DOI:10.12441/spyswjs.20230313001 [文章编号] 1673-1689(2024)09-0056-09

红豆沙馅面包的品质提升研究

王露露 洪婷婷 瞿佳丽 徐 丹 徐学明*

(江南大学食品学院,江苏 无锡 214122)

摘要:作者首先研究了甘油质量分数对红豆沙感官品质、水分特性、流变特性和质构品质的影响,以确定甘油的最适质量分数。然后通过改变红豆沙的炒制时间制备不同水分活度(A_w)的红豆沙,并将其作为馅料制作红豆沙馅面包,以面包的水分、质构和老化特性为指标,探究红豆沙A_w对面包贮藏期间品质变化的影响。通过研究红豆沙馅料与面包的相互作用规律,确定面包馅料的最适A_w。结果表明:随着甘油质量分数的增加,红豆沙的感官得分和水分质量分数都呈现先上升后下降的趋势,A_w和自由水相对含量均逐渐降低,甘油的最适质量分数为4%。与未添加红豆沙馅料的面包相比,添加不同A_w红豆沙的面包在水分特性、质构特性和老化特性方面存在显著差异。当红豆沙A_w为0.94时,红豆沙馅面包与空白组的A_w和水分质量分数最为接近,且在贮藏期间的品质更为稳定,其硬度和回生焓值也最低。因此,该面包馅料最适宜的A_w值为0.94。

关键词:甘油;水分活度;红豆沙;面包

Study on the Quality Improvement of Red Bean Paste-Filled Bread

*WANG Lulu HONG Tingting QU Jiali XU Dan XU Xueming**

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The author first investigated the effects of glycerol mass fraction on the sensory quality, moisture characteristics, rheological properties, and texture quality of red bean paste, aiming to determine the optimal glycerol mass fraction. The red bean paste with different water activity (A_w) was prepared by changing the frying time of the bean paste, and the red bean paste was then used as the filling to make the red bean paste-filled bread. The influence of the A_w of the red bean paste on the bread quality during storage was explored by the moisture content, texture, and staling characteristics of the bread. By studying the interaction between the red bean paste filling and the bread, the optimal A_w of the filling for bread was determined. The results showed that with the increased mass fraction of glycerol, the sensory score and moisture mass fraction of the red bean paste initially increased and then decreased, while the A_w and the relative content of free water gradually decreased. The optimal mass fraction of glycerol was 4%. Compared with the bread without red bean paste filling, the bread containing red bean paste with different A_w exhibited significant differences in moisture properties, texture characteristics, and staling properties. When the A_w of the red bean paste was 0.94, the A_w and moisture mass fraction of the bean paste-filled bread were closest to those of the control group, and the quality was more stable during storage, showing the lowest hardness and retrogradation enthalpy. Therefore, the optimal A_w value of the bread filling was 0.94.

Keywords: glycerol; water activity; red bean paste; bread

豆沙作为一种深受消费者喜爱的食品馅料, 近年来在注馅面包中的应用愈加广泛[1]。影响豆

基金项目:国家“十四五”重点研发计划项目(2022YFD2100300,2022YFD2100303,2022YFF1100503)。

通信作者:徐学明(1968—),男,博士,教授,博士研究生导师,主要从事谷物食品与物性的研究。 E-mail:xmxu@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2023-03-13 **修回日期:**2023-04-07

沙品质的主要因素包括豆子品种、蒸煮料液比、蒸煮温度与时间、破碎程度、炒制温度和时间等[2]。目前关于豆沙的研究主要集中在添加剂筛选及加工工艺的优化等方面。解蕊等[3]研究了红小豆浸泡条件及色拉油等原料的比例对红豆沙品质的影响，以感官评定为标准确定了红豆沙的最佳加工工艺。张雪路[4]讨论了黄原胶和单甘酯质量分数对改善豆沙品质的作用。然而，豆沙作为食品配料，其品质还需要根据最终产品的具体需求进行相应调整。近年来豆沙馅面包受到了消费者的喜爱，但是其贮藏期间的品质稳定性容易受到馅料A_w的影响。因此，研究不同A_w的红豆沙如何影响面包的品质，对于提升面包品质至关重要。

食品A_w的调控方法主要有添加A_w调节剂法和干燥法。降低食品中A_w的添加剂，如多羟基醇、糖类、盐类等，不仅能够降低食品的A_w，还可以改善食品质构[5]。其中，多羟基醇类因其含有多个羟基且能与水分子形成氢键，可有效提高产品的持水性，应用较为广泛[6]。凌逍等[7]在研究不同醇类物质对半干猪肉干A_w的影响时发现，与丙二醇、聚乙二醇相比，甘油在降低猪肉干中A_w方面表现更好。作为食品添加剂，甘油广泛应用于面包、蛋糕、馅料、乳制品、饮料等多种食品中[8-10]。为了提升红豆沙馅面包的品质，作者首先分析了甘油对红豆沙馅料的感官品质、质构、水分特性等方面的影响，并确定甘油的最适质量分数；通过调整红豆沙的炒制时间制备不同A_w的红豆沙样品，并将其作为馅料制作红豆沙馅面包，以面包的水分特性、质构特性和老化特性为评价指标，探究红豆沙A_w对面包贮藏期间品质的影响，确定面包红豆沙馅料的最适A_w，为红豆沙的实际生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器设备

