

菊粉对面团中水分迁移行为的影响规律研究

罗登林¹ 梁旭苹¹ 徐宝成¹ 许威² 韩四海¹ 周路¹

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471003; 2. 信阳师范学院生命科学学院, 信阳 464000)

摘要: 为了研究不同聚合度菊粉对面团中不同流动性水分迁移行为的影响规律,以短链、天然和长链菊粉及中筋面粉为原料,采用差示量热扫描仪(DSC)和核磁共振仪(NMR)分析了不同聚合度菊粉在不同添加量(0、2.5%、5.0%、7.5%、10.0%)时对面团中可冻结水(弱结合水和自由水)和不可冻结水(紧密结合水)的影响。DSC结果表明:3种不同聚合度菊粉的添加均引起面团中可冻结水含水率的下降和不可冻结水含水率的上升;NMR结果表明:随着菊粉添加量的增加,面团中紧密结合水和自由水含水率增大,弱结合水含水率减小,说明菊粉的添加促进了蛋白质与水分的相互作用,而抑制了淀粉与水分的相互作用。短链和天然菊粉对面团中自由水的影响较明显,而长链菊粉则对紧密结合水的影响较明显,3种菊粉都对弱结合水的影响较明显。分析显示DSC与NMR测得面团中水分状态的结果具有一致性,面团中水分迁移行为与菊粉添加量之间存在显著的线性相关性。

关键词: 菊粉; 面团; 水分迁移; 差示量热扫描; 核磁共振

中图分类号: TS211 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0335-07

Effect of Inulin on Moisture Migration Behavior in Wheat Dough

LUO Denglin¹ LIANG Xuping¹ XU Baocheng¹ XU Wei² HAN Sihai¹ ZHOU Lu¹

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. College of Life Science, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: In order to investigate the influence of inulin on water migration in wheat dough, the freezable water (loosely bound water and free water) and non-freezable water (tightly bound water) of wheat dough with different addition proportions (0, 2.5%, 5.0%, 7.5% and 10.0%) of short-chain, natural and long-chain inulin were determined by using differential scanning calorimetric (DSC) and nuclear magnetic resonance (NMR) techniques. The results of DSC showed that inulin with different degrees of polymerization (DP) all decreased freezable water content and increased non-freezable water content. And the effect of long-chain inulin on freezable water content was the most obvious. NMR results showed that with the increase of three kinds of inulin added, the contents of tightly bound water and free water were all increased in the dough, while the loosely bound water content was reduced, suggesting that the addition of three types of inulin all promoted the interaction between protein and water and inhibited the interaction between starch and moisture. The short-chain inulin and natural inulin had more obvious impact on the content of free water of the dough. On the other hand, the long-chain inulin had more significant influence on the content of tightly bound water; three kinds of inulin all had obvious effect on the loosely bound water content. In addition, the results of water state in the dough measured by DSC and NMR were consistent; there was a significant correlation between water migration and inulin addition. The test could provide data references for studying water distribution during the making process of dough and adjusting the product processing technology.

Key words: inulin; dough; moisture migration; differential scanning calorimetric; nuclear magnetic resonance

收稿日期: 2016-07-11 修回日期: 2016-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371832)、河南省高校科技创新人才支持计划项目(16HASTIT020)、河南科技大学校创新团队计划项目(2015XTD007)和河南科技大学 SRTP 计划项目(2016070)

作者简介: 罗登林(1976—),男,教授,主要从事食品营养与健康及超声技术研究,E-mail: luodenglin@163.com

引言

在食品体系中,水分的存在状态对食品的加工品质(包括质构品质、物化性质及感官品质)具有重要的影响。面团的形成过程主要是水分子与面团中的蛋白质和淀粉等大分子物质相互结合的过程,其中用于水化面粉组分并形成面筋网络结构的水分被称为结合水,自由水则在一定程度上代表着面团的流动性,对面团的稳定性起着重要的作用。因此,水分的形态和分布将直接影响面团的流变特性和加工性能,从而改变最终产品的质量。目前,用于分析食品体系中水分的状态、分布和流动性的方法通常是采用差示量热扫描(DSC)和核磁共振技术(NMR),例如,KRECH等^[1-2]利用DSC技术研究了壳聚糖和大麦抗冻蛋白对面包和面团在制作和贮藏过程中水分状态变化的影响,林向阳等^[3-4]利用NMR技术测定了面团形成过程中水分状态的变化,发现随着加水量的增加自由水含水率迅速增加,而弱结合水和紧密结合水含水率则逐渐趋于稳定。

