发芽糙米粉对米糕老化抑制作用的研究

葛云[1]，吴凤凤[1]，李静[1]，杨哪[1]，金征宇[2]，徐学明[2]
（1.江南大学食品学院，江苏无锡 214122）（2.江南大学食品科学与技术国家重点实验室，江苏无锡 214122）

摘要：本论文研究了发芽处理对米糕的抗老化作用，采用全质构、DSC 和感官分析比较了不同发芽时间糙米粉单独或按不同比例混配制得糙米糕的老化特性，并分析了糙米发芽过程中主要成分的变化规律。结果表明：发芽处理抑制米糕老化的作用随发芽时间的延长而增加，不同发芽时间糙米粉按特定的比例混配能进一步增强其抗老化效果。发芽 2 d 和发芽 3 d 的糙米粉按 1:2 的质量比例混配时抗老化效果最佳。糙米发芽后淀粉的降解导致其总淀粉、直链和支链淀粉含量的显著降低（发芽 0~4 d，总淀粉、直链和支链淀粉含量分别从 77.26%、4.08%和 73.18%下降到 46.77%、2.56%和 44.21%）以及糊精和小分子糖含量的增加（发芽 0~4 d，还原糖含量从 0.98%增加到 8.22%）是发芽处理延缓米糕老化的重要原因。此外，蛋白和脂肪等成分的变化及各组分的交互作用都可能影响最终产品的回生速率，还需进一步实验验证。

关键词：发芽糙米糕；抗老化；全质构；DSC；感官分析
文章篇号：1673-9078(2016)11-170-176 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.11.026

Improved Shelf Life of Germinated Brown Rice Cakes

GE Yun[1], WU Feng-feng[1], LI Jing[1], YANG Na[1], JIN Zheng-yu[2], XU Xue-ming[2]
(1.School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)
(2.State Key Lab of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The improved shelf life of germinated rice cakes was studied in this paper. The shelf-life properties of rice cakes prepared by pure brown rice flours with different germination times, or mixed brown rice flours in different ratios were analyzed and compared using texture profile analysis, differential scanning calorimetry (DSC), and sensory analysis, and the pattern changes in the main ingredients of brown rice during germination were analyzed. The results showed that the shelf life of rice cakes was increased with prolonged germination time, and the brown rice flours with different germination times, mixed in a specific blending ratio, could also further enhance this effect. The optimum shelf life of rice cakes was observed when the 2 d and 3 d germinated brown rice flours were mixed in a ratio of 1:2. The main reasons accounting for the improved shelf life of the rice cakes were the starch degradation. This resulted in the decrease of total starch, amylose and amylopectin content (from day zero to four of germination, the content of total starch, amylose, and amylopectin decreased from 77.26%, 4.08%, and 73.18% to 46.77%, 2.56%, and 44.21%, respectively), and the increase in content of dextrin and small-molecule sugar (from day zero to four of germination, the reducing sugar content increased from 0.98% to 8.22%). Furthermore, the improved shelf life of the final products was also influenced by changes in protein, fat and other components in the germination period and the interaction of these compounds.

Key words: germinated brown rice cakes; shelf life; texture profile analysis; differential scanning calorimetry; sensory evaluation

作为一种风味独特的传统食品，米糕具有深厚的文化内涵和底蕴，深受广大消费者的欢迎。传统的米糕除了具有高糖、高油和高淀粉等特点外，在生产、运输、储存与销售这一系列环节中，米糕会逐渐老化、变硬、水分流失以及可食用品质明显下降，不能满足消费者的要求。因此，目前市场上的米糕主要是以现做现卖的形式销售，保质期较短，一般不超过 3 d。据报道，高淀粉类食品老化的主要原因是淀粉回生引起的，其老化速率受水分与温度、淀粉酶、乳化剂、直链和支链淀粉的链长和比例、糊精、小分子糖种类和含量、蛋白质、脂肪含量等多重因素影响[1]。针对这类食品保质保鲜，除了改进基本配方、工艺以及改善生产环境和包装方法外，一般采用酶制剂、食用胶体、食用乳化剂、变性淀粉等添加剂来抑制淀粉回生[2]。

糙米是由稻谷脱壳后保留胚芽、糠层和胚乳的全谷米粒。发芽糙米是糙米在一定温度和湿度下，发芽到一定程度的糙米制品。事实上，糙米发芽的实质是糙米中以结合态存在的大量酶在适宜的温度和水分下