1.1.1 试验材料

红豆：宁洱小米地食品有限公司；大豆油：安徽中粮油脂有限公司；白砂糖、淀粉、猪油、麦芽糖、甘油、高筋小麦粉、活性干酵母：市售。

1.1.2 仪器设备

电煮锅：LB1661D型，杭州九阳生活电器有限公司；破壁机：L18-P132型，杭州九阳生活电器有限公司；电磁炉：WK2102型，美的有限公司；质构仪：TA.XT Plus型，英国SMS公司；高精度分光测色仪：UltraScan Pro1166型，美国Hunterlab公司；差示扫描量热仪：X-DSC7000型，日本精工有限公司；流变仪：DISCOVERY 65 HR-3型，美国TA仪器公司；水分活度仪：Novasina Ms1 AW型，瑞士NOVASINA公司；低场核磁共振成像分析仪：MesoMR23-060V-I型，中国上海纽曼公司；和面机：M-25型，新麦机械（中国）有限公司；醒发箱：SM-32S型，新麦机械（中国）有限公司；烤箱：MB-622型，新麦机械（中国）有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 红豆沙的制备

将清洗好的300 g红豆原料放入盆中，加入600 g水并浸泡12 h。将泡好的豆子倒入锅中，加500 g清水，电煮锅2档火（600 W）加热至沸腾，换1档火（300 W）加盖焖煮40 min。加240 g白砂糖并搅拌均匀，再焖20 min。将煮好的豆子及汤汁全部放入破壁机中绞碎成红豆沙泥，加入48 g大豆油、72 g麦芽糖，搅拌均匀。将全部红豆沙泥转移至锅中，采用电磁炉于800 W加热4 min，然后调至600 W，立刻将30 g猪油均分3次加入，熬制4 min后加入淀粉-油混合物（由18 g淀粉和24 g大豆油混合而成），继续炒制2 min后出锅。待红豆沙冷却后置于自封袋中，于4 ℃冰箱中冷藏。

1.2.2 含不同质量分数甘油的红豆沙制备

红豆沙在炒制前添加不同质量分数（0、2%、4%、5%、10%、15%、20%）的甘油，以红豆、白砂糖、大豆油、麦芽糖、猪油和玉米淀粉的总质量为基数。

1.2.3 不同A_w的红豆沙制备

在1.2.1中制备的红豆沙泥中加入质量分数4%的甘油，然后将红豆沙在800 W功率下分别炒制4.0、6.0、7.5、8.5、9.5、10.0 min，再于600 W功率炒制6 min，以制备不同A_w的红豆沙。

1.2.4 红豆沙感官品质的评定

组成感官评定小组，对红豆沙的口感、香味、色泽、凝固状态、渗油状态进行评分。最低1分为非常不喜欢，最高20分为非常喜欢。

1.2.5 红豆沙和面包水分质量分数的测定

采用GB5009.3—2016中的直接干燥法测定

红豆沙和面包中的水分质量分数。

1.2.6 红豆沙和面包A_w的测定

根据GB5009.238—2016，使用水分活度仪测定红豆沙和面包的A_w。

1.2.7 红豆沙持水性的测定

称取30 g红豆沙置于开口的容器中，环境温度25 ℃、相对湿度74%，分别于3、6 h后测定持水性变化。

1.2.8 红豆沙水分分布的测定

参考Kang等[11]的方法并稍加修改，采用MesoMR23-060V-I型低场核磁共振成像分析仪测定红豆沙的水分分布。称取1.5 g红豆沙样品放入10 mm NMR管中，用聚四氟乙烯密封袋密封包装，使用CPMG脉冲序列进行测定。试验参数TW为1 000 ms，TE为0.250 ms，NECH为2 000，扫描8次。

1.2.9 红豆沙流变学特性的测定

1)动态流变性质：参考王雪莹等[12]的方法，选用直径为20 mm的平板进行测试，平板与载物台的间距设置为2 mm。在25 ℃下，测定样品的贮能模量(G')、耗能模量(G'')随角频率的变化曲线。测试条件为：等待时间10 s，温度25 ℃，固定振荡应变1%，角频率扫描范围为0.1~20.0 rad/s。

2)静态流变性质：绘制在25 ℃下样品黏度随剪切速率的变化曲线，将制作好的红豆沙冷却至常温后置于流变仪的平板上，设定剪切速率为0.1~10.0 s^{-1}。

1.2.10 红豆沙质构的测定

参考王玉牛等[13]的方法并稍加修改。将制作好的红豆沙立即倒入直径4 cm、高2 cm的圆柱形模具中，再用PE透明塑料袋将红豆沙密封包装，贮藏于4 ℃冰箱中。分别于0、1、3、5、7 d取出样品，回温至室温。测试参数为：测定前速度1.0 mm/s，测定中速度5.0 mm/s，测定后速度5.0 mm/s，测试距离50%，停留时间5 s，触发力5 N。选择P/35探头，测试样品的硬度和凝聚性。

1.2.11 注馅面包制作

分别称取高筋粉1 000 g、水600 g、酵母15 g、糖100 g、盐12 g，混合均匀。先用和面机低档搅拌5~10 min至面团初步形成，然后高档和面至形成面筋网络结构。将搅拌好的面团分割成80 g/个的小面团，搓圆后依次放入圆形模具中。在醒发箱中(温度37 ℃，相对湿度80%)一次醒发60 min，醒发后擀成椭圆状，加入35 g红豆沙馅料，整形成圆形，收口面朝下置于刷过油的面包模具中，最后放入醒发箱中二次醒发30 min。设置烤箱上火为180 ℃，下火为210 ℃，烘烤15 min。烘烤结束后冷却2 h再装入自封袋中，进行后续试验。

