

DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034943

引用格式:金晓阳,王秋玉,唐振兴.麦芽糖醇对冷冻面团水分迁移及馒头食用品质的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(10):146-154. JIN Xiaoyang, WANG Qiuyu, TANG Zhenxing. Effects of maltitol on water migration of frozen dough and edible quality of steamed bread[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(10):146-154.

麦芽糖醇对冷冻面团水分迁移及馒头食用品质的影响

金晓阳^{1,2},王秋玉^{1,2},唐振兴^{1,2*}

1(浙江旅游职业学院 厨艺学院,浙江 杭州,310000)2(浙江省文化和旅游发展研究院,浙江 杭州,310000)

摘 要 为探究麦芽糖醇代替蔗糖在冷冻馒头面团中应用的可行性,采用 0% (S100-M0)、25% (S75-M25)、50% (S50-M50)、75% (S25-M75)、100% (S0-M100) (质量分数)的麦芽糖醇替代蔗糖制作冷冻面团,对面团水分迁移、流变学、熔融特性以及馒头色泽、质构、挥发性风味物质的变化进行分析。结果表明,添加麦芽糖醇后,冷冻面团解冻损失率显著降低;水分流动性显示,S50-M50、S25-M75 处理组的冷冻面团结合水含量较高,水分流动性较低;熔融特性表明,S25-M75 具有最低的热焓值 ΔH 和可冻结水含量 (F_w);频率扫描显示,S75-M25、S50-M50、S25-M75 处理组提高了面团的黏弹性。冷冻面团蒸制后,糖醇处理的馒头自由水含量下降;S50-M50、S25-M75 处理组呈现较稳定的色泽品质;S75-M25、S0-M100 处理组的硬度、咀嚼性显著增加;GC-MS 结果显示,5 种处理组共测出 14 个香气成分,利用投影变量重要性因子(variable importance in projection, VIP)从所有处理组中筛选出 27 个差异香气物质对馒头进行区分,并将 5 个处理组的馒头聚为三类,其中 S75-M25、S50-M50、S25-M75 这 3 组归为一类,具有较高度的相似性。综上,S75-M25、S50-M50 对冷冻面团特性及馒头品质具有较优的保护效果,该结果可为麦芽糖醇在冷冻面制品中的应用提供理论参考。

关键词 麦芽糖醇;冷冻面团;馒头;水分迁移;挥发性风味物质

馒头是我国消费极大的传统面制主食。在常温贮存和运输过程中,可能会发生水分损失和硬度增加,货架期较短。为了提升馒头的货架期、保证其新鲜度,预发酵冷冻面团应运而生,并且已经逐步取代传统馒头的生产^[1]。预发酵冷冻馒头在冷冻和贮存过程会发生较为复杂的物理和化学变化,包括面团内部水分迁移、面筋网络结构减弱、发酵时间延长,馒头底部开裂、质地变硬和风味丧失等,从而影响最终产品的质量;目前,一些加工工艺、食品添加剂等被用来控制冰晶的形成,提升冷冻馒头的质量^[2-3]。除此之外,也有研究表明,在冷冻面团中,含糖量较高的烘焙产品通过将酵母细胞的冷冻损伤降至最低而具有较优的冷冻稳定性,因此在配方中提高了糖的使用量,成为过量摄入添加糖的途径之一^[4]。

糖是淀粉基质面制品中重要的配料,除了提供甜味外,还影响面团发酵速率、糊化特性、流变性质、水分状态以及产品的外观、风味、大小、颜色和质地^[5]。研究表明,过量摄入蔗糖会引起心脏病、糖尿病、龋齿和肥胖症等一系列健康问题^[6]。为了减少产品配方中的蔗糖,食品企业开发各种蔗糖替代品,如多元醇、

阿斯巴甜、甜叶菊等^[4]。然而,在开发低糖烘焙食品的过程中,蔗糖的减少会导致外观、质地、风味和口感的显著下降;产品的流变性能和质地受到较大的影响^[7]。因此,探索具有适当功能的糖替代品在冷冻面团的研发过程中面临着巨大的技术挑战。

目前,糖醇替代蔗糖作为甜味剂的研究都集中在非发酵面团方面,而对于发酵面团的研究较少。LAGUNA等^[8]研究了 3 种糖醇对饼干中面筋体系、面团流变、饼干品质的影响,结果显示,与蔗糖组相比,含有麦芽糖醇的饼干的流变特性、质构和尺寸无显著变化。郝月慧等^[9]对比了麦芽糖醇、木糖醇和赤藓糖醇对海绵蛋糕面糊性质以及蛋糕食用品质等的影响,结果表明,用麦芽糖醇和木糖醇分别完全取代海绵蛋糕中的蔗糖后,蛋糕总体质量仍可接受。SAHIN 等^[10]测试了不同浓度的木糖醇、麦芽糖醇、赤藓糖醇对汉堡面包品质的影响,结果显示,甘露醇和麦芽糖醇是所测试的多元醇中最适合的糖替代品。DING 等^[11]发现,麦芽糖醇的加入可以增加面团中结合水的含量,进一步延缓面包的老化;另外,添加 6% 麦芽糖醇的面包硬度和咀嚼性较低。综上所述,就面团的流变学、热力学

第一作者:学士,副教授(唐振兴副教授为通信作者,E-mail:tangzhenxing@126.com)

基金项目:浙江省教育厅科研项目(Y202147210);浙江省大学生科技创新活动计划暨新苗人才计划立项项目(2022R442A002)

收稿日期:2023-01-25,改回日期:2023-02-17

指标,产品的质构、感官品质而言,麦芽糖醇与蔗糖最为相似。然而,关于麦芽糖醇在冷冻馒头加工过程中的水分迁移、流变性等研究较少。

因此,本文将麦芽糖醇与蔗糖进行不同比例的配比,重点探索了麦芽糖醇对预发酵冷冻面团流变性、水分迁移、可冻结水含量以及馒头色泽、质构、风味物质的影响,这些影响与糖醇、淀粉、蛋白质和水基质之间的相互作用有关,旨在为麦芽糖醇在冷冻面制品中的应用提供新的思路。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

香满园小麦粉(蛋白质 11.0%,脂肪 1.6%,碳水化合物 73.5%,水分 13.8%),益海嘉里粮油食品工业有限公司;燕子耐高糖活性干酵母,乐斯福(明光)有限公司;绵白糖,太古糖业有限公司;麦芽糖醇食品级(I型),山东福田药业有限公司;泡打粉,安琪酵母股份有限公司。

1.2 仪器与设备

和面机,松下电器(中国)有限公司;DW-FL831型超低温速冻冰箱,中科美菱低温科技股份有限公司;SP18.S 醒发箱,珠海三麦机械有限公司;低场核磁共振成像仪,上海纽迈电子科技有限公司;差示扫描量热仪,德国 NETZSCH 公司;哈克 MARSIII 型流变仪,赛默飞世尔科技公司;电脑色差仪,深圳市三恩时科技医学科技有限公司;TMS-PRO 质构仪,美国 FTC 公司;Car boxen TM/聚二甲基硅氧烷萃取头(75 μm),57330-U 手动固相微萃取进样器,美国 Supelco 公司;Trace DSQ II 气相色谱-质谱联用仪,美国 Thermo 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 冷冻面团和馒头的制备

