

糙米重组米的回生特性

沈汪洋^{1,2}, 晏梦婷¹, 孙威¹, 陈轩¹, 高虹³, 赵永武⁴, 周坚^{1,2}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北 武汉 430023; 2. 农产品加工湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430023;
3. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北 武汉 430064; 4. 武汉中粮食品科技有限公司, 湖北 武汉 430415)

摘要: 采用差示扫描量热仪和质构仪研究了糙米重组米的Avrami方程及硬度, 探讨了糙米重组米的回生特性。结果表明: 糙米重组米的Avrami参数 n 值均小于1, 以一次成核的方式结晶; 糙米重组米淀粉中的直链淀粉含量对Avrami参数 n 有非常显著的影响, 对支链淀粉的最大回生度没有显著的影响; 参数 n 和结晶速率 k 之间成极显著负相关; 最大回生度与结晶速率 k 成显著负相关; 硬度可以有效地反映出糙米重组米的回生程度。

关键词: 重组米; 直链淀粉; Avrami方程; 硬度

Retrogradation Properties of Restructured Brown Rice

SHEN Wangyang^{1,2}, YAN Mengting¹, SUN Wei¹, CHEN Xuan¹, GAO Hong³, ZHAO Yongwu⁴, ZHOU Jian^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;
2. Hubei Collaborative Innovation Center for Processing of Agricultural Products, Wuhan 430023, China;
3. Institute of Processing of Agricultural Produce and Nuclear Agricultural Research, Hubei Academy of Agricultural Science, Wuhan 430064, China; 4. COFCO Food Science Technology (Wuhan) Co. Ltd., Wuhan 430415, China)

Abstract: The Avrami equation (describing the transformation kinetics in crystallization and solid state phase transition) and the hardness of restructured brown rice were investigated by DSC and texture analyzer in the present study. Its retrogradation properties were also explored. The results showed that the exponent n in the Avrami equation was less than 1. The crystallization was based on one-step nucleation. The amylose content significantly affected the Avrami parameter n , while there was no significant difference between maximum retrogradation degree of amylopectin and amylose content. At the same time, significantly negative correlation was observed between the parameter n and the crystal growth rate k . The maximum degree of retrogradation and the crystal growth rate k were significantly negatively correlated with each other. The hardness of cooked restructured brown rice showed its retrogradation degree.

Key words: restructuring brown rice; amylose; Avrami equation; hardness

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201609012

中图分类号: TS245

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2016) 09-0061-05

引文格式:

沈汪洋, 晏梦婷, 孙威, 等. 糙米重组米的回生特性[J]. 食品科学, 2016, 37(9): 61-65. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201609012. <http://www.spkx.net.cn>

SHEN Wangyang, YAN Mengting, SUN Wei, et al. Retrogradation properties of restructured brown rice[J]. Food Science, 2016, 37(9): 61-65. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201609012. <http://www.spkx.net.cn>

回生也叫 β 化、老化^[1], 是淀粉分子从无序到有序的重新排列过程。回生过程中, 淀粉的结构和性质发生变化^[2], 可能会导致淀粉结晶、变硬、抗酸解能力提高、黏度减小、组织凝集、水分下降、冻融稳定性下降等一系列现象^[3]的发生, 从理论上研究揭示淀粉回升过程中这些变化产生的原因及其对食品物性带来的影响, 有助于更加深入、合理、有效地利用淀粉食品, 产生更大的社会

经济效益, 具有十分重要的现实意义^[4]。差示扫描量热(differential scanning calorimetry, DSC)分析方法广泛用于食品行业中, 是一种研究淀粉食品结构和性质简单而有效的手段, 主要应用于淀粉热力学性质的测定; 质构仪(texture analyser, TA)通过准确测定样品随时间变化的位置和质量从而得出样品的物性特征。质构仪精度高、性能稳定, 是一种常用的食品研究方法。

收稿日期: 2015-07-26

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD37B03); 公益性行业(农业)科研专项(201303080)

作者简介: 沈汪洋(1978—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品资源开发及利用。E-mail: whwangyangshen@126.com