菊粉是一种天然果糖聚合物,平均聚合度通常为2~60,按其聚合度不同分为短链菊粉(平均聚合度0~10)、长链菊粉(平均聚合度23以上)和天然菊粉(平均聚合度2~60)^[5-6]。作为一种可溶性膳食纤维,菊粉具有降血糖、维持脂类代谢平衡、增强机体免疫力等多种生理功能^[7-8],并被批准为一种功能性食品配料而广泛应用于各类食品中,以提高产品的加工性能和营养价值^[9-10]。WANG等^[11]的研究表明,菊粉的添加降低了高筋面团的吸水性,显著提高了面团的稳定性,但研究未说明是哪种菊粉。KAROLINI-SKARADZINSKA等^[12]发现长链菊粉TEX的加入会降低由2种不同蛋白质含量面粉所制作面团的吸水性。PERESSINI等^[13]的研究也证实了不同聚合度菊粉的加入均会降低面团的吸水性,并且随着菊粉聚合度的增大,对面团膨胀的抑制作用也更加明显。但是,对于不同聚合度菊粉对面团中不同流动性水分(结合水与自由水)的变化规律方面的研究还未见报道。

本文主要采用DSC和NMR 2种分析技术研究3种不同聚合度和不同添加量的菊粉对面团中水分性质的影响,并进一步分析2种方法测定结果与菊粉添加量的相关性,以期能够深入了解面团制作过程中菊粉的添加对水分状态迁移行为的影响规律,为菊粉面制品相关产品的加工和贮藏提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料和设备

短链菊粉(纯度92.4%),购买于昆山拓丰有限公司;天然菊粉(纯度86%)和长链菊粉(纯度94.5%),购买于比利时Cosucra公司,3种菊粉均在60℃条件干燥至质量恒定;面粉(蛋白质质量分数12.62%,含水率10.85%),洛阳市绿源石磨粮食加工有限公司;HM740型和面机,青岛汉尚电器有限公司;101-2型电热鼓风干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司;DSC-1型差示量热扫描仪,瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司;MesoMR23060H-1型低场核磁共振成像与分析系统,上海纽迈电子科技有限公司。

1.2 面团的制备

准确称取200g小麦面粉,不同聚合度的菊粉分别按小麦面粉质量分数0、2.5%、5.0%、7.5%、10%的比例加入,然后将混合粉放入和面机中并加入96mL去离子水(空白实验确定)进行15min搅拌。

1.3 总含水率的测定

参照GB 5009.3—2010中的直接干燥法,平行测定3次,取平均值。

1.4 DSC测定

参照LU等^[14]的方法进行调整,从制得面团的中心部位精确称取(20±0.01)mg样品平铺于铝坩埚底部,并用压样器进行密封;同时以密封的空坩埚作空白参比。在氮气流量为100mL/min的条件下,将样品放入样品池,以5℃/min的速率从25℃冷却至-40℃,并在-40℃保温10min,然后再以相同的速率升温至40℃,得到相应的DSC曲线。记录不同面团样品在结晶和熔融过程中的焓变。每个样品平行测定3次,取平均值。同时,根据DSC曲线上的熔化焓变 ΔH ,即可计算出可冻结水的含水率,计算式为

$$F = \Delta H / (\Delta H_0 W_t) \times 100\%$$

式中 ΔH_0 ——纯水的热熔值,取334 J/g

W_t ——面团的总含水率

1.5 NMR测定

将制好的面团迅速称取(25.00±0.05)g放入核磁试管中,再分别置于恒温(32℃)的核磁永久磁场中心位置的射频线圈中心,利用CPMG脉冲序列测量样品的自旋-自旋弛豫时间 T_2 ,然后根据 T_2 的反演程序得出相应面团样品 T_2 的反演谱图。每个样品平行测定3次,取平均值。其中,CPMG实验的参数设置为:采样点数 $T_D = 60\ 018$,采样频率 $S_w = 200\ \text{kHz}$,采样间隔时间 $T_w = 1\ 000\ \text{ms}$,回波个数

1 000, 回波时间 300 μs , 累加次数 $N_s = 16$ 。

1.6 数据处理

利用 Origin 8.0 进行数据处理和图形制作。采用 SPASS 17.0 对 2 种方法测得的实验数据进行显著性分析、相关性分析和线性回归分析。显著性分析采用 Duncan 检验, 显著性差异 $P < 0.05$; 相关性分析采用 Pearson 相关系数和 Two-tailed 显著性检验。

2 结果与分析

2.1 DSC 分析菊粉对面团中水分分配行为的影响及其相关性

表 1 列出了不同聚合度和添加量的菊粉对面团融化焓变、可冻结水和不可冻结水含水率的影响。从表中可以看出, 3 种菊粉的加入均显著降低了面团的水分融化焓变和可冻结水的含水率 ($P < 0.05$), 说明不同聚合度的菊粉均能改变面团中水分的分布状态, 使整个体系的水分子产生了迁移和重新分配, 且随着菊粉添加量的增加, 这种迁移行为更明显。这主要归因于菊粉分子为线性直链多糖, 链长较短, 溶于水溶液后有大量的羟基暴露在外, 因此具有较强的亲水性, 其能与水分子以氢键相结合, 从而导致面团中水分子的移动性和可冻结水含水率下降^[15]。另一方面, 菊粉的加入会增加水溶液的黏度, 从而改变了面团的流变学特性, 使得面团中可冻结的水分子运动受到限制, 从而减小可冻结水的含水率。CARINI 等^[16]发现将胡萝卜多糖加入面团中后因其增加了面团中亲水基的浓度, 也会显著降低面团中可冻结水的含水率。

