

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.02.021

大米淀粉回生特性及控制技术研究进展

韩雪¹, 井雪萍¹, 张莉丽², 张兰威¹

(1.哈尔滨工业大学 化工学院, 150090 哈尔滨; 2.东北农业大学 食品学院, 150030 哈尔滨)

摘要: 大米是我国的主食原料之一,在储藏过程中容易出现硬度增加、黏性下降、脱水等品质劣化现象,制约了大米主食品的发展。大米的主要成分淀粉易回生是导致大米主食品储藏过程中品质劣变的主要因素之一,本文重点阐述了大米淀粉的结构及大米中其他主要成分对回生特性的影响。根据国内外的研究动态,综述了常用于控制大米淀粉回生的技术方法,以期为大米主食品的品质改良、延长大米主食品的货架期提供思路。

关键词: 大米; 淀粉; 成分; 回生特性; 控制技术

中图分类号: TS21

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)02-0126-05

Review on retrogradation properties and control technology of rice starch

HAN Xue¹, JING Xueping¹, ZHANG Lili², ZHANG Lanwei¹

(1.School of Chemical Engineering and Technology, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2.Food Science College, Northeast Agricultural University, 150030 Harbin, China)

Abstract: A staple food in China, rice is prone to be hardened, dehydrated, decreased in stickiness in storage, restricting the development of the rice food. Retrogradation of starch, the main component of rice, is the leading cause to rice quality deterioration. The thesis, elaborated on the structure of rice starch and the effects of other rice components on retrogradation, and overviewed the control technologies on retrogradation of rice starch home and abroad, tries to provide ways for improving the quality of rice food and extending their shelf life.

Keywords: rice; starch; constituent; retrogradation properties; control technology

大米主食品是中国人民喜爱的一类主食,随着经济的快速发展,大米主食品产品越来越丰富,包括方便米饭、方便米粥、米糕、米粉等,但这些产品在储藏过程中常会发生硬度增加、黏性下降等劣变,使其食用品质降低。

大米的化学成分中,淀粉约占85%,蛋白质约占7%,脂类约占0.3%,其余为粗纤维等。大米淀粉是大米的主要成分,在大米中以淀粉颗粒的形式存在,其性质也是影响大米主食品加工及储藏品质的主要原因之一,淀粉的回生是导致大米主食品在低温储藏下品质劣化的主要原因之一。回生是指糊化的淀粉由无序状态向有序的结晶状态的变化^[1],缓

慢冷却后,糊化的淀粉分子运动减弱,使得淀粉分子间的氢键趋向平行排列,淀粉链形成不完全呈放射排列的混合微晶束,导致淀粉形成难以复水的高度结晶体^[2]。回生使淀粉凝胶黏性下降,硬度上升,分子的柔性减弱,产生相分离等现象^[3],对大米主食品的质构、感官、食用性及货架期产生了极大影响。本文重点针对大米淀粉的回生特性及控制技术的研究进展进行综述,以期为大米主食品保藏期品质控制提供理论依据。

1 大米淀粉组成

大米淀粉由直链淀粉和支链淀粉组成,二者的含量因品种、气候等不同而异。直链淀粉的含量是评价大米食用品质的指标之一,直链淀粉的含量越高大米主食品的硬度越大、黏性越小^[4]。根据直链淀粉的含量,可以将大米分为糯米(0~2%)、极低直链淀粉(3%~12%)大米、低直链淀粉(13%~20%)大米、中直链淀粉(21%~25%)大米及高直链淀粉($\geq 26%$)大米^[5]。

收稿日期: 2015-03-12.

基金项目: 黑龙江省应用技术与开发计划(GA14B201); 黑龙江省博士后启动基金(LBH-Q12108); 哈尔滨市创新人才基金(2013RFQXJ147).

作者简介: 韩雪(1978—),女,副教授;

张兰威(1961—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 韩雪, Xhan@hit.edu.cn.

