

## 多糖及其水解产物对谷物淀粉理化及消化特性的影响研究进展

胡薇薇<sup>1</sup>, 顾俊超<sup>1,2</sup>, 杨开<sup>2</sup>, 张治国<sup>1</sup>, 步婷婷<sup>2</sup>, 吴卫成<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>浙江省农业科学院食品科学研究所 杭州 310021

<sup>2</sup>浙江工业大学食品科学与工程学院 杭州 310014)

**摘要** 谷物是我国重要粮食作物,淀粉作为谷物的主要成分,不仅提供膳食能量,还与食品品质紧密相关。然而,天然淀粉易老化、抗剪切能力差,糊化后的淀粉还存在析水、热不稳定等问题,限制了淀粉的应用范围。利用非淀粉多糖对淀粉进行改性处理是一种绿色环保的改良方法。多糖水解产物也表现出提升淀粉加工特性的应用潜力,对于食品加工具有重要意义。本文概述多糖添加对淀粉糊化、流变、质构和体外消化特性的影响,以及多糖水解产物对谷物淀粉品质影响的研究进展,以期为谷物淀粉基食品物性改善提供理论参考。

**关键词** 多糖; 谷物淀粉; 改性; 物化; 消化

文章编号 1009-7848(2024)09-0486-11 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.09.044

谷物是我国农业的主要作物和膳食能量的重要来源,其中淀粉基胚乳是构成谷物的主要营养成分。淀粉是由葡萄糖分子聚合而成的高分子碳水化合物,具有廉价易得、可再生、可生物降解等特点,可作为乳化剂、增稠剂及凝胶剂等应用于食品加工中,并与谷物淀粉基食品品质紧密相关。淀粉分子可分为直链淀粉和支链淀粉两种大分子,其整体微观结构分为 5 个层次:分子链结构、结晶结构、片层结构、生长环结构和颗粒结构<sup>[1]</sup>。淀粉结构的差异会导致淀粉功能性质的不同,例如吸水性、溶胀性、胶凝性和消化性等。同时,天然淀粉也存在着固有缺陷,包括溶解性、抗剪切能力差的不足,糊化后的淀粉易析水、老化、热不稳定等问题,使得淀粉基加工食品口感发黏,黏弹性不好,不耐储藏,限制了淀粉的应用范围,也阻碍了谷物淀粉资源的深加工利用<sup>[2]</sup>。因此,以改善淀粉理化特性为目的的改性方法被广泛研究,从而扩展淀粉在食品加工等领域的应用<sup>[3]</sup>。当前,淀粉物性改良的方式主要包括化学法、物理法和酶法。化学改性是通过官能团修饰而改变淀粉原有的分子结构,使其化学性质改良,进而符合工业生产需求,具有快

速和高效的特点<sup>[4]</sup>。然而,改性产物的化学试剂残留以及副产物的衍生难免会引起食品安全问题。酶法是借助酶催化改变淀粉的理化性质,然而,其高成本以及酶源的单一性限制了该方法的产业化<sup>[5]</sup>。物理改性简单方便,环境友好,已得到一定程度的应用和推广。其中,利用非淀粉多糖等亲水胶体来提升淀粉的物化特性和功能价值正受到关注<sup>[6-7]</sup>。食品加工中,亲水胶体是一类能够起到稳定、乳化、保水等作用的食物添加剂,能显著改善淀粉的理化性质。南昌大学谢建华教授课题组系统研究了凉粉草多糖与玉米淀粉<sup>[8]</sup>、大米淀粉<sup>[9]</sup>、马铃薯淀粉<sup>[10]</sup>、小麦淀粉<sup>[11]</sup>之间的相互作用;综述多糖的加入对不同淀粉消化性能的影响方式,研究发现多糖的加入总是导致能量密度和淀粉颗粒膨胀,直链淀粉浸出和传热速率的降低,同时也减少颗粒分解,抑制淀粉分解酶,增加消化物黏度<sup>[6,12-13]</sup>。Zhu 等<sup>[14]</sup>通过研究魔芋葡甘聚糖对藜麦和玉米淀粉理化性质的影响,发现魔芋葡甘聚糖的加入增加了两种淀粉在糊化过程中的黏度;随着添加量的增加提升了淀粉的溶胀力和水溶性,改善了淀粉糊的凝胶化;同时,魔芋葡甘聚糖的添加降低了生淀粉和熟淀粉的体外消化率,而对两种淀粉的影响程度相似。此外,多糖水解产物也表现出提升淀粉加工特性的应用潜力,对于食品加工具有重要意义<sup>[15]</sup>。然而,目前仍缺乏关于多糖及其水解产物修饰对淀粉影响的系统综述。本文综述基于多

收稿日期: 2023-09-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(32302068);  
国家重点研发计划项目(2022YFE0123100)

第一作者: 胡薇薇,女,博士,助理研究员

通信作者: 吴卫成 E-mail: wuwc@zaas.ac.cn

糖及其水解产物在谷物淀粉食品物性改良中的应用,详细介绍多糖添加对淀粉糊化、流变、质构和体外消化特性的影响及其机理,以及多糖水解产物对谷物淀粉品质影响的研究进展,并对目前所面临的问题及发展方向进行讨论和展望,以期为谷物淀粉基食品物性和功能品质改善提供理论参考。

