

不同加工方式的淀粉质食品老化的影响因素和延缓老化方法的研究进展

洪 静¹, 郭婉雪¹, 郑学玲^{1*}, 李盘欣², 王红新², 黄亚男²

1. 河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001

2. 河南南街村(集团)有限公司, 河南 漯河 462600

摘要:淀粉质食品是人类生活中必不可少的一类食品,淀粉的老化影响淀粉质食品的品质。淀粉质食品种类繁多,淀粉种类不同并且加工方式也各不相同,因此老化的程度及影响因素也不尽相同。为了探究影响淀粉老化的因素及延缓老化的方法,综述了不同加工方式的淀粉质食品老化的影响因素和延缓老化的研究进展,对于开发新型抗老化食品有一定的参考意义。

关键词:淀粉质食品;淀粉老化;加工方式

中图分类号:TS201.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2383(2023)02-0127-07

DOI:10.16433/j.1673-2383.2023.02.017

Research progress on influencing factors and delaying aging of starchy food with different processing methods

HONG Jing¹, GUO Wanxue¹, ZHENG Xueling^{1*}, LI Panxin², WANG Hongxin², HUANG Yanan²

1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

2. Henan Nanjiecun(Group) Co. Ltd., Luohe 462600, China

Abstract: Starchy food is an essential food in human life. The aging of starch affects the quality of starchy food. There are many types of starchy foods, and starches are different in type and processing method, so the degree of aging and influencing factors are not the same. In order to explore the factors affecting the aging of starch and anti-aging methods, this paper reviewed the factors affecting the aging of starchy foods with different processing methods and the research progress in delaying aging, which had certain reference significance for the development of new anti-aging methods.

Key words: starchy food; starch aging; processing method

淀粉质食品是人们生活中必不可少的一种食品,包括面条、米饭、馒头、面包、米粉、油条和油糕等。淀粉的变化与这些食品品质的变化息息相关。淀粉是人类饮食中最大的碳水化合物来源,由直链淀粉和支链淀粉两种分子组成。在蒸煮过程中,淀粉颗粒吸水膨胀并发生糊化,糊化的淀粉颗粒分子在冷却后会以有序结构重新结合,此过程被称为淀粉的老化。淀粉老化是含淀粉类食品在储藏过程中发生品质劣化的主要

原因。淀粉质食品的品质劣化主要表现为米饭变硬^[1]、米线米粉易断条^[2]、面条硬度增加^[3]、面包质地风味差^[4]等。因此对淀粉质食品的抗老化研究有着极为重要的现实意义。大多数学者主要综述了淀粉老化的影响因素和延缓淀粉老化的方法,没有具体阐述不同加工方式之间的差异。鉴于此,作者综述了不同加工方式的淀粉质食品老化的影响因素和延缓老化的研究进展,为探寻新型抗老化方法提供理论参考。

收稿日期:2022-06-23

基金项目:河南省高等学校重点科研项目计划(21A550004);2022年度河南省重点研发与推广专项(科技攻关);河南省博士后科研项目(202102097)

作者简介:洪静(1989—),女,河南卫辉人,博士讲师,研究方向为淀粉加工理论与技术。

*通信作者:郑学玲,教授,博导,E-mail:xlzhenghau@126.com。

1 淀粉老化机理

淀粉老化是指淀粉经加热糊化后在冷却过程中从无序转变为有序的过程,可以将淀粉的老化分为两个阶段,短期老化和长期老化^[5]。短期老化是由直链淀粉导致的,高分子的直链淀粉之间会形成交联网络,小分子则会与脂肪形成结晶,淀粉间有序交联主要是直链淀粉分子间通过氢键形成双螺旋,这个过程大约在几小时或者十几小时内完成;长期老化的原因则是支链淀粉的重新排列导致的,因为在大多数天然淀粉中支链淀粉的含量高,多于直链淀粉的含量,所以在

淀粉老化过程中形成的的大多数晶体都与支链淀粉的链间缔合相关^[6]。淀粉质食品储藏过程中,其硬度会逐渐增加、持水能力下降,这主要就是支链淀粉短侧链重结晶而形成长期老化的结果^[7]。有研究表明,淀粉的长期老化和短期老化不是单独发生的,是存在一定联系的^[8]。