表 1 菊粉对面团中水分状态的影响

Tab. 1 Effect of inulin on properties of water in wheat dough

菊粉	添加量/%	融化焓变 $\Delta H / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	可冻结水含水率/%	不可冻结水含水率/%
空白	0	58.37 \pm 0.81 ^a	43.08 \pm 0.24 ^a	56.92 \pm 0.26 ^g
	2.5	56.06 \pm 0.73 ^b	42.04 \pm 0.37 ^{bc}	57.96 \pm 0.34 ^{ef}
	5.0	54.64 \pm 0.24 ^c	41.51 \pm 0.07 ^{bcd}	58.49 \pm 0.06 ^{def}
	7.5	52.57 \pm 0.07 ^{de}	40.46 \pm 0.02 ^e	59.54 \pm 0.01 ^e
	10.0	51.90 \pm 0.32 ^{de}	40.38 \pm 0.43 ^e	59.62 \pm 0.26 ^e
短链	2.5	56.21 \pm 0.45 ^b	42.10 \pm 0.138 ^{ab}	57.81 \pm 0.12 ^{fg}
	5.0	54.32 \pm 0.63 ^c	41.18 \pm 0.18 ^{cde}	58.82 \pm 0.04 ^{ede}
	7.5	52.84 \pm 0.31 ^d	40.64 \pm 0.10 ^{de}	59.36 \pm 0.05 ^{cd}
	10.0	51.40 \pm 0.04 ^{ef}	40.28 \pm 0.01 ^e	59.72 \pm 0.03 ^e
	2.5	56.71 \pm 0.08 ^{ab}	42.41 \pm 0.03 ^{ab}	57.59 \pm 0.02 ^{fg}
天然	5.0	54.58 \pm 0.35 ^c	41.53 \pm 0.11 ^{bcd}	58.47 \pm 0.04 ^{def}
	7.5	50.67 \pm 0.02 ^f	39.04 \pm 0.01 ^f	60.96 \pm 0.11 ^b
	10.0	46.53 \pm 0.89 ^g	36.42 \pm 0.27 ^g	63.58 \pm 0.25 ^a
	2.5	56.71 \pm 0.08 ^{ab}	42.41 \pm 0.03 ^{ab}	57.59 \pm 0.02 ^{fg}
	5.0	54.58 \pm 0.35 ^c	41.53 \pm 0.11 ^{bcd}	58.47 \pm 0.04 ^{def}
长链	7.5	50.67 \pm 0.02 ^f	39.04 \pm 0.01 ^f	60.96 \pm 0.11 ^b
	10.0	46.53 \pm 0.89 ^g	36.42 \pm 0.27 ^g	63.58 \pm 0.25 ^a

注: 同列不同字母表示水平间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

当 3 种菊粉的添加量达到 10% 时, 短链菊粉使面团的水分融化焓变和可冻结水含水率较空白分别降低了 11.08% 和 6.28%, 天然菊粉分别降低了 11.94% 和 6.50%, 长链菊粉分别降低了 20.28% 和 15.46%。其中, 添加长链菊粉的面团可冻结水含水率下降最明显, 其次是天然菊粉, 最后是短链菊粉, 产生这种差异性的原因是菊粉的聚合度不同, 长链菊粉的聚合度较高, 分子链长, 在水溶液中运动更容易形成空间网络结构, 从而降低了水分子运动^[13]。HAGER 等^[17]实验表明添加 3% 的菊苣菊粉或 6.8% 的短链菊粉会降低面团的含水率。SALINAS 等^[18]的研究也证实了短链菊粉的添加显著降低了面团的含水率, 同时还发现菊粉良好的持水性使得面团在最低的含水率下达到最佳的粘稠度, 使面团的结构更加光滑柔软, 但却均未对菊粉是如何影响面团中不同流动性水分的变化进行研究, 也未对天然和长链菊粉进行对比研究。

同时, 面团中不可冻结水的含水率则随着菊粉添加量的增加而逐渐升高, 且当 3 种菊粉的添加量分别高于 2.5% 时, 不可冻结水的含水率开始显著高于空白面团 ($P < 0.05$), 说明随着菊粉添加量的增加, 面团中不可冻结水的含水率显著升高。KERCH 等^[19]认为不可冻结水即为面团中的紧密结合水, 其冰点较低, 甚至在 -40°C 都不结冰。因此, 不可冻结水含水率的升高表明菊粉的加入会降低面团的冰点温度, 有利于抑制面团在冷冻过程中冰晶的形成和冻藏过程中冰晶的长大, 提高了面团的冷冻稳定性, 能够有效地保护面团的结构和质构不受破坏, 防止面团开裂, 从而提高了面团的贮藏稳定性, 并延长了其货架期^[20]。