## 1 多糖对淀粉糊化特性的影响

糊化通常是指在水热环境下淀粉颗粒吸收水分发生膨胀,颗粒逐渐破裂并缓慢分散到溶液中。糊化过程中淀粉分子间氢键被破坏,支链淀粉结晶区瓦解,淀粉的双螺旋结构向单螺旋转变,再舒展成无规则线团,颗粒不可逆润胀。添加多糖类物质对淀粉糊化特性的影响具体表现在淀粉黏度、糊化温度、崩解值、糊化焓及回生值方面的改变。Zhang 等<sup>[16]</sup>将黄原胶添加到玉米淀粉中发现,玉米淀粉的黏度、崩解值、回生值显著增大,且随着预糊化步骤的增加,影响效果更显著。Tu 等<sup>[17]</sup>比较了3种不同构型菌菇多糖(Mushroom polysaccharides, MP)对高粱淀粉糊化性质的影响,发现高粱淀粉和MP之间的相互作用取决于MP的性质及其浓度:一方面,以 $\beta$ -葡聚糖结构域为主的菌菇多糖通过包裹周围膨胀的淀粉颗粒来阻止膨胀的淀粉颗粒之间的接触,从而降低了峰值黏度;另

一方面,高浓度的葡聚糖醛木糖甘露聚糖菌菇多糖由于分子间力增加和淀粉糊中链缠结增加而提高了峰值黏度。此外,低浓度的菌菇多糖添加量均显示出相比纯高粱淀粉体系更低的崩解值,表明混合物体系更好的热稳定性。MPs浓度的增加显著降低了回生值,这与所有类型的MP糊化过程浸出直链淀粉含量降低相关。仙草胶可提高玉米淀粉-仙草胶及小麦淀粉-仙草胶复配体系的黏度和回生值,延缓糊化过程。该现象主要归因于仙草胶对淀粉分子量的稀释作用,提高淀粉链周围介质的黏度,降低其运动速度,抑制淀粉的回生过程;通过竞争水分子,阻碍冰晶形成,延缓回生<sup>[18]</sup>。以上结果可以明显看出,多糖对不同淀粉的糊化作用不一致,这可能是由于淀粉的晶体结构和淀粉溶液的电荷不同。此外,虽然影响淀粉糊化过程的因素很多,但多糖的主要作用机制如下:在淀粉颗粒表面形成物理屏障,减少加热过程中渗入淀粉颗粒内粉水分子数量<sup>[19]</sup>;或通过与淀粉竞争糊化所需的水分而阻碍淀粉分子的吸水膨胀,抑制糊化<sup>[20]</sup>。也有报道称多糖以自身分子结构中的羟基通过静电吸附或氢键作用与溶出淀粉分子或溶胀支链分子侧链氢键结合,从而抑制淀粉的溶胀并降低体系的黏度,影响糊化过程;并且随着多糖浓度的增加,这一现象变得更加明显<sup>[21-22]</sup>。

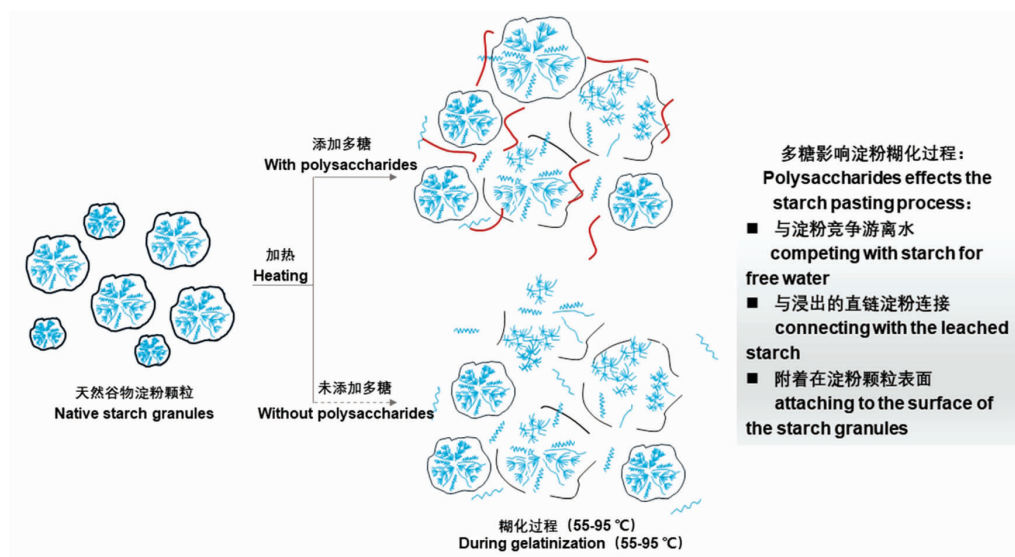


图1 多糖对糊化过程影响

Fig.1 Effect of polysaccharides on gelatinization process

## 2 多糖对淀粉流变学特性的影响

在食品加工中,淀粉悬浮液在高温和高剪切速率作用下,经历糊化、回生过程,淀粉基产品结构发生复杂变化。通过添加一定数量的多糖可以实现对淀粉凝胶流变性能的显著影响,从而扩大了淀粉应用的范围。基于多糖-淀粉体系的流变学特性研究包括两种流变实验:一种是静态流变学试验,参数包括稠度系数( $K$ )和流体指数( $n$ );另一种是动态流变学试验,参数包括复合黏度( $\eta^*$ )、储能模量( $G'$ )、损耗模量( $G''$ )和损失正切( $\tan \delta = G''/G'$ )。

