

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.02.023

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.

冻融对红豆浓浆稳定性及流变学特性的影响研究

姜平¹, 谭斌¹, 龚雪梅², 吴娜娜¹✉, 陈颖²(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037;
2. 厦门惠尔康食品有限公司, 福建 厦门 361004)

摘要: 通过对红豆浓浆进行反复冻融试验, 分析其冻融稳定性及流变学特性的变化, 以期为其在储运及品质稳定性改善等方面提供数据参考。研究表明: 红豆浓浆的结构体系在经历 1 次冻融循环 (-18 °C, 储藏 7 天) 后已经遭到了严重破坏, 其稳定系数呈现显著下降趋势, 析水率、澄清指数及颗粒粒度呈现显著增加趋势, 而经历多次反复冻融循环后, 这些指标无显著变化, 但损耗角正切值 ($\tan\delta$) 呈现逐渐增大趋势, 这说明反复冻融循环会使红豆浓浆中高聚物的数量越来越少, 聚合度越来越小。冻融循环对红豆浓浆弹性模量 (G') 具有相关性, 而对粘性模量 (G'') 的影响不大。

关键词: 红豆浓浆; 冻融循环; 稳定性; 流变学特性; 弹性模量; 粘性模量

中图分类号: TS214.9 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)02-0166-07

Research on the Effect of Freeze-thaw on Stability and Rheological Properties of Red Bean Pulp

JIANG Ping¹, TAN Bin¹, GONG Xue-mei², WU Na-na¹✉, CHEN Ying²(1. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;
2. Xiamen Hui Er Kang Food Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361004, China)

Abstract: To provide data references for the improvement of red bean pulp storage, transportation and quality stability, the changes of freeze-thaw stability and rheological properties of red bean pulp were analyzed through repeated freeze-thaw tests in this paper. The results showed that the structure system of the red bean pulp suffered serious damage after one freeze-thaw cycle (-18 °C stored 7 days), the stability coefficient significantly declined, the syneresis rate, clarify index and grain size showed significant increasing trend, these indicators had no significant changes after repeated freeze-thaw cycles, but the loss angle tangent ($\tan\delta$) showed a trend of gradual increase, indicating that the repeated freeze-thaw cycles would lead to fewer polymers and lower degree of polymerization in red bean pulp. The freeze-thaw cycle

收稿日期: 2020-10-19

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (2017YFD0401103); 北京市自然科学基金面上项目 (6192028)

Supported by: National Key Research and Development Project of the 13th five-year plan, China (NO.2017YFD0401103); Surface Project of Beijing Nature Fund (NO. 6192028)

作者简介: 姜平, 女, 1987 年出生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为粮食增值加工利用。E-mail: jp@ags.ac.cn.

通讯作者: 吴娜娜, 女, 1981 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为粮食增值加工利用。E-mail: wnn@ags.ac.cn.

had a correlation to the elastic modulus (G') of red bean pulp, but had little influence on the viscosity modulus (G'').

Key words: red bean pulp; freeze-thaw cycles; stability; rheological properties; elastic modulus; viscosity modulus

红豆, 又叫赤小豆、红小豆、赤豆, 由于它所含的蛋白质和碳水化合物含量较高, 还富含多种生理活性物质, 如膳食纤维、叶酸、皂角苷以及多种微量元素等, 具有生津、益气、补脾、补血、益肾、补肝等营养保健功能, 常被当作重要原料来加工成具有保健功能的食品^[1-2]。随着人们对健康饮食的重视, 全谷物饮品由于其方便食用、材料真实、全面的营养成分及多样的口感和风味, 成为了一种备受人们欢迎的代餐、膳食补给方式, 但随着贮存时间的延长尤其是在东北及新疆高寒地带储运过程中, 由于温度波动, 易发生冻融现象(低温冷冻、解冻), 多次冻融会加速冷冻淀粉中冰晶的形成, 并造成颗粒性损害。随着存放时间的增加, 支链淀粉微晶形成更加明显^[3], 往往会出现黏度增加、析水等现象, 这与冻融稳定性有直接关系, 这主要是因为谷物饮品中的主要成分淀粉在较低的温度环境尤其是较大的温度波动差异的条件下容易发生老化现象, 出现退减作用和脱水收缩^[4], 其中以红豆浓浆淀粉老化问题最为严重。这一情况的发生不仅给其消费体验及营养吸收方面带来了严重的负面影响, 也使得谷物饮品在销售流通环节面临着巨大的困难, 造成了极大的浪费。