直链淀粉通过 α -1,4-糖苷键连接形成线性结构并有非常少量的 α -1,6-分支 (<0.1%), 呈螺旋状, 在溶液中空间障碍相对较小, 易于取向, 发生回生, 构成了大米淀粉的无定形区^[6]。支链淀粉是大米淀粉最主要的组成部分, 构成了大米淀粉的结晶区, 它是一种高度分支的大分子, 呈树枝状, 通过 α -1,4-糖苷键连接构成主链, α -1,6-糖苷键连接主链与支链 (占总糖苷键的 4%~5%), 支链淀粉聚集时空阻碍大, 不易回生, 但在长期储藏时, 其结晶特性是导致大米淀粉回生的主要因素^[3]。

2 大米淀粉的回生特性

糊化后的淀粉在冷却和储藏过程中, 易发生回生现象, 该过程可分为两个阶段: 一是直链淀粉的短期回生, 二是支链淀粉的长期回生。短期回生一般发生在淀粉糊化后的几小时或十几小时内, 是渗漏的直链淀粉分子之间通过氢键形成双螺旋, 再以此双螺旋为连接点进一步堆积形成结晶; 长期回生速度较慢, 一般会超过几周时间, 是由于支链淀粉的高分叉结构使其在聚合时受到较强的阻碍^[7], 通常认为, 支链淀粉的长期回生对食品质量的影响较大。直链淀粉的短期回生对支链淀粉的回生具有协同作用, 直链淀粉的回生为支链淀粉的重结晶过程提供晶核, 直链淀粉含量越多, 提供的晶核就越多, 支链淀粉回生的速率就越快^[8]。

另外, 支链淀粉外侧支链长度也会影响支链淀粉结晶体的形成及其稳定性。Hizukuri 提出的支链淀粉“簇状模型”如图 1 所示, 簇状结构中的分枝有 3 种类型, 分别称为 A 链、B 链和 C 链。C 链是支链淀粉分子的主链, 是唯一一条含有还原末端的分枝; B 链与 C 链以 α -1,6-糖苷键相连, B 链根据其所跨越的簇单位数目又可分为 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 链; A 链是最外侧的链, 其还原末端通过 α -1,6-糖苷键与内层的 B 链相连, A 链本身不再分枝^[9], A 链与 B_1 链相互结合在同一晶体中, 构成了支链淀粉分子结晶的主体。外侧短支链越多, 最终回生度越高, 但由于低于 10 个单位的短链会阻碍回生, A 链与 B 链间要形成双螺旋结晶体, 分子链长至少要在 10 个葡萄糖单位以上^[10]。Vandeputte 等^[11]认为, 支链淀粉的链长及链长分布影响了同一簇内相邻链间双螺旋的形成及排列规则, 进而造成了淀粉结晶特性的差异。贺晓鹏等^[12]认为, 支链淀粉中的长支链起簇间连接作用, 而其未分支部分的外部链可通过参与双螺旋的形成来影响支链淀粉的结晶特性。

淀粉糊化后形成淀粉糊, 在储藏期间产生回生现象, 在这些过程中淀粉结构发生了从有序到无序,

又重新排成新的有序结构的变化。加热糊化过程中, 水分子和热的作用使有序的淀粉分子变得杂乱无序, 降温冷却和储藏过程中, 分子势能降低, 无序化又趋于有序化。淀粉回生的过程如图 2 所示^[13], 直链淀粉 (图 2 右侧) 在淀粉的糊化过程中双螺旋打开, 分散在淀粉糊中, 继而通过氢键形成三维立体网状结构, 出现回生现象。在储藏过程中网络结构逐渐发展, 结点尺寸增大, 结点间距缩小, 从而导致回生现象增强。支链淀粉 (图 2 左侧) 在淀粉的糊化过程中膨大发生破裂, 较均匀地分散在淀粉糊中, 随储藏时间的延长, 支链淀粉链间分子形成结晶簇, 相互绞缠导致回生。

