

淀粉结构对其性能的影响及淀粉性能的调控

杨 洁, 顾正彪, 洪 雁*

(江南大学食品学院, 无锡 214122)

摘 要: 淀粉是自然界中仅次于纤维素的第二大生物物质, 是碳水化合物在自然界中贮藏的主要形式之一。淀粉既是人类的主要能量来源, 也是一种重要的可再生资源, 被广泛应用在食品、造纸、纺织、精细化工和医药等领域。但是, 原淀粉结构的局限性, 限制了其应用范围和效果。因此, 本文首先综述了淀粉分子结构和颗粒结构对其性能的影响。其次, 阐述了通过淀粉的生物合成、淀粉结构修饰以及纤维素合成淀粉等手段改变淀粉结构, 从而达到调控淀粉性能的目的的方法, 以期为之后的深入研究提供参考。

关键词: 淀粉; 结构; 性能; 调控

Effect of starch structure on its properties and the regulation of starch properties

YANG Jie, GU Zheng-Biao, HONG Yan*

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: Starch is the second largest biomass after cellulose in nature. It is one of the main forms of carbohydrate storage. Starch is not only the main energy source of human beings, but also an important renewable resource and is widely used in food, paper, textile, fine chemicals and medicine. However, due to the limitation of starch structure, its application and effect are limited. Therefore, this paper reviewed the effects of starch molecular structure and particle structure on its properties. Then this paper also reviewed the methods of changing the starch structure by means of starch biosynthesis, starch structure modification and cellulose synthesis of starch to achieve the purpose of regulating starch performance, in order to provide reference for further research afterwards.

KEY WORDS: starch; structure; properties; regulation

1 引 言

淀粉是一种可再生的天然高分子碳水化合物, 通常存在于植物的种子、根茎、果实和茎叶中, 某些原生动物、藻类以及细菌中也存在淀粉或类似结构的糖元, 其在人体能量代谢中具有重要的作用^[1]。由于淀粉天然可再生且生物相容性好, 是工业生产的主要原辅料, 在造纸、纺织、

医药、石油、食品和发酵等行业被广泛应用, 长期以来, 世界各国都十分重视淀粉资源的开发利用研究。但由于淀粉分子链排列的多样性和微观结构的复杂性, 其精细结构对淀粉的功能特性具有较大的影响^[2]。

本文主要阐述了淀粉分子结构和颗粒结构对其性能及应用效果的影响, 并从淀粉的生物合成、淀粉结构修饰以及纤维素合成淀粉 3 个方面, 简述了淀粉性能调控的手

基金项目: 国家自然科学基金项目(31571794)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31571794)

*通讯作者: 洪雁, 教授, 主要研究方向为淀粉资源的开发与利用。E-mail: hongyan@jiangnan.edu.cn

*Corresponding author: HONG Yan, Professor, Jiangnan University, 1800 Lihu Avenue, Wuxi 214122, Jiangsu Province, China. E-mail: hongyan@jiangnan.edu.cn

段, 以期为淀粉的研究及开发提供一定的理论指导。

2 淀粉结构对其性能的影响

2.1 淀粉分子结构

淀粉主要由直链淀粉分子、支链淀粉分子和中间级分组成。原淀粉中直链淀粉和支链淀粉分子并不是以松散的个体形式存在, 而是通过分子链内和链间的氢键连接形成高度有组织的颗粒结构, 其精细结构对于淀粉的结构及功能特性均有非常大的影响。研究发现直链淀粉分子含量越大, 其流体动力学半径越大, 光线穿透力越弱, 淀粉糊的透明度越低^[3,4]。姜欢等^[5]发现麦芽糖转葡糖基酶作用于普通玉米淀粉后, 使其短链淀粉 [聚合度 (degree of polymerization, DP) < 13] 含量和长链淀粉 (DP > 30) 含量相较于原淀粉均有所增加, 合成了具有慢消化功能的新型结构。同时, 直链淀粉与脂质复合使得抗消化淀粉含量提高, 且直链淀粉回生可形成双螺旋结构也具有抗消化性^[6]。刘誉繁等^[7]研究发现高压均质处理使直链淀粉与适宜分子量大小的淀粉分子之间发生重聚集而形成有序的结构域, 提高大米淀粉抗消化性能。此外, 湿热处理可促进大米淀粉分子重排和取向, 形成新的单螺旋结构, 增加大米淀粉抗消化性能^[8]。

不同植物来源支链淀粉在分支点位置、分支链长度等方面均存在极大的差异。而支链淀粉的链长分布及长、中、短链的比例不同直接影响淀粉的透明度、溶解度、成糊温度以及凝胶和流变学等特性, 从而影响淀粉的深加工及用途^[9]。研究表明, 具有较低平均链长和平均外链长度的支链淀粉成糊特性较好、成糊温度较低^[10,11]。淀粉糊化冷却后, 其直链淀粉和支链淀粉分子通过氢键等作用力聚集形成淀粉凝胶^[12]。Zhou 等^[13]发现支链淀粉中长支链比例越高, 淀粉凝胶的硬度和内聚性越大, 而弹性和胶黏性越小。