本文通过对企业提供的红豆浓浆产品的冻融稳定性及流变学特性进行研究, 以期进一步指导产品研发改进及生产实践, 减少产品在货架期内因为老化造成的品质下降及浪费问题, 具有重要的经济和社会意义。

1 材料与方 法

红豆浓浆样品由某企业提供, 其蛋白质含量 3.4%, 脂肪含量 2.1%, 碳水化合物含量 8.2%, 膳食纤维含量 6.0%, 具体制作方法如下:

红豆→预煮→磨浆→煮浆→调配→均质→UHT杀菌→灌装
 白砂糖、低聚果糖、植脂末
 结冷胶、三氯蔗糖、蔗糖脂肪酸酯 } → 剪切分散

PL2002-IC 型电子天平: METTLER TOLEDO 仪器有限公司; L580 低速离心机: 上海卢湘仪离心机仪器有限公司; 紫外可见分光光度计: 北京普析通用仪器有限责任公司; Mastersizer 2000 E 型激光粒度仪: 英国 Malvern Panalytical 公司; AR2000EX 型旋转流变仪: 美国 TA 公司; Dispersion Analyser Lumisizer 611 型稳定性分析仪: 德国 L.U.M.GmbH 公司。

1.1 实验方法

1.1.1 红豆浓浆的反复冻融实验

将同批次多瓶红豆浓浆置于 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰柜中, 每隔 7 天取出, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 常温自然解冻 24 h, 记为一个冻融循环, 取样进行测定, 其余放回冰柜中继续冷冻, 据此分别进行 1、2、3、4、5 次冻融循环(依次简称为 0FTC、1FTC、2FTC、3FTC、4FTC、5FTC)。

1.1.2 红豆浓浆冻融稳定性的分析方法

1.1.2.1 析水率的测定方法 参考 Ye J 等^[5]方法。称取离心管质量 m_0 , 向离心管中加入适量样品后称取质量 m_1 , 以 3 500 r/min 的转速离心 20 min 后, 将离心管中的上清液小心移除, 称量离心管和剩余物的总质量 m_2 。

$$\text{析水率}(\%) = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_0)} \times 100$$

1.1.2.2 稳定系数的测定方法 参考吴金鋈^[6]方法并稍有改动。将样品稀释 10 倍, 震荡均匀后在一定波长下测定其吸光度, 并记录其数值 $A_{前}$, 以 3 000 r/min 的转速离心 10 min 后, 将离心管中的上清液小心吸出, 并在一定波长下测定其吸光度, 记录其数值 $A_{后}$, 其中所述波长为 785 nm。稳定系数 R 值的大小反映所测定样品的稳定性能, 一般情况下 R 值越大, 则样品越稳定。

$$R = \frac{A_{后}}{A_{前}}$$

1.1.2.3 Slope 值及澄清指数的测定方法 采用德国 LUMisizer 稳定性分析仪对不同冻融循环后

的红豆浓浆样品进行稳定性、全程分离步骤、沉降及悬浮并存的复杂分离行为分析^[7]。通过 Slope 值和澄清指数的大小来比较样品的稳定性,其中 Slope 值 (%/h) 是指光透过率积分随时间变化曲线的斜率,澄清指数是指样品在离心过程中各部位随时间的透光率变化。测定参数设置:检测温度 25 °C,转速 3 000 r/min, light factor 1.00, 每 10 s 扫描一次,共扫描 200 次。

