

糯玉米淀粉的理化性质及其在食品中的应用研究进展

娄海伟,王媛,赵仁勇*

河南工业大学粮油食品学院,河南郑州450001

摘要:糯玉米作为一种高营养价值的谷物,是普通玉米在自然生长过程中经过突变而形成的独特品种,其中支链淀粉含量在95%以上。天然糯玉米淀粉具有峰值黏度高、溶胀力强、抗老化、透明度高且易消化等优势特性,具有较大的应用潜力,然而糯玉米淀粉在食品中的应用却十分局限,因此探究糯玉米淀粉的理化性质,拓展其在食品中的应用成为糯玉米的研究方向。对糯玉米的起源、淀粉的合成机制及其优质特性进行了概述,总结了近年糯玉米淀粉在面制品、脂肪替代物、乳状液、增稠剂和微胶囊材料等方面的应用研究进展。同时,还探讨了糯玉米淀粉未来的发展方向和应用领域,为其创新发展和产业升级奠定理论基础。

关键词:糯玉米;淀粉;面制品;脂肪替代物;乳状液;微胶囊

中图分类号:TS231

文献标志码:A

文章编号:1673-2383(2023)03-0120-09

DOI:10.16433/j.1673-2383.2023.03.016

Research advances on physicochemical properties of waxy corn starch and its application in food

LOU Haiwei, WANG Yuan, ZHAO Renyong*

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

Abstract: Waxy corn is a grain with high nutritional value, and it is a unique variety formed by mutation of normal corn during natural growth. The content of amylopectin in waxy corn starch is more than 95%. Natural waxy corn starch has great application potential due to its advantageous properties such as high peak viscosity, high swelling power, anti-aging, high transparency and easy digestion. However, the application of waxy corn starch in food is very limited. Therefore, it has become the development trend of waxy corn to expand the application of waxy corn starch in food based on the physicochemical properties of waxy corn starch. Based on this, the origin of waxy corn, the synthesis mechanism of waxy corn starch and its high-quality characteristics were reviewed in this paper. The research on the application of waxy corn starch in flour products, fat substitutes, emulsions, thickeners and microcapsule materials in recent years was summarized. In addition, the future development direction and application fields of waxy corn starch were also discussed, which laid a theoretical foundation for the innovative development and industrial upgrading of waxy corn starch.

Key words: waxy corn; starch; flour products; fat substitutes; emulsion; microcapsules

根据联合国粮食及农业组织公布的最新数据,1961—2020年,全球的玉米产量从2.05亿t

收稿日期:2022-06-14

基金项目:河南省现代农业产业技术体系建设专项资金项目(HARS-22-02-G5);河南工业大学高层次人才科研基金项目(2020BS001);河南工业大学科技创新基金支持计划项目(2021ZKCJ12)

作者简介:娄海伟(1983—),男,河南开封人,博士,讲师,研究方向为粮食资源转化与利用。

*通信作者:赵仁勇,教授,博导,E-mail:zry8600@126.com。

增至 11.63 亿 t^[1],玉米作为优质的粮食作物得到了迅速的发展。根据国家统计局发布的数据显示,1978 年我国的玉米年产量仅为 5 595 万 t;2021 年我国的玉米年产量增至 2.7 亿 t,显著高于小麦(年产量 1.4 亿 t)和稻谷(年产量 2.1 亿 t)^[2],玉米已成为我国重要的粮食作物之一。我国的玉米种类繁多,由于直链淀粉含量的差异,被分为糯玉米、普通玉米和高直链玉米^[3]。近些年来,糯玉米因其独特的口感品质,深受消费者的喜爱。

糯玉米是由普通玉米经自然突变并通过人工筛选得到的品种^[4],其胚乳呈无光泽的蜡质状,又被称为蜡质玉米^[5],与碘液反应呈棕红或褐红色,蒸煮口感黏糯香甜^[6]。糯玉米淀粉几乎完全由支链淀粉构成,具有较高的食用品质和使用价值。目前,糯玉米淀粉大多被用于制作变性淀粉,通过物理^[7]、化学^[8]或生物^[9]等方式对淀粉进行处理,有助于推动糯玉米淀粉产业的发展。但是食品法规对变性淀粉的要求十分严格,基于天然、绿色、食用安全的考虑,越来越多的消费者更倾向于选择天然糯玉米淀粉。糯玉米淀粉的性能及用途尚未被完全发掘,其产业发展缓慢,基于国家“释放新需求、创造新供给”的食品科技创新政策,有必要深入研究天然糯玉米淀粉的理化特性并探索其合适的应用领域,对其产业发展具有推动作用,为其高值化利用奠定理论基础。