1.2.12 面包质构的测定

参考张文雅等[14]的方法并稍加修改，采用物性质构仪分析面包在贮藏期间(0、1、3、5、7 d)的全质构特征。选取同批次的3个面包样品，用镊子去除馅心，选择P/35探头进行质构测试。设置测试前速度1.0 mm/s，测试中速度1.0 mm/s，测试后速度3.0 mm/s，下压程度40%，下压力5.0 N，相邻压缩时间5 s。

1.2.13 红豆沙馅面包回生焓值的测定

采用差示扫描量热仪测定面包贮藏至第7天时的回生焓值。将制作的面包置于自封袋中密封，于4 ℃冰箱贮藏。取面包瓤进行冷冻干燥，将3 mg样品平铺于铝坩埚内，加入6 μL蒸馏水，用坩埚盖子密封，然后在4 ℃冰箱中平衡过夜，使样品和水充分混匀。以空坩埚为对照组，以10 ℃/min升温速率从20 ℃加热至90 ℃，流量为80 mL/min。测试完成后记录样品熔融时的热量变化及回升焓值。

1.2.14 数据处理分析

采用Excel 2019和SPSS V.25分析软件对试验数据进行处理和分析，用Origin 2021b软件作图。

2 结果与讨论

2.1 甘油质量分数对红豆沙感官品质的影响

甘油对红豆沙的感官品质产生了显著影响，见表1。随着甘油质量分数的增加，红豆沙感官得分呈现先升高后降低的趋势；当甘油质量分数为4%时，红豆沙的感官得分最高。表明适量的甘油可以有效提升红豆沙的整体感官品质，这可能是由于甘油能够降低红豆沙的硬度，使其质地更加柔软且更有光泽。但是过量的甘油(质量分数高于5%)则会使红豆沙变得过于黏稠，导致红豆沙容易粘牙，口感得分下降。

表 1　甘油质量分数对红豆沙感官品质的影响

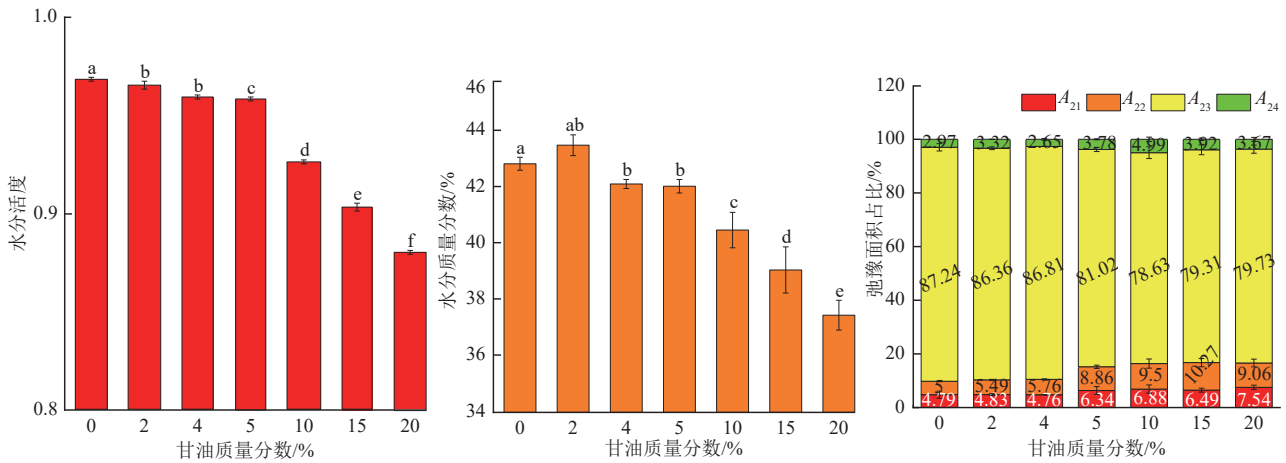
Table 1　Effect of glycerol mass fraction on sensory quality of red bean paste

甘油质量分数/%	口感	香味	色泽	凝固状态	渗油状态	感官得分
0	6.0±0.8^{cd}	14.7±0.9^{a}	11.5±0.9^{d}	6.3±1.1^{e}	11.0±0.8^{c}	49.5±2.1^{d}
2	9.5±1.7^{b}	13.5±1.5^{ab}	14.5±0.9^{c}	9.5±0.9^{c}	13.2±0.7^{b}	60.1±3.6^{b}
4	16.2±1.3^{a}	12.3±1.5^{bc}	18.3±0.9^{ab}	13.0±0.8^{b}	14.5±0.9^{a}	74.3±2.1^{a}
5	15.5±0.9^{a}	10.8±1.1^{cd}	17.0±1.3^{b}	14.5±0.9^{a}	13.5±0.9^{ab}	71.3±2.6^{a}
10	10.5±0.9^{b}	10.7±1.1^{d}	18.5±1.3^{a}	8.2±1.1^{d}	12.3±0.7^{b}	60.2±0.9^{b}
15	7.3±1.1^{c}	11.3±0.9^{cd}	18.0±0.8^{ab}	5.5±0.9^{e}	11.0±0.8^{c}	53.2±2.4^{c}
20	5.5±0.9^{d}	11.5±0.9^{cd}	17.5±0.9^{ab}	4.2±1.1^{f}	11.0±1.1^{c}	49.7±2.4^{d}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.2　甘油质量分数对红豆沙水分特性的影响