### 2.1 多糖对淀粉静态流变特性的影响

静态流变学反应淀粉凝胶样品结构随剪切速率变化的规律,通过对样品施加线性变化(增大或减小)的稳态剪切速率进行测定。淀粉糊是一种典型的非牛顿流体,具有剪切变稀的效应。并且,淀粉糊在  $1 \sim 1500 \text{ s}^{-1}$  下的流变行为通常可用幂律方程被 Herschel-Bulkley 模型来表达,其中稠度指数  $K$  值越大表明复配体系增稠效果越好,流变行为指数  $n$  值降低代表流体假塑性增加<sup>[23]</sup>。通常在添加多糖后可观察到不同淀粉的表现黏度随剪切速率的增大而降低的现象;添加多糖后混合物的流动性指数( $n$ )远低于1,且多糖含量越高, $n$  值越低<sup>[24]</sup>。在玉米淀粉溶液中加入不同浓度的燕麦 $\beta$ -葡聚糖都会导致流变指数  $n$  的降低,表明混合体系的假塑性增加<sup>[25]</sup>。类似地淀粉-水胶体混合体系流动性减弱的现象也在 Kong 等<sup>[26]</sup>的研究中被报道。另一方面,稠度指数  $K$  与多糖类型、浓度有关。魔芋葡甘露聚糖-大米淀粉复合物的表现黏度显著高于纯淀粉体系,且  $K$  值与其添加量成正比,表明淀粉分子与胶体的相互作用增加了复合物的流动阻力。相反,在虫草多糖-小麦淀粉及罗望子多糖-玉米淀粉的研究中,多糖降低了糊化淀粉的黏度并使其更具流动性,显示出  $K$  值随着多糖浓度增加而降低的趋势<sup>[26-27]</sup>。多糖等亲水胶体在淀粉静态流变特性的影响主要归因于多糖的添加降低了淀粉的有效含水量并增加了体系中淀粉的有效浓度,有利于体系形成稳定的凝胶结构。

### 2.2 多糖对淀粉动态流变特性的影响

淀粉糊的动态流变学特性,是指在交变的应力(或应变)作用下,体系表现出的力学相关的规

律,主要表现为动态黏弹性。其中弹性模量或储存模量( $G'$ )可以作为淀粉糊产生弹性变形难易程度的指标, $G'$  值越大表示凝胶强度越大,在一定应力作用下,发生变形越小。黏性模量或损失模量( $G''$ )表示初始流动所需的能量,是转变为剪切热的能量损耗,不可恢复。损失正切值( $\tan \delta = G''/G'$ )描述了流体中所含黏性和弹性的比例, $\tan \delta$  值 $<1$  表明更具弹性的固体材料, $\tan \delta$  值 $>1$  描述更具粘性的液体材料。一般而言,马铃薯、大米和小麦淀粉等具有较大粒径的淀粉具有较高的  $G'$ 、 $G''$  值和较低的  $\tan \delta$  值。孙莹<sup>[28]</sup>研究了魔芋葡甘露聚糖(Konjac glucomannan, KGM)对3种晶型淀粉的影响,发现添加 KGM 后,马铃薯、大米和豌豆淀粉的  $G'$  和  $G''$  均出现显著性增加,这可能是因为淀粉分子和 KGM 糖链通过氢键缔和,从而导致淀粉-KGM 体系中缠结点的数量增加,并形成了更稳定的三维网状结构。KGM 降低了马铃薯淀粉的  $\tan \delta$  值,而使大米淀粉和豌豆淀粉体系的  $\tan \delta$  值升高,说明 KGM 对马铃薯淀粉的弹性特征影响更明显,其复配淀粉糊的凝胶网络转变为更具弹性和刚性的结构,而对豌豆淀粉和大米淀粉的黏性特征影响更明显,其混合体系更偏向于流体特性。然而,小麦淀粉的  $G'$  和  $G''$  随着虫草多糖添加量的增加而降低。据报道直链淀粉的凝胶化有利于淀粉凝胶结构的形成,因此随着体系浸出直链淀粉含量的增加,淀粉凝胶  $G'$  值普遍增加,在此虫草多糖通过与渗出直链淀粉分子的缔合,阻碍直链淀粉分子聚集,而降低了淀粉糊的弹性<sup>[23,26]</sup>。类似的,多糖削弱直链淀粉聚集的现象也在可溶性大豆多糖-大米淀粉体系中报道<sup>[29]</sup>。此外,凝胶的储能模量还受淀粉-多糖体系中键数量和强度的影响<sup>[30]</sup>。Yuris 等<sup>[31]</sup>发现去除部分钙离子后,凉粉草多糖-小麦淀粉体系的静电斥力增加,多糖-淀粉相互作用的降低, $G'$  变小凝胶强度减弱。

## 3 多糖对淀粉质构特性的影响

质构是淀粉类食物的感官特征,淀粉颗粒在水热处理下吸水、膨胀、破碎,导致硬度下降,因而可用非淀粉多糖等亲水胶体来提升淀粉的质构特性。凝胶强度、硬度、弹性及内聚性是评估质构特性的常用指标,其中淀粉基食品的硬度、弹性和内



聚性与直链淀粉分子间的相互交联程度,以及淀粉凝胶样品网状结构有关,数值越大表明抗外界破坏的能力越强<sup>[32]</sup>。荣利远<sup>[33]</sup>比较了凉粉草多糖对根茎类、谷物类、豆类淀粉的质构特性影响,结果发现添加多糖后所有类型纯淀粉凝胶的强度和硬度都得到了显著性提升。该结果与 Ren 等<sup>[9]</sup>在大米淀粉的质构影响研究结论一致。Dangi 等<sup>[34]</sup>将天然瓜尔豆胶引入珍珠粟淀粉体系,提高了复合物凝胶的硬度,胶凝性和黏聚性差异不显著。在此,类似的凝胶硬度增加现象可能与亲水胶体多糖大分子限制水分子游离,增加淀粉的有效浓度、形成致密的组织相关,从而提高了凝胶的强度和硬度。相反,也有文献报道亲水胶体加入导致复配体系质构更加柔软,硬度降低。例如,可溶性大豆多糖的加入会使小麦淀粉凝胶质地柔软<sup>[35]</sup>。赵佳佳等<sup>[36]</sup>发现刺槐豆胶、海藻酸钠、卡拉胶和大豆多糖、 $\beta$ -葡聚糖都具有较好的抗回生老化效果,降低小麦淀粉老化后凝胶的硬度,可以保持较好的感官品质。其中大豆多糖、刺槐豆胶的抗老化效果最好:一方面,亲水胶体与淀粉分子链间的氢键作用阻碍了直链淀粉分子聚集重排,削弱了分子间相互作用;另一方面,多糖胶体附着在淀粉颗粒表面,减小了淀粉之间的黏结作用,进一步使得淀粉老化延迟,凝胶硬度降低。此外,弹性与动态流变学表征结果相似,多糖-淀粉体系的咀嚼性、内聚性的变化可能与凝胶的网络结构相关<sup>[6]</sup>。

