

魔芋胶和玉米淀粉混合物黏弹特性的研究

王 勇[#], 裴晶莹[#], 许 敏, 李晓磊^{*}, 李 丹^{*}

(长春大学农产品加工吉林省普通高等学校重点实验室, 长春 130022)

摘 要: **目的** 研究魔芋胶对玉米淀粉黏弹特性的影响。**方法** 以玉米淀粉为原料, 加入不同比例的魔芋胶, 采用动态流变仪来研究魔芋胶玉米淀粉糊化混合物的黏弹特性。**结果** Power-Low 模型能够有效地表征魔芋胶玉米淀粉糊化混合物的流变性能。魔芋胶玉米淀粉糊化混合物为假塑性流体, 与单独的玉米淀粉糊相比, 随着魔芋胶的添加量增大, 糊化混合物黏稠性增大, 假塑性增强。随着频率的增大, G' 和 G'' 均增大, 损失正切值 $\tan \delta < 1$, 说明魔芋胶的加入使得糊化混合物具有优越的黏弹性。**结论** 当魔芋胶/玉米淀粉质量比为0.4:0.8时, 糊化混合物弹性最小, 黏性最大, 糊化混合具有更好的协同增稠作用, 即糊化混流体流动特征显著。

关键词: 魔芋胶; 玉米淀粉; 黏弹特性; 流变

Study on viscoelastic characteristics of konjac gum and corn starch mixtures

WANG Yong[#], PEI Jing-Ying[#], XU Min, LI Xiao-Lei^{*}, LI Dan^{*}

(Key Laboratory of Agroproducts Processing Technology at Jilin Provincial University, Educational Department of Jilin Provincial Government, Changchun University, Changchun 130022, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effect of konjac gum on the viscoelastic properties of corn starch. **Methods** Using corn starch as raw material, different proportions of konjac gum were added, and the viscoelastic properties of konjac corn starch gelatinized mixture were studied by dynamic rheometer. **Results** The Power-Low model was an effective way to characterize the rheological properties of konjac corn starch gelatinized mixtures. The konjac gum corn starch gelatinization mixture was a pseudoplastic fluid. Compared with the corn starch paste alone, as the amount of konjac gum added increased, the gelatinization mixture increased in viscosity and pseudoplasticity. As the frequency increasing, both G' and G'' increased, and the tangent value $\tan \delta < 1$, which indicated that the addition of konjac gum made the gelatinized mixture have superior viscoelasticity. **Conclusion** When the konjac/corn starch mass ratio is 0.4:0.8, the gelatinized mixture has the least elasticity and the most viscous, and the gelatinization mixture has a better synergistic thickening effect, which indicated the gelatinized mixture fluid flow characteristics are remarkable.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31671801)、吉林省科技厅国际交流项目(20190701075GH)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31671801), and International Exchange Project of Jilin Provincial Science and Technology Department (20190701075GH)

[#]王勇, 裴晶莹为共同第一作者。

[#]WANG Yong and PEI Jing-Ying are co-first authors.

^{*}通讯作者: 李晓磊, 教授, 博士, 主要研究方向为功能食品; E-mail: xiaolei97@163.com

李丹, 教授, 博士, 主要研究方向为食品生物技术; E-mail: drlidan@sina.com

***Corresponding author:** LI Xiao-Lei, Professor, Ph.D, Key Laboratory of Agroproducts Processing Technology at Jilin Provincial University, Educational Department of Jilin Provincial Government, Changchun University, Changchun 130022, Jilin, China. E-mail: xiaolei97@163.com

LI Dan, Professor, Ph.D, Key Laboratory of Agroproducts Processing Technology at Jilin Provincial University, Educational Department of Jilin Provincial Government, Changchun University, Changchun 130022, Jilin, China. E-mail: drlidan@sina.com

KEY WORDS: konjac gum; corn starch; viscoelastic properties; flow characteristics

1 引 言

淀粉是植物生长过程中, 经过光合作用产生的一种由大量葡萄糖单元构成的大分子碳水化合物。淀粉分子内氢键的大量存在, 且氢键作用力远小于化学键, 导致淀粉具有弱的黏弹特性^[1]。玉米淀粉具有资源丰富、价格低廉、稳定性好、不易老化、抗剪切力强等优点, 同时玉米淀粉在食品加工中具有假塑性弱、不易成形、耐水性差、高血糖患者不宜食用等缺点^[1,2]。

