青稞多糖对玉米淀粉糊化和流变特性的影响

章乐乐， 崔鑫儒， 赵创谦， 李婉麒， 陈紫颖，
汤柳茜， 赖凤羲， 艾连中， 张 汇*
（上海理工大学 医疗器械与食品学院，上海 200093）

摘要： 为了研究青稞β-葡聚糖(HBBG)和阿拉伯木聚糖(HBAX)对玉米淀粉(CS)糊化和流变特性的影响，向CS中添加不同质量分数的青稞来源多糖，通过快速黏度仪(RVA)、流变仪、扫描电镜等分析其对CS黏度和表观形貌的影响。结果表明：添加不同质量分数青稞多糖均可降低CS体系的崩解值、延长糊化峰值时间，提高CS的热稳定性；线性链状结构的HBBG通过与淀粉分子交联及自身的聚集作用，增加CS体系黏度、储能模量(G')和损耗模量(G'')，提高体系的黏弹性；而具有高分支结构的HBAX则通过附着在淀粉颗粒表面，抑制淀粉颗粒膨胀，减少了直链淀粉的渗漏，降低体系峰值黏度、稠度系数K、G和G''等，增强了体系的流动性。

关键词： 玉米淀粉；青稞；β-葡聚糖；阿拉伯木聚糖；糊化；流变
中图分类号：TS 201.7 **文章编号：**1673-1689(2020)10-0073-09 **DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2020.10.010

Effects of Polysaccharides from Highland Barley on Gelatinization and Rheological Properties of Corn Starch

*ZHANG Lele, CUI Xinru, ZHAO Chuangqian, LI Wanqi, CHEN Ziying, TANG Liuqian, LAI Fengxi, AI Lianzhong, ZHANG Hui**
(School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To study the effects of β-glucan (HBBG) and arabinoxylan (HBAX) extracted from highland barley on the gelatinization and rheological properties of corn starch (CS), highland barley-derived polysaccharides with a series of concentrations were mixed into CS solution. The viscosity properties and morphological features of different mixtures were studied by rapid-visco analyzer (RVA), rheometer and scanning electron microscope (SEM). The results indicated that both HBBG and HBAX reduced the breakdown value, increased the gelatinization peak time, and finally improved the thermal stability of CS gel. HBBG with linear chain structure increased the apparent viscosity, storage modulus (G'), and loss modulus (G''), thus enhancing the viscoelasticity of CS gel by cross-linking with starch and self-aggregation. However, HBAX with highly branched structure reduced the amount of leached amylose, peak viscosity, consistency coefficient (K), G' and G'', consequently increasing the fluidity of CS system by covering around the starch granules to inhibit

收稿日期： 2020-03-31
基金项目： 国家自然科学基金项目(31771956,31601428)；上海市科技兴农项目(2019-02-08-00-07-F01152)。
* **通信作者：** 张 汇(1986—)，男，博士，讲师，主要从事碳水化合物研究。E-mail：zhh8672@126.com

the swelling of starch.

Keywords: corn starch, highland barley, β-glucan, arabinoxylan, pasting properties, rheological properties

玉米淀粉由线性的直链淀粉和具有高分支结构的支链淀粉组成,根据两者比例不同,可将玉米淀粉分为 3 类:含有质量分数 25%直链淀粉和质量分数 75%支链淀粉的普通玉米淀粉;含有质量分数 99%以上支链淀粉的蜡质玉米淀粉;含有质量分数 50%~70%直链淀粉的高直链玉米淀粉[1-3]。近年来,玉米淀粉由于其独有的理化性质,在食品工业中被广泛应用,常作为食品增稠剂、稳定剂等用以提高食品的黏度和结构性能[4]。但是,天然的玉米淀粉仍然存在一定的缺点,如加热不稳定、高温条件下抗剪切能力差、对酸敏感等,有时不能满足食品工业的要求[5]。因而许多为了改善淀粉不良品质的物理、化学、酶改性法应运而生[6]。然而,由于化学改性污染严重,酶法改性成本偏高,淀粉与多糖共混的物理改性法因其安全、环保、方便等特点引起了广泛关注与重视[7]。Li 等[8]研究了海藻酸钠对玉米淀粉品质的影响;Zhang 等[9]研究了不同相对分子质量的果胶与对玉米淀粉结构特性和体外消化率的影响;Alloncle 等[10]研究了黄原胶、瓜尔胶和刺槐豆胶对玉米淀粉糊黏弹性的影响,结果都证实了多糖胶的加入对玉米淀粉糊化、流变和消化等特性有显著的影响。

青稞(highland barley),即裸大麦,是我国西藏、青海等高海拔地区的主要粮食作物[11]。青稞营养价值丰富,富含 β-葡聚糖(平均质量分数为 5.25%)[12]和阿拉伯木聚糖(arabinoxylan,AX)等非淀粉多糖,具有高蛋白质、高维生素、高纤维、低糖、低脂等特点[13-14]。青稞 β-葡聚糖是以 β-D-吡喃葡萄糖为基本结构单元通过一定比例的 β-1,3 和 β-1,4 键互相连接起来的线性同聚多糖,且含有部分 β-1,6-糖苷键的支链[15]。据报道,青稞 β-葡聚糖因其能增加肠道黏度而阻碍淀粉分子的分解和糖类吸收,延缓淀粉消化和餐后血糖升高,具有降低餐后血糖和胰岛素水平的效果[16],同时也具有降低胆固醇[17]和提高免疫力[18]等生物活性。此外,青稞 β-葡聚糖也是一种高分子黏性多糖,具有增稠、凝胶、乳化、发泡稳定[19-20]等功能。阿拉伯木聚糖主要存在于谷物麸皮中,质量分数可达 20%~25%,而胚乳及籽粒中含量相对较少[21]。青稞阿拉伯木聚糖是主要单糖组成为阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖,含有 α、β-糖苷键,具有分支结构的戊聚糖[22]。阿拉伯木聚糖具有良好的持水性,在面制品中加入阿拉伯木聚糖可显著提高其黏弹性、凝胶强度和稳定性[23]。宋晓庆等[24]研究发现阿拉伯木聚糖的高持水性和黏性,降低了酶降解的速率,抑制了营养成分的吸收,从而降低餐后血糖含量以及胰岛素的反应值。