A_w是指某种食品的平衡蒸汽压与其在相同温度下纯水的饱和蒸汽压的比值[15]。随着甘油质量分数的增加，红豆沙A_w呈下降趋势，而水分质量分数则先上升后下降，见图 1。这一结果可能与甘油分子结构中的 3 个亲水的醇式羟基有关，这些羟基与水分子之间形成氢键，从而减少了自由水的含量，进而降低了食品体系的A_w[16]。当甘油质量分数为 2% 时，红豆沙的水分质量分数有所增加；但当甘油质量分数达到或超过 4% 时，红豆沙中的水分质量分数逐渐降低。这表明甘油具有一定的保水性，适量添加可以提高产品的水分质量分数，但过量添加则会因为其在食品中比例增加而降低食品的水分质量分数。这与李珊珊[17]的研究结果类似，添加质量分数 5% 的甘油可以使芒果果脯的水分质量分数提高 5.66%，而A_w从 0.537 降低至 0.514。



不同字母表示差异显著(P<0.05)。

(a) 水分活度　(b) 水分质量分数　(c) 弛豫峰面积占比

图 1　甘油质量分数对红豆沙水分特性的影响

Fig. 1　Effect of glycerol mass fraction on water characteristics of red bean paste

不同甘油质量分数的红豆沙弛豫峰面积占比见图 1(c)，相对峰面积的大小代表了该相态水的相对含量。峰面积大小顺序为A_{23}>A_{22}>A_{21}>A_{24}，说明红豆沙中的水分主要以自由水的形式存在。随着甘油质量分数的增加，A_{21}和A_{22}的峰面积的占比逐渐增大，而A_{23}和A_{24}的总峰面积占比则相应减小，表明自由水所占比例降低。这一结果进一步证实了甘油能够有效降低红豆沙的A_w[18]。

甘油质量分数对红豆沙的弛豫时间T_2的影响见表 2。红豆沙的核磁共振图谱中主要有 4 个峰，其中T_{21}区间的水处于强结合状态，T_{22}处于半结合状态，而T_{23}和T_{24}对应于自由水。弛豫时间T_2越小，表示水分与非水成分之间的

表 2　甘油质量分数对红豆沙弛豫时间 T_2 的影响

Table 2　Effect of glycerol mass fraction on T_2 relaxation time of red bean paste

甘油质量分数/%	弛豫时间/ms			
	T_{21}	T_{22}	T_{23}	T_{24}
0	0.98±0.06^{a}	7.52±0.24^{a}	56.62±0.19^{a}	353.06±5.82^{a}
2	0.94±0.08^{a}	6.92±0.68^{a}	55.13±0.20^{a}	290.12±10.37^{b}
4	0.97±0.03^{a}	7.09±0.13^{a}	51.11±0.15^{b}	270.50±5.36^{c}
5	0.65±0.05^{b}	5.62±0.41^{b}	38.72±0.00^{c}	289.94±0.00^{b}
10	0.64±0.24^{b}	5.68±0.71^{b}	36.18±2.05^{d}	236.59±23.97^{d}
15	0.54±0.10^{b}	4.48±0.11^{c}	36.17±1.78^{d}	252.35±0.00^{d}
20	0.58±0.05^{b}	4.23±0.48^{c}	38.72±0.00^{c}	289.94±0.00^{b}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

结合越紧密，其可移动性也就越弱[19]。红豆沙的弛豫时间 T_2 与甘油质量分数呈负相关，表明甘油降低了红豆沙水分的流动性。这可能是由于甘油与部分水分子结合，从而限制了这些水的自由移动[20]。

2.3　甘油对红豆沙持水性的影响

当红豆沙暴露于外界环境中，其水分会逐渐蒸发，这对红豆沙的感官品质会产生不利影响。因此需要探究不同质量分数的甘油在不同贮藏时间对红豆沙 A_w 和水分质量分数的影响。在贮藏期间，红豆沙的 A_w 和水分质量分数均呈下降趋势。随着甘油质量分数的增加，红豆沙的 A_w 和水分质量分数在一定贮藏时间内下降的速率逐渐变缓，见图 2。这可能与甘油的持水性有关，表明甘油在一定程度上可以抑制水分迁移，防止水分的散失[21]。

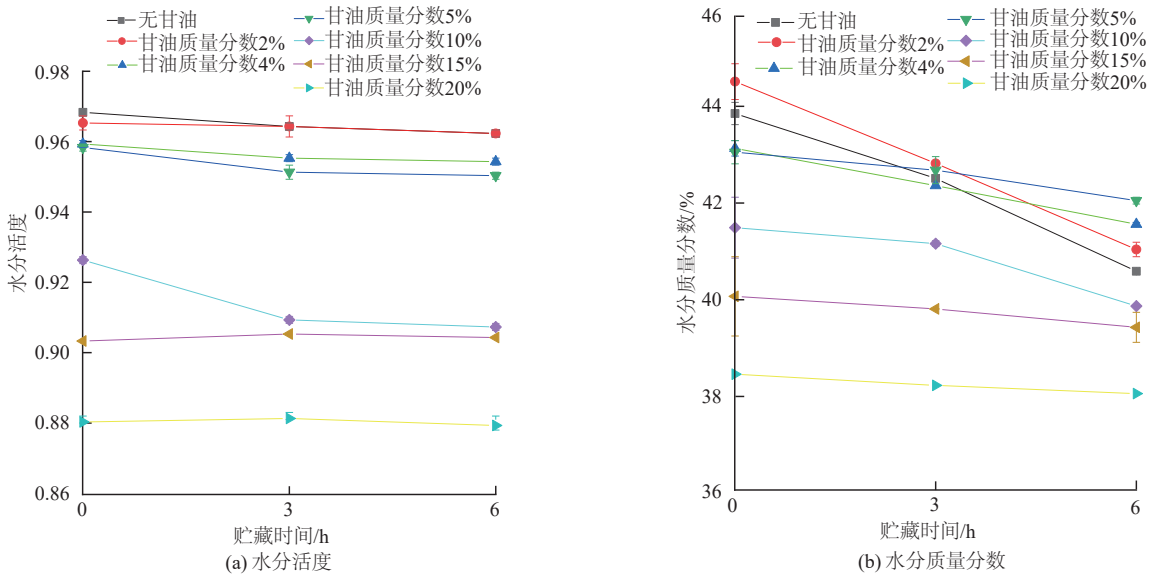


图 2　甘油质量分数对红豆沙持水性的影响

Fig. 2　Effect of glycerol mass fraction on water holding capacity of red bean paste