1.1.3 平均粒度的测定

参考汪丽萍等^[8]方法。使用 Mastersizer 2000 E 型激光粒度仪测定,测定过程采用湿法手动测量:移取一定量样品均匀分散在去离子水中,使响应值在最佳区间,测定颗粒大小的分布情况。为了减少多重散射所造成的测量误差,每个样品重复测定 3 次,取平均值。

1.1.4 流变性质

1.1.4.1 静态流变性质 参考王雪莹等^[9]方法并稍有改动。将经过多次冻融循环的红豆浓浆样品加到流变仪平板上,将剪切速率设为变量,样品的剪切速率变换范围设定为 0.1~100 s⁻¹,设定温度 25 °C,测量样品表观黏度随剪切速率的变化曲线。

1.1.4.2 动态流变性质 参考王雪莹等^[9]方法并稍有改动。在 25 °C 下,测定经过多次冻融循环的红豆浓浆样品动态流变性质,固定振荡应变在 1%,角频率变换范围设定为 0.1~20 rad/s,测定样品的弹性模量 G'、粘性模量 G''随角频率的变化曲线。

1.2 数据处理

采用 SPSS 20.0 和 Microsoft Excel 系统软件进行数据分析,使用 SPSS 20.0 软件对数据进行方差分析,方差分析选取 Duncan 检验,在 P<0.05 检验水平上对数据进行统计学分析^[10]。

2 结果与分析

2.1 冻融循环对红豆浓浆冻融稳定性的影响

2.1.1 对析水率及稳定系数的影响

由于原料组分中的直链淀粉含量较多,在冻融条件下存在加速老化、析水的现象,因此通过析水率及稳定系数的测定可以客观的反映样品经过多次冻融循环后的稳定性情况。由图 1 可以看

出,随着冻融循环次数的增加,红豆浓浆的析水率呈现逐渐增加的趋势,稳定系数呈现逐渐下降的趋势,说明反复冻融使得浓浆体系越来越不稳定,这可能是由于多次冻融逐渐破坏了浓浆内部的三维网络结构,使得原本在凝胶中的水分逐渐流失^[11],因而造成了体系的稳定性逐渐变差。

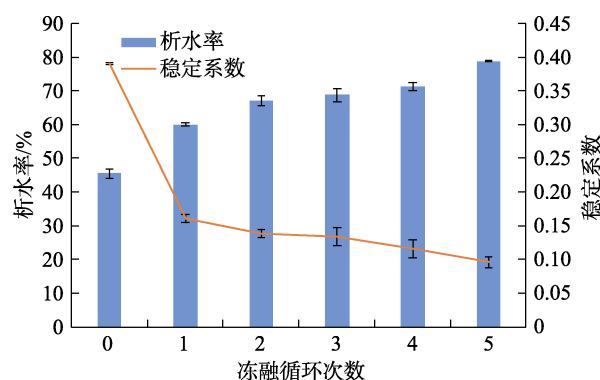


图 1 冻融循环对浓浆冻融稳定性的影响

Fig.1 Effect of freeze-thaw cycle on freeze-thaw stability of concentrated pulp

当冻融次数超过 1 次后红豆浓浆的析水率及稳定系数差异不显著,这可能是由于红豆浓浆经过 1 次冻融循环后其三维网络结构已经遭到了严重破坏,在凝胶网格中的大部分水分已经渗出,而进一步的冻融循环会使体系形成海绵状的网络结构,这种结构会导致凝胶体系的弹性和刚性增加,部分析出水分子发生回吸作用^[12],因此出现了随着冻融次数的增加,红豆浓浆的析水率先显著上升后趋于平缓的趋势。

2.1.2 对 Slope 值及澄清指数的影响

Slope 值越大,表示在一定的时间内样品的透光率变化越快,即样品的移动分层速度变化越快,样品越不稳定;反之 Slope 数值越小,样品越稳定。澄清指数越小表明样品具有良好的稳定性,不易出现分层现象^[13]。