作为青稞中主要的非淀粉多糖,比较青稞 β-葡聚糖(HBBG)和阿拉伯木聚糖(HBAX)对淀粉性质的影响相关研究相对较少。作者以 HBBG 和 HBAX 为研究对象,利用快速黏度仪、流变仪、电子扫描显微镜等手段研究其对玉米淀粉糊化和流变特性的影响,旨在探讨不同青稞来源多糖与淀粉间的相互作用,为 HBBG 和 HBAX 改善淀粉基食品以及进一步探讨淀粉消化性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

玉米淀粉(直链淀粉质量分数 23.37%):购于上海维塔化学试剂有限公司。胃蛋白酶(猪胃黏膜)、胰酶(猪胰腺,胰淀粉酶)、高温 α-淀粉酶、透析袋:购于上海源叶生物有限公司。

1.2 仪器与设备

RVA-4500 快速黏度分析仪:瑞典 Perten 公司产品;Discovery HR-3 流变仪:美国 TA 仪器公司产品;磁力搅拌器:德国 IKA 公司产品;752 型 紫外可见分光光度计:上海光谱仪器有限公司产品;ML204 分析天平:梅特勒-托利多仪器上海有限公司产品;JXN-26 高速冷冻离心机:美国贝克曼库尔特公司产品;THZ-D 台式恒温振荡器:苏州市培英实验设备有限公司产品;冷冻干燥机:美国 LABCONCO 公司产品;VEGA3 SBH 扫描电子显微镜:泰思肯(中国)有限公司产品。

1.3 实验方法

1.3.1 青稞来源多糖的提取制备 根据文献方法从青稞麦仁中提取青稞β-葡聚糖[15,25]。青稞去皮粉碎后,麦仁粉通过体积分数为 70%乙醇进行脱脂处

理,脱脂后的麦仁粉,按照料液质量体积比 1 g:10 mL 加入蒸馏水,95 ℃下用高温 α-淀粉酶处理 30 min 除去淀粉,而后冷却至 25 ℃,加入NaOH 溶液使萃取体系中 NaOH 浓度为 0.5 mol/L,在室温下搅拌提取 3 h,提取液用 2 mol/L 的盐酸调节 pH 至 5.0,4 500 r/min 离心,弃沉淀,加乙醇至上清液,4 ℃静置过夜,离心得到沉淀,收集沉淀并以蒸馏水复溶,再透析袋中透析 72 h 以除去小分子,冷冻干燥得到 β-葡聚糖粗品。粗品复溶于水,重复乙醇沉淀 2 次,最后用异丙醇洗涤沉淀 3 次,50 ℃下真空干燥 2 h,得到青稞麦仁 β-葡聚糖(HBBG)。

参照徐中香等[22]实验方法从青稞麸皮中提取阿拉伯木聚糖。麸皮粉中按照料液质量体积比 1 g:10 mL 加入体积分数为 95%乙醇,搅拌浸泡 1 d,以除去小分子、低聚糖、挥发油等。向脱脂后的麸皮粉中加入蒸馏水(料液质量体积比 1 g:10 mL),搅拌均匀后,加入高温 α-淀粉酶,95 ℃水浴 30 min。脱脂、除淀粉后的麸皮粉,按照料液质量体积比 1 g:25 mL 加入 NaOH 溶液,55 ℃下提取 3 h,等电点法除蛋白质,离心,收集上清液,上清液于蒸馏水透析 72 h,乙醇沉淀,收集沉淀并以蒸馏水复溶,重复乙醇沉淀 2 次后,复溶并冷冻干燥,得到青稞麸皮阿拉伯木聚糖(HBAX)。

1.3.2 测试样品的制备 向玉米淀粉中分别加入基于干基质量分数为 0、2%、4%、6%和 8%的 HBBG 和 HBAX,再向混合物中加入一定量的去离子水,配制成质量分数为 5%的淀粉溶液[26],将各组样品置于沸水浴中糊化 20 min,期间不断搅拌避免结块。

1.3.3 玉米淀粉糊化曲线的测定 准确称取 2.5 g 玉米淀粉和青稞来源多糖置于铝制坩埚中,加入 25 mL 去离子水,用小型塑料螺旋桨充分预搅后,将铝制坩埚卡入快速黏度仪(RVA)的旋转塔中,按下塔帽启动测量。

RVA 测定程序设置如下:旋转浆以 960 r/min 旋转 10 s,减速至 160 r/min 均匀转动 13 min 至测试结束。悬浮液在初始温度 50 ℃下平衡 1 min,然后以 12 ℃/min 的速率加热至 95 ℃,在 95 ℃下保温 2.5 min,再以相同速率冷却至 50 ℃,保温 2 min。从 RVA 谱图可知淀粉糊的谷值黏度、峰值黏度、最终黏度、崩解黏度、回生黏度、峰值时间、糊化温度等[27]。

1.3.4 渗漏直链淀粉含量的测定 将按 1.3.2 方法制备好的淀粉糊冷却至室温,10 000 r/min 离心 30 min。取上清液,加入 0.33 mol/L NaOH 溶液 6 mL,95 ℃水浴中加热 30 min,然后取 0.1 mL 混合溶液与 5 mL 体积分数为 0.5%的三氯乙酸混合,调节混合溶液的 pH 值至 5.5,用 0.01 mol/L I_2-KI 水溶液(0.05 mL)对混合物进行染色,蒸馏水作为空白对照。所有样品室温下避光静置 20 min 后,在波长 620 nm 处测定吸光度,用马铃薯直链淀粉作为标准样品并得出标准曲线(y=0.028 9x-0.007 9,R^2=0.999 5),计算不同样品中渗漏直链淀粉的质量分数[28]。