2.4　甘油质量分数对红豆沙流变学特性的影响

甘油质量分数对红豆沙流变学特性的影响见图 3。其中 G' 代表贮能模量，其值越大表示弹性越大；G'' 代表损耗模量，其值越大红豆沙黏性越强。损耗角正切 tan δ 值与样品中低聚合度分子的数量呈正相关，其变化可反映样品组成中高聚合物的变化[22]。tan δ 值越小，表示弹性成分处于主导地位，体系的固体特征更为明显[23]。随着频率的增加，红豆沙的 G' 和 G'' 均随之增大，且 G' 始终大于 G''，表明红豆沙具有良好的弹性特征。随着甘油质量分数的增加，红豆沙的 G' 和 G'' 呈现出下降趋势。另外，红豆沙的 tan δ 值在低质量分数时先降

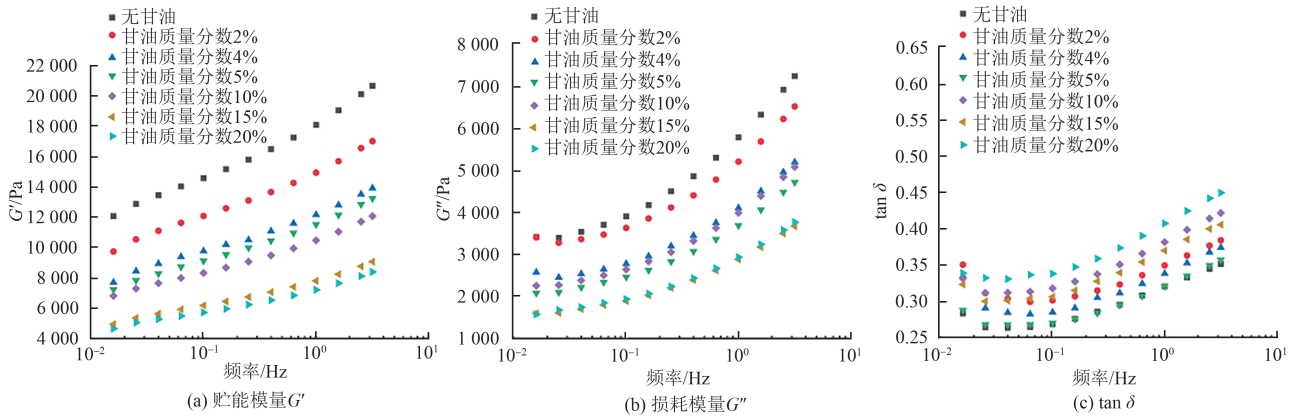


图3　甘油质量分数对红豆沙流变学特性的影响

Fig. 3　Effect of glycerol mass fraction on the rheological properties of red bean paste

低后升高，而当甘油质量分数大于5%时，tan δ值随甘油质量分数增加而降低，且始终小于1。

黏度是指流体内部阻挡流体流动的阻力，根据黏度大小是否随着剪切速率变化，可以将流体分为牛顿流体和非牛顿流体。其中黏度随剪切速率变化的是非牛顿流体，其剪切力与剪切应变率之间不存在线性关系[24]。红豆沙表现出黏度与剪切速率呈负相关的剪切变稀现象，是典型的非牛顿流体的假塑性流动行为，见图4。这可能是由于红豆沙中含有长链高分子胶粒，如蛋白质和淀粉等。当处于静止状态或剪切速率较低时，这些分子会互相缠绕紧密结合，导致整个体系的黏度较大；而当剪切速率增加时，无序的链状粒子不断旋转收缩，导致体系黏度逐渐降低，从而出现了剪切变稀现象[24]。红豆沙黏度随甘油质量分数的增加呈现先增加后降低的趋势，这可能是由于适量的甘油可以通过与其他分子间形成氢键来提高红豆沙的黏度，但过量的甘油会使红豆沙质地过稀，进而降低其黏度。

2.5　甘油质量分数对红豆沙质构的影响

随着贮藏时间的延长，红豆沙样品的硬度呈现上升趋势，这可能是由于贮藏期间淀粉的老化所致。另外，硬度在贮藏前期的上升速率高于中后期，且随着甘油质量分数的增加而降低，见图5(a)。随着甘油质量分数的增加，凝聚性随之升高，见图5(b)，表明甘油可以增强红豆沙粒子间的结合力，从而提高其紧密性。钟细娥[25]在研究甘油对莲蓉馅料影响时也得到了类似结论，随着甘油质量分数的增加，馅料硬度下降，而组织间的结合力逐渐增强。

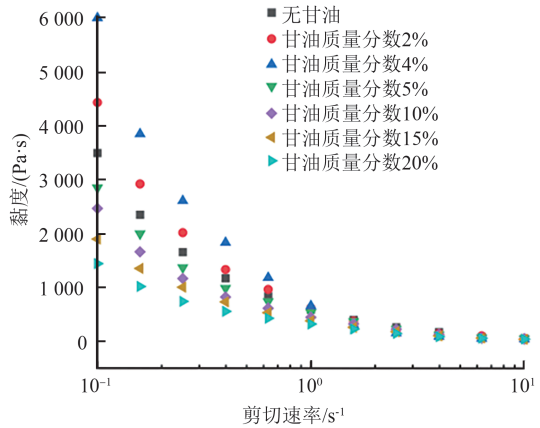


图4　甘油质量分数对红豆沙静态流变特性的影响

Fig. 4　Effect of glycerol mass fraction on the static rheological properties of red bean paste