馒头的配方:面粉 300 g、酵母 4.5 g、糖 12 g、泡打粉 1.2 g、水 165 g。

冷冻面团的制备流程为:

面粉、酵母、泡打粉、糖(绵白糖:麦芽糖醇)、水→和面→压片→分割、成型(100g/个)→醒发(35 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 75%,30 min)→速冻(-40 $^{\circ}\text{C}$,60 min)→冻藏(-18 $^{\circ}\text{C}$,2 周)

在此配方中,分别以 0%、25%、50%、75%、100%的麦芽糖醇代替绵白糖,分别命名为 S100-M0、S75-M25、S50-M50、S25-M75 和 S0-M100。

馒头制备:将冻藏后的冷冻面团放入醒发箱解冻 60 min(35 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 75%)后,放入沸水锅中蒸制

20 min,冷却至室温。

1.3.2 冷冻面团解冻损失率测定

解冻损失率是指馒头面团从冰箱里拿出放置在醒发箱解冻过程中的失水率,计算如公式(1)所示:

$$\text{WL}/\% = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

式中:WL 表示解冻损失率,%; m_0 表示从冰箱拿出来时的样品质量; m_1 表示解冻 60 min 后的样品质量。

1.3.3 冷冻面团流变学性质测定

参考 LU 等^[3]的方法并稍作修改。样品质量为 5 g,平板直径为 35 mm,间隙距离为 1 mm,温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,平衡 5 min,扫描频率范围为 0.1~10 Hz,形变量为 0.1%。

1.3.4 冷冻面团冻结及熔融性质测定

样品质量为 10 mg,置于密封的差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter, DSC)专用铝盒中。参数设置:DSC 仪器预设至 25 $^{\circ}\text{C}$,以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率从预设的 25 $^{\circ}\text{C}$ 降至 -20 $^{\circ}\text{C}$,并保持 1 min,然后以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速度至 20 $^{\circ}\text{C}$ 。用 Universal Analysis 2000 进行分析,可冻结水含量(F_w)按公式(2)进行计算:

$$F_w/\% = \frac{\Delta H}{\Delta H_0} \times 100 \quad (2)$$

式中: F_w 为可冻结水含量,%; ΔH_0 为纯水的热焓值(334 J/g)。

1.3.5 冷冻面团和馒头水分流动性测定

采用 LF-MRI 分别对冷冻面团和蒸熟后的馒头进行水分流动性测试,样品采集参考 DING 等^[11]的方法进行测定;样品质量为 10 g,采样点数:2000,扫描次数:32,间隔时间:1 s。

1.3.6 馒头色泽测定

利用电脑色差仪,测量馒头的亮度(L^*)、红度(a^*)、黄度(b^*)值。在馒头的表皮随机选择 3 处进行测量。白度指数(ΔE)按公式(3)进行计算:

$$\Delta E = \sqrt{(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3)$$

1.3.7 馒头质构测定

使用质构分析仪测量馒头的硬度、内聚性、弹性和咀嚼性。参数设置:馒头片厚度为 15 mm,P35 圆柱形探头,距离 40 mm,测前速率 2 mm/s,测试速率为 1 mm/s,下压程度 70%,测试力 0.1 N,2 次压缩时间间隔 3 s。

1.3.8 馒头挥发性风味测定^[12]

固相微萃取:5 g 馒头置于萃取瓶内,将萃取头在

气相色谱进样口老化 30 min, 老化后的萃取头隔膜进样, 在 60 ℃ 恒温水浴中保温萃取 40 min 后, 取出萃取头, 拔出针头, 并迅速插入气相色谱进样口, 250 ℃ 不分流模式下解吸挥发性成分 5 min。

GC 条件: 色谱柱采用 DB-5MS 毛细管柱; 程序升温: 40 ℃, 保持 2 min, 以 6 ℃/min 升至 120 ℃, 保持 5 min; 再以 10 ℃/min 升至 250 ℃, 保持 8 min。进样口温度 250 ℃, 载气为氦气; 柱前压为 10 psi, 流速 1.287 4 mL/min; 不分流进样, 溶剂延迟 1 min。

MS 条件: 电子电离源; 离子源温度 230 ℃; 四极杆温度 150 ℃; 电子能量 70 eV; 发射电流 34.61 μ A; 倍增器电压 1 235 V; 接口温度 250 ℃; 质量扫描范围 45 ~ 500 m/z 。

1.4 数据处理

所有测试均做 3 次重复, 测量数据以平均值 $\pm$ 标准误差表示。使用 SPSS 23.0 软件进行单因素方差分析和邓肯检验, 利用 SIMCA 14.1 软件对风味物质进行 OPLS-DA, 计算预测变量重要性投影 (variable importance in projection, VIP); 采用 Origin 2021pro 软件绘图。显著性差异水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同麦芽糖醇添加量对面团解冻损失率的影响

如图 1 所示, 添加麦芽糖醇的馒头在解冻过程中显示出比对照组 (S100-M0) 更低的水分损失。当麦芽糖醇添加量为 75% 时, 解冻损失率最低 (1.07%), 与对照组 (1.39%) 相比有显著差异 ($P < 0.05$)。出现这一结果的原因, 一方面是由于麦芽糖醇在结构上有 9 个羟基, 具有较强的保水能力^[11]; 另一方面可能是因为适当添加麦芽糖醇有助于冷冻面团在冻藏过程中保持面筋蛋白网络, 从而减少解冻过程中可溶性物质的浸出^[13]。

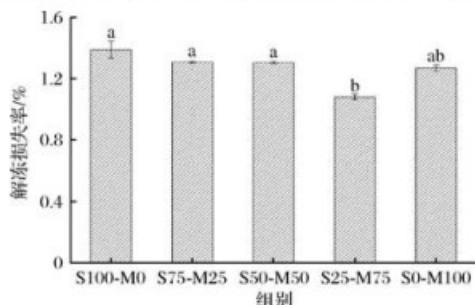


图 1 麦芽糖醇添加量对冷冻面团解冻损失率的影响

Fig. 1 Effect of maltitol content on thawing loss rate of frozen dough

注: 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) (下同)