1.3.5 扫描电镜观察(SEM) 添加了不同浓度青稞多糖的玉米淀粉复配体系在-80 ℃冰箱快速冻结。通过真空冷冻干燥后,喷金,抽真空后于电子扫描显微镜下观察并拍照。实验条件:电压值:30 kV;放大倍数:50 μm,1 500 倍。

1.3.6 玉米淀粉流变学性质的测定 将按 1.3.2 方法制备好的淀粉糊冷却至室温,在 DHR-3 旋转流变仪上选用 40 mm 不锈钢平板夹具进行剪切流变和黏弹性测试,平板与底板间样品的测试间距为 1 mm。剪切流变测定的程序设置:温度 25 ℃,剪切速率范围 0.1~100 s^{-1}。

黏弹性测定的程序设置:首先在 25 ℃和 0.1 Hz 条件下对 0.1%~10%的形变范围扫描,确定 1%为其线性黏弹区的形变值。记录储能模量(G')和损耗模量(G'')以显示其黏弹性性能[29]。

1.3.7 数据分析 每一个实验条件至少设计 3 个平行样,取其平均值,采用 Origin 8.0 进行绘图分析。使用 SPSS Statistics Software(IBM)对数据进行 ANOVA 差异显著性分析,P<0.05 为显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同青稞多糖对玉米淀粉糊化特性的影响

由于淀粉颗粒吸水溶胀,淀粉或以淀粉为主要成分的物料在水中加热和冷却时,体系黏度会发生显著变化,呈现出不同的淀粉黏滞性谱带,即 RVA 谱。由 RVA 谱图可获知峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解值、回生值、峰值时间、糊化温度等特征参数[30]。峰值黏度表征在加热过程中出现的最高黏滞性值;谷值黏度指在最高黏度过后冷却过程中出现的最小黏滞性值;最终黏度指在冷却到实验结束时的黏滞性值;崩解值为最终黏度与峰值黏度的差

值;回生值为最终黏度与谷值黏度的差值,峰值时间可以显示峰值黏度出现所需要的时间。对纯玉米淀粉和不同青稞来源多糖对玉米淀粉糊化特性的影响进行测定,结果如图 1 和表 1 所示。

结果表明,加入 HBBG 后,CS+HBBG 混合体系的峰值黏度、谷值黏度和最终黏度显著提高,并且随着 HBBG 浓度的增大而增大;而 HBAX 的加入,则显著降低体系的峰值黏度和谷值黏度。这可能是由于:一方面,玉米淀粉与线性链状结构的 HBBG 之间存在不相容的相分离行为,使得这两个组分存在于体系中相对独立的微相,促使体系的黏度增加[31];另一方面,HBBG 与渗漏出来的直链淀粉产生一定的相互作用,增大分子流体力学体积,最终使黏度增大[32]。而高支化无规卷曲的 HBAX 进入体系后,附着在淀粉颗粒表面,在糊化过程中抑制了淀粉颗粒的膨胀,降低了体系的峰值黏度[33]。以上结果表明:HBBG 和 HBAX 在糊化状态下,与淀粉的相互作用方式不同,导致了不同黏度现象,但两种现象在某种程度上均可导致淀粉消化率的降低。峰值黏度还可以衡量淀粉膨胀颗粒的抗剪切能力。峰值黏度越大,抗剪切能力越强。

崩解值反映的是淀粉糊的热稳定性和颗粒糊化过程中的破损程度[34],从表 1 中可以发现 HBBG 和 HBAX 的添加使得体系的崩解值明显下降,说明青稞多糖提高了玉米淀粉糊的热稳定性,可抑制淀粉颗粒的破损。回生值代表淀粉老化趋势。HBBG 和 HBAX 的添加使得分子聚集程度增大,体系回生值增幅明显,促进玉米淀粉的老化。表 1 中,加入不同青稞多糖后,糊化温度均降低,主要原因是青稞多糖与直链淀粉间发生相互作用。CS–HBBG 和 CS–HBAX 复配体系的峰值时间也是随着浓度的增加而延长,说明 HBBG 和 HBAX 在一定程度上抑制了玉米淀粉在糊化过程中的膨胀速率,在吴银琴等人[35]的研究中也发现类似的现象。

2.2 不同青稞多糖对渗漏直链淀粉含量的影响

淀粉糊化不仅是指淀粉颗粒受热吸水膨胀,同时也包括淀粉链段溶出的过程;淀粉链段的伸展、运动与淀粉的黏度密切相关。混合体系中,相较于支链淀粉的树状结构,直链淀粉的链状结构空间阻碍小,运动性强,对淀粉的黏度影响更大。直链淀粉遇碘可以显现蓝色,因为直链淀粉链是由大葡萄糖单元构成且没有分支的螺旋式卷曲结构,可以形成多圈螺旋,束缚较多的碘分子[34]。作者通过测定混合体系中渗漏直链淀粉含量,进一步探究不同青稞多糖对玉米淀粉糊化特性的影响。