2 不同加工方式淀粉质食品的抗老化研究

淀粉质食品有多种加工方式如蒸煮、焙烤、油炸、挤压、膨化等,不同加工方式对食品的影响不同,如表 1 所示。

表 1 不同加工方式对淀粉质食品老化的影响

Table 1 Effects of different processing methods on aging of starchy food

加工方式	水分含量/%	研究结果	参考文献
煮制	63~65	煮制类食品因水分的充分进入导致其水分含量较高容易发生老化	[9]
蒸制	40~42	蒸制利用蒸汽对食品进行传热,面筋蛋白交联速度适中,能很好地将淀粉包裹于网络结构中,有利于延缓淀粉老化	[10-11]
焙烤	33~36	焙烤是利用辐射热能加工食品,水分在此期间因温度的升高汽化,更不易老化回生	[12-13]
油炸	30~33	油炸加热均匀、传热速度快,并且随着油炸的进行,直链淀粉和脂质形成复合物使淀粉结晶度降低	[14-15]
挤压、膨化	20~25	挤压、膨化食品经过高温或高温高压后,水分含量降低、淀粉颗粒结构改变,延缓食品的老化	[16-17]

2.1 煮制类食品(方便湿面)

方便湿面又称为 LL 面,是一种健康、绿色、保鲜的新型方便食品。方便湿面是将面粉与盐水混合经和面、压片、切条、水煮、酸浸、真空包装、灭菌制作而成^[3]。方便湿面因淀粉回生和水分迁移导致品质恶化和货架期缩短,使其口感粗糙、弹性下降、容易断条。方便湿面的老化过程受原料成分、加工方式、水分、储藏时间等因素的影响^[18]。小麦直链淀粉含量与方便湿面的软硬度、色泽、口感呈极显著负相关^[19],蛋白质与方便湿面的弹性、表面状态呈显著正相关^[20];脂肪、灰分含量与方便湿面的软硬度呈极显著负相关。从加工过程看,水煮的方便湿面的水分含量高,不易长期储存,并且随着储藏时间的增加,方便湿面食用品质会变差,出现口感绵软的现象^[21]。煮制最佳蒸煮时间的方便湿面比煮制时间较短的方便湿面老化速率较慢,这是由于高糊化度淀粉比低糊化度淀粉结晶速率低^[22]。王珊等^[23]采用高静压使方便湿面的最佳煮制时间缩短至 185 s,并且提高了方便湿面的风味、口感和保质期。

2.2 蒸制类食品(馒头)

馒头是我国传统的主食,是一种以水和面粉

为原料,酵母为发酵剂的蒸制类食品。馒头在储藏过程中新鲜度会降低,会出现硬度升高、弹性下降、营养价值下降、掉渣等不良现象。馒头食用品质下降的主要原因就是淀粉老化^[24]。淀粉老化十分复杂,受许多因素的影响。影响馒头老化的因素有淀粉、蛋白质^[25]、脂质、水分、加工工艺等。直链淀粉的含量与馒头老化呈正相关。此外,馒头品质也受破损淀粉含量的影响,适量破损淀粉可以提高面团吸水量,提高其对酶的敏感性^[26]。小麦粉中的蛋白质主要表现为面筋蛋白,在和面过程中,面筋蛋白和水形成网络结构,网络结构会对淀粉分子的重排产生一定程度的影响。一般认为,面筋网状结构会阻碍淀粉分子的运动,从而延缓淀粉重结晶的进行,对馒头的老化起到一定程度的抑制^[27]。搅拌时间也影响着馒头的老化,搅拌时间可以控制面筋和水分的结合程度,从而改变面筋结构影响蛋白质和淀粉分布来影响淀粉老化。苏利^[27]研究了不同搅拌时间和熟化时间对馒头品质的影响,发现随着熟化时间的增加,馒头的硬度和老化程度先减小后趋于稳定。

2.3 焙烤类制品(面包)

