

菊粉对淀粉热特性及消化特性的影响研究进展

叶媛¹, 张喻^{1,2*}, 张金艳¹, 张佳玉¹

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 410128)

(2. 食品科学与生物技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410128)

摘要: 近年来, 通过添加外源物与淀粉形成结构稳定的复合物, 来改善淀粉的糊化老化、流变等性质成为研究热点。菊粉作为一种可溶性膳食纤维和新资源食品原料, 因具有良好的理化性质及显著的生理功能而被广泛应用于淀粉基食品中。研究表明, 菊粉通过与淀粉竞争体系水分子并限制水分子的流动来抑制淀粉颗粒的膨胀和直链淀粉的浸出, 从而延缓淀粉糊化和老化行为; 同时, 菊粉能够与直链淀粉相互作用来提高复合物凝胶的稳定性, 防止淀粉凝胶在外力作用下发生变形; 此外, 菊粉能够通过包裹在淀粉颗粒表面来阻止消化酶与淀粉的接触, 从而抑制淀粉消化。该文总结了菊粉对淀粉热特性及消化特性等的影响及作用机理, 以期为菊粉在淀粉基食品中的合理应用提供借鉴和参考。

关键词: 菊粉; 淀粉; 热特性

文章编号: 1673-9078(2025)02-385-394

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.2.1279

Research Progress on the Effects of Inulin on the Thermal and Digestive Properties of Starch

YE Yuan¹, ZHANG Yu^{1,2*}, ZHANG Jinyan¹, ZHANG Jiayu¹

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

(2. Hunan Province Key Laboratory of Food Science and Biotechnology, Changsha 410128, China)

Abstract: In recent years, it has become a research hotspot to improve the gelatinization, aging, rheology and other properties of starch by adding exogenous substances to form a structurally stable complex with starch. As a soluble dietary fiber and new resource food raw material, inulin is widely used in starch-based foods because of its good physicochemical properties and significant physiological functions. Previous research showed that inulin could inhibit the swelling of starch granules and the leaching of amylose by competing with starch for water molecules and restricting the flow of water molecules, thereby delaying starch gelatinization and aging behavior. At the same time, inulin can interact with amylose to improve the stability of the complex gel, and prevent the starch gel from being deformed under the action of external force. In addition, inulin is able to inhibit starch digestion by wrapping the surface of starch granules to block the contact between the digestive enzymes and starch. In this review, the effects

引文格式:

叶媛,张喻,张金艳,等. 菊粉对淀粉热特性及消化特性的影响研究进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(2): 385-394.

YE Yuan, ZHANG Yu, ZHANG Jinyan, et al. Research progress on the effects of inulin on the thermal and digestive properties of starch [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 385-394.

收稿日期: 2023-10-24

基金项目: 湖南省重点领域研发计划项目(2019NK2131); 湖南农业大学研究生科研创新项目(2023XC041); 湖南省研究生科研创新项目(QL20230178)

作者简介: 叶媛(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工原理与技术, E-mail: 2915836422@qq.com

通讯作者: 张喻(1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: skxzhangyu@163.com

and mechanism of inulin on the thermal and digestive properties of starch are summarized, in order to provide reference for the rational application of inulin in starch-based foods.

Key words: inulin; starch; thermal properties; digestibility

淀粉是植物细胞中贮藏碳水化合物最普遍的形式^[1],也是人类主要的供能物质^[2]。不同种类的淀粉由于直支比、结构形态和大小、结晶度等的不同,其理化性质也会存在差异^[3]。淀粉由于来源广泛、价格低廉、可降解和再生等特性被广泛应用于食品加工中^[4],但天然淀粉本身存在水溶性差、乳化和凝胶能力低、易老化回生、抗剪切力能力差等缺陷,不能满足某些食品加工的要求,使其应用范围受到限制^[5-7]。为了弥补天然淀粉的缺陷,对淀粉进行改性是目前淀粉研究领域的热点之一^[8]。已有的淀粉改性技术包括物理^[9]、化学改性^[10]、酶修饰^[11]、复合物改性以及转基因改性^[12]等。随着人们对营养和健康益处需求的增加,将淀粉与天然提取的非淀粉多糖或水胶体等外源物复配,通过改变复配体系的性质和营养特性,以此从功能和营养两方面来提高淀粉基食品品质具有广阔的应用前景^[13,14]。