魔芋为天南星科魔芋属多年生草本植物的块茎。魔芋块茎干物质主要成分为魔芋胶, 也称魔芋葡甘聚糖, 是由 D-葡萄糖和 D-甘露糖组成的单元结构, 以 β -(1-4) 糖苷键聚合而成的线性大分子聚合物^[3-5]。魔芋胶是一种非淀粉多糖类亲水性胶体, 具有良好的水溶性、凝胶性、增稠性、可塑性等多种特性, 可作为增稠剂、乳化剂, 广泛应用于食品领域; 魔芋胶也是良好的水溶性膳食纤维, 不被人体消化酶分解, 具有降血压、排毒、调节人体膳食营养平衡等功效。将魔芋胶添加到玉米淀粉中, 可以提高玉米淀粉糊的假塑性、耐水性, 抑制玉米淀粉的消化, 降低餐后人体血糖指数^[4-8]。

近年来, 国内外报道过一些关于淀粉与亲水性胶体混合物的研究。例如张帆等^[9]考察了亲水性胶体对石蒜淀粉黏弹特性的影响, 结果表明黄原胶增大了黄原胶/石蒜淀粉体系的黏性, 体系表现为典型的假塑性流体。柴春祥等^[10]研究了黄原胶与马铃薯淀粉混合物黏弹特性, 表明黄原胶加强了马铃薯淀粉的黏弹特性。Rosell 等^[11]考察了瓜尔胶、黄原胶与大米淀粉混合物的流变学的影响, 表明 0.2%~0.8% 的亲水性胶体能显著改变大米淀粉的黏弹特性。目前对于魔芋胶与玉米淀粉混物流变学性质的研究只有汪师帅等^[12]报道过, 其考察了魔芋胶与玉米淀粉比例为 1:1、1:2、2:1(m:m) 时的混物流变学性质, 结果表明魔芋胶与玉米淀粉质量比为 1:2(m:m) 时, 体系的黏弹特性要优于其他混合比例(即魔芋胶与玉米淀粉质量比为 1:1 和 2:1)。

本研究考虑到将魔芋胶作为一种食品添加剂, 食品加工工业中添加量较少, 因此在魔芋胶浓度不超过 2% 的情况下, 将不同比例的魔芋胶添加到玉米淀粉中, 进一步研究魔芋胶对玉米淀粉黏弹特性的影响, 以期魔芋胶玉米淀粉糊化混合物在食品领域中的应用提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 实验材料

玉米淀粉(S4126-corn starch, 美国 Sigma 有限公司); 魔芋胶: 华中农业大学食品科学技术学院李斌教授赠予。

2.2 实验设备

HX201 型恒温循环水槽(北京长流科学仪器有限公司); Discovery-HR-3 型混合流变仪(美国 TA 公司)。

2.3 实验方法

2.3.1 样品的制备

将魔芋胶与玉米淀粉按照质量比为 0:1.2, 0.1:1.1, 0.2:1.0, 0.3:0.9, 0.4:0.8 (m:m), 准确称取各质量比下的魔芋胶与玉米淀粉样品。向盛有混合样品的烧杯中加入 20 mL 去离子水, 制备 6% 的魔芋胶和玉米淀粉悬浮液, 置于磁力搅拌器上, 600 r/min, 10 min; 然后沸水浴糊化 30 min。

2.3.2 流变特性的测定

将样品均按照 2.3.1 方法制备。采用平板-平板测量系统, 平板直径 40 mm, 加入样品, 降低平板, 使间距为 1 mm, 擦去平板外多余样品, 加上盖板, 在盖板周围加上适量蒸馏水, 防止魔芋胶和玉米淀粉的混合样品水分蒸发。每个质量比下的魔芋胶/玉米淀粉糊化混合物样品平行测定 3 次。

静态剪切流变性的测定: 在 25 °C, 测定不同比例魔芋胶/玉米淀粉糊化混合物剪切速率($\dot{\gamma}$)从 0~300 s⁻¹ 递增, 再从 300 s⁻¹ 递减范围内剪切应力的变化。采用幂定律 (Power law 模型) 对数据点进行回归拟合, 复相关系数 R^2 表示方程的拟合精度^[13]。静态剪切应变测试中的上行线与下行线所围成的面积 Dt (s⁻¹) 表示魔芋胶和玉米淀粉糊化混合样品的触变性。