收稿日期：2015-12-11
基金项目：国家自然科学基金项目（31501523）；江苏省自然科学基金项目（BK20140148）
作者简介：葛云（1991-），女，硕士生，研究方向：食品组分与物性
通讯作者：吴凤凤（1984-），女，副教授，硕士生导师，研究方向：食品组分与物性

被激活，转变成游离态，由此发生一系列酶和生化反应，在这些酶的作用下，糙米的营养状态及食用品质得以改善[3]。目前国内外关于发芽糙米的研究多集中在营养特性和生理功效方面，而关于发芽糙米制品回生的报道很少。本论文拟通过全质构分析、DSC 和感官评定等手段比较不同发芽时间糙米粉及其按不同比例复配制成的发芽糙米糕的老化特性，并结合不同发芽阶段糙米的主要成分的变化研究糙米发芽机理，为合理开发发芽糙米制品提供参考。

1 材料与方法

1.1 原料

稻谷种子为江苏地区常规糯稻：淮糯 12 号，购于稻谷种子交易市场；糯米，常熟市白雪淀粉制品厂；粳米，益海嘉里粮油食品工业有限公司；白砂糖，宁波市糖业烟酒有限公司。

1.2 主要仪器设备

JGMJ 8098 稻谷精米检测器，上海嘉定粮油仪器有限公司；PQX-2608 多段可编程人工气候箱，宁波东南仪器有限公司；CS101-2E 电热鼓风干燥器，重庆四达实验仪器厂；YS-04 小型高速离心机，北京燕山正德机械设备有限公司；3K30 冷冻离心机，SIGMA 公司；TA.XTPlus 型物性测试仪，英国 Stable Microsystems 公司；X-DSC7000 差示扫描量热仪，日本精工纳米科技有限公司；Waters 600 高效液相色谱仪，美国 Waters 公司；LC-20AT 高效液相色谱仪、示差折光检测器，日本岛津公司。

1.3 试验方法

1.3.1 发芽糙米粉的制备

将除杂稻谷砻谷制得糙米，选取饱满完好的糙米粒，用去离子水冲洗干净。然后将糙米平铺于培养皿上，加入一定量的去离子水，放入 25 ℃的恒温培养箱发芽。分别制得 1 d、2 d、3 d 和 4 d 的发芽糙米。将发芽糙米放入 40 ℃烘箱干燥 12 h，粉碎，过 120 目筛，得到发芽糙米粉。

1.3.2 米糕的制作方法

将不同发芽时间的糙米粉或糯米粉与水一定比例混合均匀，白砂糖加入水中完全溶解，后将糖水缓慢加入米粉中，不断搅拌揉搓，模具成型，保鲜膜包好，蒸锅中加热 15 min。

1.3.3 米糕的质构分析

参考 AACC74-09 测试方法，测定发芽糙米糕 25 ℃下放置 1、3、7、14、21、28 d 的全质构特性，全质构评价参数包括硬度、粘性、咀嚼性、粘聚性、弹性和回复值。测定条件如下：采用 P/0.25S 型探头，实验前速度 2.00 mm/s，实验速度 5.00 mm/s，实验后的速度 5.00 mm/s，压缩深度 30%，时间间隔 10 s，压缩次数 2 次，每项测试重复 6 次。

1.3.4 米糕回生特性的测定（DSC 分析）

分别取 25 ℃下放置 28 d 的真空米糕 8 mg 于铝坩埚中，以空盘为参考样品，进行 DSC 测定，加热程序为：以 10 ℃/min 的升温速率从 30 ℃升温到 90 ℃。得到试样的 DSC 热效应曲线，其特征参数包括热焓(ΔH)，起始温度(T_o)，峰值温度(T_p)，终结温度(T_c)。

1.3.5 米糕的感官评定

选取 8 名品评人员组成品评小组，实验前，让品评员提前确认米糕的感官特性，评价项目包括硬度、粘性、气味、滋味、咀嚼性、组织机构和颜色，具体评定表见表 1。品评时，先趁热评定米糕的气味，然后观察米糕的颜色、组织机构，再通过咀嚼，评定米糕的口感和滋味。