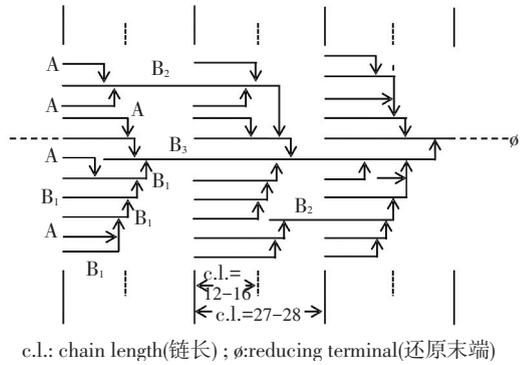


图 1 Hizukuri 支链淀粉分子结构模型^[9]

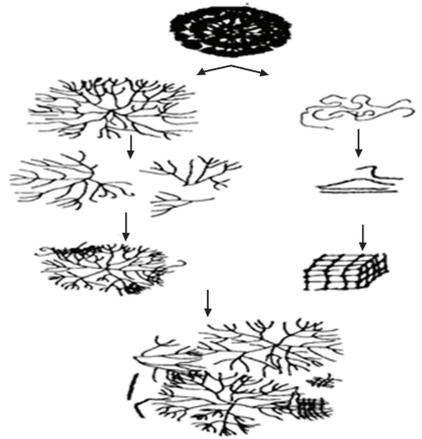


图 2 淀粉的回生过程^[13]

3 大米中其他成分对淀粉回生特性的影响

3.1 蛋白质

蛋白质的存在会抑制淀粉的回生过程^[14], 大米中由大的球状蛋白组成的蛋白质包围在淀粉颗粒的外围, 阻碍淀粉糊化胶凝时的吸水和直链淀粉的渗漏。在储藏过程中, 蛋白质的存在使体系的黏性增加, 淀粉分子链的迁移受到阻碍, 抑制了淀粉分子链间以氢键堆积的结晶, 在一定程度上抑制了直链淀粉的有序重排, 使得成核和结晶速率降低^[15]。丁文平等^[16]对余赤全米粉 (含蛋白和淀粉) 和米中淀粉体系的研究表明, 米粉和米淀粉体系胶稠度有较大

差别,米粉体系的胶稠度低于淀粉体系.将糊化后的两体系置于 4 ℃ 储藏,发现短期储藏时米粉体系初始强度大于米淀粉体系,长期储藏时全米粉的回生速度低于米中淀粉的回生速度.这说明蛋白质的存在限制了淀粉凝胶的流动,抑制了米粉体系糊化时淀粉颗粒的瓦解,增大了填充基质的强度,加强了米淀粉凝胶网络,使得短期储藏时米粉体系的初始强度大;而在米淀粉体系中,由于糊化时膨胀吸水没有受到抑制,直链淀粉渗漏出来形成的凝胶基质较多,易于互相交联缠绕,因此,不含蛋白质的米淀粉凝胶强度增长较含蛋白质的米粉凝胶强度增长快.

3.2 脂类

大米中的脂类可与直链淀粉分子结合,形成直链淀粉-脂复合物^[17].在蒸煮过程中米的脂类与直链淀粉分子形成的复合物冷却时会由处于亚稳定状态的 V 型结晶(淀粉与一些无机或有机基团进行络合,形成的螺旋状内络合物)转化成比较稳定的 B 型结晶(短链葡聚糖结晶化得到的双螺旋微晶淀粉),因而会促进直链淀粉分子的回生.此外,在生淀粉的贮存过程中,V 型结晶向 B 型结晶的转化,也会增加原淀粉中 B 型结晶的含量,在加热糊化过程中,这些结晶不易充分糊化,冷却后便会起到晶核的作用,促使其他淀粉分子加速回生^[2].然而冯健等^[18]认为,淀粉内源脂与直链淀粉形成的复合物可以抑制淀粉的回生,因为这些复合物影响了直链淀粉的双螺旋交联缠绕和结晶,从而降低了直链淀粉凝胶体的强度.Ji 等^[19]的研究也表明米糕的回生速度由于脂质含量的降低而加快.周坚^[20]认为脂类通过限制支链淀粉的重结晶从而抑制淀粉的回生.大米直链淀粉-脂类复合物与大米淀粉回生的关系有待进一步研究.