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

式中: τ : 剪切应力/Pa; K : 稠度系数/(Pa·sⁿ); $\dot{\gamma}$: 剪切速率/s⁻¹; n : 流体指数^[14]。

动态黏弹特性的测定: 在 25 °C, 应变 1.0%, 震荡频率 0.1~10 Hz 范围内, 测定贮能模量 G' 、损耗模量 G'' 、损失正切 $\tan \delta = G''/G'$ 随角频率变化的情况。

2.4 数据统计分析

应用 SPSS23.0 统计软件, 采用 LSD 数据统计方法对数据进行方差分析($P < 0.05$); 数据表示为平均值 \pm 标准差。

3 结果与分析

3.1 魔芋胶/玉米淀粉糊化混合物的静态剪切流变特性

由图 1 可知, 不同比例的魔芋胶/玉米淀粉糊化混合物在流动中所受的剪切应力随着剪切速率的增大而增大(上行线)。与不添加魔芋胶的玉米淀粉糊相比, 添加不同比例的魔芋胶均增加了糊化混合物的剪切应力, 随着魔芋胶量的增加, 糊化混合物的剪切应力也增大。在流动中的糊

化混合物剪切速率减小时(下行线), 样品不能恢复到原来的结构, 使得上行线与下行线不能够重合, 即滞后现象, 说明不同比例的魔芋胶/玉米淀粉糊化混合物为触变性流体。

由表 1 可知, 魔芋胶/玉米淀粉糊化混物流变曲线拟合的决定系数 R^2 均在 0.99 以上, 说明魔芋胶与玉米淀粉糊化混合物服从 Power-Low 模型。流体指数 $n < 1$, 说明魔芋胶与玉米淀粉混合物为假塑性流体^[15]。添加魔芋胶后的混合体系稠度系数显著提高, 魔芋胶比例越大, 糊化混合物的稠度系数 K 值越大, 流体指数 n 值越小, 显示糊化混合物的黏稠性越大, 体系的剪切稀化程度增强, 更易剪切稀化^[16,17]。稠度系数 K 值随着魔芋胶的比例增大而增大, 这是由于魔芋胶具有良好的水溶性, 促进玉米淀粉在水中均匀分散, 且魔芋胶分子与玉米淀粉分子间形成氢键, 从而导致稠度增大。随着魔芋胶比例的增大, 触变环的面积减小, 反映出魔芋胶/玉米淀粉糊化混合物的触变性减弱, 凝胶结构的形成和恢复能力增强, 可能是由于魔芋胶与玉米淀粉分子在受到剪切力的情况下, 彼此相互缠绕形成网

状结构, 产生相互促进增强的效果, 导致在相同温度、相同剪切速率下, 魔芋胶占比越大, 魔芋胶/玉米淀粉糊化混合物所受剪切力会越大, 需要消耗更多的机械能来破坏混合体系的网状结构^[17,18]。

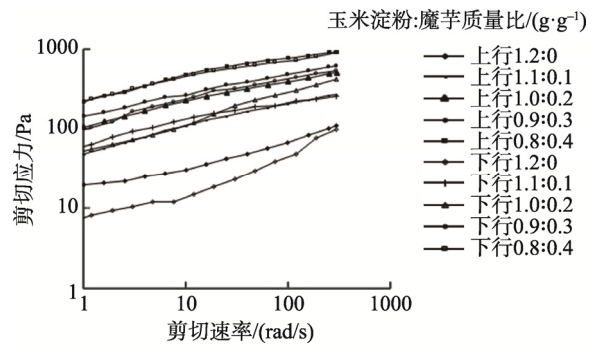


图 1 魔芋胶与玉米淀粉糊化混合物静态流变曲线
Fig.1 Static rheological curves of gelatinized mixture of corn starch and konjac gum

表 1 魔芋胶与玉米淀粉糊化混合物幂定律方程拟合参数 ($n=3$)

Table 1 Fitting parameters of Power-Law equation for gelatinized mixture of corn starch and konjac gum ($n=3$)