2.2 不同麦芽糖醇添加量对冷冻面团及馒头水分分布的影响

图 2 为不同麦芽糖醇添加量冷冻面团和蒸熟后面头的水分状态的变化, 包括横向弛豫时间 T_2 (图 2-a、图 2-c) 和面团内部水分分布 (图 2-b、图 2-d)。如图 2-a、2-c 所示, 冷冻面团和馒头的 T_2 包含 3 个弛豫区, 表明存在 3 种状态的水分子。根据弛豫时间的长短, 可将 3 种水分状态分为强结合水、半结合水、自由水; 其比例分别对应为 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 。弛豫时间在 0.01 ~ 1 ms 内的质子迁移反映了样品中的强结合水 A_{21} , 此阶段的水分子与面筋和淀粉紧密结合; 在约 10 ms 内的质子迁移反映了样品中的半结合水 A_{22} , 此状态下的水分子与面筋和淀粉的结合相对松散; 在约 35 ~ 150 ms 内的质子迁移反映了样品的自由水 A_{23} , 此状态下的水分子流动性最强^[14]。在相同的冻藏时间内, 麦芽糖醇对冷冻面团的水分分布如图 2-b 所示, 随着麦芽糖醇添加量的增加, A_{21} 含量呈先上升后下降的趋势, 其中 S50-M50 处理组 A_{21} 含量最高, 这一结果表明, 添加 50% 麦芽糖醇促进了水与面筋蛋白、淀粉的结合, 限制了水的流动性。麦芽糖醇添加量为 75% 时, A_{22} 含量最高, 比对照上升了 1.07%。可能是由于此麦芽糖醇添加量的冷冻面团中羟基基团数量较多, 羟基基团与冷冻面团中因冻藏而分离出来的水分结合更容易形成氢键, 导致面团中水分的流动性降低, 从而延缓在冻藏过程中面团的结合水向自由水转变的速度^[15]。而当麦芽醇添加量为 100% 时, 其面团内 A_{23} 含量最高, 这可能是由于较高浓度的麦芽糖醇更容易与水分子形成氢键, 通过将面筋中的水重新分配到麦芽糖醇中而产生负面影响, 并导致面筋网络部分脱水以及面筋网络结构发生变化^[16]。冷冻面团经解冻蒸制后的弛豫曲线 T_2 、水分分布如图 2-c、图 2-d 所示, 与冷冻面团相比, T_{23} 的弛豫时间较长, A_{23} 含量显著增加, 这一现象可能是由于蒸煮后的馒头在冷却至室温的过程中, 部分水蒸气凝结在馒头的表面, 部分扩散到其内部, 导致淀粉颗粒的不可逆转劣化和直链淀粉的淋失; 蒸汽加热使面团中面筋蛋白变性; 脂肪融化并渗透到面团的孔洞中, 从而增加了空间位阻, 增加了形成氢键的难度, 质子的流动性增强^[17]。由图 2-d 可知, 不同处理组之间馒头的 A_{21} 含量无显著性差异, A_{22} 含量呈上升趋势, A_{23} 含量呈下降趋势, 但差异不显著。有研究证实, 含有麦芽糖醇的面团中氢键网络强度高于蔗糖, 因此, 水分子起到了连接淀粉链和面筋网络的作用^[11]。这一结果归因于麦芽糖醇具有高保水能力, 使得面团在冻藏期间具有稳定性,

从而缩短了弛豫时间。另外,将解冻损失率、冷冻面团以及馒头水分分布做相关性分析得知,解冻损失率与馒头的 A_{21} 呈极显著负相关($r = -0.987, P < 0.01$),冷

冻面团 A_{22} 与馒头 A_{23} 呈极显著负相关($r = -0.996, P < 0.01$),冷冻面团 A_{21} 与 A_{23} 呈极显著负相关($r = -0.971, P < 0.01$)。

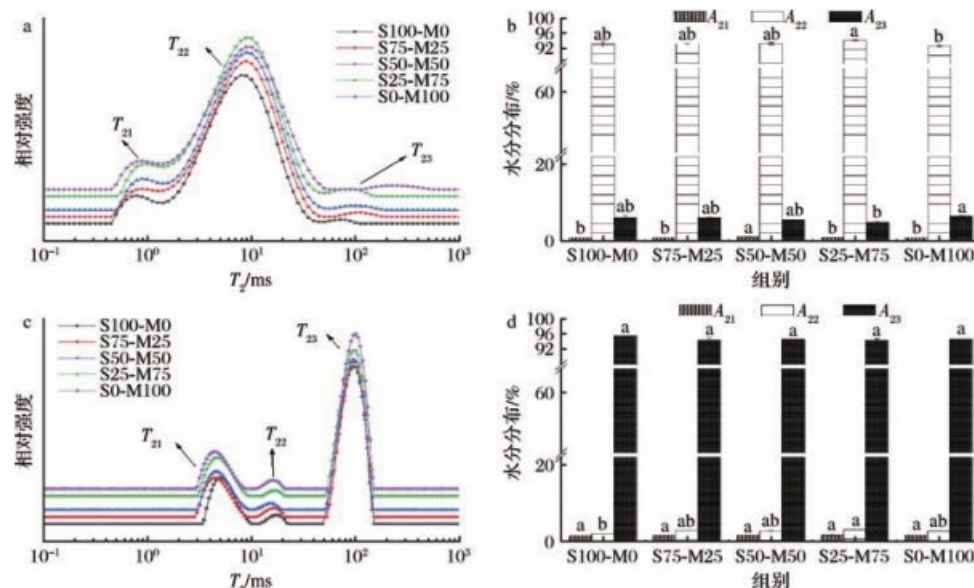


图2 麦芽糖醇添加量对冷冻面团及馒头水分分布的影响

Fig. 2 Effect of maltitol content on water distribution of frozen dough and steamed bread

2.3 不同麦芽糖醇添加量对冷冻面团熔融特性及 F_w 的影响

用 DSC 测量了冷冻面团的起始温度 (T_0)、终止温度 (T_f)、熔化热焓值 (ΔH), 并根据 ΔH 计算了样品的可冻结水含量 (F_w), 结果如表 1 所示。不同麦芽糖醇添加量制作的冷冻面团 T_0 无显著性差异; S25-M75 处理组与对照组 (S100-M0) 相比, T_f 下降 0.83°C 。 ΔH 反映了样品在熔融过程中的热变化, F_w 含量可以反映样品在冻藏过程中冰晶的变化^[18]。但在相同的贮藏期内, 添加麦芽糖醇样品的 ΔH 小于对照样品, 但差异不显著, 而添加 75% 麦芽糖醇组的 ΔH 最低。因此, 添加麦芽糖醇面团的 F_w 含量低于对照组, S25-M75 处理组的冷冻面团具有最低的 F_w (8.85%)。这些结果可归因于在冻藏过程中, 麦芽糖醇亲水性基团通过结合自由水而抑制结冰, 释放出的形成冰晶的水较少; 其次, 适量浓度的麦芽糖醇降低了面团中水分的流动性, 形成了较强的分子间氢键体系, 从而减少了对冷冻面团中面筋网络结构的物理损害^[19]。而当麦芽糖醇浓度为 100% 时, F_w 呈上升趋势, 这种影响可能是由于较高浓度的麦芽糖醇与淀粉链之间形成了更多的氢键, 导致淀粉颗粒体系中可获得更多的自由水而导致 F_w 升高^[16]。因此, 添加适

量的麦芽糖醇对冷冻面团抑制可冻结水的形成具有较好的效果, 这一结果与前文中解冻损失率、水分迁移的结果相互印证。

表 1 麦芽糖醇添加量对馒头面团可冻结水含量的影响

Table 1 Effect of maltitol content on frozen water content of steamed bread dough