1 糯玉米的起源及其淀粉的合成机制

1908 年,糯玉米作为优质的种质资源在我国首次被发现^[10],大多数分布于西南部及中原地区^[11-12],其中在西双版纳等地区种植的四路糯、紫秆糯及曼金兰黄糯等品种较为原始。随着人们对糯玉米接受度的提高,我国扩大了对糯玉米的繁育,培育出众多的糯玉米品种,其中根据胚乳的颜色可分为黑糯、紫糯、花糯、白糯、黄糯玉米等^[13]。在营养方面,糯玉米中的赖氨酸和色氨酸的含量较高,具有良好的生理功能^[14],并且胚乳中高含量的支链淀粉易被人体消化吸收^[15]。糯玉米除了被用于制作鲜食玉米外,还被用于制作糯玉米淀粉(Waxy corn starch, WCS),WCS 具有较强的黏性、溶胀性和抗老化性等特点,因此,糯玉米作为高品质谷物具有巨大的商业价值和发展潜力^[16]。

糯玉米淀粉独特的理化性质与其高含量的支链淀粉构成有关,其中支链淀粉的合成受隐性蜡质基因(*wx*)的控制,隐性纯合子(*wxwx*)存在时胚乳中支链淀粉含量几乎达到 100%。支链淀粉的形成是一个复杂的生化过程,基因直接调控糯玉米中淀粉合成酶的丰度,进一步调控支链淀粉的含量,其中淀粉合成酶(Starch synthase, SS)和分支酶(Starch branching enzymes, SBE)协同控制支链淀粉的合成,主要通过切断淀粉分子链上的 α -(1,4)-糖苷键并连接上 α -(1,6)-糖苷键合成支链淀粉,如果 SS 的基因丧失或被突变就会导致支链淀粉含量下降。玉米的蜡质基因位于 9 号染色体,其中突变体 *wx-7* 的 *wx* 基因的外显子 7 尾端的碱基缺失,导致基因的表达受阻,使颗粒结合型淀粉合成酶(Granule-Bound starch synthase I, GBSS I)的活性丧失,阻碍了 GBSS I 催化 ADP-葡萄糖合成直链淀粉,使支链淀粉的含量提高^[17-20]。糯玉米淀粉的糯性不仅受基因的控制,还受外部环境的影响,为了提高糯玉米淀粉的纯度,需使糯玉米与其他玉米品种保持安全的种植距离。

2 糯玉米淀粉的结构和理化性质

2.1 糯玉米淀粉的组成与结构

糯玉米淀粉是通过糖苷键连接而成的一种天然生物大分子^[21],几乎完全由支链淀粉组成^[22]。支链淀粉呈高度分支化的复杂结构^[23-24],由 A 链、B 链和 C 链组成^[25],其中 A 链是一条单独的无分支的淀粉链,通过 α -(1,6)-糖苷键连接在 B 链上;B 链携带一个或多个 A 链,其结构多种多样,是淀粉结构的核心;每个大分子含有一个 C 链,拥有淀粉链中唯一的还原性末端^[26-27]。支链淀粉参与淀粉结晶和无定形结构的形成,被分为外链和内链^[28],外链呈双螺旋结构进而形成结晶薄层,内链呈无定形状态从而形成非晶态层^[29]。糯玉米淀粉内部呈“年轮”般的生长环结构,各层轮纹以一个“脐”为中心环绕,其中生长轮的数量和大小取决于淀粉的结构^[30],链长影响淀粉的糊化、消化和老化等特性^[31]。

2.2 糯玉米淀粉的理化性质

2.2.1 糯玉米淀粉的糊化特性

对淀粉溶液加热时,温度升高可使水渗透入淀粉颗粒的速度加快,促进淀粉吸水膨胀,导致

部分分子链从淀粉颗粒中溶出,淀粉颗粒在不断地吸水中破裂,从而改变淀粉溶液的黏度,这一过程称为淀粉的糊化,即天然淀粉颗粒失去规则的晶体结构,形成无定形分散状态的过程^[32-33]。支链淀粉呈高度分化的树枝状,水分子易渗透入淀粉颗粒的内部,在糊化过程中能够快速吸水膨胀,糯玉米淀粉膨胀的体积是普通玉米淀粉的2.7倍以上^[34]。糯玉米淀粉的糊化特性显著影响食品品质,Wang等^[35]研究发现糯玉米淀粉具有糊化温度低、溶胀快和峰值黏度高等特点,可以改善面条的蒸煮特性,提高其弹性和咀嚼性。淀粉的糊化特性亦会影响面制品的水合作用和黏弹性^[36],Van Hung等^[37]发现交联糯玉米淀粉能够降低复配粉的糊化温度和峰值温度,提高最终黏度,可用于改善面团或面包的柔软性。因此,基于糯玉米淀粉易糊化、峰值黏度高、持水性强等优势特性,可用于提升食品的品质。

2.2.2 糯玉米淀粉的老化特性

面制品的老化是普遍存在的现象,会引起面包、馒头等食物的表皮干裂、体积缩小以及水分流失等问题^[38-40]。在储存过程中,面制品品质的变化与淀粉的结构和性质有密切关系,糊化后的淀粉颗粒在冷却阶段会重新排列并形成结晶^[41],结晶的出现提升了重组淀粉颗粒的刚性和硬度^[42]。因此,面制品在储存过程中会逐渐失水、变硬并掉渣,口感品质下降。