面包是以面粉为主要加工原料,具有蜂窝状

结构的一类焙烤食品。老化导致面包口感粗糙、掉渣、风味消失。这些系列变化不能用单一效应来解释,包括支链淀粉回生、无定形区域内聚合物的重组、水分含量的损失、无定形和结晶区域之间的水分含量分布,以及碎屑宏观结构^[28]。馒头与面包均为发酵面制品,但是面包的原料成分比馒头复杂得多,比馒头更不易老化。面包的老化受原辅料、加工工艺、包装及储藏条件的影响。高筋面粉中的蛋白质更容易吸水,从而使面包的老化速率降低。起酥油可改善面团的延展性,降低老化速率。糖类具有吸湿性,具有保水能力从而防止面包变得干硬。水分含量和面包的老化速率也有着密切关系,研究表明面包水分含量在 35%~37% 时不容易老化。从加工工艺看,烘焙温度或烘焙时间的降低,可以使被破坏的淀粉颗粒减少,导致面包在储存期间支链淀粉的回生减少,使面包的硬度降低^[29]。高温烘焙时,水分子的迁移程度更强,导致面包硬度增加得更快。有研究表明烘焙温度低于 100 ℃ 时,面包在储藏过程中的老化速率降低。Bosmans 等^[30]研究发现预烘焙可以有效地延缓面包的老化。豆康宁等^[31]研究发现随着发酵次数的增多、发酵时间的延长,所制作出的面包抗老化效果更好,品质更好。

2.4 油炸类制品(油条)

油条作为油炸类面制品,深受消费者的喜爱,是将小麦粉、水、盐和膨松剂进行混合,经过面团调制、醒发、制坯、油炸等一系列过程制作而成。油条在储藏过程中由于淀粉的老化导致弹性下降、口感粗糙、硬度增加等问题。目前针对油条的老化问题研究较少。党文谦等^[32]研究发现油条的炸制工艺会影响油条的品质,与预炸相比,直炸的油条有更低的含油率、更高的比容和质构特性。胡喜萍^[33]研究发现冷冻储藏和添加可溶性大豆多糖可以抑制水分迁移,来延缓油条的老化。刘卫光^[34]研究发现添加膨化的玉米粉可以提高面团中淀粉的凝胶强度,降低油条中淀粉的相对结晶度。张慧慧^[14]研究发现,添加甘油可以降低油条的老化速率,改善食用品质。

2.5 挤压膨化类制品(米粉)

挤压膨化是一种可以同时实现搅拌、加热、杀菌、膨化等多种操作的技术,挤压可以有效地延缓淀粉的老化,此项技术损耗较小,是生产速食米粉的重要加工方式。方便营养的速食米粉发展迅速,但是湿米粉水分和淀粉含量高,在储

藏过程中容易发生老化,导致断条率增加、变硬、表面粗糙等问题。影响米粉老化的因素包括原料成分、加工条件、水分和储藏条件等。李雅琴^[35]研究表明挤压膨化处理能改变米粉颗粒的晶体结构,并大大降低其结晶度。包装类型和储存温度也影响着米粉的品质,经比较发现尼龙袋有着更好的效果^[36]。

3 淀粉质食品的抗老化方法

目前淀粉抗老化方法主要从四方面进行:原料成分、环境体系、外源添加物、物理技术,具体方法如表 2 所示。

3.1 原料成分

淀粉质食品的品质与其原料成分息息相关,体系内的淀粉、蛋白质、糖类等均会影响淀粉的老化。Ito 等^[56]研究发现较低直链淀粉含量的面粉可使面包中的淀粉凝胶质地柔软,回生率降低。邓航^[57]通过对各两两配粉配方最优配比与基础粉制得方便湿面品质综合数值进行方差分析,发现对基础粉品质有优化效果的小麦粉品种:烟农 5158(添加量 50%)、矮抗 58(添加量 30%)和济麦 22(添加量 40%)。Li 等^[58]通过测定面条的基本成分、质构特性、蒸煮特性和水分分布来评价面条的品质,发现 2M 粉是制作湿面的最佳面粉类型。

3.2 环境体系

淀粉质食品存在的环境会显著影响食品的品质。Xu 等^[59]发现更高的封装温度能够实现更大的真空度,通过减少水从馒头向环境的迁移,有效地保留馒头中的水分。因此,较高的水分抑制了淀粉在储藏期间的回生过程。高湿或密封包装可以维持面包的风味以及防止因水分流失而变硬,对延缓面包老化起着重要作用^[60]。通过控制淀粉质食品的储藏温度可以有效地延缓淀粉的老化。当淀粉质食品低温储藏时,体系中的自由水会形成冰晶,从而阻碍淀粉之间的交联延缓老化。当淀粉质食品高温储藏时,其拥有维持氢键的能量,可以延缓淀粉的老化。Yu 等^[61]研究表明速冻结合-18 ℃ 冷冻贮藏,可有效延缓淀粉老化。