菊粉即是一种天然可溶性膳食纤维,也是一种非淀粉多糖,它是由D-果糖经 $\beta(1\rightarrow2)$ 糖苷键链接而成的一种直链多糖^[15]。根据聚合度的不同,菊粉可分为短链菊粉(DP ≤ 10)、天然菊粉(2~60)以及长链菊粉(DP ≥ 23)^[16]。菊粉具有调控血糖、降血脂、促进益生菌增殖和钙离子吸收、预防肥胖及调节肠道微生物群落结构等功效^[17-19]。此外,因菊粉还具有良好的水溶性和持水性、适宜的分子量以及与面粉相似的粉体特征和独特的凝胶特性,所以相较于其他膳食纤维,菊粉的加工性能更为突出^[20]。目前,菊粉已广泛应用于奶制品、面制品等各类食品中^[21-23]。已有研究表明,菊粉的存在可以对天然淀粉性能产生显著的影响^[24-27],如穆婉菊^[25]发现天然菊粉具有良好的保水性,能阻止淀粉在储存过程中游离水的产生,从而延缓小麦淀粉的老化回生;Ji等^[28]发现天然菊粉通过物理吸附或者非共价作用结合在淀粉颗粒表面,形成物理屏障来限制 α -淀粉酶与淀粉的接触,并且菊粉还能与淀粉竞争水分子来降低淀粉的糊化度,从而进一步降低淀粉的消化率。尹明松^[26]也发现天然菊粉的加入显著抑制了小麦、豌豆以及马铃薯淀粉的消化率。因此,在诸多进展的基础上,本文将菊粉对淀粉糊化特性、热力学特性、冻融稳定性等热特性及消化

特性等的影响进行总结,并进一步分析菊粉影响淀粉热特性和消化特性的作用机理,以期对菊粉在淀粉基食品中的合理应用提供借鉴和参考。

1 菊粉对淀粉糊化特性的影响

淀粉的糊化程度与食品的外观、口感、货架期等品质属性密切相关^[29,30]。研究发现菊粉能使小麦淀粉^[31]和甘薯淀粉^[32]糊化温度升高,且短链菊粉(DP ≤ 10)对淀粉糊化温度的影响最大,而长链菊粉(DP ≥ 23)对其影响最小^[33]。这可能与菊粉具有良好的亲水性有关,与淀粉竞争水分子的同时限制水分子的流动,从而影响淀粉颗粒的溶胀和直链淀粉的浸出,抑制了淀粉的糊化,并且菊粉还能通过分子间氢键与浸出的直链淀粉相互缠绕使得体系稳定性增强^[28],最终导致淀粉的糊化温度升高^[34]。而不同链长菊粉的吸湿性不同^[35],短链菊粉因外部含有更多的羟基和小分子糖,具有更强的水结合能力,最终导致淀粉糊化温度升高更显著^[33]。此外,菊粉还能降低淀粉体系的黏度^[25,34],且聚合度相对较低的菊粉表现更明显^[36]。这可能是由于菊粉作为一种直链多糖^[37],在糊化过程中菊粉分子会附着在淀粉颗粒表面,抑制淀粉颗粒的膨胀和直链淀粉的渗出,使得淀粉的糊化度降低,从而降低淀粉体系黏度^[34]。另外,因菊粉分子具有高度吸湿性,会减少体系水分的可用性^[27],导致支链淀粉不能充分吸收水分,无法形成完全的黏性物质,使得体系黏度降低^[31]。淀粉的峰值黏度与直链淀粉浸出量、直链淀粉-脂质复合物的形成、淀粉颗粒的膨胀以及浸出直链淀粉颗粒与残留未糊化淀粉颗粒之间对游离水的竞争有关^[38]。聚合度小的菊粉对淀粉峰值黏度的影响更大,这是因为聚合度小的菊粉具有更强的吸湿性^[39],更能降低淀粉膨胀所需要的水分,减少浸出的直链淀粉数量,从而减少了菊粉与膨胀的淀粉颗粒和/或浸出的直链淀粉之间的相互作用。且聚合度相对较低的菊粉会包裹在淀粉颗粒周围形成物理屏障,防止淀粉颗粒破损使淀粉颗粒形态饱满并保持完整,从而使淀粉颗粒流动顺畅并减少淀粉颗粒的团聚^[38,40],进而能更显著的降低淀粉