3.3 水分含量

马晓军等^[21]对即食方便米饭的研究显示即食方便米饭 4 ℃ 保藏时,水分含量在 63%~65% 时样品保藏后回生现象较严重,高于 65% 或低于 63% 时水分含量变化对淀粉回生的影响不大.Iturriaga 等^[22]对回生晶体的融化焓进行分析,发现当水分含量为 50%~60% 时融化焓达到峰值,用差示量热扫描仪和 X-射线衍射分析重结晶度反应回生程度,显示当水分含量高于 80% 或低于 10% 时,未有重结晶发生.水可能通过影响糊化后淀粉分子链的迁移及重新聚合的速率抑制淀粉回生,低水分含量时淀粉分子链迁移速率低,高水分含量则会导致体系浓度降低,阻碍淀粉分子交联缠绕和聚合有序的机会,从而抑制了淀粉的回生^[23].

4 大米淀粉回生特性的抑制方法

4.1 淀粉酶抑制法

目前用于控制淀粉回生的酶主要有 α -淀粉酶、 β -淀粉酶、糖化酶和异淀粉酶,这些酶均能水解淀粉分子中的葡萄糖苷键^[24].

α -淀粉酶是在控制淀粉回生中应用最多的一类酶,其广泛存在于微生物、植物和动物中,不同来源的 α -淀粉酶对淀粉分子结构的影响程度不同,这可能与酶的作用方式和酶的活性水平有关.Leman 等^[25]研究了不同来源的 α -淀粉酶,发现枯草杆菌 α -淀粉酶和米曲霉的 α -淀粉酶对支链淀粉分子侧链的水解能力有限,这可能是由于酶的活力低,或是酶优先水解支链淀粉的主链;而嗜热脂肪芽孢杆菌麦芽糖 α -淀粉酶(BStA)对支链淀粉的侧链有显著影响,BStA 可以减少支链淀粉的相对分子质量,将侧链的链长减少 50%,同时增加短链含量,从而有效地抑制淀粉的回生.有学者认为 α -淀粉酶通过增加淀粉体系中聚合度(DP)为 6~9 的短链从而抑制支链淀粉的重结晶;但徐进等^[26]利用广角 X 射线衍射法和差示扫描量热法研究极限糊精对小麦淀粉回生的影响,发现极限糊精与淀粉片段间的非共价作用阻碍了淀粉链有序化结构的形成,因此,认为 α -淀粉酶对淀粉回生的抑制是由于水解淀粉后产生的低相对分子质量糊精阻碍了淀粉之间的相互作用引起的.

β -淀粉酶对淀粉的回生也有明显的抑制作用. β -淀粉酶通过适当水解降低淀粉的外部链长,进而阻碍了淀粉分子链结合的几率和程度,抑制淀粉的回生^[27].丁文平等^[28]用差示扫描量热仪(DSC)测定了经过 β -淀粉酶处理后的大米淀粉样品的回生情况,认为添加了 β -淀粉酶的大米淀粉的回生速度和程度受到了显著抑制;邱泼等^[29]利用 β -淀粉酶抑制米粉的回生,生产的保鲜米制品一年内不回生.

4.2 乳化剂抑制法

乳化剂的亲油基团通过进入直链淀粉的双螺旋结构,与直链淀粉分子相互作用形成稳定的复合物,抑制直链淀粉由有序排列向无定形区变化,从而能够延缓大米淀粉的回生^[18].Matsunaga 等^[30]的研究发现蔗糖脂肪酸酯可与直链淀粉形成复合物,显著地抑制直链淀粉结晶.姜培彦等^[31]在蛋糕的制作过程中通过加入乳化剂使其与直链淀粉形成复合物,阻止直链淀粉的结晶,进而使保存一段时间的蛋糕的硬度降低,弹性、回复性和咀嚼性增加.Tang 等^[32]的研究表明,单甘酯等乳化剂与直链淀粉相互作用形成的淀粉-脂质凝聚体延缓了淀粉短期回生过程,降低了支链淀粉重结晶晶种源浓度,从而抑制了

淀粉回生整个过程.