面团	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_f/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	$F_w/\%$
S100-M0	-2.40 ± 0.13^a	3.73 ± 0.03^a	37.48 ± 1.37^a	11.22 ± 1.02^a
S75-M25	-2.30 ± 0.11^a	3.80 ± 0.06^a	35.37 ± 2.24^a	10.59 ± 0.96^{ab}
S50-M50	-2.79 ± 0.24^a	3.93 ± 0.02^a	34.80 ± 1.47^a	10.42 ± 1.21^{ab}
S25-M75	-2.97 ± 0.09^a	2.90 ± 0.07^b	29.56 ± 2.29^b	8.85 ± 0.86^b
S0-M100	-2.31 ± 0.14^a	3.71 ± 0.03^a	37.17 ± 1.31^a	11.13 ± 1.01^a

注: 不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$) (下同)

2.4 不同麦芽糖醇添加量对冷冻面团动态流变特性的影响

面团的黏弹性特征可反映面团的分子结构, 对产品的体积有很大的影响, 弹性模量 G' 、黏性模量 G'' 表征了冷冻面团的动态流变特性。不同麦芽糖醇添加量的面团样品解冻后的流变特性如图 3 所示。随着扫描频率上升, 所有冷冻面团的 G' 、 G'' 均增加。随着麦芽糖醇不同比例 (75%、50%、25%) 的加入, G' 和 G'' 值均高于对照组, 且麦芽糖醇添加量为 75% 时的 G' 和 G'' 最高; 而麦芽糖醇添加量为 100% 时, G' 和 G''

值低于对照面团。这些结果表明,一方面,适量麦芽糖醇的加入能够减缓冻藏过程中生成的冰晶对面团内大分子聚合物的破坏,使面团结构更加紧凑,面团的强度和弹性得到改善^[20];另一方面,高浓度麦芽糖醇含量面团中的 G' 和 G'' 值降低,这可能是由于此浓

度的面团内水分子与面筋蛋白结合能力减弱,导致面筋网络结构强度下降^[14]。MARIOTTI 等^[7] 在研究中发现使用高浓度甜味剂完全替代蔗糖时,必须面对改善其黏弹性质以及发酵特性的技术挑战,与本文研究结果一致。

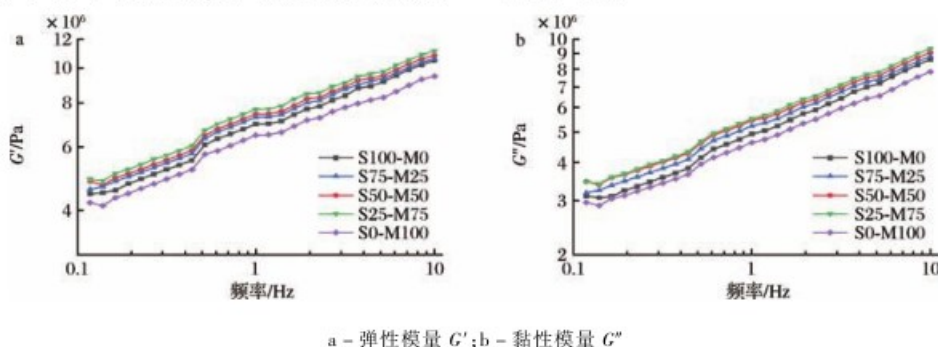


图3 麦芽糖醇添加量对冷冻面团流变特性的影响

Fig. 3 Effect of maltitol content on rheological properties of frozen dough

2.5 不同麦芽糖醇添加量对馒头色泽的影响

馒头的色泽是影响感官品质的重要属性之一,表2为不同麦芽糖醇馒头样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 和 ΔE 值。随着麦芽糖醇添加量的增加,馒头的 L^* 值呈先上升后下降的趋势,但均高于对照组。HONG 等^[13] 研究发现, L^* 值的变化与水分迁移导致样品中的水分含量增加有关。馒头 a^* 、 b^* 值变化无规律, S25-M75 处理组的馒头具有最高的 a^* 、 b^* 值,其次是 S0-M100 处理组。 ΔE 值与对照相比,均有所下降。含有麦芽糖醇的馒头与对照组之间色泽品质的微小差异可能是麦芽糖醇与面团中淀粉酶的相互作用以及对面筋网络冷冻保护作用造成的^[21]。此外,由于麦芽糖醇具有非还原性质,会影响美拉德反应与酶促反应,但馒头的加热方式与烘焙产品不同,此性质对馒头的总体色差影响不显著。

表2 麦芽糖醇添加量对馒头色差的影响

Table 2 Effect of maltitol content on color of steamed bread

馒头	L^*	a^*	b^*	ΔE
S100-M0	40.92 ± 0.76 ^b	0.24 ± 0.03 ^b	6.30 ± 0.11 ^c	59.42 ± 0.30 ^a
S75-M25	40.99 ± 0.20 ^b	0.31 ± 0.02 ^a	6.50 ± 0.11 ^{bc}	59.36 ± 0.11 ^a
S50-M50	42.29 ± 0.58 ^{ab}	0.21 ± 0.05 ^b	6.25 ± 0.18 ^c	58.60 ± 0.27 ^{ab}
S25-M75	43.72 ± 0.15 ^a	0.34 ± 0.04 ^a	6.95 ± 0.13 ^a	56.70 ± 0.11 ^b
S0-M100	41.55 ± 0.76 ^b	0.34 ± 0.03 ^a	6.77 ± 0.05 ^{ab}	58.84 ± 0.28 ^a

2.6 不同麦芽糖醇添加量对馒头质构的影响

表3为不同麦芽糖醇添加量对馒头质构的影响。硬度是馒头品质的重要指标,在相同的冻藏条件下,添加麦芽糖醇的馒头硬度值高于对照组, S75-M25 处理组馒头硬度最大,其次是 S0-M100 处理组,随麦芽

糖醇添加量的增加,硬度值又呈降低的趋势。MARTÍNEZ 等^[5] 研究发现,减少蔗糖会导致松饼硬度增加。添加麦芽糖醇后,馒头的内聚性略有下降,但差异不显著 ($P > 0.05$)。弹性是指第二次压缩中所检测到的样品恢复高度和第一次的压缩变形量之比值,受测试速度、测试力和产品结构等因素的影响^[11]。添加麦芽糖醇后馒头的弹性值呈不同程度的下降, S50-M50 处理组弹性值最低。咀嚼性表示将固体样品咀嚼成吞咽时的稳定状态所需的能量,咀嚼程度较低意味着食物更柔软^[22]。 S75-M25、S25-M75 处理组的馒头咀嚼性与对照组相似, S50-M50 处理组咀嚼性最低 (46.26 mJ), 而 S0-M100 处理组咀嚼性最高。总体而言, S50-M50、S25-M75 组具有较低的硬度、弹性和咀嚼性,表明馒头的口感较好,这一结果可推测与其抑制面团中水分在冻藏过程中重结晶有关。