淀粉的老化分为直链淀粉的短期老化和支链淀粉的长期老化,高度分支化的支链淀粉具有回生值低^[43]、抗老化能力强,糯玉米淀粉中支链淀粉含量较高,适宜添加于面制品中以延缓面制品的老化。Xiao等^[44]发现脱支糯玉米淀粉有助于抑制普通玉米淀粉的短期老化;顾娟等^[45]发现糯玉米淀粉可以降低汤圆粉的沉降值,减缓汤圆的老化。因此,糯玉米淀粉可用于延缓面制品的老化,改善食品的储藏稳定性。

2.2.3 糯玉米淀粉的透明度

淀粉的透明度是影响淀粉用途的重要指标^[46]。随着时代的发展,饮食习惯也发生了改变,越来越多的消费者倾向于食用外观独特的产品,因此商家推出了高透明度的食品来迎合消费者的需求,如粉皮、粉条、水晶虾饺和水晶汤圆等。由于糯玉米淀粉具有易糊化的特性,淀粉颗粒在水中迅速膨胀,形成均匀的淀粉溶液,可降低光的反射和折射。直链淀粉分子链之间容易缔合形成折叠的构象,光透过淀粉溶液的程度降

低^[47],而高度分支化的支链淀粉较难缔合,使糯玉米淀粉溶液呈现透亮的状态,因此其透明度较高。由于糯玉米淀粉具有较强的持水性和较高的糊化黏度,支链淀粉不易与水发生分层,储藏一段时间后淀粉溶液仍具有较高的透明度。因此,糯玉米淀粉适宜应用于对透明度有一定需求的食品。

2.2.4 糯玉米淀粉的消化性

人体每日摄入的碳水化合物大多来源于面制品,淀粉在人体的消化和吸收中占据重要的地位^[48]。在胃和肠道中,淀粉的水解效率与淀粉的颗粒大小、表面结构、直链淀粉和支链淀粉的含量有关^[49],颗粒小且表面存在孔洞结构的淀粉水解效率较高。相比于直链淀粉,支链淀粉的分子量大、结构分散且不易聚集、高度分支化、具有较大的比表面积,容易被淀粉酶水解,易于被人体消化吸收。糯玉米淀粉具有较高的支链淀粉含量,消化率为80%~90%^[50],适宜于营养需求较高的婴幼儿及肠胃功能较弱的人群。

2.2.5 糯玉米淀粉的冻融稳定性

当今冷冻速食行业发展迅速,人们对预加工即食食品的需求量增大,其中许多预加工面制品被冷冻后出售。然而在冷冻时,水分会在食物基质中形成聚集性的大冰晶;解冻时,水分又非常容易从致密的网络结构中析出,导致面制品失水、软化,从而影响产品的品质^[51],因此含有淀粉的食品,在加工、运输、保藏和销售中经过多次冷冻及解冻过程,食品的品质下降^[52]。糯玉米淀粉具有较强的持水性和冻融稳定性,在多次冻融过程中仍然保持较高的稳定性,因此,糯玉米淀粉适宜应用于冷冻食品行业。

3 糯玉米淀粉在食品中的应用

糯玉米淀粉具有峰值黏度高、回生值低、透明度和消化率高、冻融稳定性强等优势特性^[53],具有较好的应用价值。淀粉对食品品质的影响十分显著,如峰值黏度高的糯玉米淀粉可用于制作食品的馅料,使内馅不易松散;回生值低的糯玉米淀粉可提高食品的储藏稳定性,延缓面包和糕点的老化^[54];持水性好的糯玉米淀粉可提高乳剂^[55]、酱汁^[56]、果酱^[57]和色拉汁等乳状液的细腻度;糯玉米淀粉的易消化吸收的特性,有益于婴幼儿食品的开发等^[58]。以下将进一步阐述糯玉米淀粉在面制品、脂肪替代物、乳状液及增稠

剂等方面的应用研究进展,为推动糯玉米淀粉产业的发展提供理论基础。

3.1 糯玉米淀粉在面制品中的应用

糯玉米淀粉应用于发酵面制品时,在面团醒发和蒸制的过程中能够很好地保持住气体,使发酵面制品的体积增大,同时也可以提高产品的柔软度和蓬松度等^[54,59]。但目前大多数研究是关于变性糯玉米淀粉的应用,如 Dapcevic-Hadnadev 等^[60]发现辛烷基琥珀酸糯玉米淀粉能够提高淀粉凝胶的黏性及弹性,增加面团的延展性和面包芯的柔软度。