直链淀粉与支链淀粉的比例已被公认为是淀粉物化性质与功能特性的重要决定因素, 大量研究发现直链淀粉含量直接影响谷物(尤其是大米)在烹煮等加工过程中的吸水膨胀、受热糊化以及成品品质, 并将直链淀粉含量作为预测淀粉加工性质、淀粉质食品品质的重要指标^[10]; 同时, 直链和支链淀粉含量、基团以及分子大小与淀粉的成膜性也有一定的关系^[14]。

此外, 淀粉颗粒中还含有少量中间级分, 其结构和性质介于直链淀粉分子和支链淀粉分子之间^[15]。不同来源的淀粉中间级分含量不同, Yoon 等^[16]发现高直链玉米、普通玉米、普通大米、马铃薯和木薯淀粉中间级分含量分别为 13.5%、11.4%、5.8%、8.0%和 5.6%。曾红华等^[17]研究表明峰值黏度、谷值黏度、最终黏度和衰减值与中间级分子量和中间级分回转半径呈负相关。

2.2 淀粉颗粒结构

淀粉在自然界中以颗粒形式存在, 淀粉颗粒有各种形状和大小, 其大小随植物种类而异, 如玉米淀粉、马铃薯淀粉和木薯淀粉颗粒的平均粒径分别为 17.44、43.21 和 15.24 μm ^[18]。研究发现淀粉颗粒的大小会影响淀粉糊黏度和透明度等^[19]。已有研究表明, 由于支链淀粉的短链比例高时, 短链不能最大程度地堆积到晶体片层中去, 晶体化顺序较差, 因而 To、Tp、Tc 低; 而当支链淀粉中的长链比例高时, 这些长链可能通过形成较长的双螺旋结构, 从而导致糊化时需要较高的温度来解离, 因而 To、Tp、Tc 高^[20]。淀粉颗粒具有微晶结构, 其结晶度一般在 15%~45%之间, 且具有 A、B 和 C 型三种晶型^[21]。不同晶型和结晶度的淀粉会导致其性能不同。研究发现 B 晶型的小麦淀粉颗粒比 A 晶型小麦淀粉更易受冻融处理的影响^[22]。C 晶型淀粉为 A 晶型和 B 晶型的混合物, C 晶型淀粉中 A 晶型的高比例导致了淀粉的高糊化温度^[23]。同时, 也可以通过物理(淀粉含水量、微波和研磨等)或化学(酸解等)的方法改变其结晶度, 调控淀粉性能, 使其更好应用于食品工业中^[24]。

近年来, 淀粉小体结构受到研究者的关注, 小体是淀粉壳层和颗粒结构的构筑单元, 其是由支链淀粉分子侧链双螺旋排列的结晶区和直链淀粉的无定形区交替排列而成^[25]。淀粉的壳层结构又称生长环, 颗粒的表层为硬壳层。魏毛毛^[26]发现淀粉颗粒完全糊化, 小体结构消失, 形成的凝胶是疏松的网络结构, 且淀粉壳层的韧性会影响淀粉糊化程度和淀粉糊黏度。

3 淀粉性能的调控

淀粉的分子结构和颗粒结构决定了淀粉性能, 进而决定淀粉的品质和用途, 因此可以通过从淀粉生物合成途径、结构修饰等手段改变淀粉各组分含量、直链淀粉和支链淀粉所占比例以及淀粉分子的精细结构, 从而改善和调控淀粉性能, 满足应用需求, 扩大应用范围。

3.1 淀粉生物合成途径调控

淀粉生物合成途径可通过遗传操纵实现对淀粉成分及结构的改造, 属于改善淀粉性能的前端调控。合成途径主要有支链淀粉合成的模型和直链淀粉合成模型。直链淀粉主要是由蜡质基因编码的颗粒结合型淀粉合成酶 (granule-bound starch synthase, GBSS, 包括 GBSS I、GBSS Ib、GBSS II 等) 所催化合成, 支链淀粉的生物合成主要是由可溶性淀粉合成酶 (soluble starch synthases, SSS)、淀粉分支酶 (starch branching enzymes, SBE, 包括 SBE I、SBE IIa、SBE IIb 等) 和淀粉脱支酶 (starch debranching enzymes, DBE) 所催化的。Nakamura 等^[27]提出了水稻胚乳支链淀粉合成的模型, 首先 SBE 催化分支簇的长链将其转变为新的分支链, 并在可 SSS 作用下延伸成分支簇的核心骨架^[28]。当分

支链的链长达到聚合度为 12 左右时, SBE 作用下进行剪切和分支形成新的短链, 并在 SSS 作用下进行延伸^[29](图 1^[28])。通过淀粉生物合成途径的调控可为改变淀粉产量和理化特性提供基础, 如降低 SSS 和 SBE 的活性会使淀粉中的直链淀粉含量升高, 使淀粉广泛应用于油煎的酥脆食品、黏合剂、可降解的包装材料和胶卷的保护层。