表3 麦芽糖醇添加量对馒头质构的影响

Table 3 Effect of maltitol content on the texture of steamed bread

馒头	硬度/N	内聚性	弹性/mm	咀嚼性/mJ
S100-M0	7.38 ± 0.27 ^c	0.78 ± 0.03 ^a	8.39 ± 0.35 ^a	48.53 ± 3.77 ^{ab}
S75-M25	9.23 ± 1.13 ^a	0.73 ± 0.07 ^a	7.77 ± 0.12 ^b	49.94 ± 3.83 ^{ab}
S50-M50	7.96 ± 0.65 ^{bc}	0.73 ± 0.04 ^a	6.43 ± 0.04 ^c	46.26 ± 2.76 ^b
S25-M75	7.67 ± 0.23 ^c	0.74 ± 0.06 ^a	7.72 ± 0.40 ^b	49.32 ± 1.21 ^{ab}
S0-M100	8.20 ± 0.30 ^b	0.74 ± 0.03 ^a	7.30 ± 0.25 ^b	50.53 ± 4.68 ^a

2.7 不同麦芽糖醇添加量对馒头挥发性风味物质的影响

为研究不同麦芽糖醇添加量的冷冻面团经蒸制成馒头后的香气特征,利用 GC-MS 分析鉴定了 5 个

处理组样品的香气化合物成分及相对含量,结果如表4所示。对照组(S100-M0)、S75-M25组、S50-M50组、S25-M75组、S0-M100组分别检测出38、34、39、32、38种香气成分。在这5个处理组中,共检测到14个共有香气成分,其中醇类9种、酸类2种、醛类1种、酯类2种、酸类3种、烷类1种。说明随着麦芽糖醇的添加,馒头的风味发生了显著的变化。

由表4可知,在所有处理组馒头中醇类物质的种类最为丰富,根据相关研究及风味数据库检索得知,醇类对馒头的风味有很大的贡献,是其主要香气成分,能够赋予馒头特殊的酒香味、发酵味^[12]。其中S50-M50处理组醇类物质种类最多,共有19种,且相对含量也最高;S25-M75处理组醇类物质种类少于对照组,但其相对含量显著高于对照。酸类物质是发酵的产物,对馒头风味贡献率较小。随着麦芽

糖醇的增加,馒头的酸类风味物质种类也增加,S25-M75和S0-M100组的馒头酸类物质最多,这可能是由于在麦芽糖醇浓度较高的样品中,麦芽糖醇不易被酵母菌利用,而蔗糖的利用也会受到麦芽糖醇的限制,产生更多酸类物质^[23]。醛和酮等羰基化合物的香气阈值相对较低,是馒头中除醇类物质外第二丰富的芳香物质^[24]。而添加麦芽糖醇制成的馒头中醛的种类和含量均低于对照组。壬醛具有花香味、柑橘味,是5个处理组中检测出共同的风味物质。酯类物质是酸类和醇类的产物,不同处理组馒头样品酯类物质的相对含量排序为:S100-M0 > S50-M50 > S25-M75 > S0-M100 > S75-M25。其中,检测出共同的风味物质是胆甾烷基豆蔻酸酯、乌宋酸甲酯。在添加麦芽糖醇后的馒头中还检出一定量的烷烯炔类,而由于其风味活性较低,对馒头的香气贡献不大^[25]。

表4 麦芽糖醇添加量对馒头风味物质的影响

Table 4 Effect of maltitol content on flavor substances of steamed bread

化合物名称	香味特征	相对含量					VIP 值
		S100-M0	S75-M25	S50-M50	S25-M75	S0-M100	
乙醇	酒糟味	14.44 ± 1.09	11.45 ± 0.96	26.63 ± 2.24	24.17 ± 2.76	10.02 ± 1.35	0.17
3-甲基-1-丁醇	发酵味、油味、果味	4.82 ± 0.08	1.85 ± 0.02	17.26 ± 1.35	11.71 ± 1.18	0.74 ± 0.23	0.08
1-戊醇	草味	1.22 ± 0.11	0.29 ± 0.10	4.49 ± 0.23	4.63 ± 0.89	2.18 ± 0.68	1.07
2-甲基-2-十六烷醇	NA	3.18 ± 0.12	1.85 ± 0.06	0.33 ± 0.01	0.34 ± 0.16	0.58 ± 0.24	1.79
1,2,4-丁三醇	NA	0.42 ± 0.01	ND	0.34 ± 0.09	ND	0.05 ± 0.01	1.48
正己醇	香蕉味、花味、草味、香草味	0.80 ± 0.03	ND	0.13 ± 0.02	0.22 ± 0.02	ND	1.38
3,7-二甲基-6-辛烯-1-醇	NA	0.22 ± 0.01	ND	ND	ND	ND	1.48
叔十六硫醇	NA	2.34 ± 0.12	0.08 ± 0.00	ND	1.07 ± 0.09	1.51 ± 0.79	0.23
(-)-异长叶醇	NA	0.17 ± 0.01	ND	0.68 ± 0.17	ND	ND	0.38
反-2-十一烯醇	NA	0.16 ± 0.01	ND	ND	ND	ND	1.48
5,7-十二烷二炔-1,13-二醇	NA	0.29 ± 0.02	0.03 ± 0.00	0.02 ± 0.00	0.27 ± 0.12	0.11 ± 0.02	0.31
2-甲基-2-丁硫醇	薄荷味	0.15 ± 0.00	1.06 ± 0.17	0.04 ± 0.01	0.36 ± 0.08	1.84 ± 0.47	1.18
2-(十八氧基)乙醇	NA	0.27 ± 0.01	0.65 ± 0.08	0.04 ± 0.00	0.09 ± 0.02	0.49 ± 0.08	0.16
1,3-二甲氧基-2-丙醇	NA	0.20 ± 0.01	0.23 ± 0.02	0.02 ± 0.01	0.28 ± 0.05	0.14 ± 0.03	0.24
1-辛烯-3-醇	蘑菇味	0.12 ± 0.00	ND	ND	ND	ND	1.48
2-甲基丁醇	鱼油味、草味、麦芽味、洋葱味、葡萄酒味	0.04 ± 0.00	0.40 ± 0.03	0.19 ± 0.03	ND	ND	0.93
羽扇豆醇	NA	0.04 ± 0.00	0.10 ± 0.00	0.15 ± 0.04	ND	ND	0.91
高根二醇	NA	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.00	0.31 ± 0.11	0.38 ± 0.02	0.11 ± 0.07	0.98
3-甲氧基-1,2-丙二醇	NA	ND	ND	0.32 ± 0.12	ND	ND	0
S-(+)-2-甲基-1-丁醇	NA	ND	ND	0.18 ± 0.00	ND	ND	0
正辛醇	杏仁味、焦味、脂肪味、花香味	ND	ND	0.15 ± 0.02	ND	ND	0
3-甲基-1-戊醇	果味	ND	0.05 ± 0.00	0.06 ± 0.00	0.30 ± 0.04	0.02 ± 0.00	0.79
十二烷基卡必醇	NA	ND	0.13 ± 0.09	0.04 ± 0.01	0.08 ± 0.01	0.06 ± 0.18	0.48
2-癸烯-1-醇	果味	ND	ND	ND	ND	0.13 ± 0.05	1.48
DL-2,3-二羟基丙酸	NA	0.81 ± 0.11	0.26 ± 0.13	0.24 ± 0.02	0.28 ± 0.02	0.23 ± 0.11	1.52
顺式-11-二十碳烯酸	NA	0.11 ± 0.01	ND	ND	ND	0.05 ± 0.01	0.82
芥酸	NA	0.03 ± 0.00	0.17 ± 0.01	0.04 ± 0.00	0.02 ± 0.00	0.04 ± 0.01	0.69
17-十八炔酸	NA	0.02 ± 0.00	ND	0.20 ± 0.11	0.68 ± 0.07	ND	0.73
4-[(4-甲氧基苯基)氨基]肉桂酸	NA	ND	ND	2.60 ± 0.09	2.81 ± 0.82	4.98 ± 1.27	2.01
DL-β-羟基去甲缬氨酸	NA	ND	ND	0.17 ± 0.05	ND	ND	0
D-别苏氨酸	NA	ND	ND	0.21 ± 0.11	ND	ND	0
1,3,5,7-金刚烷四羧酸	NA	ND	0.17 ± 0.00	ND	ND	ND	0.74
3-羟基月桂酸	NA	ND	0.21 ± 0.03	ND	0.09 ± 0.03	0.13 ± 0.09	0.51
十六碳烯酸	NA	ND	0.18 ± 0.02	ND	0.04 ± 0.01	0.13 ± 0.06	0.51
10-苯基葵酸	NA	ND	0.12 ± 0.01	ND	0.03 ± 0.00	0.02 ± 0.01	0.34
棕榈油酸	NA	ND	0.02 ± 0.00	ND	0.08 ± 0.03	0.15 ± 0.11	1.84