糙米是稻谷脱去稻壳之后的全谷粒。其富含多种营养物质,包括膳食纤维、矿物质微量元素和维生素等,从营养学的角度来看,糙米的营养价值明显高于精制大米。但由于糙米表面还含有部分的皮层,导致糙米吸水性和膨胀性较差,用糙米煮饭,时间长、颜色深、口感差。糙米重组米是以糙米为原料,将糙米粉碎后,经复配挤压等工艺,生产制造的一种重组米。其外形类似普通大米,重组米的优点在于既保留了糙米的部分营养物质,又具有较好的口感。在挤压过程中,糙米原有淀粉被限制性的糊化,其淀粉结构发生部分改变,从而使糙米重组米的回生特性发生了显著的变化。

近年来,重组米的性质研究成为热点,张颖等^[5]完成了营养重组米的研制;刘菊芬等^[6]研究了不同添加剂对速煮重组米品质的影响;张志清等^[7]完成了工程重组米质构测定与感官评价相关分析。庄海宁等^[8]研究了挤压加工参数对重组米生产过程及产品膨胀度的影响;熊善波等^[9]应用模糊数学综合评价了工程重组米的品质改良;王会然^[10]研究了挤压重组米品质特性;王鹏等^[11]研究了稳定化米糠对营养重组米回生动力学的影响;郑广钊等^[12-13]研究了L- α -磷脂酰胆碱含量对挤压重组米回生动力学影响和挤压加工参数对重组米崩解值的影响。

目前对于糙米重组米的品质特性研究,主要集中在其糊化方面^[14],糊化度影响重组米的蒸煮特性与米饭口感,而对其回生特性研究未见报道。糙米重组米在制备的冷却过程中,经历了第一次回生。在蒸煮成为米饭之后的冷却过程中,经历第二次回生。糙米重组米的回生度是重组米的重要品质特性和指标。因此,对糙米重组米的二次回生特性进行了研究。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

“燕之坊”品牌糙米 2014年9月购于武汉市常青花园武商量贩店。

直链淀粉含量检测试剂盒 爱尔兰Megazyme公司;二甲基亚砜(dimethyl sulfoxide, DMSO)、叠氮化钠成都西亚试剂有限公司;冰醋酸、无水醋酸钠、氯化钠、氯化镁、95%乙醇 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

DS32-II双螺杆挤压膨化机 济南赛信机械有限公司;Q-10型差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter, DSC) 美国TA仪器公司;TA.XT Plus物性测试仪 英国Stable Micro Systems公司;STARTER3100实验室pH计 奥豪斯仪器(上海)有限公司;QL-861漩涡混合器 海门市其林贝尔仪器制造有限公司;TDZ5-WS医用离心机 长沙平凡仪器仪表

有限公司;TG16-WS台式高速离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;MS105DU十万分之一分析天平梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;UV-1800紫外-可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司;cfxb80-450电饭煲 广东半球实业集团公司。

1.3 方法

1.3.1 糙米重组米的制备

糙米重组米的制备流程:糙米原料→除杂→粉碎→复配→挤压成型(工艺参数见表1)→冷却→糙米重组米。

表1 样品的挤压工艺操作参数

Table 1 Extrusion processing parameters for restructuring brown rice

样品	螺杆转速/(r/min)	套筒温度/℃	物料含水量/%	喂料速率/(r/min)
重组米1	340	60、90、85	30	300
重组米2	300	60、70、90	35	300
重组米3	300	60、80、90	36	300
重组米4	300	60、85、90	35	300
重组米5	300	60、75、90	35	300
重组米6	300	60、75、95	35	300
重组米7	300	60、85、100	35	300
重组米8	240	60、90、85	42	300
重组米9	240	60、90、90	44	300