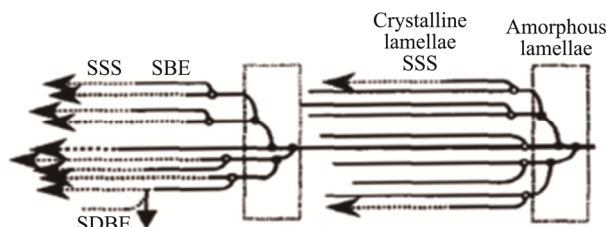


图 1 支链淀粉合成的模型

Fig.1 The model of amylopectin synthesis

直链淀粉的合成依赖于支链淀粉的合成。目前关于直链淀粉合成的第 1 种模型认为麦芽寡糖引导直链淀粉合成(图 2a^[29]), 其在淀粉合成酶 I (granule bound starch synthase I, GBSSI) 作用下延伸, 葡聚糖链在延伸过程中与 SBE 作用形成还原性末端(图 2b)^[30]。当一个新的麦芽寡糖到达颗粒结合型 GBSSI 的催化位点后, 合成新的直链淀粉分子(图 2c)。另一种直链淀粉合成的模型则认为支链淀粉引导直链淀粉合成, 在 GBSSI 和 SBE 作用下分别延伸和断裂^[31]。直链淀粉的合成速率受 GBSSI 的活性和麦芽寡糖的含量以及支链淀粉大小等多种因素的影响^[32]。

综上所述, 淀粉品质育种可通过淀粉生物合成途径实现, 利用遗传操纵实现对淀粉组分及结构的改造, 不仅可以改变直链淀粉和支链淀粉含量, 还可以调控淀粉分子的精细结构, 从而满足工业生产的各种需求。目前已经通过生物合成途径研究的淀粉有高油玉米籽粒淀粉^[33], 高直链淀粉水稻品种菲优 188^[34], 高直链玉米品种以及高支链淀粉玉米(糯玉米或蜡质玉米)^[35]等。

3.2 纤维素合成直链淀粉

You 等^[36]设计了一种将纤维素转化为直链淀粉的酶途径(图 3)。以纤维素为原料, 应用纤维二糖磷酸化酶 (cellobiosephosphorylase, CBP) 和 α -葡聚糖磷酸化酶 (α -glucanphosphorylase, α GP) 合成直链淀粉, 可使纤维素中高达 30% 的无水葡萄糖单元转化为淀粉。纤维素合成直链淀粉途径可根据应用要求调控, 成本低、产量高、反应速度快, 并对有毒化合物具有更好的耐受性^[37], 可满足从食品和饲料到可再生材料和生物燃料的不同需求。直链淀粉含量高的淀粉可作为色谱柱基质和医药胶囊材料。食品级直链淀粉如高直链淀粉小麦、玉米和大米具有更低的血糖负荷, 可以改善人类健康和降低糖尿病和肥胖症等疾病风险^[38]。直链淀粉含量中等的淀粉用作酶法生产的高密度淀粉气载

体, 可解决制氢、氢存储、基础设施和安全问题^[39]。直链淀粉含量较低的淀粉可直接用于猪、鸡等动物的饲料。

3.3 淀粉结构修饰调控

为了克服从植物中提取出来的淀粉在室温下不溶于水、易老化、难成膜、稳定性和凝胶性差等缺点, 改善淀粉产品的特性及扩大其应用范围, 对淀粉进行化学、物理或者生物酶法修饰, 改变淀粉颗粒或分子结构, 从而调控其性能, 满足加工以及应用需求^[40]。

3.3.1 化学修饰

化学改性是目前应用最广泛的修饰方法, 主要包括酸解、氧化、酯化、醚化、交联和接枝共聚等。化学改性后淀粉分子断链, 或者引入化学基团或者接上高分子物质, 分子结构及颗粒结构发生改变, 性质也相应得到改善, 不同改性方法得到的淀粉具有不同的特性。如氧化淀粉是氧化剂作用淀粉分子, 使淀粉分子中的 α -1, 4 糖苷键和 α -1, 6 糖苷键断裂, 同时葡萄糖残基上的 C2、C3 和 C6 上的 -OH 被氧化成羰基 ($>C=O$)、醛基 (-CHO) 和羧基 (-COOH), 分子结构和颗粒结构发生改变, 淀粉的结晶度下降, 黏度、成糊温度、膨胀度降低, 凝沉性减弱, 成膜性和透明度增强^[41]。磷酸酯淀粉引入具有亲水性的磷酸根基团, 分子间结合氢键能力减弱, 亲水性增加, 分子变大, 黏度和透明度增加^[42]。辛烯基琥珀酸酐酯化淀粉中接上具有亲水亲油性的辛烯基琥珀酸酐基团, 使淀粉具有较好的乳化性^[43,44]。醚化淀粉是利用醚化剂取代淀粉中的醇羟基, 分子变大, 与水之间的结合能力增强, 分子之间结合力减弱, 使其成糊温度降低, 黏度和溶解度升高, 抗老化能力提高, 冻融稳定性显著增强^[45,46]。交联淀粉引入交联剂, 分子间作用力增强, 具有耐酸、耐热和耐剪切性^[47]。接枝共聚淀粉是在引发剂作用下将单体接枝到淀粉分子骨架上, 分子变大, 分子间作用力增强, 单体的性能在一定程度上与接枝淀粉的性能相关, 可根据应用需求改变淀粉的吸水性和疏水性^[42]。但是化学修饰淀粉具有局限性, 食品安全法规对化学试剂添加量以及取代度等都有一定限制^[48]。