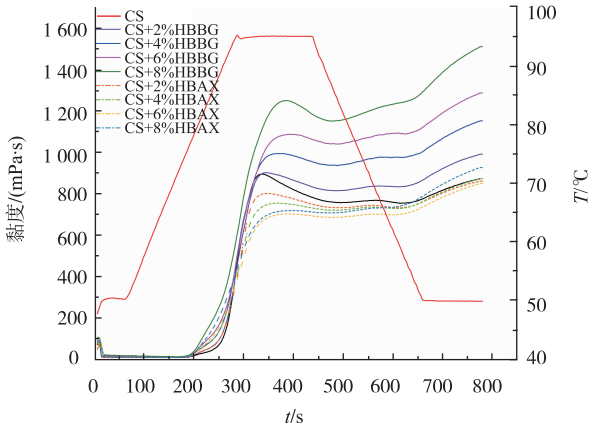


图 1 不同质量分数的青稞多糖与玉米淀粉复配体系的糊化曲线图

Fig. 1 RVA curves of CS –HBBG and CS –HBAX mixtures at different mixing ratios

根据马铃薯直链淀粉标准曲线计算不同样品中的渗漏直链淀粉质量分数,结果如图 2。添加 HBBG 和 HBAX 后,混合体系中渗漏直链淀粉质量分数逐渐降低,并且添加的 HBBG 和 HBAX 越多,渗漏直链淀粉质量分数越少。结合实验结果,可以推测,CS–HBBG 混合体系中,青稞 β–葡聚糖通过氢键与渗漏出的直链淀粉发生相互作用,阻止了渗漏出的淀粉链段进一步远程扩散,从而不同程度地减少渗漏直链淀粉在整个共混体系中的含量,使得体系黏度增加。

在 CS–HBAX 混合体系中,高支化的阿拉伯木聚糖附着在玉米淀粉颗粒周围,抑制了淀粉颗粒的膨胀,限制了淀粉与水分子的充分结合,减少了直链淀粉的渗漏,从而降低了峰值黏度,延缓了淀粉糊化。据报道,直链淀粉主要分布在颗粒表面,与支链淀粉相互缠绕并穿过支链淀粉形成的结晶区与无定形区,将支链淀粉分子“捆绑”在一起[36]。结果表明:添加 HBBG 和 HBAX 后,体系内直链淀粉含量减少,对支链分子的束缚作用减小,支链淀粉分子充分舒展,提高了体系的最终黏度,减慢了体系内分子的运动速率,一定程度上降低了淀粉水解率。

表 1　不同质量分数的青稞多糖与玉米淀粉复配体系的糊化特性

Table 1　Pasting properties of CS-HBBG and CS-HBAX mixtures at different mixing ratios

样品	峰值黏度/cp	谷值黏度/(mPa·s)	崩解黏度/(mPa·s)	最终黏度/(mPa·s)	回生黏度/(mPa·s)	峰值时间/min	糊化温度/℃
CS	894.33±6.55^{a}	755.00±5.72^{a}	139.33±0.94^{a}	872.33±8.18^{a}	117.33±2.50^{a}	5.60±0.00^{a}	89.97±0.06^{a}
CS+2%HBBG	900.67±26.25^{ab}	814.00±23.93^{a}	86.67±2.87^{b}	990.00±20.85^{b}	176.00±12.36^{b}	5.78±0.07^{a}	89.90±0.00^{a}
CS+4%HBBG	994.00±40.65^{bc}	936.00±40.55^{b}	58.00±0.82^{c}	1 150.67±31.37^{c}	214.67±17.33^{c}	6.20±0.11^{b}	89.40±0.81^{a}
CS+6%HBBG	1 086.33±50.97^{c}	1 038.67±38.18^{c}	47.67±13.67^{c}	1 285.67±58.16^{d}	247.00±20.02^{c}	6.55±0.14^{c}	89.15±1.13^{a}
CS+8%HBBG	1 247.33±64.63^{d}	1 150.00±57.45^{d}	97.33±7.76^{b}	1 508.00±66.73^{e}	358.00±24.66^{d}	6.45±0.03^{c}	85.12±3.37^{b}
CS+2%HBAX	800.67±7.41^{b}	730.67±9.46^{b}	70.00±2.16^{b}	860.33±10.87^{a}	129.67±10.14^{ab}	5.77±0.03^{b}	89.98±0.02^{a}
CS+4%HBAX	754.50±1.22^{c}	720.50±0.41^{b}	34.00±1.63^{c}	872.50±10.21^{a}	152.00±10.61^{ab}	6.10±0.02^{c}	89.08±0.67^{a}
CS+6%HBAX	702.67±16.05^{d}	685.67±17.52^{c}	17.00±1.63^{d}	849.00±24.34^{a}	163.33±7.93^{c}	6.44±0.11^{d}	88.87±0.80^{a}
CS+8%HBAX	718.33±6.13^{d}	708.00±3.74^{bc}	10.33±2.87^{e}	925.67±33.19^{b}	217.67±29.95^{c}	6.44±0.08^{d}	87.52±0.06^{b}

注:在同一列里不同字母表示差异显著(P<0.05)