1.3.2 糊化度的测定

采用经典酶法测糊化度^[14-15]。

1.3.3 直链淀粉含量的测定

根据Megazyme试剂盒提供方法进行直链淀粉含量的测定。称量20~25 mg脱脂样品于10 mL离心管,加入1 mL DMSO,漩涡混合器振荡,离心管置于沸水浴中1 min左右,确保没有凝胶状的淀粉块。漩涡混合器振荡混合离心管,并在沸水浴中间歇加热15 min,室温静置5 min,添加2 mL体积分数95%乙醇,振荡,再添加4 mL无水乙醇,离心管直立静置15 min。离心2 000 r/min,5 min,去除上清液,确保抽干所有乙醇,向离心管中加入2 mL DMSO,沸水浴中振荡15 min,立即添加4 mL的反溶剂(试剂盒自带),混合均匀,用反溶剂定容于25 mL容量瓶,得到试剂A。移取1 mL试剂A于3 mL离心管,添加0.05 mL半刀豆蛋白,混合均匀,室温直立静置1 h,14 000 r/min离心10 min,转移1 mL上清液于15 mL离心管,添加3 mL pH 4.5的醋酸钠缓冲溶液,混合,沸水浴5 min,使拌刀豆蛋白变性,离心管置于40 ℃水浴平衡5 min,加入0.1 mL淀粉葡萄糖苷酶,40 ℃水浴30 min,2 000 r/min离心5 min,移取1 mL上清液于10 mL离心管,添加4 mL葡萄糖测试试剂,40 ℃水浴20 min,在510 nm波长处测吸光度 A_{510} 。

总淀粉含量的测定:移取0.5 mL试剂A于10 mL离心管,添加4 mL pH 4.5的醋酸钠缓冲溶液,再加入0.1 mL淀粉葡萄糖苷酶,40 ℃水浴10 min,吸取1 mL置于玻璃试管中,添加4 mL葡萄糖测试试剂,40 ℃水浴20 min,

在510 nm波长处测吸光度 A 。空白试剂是添加1 mL的醋酸钠缓冲溶液, 4 mL葡萄糖测试试剂, 40 °C水浴20 min。直链淀粉含量计算公式如下。

$$\text{直链淀粉含量}/\% = \frac{A_1}{A} \times 66.8 \times 100 \quad (1)$$

1.3.4 差示扫描量热仪测定糊化和回生方法

分别称取糙米粉和9种糙米重组米米粉各3.0 mg于铝制坩埚中, 样品中加入去离子水, 制成质量浓度50 g/100 mL的溶液, 密封保存过夜, 用差示扫描量热仪进行糊化特性测定。扫描温度范围为20~100 °C, 然后从100 °C冷却至20 °C, 降温速率为10 °C/min, 保护气体为氮气, 流速20 mL/min。测定后的样品, 冷却至常温后于4 °C条件下冷藏1、3、5、7、14 d, 重新用差示扫描量热仪进行回生特性测定, 测定条件与糊化测试条件相同^[16], 回生度计算公式如下。

$$\text{回生度} = \frac{\text{结晶融化热焓}}{\text{原淀粉糊化热焓}} \quad (2)$$

1.3.5 硬度测定

采用物性仪对蒸煮后的糙米和糙米重组米进行硬度测定, 糙米与水按1:1 (m/V) 比例混合置于电饭煲中蒸煮30 min, 重组米与水按照同样的比例蒸煮8 min。取样: 在蒸煮样品中间层的不同部位随机取3粒米, 对称放置在物性仪的载物台上进行测定, 每组样品平行测定6次, 去掉硬度最大和最小的两个测定结果, 取4次测定结果, 计算平均值。测定条件如下: P/45C探头, 测前速率: 2 mm/s, 测中速率: 1.00 mm/s, 测后速率: 1.00 mm/s, 触发力值5.0 g, 压缩比例50%, 两次压缩时间5.00 s。

1.3.6 回生动力学模型的测定

淀粉糊化后, 在其回生(冷却与贮存)过程中, 直链淀粉分子快速凝聚并结晶。支链淀粉分子则在回生过程中以较慢速度凝聚并结晶, 结晶度随着时间的延续而不断增加。最后趋于该结晶条件下的极限结晶度。在结晶体系中, 晶体生长是多维的, 其生长动力学和生长维数及成核方式有关。一般以Avrami模型来描述及预测淀粉回生结晶动力学特征。Avrami方程基本模型见下式^[17]。