3.3.2 物理修饰

物理改性是指通过机械力、热、物理场等对淀粉进行改性的方法^[49]。目前已经应用到生产中的品种有预糊化淀粉、湿热处理淀粉等。

预糊化淀粉主要是通过滚筒、挤压或喷雾干燥等生产工艺实现, 是将糊化的淀粉经快速脱水干燥, 使淀粉分子来不及以氢键重新缔合, 产品加入水中仍能复水成粘稠溶液的产品。经预糊化处理的淀粉颗粒结构完全被破坏, 半结晶性消失, 具有冷水可溶性和良好的冻融稳定性, 可用于稳定冷冻食品的内部结构, 保持产品在生产过程中的稳定性^[50]。其次, 预糊化淀粉具有抗老化性, 有利于提高产品稳定性, 延长货架期。预糊化处理后的淀粉结晶结构受到一定程度的破坏, 易被淀粉酶作用分解, 利于被人体消化吸收, 用于制作老年及婴幼儿食品。

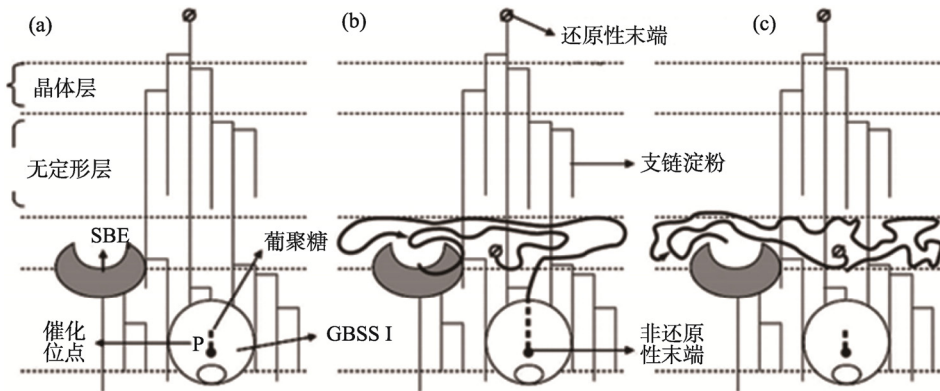


图 2 麦芽寡糖引导直链淀粉合成
Fig.2 Maltooligosaccharides induces amylose synthesis

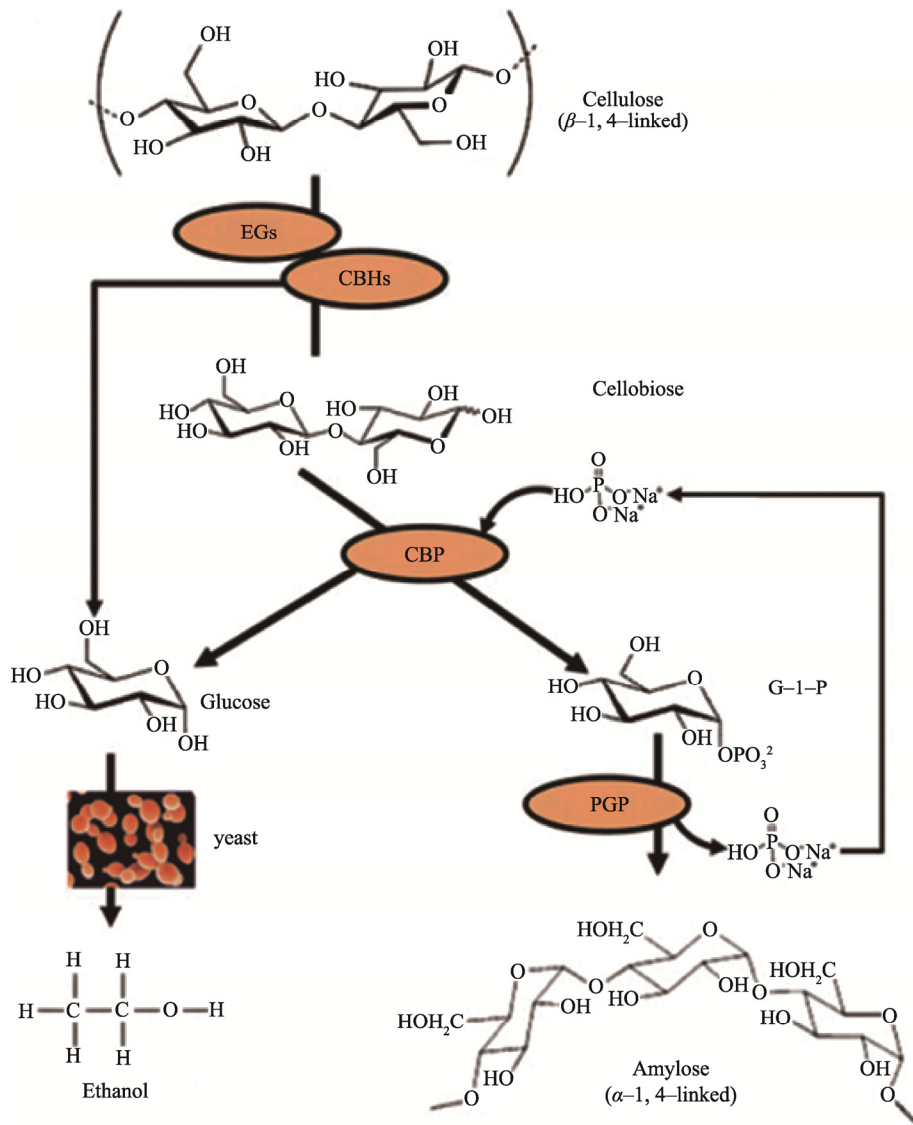


图 3 纤维素合成直链淀粉途径
Fig.3 The synthetic cellulose-to-amylose pathway

湿热处理淀粉是指在淀粉中加入少量水,在一定温度下处理一段时间,使淀粉颗粒内部结构发生改变的一种物理修饰手段。相对于化学修饰,该法免除了使用化学试剂而造成的环境污染^[51]。王宏伟等^[52]发现湿热改性淀粉半结晶片层的有序化程度下降、结晶程度和分子量降低,使其峰值黏度、终止黏度、崩解值和溶解度降低。也有研究发现由于湿热处理的温度差异,使得淀粉链移动性的变化出现差异,进而导致不同温度下湿热处理后的淀粉结构变化具有差异性,尤其是结晶区和无定形区的变化,及对淀粉酶水解敏感度的变化影响较大,从而消化性能发生改变,因此可通过调控湿热处理条件获得具有不同消化性能的新型淀粉质食品。

3.3.3 生物酶法修饰