玉米淀粉: 魔芋(g/g)	触变环面积 /(Pa/s)	上行线			下行线		
		流体指数 n	稠度系数 K /(Pa/s)	决定系数 R^2	流体指数 n	稠度系数 K /(Pa/s)	决定系数 R^2
1.2:0	1.15±0.32 ^a	0.45±0.02 ^a	7.77±1.35 ^a	0.999	0.79±0.09 ^c	2.59±1.00 ^c	0.998
1.1:0.1	0.91±0.35 ^b	0.28±0.03 ^b	80.56±2.56 ^{ab}	0.999	0.53±0.13 ^c	29.71±5.61 ^c	0.999
1.0:0.2	0.64±0.12 ^c	0.22±0.00 ^c	126.21±5.15 ^b	0.997	0.39±0.015 ^c	48.90±3.05 ^c	0.998
0.9:0.3	0.46±0.09 ^d	0.17±0.00 ^d	311.68±16.71 ^c	0.997	0.38±0.00 ^b	317.30±32.84 ^b	0.996
0.8:0.4	0.40±0.09 ^d	0.12±0.00 ^c	725.09±57.29 ^d	0.995	0.19±0.05 ^a	454.32±22.93 ^a	0.998

注: 结果以平均值±标准差表示, 同列中不同字母 a,b,c,d 表示组间差异显著性, 显著水平为 $P < 0.05$ 。

3.2 魔芋胶/玉米淀粉糊化混合物的动态黏弹性

贮能模量 G' 表示能量贮存而可恢复的弹性质, 损耗模量 G'' 表示能量损耗的黏性性质^[19]。由图 2、图 3 和图 4 可知, 所测的不同比例魔芋胶/玉米淀粉糊化混合物 G' 均小于 G'' , 因此损失正切值 $\tan \delta < 1$, 随着频率的增大, G' 和 G'' 均增大, 反映出糊化混合物具有较好的黏弹性。这是由于魔芋胶的加入使得糊化混合物中魔芋胶分子与玉米淀粉分子链间纠缠加强, 增大了糊化混合物的网络结构的密度。加入魔芋胶的糊化混合物与单独玉米淀粉糊的损失正切值相比, $\tan \delta$ 值显著增加, 在频率为 100 rad/s 左右时, 加入魔芋胶糊化混合物的 $\tan \delta$ 值逐渐低于单独玉米淀粉糊的 $\tan \delta$ 值。这表明相比不加胶的糊化混合物, 加入魔芋胶后的玉米淀粉糊化混合物显示出更加弹性的流体性质, 这主要由于玉米淀粉和魔芋胶的相互作用, 使得糊化混合物的结构更加紧密、牢固。魔芋胶和玉米淀粉比例 ($m:m$)

为 0.4:0.8 时, 损失正切值 $\tan \delta$ 最大, 糊化混合物具有更好的协同增稠作用^[20]。

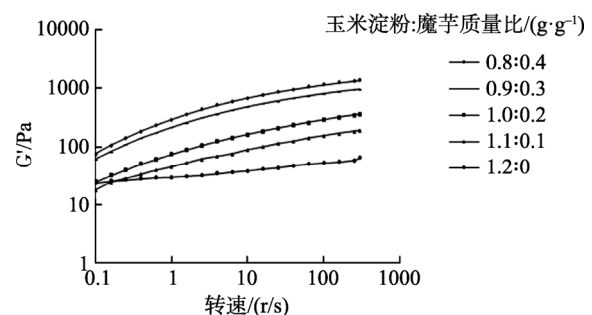


图 2 不同比例魔芋胶与玉米淀粉糊化混合物贮能模量随频率变化曲线

Fig.2 Storage modulus of gelatinized mixture with different ratios of konjac gum and corn starch as a function of frequency

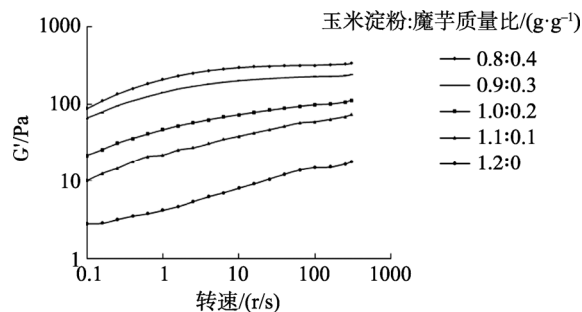


图 3 不同比例魔芋胶与玉米淀粉糊化混合物损耗模量随频率变化曲线

Fig.3 Loss modulus of gelatinized mixture with different ratios of konjac gum and corn starch as a function of frequency