#### 4 多糖对淀粉消化特性的影响

淀粉主要通过小肠中胰腺  $\alpha$ -淀粉酶和葡萄糖苷酶的酶解作用被消化和分解,产生葡萄糖供最终消化和吸收<sup>[37]</sup>。根据淀粉在小肠中被水解的情况,可将淀粉分为3个部分,即在小肠内前20 min 被消化的快消化淀粉(Rapidly Digestible Starch, RDS),在小肠内20~120 min 被消化的慢消化淀粉(Slowly Digestible Starch, SDS)和在小肠内120 min 仍不被消化的抗性淀粉(Resistant Starch, RS);其中由于SDS可在人胃肠道中的缓慢消化和葡萄糖释放会降低对餐后血糖波动的响应,从而调节餐后血糖水平并为能量消耗提供长期供应,因而成为淀粉质健康食品的主要改性目标<sup>[38]</sup>。不同于多酚类外源添加物通过改变酶结构,

降低酶活性而影响其对淀粉的消化能力<sup>[39]</sup>。表2汇总了不同多糖及其水解产物对谷物淀粉消化特性的影响。根据目前研究报道,多糖类外源添加物对淀粉消化特性的影响作用方式,主要包括以下三类:1)增稠消化体系限制水分子运动降低酶的水解速率,并形成物理屏障后限制酶进入淀粉内部。例如, $\beta$ -葡聚糖的添加可以增加消化酶解体系黏度,降低淀粉的水解速率;同时,黏度增加水解产物的扩散阻力,局部产物浓度过高也会抑制酶水解反应<sup>[25,40]</sup>。2)亲水胶体与淀粉体系通过分子间作用力、氢键和范德华力等非共价相互作用发生共聚改性形成单螺旋或结晶复合物以降低淀粉对酶的敏感性,协同提升抗酶解性能。凉粉草多糖和小麦淀粉的相互作用有利于 $\alpha$ -淀粉酶结合,但对于 $\alpha$ -葡萄糖苷酶结合则较少,进而引起小麦淀粉消化性能的改变<sup>[31]</sup>。类似的结果也在Chen等<sup>[41]</sup>大米淀粉的研究结果中报道。3)通过改变淀粉结构所含有的羟基或羧基基团从而限制酶对淀粉的可及性。Oh等<sup>[42]</sup>发现绿茶多糖通过诱导小麦淀粉微观结构的变化从而抑制淀粉水解和葡萄糖的肠吸收;尤其当抗性淀粉比例降低时,水溶性和碱溶性绿茶多糖组分具有降低淀粉水解和控制餐后血糖水平的潜在功能。Zhou等<sup>[43]</sup>发现阿拉伯胶/黄原胶/瓜尔豆胶的添加改变了原始玉米淀粉结构,影响直链淀粉的浸出和重排,从而通过改变淀粉底物环境影响淀粉的消化率。

#### 5 多糖水解产物对谷物淀粉品质特性的影响

食品中亲水胶体浓度过高时会对食品适口性和黏度产生不利影响。因此,对多糖进行水解,通过部分水解方式获得低黏度多糖水解产物以增加其应用范围,满足特定的加工需求;并且多糖水解产物也表现出提升淀粉加工特性的应用潜力,对于食品加工具有重要意义。Dangi等<sup>[34]</sup>研究了瓜尔豆胶酸水解产物对珍珠粟淀粉糊化、流变和质构特性的影响,结果显示其可以通过浓度依赖的方式显著增加淀粉吸水率。添加水解产物后珍珠小米淀粉的起始温度显著升高,并且水解产物质量分数为2%时降解焓显著增加,表明淀粉颗粒在相对较高的温度下开始融化。在流变和质构方面,稳

