:在高分辨率冷场发射扫描电镜样品台贴上导电胶,将冻干重组面团均匀平铺于导电胶上,经真空喷金处理后,在加速电压 5.0 kV、放大 2000 倍条件下观察重组面团的微观形貌。

1.3.7 显微共聚焦激光拉曼测试 将冻干重组面团切成 0.5 cm×0.5 cm×0.2 cm 的小块后,置于载玻片上,使用显微共聚焦激光拉曼光谱仪对内部淀粉和面筋蛋白特征峰进行成像分析,以探究淀粉和面筋蛋白的分布及相互作用。扫描范围为 1800~400 cm⁻¹,扫描面积为 1000 mm×1000 mm,激发波长为 785 nm,步长为 4 mm。

1.3.8 重组馒头制备 参照《粮油检验 小麦粉馒头加工品质评价》(GB/T 35991—2018)^[20]中的方法,并稍作修改。将重组面团置于温度 30 ℃、相对湿度 80% 的条件下发酵 60 min,随后蒸制 30 min,取出冷却 60 min,即得重组馒头。根据面团内部淀粉发酵时间的不同,将重组馒头分别命名为 SB-0 min、SB-30 min、SB-60 min、SB-90 min、SB-120 min。

1.3.9 重组馒头比容测定 参照张爱霞等^[23]的方法,并稍作修改。重组馒头的体积采用小米置换法测定。每组实验平行 3 次,结果取平均值。按下式计算重组馒头比容。

$$C = V/m_2$$

式中, C 为重组馒头比容/(mL·g⁻¹), m_2 为重组馒头质量/g, V 为重组馒头体积/mL。

1.3.10 重组馒头质构特性测定 参照王宏伟等^[24]的方法,并稍作修改。切取重组馒头中心部分,分割成 1 cm×2 cm×2 cm 的小块,置于质构仪测试探头正下方进行质地剖面分析(Texture Profile Analysis,TPA)测试。TPA 测试条件如下:P50 型探头,压缩率为 50%,压缩时间间隔为 5.0 s,测试前速度为 2.0 mm/s,测试中和测试后速度均为 1.0 mm/s,

感应力为 5.0 g。每组实验平行 6 次,结果取平均值。

1.3.11 重组馒头感官评价 参照孙祥祥等^[25]的方法,并稍作修改。选择 10 名具有感官评价经验的专业人员,对重组馒头的色泽、形态、气味、口感、咀嚼感、黏性、弹性和组织结构这 8 个指标进行感官评价并赋分。

1.4 数据处理

所有实验均重复 3 次以上,采用 SPSS 22.0 和 Origin 8.5 软件进行数据分析及作图,所有数据的显著性均采用 Duncan 多重比较法 ($P<0.05$) 进行检验,除特别说明外,结果均以 (平均值±标准差) 表示。

2 结果与分析

2.1 发酵处理对淀粉水合能力的影响分析

淀粉的水合能力是反映淀粉与水分子之间相互作用程度的重要理化指标,这种相互作用通常涉及水分子与淀粉内部不同层级结构之间的氢键形成与结合,而在面团及其面制品加工过程中,淀粉的水合能力与面制品的品质密切相关^[26]。不同发酵淀粉的吸水能力、溶解度和膨胀度见表 1。由表 1 可知,随着发酵时间的延长,淀粉的吸水能力显著增强,从 2.43 g/g 增加至 3.16 g/g,这可能是由于发酵过程中产生的淀粉酶和有机酸破坏了淀粉的颗粒形貌及其内部致密有序化结构,如结晶结构、螺旋结构等,使得水分子更易进入淀粉内部并与无序化结构的亲水基团相结合,进而提升淀粉的吸水能力^[27]。

淀粉的溶解度和膨胀度是衡量其与水分子之间相互作用的重要理化指标。其中,溶解度指淀粉颗粒在水中溶解的程度,反映了淀粉分子(主要是直链淀粉)从颗粒中解离并进入水相的能力,且高溶解度的淀粉往往会释放更多直链淀粉,进而影响面制品的黏性、质地和口感;膨胀度指淀粉在特定温度下的持水能力,主要反映了淀粉分子中的羟基与水分子之间的相互作用,这最终会影响淀粉或淀粉类食品的糊化行为及加工特性^[28]。由表 1 可知,随着发酵时间的延长,淀粉的溶解度显著升高,从