表1 米糕感官评价指标及评价尺度

Table 1 Sensory evaluation index and evaluation scale of rice cakes

评分指标	分值	评分标准
硬度	25	硬度适中(15~25)；稍硬或稍软(9~14)；过硬或过软(0~8)
粘性	15	爽口有粘性，不粘牙(9~15)；有粘性，稍粘牙(5~8)；粘性过大粘牙或无粘性(0~4)
气味	15	有糯米和糙米的香味(9~15)；香味不足(5~8)；无明显香味，有异味(0~4)
滋味	15	甜味适中(9~15)；甜味很淡，稍有苦味(5~8)；无甜味，有苦味(0~4)
咀嚼性	10	咀嚼时间适中，有嚼劲(10~8)；咀嚼时间稍长，较有嚼劲(5~7)；咀嚼时间过长(0~4)
组织机构	10	结构均匀，细腻(10~8)；结构稍均匀，有点塌陷(5~7)；结构不均匀，不成型(0~4)
颜色	10	颜色亮丽，易被接受(10~8)；颜色暗沉(5~7)；颜色灰暗，不易被接受(0~4)

1.3.6 糙米粉基本成分分析

水分的测定：105 ℃恒重法，GB 5009.3-2010；总淀粉含量和直链淀粉含量采用直链淀粉/支链淀粉试剂盒测定，根据 Concanavalin A(Con A)法进行测定，支链淀粉含量由总淀粉含量减去直链淀粉含量算出；蛋白质的测定：半微量凯氏定氮法，GB 5009.5-2010；

脂肪的测定：索氏抽提法，GB/T 5512-2008；还原糖的测定：3,5-二硝基水杨酸(DNS)法。

1.3.7 可溶性淀粉分子量的测定

参照 Hasjim[4]等人的方法，称取 0.1 g 不同发芽阶段的糙米粉(以干基计)分散于 25 mL 蒸馏水中，于 90 ℃水浴中保温 20 min，同时以 250 r/min 的速度进行机械搅拌，取出悬浮液，静止 10 min 以冷却至室温，4000 g 离心 10 min，取上清液，加入 5 倍体积的乙醇沉淀，4000 g 离心 10 min，向沉淀物中加入 2 mL 流动相，沸水浴 20 min，间或振荡以保证充完全溶解，经 0.45 μm 的尼龙微孔膜过滤后，进行高效液相色谱色谱分析。OHpak SB-804 色谱柱和 Sugar KS-802 色谱柱串联，流动相为 0.1 mol/L 的 $NaNO_3$ 和 0.02% NaN_3 的超纯水,流速 1.0 mL/min，柱温 50 ℃，分析时间为 30 min。在上述色谱条件下分析的葡聚糖标准样品用于分子质量标准曲线的制作。

1.3.8 糙米粉淀粉糖含量的测定

准确称取 1 g 的发芽糙米粉加入 10 mL 的去离子水常温高速搅拌 1 h，高速离心处理 3 次，离心参数为：离心力为 10000 r/min，离心时间为 20 min，取上清液，用 HPLC 法进行糖成分的测定。色谱条件：仪器：Waters 600 高效液相色谱仪；色谱柱：Waters Sugar-Pak1（300 mm×7.8 mm）流动相：水；柱温：85 ℃；流速：0.4 mL/min。

1.4 统计方法

采用 Orign 8.5 对实验数据进行图形处理；数据结果以平均值±标准差的形式表示，采用 SPSS 17.0 统计软件分析实验数据，用 Duncan 新复极差法进行显著性分析，$p<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 糙米发芽时间对糙米糕品质的影响

将不同发芽时间的糙米粉做成米糕，以未发芽糙米粉和白米粉制成的米糕为对照，探究糙米发芽时间对糙米糕品质的影响。米糕的全质构数据随贮存天数的变化曲线见表 2，贮存 28 d 后米糕的热力学特性见表 3。

表2 白米、糙米和发芽糙米糕的全质构数据随贮存天数的变化

Table 2 Changes in the TPA parameters of white rice, brown rice, and germinated brown rice cakes with the days of storage