由图 2 可以看出,Slope 值及澄清指数均随着冻融次数的增加而呈现逐渐增大并趋于平缓的趋势,当冻融次数超过 1 次后红豆浓浆的澄清指数变化差异不显著,这与红豆浓浆的析水率所呈现趋势一致。这可能是由于在冷藏过程中热能的波动和水的相变使淀粉胶基质被破坏,冻结时水分子呈玻璃态,而玻璃态的水无固态形状,不存在晶体结构,流动性差,再加上一些添加剂如蔗糖

等的存在使得水分子更易形成玻璃态故而稳定性好^[14-15]，但融化过程导致体系结构玻璃态的破坏，因此红豆浓浆体系越来越不稳定，易出现分层现象。

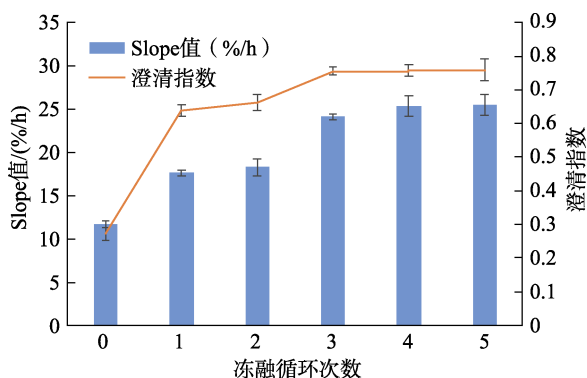


图 2 冻融循环对浓浆 Slope 值及澄清指数的影响
 Fig.2 Effect of freeze-thaw cycle on Slope value and clarification index of pulp

2.2 冻融循环对红豆浓浆颗粒粒度的影响

在粒度分布中， $D_{0.1}$ 表示该样品有 10% 的颗粒所对应的的直径， $D_{0.5}$ 表示该颗粒群的粒度大小，也称为中位径， $D_{0.9}$ 表示该样品有 90% 的颗粒所对应的的直径， $D_{4.3}$ 表示平均径， $(D_{0.9}-D_{0.1})/D_{0.5}$ 称为距径，它表示样品分布区域的宽度，距

径越大，表明其分布得越宽。根据斯托克斯规律，颗粒粒径越小，沉淀速度越慢，样品越稳定^[16]。

通过表 1 中的数据可以看出，与红豆浓浆原始样品相比，经过不同冻融循环后红豆浓浆的颗粒均呈现增大趋势，这可能是由于冷冻过程中浓浆中的自由水向冰晶态转变，而冰晶在颗粒上占据的空间更多，施加的机械力也更大，这就会使淀粉颗粒膨大、溶胀^[17]，而解冻会使淀粉的表层和内部结构发生破损，一些中等分子量大小的支链淀粉的裂解和渗出^[18]以及水分子的移动、结合和再分布会导致淀粉结构变得松散且刚性下降，导致了浓浆颗粒粒径的变化。但经过 1 次冻融循环后浓浆的颗粒粒度增大的幅度最大，再经过多次冻融循环后，颗粒粒度与 1 次冻融循环后浓浆的颗粒粒度相比反而逐渐减小，这可能是由于初次冻融对浓浆体系中淀粉结构体系破坏程度最大，大分子间的再结合或淀粉等大分子的溢出使得颗粒粒度增大，而后发生的多次冻融循环可能使浓浆体系在初次冻融基础上形成了海绵状结构，水分子发生回吸，淀粉分子被破坏裂解，因此颗粒粒度与 1 次冻融循环后浓浆的颗粒粒度相比逐渐变小。

表 1 冻融循环对浓浆颗粒粒度的影响
 Table 1 Effect of freeze-thaw cycle on particle size of pulp

	$D_{0.1}$	$D_{0.5}$	$D_{0.9}$	$D_{4.3}$	距径
0FTC	10.692±0.082 ^e	55.700±0.475 ^f	138.014±0.775 ^f	66.565±1.286 ^e	2.29 ^a
1FTC	92.587±2.666 ^a	327.129±8.271 ^a	631.663±15.898 ^a	350.652±4.648 ^a	1.65 ^b
2FTC	92.054±5.476 ^a	260.069±20.123 ^b	505.162±36.291 ^b	282.117±20.810 ^b	1.59 ^{bc}
3FTC	90.136±3.708 ^b	245.091±12.199 ^c	472.963±16.278 ^d	265.463±11.165 ^c	1.56 ^c
4FTC	86.040±1.153 ^c	240.847±1.793 ^d	480.871±1.866 ^c	264.769±1.156 ^c	1.64 ^b
5FTC	72.028±0.584 ^d	195.053±1.294 ^e	383.035±2.552 ^c	212.967±1.364 ^d	1.59 ^{bc}