糯玉米淀粉应用于非发酵面制品时,可有效改善面团的硬度和回复性,提升产品的感官品质和蒸煮品质等^[61]。如 Guo 等^[16]发现糯玉米淀粉较糯米粉具有更好的冻融稳定性、更高的糊化黏度和更慢的凝沉速率,可替代糯米粉应用于汤圆、糯米团和年糕等速冻黏性面制品中。Yu 等^[62]发现糯玉米淀粉可提高面条爽滑、筋道的口感,也能够提高方便面的复水性等;侯汉学等^[63]发现羟丙基磷酸交联糯玉米淀粉可改善面团的流变学性能,降低面条的溶出率。因此,糯玉米淀粉在面制品中具有较好的应用前景。

3.2 糯玉米淀粉作为脂肪替代物的应用

为了满足消费者对脂肪质地和口感的需求,食品行业使用具有独特质地和风味口感的功能性脂肪替代物来降低食品中的热量,以避免高脂饮食造成的健康问题^[64]。Abu-Hardan 等^[65]发现糯玉米淀粉和脂肪的复合物可以作为脂肪替代物应用于食品中,并且不会因为脂肪含量的降低而出现食品口感下降的问题,为低脂食品的开发提供了新的原料支持。Heydari 等^[66]发现使用高压处理后的糯玉米淀粉替代低温乳剂中的脂肪,可以有效地提高乳剂的 Zeta 电位、硬度以及稠度等,也可以降低乳剂的平均粒径和分散指数。此外,添加糯玉米淀粉不仅能够提高乳剂的稳定性,还可降低 50% 的脂肪含量。Garzoan 等^[67]采用糯玉米淀粉-脂质复合物制备曲奇饼干,有效降低了起酥油的添加量。Diamantino 等^[68]发现辛烷基琥珀酸糯玉米淀粉可以提高脱脂干酪的水分含量,改善其口感质地。以糯玉米淀粉作为脂肪替代物,可为患有肥胖症和心血管疾病的人群提供低脂、低能量的食物,也有助于普通人群远离高脂饮食引发的疾病。

3.3 糯玉米淀粉在乳状液和食品增稠剂中的应用

两种互不相溶的液体混合形成的分散体系

为乳状液,如蚝油、沙拉酱和蛋黄酱等^[69],在这些产品的加工过程中,常需要添加增稠剂、乳化剂等来提高分散体系的稳定性。Xu 等^[70]发现小颗粒的淀粉能提升空间位阻效应,改变界面性质。Pickering 乳液是一种通过添加固体颗粒来提高稳定性的乳状液^[71],使用辛烯基琥珀酸糯玉米淀粉和壳聚糖,可以在 pH 6.5 条件下稳定 Pickering 乳液,使其具有较高的浊度、表观黏度和热稳定性。Jo 等^[72]发现辛烯基琥珀酸糯玉米淀粉可有效提高体系的稳定性,尤其是中性或碱性条件下,不会对胃肠道产生损伤。Jo 等^[73]利用辛烯基琥珀酸糯玉米淀粉制备白藜芦醇乳剂,提高了白藜芦醇的消化性和酸性条件下的乳剂稳定性,增强了白藜芦醇的生物可及性。糊化后的糯玉米淀粉具有较高的峰值黏度,可以改善乳状液的稳定性。Bortnowska 等^[55,74]发现糯玉米淀粉对酱汁的增稠效果显著优于马铃薯淀粉,对开发高品质酱汁具有重要的意义。Costa 等^[75]发现 4% 的糯玉米淀粉添加量可以提高益生菌发酵的大米副产物的稠度,据此研发出了一款口感与营养较好的酸奶类制品。因为糯玉米淀粉能够显著提高乳状液的稳定性并增加乳状液的稠度,所以糯玉米淀粉在乳状液、增稠剂等领域具有很大的应用潜力。

3.4 糯玉米淀粉作为微胶囊材料的应用

微胶囊技术用于保护和缓释微胶囊内的成分,其中微胶囊由壁材和芯材组成,在食品中,壁材通常被用于包裹固体饮料、风味调味品和色素等。壁材的选择需要考虑其物理化学性能,虽然糯玉米淀粉具有较好的透明度和成膜性,但天然糯玉米淀粉直接作为生物活性物质的缓释材料仍具有一定的局限性,因此常采用变性糯玉米淀粉作为微胶囊的壁材。如薛军^[34]发现双重酯化糯玉米淀粉微胶囊产品的表面结构较稳定,较好地保护了芯材物质 V_E 。雷欣欣等^[76]使用羟丙基-辛烯基改性糯玉米淀粉制备壁材,将油脂包裹在其中,壁材表面的油脂含量下降,提高了包油能力。糯玉米淀粉也是很好的芯材材料,如 Park 等^[77]采用海藻酸钠包裹糯玉米淀粉,降低了糯玉米淀粉的消化速率,制备的微胶囊适用于高血糖和高血压等人群。糯玉米淀粉既可以作为微胶囊的壁材也可以作为微胶囊的芯材,对糯玉米淀粉产业链的延长具有重要意义。