表 2 为 DSC 方法测定的菊粉添加量与面团中水分状态的相关性分析。从表中可以看出, 3 种菊粉的添加量均与面团中可冻结水含水率呈显著负相关, 其中, 天然菊粉与可冻结水含水率之间的线性相关系数高于短链和长链菊粉, 且相关系数均超过 0.95。通过线性回归方程可知, 加入长链菊粉的面团中可冻结水含水率的变化斜率最大, 表明长链菊粉的添加对面团中水分分配行为的影响最明显, 其次是天然菊粉, 最后是短链菊粉。

2.2 NMR 分析菊粉对面团水分弛豫时间和峰面积的影响及其相关性

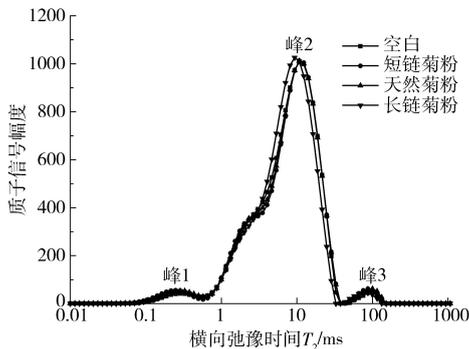
图 1 为通过 CPMG- T_2 脉冲序列及拟合后得到的空白面团和 3 种菊粉添加量在 5% 时面团水分的 T_2 反演示意图。从图中可以看出, 每条曲线上均存在 3 个峰, 这表明面团中至少存在 3 种状态的水分, 分别对应于 T_{21} (0.01 ~ 1 ms)、 T_{22} (1 ~ 40 ms) 和 T_{23}

表2 DSC方法测定的菊粉添加量与面团中水分状态的相关性

Tab. 2 Correlation analysis of inulin content with water distribution in wheat dough measured by DSC

菊粉	含水率	回归方程	相关系数 R	决定系数 R^2
短链	可冻结水含水率	$y = -0.279x + 42.890$	-0.975 **	0.951
	不可冻结水含水率	$y = 0.279x + 57.110$	0.975 **	
天然	可冻结水含水率	$y = -0.286x + 42.900$	-0.982 **	0.965
	不可冻结水含水率	$y = 0.286x + 57.100$	0.982 **	
长链	可冻结水含水率	$y = -0.668x + 43.834$	-0.961 **	0.924
	不可冻结水含水率	$y = 0.668x + 56.166$	0.961 **	

注: ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著, x 表示菊粉添加量, y 表示含水率。

图1 面团的水分横向弛豫时间 T_2 反演图Fig. 1 Water inversion results of transverse relaxation times T_2 in wheat dough

(40 ~ 200 ms)。 T_{21} 表示紧密结合水, 主要是水与蛋白质大分子表面极性基团紧密结合的弛豫时间; T_{22} 表示弱结合水, 主要是水与淀粉和糖类等大分子连接的弛豫时间; T_{23} 则表示游离在外的自由水^[21-22]。 T_2 值越小表示水分结合的越紧密, 面团持水性越好。其中, 加入长链菊粉面团的弛豫时间 T_{21} 值没有明显变化(0.27 ms), 而 T_{22} (9.33 ms) 和 T_{23} (76.28 ms) 均显著小于空白面团对应的时间(10.72 ms、100 ms); 加入短链和天然菊粉面团的弛豫时间 T_{21} (0.25 ~ 0.28 ms) 和 T_{22} (10.72 ms) 相比空白面团的 T_{22} 没有

发生变化, 但 T_{23} 值(86.97 ~ 93.49 ms) 也均小于空白面团。表明不同聚合度菊粉的添加均导致面团中水分的流动性变差, 其中长链菊粉的水分流动性最弱, 水分子与面团体系中其他组分之间的相互结合更为紧密。LIU 等^[23] 的研究表明, 菊粉能够通过氢键与蛋白质相结合, 且长链菊粉与蛋白质的相互作用强于短链和天然菊粉, 因此加入长链菊粉制得面团的水分自由度最低。同时拟合计算各峰所覆盖范围的信号幅度, 以每个峰的积分面积占总峰面积的百分比表示面团中不同形态水分的相对含量, 分别记为 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} 。其中, 弱结合水 A_{22} 的信号幅度所占的百分比最大, 高达 94% 以上, 表明在面筋网络充分形成的面团中最主要的水分形态是弱结合水。

表3 为不同聚合度和添加量的菊粉对面团弛豫时间 T_2 及对应峰面积百分比 A_2 的影响。由表3 可以看出, 随着菊粉添加量的增加, 短链菊粉和天然菊粉对面团的弛豫时间 T_{21} 、 T_{22} 无显著性影响($P > 0.05$); 对于长链菊粉, 不同添加量对面团的 T_{21} 也无显著性影响, 但当添加量高于 2.5% 时, 面团的弛豫时间 T_{22} 开始显著小于空白面团($P < 0.05$), 且添加