4.35% 上升至 5.63%,这可能是由于发酵过程中产生的淀粉酶能够作用于淀粉的分子链结构(如支链淀粉),使其降解并释放出较短的更易与水分子发生结合的线性链,从而提升其溶解度^[29];淀粉的膨胀度先增加后降低,且在发酵时间为 60 min 时达到最大值 7.05 g/g。这可能是由于适度发酵有利于水分子进入淀粉的无定形和结晶区域,并与淀粉分子结构中的羟基结合,从而引起淀粉膨胀度提高;但随着发酵时间的进一步延长,淀粉结构破损严重,其颗粒的刚性和稳定性不足,进而又导致淀粉的膨胀度降低^[30]。

2.2 重组面团水分分布分析

在重组面团形成过程中,发酵淀粉、谷朊粉等组分吸水膨胀并相互交联,其内部发酵淀粉的水合能力差异会导致重组面团内部水分的结合状态和分布不一致,进而影响面制品的品质特性^[31]。重组面团水分状态的变化见表 2。由表 2 可知,重组面团的水分状态发生了显著变化,具体表现在强结合水(A_{21})、弱结合水(A_{22})和自由水(A_{23})三者的分布上。随着发酵时间的延长,重组面团 A_{21} 和 A_{23} 分布比例均逐渐下降,分别由 10.13% 和 0.73% 下降至

表 1 不同发酵淀粉的吸水能力、溶解度和膨胀度
Table 1 Water absorption capacity, solubility, and swelling power of starches fermented for different durations

组别	吸水能力/ (g·g ⁻¹)	溶解度/ %	膨胀度/ (g·g ⁻¹)
FJDF-0 min	2.43±0.05 ^d	4.35±0.11 ^e	6.41±0.17 ^d
FJDF-30 min	2.57±0.12 ^c	4.78±0.14 ^d	6.78±0.18 ^c
FJDF-60 min	2.78±0.11 ^c	5.05±0.12 ^e	7.05±0.15 ^a
FJDF-90 min	2.92±0.09 ^b	5.21±0.13 ^b	6.91±0.14 ^b
FJDF-120 min	3.16±0.10 ^a	5.63±0.14 ^a	6.87±0.16 ^{bc}

注:同列数据不同肩标小写字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$),下同。

表 2 重组面团水分状态的变化
Table 2 Changes in water distribution of reconstituted dough

组别	A_{21}	A_{22}	A_{23}	%
D-0 min	10.13±0.24 ^a	89.14±0.59 ^c	0.73±0.05 ^a	
D-30 min	9.79±0.15 ^b	89.77±0.62 ^b	0.44±0.04 ^b	
D-60 min	9.57±0.25 ^{bc}	90.03±0.47 ^{ab}	0.40±0.03 ^b	
D-90 min	9.38±0.18 ^c	90.34±0.72 ^a	0.28±0.06 ^c	
D-120 min	9.13±0.22 ^d	90.54±0.46 ^a	0.33±0.03 ^c	

9.13%和0.33%,而 A_{22} 分布比例逐渐升高,由89.14%升高至90.54%,表明重组面团内部紧密结合的强结合水逐渐转化为弱结合水。这可能是由于发酵会破坏淀粉结构并使其更易吸水,阻碍面筋蛋白的水合作用,从而导致重组面团内部结构变得松散。此外,破损的淀粉分子更易与面筋蛋白结合,形成较弱的复合体系,进而影响面团水分状态和质地^[32]。