生物酶法修饰是通过使用各种淀粉酶对淀粉进行水解,改变淀粉的分子结构,从而改变淀粉的加工性能,进而拓宽淀粉的应用领域^[53]。不同的淀粉酶对淀粉的作用方式不同,对其结构和性能影响也不同。

α -淀粉酶是一种内切酶,对糊化的淀粉具有很强的水解能力,能够随机切断淀粉分子内的 α -1,4糖苷键,将长链淀粉水解成短链的糊精、麦芽糖、低聚糖和葡萄糖等,使其黏度降低、流动性增强^[54]。王成等^[55]发现经过 α -淀粉酶水解的芭蕉芋淀粉的溶解度、膨胀度、吸水度和吸油度增大,其热稳定性增加,但其透光率和冻融稳定性降低。

β -淀粉酶是一种外切酶,能从淀粉的非还原末端开始,隔2个葡萄糖单元水解 α -1,4糖苷键,生成麦芽糖和小分子淀粉。研究发现 β -淀粉酶可以降低直、支链淀粉分子质量和支链淀粉平均侧链长度,降低直、支链淀粉形成双螺旋的趋向,从而抑制小麦淀粉回生^[56]。

淀粉分支酶是先将淀粉分子中 α -1,4糖苷键切断生成短直链片段,再将这个片段以 α -1,6糖苷键连接到淀粉分子上,使淀粉分子产生新的分支点,改变淀粉分子的分支密度^[57]。经淀粉分支酶修饰后,成糊温度降低,淀粉糊透明度增加;同时能延缓或抑制淀粉回生;淀粉分支密度的增加,使其消化性降低。李才明等^[58]发现,经分支酶处理过的淀粉,快消化淀粉含量低至51.1%;餐后血糖峰值显著降低,且在餐后30 min以后,仍能保持较高的血糖水平,可实现血糖持续释放。

淀粉脱支酶是能高效专一地水解淀粉中 α -1,6糖苷键的一种酶。经脱支酶作用后,淀粉中的支链淀粉分子变小,直链淀粉分子增加,淀粉粒的晶体结构变得松弛,结晶度降低,无定形结构增加。此外,通过改变脱支酶活性可以改变直支链比以及支链淀粉结构,生成具有新特性的淀粉^[59]。经脱支酶修饰后,淀粉黏度降低,热稳定性增加。同时,淀粉的短链之间结合并发生重排,使得淀粉酶对其作用减弱,导致淀粉的快消化淀粉含量下降,慢消化和抗性淀粉含量上升^[60]。

4 结 论

本文综述了不同淀粉结构与其性能之间的关联性,介绍了通过淀粉生物合成途径、纤维素合成淀粉途径和淀粉结构修饰途径,能在一定程度上改变淀粉的颗粒或分子结构,从而改变淀粉的性能,达到调控淀粉性能的目的。