表 1 多糖及其水解产物对谷物淀粉糊化特性的影响

Table 1 Effects of polysaccharides and their hydrolysates on the physicochemical properties of cereals starch			
添加物	淀粉种类	添加量	主要影响结果
凉粉草多糖	小麦淀粉	0.1%~5%(质量分数)	凉粉草多糖提高了淀粉凝胶强度和热稳定性、减少直链淀粉浸出
凉粉草多糖	大米淀粉	0.05%~0.5%(质量分数)	淀粉凝胶具有剪切稀化行为,凉粉草多糖提高了淀粉凝胶的糊化黏度和凝胶特性、黏弹性,增加凝胶短程有序度
大豆多糖	大米淀粉	2%~10%(质量分数)	大豆多糖降低了混合体系的峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、崩解值及回生值,增加了糊化温度;凝胶体系G'均大于G'',且呈现出频率依赖性,具有典型的弱凝胶特性
大豆多糖	玉米淀粉	4%(质量分数)	大豆多糖减少了直链淀粉浸出与结晶度的形成,降低了淀粉体系的糊化黏度,降低玉米淀粉和小麦淀粉凝胶硬度
魔芋葡甘露聚糖	藜麦淀粉	2.5%~20%(质量分数)	魔芋葡甘露聚糖的添加增加了淀粉体系黏度、对凝胶结构特性几乎没有影响
魔芋葡甘露聚糖	玉米淀粉		
菌菇多糖	高粱淀粉	0.15%~0.6%(质量分数)	菌菇多糖降低了高粱淀粉的糊化程度、回生性;其中黑木耳多糖和银耳多糖通过与淀粉的疏水相互作用抑制高粱淀粉凝胶中淀粉结晶
滑子菇多糖	玉米淀粉	0.3~1.5 g/mL	滑子菇多糖可提高复配体系的黏度和糊化温度,延缓糊化过程;两者通过氢键发生相互作用,并且随着多糖质量浓度的增加,复配体系的黏弹性和假塑性逐渐增强,流动性逐渐降低。
菊粉	小麦淀粉	5%~20%(质量分数)	菊粉降低了淀粉体系的黏度、崩解值和回生值,抑制糊化;复配体系均为典型的非牛顿流体,具有剪切稀化行为,随着添加量的增加凝胶结构逐渐由类固态转变为类液态;抗性淀粉含量与添加量呈正相关
$\beta$ -葡聚糖及其水解产物	燕麦淀粉	~1%(质量分数)	随着 $\beta$ -葡聚糖分子质量的增加,淀粉体系黏度增加,溶解度降低
果胶及其水解产物	大麦淀粉	4%,6%(质量分数)	果胶(NP)及其水解产物(PH)提高了淀粉体系糊化温度、降低了糊化焓、崩解值、最终黏度。不同的是:NP增加了大麦淀粉的峰值黏度,而pH值降低峰值黏度;NP提高了淀粉糊G'和G''值,增加了淀粉糊的弹性,而pH值添加后G'和G''值较低,增加了淀粉糊的黏性行为
瓜尔豆胶及其水解产物	珍珠粟淀粉	1%,2%(质量分数)	瓜尔豆胶(NGG)及其水解产物(GGH)均降低了流动行为指数和稠度指数,增加了淀粉糊G'和G''值,形成了类固体结构;NGG显著增加了峰值、崩解值和最终黏度,而GGH没有改变峰值和最终黏度,但降低了崩解值
麦芽糖	大黄米淀粉	2%~10%(质量分数)	麦芽糖能够提高糯性谷物淀粉的糊化温度,显著降低淀粉体系峰值黏度、终值黏度和回生值;随着添加量的增加,淀粉糊剪切应力降低,稠度降低
	糯米淀粉		
	糯玉米淀粉		

表 2 多糖及其水解产物对谷物淀粉消化特性的影响

Table 2 Effects of polysaccharides and their hydrolysates on the digestion characteristics of cereals starch				
添加物	淀粉种类	添加量	主要影响结果	参考文献
黑木耳多糖 银耳多糖	高粱淀粉	0.6% (质量分数)	0.6%的黑木耳多糖(AAP)/银耳多糖(TFP)增加了水解产物中高分子质量 $\alpha$ -糊精的比例,并延迟了葡萄糖从消化淀粉凝胶中的扩散。这种减少与 AAP/TFP 对 $\alpha$ -葡萄糖苷酶的抑制作用以及高分子质量麦芽低聚糖的抑制水解相关。AAP/TFP 与葡萄糖转运蛋白(SGLT1)的潜在结合也阻碍了葡萄糖转运	[50]
	高粱淀粉			
知母多糖	小麦淀粉	4%~12% (质量分数)	知母多糖通过在淀粉颗粒表面形成屏障,在一定程度上减少了淀粉的酶水解,抑制了小麦淀粉的糊化,并增加了消化过程中 SDS 和 RS 的含量	[51]
罗望子多糖	玉米淀粉	0.4% (质量分数)	罗望子多糖会增加淀粉糊的粘度,延缓淀粉酶进入淀粉分子,从而抑制玉米淀粉的消化	[27]
虫草多糖	小麦淀粉	5%~15% (质量分数)	通过氢键围绕浸出的直链淀粉的表面,降低了小麦淀粉的体外消化率	[26]
黄原胶	玉米淀粉 高粱淀粉	0.5%~2% (质量分数)	黄原胶的添加提高了玉米淀粉、高粱淀粉挤出物的抗性淀粉含量(1%添加量时显示最大的抗性淀粉含量 66.34%和 70.51%)、降低了复合物升糖指数;主要作用方式包括在淀粉颗粒表面周围形成保护屏障、与浸出的直链淀粉分子链的相互作用。	[52]
黄原胶	大米淀粉	0.1%~0.5% (质量分数)	黄原胶与魔芋葡甘聚糖通过与淀粉分子间的相互作用抑制了凝胶中的淀粉水解,并且观察到这种抑制作用的浓度依赖性	[53]
魔芋葡甘聚糖	小麦淀粉	0.5%~4.5% (质量分数)	随着添加量的增加,快消化淀粉含量呈显著下降趋势,并在 4.5%时达到最低;同时,魔芋葡甘聚糖可以提高冷冻淀粉的抗性淀粉含量,对抑制小麦淀粉消化率产生积极影响。	[54]
魔芋葡甘聚糖	玉米淀粉	3%~12% (质量分数)	魔芋葡甘聚糖增强玉米淀粉的黏弹性和抗消化性;魔芋葡甘聚糖一部分可以在淀粉颗粒周围形成层状结构,同时也会引起直链淀粉结构重排并影响直链淀粉网络结构,其添加量与淀粉的消化密切相关	[55],[56]
菊粉	小麦淀粉	1:1 (质量比)	菊粉的添加增加了显著增加了小麦抗性淀粉的含量,相比对照组,其值从 27.56%提升至 66.34%	[57]
$\beta$ -葡聚糖及其水解产物	燕麦淀粉	~1% (质量分数)	$\beta$ -葡聚糖分子质量和溶液浓度越大,其降低淀粉消化效果就越好,表现在慢消化淀粉和抗性淀粉含量增加,以及血糖指数降低。	[13]