续表 4

化合物名称	香味特征	相对含量					VIP 值
		S100-M0	S75-M25	S50-M50	S25-M75	S0-M100	
酮丙二酸	NA	ND	ND	ND	0.11 ± 0.03	ND	0.74
7-苯甲酰庚酸	NA	ND	ND	ND	ND	0.12 ± 0.06	1.48
壬醛	花香味、柑橘香	10.46 ± 1.24	1.39 ± 0.23	3.30 ± 0.52	2.21 ± 0.18	1.25 ± 0.12	1.52
庚醛	鱼腥味	0.51 ± 0.11	ND	0.25 ± 0.04	ND	ND	1.49
反式-2-壬醛	木香味	0.38 ± 0.03	ND	ND	ND	ND	1.48
反-2-十二烯醛	果香味	0.13 ± 0.00	ND	ND	ND	ND	1.48
白桦脂醛	NA	0.21 ± 0.01	ND	ND	ND	ND	1.48
正癸醛	柑橘香、脂肪香	0.53 ± 0.06	ND	ND	ND	ND	1.48
2-辛烯醛	脂肪香、鸡肉香	0.02 ± 0.00	ND	ND	0.13 ± 0.01	ND	0.52
2,4-壬二烯醛	谷香味、油炸味、脂肪味、西瓜味	ND	ND	0.74 ± 0.09	0.17 ± 0.03	0.09 ± 0.02	0.37
2-壬烯醛	木香味	ND	0.11 ± 0.01	0.34 ± 0.12	ND	ND	0.25
β-苯丙醛二甲缩醛	果香味	ND	0.11 ± 0.04	ND	ND	0.16 ± 0.07	0.91
赤霉素 A7 甲酯	NA	2.18 ± 0.18	ND	ND	ND	ND	1.48
牒基甲酸苄酯	NA	0.22 ± 0.03	0.14 ± 0.01	ND	0.12 ± 0.01	0.04 ± 0.00	1.46
2-十八烷酸单甘油酯	NA	0.21 ± 0.02	ND	ND	ND	0.07 ± 0.01	1.02
胆甾烯基豆蔻酸酯	NA	0.24 ± 0.00	0.07 ± 0.00	0.05 ± 0.01	0.10 ± 0.02	0.15 ± 0.04	0.66
乌宋酸甲酯	NA	1.70 ± 0.46	0.56 ± 0.16	2.46 ± 0.51	1.53 ± 0.72	0.72 ± 0.12	0.43
硫甲基仲丁酯	NA	0.15 ± 0.00	ND	ND	ND	ND	1.48
烷醇乳酸酯	NA	0.10 ± 0.01	ND	ND	ND	ND	1.48
甲酸异戊酯	苹果香味	0.10 ± 0.00	0.11 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.23 ± 0.11	ND	0.23
丙烯酸月桂酯	NA	0.03 ± 0.00	ND	ND	ND	0.12 ± 0.01	1.15
甲酸己酯	果香味	ND	0.02 ± 0.00	0.20 ± 0.03	ND	0.04 ± 0.01	0.23
N-苄基甘氨酸乙酯	NA	ND	ND	0.16 ± 0.01	ND	ND	0
2,2,4-三甲基戊二醇异丁酯	NA	ND	ND	0.16 ± 0.04	ND	ND	0
桦木酸甲酯	NA	ND	0.04 ± 0.00	0.12 ± 0.11	ND	ND	0.25
氨基甲酸甲酯	NA	ND	ND	0.19 ± 0.13	ND	ND	0
维生素 C 硬脂酸酯	NA	ND	ND	0.07 ± 0.01	ND	0.42 ± 0.13	1.53
螺内酯	NA	ND	0.27 ± 0.11	ND	ND	0.20 ± 0.02	0.32
硬脂酸烯丙酯	NA	ND	ND	ND	0.17 ± 0.05	ND	0.74
1,1-二甲氧基十六烷	NA	ND	ND	0.24 ± 0.04	ND	ND	0
正十二烷	NA	ND	0.52 ± 0.28	ND	ND	0.53 ± 0.17	0.62
3-甲基十一烷	NA	ND	0.14 ± 0.02	ND	ND	0.15 ± 0.02	0.67
2,4-双(1,1-二甲乙基)-5-甲基苯酚	NA	ND	0.09 ± 0.00	ND	0.03 ± 0.00	0.10 ± 0.01	0.96
3,5-二甲基-1-己烯	NA	ND	ND	ND	0.14 ± 0.02	ND	0.74
正十五烷	NA	ND	ND	ND	ND	0.13 ± 0.07	1.48

注:NA 表示在数据库中未检索到香味特征;ND 表示未检出风味物质

2.8 不同麦芽糖醇添加量馒头的香气成分差异分析

为了进一步分析不同麦芽糖醇添加量对馒头样品之间的挥发性风味的差异,利用 SIMCA 软件对风味物质进行 OPLS-DA 回归模型分析,计算预测变量重要性投影 VIP 值,该模型中,解释变量(R^2Y)和预测能力(Q^2Y)分别为 0.891 和 0.863,说明该模型对 5 种不同麦芽糖醇添加量馒头的差异性风味物质的预测和筛选是有效的。以 VIP 值 >1 的标准,筛选出 27 种差异香气物质(图 4)。其中醇类 9 种、酸类 4 种、醛类 6 种、酯类 7 种、烷类 1 种。由图 4 可知,5 个处理组的馒头可按照其挥发性物质组成的差异分为三类,第一类是 S100-M0,第二类是 S0-M100、第三