表3 菊粉对面团水分弛豫时间 T_2 和峰面积的影响Tab. 3 Effect of inulin on relaxation time T_2 and peak areas of wheat doughs

菊粉	添加量/%	紧密结合水横向弛豫时间 T_{21} /ms	弱结合水横向弛豫时间 T_{22} /ms	自由水横向弛豫时间 T_{23} /ms	紧密结合水峰面积百分比 $A_{21}/\%$	弱结合水峰面积百分比 $A_{22}/\%$	自由水峰面积百分比 $A_{23}/\%$
空白	0	0.28 ^a	10.72 ± 0.01 ^a	100.00 ^a	2.90 ± 0.16 ^a	95.51 ± 0.19 ^a	1.60 ± 0.03 ^a
	2.5	0.27 ± 0.02 ^a	10.72 ± 0.01 ^a	93.49 ± 6.52 ^{ab}	3.15 ± 0.32 ^a	95.10 ± 0.24 ^{ab}	1.76 ± 0.08 ^{fg}
短链	5.0	0.25 ^a	10.72 ± 0.01 ^a	93.49 ± 6.52 ^{ab}	3.53 ± 0.62 ^a	94.30 ± 0.46 ^b	2.19 ± 0.16 ^{bed}
	7.5	0.25 ^a	10.72 ± 0.01 ^a	93.49 ± 6.52 ^{ab}	3.30 ± 0.21 ^a	94.45 ± 0.25 ^{ab}	2.25 ± 0.04 ^{bc}
	10.0	0.25 ^a	10.72 ± 0.01 ^a	86.97 ^{ab}	3.30 ± 0.06 ^a	94.19 ± 0.02 ^b	2.52 ± 0.08 ^a
	2.5	0.25 ± 0.03 ^a	10.72 ± 0.01 ^a	93.49 ± 6.52 ^{ab}	3.45 ± 0.16 ^a	94.68 ± 0.15 ^{ab}	1.88 ± 0.01 ^{ef}
天然	5.0	0.28 ^a	10.72 ± 0.01 ^a	86.97 ± 6.52 ^{ab}	3.28 ± 0.04 ^a	94.63 ± 0.07 ^{ab}	2.10 ± 0.01 ^{ede}
	7.5	0.28 ± 0.06 ^a	10.72 ± 0.01 ^a	93.49 ± 6.52 ^{ab}	3.11 ± 0.01 ^a	94.63 ± 0.02 ^{ab}	2.27 ± 0.02 ^{bc}
	10.0	0.28 ^a	10.72 ± 0.01 ^a	86.97 ^{ab}	2.99 ± 1.08 ^a	94.60 ± 0.04 ^{ab}	2.41 ± 0.04 ^{ab}
长链	2.5	0.28 ± 0.04 ^a	10.72 ± 0.01 ^a	86.97 ^{ab}	3.29 ± 0.54 ^a	94.96 ± 0.96 ^{ab}	1.77 ± 0.14 ^{fg}
	5.0	0.27 ± 0.02 ^a	9.33 ± 0.01 ^b	76.38 ± 10.59 ^{ab}	3.29 ± 0.01 ^a	94.91 ± 0.48 ^{ab}	1.80 ± 0.06 ^{fg}
	7.5	0.28 ^a	9.33 ± 0.01 ^b	76.38 ± 10.59 ^{ab}	3.36 ± 0.01 ^a	94.67 ± 0.01 ^{ab}	1.99 ± 0.01 ^{def}
	10.0	0.25 ^a	8.11 ± 0.01 ^c	72.10 ± 14.87 ^b	4.14 ± 0.01 ^a	94.00 ± 0.01 ^b	1.87 ± 0.03 ^{ef}

量越多 T_{22} 值越小。面团的弛豫时间 T_{23} 也随着 3 种菊粉的添加逐渐下降,当菊粉添加量达到最大值 10.0% 时,面团的 T_{23} 最小。表明菊粉的添加增强了面团体系对自由水的束缚力,导致这部分水的自由度下降。这可以归因于菊粉具有较强的亲水性及持水性,其分子链上的羟基与水分子通过质子交换降低水的流动性,从而减小弛豫时间,且菊粉添加量越多,对水分子流动的抑制能力就越强,自由水的弛豫时间 T_{23} 下降得就越快。