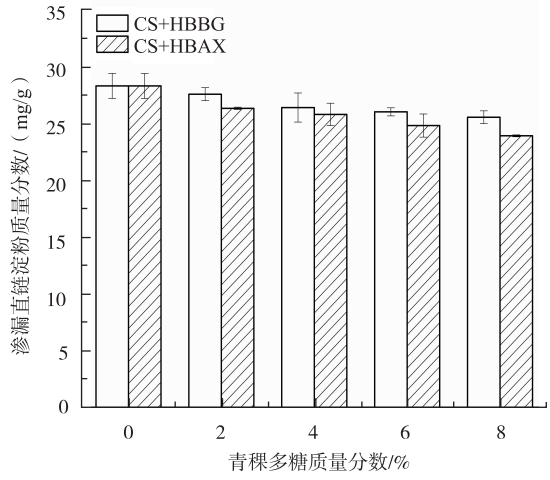


图 2　玉米淀粉与青稞多糖混合体系的渗漏直链淀粉质量分数

Fig. 2　The leached amylose amount of CS and CS-HBBG/CS-HBAX mixtures

2.3　不同青稞多糖对玉米淀粉糊微观结构的影响

进一步通过扫描电子显微镜(SEM)观察淀粉颗粒的表面结构,通过形态学直观分析淀粉颗粒的变化,玉米淀粉糊化前后的颗粒形态和 CS-HBBG/CS-HBAX 混合体系的微观结构变化如图 3 所示。由图可知,未糊化的玉米淀粉颗粒呈现完整、圆形或多边形结构(图 3(a)),而糊化后的玉米淀粉的 SEM 图呈现无规则、疏松的多孔片状结构(图 3(b)),这与 Yu 等人[37]的实验结果一致。在 CS-HBBG 体系中,HBBG 的加入使得复合凝胶体系骨架增大增厚,呈现高度交联的多孔状结构(图 3(c))。孔的大小与水分分布有关,孔越大,说明淀粉碎片间的纠缠力越大,HBBG 与玉米淀粉之间的结合更紧密,相互作用力越强。而添加了 HBAX 后的样品中除了主要的无序碎片状,还能观察到少量未被完全破坏的淀粉颗粒(图 3(d)),这说明 HBAX 抑制了部分玉米淀粉颗粒在糊化过程中破损,从而抑制淀粉糊化,降低淀粉糊化的峰值黏度。这与 RVA 糊化曲线结果一致。不同青稞多糖与玉米淀粉产生不同相互作用关系,从而影响淀粉的糊化和黏度性质,可减缓淀粉的酶解速率,降低餐后血糖响应。

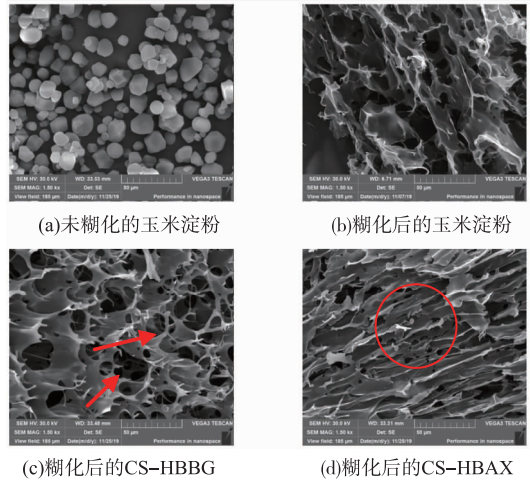


图 3　玉米淀粉和青稞多糖的扫描电镜图(50 μm,1 500×)

Fig. 3　Scanning electro-micrographs of CS、CS-HBBG、CS-HBAX mixtures

2.4　不同青稞多糖对玉米淀粉糊剪切流变特性的影响

黏度是描述液体抗拒剪切引发流动的物理特性。黏度不受剪切速率影响的理想液体称作“牛顿流体”;反之,不具备这种“理想”流动特性的其他液体称作“非牛顿流体”[3]。从图 4 可知在所扫描的剪切速率中,混合体系的黏度随着剪切速率的变化而

发生变化,因此,该流体属于非牛顿流体。玉米淀粉糊的黏度先略有增加后呈大幅度下降趋势,可能是由于受到外力作用,淀粉分子原来的结构被破坏,形成新结构而导致的体积“膨胀”,产生剪切变稠的现象。增加了 HBBG 和 HBAX 后,这种现象逐渐消失,淀粉糊出现剪切稀化的假塑性现象,表现为体系表观黏度随着剪切速率的增加而降低。在相同的剪切速率下,CS-HBBG 的混合复配凝胶体系的黏度比不添加 HBBG 的玉米淀粉大,且随着浓度的增大而增大;而 CS-HBAX 混合体系则是呈现相反的规律,体系黏度在剪切过程中随着 HBAX 浓度的增加而相应减小。

幂律方程可以准确地描述剪切速率范围内各种胶体的流动特性。对图 4 中各数据点进行拟合发现,通过 Herschel-Bulkley 方程得到的 R^2 在 0.950~0.999 的范围内,具有更好的拟合精度。Herschel-Bulkley 方程表现为剪切应力与剪切速率的线性关系,作为描述剪切速率为 1 时剪应力不为零的非牛顿流体幂律模型,该方程流体在低剪切速率下表现为幂律流体,而在高剪切速率下偏离幂律流体[38]。主要用 3 个参数描述流变特征,其表达式为:

$$\tau=\tau_0'+K^n \quad (1)$$

式中:τ_0 为剪切应力,(Pa);K 为稠度系数,(Pa·s^n);n 为流体行为指数,无因次。

拟合得到所有样品的具体数值见表 2。由表 2 可知,不同青稞多糖与玉米淀粉的混合体系在剪切范围内都是典型的假塑性流体(流体行为指数 $n<1$),并且 HBBG 的添加会增加复配体系的假塑性,表现出更强剪切变稀效应。而随着 HBAX 含量的增加,n 值越来越接近 1,说明复配体系的假塑性逐渐减弱,流动性得到改善。稠度系数 K 值随着 HBBG 浓度增加而增大,说明分子间的缠结使复配体系黏度增大;而 HBAX 的加入使 K 值有所降低,说明体系的整个稠度降低。这与 RVA 实验结果相一致:HBBG 的添加使玉米淀粉糊的峰值黏度增大,抗剪切能力增强;HBAX 降低了玉米淀粉糊的峰值黏度,减弱其抗剪切能力。

2.5 不同青稞多糖对玉米淀粉糊黏弹特性的影响

物质的黏弹特性反映溶液的凝胶性质,同时与胶体的实际生产应用有着很大的关联性。动态流变学通过测定不同样品的黏弹性模量来判断该流体是以黏性为主还是弹性为主。储能模量(G')由卷曲

表 2 不同青稞多糖对玉米淀粉糊剪切流变参数的影响

Table 2 Static rheological parameters of CS-HBBG and CS-HBAX mixtures gels at different mixing ratios

样品	K	n	R^2
CS	4.087	0.357	0.995
CS+2%HBBG	7.334	0.270	0.985
CS+4%HBBG	8.638	0.241	0.970
CS+6%HBBG	25.324	0.110	0.950
CS+8%HBBG	38.438	0.149	0.981
CS+2%HBAX	2.209	0.483	0.999
CS+4%HBAX	1.828	0.515	0.999
CS+6%HBAX	1.487	0.537	0.999
CS+8%HBAX	1.151	0.583	0.999