米糕种类	贮存天数/d	硬度/N	弹性	粘聚性	粘性/N	咀嚼性/N	回复值
白米糕	1	4.12±0.82	0.99±0.02	0.96±0.02	3.74±0.28	3.92±0.22	0.389±0.012
	3	21.76±1.75	0.98±0.01	0.78±0.01	15.23±1.02	16.10±0.58	0.394±0.024
	7	44.67±2.01	0.88±0.04	0.69±0.02	32.11±1.23	27.12±3.19	0.391±0.036
	14	67.13±2.48	0.75±0.01	0.58±0.02	48.86±1.64	29.37±1.57	0.375±0.013
	21	82.33±2.54	0.89±0.02	0.62±0.03	51.30±2.75	45.43±3.18	0.321±0.010
	28	94.42±3.12	0.83±0.03	0.73±0.02	67.38±2.87	57.23±4.52	0.388±0.015
糙米糕	1	2.40±0.27	0.98±0.01	0.91±0.04	2.16±0.14	2.12±0.18	0.343±0.006
	3	8.43±0.71	0.92±0.01	0.75±0.03	6.38±0.27	5.91±0.24	0.392±0.020
	7	39.03±0.82	0.87±0.05	0.68±0.04	26.93±1.38	23.83±3.17	0.354±0.052
	14	61.19±0.34	0.76±0.01	0.63±0.01	38.18±1.05	28.99±0.54	0.351±0.009
	21	72.89±4.53	0.84±0.02	0.60±0.01	43.45±3.12	33.77±3.73	0.287±0.012
	28	78.52±3.44	0.99±0.03	0.71±0.02	53.03±3.85	55.05±3.62	0.316±0.020
发芽 1 d 糙米糕	1	1.25±0.11	0.96±0.01	0.96±0.02	1.19±0.10	1.15±0.09	0.254±0.010
	3	4.36±0.86	0.96±0.03	0.72±0.01	3.13±0.44	3.00±0.52	0.289±0.022
	7	24.54±1.75	0.79±0.03	0.61±0.02	14.95±1.57	11.27±2.01	0.278±0.019
	14	43.76±1.01	0.71±0.02	0.57±0.02	24.90±1.33	17.68±1.57	0.269±0.018
	21	55.99±0.59	0.82±0.04	0.64±0.03	35.74±2.19	33.62±4.86	0.325±0.052
	28	60.26±2.48	0.96±0.02	0.75±0.03	42.88±2.87	43.32±4.49	0.345±0.031
发芽 2 d 糙米糕	1	0.97±0.17	0.99±0.01	0.90±0.04	0.88±0.13	0.87±0.14	0.212±0.010
	3	2.97±0.75	0.99±0.01	0.78±0.05	2.28±0.43	2.24±0.45	0.267±0.015
	7	17.23±2.47	0.68±0.10	0.63±0.05	10.85±0.78	7.30±0.66	0.326±0.013

转下页

接上页

	14	30.19±0.59	0.72±0.03	0.54±0.01	16.53±0.87	12.00±0.54	0.245±0.032
	21	37.38±3.21	0.83±0.07	0.64±0.08	31.40±1.02	27.12±.87	0.400±0.038
	28	43.09±2.76	0.91±0.02	0.76±0.04	31.53±2.44	31.26±1.89	0.033±0.023
发芽3 d糙米糕	1	0.73±0.12	0.99±0.06	0.73±0.06	0.56±0.04	0.54±0.02	0.136±0.006
	3	1.04±0.39	0.97±0.04	0.72±0.08	0.76±0.88	0.73±0.10	0.155±0.007
	7	4.72±0.11	0.96±0.01	0.71±0.03	0.91±0.21	0.90±0.27	0.180±0.040
	14	10.33±0.12	0.95±0.07	0.65±0.02	1.20±0.70	1.11±0.76	0.193±0.017
	21	14.24±0.26	0.97±0.03	0.74±0.07	2.57±0.32	2.55±3.93	0.170±0.005
	28	17.49±1.14	0.97±0.03	0.67±0.06	10.57±1.02	11.36±1.18	0.179±0.011
发芽4 d糙米糕	1	-	0.99±0.01	0.78±0.03	-	-	0.087±0.001
	3	0.48±0.11	0.99±0.01	0.85±0.04	0.40±0.07	0.40±0.12	0.082±0.006
	7	0.77±0.14	0.99±0.01	0.82±0.03	0.56±0.12	0.56±0.20	0.102±0.007
	14	1.52±0.23	0.84±0.05	0.66±0.05	0.87±0.78	0.73±0.25	0.153±0.005
	21	2.55±0.59	0.84±0.04	0.64±0.03	1.82±0.53	1.75±0.11	0.226±0.029
	28	3.03±1.07	0.93±0.02	0.77±0.02	2.31±0.67	2.35±0.15	0.198±0.021

表3 发芽糙米糕贮存28d后的热力学性质

Table 3 Thermodynamic properties of the germinated brown rice cakes after being stored for 28 d