$$V = 1 - \exp(-kt^n) \quad (3)$$

式中: V 为在 t 时间时, 淀粉结晶量所占极限结晶总量的分率; k 为结晶速率常数, 与晶核密度及晶体一维生长速率有关; n 为Avrami指数。当 $n \leq 1$ 时, 对应在一维、二维及三维结晶生长方式中, 成核方式为瞬间成核(或称一次成核, 不依热成核); 当 $n \leq 2$ 时, 则对应自发成核(或称不断成核, 依热成核)。对于 V , 不同的回生结晶测定方法有各自的表征方式^[18]。在DSC测试中, 淀粉的回生结晶量由回生焓 ΔH 表示, 因此 V 可表示为:

$$V = \frac{\Delta H_t - \Delta H_0}{\Delta H_\infty - \Delta H_0} \quad (4)$$

式中: ΔH_0 和 ΔH_t 分别为时间为0和 t 时刻的回生热焓值; ΔH_∞ 为回生焓极限值, 由淀粉回生一定时间后的回生焓值表示^[19]。一般地, $\Delta H_0 = 0$, 则式(4)可表示为:

$$V = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty} \quad (5)$$

由式(3)、(4)、(5), 并做对数处理最终得到:

$$\ln[-\ln(1 - \frac{\Delta H_t}{\Delta H_\infty})] = \ln k + n \ln t \quad (6)$$

因此, 将不同时间段的淀粉结晶融化热焓代入式(6), 计算出各 t 时刻的 $\ln[-\ln(1 - \Delta H_t/\Delta H_\infty)]$ 后, 对 $\ln t$ 进行线性回归, 即可得到速率常数 k 与Avrami指数 n 。

1.4 数据分析

采用SPSS 17.0软件进行相关性分析和显著性分析。

2 结果与分析

2.1 糙米和糙米重组米的糊化度

表2 糙米和糙米重组米的糊化度

指标	糙米	重组米1	重组米2	重组米3	重组米4	重组米5	重组米6	重组米7	重组米8	重组米9
糊化度/%	23.56	64.37	71.81	75.46	78.90	82.27	84.84	86.6	93.61	98.40

由表2可知, 糙米经过挤压重组后, 糊化度明显升高。由于每种重组米的挤压制备工艺参数不同, 因此, 其糊化度也不同^[14]。

2.2 糊化度对回生动力学的影响

表3 DSC测定样品糊化热焓值 ΔH 和回生热焓值 ΔH

Table 3 Gelatinization enthalpy value ΔH and retrogradation enthalpy value ΔH of samples measured by DSC

指标	糙米	重组米1	重组米2	重组米3	重组米4	重组米5	重组米6	重组米7	重组米8	重组米9
糊化热焓/(J/g)	4.441	1.764	1.578	1.453	1.270	1.732	1.328	1.134	1.810	1.293
回生热焓/(J/g)	1 d	0.829 3	0.185 7	0.239 0	0.126 6	0.177 8	0.170 8	0.439 4	0.283 4	0.159 5
	3 d	0.988 9	0.316 0	0.490 0	0.473 8	0.456 6	0.335 0	0.625 5	0.480 4	0.308 7
	5 d	1.107 8	0.355 8	0.650 9	0.629 2	0.489 6	0.372 7	0.739 4	0.515 0	0.348 5
	7 d	1.293 4	0.463 6	0.704 9	0.848 8	0.681 4	0.503 4	0.852 1	0.633 8	0.410 2
	14 d	2.156 0	0.714 0	1.831 0	2.091 0	2.353 0	2.330 0	2.527 0	1.659 0	1.215 0

由表3可知, 糙米和糙米重组米在回生1、3、5、7 d时热焓值增长速率较为缓慢, 在14 d时热焓增加速率略有增加, 结晶速率加快。表3反映随着贮存时间的延长, 热焓值随之增加。热焓值高的淀粉结晶结构或分子秩序极强。随着贮存时间的延长, 结晶量在3~7 d内增长较为稳定, 7 d以后增长速率加快, 其他学者的研究也证实了该现象^[20-22]。

由表4可知, 糙米和大部分糙米重组米的Avrami参数 n 值均小于1, 说明是以一次成核的方式结晶。仅有重组米3的Avrami参数 n 值为1.081 7, 大于1, 表明它是偶然成