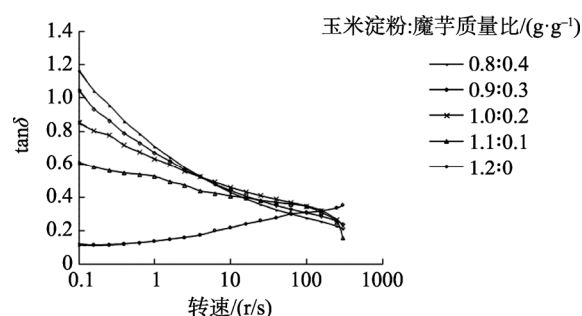


图 4 不同比例魔芋胶与玉米淀粉糊化混合物损失正切值随频率变化曲线

Fig.4 Loss angle tangent of gelatinized mixture with different ratios of konjac gum and corn starch as a function of frequency

4 结 论

对不同比例的魔芋胶/玉米淀粉糊化混合物进行黏弹性分析, 静态剪切流变学试验结果显示: 流体指数 $n < 1$, 不同比例魔芋胶玉米淀粉糊化混合物是典型的假塑性流体。与单独的玉米淀粉相比, 随着魔芋胶的添加量增大, 糊化混合物的稠度系数 K 和损失正切值 $\tan \delta$ 显著增加, 流体指数 n 显著减小, 假塑性增强, 更易剪切稀化。当魔芋胶/玉米淀粉质量比为 0.4:0.8 时, 稠度系数最大, 流体指数最小, 糊化混合物剪切稀化程度最大。动态黏弹性试验结果表明: 不同比例魔芋胶玉米淀粉糊化混合物贮能模量 G' 和损耗模量 G'' 都随频率的增加而逐渐增大, 且魔芋胶比例越大, 糊化混合物贮能模量 G' 和损耗模量 G'' 越大, 且不同比例魔芋胶/玉米淀粉糊化混合物 G' 均小于 G'' , 表现魔芋胶的添加, 使得糊化混合物具有较好的黏弹性。魔芋胶/玉米淀粉质量比为 0.4:0.8 时, 弹性最小, 黏性最大, 糊化混合物具有更好的协同增稠作用, 即糊化混合物流体流动特征显著。

参考文献

[1] 聂亚楠, 田孝才, 吴凯, 等. 玉米淀粉胶粘剂的增强及耐水改性研究

[J]. 中国胶粘剂, 2012, 21(11): 15-18.

Nie YN, Tian XC, Wu K, *et al.* Study on modified corn starch adhesive in reinforcing and water-resistance [J]. China Adhesiv, 2012, 21(11): 15-18.

[2] 张伏, 付三玲, 佟金, 等. 玉米淀粉糊的流变学特性分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 294-297.

Zhang F, Fu SL, Tong J, *et al.* Rheological properties of maize starch pastes [J]. Transac CSAE, 2008, 24(9): 294-297.

[3] 刘敏, 代曜伊, 毕家钰, 等. 魔芋胶对莲藕淀粉糊化和流变特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(7): 109-114.

Liu M, Dai YY, Bi JY, *et al.* Effect of konjac gum on pasting and rheological properties of lotus root starch [J]. Food Ferment Ind, 2017, 43(7): 109-114.

[4] 屠文瑶, 王中, 乔冬玲, 等. 浓度/温度对魔芋葡甘聚糖溶液流变特性的影响[J/OL]. 食品工业科技. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20190429.1431.004.html>

Tu WY, Wang Z, Qiao DL, *et al.* Effects of konjac glucomannan (KGM) concentrations and temperatures on rheological properties [J/OL]. Sci Technol Food Ind. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20190429.1431.004.html>

[5] 穆晓燕, 郑艳, 朱新鹏. 魔芋低聚糖生理作用及应用的研究进展[J]. 现代商贸工业, 2019, (11): 219-222.

Mu XY, Zheng Y, Zhu XP. Research progress on physiological function and application of konjac oligosaccharides [J]. Mod Bus Trad Ind, 2019, (11): 219-222.

[6] Andrade CT, Simão RA, *et al.* Surface modification of maize starch films by low-pressure glow 1-butene plasma [J]. Carbohydr Polym, 2005, 61(4): 407-413.

[7] 曾瑞琪, 李苇舟, 赵欣, 等. 魔芋胶-黄原胶复配体系流变学特性及其凝胶形成动力学分析[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 39-46

Zeng RQ, Li WZ, Zhao X, *et al.* Rheological properties and gelation kinetics of konjac gum-xanthan gum mixtures [J]. Food Sci, 2018, 39(9): 39-46.