3.3 外源添加物

外源添加物不仅可以有效提高淀粉质食品的质构品质,还可以降低老化程度。常用的外源添加物有生物酶制剂、乳化剂、亲水胶体等。

表 2 淀粉质食品的抗老化方法
Table 2 Anti-aging method of starchy food

抗老化方法	研究结果		参考文献
原料成分	淀粉	添加糯小麦粉可以改变直链淀粉的含量从而获得高品质的面条	[37]
	蛋白质	蛋白质可以与淀粉通过非共价相互作用来延缓淀粉的老化;蛋白质可以分散在淀粉之间,阻碍淀粉的交联	[38-39]
	脂质	脂质主要和直链淀粉形成复合物,阻止淀粉形成双螺旋结构	[40]
	小分子糖	小分子糖类作为降塑剂可以使淀粉链之间的相互作用增强,使分子链的迁移速率降低,从而抑制淀粉老化	[41]
环境体系	温度	低温和超低温(-100 ℃)冷冻大米淀粉凝胶可以显著延缓淀粉的老化过程	[42]
	水分	水分含量小于 20%,大于 70%不易引起淀粉的老化	[43]
	pH 值	鲜湿米粉浸泡在 pH 值 3.8~4.0 酸液中,然后真空包装,再通过蒸汽灭菌可改善其储存品质	[44]
外源添加物	酶类	α -淀粉酶可以水解淀粉产生寡糖,这些寡糖可以通过干扰淀粉结晶和凝胶形成从而延缓老化; β -淀粉酶可以水解直链或支链淀粉非还原末端的麦芽糖单元,缩短淀粉分支的长度,阻碍淀粉的重结晶	[45-46]
	亲水胶体	羟丙基甲基纤维素(HPMC)可以在羟基附近聚集大量的水,提高淀粉体系的持水性而抑制老化,改善面包的品质	[47]
	乳化剂	乳化剂-淀粉复合物的形成,特别是与直链淀粉分子的形成,可能导致淀粉分子从淀粉颗粒中的浸出更少,从而减缓煎饼的老化	[48]
	多酚	多酚能够与一些蛋白质进行结合,从而延缓老化;多酚有许多羟基可以和淀粉链的羟基结合成氢键,减少淀粉链之间的结合;多酚可以降低体系的 pH 值影响老化	[49-50]
	变性淀粉	变性淀粉引入一些亲水基团,可以阻碍淀粉分子间氢键缩合脱水作用,延缓鲜湿米粉的老化	[51]
物理技术	超高压	超高压处理能够显著抑制马铃薯淀粉老化	[52]
	微波	微波可以降低小麦淀粉的结晶度,微波辐射延缓熟化后莲子的老化,降低其硬度	[53-54]
	超声波	超声波处理可以降低蛋白质和水分子之间的表面张力,促进面筋网络的形成和蛋白质的水合作用,减少静置加工时间,提高鲜湿面条的质量	[55]

Ge 等^[62]研究发现 KGM 的加入引入了空间限制,减缓了淀粉分子之间的交联,导致各种基质系统中的水流动性增强,从而延缓淀粉的老化。Kang 等^[63]研究发现脂类物质的添加可以降低馒头的结晶度从而改善其品质。Bollanin 等^[64]研究发现转谷氨酰胺酶可以强化面筋网络结构,降低面包的老化速率。He 等^[65]研究表明瓜尔胶和黄原胶可以和淀粉相互作用,降低了玉米淀粉的老化焓和相对结晶度。

3.4 物理技术

目前通过物理的方法也可以抑制淀粉的老化。红外-微波复合烘焙面包样品的硬度、结晶度低于微波烘焙面包样品,这意味着复合加热部分解决了微波烘焙的快速老化问题^[28]。Lin 等^[66]研究发现添加经超声波和酶处理红豆蛋白后,蛋白质与淀粉的相互作用增强,从而延缓湿米粉的老化。发酵也是一种可以延缓淀粉老化的方式,Yang 等^[67]研究发现发酵改变了淀粉结晶区域,降低了蛋白质、脂质的含量,促进了米粉中淀粉分子之间氢键形成,延缓了淀粉的老化。