核和瞬间成核共同作用的成核方式。有研究人员采用两相理论,以假设固(晶体)液两相的浓度保持不变的条件下研究了晶体结晶,但是实际的淀粉回生过程会使液相中的淀粉浓度降低,进而解释了出现 n 大于1的现象^[23]。糙米的晶体结晶速率 k 最高,糙米重组米5的晶体结晶速率 k 最低。说明糙米经过挤压后,回生受到抑制。并且糙米重组米晶体的结晶速率 k 随着糊化度的升高而降低,但在糊化度达到82.27%时,晶体的结晶速率 k 又有所回升,这是由于在糊化度较低时,淀粉完全熔融的状态未形成,从而导致不仅淀粉粒的膨胀受到抑制,而且淀粉粒之间的相互连接也受到阻止^[23]。

表4 不同糊化度的糙米重组米Avrami回生动力学模型
Table 4 Avrami retrogradation dynamical models for restructured brown rice with deferent gelatinization degrees

样品	Avrami方程	R^2	n	$\ln k$	k
糙米	$y=0.303\ 3x-1.502\ 0$	0.930 3	0.303 3	-0.691 9	0.500 6
重组米1	$y=0.577\ 4x-0.884\ 7$	0.980 3	0.577 4	-0.884 7	0.412 8
重组米2	$y=0.735\ 5x-0.998\ 6$	0.992 4	0.735 5	-0.998 6	0.368 4
重组米3	$y=1.081\ 7x-1.081\ 7$	0.986 0	1.081 7	-1.081 7	0.339 0
重组米4	$y=0.724\ 0x-1.445\ 3$	0.961 2	0.724 0	-1.445 3	0.235 7
重组米5	$y=0.568\ 3x-1.474\ 3$	0.975 6	0.568 3	-1.474 3	0.228 9
重组米6	$y=0.387\ 0x-1.085\ 7$	0.996 0	0.387 0	-1.085 7	0.337 7
重组米7	$y=0.463\ 3x-1.081\ 6$	0.973 6	0.463 3	-1.081 6	0.339 1
重组米8	$y=0.545\ 6x-1.198\ 1$	0.980 3	0.545 6	-1.198 1	0.301 8
重组米9	$y=0.483\ 6x-1.105\ 7$	0.995 4	0.483 6	-1.105 7	0.331 0

2.3 直链淀粉含量与回生特性的相关性分析

为考察直链淀粉含量对回生的影响,利用SPSS软件对直链淀粉含量和Avrami参数 n 以及结晶速率 k 和最大回生度(14 d时)进行相关性分析,其结果见表5。糙米重组米直链淀粉含量与Avrami参数 n 成极显著正相关性,说明直链淀粉含量对于支链淀粉的结晶有着显著影响,它可以影响支链淀粉的成核方式。直链淀粉含量越高, n 值越大, k 值越小,说明支链淀粉结晶成核和生长速率较小;直链淀粉含量对支链淀粉的最大回生度没有显著的影响,说明直链淀粉含量并不能影响支链的最终结晶程度;直链淀粉在冷却和贮藏中并没有形成结晶,直链淀粉不是以晶种的形式影响支链淀粉的结晶,而是参与了支链淀粉的成核和结晶^[24]。糙米重组米淀粉回生的特征值参数 n 和结晶速率 k 之间存在着非常显著的负相关,说明晶核形成得越慢,越分散(n 越大),晶体结晶速率越小(k 越小)。糙米重组米最大回生度与晶体结晶速率 k 有显著的负相关,说明结晶速率越慢,最大回生度越高。

表5 直链淀粉含量与Avrami参数间的双变量相关性分析
Table 5 Correlation analysis of amylose content and Avrami equation parameters

指标	直链淀粉含量	n	k	最大回生度
直链淀粉含量	1			
n	0.785**	1		
k	-0.595	-0.899**	1	
最大回生度	0.328	0.549	-0.652*	1

注:*. 0.05 水平上差异显著(双尾 t -检验);**.0.01 水平上差异极显著(双尾 t -检验)。下同。

2.4 糙米和糙米重组米米饭的硬度

糙米米饭和不同糊化度的糙米重组米米饭在4℃放置1、3、5、7、14 d的硬度的测定结果见表6。糙米米饭的硬度显著高于糙米重组米米饭的硬度。糙米重组米米饭的硬度随着糊化度的增加而增加。且糙米重组米米饭放置1、3、5、7 d的回生速率基本一致,在14 d回生速率最快。当存放时间为7~14 d时,糙米重组米米饭基本达到自身的最大回生度。