此外,从表 3 中还可以看出,3 种菊粉的加入均导致面团的紧密结合水峰面积百分比 A_{21} 升高和弱结合水峰面积百分比 A_{22} 下降,但变化都不显著 ($P > 0.05$, 除 10.0% 的长链菊粉添加量外);而面团的自由结合水峰面积百分比 A_{23} 则随着 3 种菊粉添加量的增加均呈上升趋势,且相对空白面团变化显著 ($P < 0.05$)。总体看来,3 种菊粉的加入均引起面团中弱结合水向自由水和紧密结合水的方向迁移,导致弱结合水含水率的下降、紧密结合水与自由水含水率的升高。弱结合水主要是由面团中淀粉与水分子间相互作用产生的,其含水率下降表示两者间的相互作用减弱,在面团搅拌的过程中,相对于淀粉分子来说,菊粉的分子量较小,因此其会作为一种稀释物质在淀粉颗粒的周围形成一种障碍,此时,菊粉由于吸水作用而占据了一部分水分,使得淀粉颗粒周围的水分分配量下降,从而延缓了淀粉颗粒的吸水膨胀^[24-25]。紧密结合水主要是由面团中蛋白质与水分子相互作用产生的,其含水率上升表示两者间相互作用增强,在面筋网络形成的过程中,菊粉会与面团中的面筋蛋白以氢键和疏水方式相结合,从而形成更加致密的网络结构,增强了对水分子的截留能力,促进了蛋白质的水合作用^[23]。对于 3 种菊粉,在引起自由水含水率上升方面,加入短链和天然菊粉的面团自由水含水率变化大于长链菊粉;而在引起紧密结合水上升方面,加入长链菊粉的面团紧密结合水含水率变化大于短链和天然菊粉,出现这种差异性的原因可能是因为短链和天然菊粉的聚合度相似,而长链菊粉的聚合度高,分子量相对较大,疏水性也会随之增强,且其分子链上含有的羟基数量高于短链和天然菊粉,因此,长链菊粉对淀粉的包裹作用会更强,同时长链菊粉在提高面筋网络致密性和面筋蛋白乳化活性能力方面也均强于短链和天然菊粉^[23,26]。

表 4 为 NMR 方法测定的菊粉添加量与面团中水分分布的相关性。从表中可以看出 3 种菊粉的添加量均与面团的质子信号幅度具有明显的线性相关性。长链菊粉添加量与 A_{21} 和 A_{22} 之间的线性相关系

表 4 NMR 方法测定的菊粉添加量与面团中水分状态的相关性

Tab. 4 Correlation analysis of inulin content with water distribution in wheat dough measured by NMR

菊粉	相关系数		回归方程	决定系数
	R			
短链	A_{21}	0.650	—	—
	A_{22}	-0.913 *	$Y = -0.330x + 95.698$	0.833
	A_{23}	0.980 **	$Y = 0.234x + 1.358$	0.959
天然	A_{21}	0.529	—	—
	A_{22}	-0.751	—	—
	A_{23}	0.990 **	$Y = 0.201x + 1.444$	0.981
长链	A_{21}	0.889 *	$Y = 0.255x + 2.627$	0.791
	A_{22}	-0.958 *	$Y = -0.333x + 95.804$	0.917
	A_{23}	0.845	—	—

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著,“—”表示不存在线性相关性, x 表示菊粉添加量, Y 表示峰面积百分比。

数均高于短链和天然菊粉,其中 A_{21} 与菊粉添加量呈显著线性正相关 ($R = 0.889$), A_{22} 与菊粉添加量呈显著线性负相关 ($R = -0.958$);而短链和天然菊粉的添加量与 A_{23} 之间的线性相关系数 ($R = 0.980$ 和 0.990) 高于长链菊粉,且均显著。通过线性回归方程可知,就紧密结合水和弱结合水的变化而言,加入长链菊粉的面团变化速率大于短链菊粉和天然菊粉;而对于自由水的变化,加入短链菊粉的面团变化速率大于天然和长链菊粉。

2.3 DSC 和 NMR 测定水分状态结果的相关性分析

DSC 和 NMR 2 种测定方法分析菊粉对面团中水分迁移行为的影响,结果的相关性分析如表 5 所示。DSC 测得的可冻结水含水率与 NMR 测得的深层结合水的峰面积 A_{21} 极显著负相关 ($R = -0.811$, $P < 0.01$), 与弱结合水峰面积 A_{22} 极显著正相关 ($R = 0.767$, $P < 0.01$)。不可冻结水含水率与横向弛豫时间 T_{22} 和对应的峰面积 A_{22} 极显著负相关,分别为 $R = -0.789$ 和 $R = -0.767$ ($P < 0.01$);同时,与深层结合水峰面积 A_{21} 呈极显著正相关 ($R = 0.811$, $P < 0.01$)。这些表明 DSC 测得的可冻结水峰面积百分比的变化趋势与 NMR 测得的弱结合水峰面积百分比 A_{22} 的变化趋势一致,不可冻结水的百分比与深层结合水峰面积的百分比 A_{21} 也具有相同的变化趋势。

3 结束语

3 种不同聚合度菊粉的添加均能改变面团中水分的分布状态,DSC 结果表明,菊粉的添加引起可冻结水含水率的下降和不可冻结水含水率的上升,但菊粉聚合度不同,对水分迁移行为的影响也不同。

表5 DSC和NMR测定面团中水分形态结果的相关性分析

Tab.5 Correlation analysis of results of water state in dough determined by DSC and NMR

