

# 糖类化合物对糯性谷物淀粉品质的影响

林楠<sup>1,2</sup>, 郑明珠<sup>1,2\*</sup>, 杨新标<sup>1,2</sup>, 肖瑜<sup>1,2</sup>

(1. 小麦和玉米深加工国家工程实验室, 长春 130118; 2. 吉林农业大学食品科学与工程, 长春 130118)

**摘要:** 糯性谷物淀粉与普通淀粉相比具有较低的糊化温度、较强的抗老化性和冻融稳定性等特点, 在食品工业中具有更好的应用前景。糖类化合物能提高糯性谷物淀粉的糊化温度和峰值黏度, 抑制淀粉的长期回生, 影响淀粉的微观结构, 并且非淀粉类多糖能够降低糯性谷物淀粉的消化率。本文针对我国传统的粮食作物-糯性谷物, 综述了糖类化合物对糯性谷物淀粉的作用机制、理化性质和消化性。为后续糖对糯性谷物淀粉影响的研究提供更加完整的理论依据。

**关键词:** 糯性谷物淀粉; 糖类化合物; 作用机制; 理化性质; 消化性

## Effect of carbohydrate on the quality of glutinous grain starch

LIN Nan<sup>1,2</sup>, ZHENG Ming-Zhu<sup>1,2\*</sup>, YANG Xin-Biao<sup>1,2</sup>, XIAO Yu<sup>1,2</sup>

(1. National Engineering Laboratory on Wheat and Corn Further Processing, Changchun 130118, China;  
2. College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**ABSTRACT:** Compared with normal starch, glutinous grain starch has lower gelatinization temperature, stronger aging resistance and freeze-thaw stability, so it has better application prospect in food industry. The saccharide compound can increase the gelatinization temperature and peak viscosity of waxy grain starch, inhibit the long-term retrogradation of starch, affect the microstructure of starch, and non-starch polysaccharides can reduce the digestibility of waxy grain starch. This paper reviewed the effect of carbohydrate on the action mechanism, physicochemical properties and digestibility of glutinous grain starch, which provided a more complete theoretical basis for the research on the effect of carbohydrate on waxy grain starch.

**KEY WORDS:** glutinous grain starch; carbohydrate; mechanism of action; physicochemical properties; digestibility

## 1 引言

糯性谷物是我国传统粮食作物, 通常被加工成各类具有中国特色的食物, 深受广大消费者的喜爱, 其中糯玉米、糯高粱米、糯大黄米、糯米等较为常见。糯性谷物与非糯性谷物有较大差异, 含有少量或几乎不含有直链淀粉, 糊化温度低<sup>[1]</sup>, 但是粘度高, 且回生较慢, 有良好的持水性和冻融稳定性<sup>[2,3]</sup>, 淀粉作为一种可食用的增稠剂和稳

定剂<sup>[4]</sup>, 在食品开发与营养健康方面发挥着重要作用, 广泛用于食品工业, 以提高产品的整体质量, 降低成本, 便于加工<sup>[5]</sup>。糖类化合物是多羟基醛或多羟基酮及其缩聚物和衍生物的总称, 根据其组成可分为单糖、低聚糖及多糖, 又可统分为小分子糖和多糖。糖类化合物是最基本的营养元素和主要的食品调料之一, 是一切生物体维持生命活动所需能量的主要来源<sup>[6]</sup>。糖的添加将会引起淀粉质食品品质的变化, 而这些品质的变化很大程度上取决于糖与淀粉

基金项目: 十三五国家重点研发专项(2016YFD0400401)

Fund: Supported by the National Key Point Research and Invention Program of the Thirteenth (2016YFD0400401)

\*通讯作者: 郑明珠, 博士, 副教授, 主要研究方向为谷物食品开发研究。E-mail: zhengmzhu@163.com

\*Corresponding author: ZHENG Ming-Zhu, Ph.D, Associate Professor, National Engineering Laboratory on Wheat and Corn Further Processing, Changchun 130118, China. E-mail: zhengmzhu@163.com