表6 糙米和不同糊化度的糙米重组米米饭硬度
Table 6 Hardness of cooked samples of brown rice and restructured brown rice with deferent gelatinization degrees

样品	1 d	3 d	5 d	7 d	14 d
糙米	3 920.90±41.13	4 045.81±43.56	4 053.53±56.27	4 060.41±45.34	4 072.38±48.70
重组米1	1 123.13±50.23	1 152.41±45.65	1 156.36±50.37	1 161.25±46.89	1 172.63±49.29
重组米2	1 387.18±45.90	1 412.47±46.23	1 425.81±46.90	1 430.43±46.66	1 452.73±48.53
重组米3	1 690.19±44.87	1 694.14±48.23	1 702.31±48.94	1 707.60±49.35	1 728.72±46.98
重组米4	1 912.54±43.33	1 918.42±48.92	1 921.44±47.32	1 930.28±46.66	1 952.58±49.24
重组米5	2 045.46±47.87	2 053.28±49.53	2 055.25±49.03	2 061.83±47.78	2 085.36±48.37
重组米6	2 138.82±43.76	2 142.91±50.02	2 146.13±49.24	2 149.32±42.43	2 168.71±55.25
重组米7	2 235.47±50.02	2 238.42±44.12	2 241.73±49.07	2 244.19±41.43	2 257.83±52.25
重组米8	2 382.17±48.34	2 387.59±43.23	2 390.16±50.43	2 394.17±44.44	2 420.09±48.88
重组米9	2 414.12±51.12	2 418.57±46.67	2 422.78±52.78	2 426.23±48.56	2 450.27±46.36

2.5 硬度与晶体熔融焓值的相关性分析

表7 糙米和糙米重组米米饭的硬度与晶体熔融焓值 ΔH 的相关性分析
Table 7 Correlation analysis between hardness and crystal melting ΔH for cooked samples of brown rice and restructured brown rice

样品	γ	样品	γ
糙米	-0.826	重组米5	0.966**
重组米1	0.889*	重组米6	0.987**
重组米2	0.891*	重组米7	0.984**
重组米3	0.988**	重组米8	0.996**
重组米4	0.974**	重组米9	0.994**

注:*. 差异显著($P < 0.05$); **. 差异极显著($P < 0.01$)。

从上述实验结果分析样品的硬度与DSC测定出的晶体熔融焓值的变化趋势一致。利用SPSS软件分析两者的相关性,确定热焓与硬度的相关系数 γ ,分析结果见表7。糙米米饭的硬度与晶体熔融焓值无显著差异($P > 0.05$),而糙米重组米米饭的相关系数 γ 值均差异显著($P < 0.05$),糙米重组米米饭的晶体熔融焓值与硬度值两者之间具有显著相关性。

3 结 论

糙米和大部分糙米重组米的Avrami参数 n 值均小于1,以一次成核的方式结晶;糙米重组米晶体的结晶速率 k 随着糊化度的升高而降低;糙米重组米的直链淀粉含量对Avrami参数 n 有极显著影响,对支链淀粉的最大回生度

没有显著的影响;参数 n 和结晶速率 k 之间成极显著负相关,重组米淀粉的晶核形成得越慢,越分散(n 越大),晶体结晶速率 k 越小;最大回生度与晶体结晶速率 k 成显著负相关,表明结晶速率越慢,最大回生度越高;硬度可以有效地反映出糙米重组米的回生程度。

参考文献:

- [1] 魏西根, 许琳, 刘建伟. 大米淀粉回生的研究进展[J]. 农产品加工·学刊, 2007(10): 32-34. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646-B.2007.10.011.
- [2] 刘钰馨, 莫羨忠, 李建鸣, 等. 淀粉回生行为特性及其机理研究进展[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2014, 31(2): 45-46. DOI:10.3969/j.issn.1002-8743(2014)02-0045-03.
- [3] 冯健, 刘文秀, 林亚玲, 等. 淀粉抗回生的研究进展[J]. 食品科学, 2011, 32(9): 335-339.
- [4] 姚远, 丁霄霖. 米饭回生研究(III)米饭回生抑制的原理与工艺[J]. 中国粮油学报, 2000, 15(1): 55-57. DOI:10.3321/j.issn.1003-0174.2000.01.002.
- [5] 张颖, 杨晓勇, 王波, 等. 营养重组米的研制[J]. 食品与发酵科技, 2014, 50(6): 36-39.
- [6] 刘菊芬, 安红周, 李盘欣. 不同添加剂对速煮重组米品质的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(2): 358-361. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2012.02.079.
- [7] 张志清, 熊善波, 李远志, 等. 工程重组米质构测定(TPA)与感官评价相关分析[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(10): 1-5.
- [8] 庄海宁, 冯涛, 金征宇, 等. 挤压加工参数对重组米生产过程及产品膨胀度的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 349-356. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2011.09.061.
- [9] 熊善波, 张志清, 李远志, 等. 模糊数学综合评价在工程重组米品质改良研究中的应用[J]. 食品科学, 2011, 32(18): 49-53.
- [10] 王会然. 挤压重组米品质特性研究[J]. 食品工业, 2015, 36(4): 92-95.
- [11] 王鹏, 杨柳, 肖志刚, 等. 稳定化米糠对营养重组米回生动力学的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 31-34. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2015.04.008.
- [12] 郑广钊, 肖志刚, 王利民, 等. L - α -磷脂酰胆碱含量对挤压重组米回生动力学影响[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(3): 6-10. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2012.03.002.
- [13] 郑广钊, 肖志刚, 孙树坤, 等. 挤压加工参数对重组米崩解值的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 121-127. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.025.
- [14] 晏梦婷, 周坚, 沈汪洋. 糙米重组米的糊化特性研究[J]. 粮食与饲料工业, 2014(7): 1-4. DOI:10.7633/j.issn.1003-6202.2014.07.001.
- [15] 赵凯. 淀粉非化学改性技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 61-65.
- [16] 丁文平, 王月慧, 夏文水. 淀粉的回生机理及其测定方法[J]. 粮食与饲料工业, 2004(12): 28-30. DOI:10.3969/j.issn.1003-6202.2004.12.012.
- [17] 徐进, 徐学明, 金征宇, 等. 极限糊精对小麦淀粉回生的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(11): 1136-1141.
- [18] 张涛, 张儒, 王焕龙. 几种小红栲变性淀粉的糊化与回生特性[J]. 食品工业科技, 2011, 32(8): 77-80. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2011.08.057.
- [19] 吴跃, 陈正行, 李晓喧. 抑制淀粉回生方法的研究现状和进展[J]. 食品工业科技, 2011, 32(4): 423-425. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2011.04.095.
- [20] ROBERTS K, WELLS B. Microstructure of amylose gels[J]. Carbohydrate Polymers, 1992, 18(3): 189-193. DOI:10.1016/0144-8617(92)90063-V.
- [21] CARINS P, SUN L, MORRIS V J, et al. Physicochemical studies using amylose as an *in vitro* model for resistant starch[J]. Journal of Cereal Science, 1995, 21(1): 33-43. DOI:10.1016/S0733-5210(95)80006-9.
- [22] GIDLEY M J, COOK D, DARKE A H, et al. Molecular order and structure in enzyme-resistant retrograded starch[J]. Carbohydrate Polymers, 1995, 28(1): 23-31. DOI:10.1016/0144-8617(96)81387-7.
- [23] RUSSELL P L. A kinetic study of bread staling by differential scanning calorimetry and compressibility measurements. The effect of added monoglyceride[J]. Journal of Clinical Nursing, 1983, 1(4): 285-296. DOI:10.1016/S0733-5210(83)80016-2.
- [24] ZHANG W, JACKSON D S. Retrogradation behavior of wheat starch gels with differing molecular profiles[J]. Journal of Food Science, 1992, 57(6): 1428-1432. DOI:10.1111/j.1365-2621.1992.tb06875.x.