2.3 重组面团微观结构分析

小麦粉经水调制形成面团是馒头加工的基础。淀粉作为小麦粉内部的重要组成部分之一,在形成面团过程中,水分子首先与淀粉颗粒表面接触并粘附其上,随之与淀粉的亲水基团通过氢键交联形成均匀吸水的淀粉颗粒,并逐渐镶嵌于面筋网络结构内部,进而起到填充和支撑网络结构的作用^[33]。因此,淀粉组分结构和理化特性的变化能够显著影响面团的形成及其内部微观结构,进而决定最终面制品的品质。重组面团的微观结构如图1所示。由图1可知,未发酵淀粉与谷朊粉制成的重组面团中,面筋网络结构不太连续。随着淀粉发酵时间的延长,面筋网络结构变得更加连续且完整,淀粉颗粒紧密地填充于面筋网络结构中,尤其当发酵时间为60 min

时,能清晰地观察到淀粉与面筋蛋白之间形成了致密有序的三维网络结构,且淀粉颗粒紧密均匀地嵌入膜状面筋基质中,形成有序的淀粉-面筋蛋白复合体系。这可能是由于在面团发酵过程中,发酵淀粉的溶解度增加、吸水能力增强,使淀粉颗粒能够更好地填充到面筋网络结构的间隙中,增加淀粉与面筋蛋白之间的相互作用,并促进网络结构的形成和稳定。此外,适度发酵也能促进淀粉分子结构中的羟基与面筋蛋白中的极性基团形成氢键,从而形成致密有序的网络结构。然而,当发酵时间为90 min和120 min时,面筋网络结构呈现松散、不连续的状态,这可能是随着发酵时间的继续延长,发酵淀粉逐渐增强的水合能力可促进水分子在淀粉-面筋蛋白复合体系中重新分布,导致该复合体系微观结构的有序化程度降低,进而弱化了面筋网络结构的形成和稳定^[34]。

2.4 重组面团内部淀粉与面筋蛋白相互作用分析

重组面团内部淀粉和面筋蛋白的分布如图2所示,其中,绿色代表淀粉颗粒的分布,红色代表面筋蛋白的分布。由图2可知,未发酵淀粉与谷朊粉制成的重组面团中,面筋蛋白分子高度聚集,形成了