4.3 小分子糖类抑制法

糖类对淀粉的回生也有一定的抑制作用.目前的研究显示,单糖、二糖、寡糖等小分子糖类抑制淀粉回生的机理主要有两种,即小分子糖类的降塑理论和相容性理论.降塑理论认为在淀粉的重结晶过程中,小分子糖类作为降塑剂增强了淀粉链之间的相互作用,降低了分子链的迁移速率,从而抑制了淀粉回生^[33];相容性理论认为小分子糖对淀粉回生的作用取决于二者的相容性,若二者相容则淀粉微相区淀粉浓度降低,进而降低了淀粉分子链的重排;若两者不相容,则淀粉微相区淀粉浓度升高,进而加速回生过程^[34].相容性理论较降塑理论更为完善,它可以解释不同单糖对淀粉回生抑制效果有显著差异的原因^[35].多糖类胶体抑制淀粉回生的方式主要是通过与水或淀粉作用,降低氢键引起的淀粉分子链之间的相互作用. Muadklay 等^[36]在木薯淀粉乳中添加了0.5%的黄原胶,结果显示淀粉回生受到了抑制;黄原胶通过抑制糊化过程中直链淀粉的溶出及与初期糊化过程中渗漏出的淀粉可溶性组分相互作用,影响淀粉分子自身的聚合,从而影响淀粉回生过程^[37].

4.4 超高压抑制法

超高压为控制淀粉回生提供了一个新的技术手段.淀粉经超高压处理后重结晶过程中的瞬间成核方式趋于零散式成核,因而回生过程被抑制^[35].Guo 等^[38]用超高压处理糊化的淀粉,并将样品保存在4℃下,发现经超高压处理的淀粉在储藏过程中有较低的重结晶速率和回生趋势.田耀旗^[35]的研究发现超高压对不同种类淀粉回生的抑制程度不同,用超高压技术处理粳米和糯米,粳米的回生速率显著降低,而糯米的回生现象并未受到显著的影响.刘莉等^[39]将超高压处理与添加 β -环糊精(β -CD)相结合研究二者对米饭回生现象的影响,将样品在4℃条件下储藏35d,发现其回生焓变值比常压对照组降低了3.10 J/g,表明超高压处理和添加 β -CD的结合对米饭的回生具有协同作用.但超高压装置基本建设成本高,并且经反复加减压,高压密封体易损坏,加压容器易发生损伤,使得实际应用中超高压装置的压力仅在500 MPa左右,这些问题限制了超高压技术的应用,还有待解决^[40].

4.5 淀粉混合抑制法

淀粉混合因可以改变淀粉的糊化特性已应用到挤压膨化类食品的生产中^[41].有研究表明,不同淀粉混合还会抑制淀粉的回生现象^[42].Novelo-Gen 等^[43]将棉豆淀粉与木薯淀粉按不同质量比进行混合(25:75、50:50、75:25)研究可能产生的新性

状,发现二者以25:75混合时未出现回生现象.Ortega-Ojeda 等^[44]研究了马铃薯、大麦、玉米淀粉不同混合方式的回生特性,样品在6℃存放7d后,蜡质玉米与大麦淀粉按25:75混合时回生程度最低,认为混合淀粉的回生程度与其中各种淀粉所占的比例有关.目前关于淀粉混合对淀粉回生抑制作用的报道较少,还需要进一步的研究.