定剪切测量表明,瓜尔豆胶酸水解产物降低了流动行为指数( $n$ )和稠度指数( $K$ ),增加了 $G'$ 和 $G''$ 值,形成了更具硬度、弹性和咀嚼性的固体形态凝胶。林楠等<sup>[15,44]</sup>比较了麦芽糖对糯性谷物淀粉(大黄米、糯米、糯玉米淀粉)糊化和流变性质的影响,结果显示麦芽糖通过减少整个体系自由水含量减少,提高3种糯性谷物淀粉的成糊温度和糊化焓值,降低体系黏度。Hu等<sup>[45]</sup>讨论不同浓度麦芽糊精对甘薯淀粉的性质影响发现,适当浓度添加量的麦芽糊精通过氢键作用交联淀粉分子,促进淀粉分子形成致密有序的凝胶网络结构,从而提高粉丝的咀嚼性,减少粉丝蒸熟损失,提升粉丝质量。

## 6 总结与展望

在淀粉中添加非淀粉多糖等亲水胶体对淀粉进行改性处理是一种绿色有效的方法,对多糖-淀粉复配体系的糊化特性、流变特性、质构特性和消化特性等有显著改善作用。其中,多糖在糊化过程中通过附着在淀粉颗粒表面来保护淀粉,其与淀粉之间的非共价键相互作用显著影响淀粉凝胶的流变性能;不同类型的多糖和适量的多糖添加可改善淀粉基质的质构参数;并且,添加多糖会降低消化过程中淀粉与酶的接触点,从而影响消化效果。此外,通过部分水解方式获得低黏度多糖水解产物以增加其应用范围,可以满足特定的加工需求,适量添加可提升淀粉基凝胶品质特性。

然而,想要获得理想的多糖-淀粉复配体系应用于实际生产中,改善产品质量,提高经济效益,还需进一步深入研究;首先,探究不同亲水胶体之间的复配效应,以及复配胶体对淀粉理化性质的影响和相关机理;其次,讨论温度、pH值、金属离子等外界条件对多糖与淀粉之间互作的影响及功能相关性,使多糖改善淀粉基食品的功能特性得到稳定发挥。此外,还包括新资源多糖的开发、以产品基质为导向,探究混合体系的机械性能,亲水性和可加工性在食品工业中的应用等。全面而深入地了解 and 建立多糖结构与淀粉分子之间的互作关系,探明品质相关影响机制,扩展多糖在谷物淀粉基食品的品质改善应用。

## 参考文献

- [1] GALLANT D J, BOUCHET B, BALDWIN P M. Microscopy of starch: Evidence of a new level of granule organization[J]. Carbohydrate Polymers, 1997, 32(3): 177-191.
- [2] WANG Y, ZHAO J K, WU Y W, et al. Processing of air-dried chestnut and physicochemical properties of its starch with low digestibility[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106051.
- [3] 王子朝, 郑欣欣, 余晓雪, 等. 多糖对食品物性及功能影响的研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(1): 126-134.  
WANG Z C, ZHENG X X, YU X X, et al. Research progress on the effect of polysaccharide on physical property and function of food[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(1): 126-134.
- [4] WANG Z, MHASKE P, FARAHNAKY A, et al. Cassava starch: Chemical modification and its impact on functional properties and digestibility, a review[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 129: 107542.
- [5] 代香临, 郑启航, 胡楠楠, 等. 超声辅助酶改性典型晶型淀粉的结构及消化特性[J]. 中国食品学报, 2023, 23(1): 78-86.  
DAI X L, ZHENG Q H, HU N N, et al. The structure and digestive properties of ultrasonic assisted enzyme modified typical crystalline starches [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(1): 78-86.
- [6] CHEN S, QIN L, CHEN T, et al. Modification of starch by polysaccharides in pasting, rheology, texture and in vitro digestion: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 207(15): 81-89.
- [7] 王磊鑫, 吕莹果, 吴娜娜, 等. 膳食纤维对淀粉性质的影响研究进展[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(6): 173-181.  
WANG L X, LÜ Y G, WU N N, et al. Research progress on the effect of dietary fiber on properties of starch [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(6): 173-181.
- [8] LUO Y, SHEN M Y, HAN X Y, et al. Gelation characteristics of Mesona chinensis polysaccharide-maize starches gels: Influences of KCl and NaCl[J].