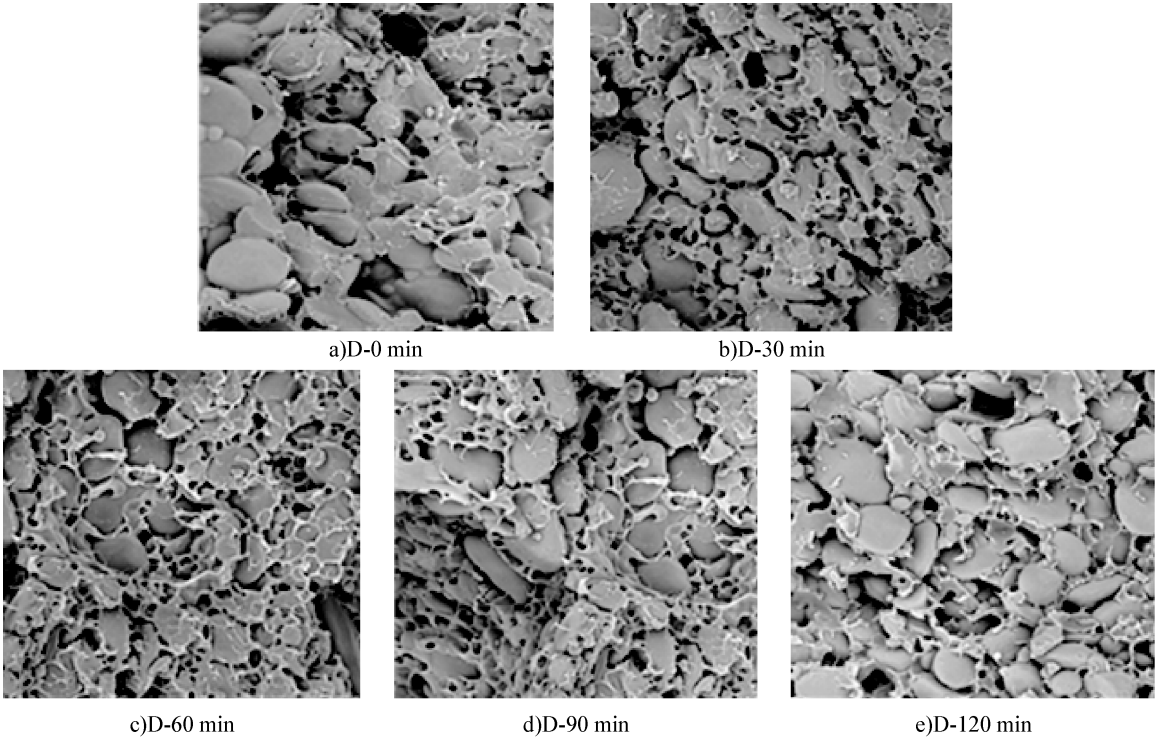


图1 重组面团的微观结构
Fig. 1 Microstructure of reconstituted dough

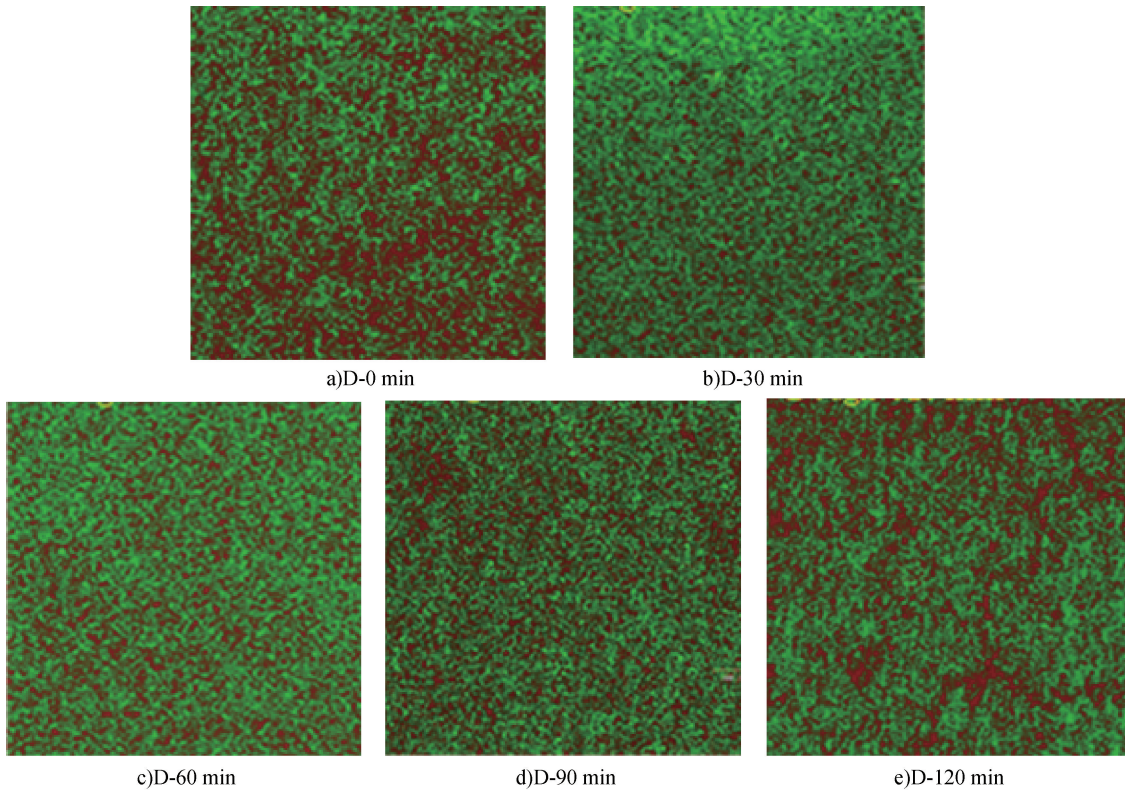


图2 重组面团内部淀粉和面筋蛋白的分布

Fig. 2 Distribution of starch and gluten protein within the reconstituted dough structure