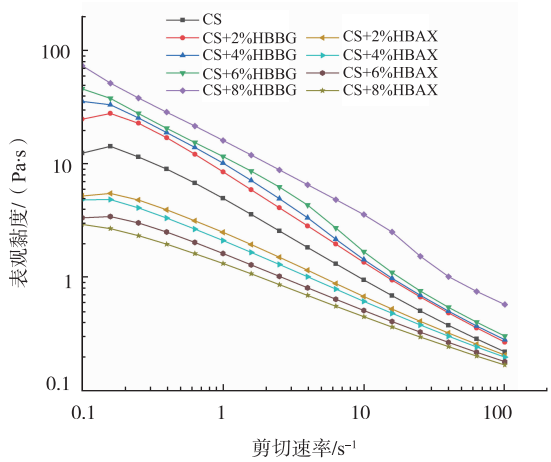


图 4 不同青稞多糖与玉米淀粉复配体系的静态流变曲线

Fig. 4 Static rheological curves of CS-HBBG and CS-HBAX mixtures gels at different mixing ratios

链构象熵的变化引起,由于弹性形变而储存能量的大小,可逆形变;损耗模量(G'')则表示链段和分子链相对移动造成的黏性形变,由于黏性形变而损耗的能量大小,不可逆形变;损耗角正切值($\tan\delta$)为 G''与 G'的比值[27]。不同青稞多糖对玉米淀粉糊的动态黏弹流变曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出,CS 呈现频率依赖性,随着角频率的增大而增大,且 G'始终大于 G'',$\tan\delta$ 小于 1,表现为一种典型的弱凝胶性质[39]。HBBG 的添加会同时增大混合体系的 G'和 G'',这可能是因为 HBBG 的加入使得混合体系中缠结点增多,凝胶体系网络结构加强;而 HBAX 的添加则是减小了 G'和 G''。$\tan\delta$ 为 G''与 G'的比值,$\tan\delta$ 值越大,体系黏度比例越大,流动性越强,反之则弹性比例较大[40]。可以看出,在低频区,CS-

HBBG 体系的tan δ 值均小于原玉米淀粉，到高频区后，tan δ 值越来越接近玉米淀粉，总体来说，混合体系的流动性降低，具有偏向弹性流体的性质。而添加 HBAX 增加了玉米淀粉体系的 tan δ 值，呈现出较强的黏性性质，G''的增速大于 G'，体系流动性增强，结合 RVA 分析可知，HBAX 包裹在玉米淀粉颗粒表面，阻碍了淀粉颗粒的吸水膨胀，减少了渗漏直链淀粉的含量，使混合体系难以形成有序的构象，从而导致体系的弹性减弱。

流变学实验表明：具有不同结构特点的青稞 β-葡聚糖和阿拉伯木聚糖加入玉米淀粉体系后，改变了凝胶网络结构，对体系表观黏度和黏弹特性产生了不同影响，而这些影响都会延缓玉米淀粉的水解速率。