- Journal of Cereal Science, 2020, 96: 103108.
- [9] REN Y M, RONG L Y, SHEN M Y, et al. Interaction between rice starch and *Mesona chinensis* Benth polysaccharide gels: Pasting and gelling properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 240(15): 116316.
- [10] LIU S C, SHEN M Y, XIAO Y H, et al. Effect of maize, potato, and pea starches with *Mesona chinensis* polysaccharide on pasting, gelatinization properties, granular morphology and digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106047.
- [11] YURIS A, GOH K K T, HARDACRE A K, et al. The effect of gel structure on the in vitro digestibility of wheat starch–*Mesona chinensis* polysaccharide gels[J]. Food & Function, 2019, 10(1): 250–258.
- [12] ARAVIND N, SISSONS M J, FELLOWS C M, et al. Effect of inulin soluble dietary fibre addition on technological, sensory, and structural properties of durum wheat spaghetti[J]. Food Chemistry, 2012, 132(2): 993–1002.
- [13] KIM H J, WHITE P J. Impact of the molecular weight, viscosity, and solubility of  $\beta$ -glucan on *in vitro* oat starch digestibility[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(13): 3270–3277.
- [14] ZHU F, ZHANG Y. Effect of konjac glucomannan on physicochemical properties of quinoa and maize starches[J]. Cereal Chemistry, 2019, 96(5): 878–84.
- [15] 林楠, 肖瑜, 杨新标, 等. 麦芽糖对糯性谷物淀粉糊化和流变性质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 1–7.
- LIN N, XIAO Y, YANG X B, et al. Effect of maltose on gelatinization and rheological properties of waxy cereal starches[J]. Food Science, 2021, 42(10): 1–7.
- [16] ZHANG C, WANG Z J, LIU Q Q, et al. Improvement of pasting and gelling behaviors of waxy maize starch by partial gelatinization and freeze–thawing treatment with xanthan gum[J]. Food Chemistry, 2022, 375(1): 131656.
- [17] TU J, ADHIKARI B, BRENNAN M A, et al. Interactions between sorghum starch and mushroom polysaccharides and their effects on starch gelatinization and digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108504.
- [18] RONG L Y, LIU W M, SHEN M Y, et al. The effects of *Mesona chinensis* Benth gum on the pasting, rheological, and microstructure properties of different types of starches[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 2287–2293.
- [19] 冀晓龙, 尹明松, 赵阳, 等. 菊粉–小麦淀粉复配体系理化特性及相互作用[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(3): 135–140.
- JI X L, YIN M S, ZHAO Y, et al. Study on physicochemical properties of inulin–wheat starch blended systems and the interactions between the components[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(3): 135–140.
- [20] MA S P, ZHU P L, WANG M C. Effects of konjac glucomannan on pasting and rheological properties of corn starch[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 234–240.
- [21] FUNAMI T, NAKAUMA M, NODA S, et al. Effects of some anionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behaviors of wheat starch: Soybean–soluble polysaccharide and gum arabic[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(8): 1528–1540.
- [22] ZHANG Y Y, GU Z B, ZHU L, et al. Comparative study on the interaction between native corn starch and different hydrocolloids during gelatinization[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 116: 136–143.
- [23] 王丽, 李淑荣, 句荣辉, 等. 淀粉流变学特性在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(10): 212–215.
- WANG L, LI S R, JU R H, et al. Research progress in application of starch rheological properties in food processing[J]. The Food Industry, 2022, 43(10): 212–215.
- [24] XIAO Y H, SHEN M Y, LUO Y, et al. Effect of *Mesona chinensis* polysaccharide on the pasting, rheological, and structural properties of tapioca starch varying in gelatinization temperatures[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 156(1): 137–143.
- [25] HAO Z W, HAN S J, XU H J, et al. Insights into the rheological properties, multi-scale structure and in vitro digestibility changes of starch– $\beta$ -glucan complex prepared by ball milling[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 224(1): 1313–1321.



- [26] KONG X R, ZHU Z Y, ZHANG X J, et al. Effects of *Cordyceps polysaccharides* on pasting properties and *in vitro* starch digestibility of wheat starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105604.
- [27] XIE F, ZHANG H, WU Y, et al. Effects of tamarind seed polysaccharide on physicochemical properties of corn starch treated by high pressure homogenization[J]. LWT, 2021, 150: 112010.
- [28] 孙莹. 魔芋葡甘聚糖对三种晶型淀粉物理化学性质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- SUN Y. Effects of konjac glucomannan on physicochemical properties of three starches with different crystalline[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.
- [29] 武娜, 杨杨, 边鑫, 等. 可溶性大豆多糖对大米淀粉物化特性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6140-6146.
- WU N, YANG Y, BIAN X, et al. Effects of soluble soybean polysaccharides on the physical and chemical properties of rice starch[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(19): 6140-6146.
- [30] FENG T, YE R. Rheological behavior of biopolymer systems[M]// Handbook of Biopolymer - Based Materials. US: Wiley - VCH Verlag GmbH & Co, 2013: 673-698.
- [31] YURIS A, HARDACRE A K, GOH K K T, et al. The role of calcium in wheat starch-*Mesona chinensis* polysaccharide gels: Rheological properties, *in vitro* digestibility and enzyme inhibitory activities[J]. LWT, 2019, 99: 202-208.
- [32] 范欣, 李小平, 胡经纬, 等. 亲水胶体对淀粉理化性质的影响及机理研究进展[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(9): 195-202.
- FAN X, LI X P, HU J W, et al. Review on effects and mechanism of hydrocolloids on physicochemical properties of starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(9): 195-202.
- [33] 荣利远. 凉粉草胶液对不同种类淀粉凝胶特性的影响及其在淀粉膜中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- RONG L Y. Effects of *Mesona chinensis* gum on the gel properties of different starch and its application in starch film[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [34] DANGI N, YADAV B S, YADAV R B. Pasting, rheological, thermal and gel textural properties of pearl millet starch as modified by guar gum and its acid hydrolysate[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 139 (15): 387-396.
- [35] ZHAO Q Z, TIAN H, CHEN L, et al. Interactions between soluble soybean polysaccharide and starch during the gelatinization and retrogradation: Effects of selected starch varieties[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106765.
- [36] 赵佳佳, 钟晴, 钱海峰, 等. 不同添加剂对小麦淀粉凝胶抗老化效果的研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(8): 37-42.
- ZHAO J J, ZHONG Q, QIAN H F, et al. Study on the anti-retrogradation effects of different additives on the wheat starch gel[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(8): 37-42.
- [37] QADIR N, WANI I A. *In-vitro* digestibility of rice starch and factors regulating its digestion process: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 291(1): 119600.
- [38] 谭沙, 朱仁威, 刘庆庆, 等. 外源添加物对淀粉理化性质和消化特性影响的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 286-292.
- TAN S, ZHU R W, LIU Q Q, et al. Research progress on effects of exogenous additives on physicochemical properties and digestibility of starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(12): 286-292.
- [39] ZHENG Y, TIAN J, OGAWA Y, et al. Co-extrusion of proanthocyanins from Chinese bayberry leaves modifies the physicochemical properties as well as the *in vitro* digestion of restructured rice[J]. Food Structure, 2021, 27: 100182.
- [40] NGUYEN T T L, FLANAGAN B M, TAO K, et al. Effect of processing on the solubility and molecular size of oat  $\beta$ -glucan and consequences for starch digestibility of oat-fortified noodles[J]. Food Chemistry, 2022, 372(15): 131291.
- [41] CHEN L, TIAN Y Q, ZHANG Z P, et al. Effect of pullulan on the digestible, crystalline and morphological characteristics of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 383-390.
- [42] OH J H, CHUNG J O, LEE C Y, et al. Characterized polysaccharides from green tea inhibited starch hydrolysis and glucose intestinal uptake by inducing microstructural changes of wheat starch[J].

- Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(47): 14075–14085.
- [43] ZHOU S, HONG Y, GU Z B, et al. Effect of heat–moisture treatment on the *in vitro* digestibility and physicochemical properties of starch–hydrocolloid complexes[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 104: 105736.
- [44] 林楠, 郑明珠, 杨新标, 等. 糖类化合物对糯性谷物淀粉品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(20): 6747–6751.
- LIN N, ZHENG M Z, YANG X B, et al. Effect of carbohydrate on the quality of glutinous grain starch[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(20): 6747–6751.
- [45] HU W W, ZHANG W, ZHANG Z G, et al. Effect of maltodextrin on the physicochemical properties and cooking performance of sweet potato starch noodles[J]. Foods, 2022, 11(24): 4082.
- [46] YURIS A, GOH K K T, HARDACRE A K, et al. Understanding the interaction between wheat starch and *Mesona chinensis* polysaccharide[J]. LWT, 2017, 84: 212–221.
- [47] LIU S, LIN L, SHEN M, et al. Effect of *Mesona chinensis* polysaccharide on the pasting, thermal and rheological properties of wheat starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 118: 945–951.
- [48] 赵辉, 张艳荣, 杨岩, 等. 滑子菇多糖对玉米淀粉理化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(2): 100–110.
- ZHAO H, ZHANG Y R, YANG Y, et al. Effects of pholiota nameko polysaccharide on physicochemical properties of corn starch[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(2): 100–110.
- [49] DANGI N, YADAV B S, YADAV R B. Pectin and its acid hydrolysate for the modification of hydration, pasting, thermal and rheological properties of barley starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 152(1): 969–980.
- [50] TU J, ADHIKARI B, BRENNAN M A, et al. Acidic polysaccharides from black ear and silver ear mushrooms modulated the release and transport of glucose from gelatinised sorghum starch during digestion[J]. Food Chemistry, 2023, 411(15): 135426.
- [51] ZHU L, ZHANG F J, YANG Y, et al. Extraction, purification, structural characterization of *Anemarrhena asphodeloides* polysaccharide and its effect on gelatinization and digestion of wheat starch[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 189(1): 115867.
- [52] SHAIKH F, ALI T M, MUSTAFA G, et al. Comparative study on effects of xanthan gum at different concentrations on the functional, thermal, and digestibility characteristics of corn and sorghum starch extrudates[J]. Starch – Stärke, 2021, 73(3/4): 2000206.
- [53] SASAKI T, KOHYAMA K. Effect of non–starch polysaccharides on the *in vitro* digestibility and rheological properties of rice starch gel[J]. Food Chemistry, 2011, 127(2): 541–546.
- [54] WANG Y Y, GUO J Y, WANG C Y, et al. Effects of konjac glucomannan and freezing on thermal properties, rheology, digestibility and microstructure of starch isolated from wheat dough[J]. LWT, 2023, 177(1): 114588.
- [55] NING Y J, CUI B, YUAN C, et al. Effects of konjac glucomannan on the rheological, microstructure and digestibility properties of debranched corn starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105342.
- [56] NING Y J, CUI B, YUAN C. Decreasing the digestibility of debranched corn starch by encapsulation with konjac glucomannan[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105966.
- [57] JI X L, WANG Z W, JIN X Y, et al. Effect of inulin on the pasting and retrogradation characteristics of three different crystalline starches and their interaction mechanism[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 978900.

## Research Progress on the Effects of Polysaccharides and Their Hydrolysates on the Physicochemical and Digestive Characteristics of Cereals Starch

Hu Weiwei<sup>1</sup>, Gu Junchao<sup>1,2</sup>, Yang Kai<sup>2</sup>, Zhang Zhiguo<sup>1</sup>, Bu Tingting<sup>2</sup>, Wu Weicheng<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>*Food Science Institute, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021*

<sup>2</sup>*College of Food Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014*)

**Abstract** Cereals are important food crops in China. As the main nutritional component of cereals, starch is closely related to the quality of starch-based foods. However, natural starch has shortcomings such as easy aging and poor shear resistance, and the gelatinized starch also has problems such as water separation, easy aging, and thermal instability, limiting its application range. Introducing hydrophilic colloids such as non-starch polysaccharides is a green and environmentally friendly starch modification method. Moreover, the hydrolysates of polysaccharides also exhibit potential applications to improve the processing characteristics of starch, which is of great significance for food processing. This article summarizes the effects and mechanisms of polysaccharides on starch gelatinization, rheology, texture, and *in vitro* digestion properties, as well as the research progress in the effects of polysaccharide hydrolysates on the quality of cereal starch. It is expected that this work could provide theoretical reference for improving the physical properties of cereal starch-based foods.

**Keywords** polysaccharide; cereals starch; modification; physicochemical; digestion