较为厚重的面筋基质,而淀粉颗粒则相对松散地嵌入其中。随着发酵时间的延长,重组面团内部结构开始发生变化,面筋网络结构变得更薄,且有更多的淀粉颗粒逐渐嵌入其中(见图2b));当发酵持续进行到60 min时,面筋网络结构变得均匀且连续,这可能与淀粉颗粒在发酵过程中吸收了适量水分有关。水分的存在可使淀粉表面形成稳定的水合层,从而改善其在面筋网络结构中的填充效果^[35];同时,水合层的形成还可增强淀粉与面筋蛋白之间的氢键和相互作用,进而优化面筋网络结构的形成。然而,随着发酵时间的继续延长,过度破损的淀粉颗粒吸水能力进一步增强,导致重组面团内部水分子的结合程度发生转变并重新分布,这不仅会

减弱淀粉与面筋蛋白之间的氢键和相互作用,还可能破坏并弱化面筋网络的整体结构^[36]。因此,适度发酵对维持重组面团的结构稳定性至关重要。

2.5 重组馒头比容和质构特性分析

重组馒头的比容和质构特性见表3。由表3可知,随着发酵时间的延长,重组馒头的比容呈先增大后减小的趋势,且在发酵时间为60 min时达到最大值1.90 mL/g。这可能是由于适度发酵的淀粉呈无序化的分子链和聚集态结构,有利于增强水分子与面筋蛋白之间的相互作用,进而形成稳定的三维网络结构,而这种网络结构不仅持气能力强,且有利于维持面筋网络适度的弹性和延展性,使得重组馒头具有较高的比容和较好的松软度^[37]。此外,发

表3 重组馒头的比容和质构特性

Table 3 Specific volume and textural properties of reconstituted steamed bread

组别	比容/(mL·g ⁻¹)	硬度/g	弹性/g	咀嚼性	回复性
SB-0 min	1.08±0.02 ^e	2 487.9±71.6 ^a	0.91±0.02 ^b	2 189.4±79.9 ^a	0.41±0.01 ^b
SB-30 min	1.56±0.05 ^c	2 096.9±75.0 ^b	0.92±0.01 ^a	1 721.2±80.0 ^b	0.42±0.01 ^b
SB-60 min	1.90±0.05 ^a	1 574.1±66.4 ^d	0.93±0.01 ^a	1 215.1±90.3 ^d	0.45±0.01 ^a
SB-90 min	1.72±0.06 ^b	1 908.0±83.4 ^c	0.92±0.01 ^a	1 311.5±51.1 ^c	0.44±0.03 ^a
SB-120 min	1.34±0.05 ^d	2 150.9±57.1 ^b	0.92±0.02 ^a	1 771.9±57.1 ^b	0.43±0.01 ^{ab}

酵后的淀粉更易被酵母菌利用而产生 CO_2 , 该气体能够被均匀地捕获在面筋网络结构中, 使面团内部形成均匀的气孔结构。然而, 随着发酵时间的继续延长, 发酵淀粉颗粒的有序化结构被严重破坏, 其与面筋蛋白之间的相互作用减弱, 从而导致淀粉-面筋蛋白复合体系的结构变得松散, 持气能力降低, 且过度无序化的淀粉颗粒可能会与面筋网络竞争性吸水, 使面筋网络结构弱化且持气能力减弱, 进而导致重组馒头比容下降。

随着发酵时间的延长, 重组馒头的硬度和咀嚼性均呈先减小后增大的趋势, 而弹性和回复性均呈先增大后减小的趋势。其中, SB-60 min 的硬度和咀嚼性均最小, 分别为 1 574.1 g 和 1 215.1; 弹性和回复性均最大, 分别为 0.93 g 和 0.45。这可能是由于适度发酵的淀粉易吸收水分并使其均匀分布在面团内部, 从而赋予淀粉-面筋蛋白复合体系适度的回复性和弹性; 同时, 适度发酵淀粉能够保持适宜的水合状态, 使重组面团的含水量与面筋网络结构相对稳定, 内部水分状态良好, 进而赋予重组馒头良好的口感^[38]。但随着发酵时间的继续延长, 淀粉分子更易与水分子结合, 进而与面筋蛋白发生竞争性吸水, 弱化面筋网络结构的形成和稳定, 导致重组馒头硬度、咀嚼性增加, 弹性、回复性下降。