发芽天数/d	T_o/℃	T_p/℃	T_c/℃	ΔH/(J/g)
0	55.24±0.47	66.28±0.41	71.43±0.31	3.75±1.25^b
1	54.10±0.19	64.79±0.52	68.68±0.97	2.93±0.92^b
2	55.74±0.72	65.40±0.52	69.28±0.65	2.11±0.33^b
3	58.73±0.09	68.87±0.91	70.87±0.82	1.38±0.19^a
4	57.57±0.31	69.99±0.82	71.13±0.76	0.72±0.08^a

表4 不同发芽阶段糙米糕的感官评定结果

Table 4 Sensory evaluation results of brown rice cakes at different germination stages

感官指标	分值	发芽天数/d				
		0	1	2	3	4
硬度	25	10.75±0.75	15.43±0.81	16.47±0.54	21.23±0.65	19.76±0.68
风味	15	9.29±0.42	10.22±0.36	11.34±0.23	12.19±0.45	12.97±0.59
滋味	15	9.71±0.54	10.14±0.57	13.48±0.49	12.34±0.21	10.54±0.51
粘性	15	8.69±0.38	9.27±0.30	11.29±0.41	11.98±0.93	10.25±0.59
颜色	10	9.02±0.76	8.84±0.95	8.72±0.82	8.51±0.76	7.84±0.82
咀嚼性	10	5.12±0.28	8.92±0.59	9.42±0.74	8.47±0.93	7.62±0.84
组织结构	10	5.48±0.22	7.87±0.49	8.24±0.77	8.95±0.67	7.91±0.58
总分	100	58.06±3.41	70.69±3.07	78.96±2.97	83.67±3.49	76.89±3.17

从表2可以看出，随着贮存时间的延长，米糕的硬度、粘性和咀嚼性都在不断增加，食用品质在不断的变差，而弹性、粘聚性和回复值在一定范围内波动。米糕在储存中发生淀粉老化回生，随着淀粉分子重新排列，糊化后的淀粉结构被破坏，限制淀粉链之间相互作用，坚实性和强度增加，表现为硬度、粘性和咀嚼性显著增大[5]。然而糙米糕与传统白米糕相比，硬度较小且上升缓慢，说明糙米糕比白米糕更不易回生。在各贮藏阶段，米糕的硬度均随发芽时间的延长而显著降低，表明发芽处理能有效抑制糙米制品的老化。

而从表3可以看出：融化支链淀粉重结晶所需的热焓ΔH 随发芽时间的延长逐渐减小，由发芽 0 d 的 3.75 J/g 减小到 4 d 的 0.72 J/g，表明支链淀粉重结晶含量，即回生程度减小。热焓数据跟质构硬度的数据相对应，进一步证明糙米发芽时间越长，所制米糕抗老化的能力越好。

由表4感官评定结果可知，适度发芽时间的糙米糕具有特殊的香气、滋味和较好的咀嚼性。虽然糙米

发芽天数越长，米糕的抗老化能力越好，但并不是选择发芽时间越长的糙米制成的米糕品质越好。发芽 4 d 的糙米糕虽不易回生，但粘弹性差、有苦味与口感不佳。综合考虑，选择发芽 2~3 d 的发芽糙米粉或者将不同发芽天数的糙米粉复配添加到米糕中较合适。

2.2 不同发芽天数的糙米粉混配对糙米糕品质的影响

为了进一步探索发芽糙米粉对米糕老化的影响，将不同发芽阶段的糙米粉按不同比例进行混配后制成糙米糕，其贮存 28 d 后的硬度和热力学特性分别见表 5 与表 6。

表5 不同阶段不同比例糙米混合后的糙米糕硬度/N

Table 5 Hardness of germinated brown rice cakes prepared from the brown rice samples at different germination stages with different blending ratios

	1:1	1:2	2:1
①+②	41.56±4.50	36.13±3.34	33.83±2.12
①+③	37.31±1.65	31.30±3.42	33.28±3.67
①+④	27.01±2.93	29.05±1.99	35.20±2.10
②+③	29.31±3.66	25.73±3.36	41.91±2.04
②+④	31.38±3.34	30.36±3.12	39.91±3.90
③+④	28.74±3.78	24.62±3.51	28.90±2.24