3.5 糯玉米淀粉与食用胶体结合的应用

糯玉米淀粉可以与食用胶体形成稳定的混

合体系。Liu 等^[78]发现糯玉米淀粉与卡拉胶形成了稳定的水凝胶结构,卡拉胶通过吸附周围的水分来促进淀粉分子间的相互作用,从而获得更强的网络结构。Sahin 等^[79]发现糯玉米淀粉可以与瓜尔豆胶、阿拉伯胶或卡拉胶制作无蔗糖点心,有效提高点心的内聚性和硬度等感官品质。

4 总结与展望

糯玉米作为一种优质的谷物,其淀粉具有独特的品质,但目前糯玉米淀粉的发展十分缓慢,在国家食品科技创新的新政策背景下,很有必要了解糯玉米淀粉的理化性质和糯玉米淀粉在食品中的应用。基于此,首先简述了糯玉米的起源和糯玉米淀粉的合成机制;其次阐述了糯玉米淀粉的优势特性对食品品质的影响,并分析了其糊化特性、老化特性、透明度和消化性等,对维持食品内部结构的稳态、延缓面制品的老化、提高食品的透明度和口感品质等方面具有重要的意义;最后总结了糯玉米淀粉在食品中的应用研究,有助于进一步推动糯玉米淀粉产业的发展,为糯玉米淀粉的高值化利用开辟新途径,为糯玉米淀粉的可持续发展奠定理论基础。

随着时代的发展和进步,糯玉米及其淀粉在食品行业中迅速发展并占据重要地位,但仍存在一些问题:(1)培育支链淀粉纯度更高的糯玉米品种;(2)探索绿色、安全且高效的糯玉米淀粉提取新技术,以期提高糯玉米淀粉的提取率;(3)挖掘糯玉米淀粉的优势特性;(4)基于糯玉米淀粉的理化性质,进一步拓展其应用领域,开发更多的糯玉米淀粉产品,满足不同消费者的需求,如具有良好抗老化性的面制品、具有良好冻融稳定性的冷冻食品等;(5)拓展糯玉米淀粉的应用领域,如化妆品、药物的胶囊壳等。

参考文献:

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food and Agriculture Organization Statistics [EB/OL]. [2023-03-19]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.

[2] 国家统计局. 主要农作物产品产量[EB/OL]. [2023-03-19]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.

[3] NUSS E T, TANUMIHARDJO S A. Maize: a paramount staple crop in the context of global nutrition [J]. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 2010, 9(4): 417-436.

[4] 鲍坚东. 中国糯玉米起源与育种选择分子机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[5] GU W, YU D S, GUAN Y, et al. The dynamic transcriptome of waxy maize (*Zea mays* L. *sinensis* Kulesh) during seed development [J]. *Genes & genomics*, 2020, 42(9): 997-1010.

[6] 姚宗国, 李汉文, 张学艳. 浅谈糯玉米的开发利用[J]. *天津农林科技*, 2004(4): 30-31.

[7] ZHAO X, WANG Y, LI D, et al. Insight into the biphasic transition of heat-moisture treated waxy maize starch through controlled gelatinization [J]. *Food chemistry*, 2021, 341: 128214.

[8] TANG H B, LV X L, LI Y P, et al. Dialdehyde oxidation of cross-linked waxy corn starch: optimization, property and characterization [J]. *Arabian journal for science and engineering*, 2021, 46(1): 247-256.

[9] ZHANG H, CHEN Z X, ZHOU X, et al. Anti-digestion properties of amylosucrase modified waxy corn starch [J]. *International journal of biological macromolecules*, 2018, 109: 383-388.

[10] LUO M J, SHI Y X, YANG Y, et al. Sequence polymorphism of the waxy gene in waxy maize accessions and characterization of a new waxy allele [J]. *Scientific reports*, 2020, 10(1): 1-10.

[11] 李玉军, 刘婷婷, 张泽志. 糯玉米起源、研究及发展概况[J]. *耕作与栽培*, 2010(3): 52-53, 63.

[12] YU R H, WANG Y L, SUN Y, et al. Analysis of genetic distance by SSR in waxy maize [J]. *Genetics and molecular research*, 2012, 11(1): 254-260.

[13] 王琴, 冯颖竹, 温其标. 糯玉米淀粉及其改性淀粉在食品工业中的应用[J]. *粮食与食品工业*, 2005, 12(4): 23-25, 37.