2.6 重组馒头感官品质分析

感官评价是利用专业评价人员的视觉、味觉、嗅觉等感官, 并结合理化、心理、统计学等手段分析食品品质特性的科学方法, 可对食品品质进行定性和定量分析^[39]。重组馒头的感官评价结果如图 3 所示。由图 3 可知, 随着发酵时间的延长, 重组馒头的各项感官指标评分均呈先增加后降低趋势。其中 SB-60 min 的感官评价总分最高, 为 79.4 分, 而 SB-0 min 和 SB-120 min 的感官评价总分均相对较低, 这与重组馒头的比容和质构特性结果一致。这可能是由于适度发酵有利于面筋蛋白形成稳定的三维网络结构, 并增强面团醒发过程中的持气能力, 从而赋予重组馒头较好的感官品质。而过度发酵会导致淀粉分子与面筋蛋白竞争性吸水, 使面筋蛋白结构弱化且持气能力减弱, 进而导致重组馒头感官品质下降。

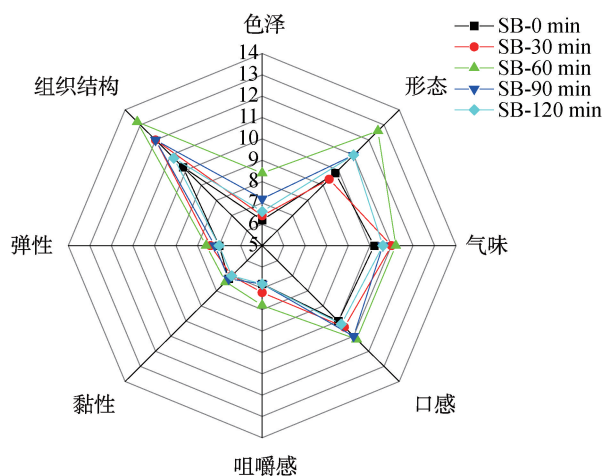


图 3 重组馒头的感官评价结果

Fig. 3 Sensory evaluation scores of reconstituted steamed bread

3 结论

本文研究了不同发酵时间淀粉的水合能力, 包括吸水能力、溶解度和膨胀度, 以及其对重组面团的水分分布、微观结构与重组馒头的比容、质构特性和感官品质的影响, 得到如下结论: 随着发酵时间的延长, 淀粉的吸水能力和溶解度均呈上升趋势, 而膨胀度呈先上升后下降趋势, 表明发酵能增强淀粉的水合能力; 适度发酵有利于淀粉颗粒更好地填充到面筋蛋白网络结构的间隙中, 增强淀粉与面筋蛋白之间的相互作用, 促进面筋网络结构的形成和稳定, 进而提升重组面团网络结构的稳定性和致密性。重组馒头的比容、弹性和回复性均呈先增大后减小的趋势, 而硬度和咀嚼性均呈先减小后增大的趋势, 其中由发酵 60 min 淀粉所制备的重组馒头, 感官评价总分最高, 质构特性最好, 更易被消费者所接受。本研究揭示了在面团发酵过程中, 淀粉水合能力变化对馒头品质的影响规律, 可为优化发酵面制品工业化生产提供参考。然而, 发酵过程中面团蛋白质与淀粉分子之间相互作用的具体变化机制, 尚有待进一步研究与明确。

参考文献:

- [1] 艾志录, 聂文静, 邢小龙, 等. 不同地区传统老酵头对面团发酵特性及馒头品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(10): 71-78.
- [2] 乞萌, 魏冠棉, 李丽娜, 等. 不同酵母发酵面团特性分