4 展望

淀粉老化的问题不可避免,造成食品的品质

劣变,但可以通过一些措施来减缓淀粉的老化。影响淀粉质老化的因素有淀粉本身的性质、水分、温度、无机盐、蛋白质、脂质和小分子糖类,根据影响淀粉老化的因素可以采取相应的措施。目前比较普遍的延缓淀粉老化的方式是添加酶制剂、乳化剂、亲水胶体和变性淀粉,但是酶制剂花费较高且酶解程度不易控制,因此需要探寻出新型绿色的抗老化方法。

参考文献:

- [1] YANG Z, HAN X, WU H Y, et al. Impact of emulsifiers addition on the retrogradation of rice gels during low-temperature storage [J]. Journal of food quality, 2017, 2017: 1-7.
- [2] LI C M, YOU Y X, CHEN D, et al. A systematic review of rice noodles: raw material, processing method and quality improvement [J]. Trends in food science & technology, 2021, 107: 389-400.
- [3] TANG A X, LI M, WANG R B, et al. Manipulating raw noodle crystallinity to control the hardness of cooked noodle [J]. LWT - food science and technology, 2019, 109: 305

- 312.
- [4] DEMIRKESEN I, CAMPANELLA O H, SUMNU G, et al. A study on staling characteristics of gluten-free breads prepared with chestnut and rice flours [J]. Food and bio-process technology, 2014, 7(3): 806-820.
 - [5] CHEN L, REN F, ZHANG Z P, et al. Effect of pullulan on the short-term and long-term retrogradation of rice starch [J]. Carbohydrate polymers, 2015, 115: 415-421.
 - [6] LI C Y, LAI V, LU S, et al. Correlation between the physical property, eating quality and the molecular structure of rice-starchy systems[J]. Żywność technologia jakoś suplement, 1998, 5(4): 72-86.
 - [7] SASAKI T. Effect of wheat starch characteristics on the gelatinization, retrogradation, and gelation properties [J]. Japan agricultural research quarterly, 2005, 39(4): 253-260.
 - [8] LELOUP V M, COLONNA P, BULEON A. Influence of amylose-amylopectin ratio on gel properties [J]. Journal of cereal science, 1991, 13(1): 1-13.
 - [9] 王克钧. 湿面的抗老化研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2009.
 - [10] 汪磊. 燕麦 β -葡聚糖对面粉、面团特性及馒头品质的影响和机制 [D]. 重庆: 西南大学, 2017.
 - [11] TIAN Y, LI M, TANG A X, et al. RS content and eGI value of cooked noodles (I): effect of cooking methods [J]. Foods, 2020, 9(3): 328.
 - [12] 陈欣欣, 张国治, 贺国亚. 青麦仁面包老化过程中品质分析 [J]. 粮食加工, 2020, 45(3): 13-17.
 - [13] 陈鹤. 不同加工方式对糙米制品功能成分、品质及消化吸收的影响研究 [D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2021.
 - [14] 张慧慧. 油条的品质改良和耐贮存性能的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
 - [15] SINGH N, SINGH J, KAUR L, et al. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources [J]. Food chemistry, 2003, 81(2): 219-231.
 - [16] 李俊伟. 挤压法制备大米抗性淀粉的工艺及其性质研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2008.
 - [17] 杨恒. 糖醇对辣条品质的影响及抗老化机制研究 [D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021.
 - [18] 肖东. 鲜湿面储藏期内老化机理及抗老化研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
 - [19] 章绍兵, 陆启玉. 直链淀粉含量对面粉糊化特性及面条品质的影响 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2005, 26(6): 9-12.
 - [20] WANG C, KOVACS M I P, FOWLER D B, et al. Effects of protein content and composition on white noodle making quality: color [J]. Cereal chemistry, 2004, 81(6): 777-784.
 - [21] 李颖. 无添加方便熟湿面产业化关键技术研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
 - [22] 金鑫, 周裔彬, 徐亚元, 等. 不同糊化度粳米淀粉在贮藏过程中结晶性和抗性淀粉的变化 [J]. 中国粮油学报, 2013, 28(11): 23-27.
 - [23] 王珊, 刘欣然, 李沁园, 等. 高静压技术生产方便湿面条的工艺研究 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(3): 229-233, 239.
 - [24] SIM S Y, NOOR AZIAH A A, CHENG L H. Characteristics of wheat dough and Chinese steamed bread added with sodium alginates or konjac glucomannan [J]. Food hydrocolloids, 2011, 25(5): 951-957.
 - [25] GOMES-RUFFI C R, DA CUNHA R H, ALMEIDA E L, et al. Effect of the emulsifier sodium stearoyl lactylate and of the enzyme maltogenic amylase on the quality of pan bread during storage [J]. LWT-food science and technology, 2012, 49(1): 96-101.
 - [26] 王春霞, 周国燕, 胡晓亮, 等. 馒头的老化机理及延缓老化方法的研究进展 [J]. 食品科学, 2012, 33(11): 328-332.
 - [27] 苏利. 加工工艺对馒头品质的影响研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
 - [28] OZKOC S O, SUMNU G, SAHIN S, et al. Investigation of physicochemical properties of