类是 S75-M25、S50-M50 和 S25-M75 的馒头。其中,4-[(4-甲氧基苯基)氨基]肉桂酸、棕榈油酸、2-甲基-2-十六烷醇、维生素 C 硬脂酸酯、DL-2,3-二羟基丙酸、壬醛等物质 VIP 值相对较大(>1.5),推测可能是影响馒头香味差异的重要挥发性物质。另外庚醛、2-十八烷酸单甘油酯、正己醇、壬醛、反-2-十二烯醛、烷醇乳酸酯、赤霉素 A7 甲酯、反式-2-壬醛、1-辛烯-3-醇、反-2-十一烯醇、3,7-二甲基-6-辛烯-1-醇、硫甲基仲丁酯、白桦脂醛、1,2,4-丁三醇、DL-2,3-二羟基丙酸、2-甲基-2-丁硫醇在对照组中相对含量较高,对照组与添加麦芽糖醇处理组中挥发性化合物的差异,推测与冷冻面团中酵母发酵程度有关。

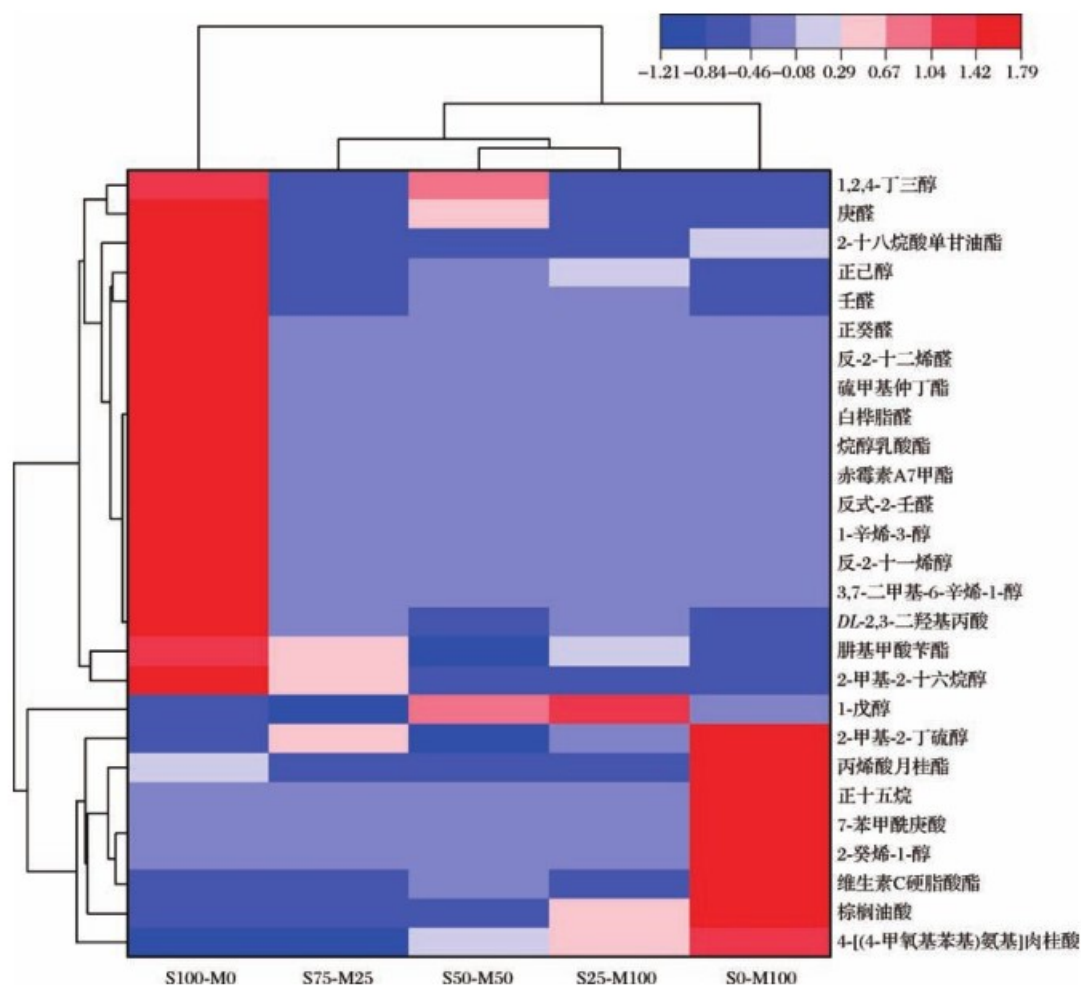


图4 不同麦芽糖醇添加量馒头的香气成分聚类热图

Fig.4 Heatmap of aroma components of steamed bread with different maltitol content

3 结论

本文对麦芽糖醇替代蔗糖制作的冷冻馒头面团中水分分布和流动性、冻结及熔融性质、动态流变特性以及馒头色泽、质构、挥发性风味物质等方面进行了研究。研究结果发现, S50-M50、S25-M75 通过降低解冻损失率、改善冷冻对面团的弹性模量及黏性模量的破坏、减少水分流动性和可冻结水含量,从而有效地保护了面团面筋网络免受冰晶的破坏,进而提高面团特性改善了馒头色泽和质构特性。另一方面,由于蔗糖和麦芽糖醇在发酵过程中被酵母菌利用程度不同,使对照组与添加麦芽糖醇处理组中挥发性化合物存在显著差异,尤以 S50-M50 处理组的风味物质最多;根据 OPLS-DA 模型可知, S75-M25、S50-M50 和 S25-M75 的馒头挥发性风味可聚为一类。

综上所述,麦芽糖醇替代蔗糖作为改良剂改善冷冻馒头面团品质具有可行性。但值得注意的是,个体

之间对麦芽糖醇的耐受性具有差异,并且过度摄入会对肠道产生不利影响。除此之外,淀粉、面筋网络在冷冻贮存过程中的变化一直是影响冷冻面团品质的关键问题,麦芽糖醇与淀粉和面筋网络之间的相互作用还需要更进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] WANG Q Y, ZHANG H F, ZHU W Z, et al. Physicochemical properties and nutritional quality of pre-fermented red bean steamed buns as affected by freeze-thaw cycling[J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1): 748-763.
- [2] JAMES C, PURNELL G, JAMES S J. A review of novel and innovative food freezing technologies[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(8): 1616-1634.
- [3] LU L, ZHU K X. Physicochemical and fermentation properties of pre-fermented frozen dough: Comparative study of frozen storage and freeze-thaw cycles[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 136: 108253.
- [4] JEONG S, PARK Y Y, LEE S Y. Assessment of turanose as a sugar alternative in a frozen dough system: Rheology, tomography, and baking performance[J]. LWT, 2021, 141: 110869.
- [5] MARTÍNEZ-CERVERA S, SALVADOR A, SANZ T. Comparison of different polyols as total sucrose replacers in muffins: Thermal, rheological, texture and acceptability properties[J]. Food Hydrocol-