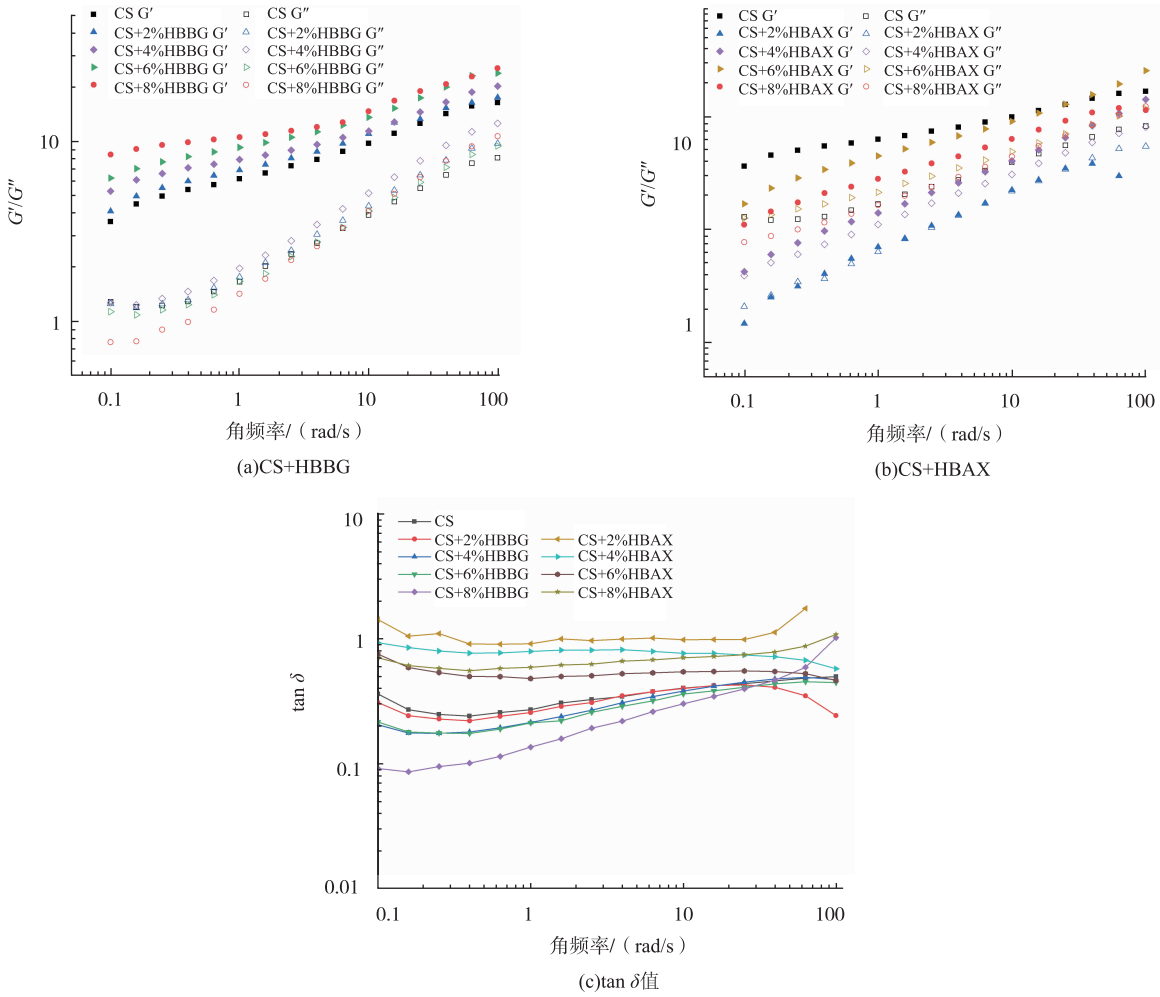


图 5　不同青稞多糖与玉米淀粉混合体系的动态流变曲线

Fig. 5　Dynamic rheological curves of CS–HBBG and CS–HBAX mixtures gels at different mixing ratios

3 结　语

通过研究两种青稞来源多糖对玉米淀粉糊化和流变学特性的影响，发现具有线性链状结构的青稞 β-葡聚糖与玉米淀粉之间存在不相容的相分离行为，可以使淀粉糊化的峰值黏度、稠度系数、G'和 G''值都有所增加，从而使提高整个体系的黏度，使玉米淀粉在加工过程中具有更好的抗剪切能力；而青稞阿拉伯木聚糖通过附着在淀粉颗粒表面，抑制其吸水膨胀性，减少直链淀粉的渗漏，降低了混合体系的峰值黏度、稠度系数、G'和 G''值。不同青稞来源多糖的添加均降低玉米淀粉崩解值，减少渗漏直链淀粉含量，延长淀粉峰值时间，降低糊化温度，有效提高了玉米淀粉的热稳定性。

参考文献:

[1] CHEN L,TIAN Y,BAI Y,et al. Effect of frying on the pasting and rheological properties of normal maize starch[J]. **Food Hydrocolloids**,2017,77:85-95.
[2] LV X X,WANG Y,LI Y,et al. Assembly of pickering emulsions using milled starch particles with different amylose/amylopectin ratios[J]. **Food Hydrocolloids**,2018,84:47-57.
[3] 王磊. 玉米淀粉糊流变特性研究[J]. 粮食与油脂,2014,27(10):45-48.
[4] CUI S,LI M,ZHANG S,et al. Physicochemical properties of maize and sweet potato starches in the presence of cellulose nanocrystals[J]. **Food Hydrocolloids**,2018,77:220-227.
[5] ZHOU D N,ZHANG B,CHEN B,et al. Effects of oligosaccharides on pasting,thermal and rheological properties of sweet potato starch[J]. **Food Chemistry**,2017,230:516-523.
[6] SINGH A,GEVEKEA D J,YADAV M P. Improvement of rheological,thermal and functional properties of tapioca starch by using gum Arabic[J]. **LWT–Food Science and Technology**,2017,80:155-162.
[7] LIU M,ZHANG Y,ZHANG H,et al. The anti-diabetic activity of oat β-d-glucan in streptozotocin-nicotinamide induced diabetic mice[J]. **International Journal of Biological Macromolecules**,2016,91:1170-1176.
[8] LI Q Q,WANG Y S,CHEN H H,et al. Retardant effect of sodium alginate on the retrogradation properties of normal corn starch and anti-retrogradation mechanism[J]. **Food Hydrocolloids**,2017,69:1-9.
[9] ZHANG B,BAI B,PAN Y,et al. Effects of pectin with different molecular weight on gelatinization behavior,textural properties,retrogradation and in vitro digestibility of corn starch[J]. **Food Chemistry**,2018,264:58-63.
[10] ALLONCLE M,DOUBLIER J L. Viscoelastic properties of maize starch/hydrocolloid pastes and gels [J]. **Food Hydrocolloids**,1991,5(5):455-467.
[11] 阚建全,陈宗道,等. 青稞的成分研究及其应用现状[J]. 中国食品添加剂,2004(4):43-46.
[12] 洛桑旦达,强小林. 青稞特有营养成分分析与开发利用现状调查研究报告[J]. 西藏科技,2001(8):57-63.
[13] 吕远平,熊茉君,贾利蓉,等. 青稞特性及在食品中的应用[J]. 食品科学,2005,26(7):266-270.
[14] 姜忠杰,李国明,周明,等. 青稞麸皮可溶性粗多糖的提取及其抗氧化性研究[J]. 中国食品添加剂,2012(6):70-77.
[15] ZHANG H,ZHANG N,XIONG Z,et al. Structural characterization and rheological properties of β-D-glucan from hull-less barley(Hordeum vulgare L. var. nudum Hook. f.)[J]. **Phytochemistry**,2018,155:155-163.
[16] CAVALLERO A,EMPILLI S,BRIGHENI F,et al. High (1→3,1→4)-β-Glucan barley fractions in bread making and their effects on human Glycemic Response[J]. **Journal of Cereal Science**,2002,36:59-66.
[17] 陈建澍,潘伟槐,童微量,等. 大麦 β- 葡聚糖对小鼠血脂水平的影响[J]. 大麦科学,2002(3):23-25.
[18] SANG H M,FOTEDAR R. Effects of dietary β-1,3-glucan on the growth,survival,physiological and immune response of marron,Cherax tenuimanus(smith,1912)[J]. **Fish & Shellfish Immunology**,2010,28(5-6):957-960.
[19] IZYDORCZYK M S,HUSSAIN A,MACGREGOR A W. Effect of barley and barley components on rheological properties of wheat dough[J]. **Journal of Cereal Science**,2001,34:251-260.
[20] BURKUS Z,TEMELLI F. Effect of extraction conditions on yield,composition,and viscosity of barley β-glucan gum [J]. **Cereal Chemistry**,1998,75(6):805-809.
[21] 苏东民,李雪,苏东海,等. 小麦阿拉伯木聚糖及其功能性质研究进展[J]. 河南工业大学学报:自然科学版,2012(4):89-94.
[22] 徐中香,胡浩,李季楠,等. 青稞麸皮阿拉伯木聚糖的提取工艺优化及结构分析[J]. 食品科学,2018(8):191-197.
[23] 马福敏,郭乃菲,徐美玲,等. 小麦粉中水溶性阿拉伯木聚糖对面筋蛋白黏弹性的影响[J]. 中国粮油学报,2013(10):1-5.
[24] 宋晓庆,董海洲. 黑麦阿拉伯木聚糖的结构、性质与营养功能[J]. 中国食物与营养,2004(2):29-30+59.
[25] LI W,CUI S,KAKUDA Y. Extraction,fractionation,structural and physical characterization of wheat β-d-glucans [J]. **Carbohydrate Polymers**,2006,63(3):408-416.
[26] 冯涛. 凉粉草胶结构、性质及与淀粉相互作用的研究[D]. 无锡:江南大学,2007.
[27] 汪名春,韦冷云,朱培蕾,等. 菊糖对小麦淀粉糊热力学及流变学特性的影响[J]. 中国粮油学报,2017,(2):24-28.
[28] FUNAMI T,KATAOKA Y,OMOTO T,et al. Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch[J]. **Food Hydrocolloids**,2005,19(1):1-13.
[29] 陈忠秋,冯涛,庄海宁,等. 香菇 β- 葡聚糖的提取及其对淀粉消化性的影响[J]. 食品科学,2018,39(10):71-77.