的相互作用。研究已经证明糖类化合物对糯性谷物淀粉具有良好的促进作用,在食品加工中,能有效提高淀粉使用性能并简化加工工艺,让产品具有良好的稳定性,从而提高产品的品质<sup>[7]</sup>。这是由于糖类化合物的添加可影响糯性淀粉的糊化和老化特性,直接影响到最终产品的质构、口感、稳定性等品质<sup>[8]</sup>,外源添加糖类化合物比传统的方法更加经济、安全和方便。因此,研究糖类化合物对糯性谷物淀粉的影响具有重要的意义,它对提高传统食品质量,改善食品加工工艺和指导新型食品的研究与开发都会起到巨大的推动作用。本文主要针对小分子糖与非淀粉类多糖,综述糖类化合物对淀粉性质的作用机制和影响,以期为后续糖对糯性谷物淀粉影响的研究提供更加完整的理论依据。

## 2 糖类化合物对糯性谷物淀粉的作用机制

### 2.1 小分子糖对糯性谷物淀粉的作用机制

小分子糖类对糯性谷物淀粉的研究主要有单糖一类的葡萄糖、果糖、核糖、木糖和阿拉伯糖等,还有蔗糖、麦芽糖、海藻糖、棉子糖和水苏糖等一类的低聚糖,其影响机制主要可以分为 4 个方面。第一,由于小分子糖的分子量较小,在与淀粉反应过程中能够进入淀粉内部,从而影响淀粉本身的性质;第二,小分子糖与淀粉颗粒表面的水化膜相互作用,进而降低淀粉的水分活度,减少淀粉内部直链淀粉的析出数量<sup>[9,10]</sup>,影响糊化过程;第三,由于小分子糖与淀粉相容性较好,糖分子就可起到类似水分子的作用,对分子链起到一定的稀释作用,能够降低分子链的迁移率<sup>[11]</sup>,对糯性谷物老化性质影响较大;第四,小分子糖可能对淀粉酶产生作用。Ace 等<sup>[12]</sup>研究发现蔗糖对淀粉酶影响远远大于对直链淀粉的影响,由于糯性谷物淀粉基本不含直链淀粉,且小分子糖对淀粉消化作用不明显,相关研究较少,消化机制有待完善。

### 2.2 多糖对糯性谷物淀粉的作用机制

多糖对糯性谷物淀粉的研究主要集中在对多糖类亲水胶体的研究,关于淀粉与胶体的相互作用机制目前没有完全一致的定论,有些研究者认为,在糊化过程中亲水胶体与可溶性直链淀粉能形成氢键,从而提高了整个混合体系的黏度。根据 Shi 等<sup>[13]</sup>的研究发现胶体和淀粉间有 2 种作用形式:一是糊化过程中胶体与淀粉渗漏出的直链分子相互作用,并且会有部分粘连在糊化淀粉颗粒上;二是亲水胶体与淀粉分子相互作用后使体系的溶胀淀粉颗粒分散在亲水性胶体中,可形成连续相与分散相。在糊化过程中胶体与淀粉发生相分离,淀粉颗粒膨胀导致连续相的体积减小,复配体系黏度增大。Mandala 等<sup>[14]</sup>也提出相同的理论。有研究提出非淀粉多糖对淀粉消化性质的影响可能是由于多糖在淀粉基质外围包裹形成一层物理屏障,以减少酶的结合位点来降低酶催化活性<sup>[15]</sup>。