通过探究甘油质量分数对红豆沙品质的影响，确定甘油的最适质量分数为4%。

2.6　红豆沙A_w对面包水分特性的影响

在甘油质量分数为4%的基础上，进一步通过调整炒制时间制备具有不同A_w的红豆沙样品，其A_w分别为0.96、0.95、0.94、0.93、0.92和0.91。将其作为馅料制作出6批不同的红豆沙馅面包，无馅料面包为空白组，探究红豆沙A_w对面包在贮藏期间A_w的影响，见图6。空白组的A_w值随贮藏时间的延长而降低，这与王志军等[26]的研究结果一致。红豆沙A_w为0.96的面包A_w始终高于空白组，红豆沙A_w为0.95和0.94的面包与空白组A_w值最相近。红豆沙A_w为0.93、0.92和0.91的面包A_w最低，这可能是由于面包在醒发和烘烤过程中与红豆沙之间发生了水分迁移。

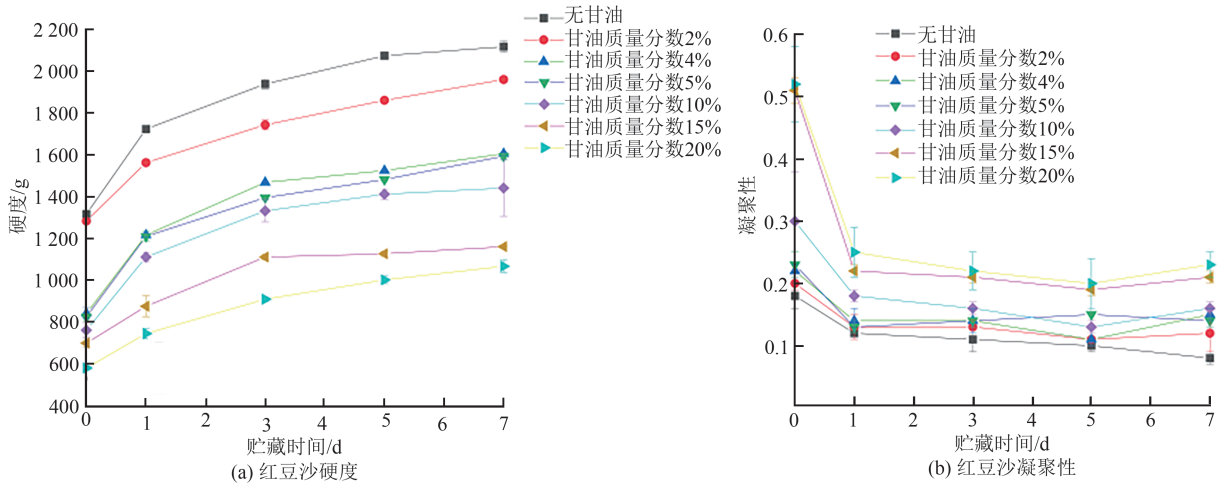


图 5　甘油质量分数对红豆沙贮藏期间质构的影响

Fig. 5　Effect of glycerol mass fraction on the texture of red bean paste during storage

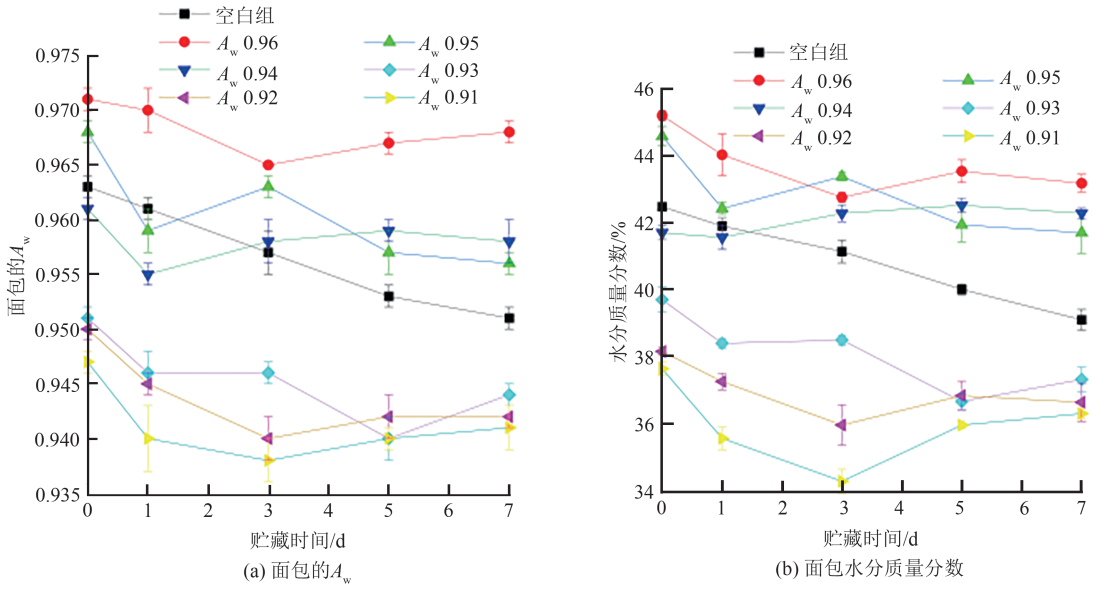


图 6　不同 A_w 红豆沙对面包水分特性的影响

Fig. 6　Effect of red bean paste with different Aw on the water characteristics of bread