含水率	紧密结合水横向	弱结合水横向	自由水横向弛豫	紧密结合水峰面积	弱结合水峰面积	自由水峰面积
	弛豫时间 T_{21}	弛豫时间 T_{22}	时间 T_{23}	百分比 A_{21}	百分比 A_{22}	百分比 A_{23}
可冻结水含水率	0.339	0.492	0.354	-0.811 **	0.767 **	-0.302
不可冻结水含水率	-0.192	-0.789 **	-0.276	0.811 **	-0.767 **	0.302

注:**表示在 $P < 0.01$ 水平上显著。

而NMR结果表明,短链和天然菊粉对面团中自由水的影响较明显,而长链菊粉则对紧密结合水的影响较明显,3种菊粉都对弱结合水的影响较明显。3类菊粉中长链菊粉对面团的弱结合水影响最显著,当长链菊粉添加量高于5.0%时,长链菊粉能显著降低面团的弛豫时间 T_{22} 。随着菊粉添加量的增

加,面团中紧密结合水和自由水含水率增大,弱结合水含水率减小,说明菊粉的添加促进了蛋白质与水分的相互作用,而抑制了淀粉与水分的相互作用。同时,通过相关性分析可知,DSC与NMR测得的面团中水分状态结果具有一致性,面团的水分迁移行为与菊粉添加量之间存在显著的线性相关性。

参 考 文 献

- KERCH G, RUSTICHELLI F, AUSILI P, et al. Effect of chitosan on physical and chemical processes during bread baking and staling[J]. *European Food Research & Technology*, 2008, 226(6): 1459 - 1464.
- DING X, ZHANG H, WANG L, et al. Effect of barley antifreeze protein on thermal properties and water state of dough during freezing and freeze-thaw cycles[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 47(5): 32 - 40.
- 林向阳. 核磁共振及成像技术在面包制品加工与贮藏过程中的研究[D]. 南昌:南昌大学, 2006.
LIN Xiangyang. Study of bread during processing and storage using NMR and MRI techniques [D]. Nanchang: Nanchang University, 2006. (in Chinese)
- 何成云. 核磁共振及成像技术在馒头加工与贮藏过程中的研究[D]. 南昌:南昌大学, 2006.
HE Chengyun. Study of Chinese steamed bread during processing and storage using NMR and MRI techniques [D]. Nanchang: Nanchang University, 2006. (in Chinese)
- CHI Z M, ZHANG T, CAO T S, et al. Biotechnological potential of inulin for bioprocesses[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(6): 4295 - 4303.
- 魏凌云, 王建华, 郑晓冬, 等. 菊粉研究的回顾与展望[J]. *食品与发酵工业*, 2005, 31(7): 81 - 85.
WEI Lingyun, WANG Jianhua, ZHENG Xiaodong, et al. Review and prospects of the inulin research[J]. *Food & Fermentation Industries*, 2005, 31(7): 81 - 85. (in Chinese)
- KAUR N, GUPTA A K. Applications of inulin and oligofructose in health and nutrition[J]. *Journal of Biosciences*, 2002, 27(7): 703 - 714.
- BOSSCHER D, LOO J V, FRANCK A. Inulin and oligofructose as functional ingredients to improve bone mineralization[J]. *International Dairy Journal*, 2006, 16(9): 1092 - 1097.
- 罗登林, 许威, 陈瑞红, 等. 菊粉溶解性能与凝胶质构特性试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(3): 118 - 122. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120323&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.023.
LUO Denglin, XU Wei, CHEN Ruihong, et al. Solubility and gelatin textural properties of inulin[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3): 118 - 122. (in Chinese)
- MEYER D, BAYARRI S, TARREGA A, et al. Inulin as texture modifier in dairy products[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(8): 1881 - 1890.
- WANG J, ROSELL C M, BARBER C B D. Effect of the addition of different fibres on wheat dough performance and bread quality [J]. *Food Chemistry*, 2002, 79(2): 221 - 226.
- KAROLINI-SKARADZINSKA Z, BIHUNIAK P, PIOTROWSKA E, et al. Properties of dough and qualitative characteristics of wheat bread with addition of inulin[J]. *Polish Journal of Food & Nutrition Sciences*, 2007, 57(4): 267 - 270.
- PERESSINI D, SENSIDONI A. Effect of soluble dietary fibre addition on rheological and breadmaking properties of wheat doughs [J]. *Journal of Cereal Science*, 2009, 49(2): 190 - 201.
- LU Z, SEETHARAMAN K. ^1H nuclear magnetic resonance (NMR) and differential scanning calorimetry (DSC) studies of water mobility in dough systems containing barley flour[J]. *Cereal Chemistry*, 2013, 90(2): 120 - 126.
- 许威. 菊粉物化特性的研究[D]. 洛阳:河南科技大学, 2012.
XU Wei. Study on physicochemical properties of inulin [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- CARINI E, CURTI E, SPOTTI E, et al. Effect of formulation on physicochemical properties and water status of nutritionally enriched fresh pasta[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2010, 5(5): 1 - 11.
- HAGER A S, RYAN L A M, SCHWAB C, et al. Influence of the soluble fibers inulin and oat β -glucan on quality of dough and