- 析及其对馒头品质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45 (12): 59-67.
- [3] ZHANG B B, XIE X H, ZHU H S, et al. Solid-state fermentation by *S. cerevisiae* with high resistance to ferulic acid improves the physicochemical properties of wheat bran and quality of bran-rich Chinese steamed bread[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(2): 954-965.
- [4] 陈佳芳, 汤晓娟, 蒋慧, 等. 不同高产胞外多糖乳酸菌发酵荞麦酸面团对面团面筋网络结构和面包烘焙特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 1-6.
- [5] 刘长虹, 拱姍姍, 韩丹丹, 等. 深度发酵过程面团面筋蛋白的变化[J]. 食品科技, 2015, 40(2): 204-207.
- [6] XIE D D, LI X, LI X H, et al. Effect of gluten protein levels on physicochemical and fermentation properties of corn dough[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2024, 59(1): 189-196.
- [7] WANG H W, LIU J J, ZHANG Y S, et al. Insights into the hierarchical structure and physicochemical properties of starch isolated from fermented dough[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267(2): 131315.
- [8] 曹龙奎, 寇芳, 康丽君, 等. 自然发酵对小米淀粉分子结构及凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(14): 127-131.
- [9] 马蕾, 梁建芬. 不同发酵处理对玉米粉加工特性及淀粉粒结构的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 303-311.
- [10] 闫慧丽, 陆啟玉, 李翠翠. 小麦淀粉结构、组成、改性对其理化性能及面条品质的影响研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 307-313.
- [11] 张克, 陆啟玉. 小麦氧化淀粉的理化性质及对生鲜面条品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 26-30.
- [12] PYCIA K, GAŁKOWSKA D, JUSZCZAK L, et al. Physicochemical, thermal and rheological properties of starches isolated from malting barley varieties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(8): 4797-4807.
- [13] 李越, 王龙, 苗榕芯, 等. 不同改良剂对发芽糙米-小麦面团性质及馒头品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 222-228.
- [14] 陈金凤, 李敏, 崔彦利, 等. 面团发酵和面包焙烤过程中小麦淀粉理化和结构特性变化[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(14): 126-131.
- [15] LIANG W, SHEN H S, LIN Q, et al. Moderate regulation of wheat B-starch ratio: Improvement of molecular structure, spatial conformation, aggregation behavior of reconstituted fermented doughs and its processing suitability[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 274: 133256.
- [16] ZHAO T, LI X P, ZHU R Z, et al. Effect of natural fermentation on the structure and physicochemical properties of wheat starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 218: 163-169.
- [17] 王宏伟, 王小婷, 国思琪, 等. 不同贮藏期小麦淀粉水合能力变化对面条品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 122-130.
- [18] SONKAR S, JADDU S, PRADHAN R C, et al. Effect of atmospheric cold plasma (pin type) on hydration and structure properties of kodo-millet starch[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 182: 114889.
- [19] 张华, 王新天, 宋佳宁, 等. 不同干燥方法对预糊化淀粉理化性质的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(7): 4-7.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 粮油检验 小麦粉馒头加工品质评价: GB/T 35991—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [21] 王宏伟, 国思琪, 苏会雨, 等. 亚麻籽胶和沙蒿胶对冷冻面团及馒头品质的影响[J]. 轻工学报, 2023, 38(6): 1-10.
- [22] DAVOUDI Z, AZIZI M H, BARZEGAR M. Porous corn starch obtained from combined cold plasma and enzymatic hydrolysis: Microstructure and physicochemical properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 223: 790-797.
- [23] 张爱霞, 刘敬科, 赵巍, 等. 小米馒头质构分析和品质评价[J]. 食品科技, 2017, 42(6): 156-161.
- [24] 王宏伟, 陈彬云, 许可, 等. 冻融淀粉对馒头品质的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(7): 69-76.
- [25] 孙祥祥, 刘长虹, 崔晨悦, 等. 米酒老面添加量对面团及馒头品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(4): 47-50, 57.
- [26] LIU D X, SONG S X, TAO L, et al. Effects of common buckwheat bran on wheat dough properties and noodle quality compared with common buckwheat hull[J]. LWT-Food Science & Technology, 2022, 155: 112971.
- [27] 陈佩, 张晓, 赵冰, 等. 糯小麦淀粉形态及内部结构的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(1): 70-72.
- [28] 杨月月, 王晓曦, 马森. 小麦淀粉性质及其对面制品影响的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(12): 19-21.
- [29] BONANNO A, DI GRIGOLI A, TODARO M, et al. Improvement of oxidative status, milk and cheese production, and food sustainability indexes by addition of durum wheat bran to dairy cows' diet[J]. Animals, 2019, 9(9): 698.
- [30] WANG J Q, LYU X R, LAN T, et al. Modification in structural, physicochemical, functional, and *in vitro* digestive properties of kiwi starch by high-power ultrasound treatment[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106004.
- [31] 马珂莹, 黄峻榕, 伏佳静, 等. 谷朊粉和小麦淀粉添加量对重组面团冻藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 38-44.
- [32] 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.
- [33] 逯蕾, 韩小贤, 郑学玲, 等. 小麦粉水溶物对面团和面