参考文献

- [1] Evers AD, O'Brien L, Blakeney AB. Cereal structure and composition [J]. Aust J Agric Res, 1999, 50(5): 629-650.
- [2] 马芸. 淀粉颗粒外壳的分离及其性质与结构研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018.
Ma Y. Separation of starch granules shell and their properties and structures [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2018.
- [3] 张燕鹏, 庄坤, 丁文平, 等. 豌豆淀粉与马铃薯淀粉、玉米淀粉理化性质比较[J]. 食品工业科技, 2016, 37(4): 183-186.
Zhang YP, Zhuang K, Ding WP, et al. Comparison of physical and chemical properties of pea, potato, and corn starch [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(4): 183-186.
- [4] Pycia K, Juszczyk L, Galkowska D, et al. Physicochemical properties of starches obtained from Polish potato cultivars [J]. Starch - Stärke, 2012, 64(2): 105-114.
- [5] 姜欢, 缪铭, 江波. 麦芽糖转葡萄糖基酶修饰对普通玉米淀粉分子结构与消化性能的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, (3): 41-45.
Jiang H, Miao M, Jiang B. Effects of maltose transglucosylase modification on molecular structure and digestibility of common maize starch [J]. Food Ferment Ind, 2014, (3): 41-45.
- [6] 周斌. V型淀粉的结构变化及其对消化性能的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(10): 208-212.
Zhou B. Structural changes of V-starch and its effects on digestive properties [J]. Food Ind, 2018, 39(10): 208-212.
- [7] 刘誉繁, 郑波, 曾茜茜, 等. 高压均质对大米淀粉分子结构及体外消化性能的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(9): 1-5.
Liu YF, Zheng B, Zeng QQ, et al. Effect of high pressure homogenization on molecular structure and *in vitro* digestibility of rice starch [J]. Mod Food Sci Technol, 2019, 35(9): 1-5.
- [8] 卞华伟, 刘誉繁, 郑波, 等. 湿热处理对不同直链淀粉含量大米淀粉多尺度结构和消化性能的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(12): 46-50.
Bian HW, Liu YF, Zheng B, et al. Effects of heat-moisture treatment on multi-scale structure and digestibility of rice starch with different amylose content [J]. Mod Food Sci Technol, 2018, 34(12): 46-50.
- [9] 王倩. 淀粉小体与分子结构关系的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018.
Wang Q. Study on the relationship between starch blocklets and molecular structure [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2018.
- [10] He X, Zhu C, Liu LL, et al. Difference of amylopectin structure among rice varieties differing in grain quality and its correlations with starch physicochemical properties [J]. Acta Agronomica Sin, 2010, 36(2): 276-284.
- [11] 周慧颖, 彭小松, 欧阳林娟, 等. 支链淀粉结构对稻米淀粉糊化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(8): 25-30.
Zhou HY, Peng XS, Ouyang LJ, et al. Effect of amylopectin structure on