5 展望

大米主食品储藏过程中品质劣化是一个复杂的过程,大米淀粉回生在该过程中起重要作用,国内外对大米淀粉的回生机制与控制方法的报道很多,但机理尚未研究清楚,还需进一步解释;目前,对大米淀粉回生的控制措施可能会导致大米主食品的食味不佳,或是达不到期望的抑制效果.因此,更深一步探索大米淀粉的回生机制,寻找更适合的抑制大米淀粉回生的方法对大米主食品产业的发展有重要意义.

参考文献

- [1] FU Zongqiang, WANG Lijun, LI Dong, et al. The effect of partial gelatinization of corn starch on its retrogradation [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 97(2): 512-517.
- [2] 王睿. 即食方便米饭的抗老化研究及工艺改进 [D]. 无锡:江南大学, 2007.
- [3] 余世锋. 低温和超低温预冷下大米淀粉凝沉特性及应用研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [4] SUWANNAPORN P, PITIPHUNPONG S, CHAMPANGEM S. Classification of rice amylose content by discriminant analysis of physicochemical properties [J]. Starch/Stärke, 2007, 59: 171-177.
- [5] PANDEY M K, RANI N S, MADHAV S M, et al. Different isoforms of starch-synthesizing enzymes controlling amylose and amylopectin content in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Biotechnology Advances, 2012, 30(6): 1697-1706.
- [6] 唐敏敏, 洪雁, 顾正彪, 等. 黄原胶对大米淀粉长期回生的影响 [J]. 食品与生物技术学报, 2013, 32(7): 692-697.
- [7] SONG Rukun, HUANG Min, LI Bin, et al. The effect of three gums on the retrogradation of indica rice starch [J]. Nutrients, 2012, 4(6): 425-435.
- [8] LU Zhanhui, SASAKI T, LI Yongyu, et al. Effect of amylose content and rice type on dynamic viscoelasticity of a composite rice starch gel [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(7): 1712-1719.
- [9] 李春燕, 封超年, 张荣, 等. 作物籽粒淀粉结构的形成与相关酶关系的研究进展 [J]. 生命科学, 2005, 17(5): 449-455.
- [10] GIDLEY M J, BULPIN P V. Crystallization of maltooligosaccharides as models of the crystalline forms of starch: mini-