- breads baked in microwave and infrared-microwave combination ovens during storage [J]. *European food research and technology*, 2009, 228(6): 883-893.
- [29] BOSMANS G M, LAGRAIN B, FIERENS E, et al. The impact of baking time and bread storage temperature on bread crumb properties [J]. *Food chemistry*, 2013, 141(4): 3301-3308.
- [30] BOSMANS G M, LAGRAIN B, OOMS N, et al. Storage of parbaked bread affects shelf life of fully baked end product: a ^1H NMR study [J]. *Food chemistry*, 2014, 165: 149-156.
- [31] 豆康宁, 吕银德, 赵俊芳. 发酵方法对面包老化的影响 [J]. *粮食加工*, 2017, 42(2): 68-69.
- [32] 党文谦, 刘玫, 武小楠, 等. 炸制工艺对冻藏过程速冻预制油条品质的影响 [J/OL]. *食品与发酵工业*, 2022: 1-9 [2022-07-13]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032118>.
- [33] 胡喜萍. 可溶性大豆多糖(SSPS)对油条品质的影响及与控储存温度协同抗老化作用 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [34] 刘卫光. 添加玉米粉对油条品质的影响及其作用机理研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [35] 李雅琴. 三种物理处理方法对碎籼米粉理化性质的影响 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- [36] RACHTANAPUN P, TANGNONTAPHAT T. Effects of packaging types and storage temperatures on the shelf life of fresh rice noodles under vacuum conditions [J]. *Chiang Mai journal of science*, 2011, 38(4): 579-589.
- [37] GUO G, JACKSON D S, GRAYBOSCH R A, et al. Asian salted noodle quality: impact of amylose content adjustments using waxy wheat flour [J]. *Cereal chemistry*, 2003, 80(4): 437-445.
- [38] NIU L Y, WU L Y, XIAO J H. Inhibition of gelatinized rice starch retrogradation by rice bran protein hydrolysates [J]. *Carbohydrate polymers*, 2017, 175: 311-319.
- [39] YANG C H, ZHONG F, DOUGLAS GOFF H, et al. Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends [J]. *Food chemistry*, 2019, 280: 51-58.
- [40] CHAO C, YU J L, WANG S, et al. Mechanisms underlying the formation of complexes between maize starch and lipids [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2018, 66(1): 272-278.
- [41] PENG B, LI Y Q, DING S Y, et al. Characterization of textural, rheological, thermal, microstructural, and water mobility in wheat flour dough and bread affected by trehalose [J]. *Food chemistry*, 2017, 233: 369-377.
- [42] YU S F, MA Y, ZHENG X Q. Effects of low-and ultralow-temperature freezing on retrogradation and textural properties of rice starch gel during storage [J]. *Journal of texture studies*, 2012, 43(3): 175-186.
- [43] WANG S J, LI C L, COPELAND L, et al. Starch retrogradation: a comprehensive review [J]. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 2015, 14(5): 568-585.
- [44] 杜连起. 保鲜湿米粉的制作 [J]. *农产品加工*, 2009(4): 26-27.
- [45] 陆云军, 陆利霞, 姚丽丽, 等. 酶制剂对全麦面包品质作用分析 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42(1): 363-367, 372.
- [46] GUERRA N P, PASTRANA CASTRO L. Modelling the effects of ageing time of starch on the enzymatic activity of three amylolytic enzymes [J]. *The scientific world journal*, 2012, 2012: 1-13.
- [47] BÁRCENAS M E, ROSELL C M. Effect of HPMC addition on the microstructure, quality and aging of wheat bread [J]. *Food hydrocolloids*, 2005, 19(6): 1037-1043.
- [48] YAMASHITA S, MATSUMIYA K, KOGO Y, et al. Emulsifiers efficiently prevent hardening of pancakes under refrigerated conditions via inclusion complexes with starch molecules [J]. *Food hydrocolloids*, 2020, 100: 105432.