- loids, 2014, 35:1-8.
- [6] WOODBURY T J, LUST A L, MAUER L J. The effects of commercially available sweeteners (sucrose and sucrose replacers) on wheat starch gelatinization and pasting, and cookie baking[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(3):687-698.
- [7] MARIOTTI M, ALAMPRESE C. About the use of different sweeteners in baked goods. Influence on the mechanical and rheological properties of the doughs[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 48(1):9-15.
- [8] LAGUNA L, VALLONS K J R, JURGENS A, et al. Understanding the effect of sugar and sugar replacement in short dough biscuits[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(11):3143-3154.
- [9] 郝月慧, 贾春利, 王凤, 等. 三种糖醇对海绵蛋糕面糊流变学、热力学及烘焙学特性影响的比较研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(6):298-302;306.
- HAO Y H, JIA C L, WANG F, et al. A comparative research of the influences of maltitol, xylitol and erythritol on the rheological, thermal and baking properties of sponge-cake batter[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(6):298-302;306.
- [10] SAHIN A W, AXEL C, ZANNINI E, et al. Xylitol, mannitol and maltitol as potential sucrose replacers in burger buns[J]. *Food Function*, 2018, 9(4):2201-2212.
- [11] DING S Y, PENG B, LI Y Q, et al. Evaluation of specific volume, texture, thermal features, water mobility, and inhibitory effect of staling in wheat bread affected by maltitol[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283:123-130.
- [12] 王秋玉, 章海风, 朱文政, 等. 不同加热方式对冷冻豆沙包食用品质及挥发性物质的比较分析[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(6):266-275.
- WANG Q Y, ZHANG H F, ZHU W Z, et al. Effects of heating methods on quality and volatile substance contents of frozen red bean paste buns[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(6):266-275.
- [13] HONG T T, MA Y, YUAN Y R, et al. Understanding the influence of pullulan on the quality changes, water mobility, structural properties and thermal properties of frozen cooked noodles[J]. *Food Chemistry*, 2021, 365:1-10.
- [14] XIE X H, LI J H, ZHU H S, et al. Effects of polydextrose on rheological and fermentation properties of frozen dough and quality of Chinese steamed bread[J]. *Starch-Stärke*, 2023, 75(1-2):2200153.
- [15] 周锦枫. 脂肪酯和糖醇类对冷冻面团品质及其产品特性的影响[D]. 南昌:江西农业大学, 2020.
- ZHOU J F. Effects of fatty acid esters and sugar alcohols on frozen dough quality and product characteristics[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020.
- [16] DING S Y, YANG J. The effects of sugar alcohols on rheological properties, functionalities, and texture in baked products - A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111:670-679.
- [17] YANG Y X, XU H M, TANG S, et al. Study on the thermal and water migration of Chinese steamed buns during cooling process after steam cooking[J]. *LWT*, 2021, 145:111377.
- [18] SHU Q, WEI T Y, LIU X Y, et al. The dough-strengthening and spore-sterilizing effects of mannosylerythritol lipid-a in frozen dough and its application in bread making[J]. *Food Chemistry*, 2022, 369:131011.
- [19] XIN C, NIE L J, CHEN H L, et al. Effect of degree of substitution of carboxymethyl cellulose sodium on the state of water, rheological and baking performance of frozen bread dough[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 80:8-14.
- [20] NG F S K, CHIANG J H, NG G C F, et al. Influence of inulin - konjac suspension as a fat replacer in baked muffins and its impact on textural and oxidative stability upon storage[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(10):e15769.
- [21] HEJRANI T, SHEIKHOLESLAMI Z, MORTAZAVI A, et al. The properties of part baked frozen bread with guar and xanthan gums[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 71:252-257.
- [22] LIU M L, LIU X Q, LI Y. Soybean peptides' cryoprotective effects on *Saccharomyces cerevisiae* fermenting power in frozen dough and maintenance of the Chinese steamed bread qualities[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(8):e14572.
- [23] ALVES-ARAÚJO C, PACHECO A, ALMEIDA M J, et al. Sugar utilization patterns and respiro-fermentative metabolism in the baker's yeast *Torulaspora delbrueckii*[J]. *Microbiology (Reading)*, 2007, 153(Pt 3):898-904.
- [24] FAN H P, ZHENG X L, AI Z L, et al. Analysis of volatile aroma components from Mantou fermented by different starters[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(6):e13627.
- [25] 李晓敏, 韩伟, 黎琪, 等. 传统酸面团菌群结构及其酵制馒头风味物质分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(10):162-170.
- LI X M, HAN W, LI Q, et al. Analysis of microbial community structure in traditional sourdough and flavor components in steamed bread made with it[J]. *Food Science*, 2021, 42(10):162-170.

Effects of maltitol on water migration of frozen dough and edible quality of steamed bread

JIN Xiaoyang^{1,2}, WANG Qiuyu^{1,2}, TANG Zhenxing^{1,2*}

1 (School of Culinary Art, Tourism College of Zhejiang, Hangzhou 310000, China)

2 (Zhejiang Institute of Culture and Tourism Development, Hangzhou 310000, China)

ABSTRACT To explore the feasibility of maltitol instead of sucrose in frozen steamed bread dough, 0% (S100-M0), 25% (S75-M25), 50% (S50-M50), 75% (S25-M75), and 100% (S0-M100) maltitol were used to make a frozen dough, and the changes of water migration, rheology, melting characteristics, color, texture, and volatile flavor substances of steamed bread were analyzed. Results showed that after adding maltitol, the thawing loss rate of frozen dough decreased significantly. The water fluidity of frozen dough treated with S50-M50 and S25-M75 was higher and the water fluidity was lower. The melting characteristics showed that S25-M75 had the lowest enthalpy ΔH and frozen water content (F_w). Frequency scanning showed that S75-M25, S50-M50, and S25-M75 increased the viscoelasticity of dough. After frozen dough steaming, the free water content of steamed bread treated with sugar and alcohol decreased, the color of the S50-M50 and S25-M75 treatment groups was stable, and the hardness and chewiness of the S75-M25 and S0-M100 treatment groups increased significantly. The GC-MS results showed that a total of 14 aroma components were detected in the five treatment groups. Twenty-seven different aroma components were selected from all the treatment groups by projection variable importance factor (variable importance in projection, VIP), the steamed bread from the five treatment groups was classified into three groups, and S75-M25, S50-M50, and S25-M75 were grouped into one group with high similarity. To sum up, S75-M25 and S50-M50 had better protective effects on frozen dough characteristics and steamed bread quality, which could provide a theoretical reference for the application of maltitol in frozen products.

Key words maltitol; frozen dough; steamed bread; water migration; volatile flavor compounds