## 3 糖类化合物对糯性谷物理化性质的影响

糯性谷物淀粉与糖类化合物形成混合体系,发生相互作用后会对淀粉的性质造成影响,主要影响糯性谷物淀粉的糊化特性、老化特性及微观结构。

### 3.1 糖类化合物对糯性谷物淀粉糊化性质的影响

淀粉在糊化过程中,淀粉链自身氢键被破坏,水分子与淀粉分子结合形成新的氢键,淀粉颗粒吸水润胀,双螺旋结构打开,结晶区消失,淀粉分子的结构趋向无序化<sup>[16]</sup>。淀粉糊的峰值黏度与淀粉颗粒脆弱性和水结合能力有关<sup>[17]</sup>,糯性谷物淀粉由于直链淀粉含量很少,淀粉颗粒能够迅速膨胀,因此其淀粉糊的糊化温度较低,峰值黏度较高<sup>[18]</sup>。研究表明小分子糖能够破坏淀粉颗粒表面的水化膜,使得水分活度降低,导致直链淀粉溶出减少,糊化温度和黏度升高。Gunaratne 等<sup>[19]</sup>研究发现将葡萄糖和蔗糖添加到糯马铃薯淀粉中可提高混合体系的峰值黏度和最终黏度,且蔗糖的作用效果要优于葡萄糖。Wiktor 等<sup>[20]</sup>研究发现在葡萄糖浆存在的条件下,普通玉米淀粉与蜡质玉米淀粉的糊化温度和峰值黏度均增加,且蜡质玉米淀粉增加速率大于普通玉米淀粉,这是由于蜡质玉米淀粉支链淀粉含量高,所以淀粉膨胀速率较快。Kohyama 等<sup>[21]</sup>研究发现,小分子糖能够升高糯马铃薯淀粉的糊化温度,降低糯马铃薯淀粉的糊化焓值,且蔗糖的作用效果要大于葡萄糖。

非淀粉多糖对糯性谷物淀粉糊化性质的影响研究中, Kim 等<sup>[22]</sup>则探讨了瓜尔胶和黄原胶对糯米淀粉流变特性的影响。实验发现 2 种胶体的添加均增加了淀粉凝胶的表观粘度和稠度系数。淀粉凝胶的储能模量及损耗模量随胶体浓度的升高而增大,而流体特性指数则随黄原胶浓度的增加而减小。与瓜尔胶相比,黄原胶对淀粉凝胶具有较大的动态模量  $W$  及较低的  $\tan\delta$  值。Achayuthakan 等<sup>[23]</sup>研究发现随着黄原胶与瓜尔胶浓度的增加,蜡质玉米淀粉的黏度和成糊温度显著增加,且具有更加优越的动态粘弹性。原因可能是由于蜡质玉米淀粉溶胀颗粒分散在胶体中可形成连续相与分散相,且亲水胶体处于连续相中,淀粉颗粒膨胀导致连续相的体积减小,而胶体的浓度不断增大,因而复配体系黏度增大并且导致升温速率和水分扩散系数减小,糊化温度升高<sup>[24]</sup>。这与 Heyman 等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。

### 3.2 糖类化合物对糯性谷淀粉老化性质的影响

糯性淀粉回生受内因和外因的影响,内因有淀粉的不同来源(植物籽粒)、直链淀粉和支链淀粉的比值<sup>[26]</sup>、水分含量<sup>[27]</sup>等。外在因素则包含不同的处理方式<sup>[28,29]</sup>、储存条件<sup>[30]</sup>及外源添加剂等<sup>[31,32]</sup>。糯性淀粉一般是由支链淀粉组成,支链淀粉具有高支化结构,链间靠拢受到较强的抑制作用,所以糯性谷物淀粉的回生现象一般比非糯性淀粉要进行的缓慢。