- starch gelatinization in rice [J]. *J Chin Cereal Oil Ass*, 2018, 33(8): 25–30.
- [12] 黄峻榕, 唐晓东, 蒲寅寅. 淀粉凝胶的微观结构、质构及稳定性研究进展[J]. *食品与生物技术学报*, 2017, 36(7): 673–679.
Huang JR, Tang XD, Pu HY. Progress in studies on microstructure, texture and stability of starch gels [J]. *J Food Biotechnol*, 2017, 36(7): 673–679.
- [13] Zhou W, Yang J, Hong Y, *et al*. Impact of amylose content on starch physicochemical properties in transgenic sweet potato [J]. *Carbohydr Polym*, 2015, (122): 417–427.
- [14] Singh N. Starch in food: structure, function and applications [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2010, 41(1): 108–109.
- [15] 韩文芳, 林亲录, 赵思明, 等. 淀粉中间级分的研究进展[J]. *食品科学*, 2019, (1): 1–9.
Hang WF, Lin QL, Zhao SM, *et al*. Progress in research on starch intermediate fraction [J]. *Food Sci*, 2019, (1): 1–9.
- [16] Yoon JW, Lim ST. Molecular fractionation of starch by density-gradient ultracentrifugation [J]. *Carbohydr Res*, 2003, 338(7): 611–617.
- [17] 曾红华, 胡蝶, 左健, 等. 湿热处理对锥栗原淀粉及分离组分回生的影响[J]. *中国粮油学报*, 2011, 26(6): 36–39.
Zeng HH, Hu D, Zuo J, *et al*. Effect of heat and humidity treatment on retrogradation of starches and isolated components of castanea chinensis [J]. *J Chin Cereal Oil Ass*, 2011, 26(6): 36–39.
- [18] 张本山, 刘培玲. 几种淀粉颗粒的结构与形貌特征[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2005, (6): 68–73.
Zhang BS, Liu PL. The structure and morphology of several starch granules [J]. *J South China Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2005, (6): 68–73.
- [19] 吴桂玲, 李文浩, 刘立品, 等. 脂类和颗粒结合蛋白对小麦 A、B 淀粉理化性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(8): 17–23.
Wu GL, Li WH, Liu LP, *et al*. Effects of lipid and granular binding protein on physicochemical properties of wheat starch A and B [J]. *J Chin Cereal Oil Ass*, 2016, 31(8): 17–23.
- [20] Lin L, Cai C, Gilbert RG, *et al*. Relationships between amylopectin molecular structures and functional properties of different-sized fractions of normal and high-amylose maize starches [J]. *Food Hydrocolloid*, 2016, (52): 359–368.
- [21] 杨景峰, 罗志刚, 罗发兴. 淀粉晶体结构研究进展[J]. *食品工业科技*, 2007, (7): 240–243.
Yang JF, Luo ZG, Luo FX. Research progress on crystal structure of starch [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2007, (7): 240–243.
- [22] 赵安琪, 于雷, 杨未, 等. 冻融处理对淀粉颗粒结构和性质影响的研究进展[J]. *中国食品添加剂*, 2017, (7): 203–208.
Zhao AQ, Yu L, Yang M, *et al*. Research progress on the effects of freeze-thaw treatment on the structure and properties of starch granules [J]. *China Food Add*, 2017, (7): 203–208.
- [23] 范孝旭. 土圪儿 C-型淀粉的特性和晶态分布研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
Fan XX. Characteristics and crystallinity of C-type starch in the soil [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [24] Genyi Z, Zihua A, Hamaker BR. Slow digestion property of native cereal starches [J]. *Biomacromolecules*, 2006, 7(11): 3252.
- [25] Huang J, Chen Z, Xu Y, *et al*. Comparison of waxy and normal potato starch remaining granules after chemical surface gelatinization: Pasting behavior and surface morphology [J]. *Carbohydr Polym*, 2014, 102(1): 1001–1007.
- [26] 魏毛毛. 淀粉糊化过程中小体形态变化和不完全糊化颗粒性质研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.
Wei MM. The study of morphological changes of blocklets and properties of incomplete gelatinized granules during starch gelatinization [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017.
- [27] Nakamura Y, Sakurai A, Inaba Y, *et al*. The fine structure of amylopectin in endosperm from Asian cultivated rice can be largely classified into two classes [J]. *Stärke*, 2002, 54(3/4): 117–131.
- [28] 朱晔荣, 刘苗苗, 李亚辉. 植物淀粉生物合成调节机制的研究进展[J]. *植物生理学报*, 2013, 49(12): 1319–1325.
Zhu YR, Liu MM, Li YH. Research progress on the regulation mechanism of plant starch biosynthesis [J]. *J Plant Physiol*, 2013, 49(12): 1319–1325.
- [29] James MG, Denyer K, Myers AM. Starch synthesis in the cereal endosperm [J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2003, 6(3): 215–222.
- [30] Zeeman SC, Umemoto T, Lue WL, *et al*. A mutant of Arabidopsis lacking a chloroplastic isoamylase accumulates both starch and phytylglycogen [J]. *Plant Cell*, 1998, 10(10): 1699–1711.
- [31] Van-De-Wal M, D'Hulst C, Vincken J, *et al*. Amylose is synthesized in vitro by extension of and cleavage from amylopectin [J]. *J Biol Chem*, 1998, 273(35): 22232–22240.
- [32] Smith AM. The biosynthesis of starch granules [J]. *Biomacromolec*, 2001, 2(2): 335–341.
- [33] 刘开昌, 胡昌浩. 高油、高淀粉玉米籽粒主要品质成分积累及其生理生化特性[J]. *作物学报*, 2002, (4): 492–498.
Liu KC, Hu CH. Accumulation of main quality components and their physiological and biochemical characteristics in high-oil and high-starch corn seeds [J]. *Acta Agronomica Sin*, 2002, (4): 492–498.
- [34] 范永义, 唐虹, 张玲, 等. 高直链淀粉水稻的淀粉积累及相关酶活性关系研究[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(20): 5–8.
Fan YY, Tang H, Zhang L, *et al*. Study on the relationship between starch accumulation and enzyme activity in rice with high amylose content [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2014, 41(20): 5–8.
- [35] 林晶, 杨显峰. 高淀粉玉米及其发展前景[C]. 全国鲜食玉米大会, 2009.
Lin J, Yang XF. High starch corn and its development prospect [C]. National Fresh Corn Congress, 2009.
- [36] You C, Chen H, Myung S, *et al*. Enzymatic transformation of nonfood biomass to starch (applied biological sciences) [J]. *Proceed Nation Acad Sci Am*, 2013, 110(18): 7182–7187.
- [37] Martín D, Campo JS. High-yield dihydrogen production from xylose through cell-free synthetic cascade enzymes [J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2013, 52(17): 4587–4590.
- [38] Maki KC. Resistant starch from high-amylose maize increases insulin sensitivity in overweight and obese men [J]. *J Nutr*, 2012, 142(4): 717–723.
- [39] Zhang Y, Huang WD. Constructing the electricity-carbohydrate-hydrogen cycle for a sustainability revolution [J]. *Trend Biotechnol*, 2012, 30(6): 301–306.
- [40] Ahmed J, Thomas L, Taher A, *et al*. Impact of high pressure treatment on functional, rheological, pasting, and structural properties of lentil starch dispersions [J]. *Carbohydr Polym*, 2016, (152): 639–647.
- [41] 张克, 陆启玉. 小麦氧化淀粉的理化性质及对生鲜面条品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(15): 26–30.
Zhang K, Lu QY. Physical and chemical properties of wheat oxidized starch and its effect on quality of fresh noodles [J]. *Food Sci*, 2017, 38(15):