注：分别以（①②③④）表示不同发芽时间(24、48、72、96 h)的糙米粉，下同；1:1 代表发芽糙米 1、发芽糙米 2 各占 1/2；1:2 代表发芽糙米 1 占 1/3，发芽糙米 2 占 2/3；2:1 代表发芽糙米 1 占 2/3，发芽糙米 2 占 1/3。

从表 5 可以看出，混配糙米粉制成的米糕的硬度比相应单一发芽糙米粉制作的米糕的硬度小，说明混配发芽糙米粉的抗回生效果更好。混配米糕的硬度也不是按发芽时间较短的糙米粉的比例增大而逐渐增大的，回生度与混合比例之间无明显规律性变化趋势。发芽 3 d 和发芽 4 d 的糙米粉按 1:2 复配所得制品放置 28 d 后的硬度最小，发芽 2 d 和发芽 3 d 的糙米粉按 1:2 复配所得制品放置 28 d 后的硬度次之。但根据 2.1 不同发芽阶段纯糙米糕感官和质构测试结果可知，发芽时间大于 3 d 的糙米粉做成的米糕粘弹性和色泽较差，且有苦味，因此综合考虑选择发芽 2 d 和发芽 3 d 的 1:2 做成米糕比较合理。

从表 6 同样可以看出，不同发芽阶段的发芽糙米粉按不同比例混合制成的米糕的回生焓值数据的变化趋势与硬度数据的变化趋势基本一致的，去掉发芽 3 d 和发芽 4 d 的 1:2 组合，发芽 2 d 和发芽 3 d 的 1:2 组合做成的米糕回生度最小。

表6 不同阶段不同比例糙米混合后的糙米糕放置28 d的回生焓ΔH/(J/g)

Table 6 ΔH (on day 28 of storage) of the germinated brown rice cakes prepared from the brown rice samples at different germination stages with different blending ratios

	1:1	1:2	2:1
①+②	2.75±0.30	2.48±0.21	2.02±0.33
①+③	2.06±0.29	1.38±0.32	1.47±0.27
①+④	0.85±0.11	0.87±0.29	1.28±0.32
②+③	0.78±0.24	0.62±0.18	1.26±0.20
②+④	1.04±0.17	0.86±0.35	1.18±0.16
③+④	0.75±0.23	0.37±0.26	0.85±0.18

2.3 发芽糙米抑制米糕老化的机理初探

为了进一步分析不同发芽糙米粉的抗老化特性，探究不同发芽时间糙米粉按一定比例混配后表现出的上述特殊抗老化现象的机理，本研究对不同发芽时间糙米的主要成分变化进行了分析，结果见表 7。

表7 不同发芽时间的糙米的主要成分（%，干基）

Table 7 Main composition of brown rice from different germination stages

发芽天数/d	总淀粉总量	直链淀粉含量	支链淀粉含量	粗蛋白含量	粗脂肪含量	还原糖含量
0	77.26±1.47^{a}	4.08±0.25^{d}	73.18±1.41^{a}	11.5±0.06^{d}	2.78±0.25^{c}	0.98±0.25^{d}
1	72.43±1.19^{b}	3.76±0.09^{c}	68.67±1.52^{b}	11.9±0.08^{c}	2.56±0.32^{d}	2.92±0.32^{c}
2	65.74±1.72^{c}	3.43±0.13^{c}	62.31±1.27^{c}	11.6±0.07^{d}	2.28±0.13^{e}	5.19±0.13^{c}
3	56.53±1.49^{d}	2.94±0.17^{b}	53.59±0.91^{d}	12.3±0.07^{b}	2.81±0.09^{b}	6.72±0.09^{b}
4	46.77±1.31^{e}	2.56±0.13^{a}	44.21±0.82^{e}	12.6±0.14^{a}	3.31±0.01^{a}	8.22±0.11^{a}

注：表中不同的字母表示两组数据差异显著(p<0.05)，下同。

从表 7 可以看出，随着发芽时间的延长，糙米总淀粉、直链淀粉和支链淀粉含量显著降低(p<0.05)，总淀粉含量从 77.26%下降到 46.77%，而还原糖含量从 0.98%上升到 8.22%。蛋白质的含量在发芽初期变化不明显，后期略有增加。关于蛋白质在发芽过程中的变化，不同的报道得出的结果差异较大[6]。脂肪的含量在发芽 0~2 d 随发芽时间的延长逐渐降低，之后逐渐增加。研究表明，糙米在发芽过程中，蛋白质和