注：同列中不同上标表示存在显著差异 ($P<0.05$)。0FTC、1FTC、2FTC、3FTC、4FTC、5FTC 分别代表 0、1、2、3、4、5 次冻融。

Note: Different superscripts in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). 0FTC、1FTC、2FTC、3FTC、4FTC and 5FTC represent 0、1、2、3、4 and 5 freeze-thaw cycles respectively.

2.3 冻融循环对红豆浓浆流变性质的影响

食品的流变学特性分析是一种衡量食品稳定性以及设计加工工艺的重要手段，通过流变学分析得到的重要参数可以对食品的状态和品质做出判断，能为其产品研发和质量检测提供重要参数^[9]。

2.3.1 冻融循环对红豆浓浆静态流变性质的影响

触变性和触变结构是影响食品体系稳定性的重要因素。触变性是指剪切使分散体系结构破坏，去除剪切后结构逐步恢复的现象，它分为正触变性（切稀现象）和负触变性（切稠现象）^[19]。

由图 3 可以看出，多次冻融循环后红豆浓浆

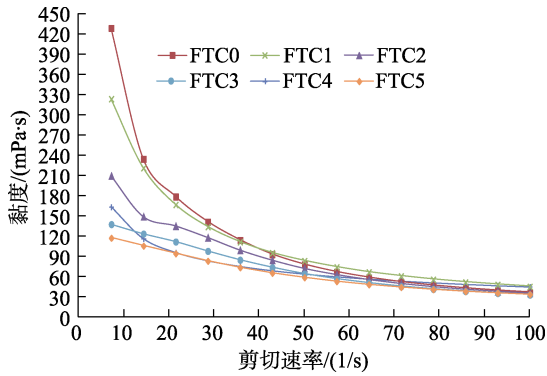


图 3 冻融循环后浓浆静态流变特性图
Fig.3 Static rheological characteristics of pulp after freeze-thaw cycles

样品均表现为溶液黏度随剪切速率增加而减小的正触变性现象，这是典型的非牛顿流体的假塑性流动行为，而且随着冻融次数的增加，浓浆样品的黏度也呈现下降的趋势，这可能是因为在体系中含有链状高分子的胶体粒子，如蛋白-脂肪、淀粉-蛋白、淀粉-多糖等，它们处于静止状态或低速率流动状态时会互相缠绕结合在一起，这就使得此时的体系黏度较大，而当外力的剪切速度增大时，不规则的链状粒子在剪切外力的作用下不断收缩、翻转成团，减少了相互勾挂，从而出现了剪切稀化现象，黏度逐渐降低^[6]。而随着冻融次数的增加，红豆浓浆中冰晶不断的融解和再形成，就会伴随着对淀粉颗粒的反复挤压，造成程度逐渐加深的机械损伤并伴随越来越多淀粉游离溢出和加速重结晶老化导致黏度显著下降^[20-21]。

2.3.2 冻融循环对红豆浓浆动态流变性质的影响

动态流变仪是分析样品的粘性性质和弹性性质的一种重要手段，可以分为温度扫描和频率扫描，其中频率扫描就是通过改变振荡频率来分析物质的弹性模量 (G') 和粘性模量 (G'') 的变化情况的一种测定方法，进一步计算可得到损耗角正切 $\tan\delta$ ($\tan\delta = G''/G'$)，这些参数都间接地提供了样品的分子结构方面的信息^[22]。 G' 表示物料在形变过程中储存的能量，反映物料形变后恢复原状的能力， G' 越大物料恢复形状的能力越强； G'' 表示在形变过程中物料为了抵抗黏性阻力而损失的能量，反映物料抵抗流动的能力， G'' 越大物料抵抗流动的能力越强^[23]。 $\tan\delta$ 值的变化反映了样品组分中高聚物组成的变化，其值越大，则说明样品中含有低聚合度分子的数量越多，当材料的