食品中水分质量分数和 A_w 息息相关，面包水分质量分数变化趋势和 A_w 一致。

2.7　红豆沙 A_w 对面包硬度的影响

Willhoft 等[27]研究表明，面包在出炉后，由于内外水分梯度的差异，会导致面包硬度增加。对于注馅面包，馅料和面包之间也会发生水分迁移，不同馅料 A_w 对面包硬度也会产生不同的影响。随着贮藏时间的延长，面包的硬度逐渐增大，且在贮藏前期变化较大，后期变化幅度较小，见图 7。在贮藏前期，A_w 为 0.91 的馅料对应的面包硬度最大；而在贮藏后期，A_w 为 0.93、0.92 和 0.91 的馅料对应的面包硬度较大。这可能是由于面包瓤中的水分向馅料中转移，导致面包失水较为严重。

2.8　红豆沙 A_w 对面包回生焓值的影响

淀粉的回生是指在常温下，糊化的 α-淀粉自动排序形成高度结晶化的不溶解的淀粉分子的现象[28]。在 DSC 曲线中，吸热峰是由回生淀粉颗粒无定形区的熔融引起的，这种现象称为老化吸热，馅料 A_w 为 0.96、0.95、0.94 和 0.93 的面包回生焓值显著低于空白组，见图 8，这可能是由于这几组面包的水分质量分数较高，影响了淀粉的重结晶。Engelsen 等[29]的试验也表明面包中的水分质量分

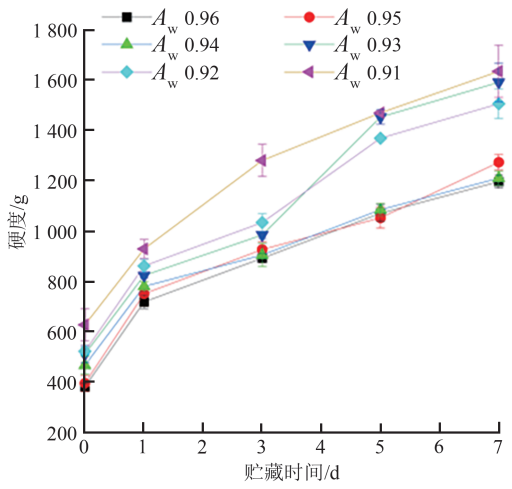
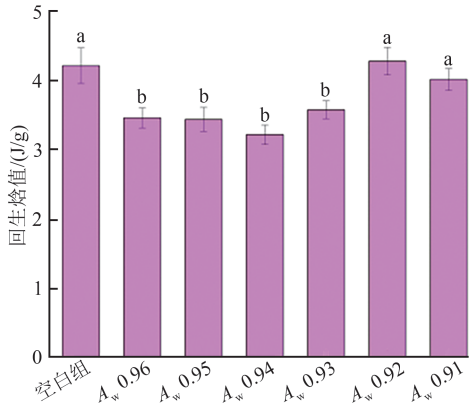


图 7　红豆沙 A_w 对面包硬度的影响

Fig. 7　Effect of red bean paste with different A_w on the hardness of bread

数对面包老化的影响较为显著。



不同字母表示差异显著(P<0.05)。

图 8　红豆沙 A_w 对面包贮藏第 7 天回生焓值的影响

Fig. 8　Effect of red bean paste with different A_w on the retrogradation enthalpy of bread on the 7th day of storage

3　结论

随着甘油质量分数的增加，红豆沙的 A_w 和自由水相对含量均随之降低，从而提高了红豆沙的持水能力和贮藏稳定性。适量添加甘油可有效改善红豆沙的贮藏品质，但当甘油质量分数超过 5% 时，会导致红豆沙品质下降，因此确定甘油的最适质量分数为 4%。在此基础上，通过调整炒制时间制备不同 A_w 的红豆沙，并将其应用于红豆沙馅面包中。结果表明，红豆沙的 A_w 对面包的品质有显著影响，A_w 为 0.94 的红豆沙对应的面包与空白组的水分特性最为接近，并且在贮藏期间的品质更为稳定，其硬度和回生焓值也低于空白组。因此，该面包最适宜的馅料 A_w 为 0.94。

参考文献

[1] 惠丽娟．荞麦杂豆蛋糕的加工技术及影响其品质的因素的研究[D]．武汉：华中农业大学，2008．

[2] 杨益叶．豆沙配方优化及保藏研究[D]．南京：南京农业大学，2018．

[3] 解蕊．红豆沙加工工艺的研究[J]．粮油食品科技，2010，18(4)：38-41．
XIE R．Study on the technology of processing red bean paste [J]．Science and Technology of Cereals，Oils and Foods，2010，18(4)：38-41．

[4] 张雪路．黑小豆沙的研制及其货架期预测[D]．大庆：黑龙江八一农垦大学，2016．

[5] LI M，ZHU K X，GUO X，et al．Effect of water activity and irradiation on the shelf-life of fresh noodles [J]．Innovative Food Science & Emerging Technologies，2011，12(4)：526-530．

[6] 钟玉虎．腌腊肉制品低盐生产技术[D]．无锡：江南大学，2013．

[7] 凌逍，马世广，汪学荣．不同水分活度降低剂对半干猪肉干水分活度的影响[J]．肉类工业，2019(12)：14-19．
LING X，MA S G，WANG X R．Effect of different water activity lowering agent on the water activity of semi-dried pork [J]．Meat Industry，2019(12)：14-19．