- mum chain length requirement for the formation of double helices [J]. *Carbohydr Res*, 1987, 161(2): 291-300.
- [11] VANDEPUTTE G E, VERMEYLEN R, GEEROMS J, et al. Rice starches. III. structural aspects provide insight in amylopectin retrogradation properties and gel texture [J]. *Journal of Cereal Science*, 2003, 38(1): 61-68.
- [12] 贺晓鹏, 朱昌兰, 刘玲珑, 等. 不同水稻品种支链淀粉结构的差异及其与淀粉理化特性的关系 [J]. *作物学报*, 2010, 36(2): 276-284.
- [13] 赵思明, 熊善柏, 张声华. 淀粉糊物系及其老化特性研究 [J]. *中国粮油学报*, 2001, 16(2): 18-21.
- [14] LIAN Xijun, GUO Junjie, WANG Danli, et al. Effects of protein in wheat flour on retrogradation of wheat starch [J]. *Journal of Food Science*, 2014, 79(8): 1505-1511.
- [15] 王玉珠. 即食米饭的食用品质改良及抑制回生现象的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [16] 丁文平, 王月慧. 米粉体系和米淀粉体系回生特性的比较研究 [J]. *郑州工程学院学报*, 2004, 25(3): 16-19.
- [17] KAUR K, SINGH N. Amylose-lipid complex formation during cooking of rice flour [J]. *Food Chemistry*, 2000, 71(4): 511-517.
- [18] 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.
- [19] JI Ying, ZHU Kexue, QIAN Haifeng, et al. Staling of cake prepared from rice flour and sticky rice flour [J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(1): 53-58.
- [20] 周坚. 方便稀饭的研制及其糊化回生机理研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2003.
- [21] 马晓军, 王睿, 耿敏, 等. 即食方便米饭的老化机理及影响因素研究 [J]. *食品与发酵工业*, 2008, 34(7): 37-40.
- [22] ITURRIAGA L B, DE MISHIMA B L, AÑON M C. A study of the retrogradation process in five argentine rice starches [J]. *LWT*, 2010, 43(4): 670-674.
- [23] 罗思, 黄立新. 水对淀粉结构的影响及其作用的研究 [J]. *农产品加工*, 2009(10): 68-74.
- [24] 高颖. 大米老化机理、影响因素及控制技术研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [25] LEMAN P, GOESAERT H, DELCOUR J A. Residual amylopectin structures of amylase-treated wheat starch slurries reflect amylase mode of action [J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(1): 153-164.
- [26] 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.
- [27] 吴磊, 高群玉. 生物酶法抑制淀粉凝沉的研究 [J]. *粮油食品科技*, 2008, 16(4): 48-51.
- [28] 丁文平, 李清. 淀粉酶对大米淀粉回生影响机理的研究 [J]. *粮食与饲料工业*, 2005(10): 16-17.
- [29] 邱泼, 韩文凤, 殷七荣, 等. 生物酶法抑制鲜湿米粉回生的研究 [J]. *粮食与饲料工业*, 2006(11): 17-21.
- [30] MASTSUNAGA A, KAINUMA K. Studies on the retrogradation of starch in starchy foods; effect of the addition of sucrose fatty acid ester on the retrogradation of corn starch [J]. *Starch*, 1986, 38(1): 1-6.
- [31] 姜培彦, 马晓军, 余斌, 等. 乳化剂与直链淀粉相互作用及其对蛋糕品质影响的研究 [J]. *食品工业科技*, 2008, 29(2): 247-249.
- [32] TANG M C, COPELAND L. Investigation of starch retrogradation using atomic force microscopy [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 70(1): 1-7.
- [33] SLADE L, LEVINE H. Non-equilibrium behavior of small carbohydrate-water systems [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1988, 60(12): 1841-1864.
- [34] BILLADERIS C G, PROKOPOWITH D J. Effect of polyhydroxy compounds on structure formation in waxy maize starch gels: a calorimetric study [J]. *Carbohydrate Polymers*, 1994, 23(3): 193-202.
- [35] 田耀旗. 淀粉回生及其控制研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [36] MUADKLAY J, CHAROENREIN S. Effects of hydrocolloids and freezing rates on freeze-thaw stability of tapioca starch gels [J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(7): 1268-1272.
- [37] CHANTARO P, PONGSAWANIT R. Influence of sucrose on thermal and pasting properties of tapioca starch and xanthan gum mixtures [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 98(1): 44-50.
- [38] GUO Zebin, ZENG Shaoxiao, ZHANG Yi, et al. The effects of ultra-high pressure on the structural, rheological and retrogradation properties of lotus seed starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 44: 285-291.
- [39] 刘莉, 赵建伟, 焦爱权, 等. 超高压协同 β -环糊精渗入对米饭回生的抑制 [J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(1): 16-20.
- [40] 孙斌, 钱海刚. 超高压技术在食品中的应用 [J]. *科技资讯*, 2008(3): 20-21.
- [41] WATERSCHOOT J, GOMAND S V, WILLEBRORDS J K, et al. Pasting properties of blends of potato, rice and maize starches [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 41: 298-308.
- [42] YAO Y, ZHANG J, DING X. Retrogradation of starch mixtures containing rice starch [J]. *Journal of Food Science*, 2003, 68(1): 260-265.
- [43] NOVELLO-CEN L, BETANCUR-ANCONA D. Chemical and functional properties of phaseolus lunatus and manihot esculenta starch blends [J]. *Starch/Stärke*, 2005, 57(9): 431-441.
- [44] ORTEGA-OJEDA F E, ELIASSON A C. Gelatinisation and retrogradation behaviour of some starch mixtures [J]. *Starch/Stärke*, 2001, 53(10): 520-529.