性质类似于固体时，其在线性范围内的形变是可压缩和恢复的，粘性模量 (G'') 小于弹性模量 (G')， $\tan\delta < 1$ ；反之，当材料性质类似于流体或粘性系统时， $\tan\delta > 1$ 。

图 4 中列出了经过不同次数冻融循环后红豆浓浆的弹性模量 (G')、粘性模量 (G'') 以及 $\tan\delta$ 值随角频率的变化曲线图，其中 A 图反映了经过不同次数冻融循环的红豆浓浆的弹性模量 (G') 均随着角频率的变化呈现先增大后减小的趋势，其变化曲线形状近似抛物线，符合二次函数变化规律，对其进行二次拟合分析，分析冻融次数对浓浆弹性模量的影响。二次回归模型拟合研究模型为：

$$y = ax^2 + bx + c$$

式中： y -弹性模量 (Pa)； x -角频率 (rad/s)； a, b, c -

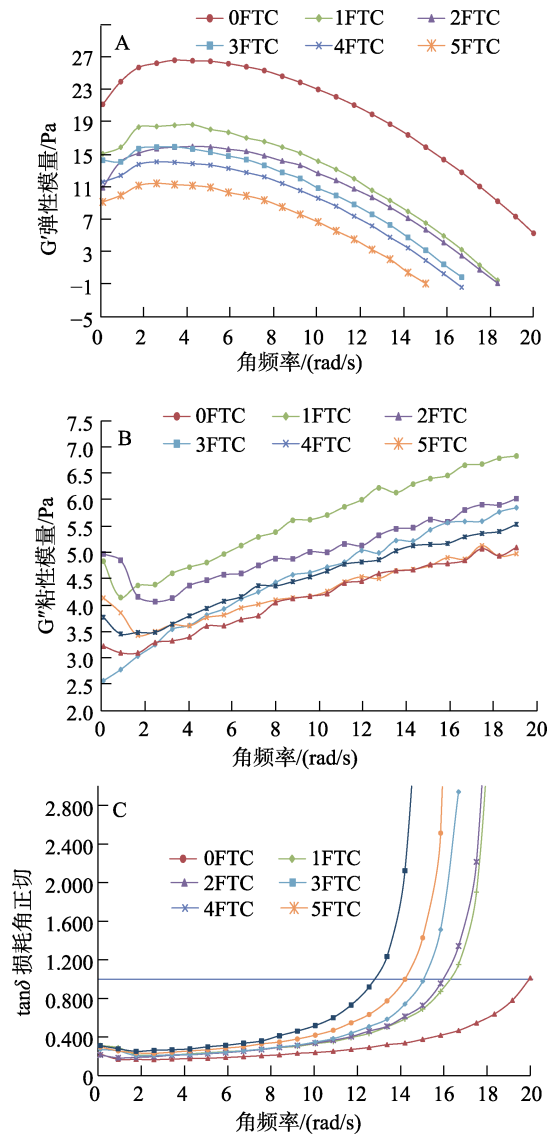


图 4 冻融循环后浓浆动态流变特性图
Fig.4 Dynamic rheological characteristics of pulp after freeze-thaw cycles

拟合系数。

拟合系数及检验结果如表 2 所示, 从表中可以看出, 冻融循环对红豆浓浆弹性模量具有相关性, 红豆浓浆在不同冻融循环处理后拟合优度 $R^2 > 0.9$, 说明回归方程拟合度较高。

表 2 拟合系数及检验结果
Table 2 Fitting coefficient and test results

冻融次数	拟合系数 a	拟合系数 b	拟合系数 c	R^2
0	-0.088	0.857	24.006	0.988
1	-0.086	0.674	17.239	0.990
2	-0.090	0.905	14.080	0.986
3	-0.081	0.490	15.561	0.995
4	-0.085	0.620	13.454	0.995
5	-0.086	0.594	11.043	0.992