制品的影响[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(4): 13-18.

[34] FAN J L, HAN N, CHEN H Q. Physicochemical and structural properties of wheat gluten/rice starch dough-like model[J]. Journal of Cereal Science, 2021, 98: 103181.

[35] HU X H, CHENG L, HONG Y, et al. An extensive review: How starch and gluten impact dough machinability and resultant bread qualities[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(13): 1930-1941.

[36] 张艳艳, 吴昊, 白冰洁, 等. 冻结过程中面团水分均匀度及面筋蛋白网络结构变化规律研究[J]. 轻工学报, 2023, 38(6): 11-17.

[37] MA S, ZHAN J, WANG Z, et al. Effect of baked wheat germ on the rheology and fermentation properties of steamed bread dough[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(6): 1-8.

[38] 刘艳红. 益生菌发酵对面团性质及馒头品质的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2022.

[39] 王月慧, 翟健安, 吴会敏, 等. 不同酯化度的果胶对小麦粉及馒头品质的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(7): 174-179.

Effects of starch hydration dynamics during dough fermentation on steamed bread quality

SU Panpan^{1,2}, QIAO Jingyue^{1,3}, ZHANG Yu⁴, SHEN Huishan^{1,2,3}, ZHANG Yanyan^{1,2,3},
LIU Xingli^{1,2}, ZHANG Hua^{1,2,3}, WANG Hongwei^{1,2,3}

1. College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. Zhengzhou University of Light Industry, Key Laboratory of Cold Chain Food Processing and Safety Control, Ministry of Education, Zhengzhou 450001, China;
3. Zhengzhou University of Light Industry, Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe 462300, China;
4. Neijiang Academy of Agricultural Sciences, Neijiang 641000, China

Abstract: Starch was extracted from wheat doughs fermented for 0~120 min (0 min, 30 min, 60 min, 90 min, and 120 min) to examine changes in its hydration capacity. The starch was then recombined with gluten to prepare reconstituted doughs, and the effects on dough water distribution, microstructure, and steamed bread specific volume, textural properties, and sensory quality were analyzed. Results showed that starch water absorption capacity and solubility increased continuously with fermentation time, while swelling power initially rose and then declined, peaking at 7.05 g/g after 60 min. In the reconstituted doughs, strongly bound water (A_{21}) and free water (A_{23}) proportions decreased, while weakly bound water (A_{22}) increased, indicating a conversion of strongly bound to weakly bound water. The gluten network became more uniform and continuous, with starch granules densely embedded. At 60 min, starch granules were uniformly integrated into the membranous gluten matrix, forming an ordered starch-gluten composite. Steamed bread specific volume, springiness, and resilience initially increased and then decreased, while hardness and chewiness showed the opposite trend. At 60 min, the steamed bread exhibited the best specific volume and textural properties, with the highest sensory score of 79.4. Moderate fermentation enhanced starch hydration capacity, thus improving steamed bread quality.

Key words: dough fermentation; hydration capacity; starch; steamed bread; quality

[责任编辑: 杨晓娟]