- 26-30.
- [42] 孙亚东, 陈启凤, 吕闪闪, 等. 淀粉改性的研究进展[J]. 材料导报, 2016, (21): 71-77.
Sun YD, Chen QF, Lv SS, *et al.* Research progress of starch modification [J]. Mater Rep, 2016, (21): 71-77.
- [43] Šubarić D, Ačkar Đ, Babić J, *et al.* Modification of wheat starch with succinic acid/acetic anhydride and azelaic acid/acetic anhydride mixtures I. Thermophysical and pasting properties [J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(10): 2616-2623.
- [44] Ačkar Đ, Subarić D, Babić J, *et al.* Modification of wheat starch with succinic acid/acetanhydride and azelaic acid/acetanhydride mixtures. II. Chemical and physical properties [J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(8): 1463-1472.
- [45] Majzoubi M, Saberi B, Farahnaky A, *et al.* Comparison of physicochemical and gel characteristics of hydroxypropylated oat and wheat starches [J]. Int J Food Eng, 2014, 10(4): 657-667.
- [46] Yousefi AR, Razavi SMA, Norouzy A. *In vitro* gastrointestinal digestibility of native, hydroxypropylated and cross-linked wheat starches [J]. Food Funct, 2015, 6(9): 3126-3134.
- [47] Ačkar D, Babić J, Šubarić D, *et al.* Isolation of starch from two wheat varieties and their modification with epichlorohydrin [J]. Carbohydr Polym, 2010, 81(1): 76-82.
- [48] 邓凡, 李甘. 淀粉改性方法及应用研究[J]. 广东蚕业, 2017, (3): 26.
Deng F, Li G. Study on modification method and application of starch [J]. Guangdong Seric, 2017, (3): 26.
- [49] 李庭龙, 韦金雷, 刘振楷, 等. 物理法淀粉改性研究进展[J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2015, (21): 90-93.
Li TW, Wei JL, Liu ZK, *et al.* Research progress on physical modification of starch [J]. J Guangxi Univ Nation (Nat Sci Ed), 2015, (21): 90-93.
- [50] 曹志刚, 曹志强, 曹咏梅. 预糊化淀粉的性质、应用及市场前景[J]. 大众科技, 2016, 18(2): 59-63.
Cao ZG, Cao ZQ, Cao YM. Property, application and market prospect of pre-gelatinized starch [J]. Pop Sci Technol, 2016, 18(2): 59-63.
- [51] 廖卢艳, 吴卫国. 湿热改性淀粉研究进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(5): 266-269.
Liao LY, Wu WG. Research progress on heat-moisture modified starch [J]. Food Mach, 2015, 31(5): 266-269.
- [52] 王宏伟, 李晓玺, 黄吉东, 等. 湿热处理对大米淀粉多层次结构及消化特性的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(6): 184-188.
Wang HW, Li XX, Huang JD, *et al.* Effects of heat-moisture treatment on multi-scale structure and digestibility of rice starch [J]. Mod Food Sci Technol, 2017, 33(6): 184-188.
- [53] 王水林. 糯米淀粉的酶法改性对其物化性能的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
Wang SL. Effects of enzymatic modification of glutinous rice starch on its physicochemical properties[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018.
- [54] 罗志刚, 杨景峰, 罗发兴. α -淀粉酶的性质及应用[J]. 食品研究与开发, 2007, (8): 163-167.
Luo ZG, Yang JF, Luo FX. Properties and applications of α -amylase [J]. Food Res Dev, 2007, (8): 163-167.
- [55] 王成, 荣玉芝, 李虎, 等. α -淀粉酶水解对芭蕉芋淀粉理化性质的影响[J]. 食品与药品, 2014, 16(4): 229-232.
Wang C, Rong YZ, Li H, *et al.* Effect of α -amylase hydrolysis on physicochemical properties of plantain arum starch [J]. Food Drug, 2014, 16(4): 229-232.
- [56] 熊柳, 南冲, 孙庆杰, 等. 酶法修饰抑制小麦淀粉回生工艺优化及机理探讨[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(1): 31-36.
Xiong L, Nan C, Sun QJ, *et al.* Optimization and mechanism of enzymatic modification on inhibition of wheat starch retrogradation [J]. J Chin Cereal Oil Ass, 2013, 28(1): 31-36.
- [57] 顾正彪, 李兆丰, 李雯雯, 等. 一种抑制淀粉回生的生物改性方法. 中国: CN104544473A [P].[2015-4-29].
Gu ZB, Li ZF, Li WW, *et al.* A biological modification method by restraining the starch retrogradation. China: CN104544473A [P]. [2015-4-29].
- [58] 李才明, 李阳, 顾正彪, 等. 麦芽糊精的支化修饰及其特性研究进展[J]. 中国食品学报, 2018, 18(10): 1-8.
Li CM, Li Y, Gu ZB, *et al.* Advances in mycochemical modification of maltodextrin and its properties [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2018, 18(10): 1-8.
- [59] 范祥云. 大麦籽粒直链淀粉和支链淀粉含量的 QTL 定位研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2018.
Fan XY. QTL mapping of amylose and amylopectin contents in barley seeds [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018.
- [60] 郭晓娟, 刘成梅, 吴建永. 亲水胶体对淀粉理化性质影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 367-371.
Guo XJ, Liu CM, Wu JY. Research progress on the effect of Hydrocolloidson the physicochemical properties of starch [J]. Sci Technol Food Ind, 2016, 37(6): 367-371.

(责任编辑: 陈雨薇)

作者简介

杨洁, 博士, 主要研究方向为淀粉资源的开发和利用
E-mail: 7864290805@163.com

洪雁, 教授, 主要研究方向为淀粉资源的开发与利用。
E-mail: hongyan@jiangnan.edu.cn