脂肪在酶的作用下发生降解[6]，但淀粉含量的快速降低及干物质损失导致总固形物含量降低可能是蛋白质和脂肪含量在发芽后期反而有所增加的主要原因[7]。

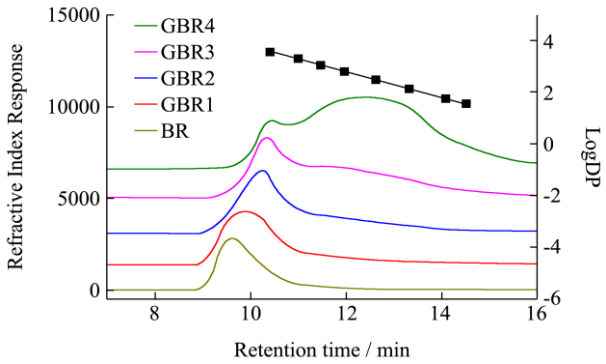


图1 发芽对糙米可溶性淀粉分子量的影响

Fig.1 Effect of germination on the molecular weight of brown-rice soluble starch

不同发芽阶段糙米的可溶性淀粉分子量分布如图1所示，糙米发芽从0~4 d，可溶性淀粉峰值DP由2.8下降到1.1，峰值分子量由10^6下降到2×10^3。该结果进一步证实了糙米发芽过程中淀粉不断降解，大分子物质含量不断减少，糊精和糖等较低分子量的成分的含量逐渐增加。徐杰等人[8]也指出糙米经发芽后总淀粉和直链淀粉含量都有明显的减小，支链淀粉中的短链含量减小而长链增加，从而抑制了淀粉的回生。而小糖分子可以阻止淀粉糊储存过程中的老化进程[9]。如表8所示，大部分淀粉糖的含量随发芽时间的延长逐渐增加；尤其是发芽2~3 d，小分子糖含量增幅最大。而发芽后期葡萄糖含量的减少主要是由于糙米发芽时的呼吸作用所消耗。根据报道，小分子糖含量的增加会有效地抑制淀粉及高淀粉食品的老化回生[9]。Smits[10]等人研究表明等糖质量分数的小麦淀粉胶分别添加葡萄糖，麦芽糖，麦芽三糖至麦芽六糖，其中麦芽三糖与四糖延缓淀粉回生效果最好，葡萄糖效果最弱。Katsuta[11]等人的研究表明小分子糖类抑制回生的有效顺序是：麦芽三糖>麦芽糖>蔗糖>葡萄糖>果糖>木糖、核糖>纯淀粉。小分子糖抑制淀粉回生的机理主要由于这些小分子糖容易游离出淀粉与蛋白质分子间的空间或淀粉与淀粉分子间的空间，导致它们两者之间的交联作用不易发生，从而抑制老化[4]。糊精的抗老化机制国内外研究报道的比较少，Miyazaki[12]等人认为糊精干扰了淀粉和蛋白质之间的氢键的形成，从而抑制老化。

表8 发芽对糙米中淀粉糖含量的影响(mg/g)

Table 8 Effect of germination on the starch and sugar content of brown rice

发芽时间/d	果糖	葡萄糖	麦芽糖	麦芽三糖	麦芽四糖	麦芽五糖
0	5.39±0.37	35.55±2.78	15.93±1.24	1.55±0.07	2.73±1.12	2.07±0.21
1	6.13±0.48	56.39±4.54	20.67±2.63	1.70±0.13	2.86±1.43	2.10±0.33
2	8.94±0.86	63.97±6.87	45.08±5.09	7.17±0.83	3.50±1.07	6.16±0.69
3	10.81±1.07	34.56±3.86	117.00±11.81	15.45±1.22	13.39±2.35	12.63±1.25
4	12.75±1.23	29.73±4.76	139.28±9.80	19.54±1.54	14.58±1.95	18.36±1.94

综上所述，发芽糙米抗老化作用的主要是由于糙米在发芽过程中淀粉、蛋白质和脂肪等发生了一系列了变化，使其组分更有利于抑制淀粉回生。混配后表现出的特殊抗老化现象表明了米糕的回生程度并不单纯同淀粉降解相关，发芽过程中其它成分如蛋白质与脂肪的不规律变化，不同发芽时间糙米中各组分之间的交互作用等都可能影响最终产品的回生速率。如Dhinda F等人[13]认为外源蛋白质能与直链淀粉分子形成氢键致使淀粉分子被束缚，从而抑制直链淀粉的回生，所以蛋白质的含量与淀粉的回生也有很大的关系。此外，脂肪及其降解产物单甘脂等能够抑制淀粉的回生，其抗回生机制是疏水性端插入直链淀粉螺旋内部，与直链淀粉分子形成螺旋复合物，从而影响淀粉的重结晶[14]。要阐明发芽处理延缓糙米糕老化的机制还需要通过大量实验进一步研究混配发芽糙米粉的组分特性及各组分的交互作用对米糕老化的影响规律。