- [14] 范瑞,陈永欣,董立红,等.黑糯玉米新品种晋糯20号的选育[J].中国蔬菜,2021(1):98-101.
- [15] FUKUNAGA K, KAWASE M, KATO K. Structural variation in the *Waxy* gene and differentiation in foxtail millet [*Setaria italica* (L.) P. Beauv.]: implications for multiple origins of the waxy phenotype [J]. *Molecular genetics and genomics*, 2002, 268(2): 214-222.
- [16] GUO Y Q, SUN L L, CHEN L R, et al. Applications of waxy corn flour based on physicochemical and processing properties: comparison with waxy rice flour and waxy corn starch [J]. *International journal of food engineering*, 2021, 17(5): 355-363.
- [17] HOSSAIN F, CHHABRA R, DEVI E L, et al. Molecular analysis of mutant *granule-bound starch synthase-1 (waxy1)* gene in diverse waxy maize inbreds [J]. *3 biotech*, 2019, 9(1): 3.
- [18] HUANG L C, GU Z W, CHEN Z Z, et al. Improving rice eating and cooking quality by coordinated expression of the major starch synthesis-related genes, *SSII* and *Wx*, in endosperm [J]. *Plant molecular biology*, 2021, 106(4): 419-432.
- [19] CHEN Z Z, LU Y, FENG L H, et al. Genetic dissection and functional differentiation of *ALK^a* and *ALK^b*, two natural alleles of the *ALK/SSIIa* gene, responding to low gelatinization temperature in rice [J]. *Rice*, 2020, 13(1): 39.
- [20] STAMP P, EICKE S, JAMPATONG S, et al. Southeast Asian *waxy* maize (*Zea mays* L.), a resource for amylopectin starch quality types? [J]. *Plant genetic resources*, 2017, 15(5): 430-437.
- [21] 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.
- [22] ŠÁRKA E, DVOŘÁČEK V. New processing and applications of waxy starch (a review) [J]. *Journal of food engineering*, 2017, 206: 77-87.
- [23] 宋志伟.不同类型玉米淀粉合成相关基因表达、淀粉颗粒结构及遗传互作的分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [24] ZEEMAN S C, KOSSMANN J, SMITH A M. Starch: its metabolism, evolution, and biotechnological modification in plants [J]. *Annual review of plant biology*, 2010, 61: 209-234.
- [25] CUESTA-SEIJO J A, DE PORCELLINIS A J, VALENTE A H, et al. Amylopectin chain length dynamics and activity signatures of key carbon metabolic enzymes highlight early maturation as culprit for yield reduction of barley endosperm starch after heat stress [J]. *Plant and cell physiology*, 2019, 60(12): 2692-2706.
- [26] ZHANG L, LI G T, YAO W R, et al. Unit and internal chain profiles of maca amylopectin [J]. *Food chemistry*, 2018, 242: 106-112.
- [27] PÉREZ S, BERTOFT E. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: a comprehensive review [J]. *Starch-stärke*, 2010, 62(8): 389-420.
- [28] LI G T, ZHU F. Molecular structure of quinoa starch [J]. *Carbohydrate polymers*, 2017, 158: 124-132.
- [29] JENKINS P J, DONALD A M. The influence of amylose on starch granule structure [J]. *International journal of biological macromolecules*, 1995, 17(6): 315-321.
- [30] VANDEPUTTE G E, DELCOUR J A. From sucrose to starch granule to starch physical behaviour: a focus on rice starch [J]. *Carbohydrate polymers*, 2004, 58(3): 245-266.
- [31] WANG Y J, QIAN J, LIU D, et al. Cluster and building block structure of amylopectin from waxy maize starch [J]. *Cereal chemistry*, 2021, 98(3): 616-623.
- [32] ZHANG B J, QIAO D L, ZHAO S M, et al. Starch-based food matrices containing pro-