[30] FITZGERALD M A，MARTIN M，WARD R M，et al. Viscosity of rice flour：A rheological and biological study [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**，2003，51(8)：2295-2299.
[31] 陈忠秋. 猴头菇 β- 葡聚糖对小麦淀粉消化性的影响及其机理研究[D]. 上海：上海应用技术大学，2018.
[32] VITURAWONG Y，ACHAYUTHAKAN P，SUPHANTHARIKA M. Gelatinization and rheological properties of rice starch/xanthan mixtures：effect of molecular weight of xanthan and different salts[J]. **Food Chemistry**，2008，111(1)：106-114.
[33] NAWAB A，ALAM F，HASNAIN A. Functional properties of cowpea(*Vigna unguiculata*) starch as modified by guar，pectin，and xanthan gums[J]. **Starch– Starke**，2014，66(9-10)：832-840.
[34] 陈龙. 普鲁兰多糖对大米淀粉性质的影响及机理研究[D]. 无锡：江南大学，2015.
[35] WU Y Q，TANG M M，HONG Y，et al. Effect of amylose content on the pasting and rheological properties of corn starch/guar gum mixtures[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**，2014，33(1)：48-55.
[36] JANE J. Current understanding on starch granule structures[J]. **Journal of Applied Glycoscience**，2006，53(3)：205-213.
[37] LUO Y，SHEN M，LI E，et al. Effect of Mesona chinensis polysaccharide on pasting，rheological and structural properties of corn starches varying in amylose contents[J]. **Carbohydrate Polymers**，2020(230).
[38] OMOSEBI A O，ADENUGA K A. Pressure Drop Versus Flow Rate Profiles for Power-Law and Herschel-Bulkley Fluids[M]. New York：Society of Petroleum Engineers，2012.
[39] PTASZEK A，BERSKI W，PTASZEK P，et al. Viscoelastic properties of waxy maize starch and selected non-starch hydrocolloids gels[J]. **Carbohydrate Polymers**，2009，76(4)：567-577.
[40] 许元泽. 高分子结构流变学[M]. 成都：四川教育出版社，1988.

科　技　信　息

科学家提出馒头和面包可优先作为叶酸摄入来源面食

近日，中国农业科学院生物技术研究所作物代谢调控与营养强化团队通过系统分析小麦从籽粒存贮、面粉加工到面食制作各环节中叶酸营养素含量的变化，为面食制备过程中保留叶酸营养提供科学数据和膳食建议。相关研究成果在线发表在《食品化学》上。

据张春义研究员介绍，叶酸(Folates)属于水溶性 B 族维生素(B9)，是维持生命活动正常进行的重要功能因子。人类自身不能合成叶酸，主要依赖于从食物中摄取。小麦是世界三大粮食作物之一，是我国特别是北方地区重要的主食之一。前期研究中，该团队和作科所叶兴国团队合作，全面分析了我国北方地区 316 份小麦品种的叶酸含量，发现多个富含叶酸的小麦品种可直接种植食用，或作为优异种质资源用于新品种培育。但是由于叶酸分子较不稳定，极易降解或转化，因此如何保证存储、加工及烹饪过程中的叶酸含量成为关键。两个团队继续合作对小麦籽粒存贮、面粉加工及面食制作(面包、馒头、面条)中叶酸保留展开系统分析。发现室温存贮 4 个月起小麦籽粒叶酸含量开始出现下降(14%~16%)，存贮 8 个月下降较为显著，达 26%；面粉加工会导致叶酸严重损失，保留率仅为 29%。不同的烹饪方式也会影响面食中的叶酸含量，对比煮后面条、蒸后馒头和烘焙后面包中的叶酸含量，结果表明，煮沸会导致面条中叶酸大量损失，而蒸馒头或烘焙面包包含发酵过程，能够显著提高加工食品中的叶酸含量，因此馒头和面包可优先作为叶酸摄入来源。

[信息来源]梁秋菊. 科学家提出馒头和面包可优先作为叶酸摄入来源面食 [EB/OL]. (2020-08-7). http://www.caas.cn/xwzx/kyjz/306897.html