[8] 李燮昕，王鑫，刘世洪，等．速冻披萨饼坯品质改良剂的筛选[J]．粮油食品科技，2020，28(1)：34-39．
LI X X，WANG X，LIU S H，et al．Screening of quality modifying agent for frozen pizza crust[J]．Science and Technology of Cereals，Oils and Foods，2020，28(1)：34-39．

[9] CLUBBS E A，VITTADINI E，SHELLHAMMER T H，et al．Changes in the mechanical properties of corn tortillas due to the addition of glycerol and salt and selective high pressure treatments [J]．Innovative Food Science & Emerging Technologies，2005，6(3)：304-309．

[10] 李敬，苏红，张晓梅，等．不同水分活度降低剂对大菱鲆即食制品的影响[J]．食品科学，2017，38(22)：269-274．
LI J，SU H，ZHANG X M，et al．Effects of different water activity-lowering agents on ready-to-eat *Scophthalmus maximus*[J]．Food Science，2017，38(22)：269-274．

[11] KANG Z L，Zou X L，Meng L，et al．Effects of NaCl and soy protein isolate on the physicochemical，water distribution，and mobility in frankfurters [J]．International Journal of Food Science & Technology，2021，56(12)：6572-6579．

[12] 王雪莹，刘建学，韩四海，等．板栗糊饮料流变学特性研

究[J]. 食品工业科技,2019,40(17):79-83,89.
WANG X Y,LIU J X,HAN S H,et al. Rheological properties of chestnut paste beverage[J]. Science and Technology of Food Industry,2019,40(17):79-83,89.

[13] 王玉牛,李汴生,阮征,等. 广式月饼蓉沙馅料质地感官评价与仪器分析的相关性研究[J]. 食品工业科技,2012,33(7):96-99,104.
WANG Y N,LI B S,RUAN Z,et al. Study on association between sensory evaluation and instrumental analysis of the Cantonese moon cakes' paste filling[J]. Science and Technology of Food Industry,2012,33(7):96-99,104.

[14] 张文雅,徐丹,吴凤凤,等. 硬脂酰乳酸钠对冻融循环发酵面团及其油炸甜甜圈品质的影响[J]. 食品与生物技术学报,2022,41(2):73-81.
ZHANG W Y,XU D,WU F F,et al. Effects of sodium stearyl lactate on quality of freeze-thaw circulating fermented dough and its fried donuts[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2022,41(2):73-81.

[15] 叶梦姣,岑红蕾,郝朝辉,等. 水分活度的研究综述[J]. 安徽农学通报,2013,19(9):147-148.
YE M J,CEN H L,HAO Z H,et al. The research overview of water activity[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2013,19(9):147-148.

[16] CHELLI R,PROCACCI P,CARDINI G,et al. Glycerol condensed phases Part II. A molecular dynamics study of the conformational structure and hydrogen bonding[J]. Physical Chemistry Chemical Physics,1999,1(5):879-885.

[17] 李珊珊. 中等水分芒果果脯的研制与保藏研究[D]. 无锡:江南大学,2020.

[18] JANG S J,KIM H W,HWANG K E,et al. Effects of replacing sucrose with various sugar alcohols on quality properties of semi-dried jerky[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources,2015,35(5):622-629.

[19] 李坤. 青菜馅扬州包子抑菌及减脂研究[D]. 无锡:江南大学,2020.

[20] LIU L G,ZHOU Y,WAN J,et al. Mechanism of polyhydroxy alcohol-mediated curing on moisture migration of minced pork tenderloin:on the basis of molecular docking[J]. Food Chemistry,2022,15:100401.

[21] 吕银德,赵俊芳. 栅栏技术在面包防腐中的应用[J]. 中国食品添加剂,2016,27(9):164-168.
LV Y D,ZHAO J F. Application of hurdle technology in bread anticorrosion[J]. China Food Additives,2016,27(9):164-168.

[22] 姜平,谭斌,龚雪梅,等. 冻融对红豆浓浆稳定性及流变学特性的影响研究[J]. 粮油食品科技,2021,29(2):166-172.
JIANG P,TAN B,GONG X M,et al. Research on the effect of freeze-thaw on stability and rheological properties of red bean pulp[J]. Science and Technology of Cereals,Oils and Foods,2021,29(2):166-172.

[23] 徐丹. 旧金山乳杆菌对酸面团面包品质影响机理及面包风味改良的研究[D]. 无锡:江南大学,2019.

[24] 石翠杰. 非牛顿流体黏度标物体系研究[D]. 北京:中国石油大学(北京),2020.

[25] 钟细娥. 甘油在广式月饼饼皮、莲蓉馅料中的应用研究[D]. 广州:暨南大学,2020.

[26] 王志军,蔡金鑫,虞桠芳,等. 天然酵母发酵对面包老化的影响[J]. 食品与生物技术学报,2018,37(9):924-930.
WANG Z J,CAI J X,YU Y F,et al. Effects of sourdough fermentation on bread staling[J]. Journal of Food Science and Biotechnology,2018,37(9):924-930.

[27] WILLHOFT E M A. Mechanism and theory of staling of bread and baked goods,and associated changes in textural properties[J]. Journal of Texture Studies,1973,4(3):292-322.

[28] 詹冬玲,任玉雪,闵伟红,等. 面包老化机理及其分析技术的研究进展[J]. 食品工业科技,2013,34(23):353-355,360.
ZHAN D L,REN Y X,MIN W H,et al. Research progress in the bread aging mechanism and analysis techniques[J]. Science and Technology of Food Industry,2013,34(23):353-355,360.

[29] 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.

(责任编辑:刘冬梅)