- tein: recent understanding of morphology, structure, and properties [J]. Trends in food science & technology, 2021, 114: 212–231.
- [33] 崔雷. 玉米支链淀粉与小分子糖在水中的相互作用 [D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [34] 薛军. 蜡质玉米淀粉的双重酯化改性及其在油脂微胶囊化中的应用 [D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [35] WANG B, LI D, WANG L J, et al. Anti-thixotropic properties of waxy maize starch dispersions with different pasting conditions [J]. Carbohydrate polymers, 2010, 79(4): 1130–1139.
- [36] IMMONEN M, MAINA N H, CODA R, et al. The molecular state of gelatinized starch in surplus bread affects bread recycling potential [J]. LWT—food science and technology, 2021, 150: 112071.
- [37] VAN HUNG P, MORITA N. Dough properties and bread quality of flours supplemented with cross-linked cornstarches [J]. Food research international, 2004, 37(5): 461–467.
- [38] 张雨, 张康逸, 张国治. 淀粉老化过程机理及淀粉抗老化剂应用的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 316–321.
- [39] 赵凯, 李君, 刘宁, 等. 小麦淀粉老化动力学及玻璃化转变温度 [J]. 食品科学, 2017, 38(23): 100–105.
- [40] 魏长庆, 刘文玉, 许程剑. 淀粉玻璃化转变及其对食品品质影响 [J]. 粮食与油脂, 2012, 25(1): 4–6.
- [41] BARICHELLO V, YADA R Y, COFFIN R H, et al. Low temperature sweetening in susceptible and resistant potatoes: starch structure and composition [J]. Journal of food science, 1990, 55(4): 1054–1059.
- [42] MILES M J, MORRIS V J, ORFORD P D, et al. The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch [J]. Carbohydrate research, 1985, 135(2): 271–281.
- [43] XU J C, CHEN L, GUO X B, et al. Understanding the multi-scale structure and digestibility of different waxy maize starches [J]. International journal of biological macromolecules, 2020, 144: 252–258.
- [44] XIAO W H, SHEN M Y, REN Y M, et al. Controlling the pasting, rheological, gel, and structural properties of corn starch by incorporation of debranched waxy corn starch [J]. Food hydrocolloids, 2022, 123: 107136.
- [45] 顾娟, 郝美丽, 李义, 等. 蜡质玉米淀粉对糯米粉及速冻汤圆品质的影响 [J]. 粮食与饲料工业, 2022(1): 39–43, 48.
- [46] LI H Y, YAN S, YANG L, et al. High-pressure homogenization thinned starch paste and its application in improving the stickiness of cooked non-glutinous rice [J]. LWT—food science and technology, 2020, 131: 109750.
- [47] BELLO-PÉREZ L A, PAREDES-LÓPEZ O. Starch and amylopectin-effects of solutes on clarity of pastes [J]. Starch-stärke, 1996, 48(6): 205–207.
- [48] CUI Z H, DIBLEY M J. Trends in dietary energy, fat, carbohydrate and protein intake in Chinese children and adolescents from 1991 to 2009 [J]. The British journal of nutrition, 2012, 108(7): 1292–1299.
- [49] SINGH J, DARTOIS A, KAUR L. Starch digestibility in food matrix: a review [J]. Trends in food science & technology, 2010, 21(4): 168–180.
- [50] LUO Y, HAN X Y, SHEN M Y, et al. *Mesona chinensis* polysaccharide on the thermal, structural and digestibility properties of waxy and normal maize starches [J]. Food hydrocolloids, 2021, 112: 106317.
- [51] TENG L Y, CHIN N L, YUSOF Y A. Rheological and textural studies of fresh and freeze-thawed native sago starch-sugar gels. II. Comparisons with other starch sources and reheating effects [J]. Food hydrocolloids, 2013, 31(2): 156–165.
- [52] YE J P, YANG R, LIU C M, et al. Improvement in freeze-thaw stability of rice starch gel by inulin and its mechanism [J]. Food chemistry, 2018, 268: 324–333.
- [53] YANG H, WEI Q, LU W P, et al. Effects of

- post-silking low temperature on the physicochemical properties of waxy maize starch [J]. *International journal of biological macromolecules*, 2021, 188: 160-168.
- [54] ŠÁRKA E, DVOŘÁČEK V. Waxy starch as a perspective raw material (a review) [J]. *Food hydrocolloids*, 2017, 69: 402-409.
- [55] BORTNOWSKA G, BALEJKO J, TOKARCZYK G, et al. Effects of pregelatinized waxy maize starch on the physicochemical properties and stability of model low-fat oil-in-water food emulsions [J]. *Food hydrocolloids*, 2014, 36: 229-237.
- [56] GUARDEÑO L M, QUILES A, LLORCA E, et al. Effect of microwave thawing on microstructure and physicochemical stability of low fat white sauces made with soy protein [J]. *Czech journal of food sciences*, 2013, 31(6): 568-574.
- [57] 刘希涛. 焙烤型复合荔枝果酱加工工艺研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [58] BAO J S, CORKE H, SUN M. Genetic diversity in the physicochemical properties of waxy rice (*Oryza sativa* L) starch [J]. *Journal of the science of food and agriculture*, 2004, 84(11): 1299-1306.
- [59] DAPČEVIĆ HADNA ĐEV T R, DOKIĆ L P, HADNA ĐEV M S, et al. Rheological and breadmaking properties of wheat flours supplemented with octenyl succinic anhydride-modified waxy maize starches [J]. *Food and bioprocess technology*, 2014, 7(1): 235-247.
- [60] DAPCEVIC-HADNADJEV T, DOKIC L, POJIC M, et al. Rheological properties of dough and quality of bread supplemented with emulsifying polysaccharides [J]. *Hemijaska industrija*, 2014, 68(1): 99-106.
- [61] 张江宁, 丁卫英, 张玲, 等. 糯玉米淀粉在食品中应用的研究进展 [J]. *农产品加工*, 2019(22): 87-88.
- [62] YU L J, NGADI M O. Rheological properties of instant fried noodle dough as affected by some ingredients [J]. *Journal of the science of food and agriculture*, 2006, 86(4): 544-548.
- [63] 侯汉学, 董海洲, 汪建民, 等. 羟丙基磷酸交联糯玉米淀粉的性质及其作为面条品质改良剂的研究 [J]. *食品与发酵工业*, 2004, 30(6): 17-21.
- [64] AGYEI-AMPONSAH J, MACAKOVA L, DEKOCK H L, et al. Effect of substituting sunflower oil with starch-based fat replacers on sensory profile, tribology, and rheology of reduced-fat mayonnaise-type emulsions [J]. *Starch-stärke*, 2021, 73(3/4): 2000092.
- [65] ABU-HARDAN M O, HILL S E, FARHAT I A. A calorimetric study of the interaction between waxy maize starch and lipid [J]. *Starch-stärke*, 2007, 59(5): 217-223.
- [66] HEYDARI A, ALI RAZAVI S M. Evaluating high pressure-treated corn and waxy corn starches as novel fat replacers in model low-fat O/W emulsions: a physical and rheological study [J]. *International journal of biological macromolecules*, 2021, 184: 393-404.
- [67] GARZOAN G A, GAINES C S, PALMQUIST D E. Use of wheat flour-lipid and waxy maize starch-lipid composites in wire-cut formula cookies [J]. *Journal of food science*, 2003, 68(2): 654-659.
- [68] DIAMANTINO V R, BERALDO F A, SUNAKOZAWA T N, et al. Effect of octenyl succinylated waxy starch as a fat mimetic on texture, microstructure and physicochemical properties of Minas fresh cheese [J]. *LWT-food science and technology*, 2014, 56(2): 356-362.
- [69] MCCLEMENTS D J. Crystals and crystallization in oil-in-water emulsions: implications for emulsion-based delivery systems [J]. *Advances in colloid and interface science*, 2012, 174: 1-30.
- [70] XU T, JIANG C C, ZHOU Q W, et al. Preparation and characterization of octenyl succinic anhydride modified waxy maize starch hydrolyzate/chitosan complexes with enhanced interfacial properties [J]. *Carbohydrate polymers*, 2021, 267: 118228.
- [71] HOFFMANN H, REGER M. Emulsions with