B 图反映了经过不同次数冻融循环的红豆浓浆的粘性模量 (G'') 均随着角频率的变化呈现逐渐增大的趋势, 但增加幅度并不是很大, 只有 1~3 Pa 的增加, 而且不同冻融循环处理后样品的粘性模量并未有较大差异, 说明冻融循环对浓浆的粘性模量影响不大。C 图反映了经过不同次数冻融循环的红豆浓浆的损耗角正切值 ($\tan\delta$) 均随着角频率的变化呈现逐渐增大的趋势, 且随着冻融循环次数的增加, $\tan\delta$ 值的变化幅度越来越大, 说明冻融循环使红豆浓浆中高聚物的数量越来越少, 聚合度越来越小。


3 结论

通过对红豆浓浆产品的冻融稳定性及流变学性质的分析, 该红豆浓浆产品是典型的非牛顿流体的假塑性流体, 经历 1 次冻融循环 ($-18\text{ }^\circ\text{C}$ 储藏 7 天) 后稳定系数呈现显著下降趋势, 析水率、澄清指数及颗粒粒度呈现显著增加趋势, 而经历多次反复冻融循环后, 这些指标无显著变化, 损耗角正切值 ($\tan\delta$) 呈现逐渐增大趋势, 这说明红豆浓浆的结构体系在经历 1 次冻融循环后已经遭到了严重破坏, 反复的冻融循环会使红豆浓浆中高聚物的数量越来越少, 聚合度越来越小。因此企业应密切关注该产品在东北及新疆等高寒地带储运过程中温度的变化, 还应进一步在筛选原料品种、与化学变性淀粉的复配、冻融条件和工艺的优化以及添加剂的合理使用等方面进一步提

升产品冻融性能, 保持产品的口感及风味。

参考文献:

- [1] 杨治业. 红豆加工前景广阔[J]. 农产品加工, 2010, (7): 2-3.
YANG Z Y. Red bean processing has broad prospects[J]. Farm Product Processing, 2010, (7): 2-3.
- [2] 康云峰, 吕广, 马志梅. 红豆浓浆产品淀粉抗老化研究[J]. 中国食品添加剂, 2015(12): 129-134.
KANG Y F, LV G, MA Z M. Study on the starch aging resistant of red been drinks[J]. China Food Additives, 2015(12): 129-134.
- [3] TAO H, ZHANG B, WU F, et al. Effect of multiple freezing/thawing-modified wheat starch on dough properties and bread quality using a reconstitution system[J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 132-137
- [4] 贲东旭, 周小悦, 陶文初, 等. 八宝粥原料冻融稳定性研究[J]. 食品科技, 2015, 40(12): 56-59.
BEN D X, ZHOU X Y, TAO W C, et al. The freeze-thaw stability of the ingredients in canned mixed congee[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(12): 56-59.
- [5] YE J P, HU X T, ZHANG F, et al. Freeze-thaw stability of rice starch modified by improved extrusion cooking technology[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 20(151): 113-118.
- [6] 吴金璧. 复合全豆植物蛋白饮料的稳定性及流变特性研究[D]. 华南理工大学, 2010.
WU J J. Study on the stability and rheological characteristics of compound whole-seed protein beverage[D]. South China University of Technology, 2010.
- [7] 许朵霞, 王小亚, 尤嘉, 等. 蛋白质-多糖复合物对 β -胡萝卜素乳液的影响[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(4): 9-13.
XU D X, WANG X Y, YOU J, et al. The influence of protein-polysaccharide conjugate on the stability of the β -carotene Emulsion[J]. Food Research and Development, 2012, 33(4): 9-13.
- [8] 汪丽萍, 朱亚婧, 冯叙桥, 等. 均质工艺对燕麦浆稳定性影响的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(18): 324-327+354.
WANG L P, ZHU Y J, FENG X Q, et al. Study on influence of homogenization parameters on the stability of oats milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(18): 324-327+354.
- [9] 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. Studies on rheological properties of chestnut paste beverage[J]. Science and technology of food industry, 2019, 40(17): 79-83+89.
- [10] 赵月, 吕美, 杨华. 辽宁省主栽品种马铃薯块茎和马铃薯全粉的品质分析[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(1): 70-75.
ZHAO Y, LV M, YANG H. Quality analysis of potato tuber and potato granules of main cultivars in Liaoning province[J]. Science