研究发现糖类化合物对淀粉的回生现象有一定的抑制作用。马红静<sup>[33]</sup>研究表明添加小分子糖的淀粉凝胶糊化焓值增大, 熔融焓降低, 熔融焓/糊化焓降低, 老化作用受到抑制, 且小分子糖对淀粉凝胶老化抑制的能力为海藻糖>蔗糖>葡萄糖>果糖。宋云平等<sup>[34]</sup>同样发现在含有糯米淀粉、蔗糖的复合体系中, 用海藻糖代替部分蔗糖, 能够有效延缓回生进程, 在不断反复冻融的过程中发现海藻糖可显著抑制淀粉回生。Kohyama 等<sup>[21]</sup>也发现葡萄糖、蔗糖、果糖不仅对糯马铃薯淀粉的糊化性质有影响, 也可以抑制淀粉的回生。Wang 等<sup>[35]</sup>利用差示扫描量热法, X 射线衍射和分子动力学模型研究了不同组成的单糖和二糖对玉米和蜡质玉米淀粉长期回生的影响。DSC 数据显示, 添加糖能够降低体系的糊化焓值, 利用分子动力学模型预测了二糖和淀粉的相互作用, 证实二糖能够降低淀粉的回生。非淀粉多糖能够控制食品体系中水分子流动, 改善食品品质。因此理论上多糖可以应用于淀粉基食品中控制回生。熊小雅<sup>[36]</sup>研究发现, 4 °C 冷藏后经过湿热处理, 蜡质淀粉-瓜尔多胶共混物的  $\Delta T$  值增大,  $\Delta H$  减小, 表明添加瓜尔多胶可以抑制共混物的回生。赵悄然<sup>[37]</sup>与谢新华等<sup>[38]</sup>先后研究了亚麻籽胶对糯米淀粉凝胶老化的影响, 发现淀粉凝胶熔融焓/糊化焓降低, 表明糯米淀粉凝胶老化受到抑制。

### 3.3 糖类化合物对糯性谷物淀粉微观结构的影响

在对淀粉微观结构分析中主要采用扫描电子显微镜观察。马红静<sup>[33]</sup>在小分子糖对糯米淀粉凝胶微观结构研究中发现, 糯米淀粉凝胶反复冻融后, 会在其凝胶表面形成很多凹洞, 淀粉基质会变得疏松。随着冻融的次数增加, 冰晶不断形成和溶解, 会产生一定的微机械力, 这种力会使淀粉分子内部的通道增大, 可溶物会溶出, 进而导致淀粉的表面粗糙不平整<sup>[39]</sup>。而添加葡萄糖、果糖、蔗糖或者海藻糖则可以改善糯米淀粉凝胶的微观结构。相比原淀粉的网络结构, 其中的凹洞会明显变小, 表面变得光滑平整。且海藻糖改善凝胶微结构的效果好于其他小分子糖类。熊小雅<sup>[36]</sup>利用扫描电子显微镜观察到瓜尔多胶能够均匀地粘附在淀粉颗粒表面并且出现颗粒聚集现象, 高直链玉米淀粉颗粒主要呈椭圆形, 有的呈现杆状; 蜡质玉米淀粉则主要为多角形和球形, 且颗粒尺寸比高直链玉米淀粉大。李佳佳<sup>[40]</sup>和 Hsieh 等<sup>[41]</sup>也在研究中表明蜡质淀粉结构大多为椭圆形, 且糯米淀粉颗粒尺寸最小。张斌等<sup>[42]</sup>研究也表明玉米淀粉的相对结晶度随支链淀粉含量降低而减小。

## 4 糖类化合物对糯性谷物淀粉消化性质的影响

糯性谷物淀粉基本由支链淀粉构成, 具有高黏度、易消化的特点。王璐等<sup>[43]</sup>在对糯性食物淀粉消化特性研究中发现无论是怎样的加工与储藏方式, 糯性谷物淀粉食物的消化速率都要高于非糯性谷物淀粉, 因此对于一些需要减