[8] 李智, 艾连, 丁文字, 等. 可溶性膳食纤维对玉米淀粉体外消化的抑制作用[J/OL]. 食品工业科技. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.ts.20190528.1512.003.html>

Li Z, Ai L, Ding WZ, *et al.* Inhibitory effects of soluble dietary fibers on the in vitro digestion of corn starch [J/OL]. Sci Technol Food Ind. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.ts.20190528.1512.003.html>

[9] 张帆, 周守标, 李宁, 等. 亲水胶体对石蒜淀粉糊特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 37-42.

Zhang F, Zhou SB, Li N, *et al.* Effects of hydrocolloids on the properties of starch paste from lycoris radiate bulbs [J]. Food Sci, 2018, 39(4): 37-42.

[10] 柴春祥, Sundarangunase K. 黄原胶对马铃薯淀粉流变学特性的影响[J]. 食品工业科技, 2007, 23(8): 115-118.

Chai CX, Sundarangunase K. Effect of xanthan gum on rheological properties of potato starch [J]. Sci Technol Food Ind, 2007, 23(8): 115-118.

[11] Rosell CM, Yokoyama W. Rheology of different hydrocolloids-rice starch blends, effect of successive heating-cooling cycles [J]. Carbohydr Polym, 2011, (84): 373-382.

[12] 汪师帅, 邹慧, 王菁, 等. 脱乙酰魔芋葡甘聚糖对马铃薯淀粉糊化及流变学性质的影响[J/OL]. 食品工业科技. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/>

11.1759.TS.20190306.1719.103.html

Wang SS, Zhou H, Wang Q, *et al.* Effects of deacetylated konjac glucumannan on gelatinization and rheological properties of potato starch [J/OL]. *Sci Technol Food Ind.* <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20190306.1719.103.html>

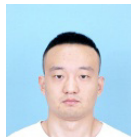
- [13] Tamsiripong T, Pongsawatmanit R, Ikeda S, *et al.* Influence of xyloglucan on gelatinization and retrogradation of tapioca starch [J]. *Food Hydrocolloid*, 2005, 19(6): 1054–1063.
- [14] Wang B, Wang LJ, Li D, *et al.* Rheological properties of waxy maize starch and xanthan gum mixtures in the presence of sucrose [J]. *Carbohydr Polym*, 2009, (77): 472–481.
- [15] 黄来发. 食品增稠剂[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
Huang LF. *Food thickener* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [16] 蔡旭冉, 顾正彪, 洪雁, 等. 瓜尔胶和黄原胶对马铃薯淀粉及其变性淀粉糊化和流变性质的影响[J]. *食品科学*, 2011, 32(17): 22–26.
Cai XR, Gu ZB, Hong Y, *et al.* Effects of guar gum and xanthan gum on pasting and rheological properties of native and modified potato starch [J]. *Food Sci*, 2011, 32(17): 22–26.
- [17] 董贝贝, 黄峻榕. 八种淀粉糊化和流变特性及其与凝胶特性的关系[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.
Dong BB, Huang JR. Pasting, rheological properties and the relationship with gel properties of eight kinds of starch [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017.
- [18] 龙明秀, 吴凤玉, 田竹希, 等. 魔芋胶对甘薯淀粉流变学特性及粉条品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(12): 26–33.
Long MX, Wu FY, Tian ZX, *et al.* Effect of konjac gum on rheological properties of sweet potato starch and qualities of starch noodles [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2018, 34(12): 26–33.
- [19] Yuvaret V, Piyada A, Manop S. Gelatinization and rheological properties of rice/xanthan mixtures [J]. *Food Chem*, 2008, 111(1): 106–114.
- [20] 张雅媛, 洪雁, 顾正彪, 等. 玉米淀粉与黄原胶复配体系流变和凝胶特

性分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 357–362.

Zhang YY, Hong Y, Gu ZB, *et al.* Rheological and gel properties of corn starch-xanthan mixed systems [J]. *Trans CSAE*, 2011, 27(9): 357–362.

(责任编辑: 陈雨薇)

作者简介



王 勇, 硕士, 主要研究方向为功能食品。

E-mail: 514013974@qq.com

裴晶莹, 博士, 主要研究方向为功能食品。

E-mail: 85440862@qq.com

李晓磊, 教授, 博士, 主要研究方向为功能食品。

E-mail: xiaolei97@163.com

李 丹, 教授, 博士, 主要研究方向为食品生物技术。

E-mail: drlidan@sina.com