3 结论

本论文对比不同发芽时间的糙米粉制备糙米糕的老化特性，表明发芽处理具有显著的抑制米糕老化的作用($p<0.05$)。通过将不同发芽时间的糙米粉按不同比例混配后制备米糕测老化程度，发现并不遵守“发芽时间长的糙米粉高比例同发芽时间短的糙米粉混合时的老化速率低于发芽时间长的糙米粉低比例同发芽时间短的糙米粉混合时的老化速率”这样一种规律，不同发芽时间的糙米粉按适当比例混配能进一步增加米糕的抗老化效果。不同配粉试验结果显示发芽2 d和发芽3 d的糙米粉按1:2混配时抗老化效果最佳，且感官最佳。糙米发芽后淀粉的降解导致其总淀粉、直链和支链淀粉含量的降低以及糊精和小分子糖含量的增加是发芽处理延缓米糕老化的重要原因。此外，不同发芽时间糙米粉混配后表现出的特殊抗老化现象还表

明，其它成分如蛋白质和脂肪含量的变化及各组分的交互作用都可能影响米糕的老化速率。本研究为应用发芽技术延缓传统米制品老化提供了指导。

参考文献

[1] Grewal N, Faubion J, Feng G, et al. Structure of waxy maize starch hydrolyzed by maltogenic *α*-amylase in relation to its staling [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015

[2] 白亚丁.高水分米糕的抗老化研究[D].无锡:江南大学,2009
BAI Ya-ding. The study on the anti-staling of high-moisture Migao [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009

[3] 吴凤凤.发芽对糙米主要营养成分、生理功效和加工特性的影响[D].无锡:江南大学,2013
WU Feng-feng. Effect of germination on nutritional components, physiological functions and processing characteristics of brown rice [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013

[4] HasjimJ, Li E, DhitalS. Milling of rice grains: The roles of starch structures in the solubility and swelling properties of riceflour [J]. Starch-Starke, 2012, 64(8): 631-645

[5] 周颖.不同种类糯米糕老化特性研究[D].无锡:江南大学,2013
ZHOU Ying. Study on the retrogration of various glutinous rice cakes [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013

[6] Ayernor G S, Ocloo F C K. Physico-chemical changes and diastatic activity associated with germinating paddy rice (PSB. Rc 34) [J]. African Journal of Food Science, 2007, 1: 37-41

[7] Moongngarm A, Saetung N. Comparison of chemical compositions and bioactive compounds of germinated rough rice and brown rice [J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 782-788

[8] 徐杰.发芽糙米淀粉和蛋白的研究及方便米饭的制备[D].无锡:江南大学,2012
XU Jie. Study on starch and protein of germinated brown rice and preparation of its instant rice [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012

[9] Monnet D, Joly C, Dole P, et al. Enhanced mechanical properties of partially beta-amylase trimmed starch for material applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 80: 747-752

[10] Smits A L M, Kruiskamp P H, Van Soest J J G., et al. Theinfluenceof various small plasticisers and malto-oligosaccharides on the retrogradation of (partly) gelatinised starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 51: 417-424

[11] Katsuta K, Miura M, Nishimura A. Kinetic treatment for rheological properties and effects ofsaccharides on retrogradation of rice starch gels [J]. Food Hydrocolloids, 1992, 6(2): 187-198

[12] Miyazaki M, Maeda T and Morita N. Effect of various dextrin substitutions for wheat flour on dough properties and bread qualities [J]. Food Research International, 2004, 37: 59-65

[13] Dhinda F, Lakshmi J A, Prakash J, et al. Effect of ingredients on rheological, nutritional and quality characteristics of high protein, high fibre and low carbohydrate bread [J]. Food Bioprocess Technol., 2012, 5: 2998-3006

[14] Tang M C, Copeland L. Investigation of starch retrogradation using atomic force microscopy [J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 70: 1-7