肥和患有高血糖的人们来说应该谨慎食用。研究发现一些非淀粉类多糖能够降低糯性谷物的消化率, 但目前国内外对于其作用机制尚未彻底明确解释说明, 可能是由于非淀粉多糖在淀粉基质外围包裹形成一层物理屏障, 以减少酶的结合位点来降低酶催化活性<sup>[15]</sup>。张宇<sup>[44]</sup>研究得出燕麦  $\beta$ -葡聚糖对体外淀粉消化率有很大影响。燕麦  $\beta$ -葡聚糖分子量和溶液浓度越大, 其降低淀粉消化效果就越好, 表现在血糖指数 (glycemic index, GI) 降低、慢消化淀粉 (slow digestion starch, SDS) 和抗性淀粉 (resistant starch, RS) 含量增加。Jo 等<sup>[45]</sup>在研究壳聚糖对蜡质玉米淀粉晶体稳定和消化稳定性的影响时发现, 在酸性条件下壳聚糖能增强淀粉体系的稳定性和控制淀粉在胃肠道中的消化速率。Dartois 和 Bordoloi 等<sup>[46,47]</sup>先后进行了瓜尔豆胶影响蜡质玉米淀粉和马铃薯淀粉消化性的研究, 结果表明瓜尔豆胶能显著地降低 2 种淀粉的消化速度和程度。

## 5 其他影响

来源于不同谷物的淀粉、糖的种类及添加量、处理的方法都会影响糖与淀粉的相互作用, 使淀粉的性质发生改变。不同谷物来源的淀粉其支链淀粉的含量和分子聚合度也不尽相同, 而淀粉分子聚合度在 80~100 时有最快的老化速率。有研究表明, 由于糖分子可以通过羟基稳定水分子的结构, 作用强度与糖的动力学水化数量保持一致。而糖中动力学水化数量又与糖分子中平伏键羟基的平均数量有一个良好的线性关系, 因此不同种类的糖与不同类型的淀粉之间发生的作用也不尽相同<sup>[48]</sup>。也有文献报道糖分子与水分子的结合能力与糖的分子量与立体结构相关, 糖分子越小, 越易与水分子相结合<sup>[49]</sup>。

淀粉与糖相互作用中还受到水分、处理方式、酸碱条件等因素影响。余世锋等<sup>[50]</sup>研究发现水分的调节能够有效控制糯玉米淀粉糊化过程中结晶特性的变化。水分含量较高时, 淀粉凝胶的结晶度就会相对较低, 这可能是由于糊化过程中水分子与淀粉颗粒中淀粉分子充分接触致使淀粉颗粒崩解和结晶特性破坏所致。冷雪<sup>[51]</sup>利用柠檬酸和碳酸氢钠调节体系的 pH, 发现柠檬酸能抑制小米淀粉糊化, 而碳酸氢钠促进体系糊化。

## 6 结 论

从糖类化合物对糯性谷物淀粉品质的影响中发现, 小分子糖类和淀粉类多糖都能提高糯性谷物淀粉的糊化温度、峰值黏度, 抑制淀粉的长期回生, 影响淀粉的微观结构, 并且非淀粉类多糖能够降低糯性谷物淀粉的消化率。由于糯性谷物淀粉支链淀粉含量较高, 其特殊的晶体结构与糊化过程, 使得部分糖类对其作用不明显, 所以不能一概而论。而且糖的种类, 淀粉的来源, 处理方式等方