- and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(1): 70-75.
- [11] 谢涛. 三种回生抗性淀粉对米淀粉的冻融与流变性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(12): 28-34.
 XIE T. Effect of three kinds of retrograded resistant starches on freeze-thaw stabilities and rheological properties of rice starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(12): 28-34.
- [12] YUAN R C, THOMPSON D B. Freeze-thaw stability of three waxy maize starch pastes measured by centrifugation and calorimetry[J]. Cereal Chemistry, 1998, 75: 571-573.
- [13] MAO L, ROOS Y H, O'CALLAGHAN D J, et al. Volatile release from whey protein isolate-pectin multilayer stabilized emulsions: effect of pH, salt, and artificial salivas[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(26): 6231-6239.
- [14] AHMAD F B, WILLIAMS P A. Effect of galactomannans on the thermal and rheological properties of sago starch[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(3): 1578-1586.
- [15] 秦华明, 宗敏华, 梁世中. 糖在蛋白质药物冷冻干燥过程中保护作用的分子机制[J]. 广东药学院学报, 2001, 17(4): 305-307.
 QIN H M, ZONG M H, LIANG S Z. Molecular mechanism of the protective effect of sugar on protein drugs during freeze-drying[J]. Journal of Guangdong Pharmaceutical University, 2001, 17(4): 305-307.
- [16] 穆硕, 鹿瑶, 高彦祥, 等. 果胶和热处理对蛋白质乳液凝胶结构特性和复合维生素稳定性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(18): 29-34.
 MU S, LU Y, GAO Y X, et al. Effect of pectin and preheating on the structure and stability of mixed vitamins in protein emulsion gels[J]. Food Science, 2018, 39(18): 29-34.
- [17] 苏晗, 涂金金, 陈竟豪, 等. 淀粉冻融特性及其品质影响因素研究现状[J]. 包装工程, 2019, 40(13): 31-40.
 SU H, TU J J, CHEN J H, et al. Freeze-thaw properties and influencing factors of starch quality[J]. Packaging engineering, 2019, 40(13): 31-40.
- [18] SZYMONSKA J, WODNICKA K. Effect of multiple freezing and thawing on the surface and functional properties of granular potato starch[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19: 753-760.
- [19] 侯万国, 苏延磊, 孙德军, 等. Mg-Fe-MNH-钠质蒙脱土分散体系的触变性研究[J]. 化学学报, 2000, 58(6): 722-726.
 HOU W G, SU Y L, SUN D J, et al. Study on the magnesium ferric hydroxide-montmorillonite suspension[J]. Acta Chemica Sinica, 2000, 58(6): 722-726.
- [20] 严娟, 杨哪, 焦爱权, 等. 冻融对糯米淀粉性质的影响[J]. 食品工业技术, 2012, 33: 109-112.
 YANG J, YANG N, JIAO A Q, et al. Effect of freezing and thawing on the properties of glutinous rice starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33: 109-112.
- [21] TAO H, YAN J, ZHAO J, et al. Effect of multiple freezing thawing cycles on the structural and functional properties of waxy rice starch[J]. Plosone, 2015(10): 1371.
- [22] ZAIDULISM, NORULANINAN, OMARAKM, et al. RVA analysis of mixtures of wheat flour and potato, sweet potat, yam, and cassava starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 69(4): 784-790.
- [23] HESARINEJAD M A, KOOCHEKI A, RAZAVI S M A. Dynamic rheological properties of Lepidium perfoliatum seed gum: Effect of concentration, temperature and heating/cooling rate[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 583-589. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。