- bread[J]. *European Food Research & Technology*, 2011, 232(3): 405–413.
- 18 SALINAS M V, ZULETA A, RONAYNE P, et al. Wheat flour enriched with calcium and inulin: a study of hydration and rheological properties of dough[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2012, 5(8): 3129–3141.
- 19 KERCH G, GLONIN A, ZICANS J, et al. A DSC study of the effect of ascorbic acid on bound water content and distribution in chitosan-enriched bread rolls during storage[J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2012, 108(1): 73–78.
- 20 王金虎. 不同亲水胶体对速冻水饺皮品质影响的研究[D]. 无锡:江南大学, 2009.
WAN Jinhu. Effects of different hydrocolloids on quality of quick-frozen dumpling skin[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009. (in Chinese)
- 21 ENGELSEN S B, JENSEN M K, PEDERSEN H T, et al. NMR-baking and multivariate prediction of instrumental texture parameters in bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2001, 33(1): 59–69.
- 22 LAI H M, HWANG S C. Water status of cooked white salted noodles evaluated by MRI[J]. *Food Research International*, 2004, 37(10): 957–966.
- 23 LIU J, LUO D, Li X, et al. Effects of inulin on the structure and emulsifying properties of protein components in dough[J]. *Food Chemistry*, 2016, 210(21): 235–241.
- 24 BRENNAN C S, KURI V, TUDORICA C M. Inulin-enriched pasta: effects on textural properties and starch degradation[J]. *Food Chemistry*, 2004, 86(2): 189–193.
- 25 张雅媛. 玉米淀粉与亲水性胶体协同性和作用机理的研究[D]. 无锡:江南大学, 2012.
ZHANG Yayuan. Synergistic effect and mechanism of corn starch and hydrophilic[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012. (in Chinese)
- 26 GLIBOWSKI P. Rheological properties and structure of inulin- whey protein gels[J]. *International Dairy Journal*, 2009, 19(8): 443–449.
-

(上接第 246 页)

- 25 余海英, 彭文英, 马秀, 等. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 99–104.
YU Haiying, PENG Wenying, MA Xiu, et al. Effects of no tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semiarid region of northern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 99–104. (in Chinese)
- 26 王小彬, 蔡典雄, 金轲, 等. 旱地麦田夏闲期耕作措施对土壤水分有效性的影响[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(9): 1044–1049.
WANG Xiaobin, CAI Dianxiong, JIN Ke, et al. Water availability for winter wheat affected by summer fallow tillage practices in sloping dryland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(9): 1044–1049. (in Chinese)
- 27 XU Z Z, YU Z W, WANG D, et al. Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes [J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2005, 191(6): 439–449.
- 28 范雪梅, 戴廷波, 姜东, 等. 花后干旱与渍水下氮素供应对小麦碳氮运转的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 63–67.
FAN X M, DAI T B, JIANG D, et al. Effects of nitrogen rates on carbon and nitrogen assimilate translocation in wheat grown under drought and waterlogging from anthesis to maturity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 63–67. (in Chinese)
- 29 ZHAO G C, HE Z H, LIU L H, et al. Study on the co-enhancing regulating effect of fertilization and watering on the main quality and yield in Zhongyou 9507 high gluten wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(3): 351–356.
- 30 WANG Z H, WANG B, LI S X. Influence of water deficit and supplemental irrigation on nitrogen uptake by winter wheat and nitrogen residual in soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(8): 1339–1343.
- 31 XU Z Z, YU Z W, WANG D. Nitrogen translocation in wheat plants under soil water deficit[J]. *Plant and Soil*, 2006, 280(1–2): 291–303.
- 32 LI F S, KANG S Z, ZHANG J H, et al. Effects of atmospheric CO₂ enrichment, water status and applied nitrogen on water and nitrogen-use efficiencies of wheat[J]. *Plant and Soil*, 2003, 254(2): 279–289.
- 33 张永丽, 于振文. 灌水量对小麦氮素吸收、分配、利用及产量与品质的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(5): 870–878.
ZHANG Yongli, YU Zhenwen. Effects of irrigation amount on nitrogen uptake, distribution, use, and grain yield and quality in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(5): 870–878. (in Chinese)
- 34 樊小林, 李玲, 何文勤, 等. 氮肥、干旱胁迫、基因型差异对冬小麦吸氮量的效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(2): 131–137.
FAN Xiaolin, LI Ling, HE Wenqin, et al. Effect of nitrogen fertilizer, water stress and the genotypes on nitrogen uptake of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(2): 131–137. (in Chinese)
- 35 刘恩科, 梅旭荣, 龚道枝, 等. 不同生育时期干旱对冬小麦氮素吸收与利用的影响[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 555–562.
LIU Enke, MEI Xurong, GONG Daozhi, et al. Effects of drought on N absorption and utilization in winter wheat at different developmental stages[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2010, 34(5): 555–562. (in Chinese)