面的差异性,都会影响淀粉的理化性质。因此糖类化合物与糯性谷物淀粉的作用机制仍需完善。

### 参考文献

- [1] 张正茂, 阚玲, 王丽. 不同糯性谷物淀粉性质的比较研究[J]. 现代食品科技, 2019, 35(1): 51-57, 43.  
Zhang ZM, Kan L, Wang L. Comparative studies on the properties of starches from different waxy/glutinous cereals [J]. Mod Food Sci Technol, 2019, 35(1): 51-57, 43.
- [2] Chao-Feng H, Liu WC, Judith K. Structure, properties, and potential applications of waxy tapioca starches—A review [J]. Trend Food Sci Technol, 2019, (83): 225-234
- [3] Zhang HX, Zhang W, Xu CZ, *et al.* Studies on the rheological and gelatinization characteristics of waxy wheat flour [J]. Int J Biol Macromol, 2014, 64(2): 123.
- [4] Amparo MT, Julia RG, Ezequiel M. Commercial thickeners used by patients with dysphagia: Rheological and structural behaviour in different food matrices [J]. Food Hydrocoll, 2015, (51): 318-326.
- [5] Alcázar-Alay SC, Almeida MMA. Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources [J]. Food Sci Technol (Campinas), 2015, 35(2): 215-236.
- [6] 刘红梅, 刘聚胜. 功能性低聚糖的研究及在食品中的应用现状[J]. 轻工科技, 2012, 28(4): 15-16, 19.  
Liu HM, Liu JS. Research on functional oligosaccharides and their application status in food [J]. Light Ind Sci Technol, 2012, 28(4): 15-16, 19.
- [7] Lucia P, Amalia C, Matteo DN. Overview on the general approaches to improve gluten-free pasta and bread [J]. Foods, 2016, 5(4): 87-90.
- [8] Mahmood K, Kamilah H, Shang PL, *et al.* A review: Interaction of starch/non-starch hydrocolloid blending and the recent food applications [J]. Food Biosci, 2017, (10): S2212429217300950.
- [9] Chiun CR, Wang PY, Chiang PH. Physicochemical properties of water caltrop (*Trapa taiwanensis* Nakai) starch at different growth time [J]. Carbohydr Polym, 2008, (71): 310-315.
- [10] Perry PA, Donald AM. The effect of sugars on the gelatinisation of starch [J]. Carbohydr Polym, 2002, (49): 155-165.
- [11] 孟祥艳. 淀粉老化机理及影响因素的研究[J]. 食品工程, 2007, (2): 60-63.  
Meng XY. Study on retrogradation mechanism and influencing factors of starch retrogradation [J]. Food Eng, 2007, (2): 60-63.
- [12] Aee LH, Hie KN, Nishinari K. DSC and rheological studies of the effects of sucrose on the gelatinization and retrogradation of acorn starch [J]. Thermochimica Acta, 1998, 322(1): 39-46.
- [13] Shi X, Bemiller JN. Effects of food gums on viscosities of starch suspensions during pasting [J]. Carbohydr Polym, 2002, 50(1): 7-18.
- [14] Mandala I, Bayas E. Xanthan effect on swelling, solubility and viscosity of wheat starch dispersions [J]. Food Hydrocolloid, 2004, 18(2): 191-201.
- [15] 刘璐. 非淀粉多糖对淀粉消化性的影响及其作用机制[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.  
Liu L. The effect and mechanisms of non-polysaccharides on starch digestibility [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.
- [16] Rini Y, Shoichi G. Dispersion characteristics of pregelatinized waxy rice starch and its performance as an emulsifier for oil-in-water emulsions: Effect of gelatinization temperature and starch concentration [J]. Food Hydrocolloid, 2018. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.12.013.