- [49] ZHANG H H, SUN B H, ZHANG S K, et al. Inhibition of wheat starch retrogradation by tea derivatives [J]. Carbohydrate polymers, 2015, 134: 413-417.
- [50] SHI M, HUANG L Y, NIE N, et al. Binding of tea catechins to rice bran protein isolate: interaction and protective effect during *in vitro* digestion [J]. Food research international, 2017, 93: 1-7.
- [51] 胡爱军, 郑捷, 秦志平, 等. 变性淀粉特性及其在食品工业中应用 [J]. 粮食与油脂, 2010, 23(6): 1-4.
- [52] KAWAI K, FUKAMI K, KOSEKI S, et al. Gelatinization and retrogradation of potato starch-water mixtures treated with high hydrostatic pressure [J]. High pressure bioscience and biotechnology, 2007, 1(1): 280-284.
- [53] LEWANDOWICZ G, JANKOWSKI T, FORNAL J. Effect of microwave radiation on physico-chemical properties and structure of cereal starches [J]. Carbohydrate polymers, 2000, 42(2): 193-199.
- [54] 杜艳芳. 微波辐射对莲子质构特性的影响及抑制淀粉老化机理的研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- [55] LI S H, TANG D, LIU S T, et al. Improvement of noodle quality: the effect of ultrasonic on noodles resting [J]. Journal of cereal science, 2020, 96: 103089.
- [56] ITO M, KIM S J, SARKER Z I, et al. Staling and texture of bread prepared from new Japanese bread wheat varieties with slightly low-amylose starch [J]. Food science and technology research, 2007, 13(2): 121-128.
- [57] 邓航. 鲜湿面专用小麦粉配制及其制品冻藏中物性变化的研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [58] LI L, WANG N, MA S, et al. Relationship of moisture status and quality characteristics of fresh wet noodles prepared from different grade wheat flours from flour milling streams [J]. Journal of chemistry, 2018, 2018: 1-8.
- [59] XU S Y, DONG R, LIU Y, et al. Effect of thermal packaging temperature on Chinese steamed bread quality during room temperature storage [J]. Journal of cereal science, 2020, 92: 102921.
- [60] 王雨, 薛自萍. 影响面包老化的因素及延缓措施 [J]. 农产品加工, 2019(10): 82-83.
- [61] YU S, MA Y, SUN D W. Effects of freezing rates on starch retrogradation and textural properties of cooked rice during storage [J]. LWT-food science and technology, 2010, 43(7): 1138-1143.
- [62] GE Z Z, WANG W J, GAO S S, et al. Effects of konjac glucomannan on the long-term retrogradation and shelf life of boiled wheat noodles [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2022, 102(2): 644-652.
- [63] KANG X M, YU B, ZHANG H Y, et al. The formation and *in vitro* enzymatic digestibility of starch-lipid complexes in steamed bread free from and supplemented with different fatty acids: effect on textural and retrogradation properties during storage [J]. International journal of biological macromolecules, 2021, 166: 1210-1219.
- [64] BOLLAÍN C, ANGIOLONI A, COLLAR C. Bread staling assessment of enzyme-supplemented pan breads by dynamic and static deformation measurements [J]. European food research and technology, 2005, 220(1): 83-89.
- [65] HE H Z, ZHANG Y Y, HONG Y, et al. Effects of hydrocolloids on corn starch retrogradation [J]. Starch-stärke, 2015, 67(3/4): 348-354.
- [66] LIN Z X, LIU L, QIN W Y, et al. Changes in the quality and *in vitro* digestibility of brown rice noodles with the addition of ultrasound-assisted enzyme-treated red lentil protein [J]. International journal of food science & technology, 2022, 57(2): 1150-1160.
- [67] YANG Y, TAO W Y. Effects of lactic acid fermentation on FT-IR and pasting properties of rice flour [J]. Food research international, 2008, 41(9): 937-940.

(责任编辑 金铁成)