- unique properties from proteins as emulsifiers [J]. *Advances in colloid and interface science*, 2014, 205: 94-104.
- [72] JO M, BAN C, GOH K K T, et al. Gastrointestinal digestion and stability of submicron-sized emulsions stabilized using waxy maize starch crystals [J]. *Food hydrocolloids*, 2018, 84: 343-352.
- [73] JO M, BAN C, GOH K K T, et al. Enhancement of the gut-retention time of resveratrol using waxy maize starch nanocrystal-stabilized and chitosan-coated Pickering emulsions [J]. *Food hydrocolloids*, 2021, 112: 106291.
- [74] BORTNOWSKA G, KRZEMIŃSKA N, MOJKA K. Effects of waxy maize and potato starches on the stability and physicochemical properties of model sauces prepared with fresh beef meat [J]. *International journal of food science & technology*, 2013, 48(12): 2668-2675.
- [75] COSTA K K F D, OLIVEIRA E R, RIBEIRO A E C, et al. Texture profile of fermented rice extracts with probiotic strains and different contents of waxy maize starch, and sensory acceptance of flavoured selected extract [J]. *International journal of food science & technology*, 2019, 55(2): 490-499.
- [76] 雷欣欣, 张本山, 卢海凤. 羟丙基辛烯基复合改性蜡质玉米淀粉制备及在油脂微胶囊化应用 [J]. *粮食与油脂*, 2013, 26(10): 22-25.
- [77] PARK I, KIM Y K, KIM B H, et al. Encapsulated amylosucrase-treated starch with enhanced thermal stability: preparation and susceptibility to digestion [J]. *Starch-stärke*, 2014, 66(1/2): 216-224.
- [78] LIU B, ZHU S, ZHONG F, et al. Modulating storage stability of binary gel by adjusting the ratios of starch and kappa-carrageenan [J]. *Carbohydrate polymers*, 2021, 268: 118264.
- [79] SAHIN S, HAMAMCI H, GARAYEV S. Rheological properties of lactose-free dairy desserts [J]. *Food science and technology international*, 2016, 22(7): 609-620.

(责任编辑 姚玮华)

(上接第 72 页)

- [18] 胡献刚. 新兴适配体在高效净化/诊断环境与生物体内污染物的特点及其机理 [D]. 天津: 南开大学, 2012.
- [19] NADIMI M, ZIARATI SARAVANI A, AROON M A, et al. Photodegradation of methylene blue by a ternary magnetic $\text{TiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{graphene oxide}$ nanocomposite under visible light [J]. *Materials chemistry and physics*, 2019, 225: 464-474.
- [20] LI Z Q, WANG H L, ZI L Y, et al. Preparation and photocatalytic performance of magnetic $\text{TiO}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4/\text{graphene}$ (RGO) composites under VIS-light irradiation [J]. *Ceramics international*, 2015, 41(9): 10634-10643.
- [21] 齐梦雨. 基于适配体功能材料的抗生素残留分析检测 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2018.
- [22] 胡馥鹏, 周岳陵, 段立民, 等. pH 值对 $\text{g-C}_3\text{N}_4$ 可见光催化降解罗丹明 B 性能的影响 [J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(11): 1545-1550.

(责任编辑 姚玮华)