- [17] Copeland L, Blazek J, Salman H, *et al.* Form and functionality of starch [J]. Food Hydrocolloid, 2009, 23(6): 1527-1534
- [18] Šárka A, Evžen DV. New processing and applications of waxy starch (a review) [J]. J Food Eng, 2017, (206): 77-87.
- [19] Gunaratne A, Ranaweera S, Corke H. Thermal, pasting and gelling properties of wheat and potato starches in the presence of sucrose, glucose, glycerol and hydroxypropyl  $\beta$ -cyclodextrin [J]. Carbohydr Polym, 2007, 70(1): 112-122.
- [20] Wiktor B, Rafał Z. Pasting and gel characteristics of normal and waxy maize starch in glucose syrup solutions [J]. J Cere Sci, 2018, (79): 253-258.
- [21] Kohyama K, Nishinari K. Effect of soluble sugars on gelatinization and retrogradation of sweet potato starch [J]. J Agric Food Chem, 2002, 39(8): 1406-1410.
- [22] Kim DD, Lee YS, Yoo B. Rheological properties of waxy rice starch-gum mixtures in steady and dynamic shear [J]. J Food Sci Nutr, 2009, 14(3): 233-239.
- [23] Achayuthakan P, Suphantharika M. Pasting and rheological properties of waxy corn starch as affected by guar gum and xanthan gum [J]. Carbohydr Polym, 2008, 71(1): 9-17.
- [24] Piyada A, Manop S. Pasting and rheological properties of waxy corn starch as affected by guar gum and xanthan gum [J]. Carbohydr Polym, 2007, 71(1): 9-17.
- [25] Heyman B, De-Vos WH, Depypere F, *et al.* Guar and xanthan gum differentially affect shear induced breakdown of native waxy maize starch [J]. Food Hydrocolloid, 2014, (35): 546-556.
- [26] Yu S, Ma Y, Sun DW. Impact of amylose content on starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage [J]. J Cere Sci, 2009, 50(2): 139-144. Doi:10.1016/j.jcs.2009.04.003
- [27] Zhou X, Wang R, Yoo SH. Water effect on the interaction between amylose and amylopectin during retrogradation [J]. Carbohydr Polym, 2011, (86): 1671-1674.
- [28] Na J, Shengju G, Man L. Effect of annealing on the structural and physicochemical properties of waxy rice starch nanoparticles: Effect of annealing on the properties of starch nanoparticles [J]. Food Chem, 2019, (286): 17-21.
- [29] 王立东, 寇芳, 刘婷婷. 气流超微粉碎对蜡质玉米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 高分子通报, 2017, (2): 56-63.  
Wang LD, Kou F, Liu TT. Effects of ultrafine pulverization on the structure and physicochemical properties of waxy corn starch [J]. Polym Bull, 2017, (2): 56-63.
- [30] Xie YY, Hu XP, Jin ZY, *et al.* Effect of temperature-cycled retrogradation on in vitro digestibility and structural characteristics of waxy potato starch [J]. Int J Biol Macromol, 2014, (67): 79-84.
- [31] Qiu C, Li X, Ji N, *et al.* Rheological properties and microstructure characterization of normal and waxy corn starch dry heated with soy protein isolate [J]. Food Hydrocolloid, 2015, (48): 1-7. Doi:10.1016/j.foodhyd.2015.01.030
- [32] Wang W, Zhou H, Yang H, *et al.* Effects of salts on the gelatinization and retrogradation properties of maize starch and waxy maize starch [J]. Food

- Chem, 2017, (214): 319–327.
- [33] 马红静. 小分子糖对糯米淀粉糊化特性和质构特性的影响研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- Ma HJ. Study on the effect of low molecular weight sugars on pasting and texture properties of waxy rice starch [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015.
- [34] 宋云平, 宫衡, 傅水林, 等. 海藻糖对淀粉回生抑制作用的研究[J]. 食品科学, 2005, 26(10): 94–98.
- Song YP, Gong H, Fu SL, *et al.* Study on the inhibition of *Trehalose* on starch retrogradation [J]. Food Sci, 2005, 26(10): 94–98.
- [35] Wang L, Xu J, Fan XR. Effect of disaccharides of different composition and linkage on corn and waxy corn starch retrogradation [J]. Food Hydrocolloid, 2016, (61): 531–536.
- [36] 熊小雅. 淀粉—半乳甘露聚糖复合物的消化性及理化特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- Xiong XY. Study on digestibility and physicochemical properties of starch-galactomannan complexes [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [37] 赵悄然. 亚麻籽胶和罗望子胶对糯米淀粉性质影响研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
- Zhao QR. Study on the effect of linseed gum and tamarind gum on the properties of glutinous rice starch [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016.
- [38] 谢新华, 赵悄然, 朱鸿帅, 等. 亚麻籽胶对糯米淀粉凝胶冻融稳定性的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(8): 52–56.
- Xie XH, Zhao QR, Zhu HS, *et al.* Effect of flaxseed gum on freeze-thaw stability of glutinous rice starch gel [J]. J Chin Cere Oils Assoc, 2017, 32(8): 52–56.
- [39] 严娟, 杨哪, 焦爱权, 等. 冻融对糯米淀粉性质的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(24): 109–112.
- Yan J, Yang N, Jiao AQ, *et al.* Effect of freezing and thawing on the properties of glutinous rice starch [J]. Food Ind Technol, 2012, 33(24): 109–112.
- [40] 李佳佳, 卢未琴, 高群玉. 不同链淀粉含量玉米微晶淀粉理化性质研究[J]. 粮食与油脂, 2011, (2): 13–17.
- Li JJ, Lu WQ, Gao WQ. Studies on physicochemical properties of microcrystalline starches made from different content of amylose [J]. Cere Oils, 2011, (2): 13–17.
- [41] Hsieh CF, Liu WC, Judith K. Structure and functional properties of waxy starches [J]. Food Hydrocolloid, 2019, (94): 238–254.
- [42] 张斌, 罗发兴, 黄强, 等. 不同直链含量玉米淀粉结晶结构及其消化研究[J]. 食品与发酵工业, 2010, (8): 26–30.
- Zhang B, Luo FX, Huang Q, *et al.* Study on crystal structure and digestibility of different linear content corn starch [J]. Food Ferment Ind, 2010, (8): 26–30.
- [43] 王璐, 范志红, 史海燕, 等. 几种糯性食物的淀粉消化特性[J]. 食品科学, 2010, 31(17): 359–363.
- Wang L, Fan ZH, Shi HY, *et al.* Starch digestion characteristics of several waxy cereal foods [J]. Food Sci, 2010, 31(17): 359–363.
- [44] 张宇. 燕麦  $\beta$ -葡聚糖对淀粉消化吸收和血糖的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- Zhang Y. Study on the effect of oat  $\beta$ -glucan on starch digestion, glucose adsorption and blood sugar [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [45] Jo M, Ban C, Goh KKT, *et al.* Influence of chitosan-coating on the stability and digestion of emulsions stabilized by waxy maize starch crystals [J]. Food Hydrocolloid, 2019. Dio: 10.1016/j.foodhyd.2019.04.010.
- [46] Dartois A, Singh J, Kaur L, *et al.* Influence of guar gum on the in vitro starch digestibility—rheological and microstructural characteristics [J]. Food Biophys, 2010, (5): 149–160.
- [47] Bordoloi A, Singh J, Kaur L. *In vitro* digestibility of starch in cooked potatoes as affected by guar gum: microstructural and rheological characteristics [J]. Food Chem, 2012, (133): 1206–1213.
- [48] 李莎. 盐糖复合对淀粉功能性质的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2017.
- Li S. Co-effect of salt and sugar on the functional properties of starch [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2017.
- [49] 周建芹, 姜邵通, 潘丽军, 等. 淀粉糊老化研究及应用[J]. 郑州工程学院学报, 2002, 23(4): 80–84.
- Zhou JQ, Jiang ST, Pan LJ, *et al.* Starch paste aging research and application [J]. J Zhengzhou Inst Technol, 2002, 23(4): 80–84.
- [50] 余世锋, 刘梦, 高帅, 等. 水分对糯性玉米淀粉凝胶微观结构的影响[J]. 食品工业, 2017, 38(5): 190–192.
- Yu SF, Liu M, Gao S, *et al.* Effects of moisture content on the microstructural characteristics of waxy corn starch gel [J]. Food Ind, 2017, 38(5): 190–192.
- [51] 冷雪. NaCl、蔗糖及 pH 对小米淀粉和小米粉的糊化及老化特性影响的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- Leng X. Effects of NaCl, sucrose and pH on the Gelatinization and aging characteristics of millet starch and millet flour [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015.

(责任编辑: 陈雨薇)

## 作者简介



林楠, 硕士, 主要研究方向为粮食深加工。

E-mail: 1711300012@qq.com



郑明珠, 博士, 副教授, 主要研究方向为谷物食品开发研究。

E-mail: zhengmzhu@163.com