峰值黏度^[36]。而高聚合度的菊粉自身黏度较强^[41], 易形成粘性溶液, 一定程度上抵消了菊粉对峰值黏度的降低^[36]。

2 菊粉对淀粉老化特性的影响

淀粉老化回生是限制淀粉应用的一个重要原因。通常情况下, 淀粉老化回生会对淀粉类食品产生质构劣化、透明度下降、口感粗糙等一系列不利影响^[42]。菊粉可以抑制淀粉的老化, 但由于淀粉种类、菊粉浓度和聚合度的不同, 影响效果也不同。如冀晓龙等^[31]研究发现小麦淀粉回生值随着天然菊粉添加量的增加而逐渐降低, 且当菊粉添加量为 20% (m/V) 时其回生值达到最低。淀粉的回生值主要与直链淀粉分子的重结晶有关^[25], 其值越低, 则表明短期回生的程度越低^[43]。天然菊粉的加入能使小麦淀粉回生值显著降低, 可能是因为菊粉分子能在淀粉颗粒表面形成水合层, 从而通过限制糊化过程中直链淀粉的重排来抑制淀粉的短期回生^[25]。XRD 常用来进一步验证外源物对淀粉回生的抑制作用, Ji 等^[28]发现在豌豆淀粉中天然菊粉含量由 5% (m/V) 增至 15% 时, 体系相对结晶度不断降低, 菊粉抑制了淀粉的回生, 而当菊粉添加量达到 20% 时, 相对结晶度反而增加, 说明当过量菊粉存在时, 反而促进了淀粉的回生。Luo 等^[33]发现短链、天然以及长链菊粉均能抑制小麦淀粉在 7 d 储存过程中直链淀粉的再结晶, 但当菊粉添加量达到 15% (m/m) 时, 淀粉结晶度会明显增加。这可能是由于过量的菊粉可以通过分子间相互作用形成晶体, 并为支链淀粉的再结晶提供晶核, 从而导致相对结晶度的增加。此外, 添加不同聚合度菊粉均能降低大米淀粉在老化 7、14 d 后的相对结晶度, 且短链菊粉延缓淀粉老化的效果最好^[44]。菊粉能延缓淀粉的老化, 可能是由于菊粉分子能与浸出的直链淀粉相互作用^[25], 从而抑制直链淀粉的重排, 并且菊粉的高亲水性能在糊化过程中限制淀粉颗粒周围水分子的运动能力, 从而减少直链淀粉的浸出量, 也会阻碍直链淀粉的重排。同时, 由于菊粉的高亲水性使得参与淀粉重结晶的水分子减少, 减弱了体系内直链及支链淀粉利用水分子形成重结晶的能力, 使得淀粉的老化行为进一步得到抑制^[44]。Xu 等^[45]通过扫描电镜观察发现, 未加入菊粉的小麦淀粉糊在 4 °C 下保存 7 d 后体系呈片状结构, 表面无粉状或絮状晶体 (图 1a), 而添加了 5% (m/m) 天

然菊粉的小麦淀粉糊在 4 °C 储存 7 d 后, 淀粉颗粒表面呈絮状和皱状结构 (图 1b)^[45], 这表明在加热糊化过程中菊粉能以小分子的形式穿插在淀粉分子之间, 从而在冷却后能抑制淀粉的再结晶, 延缓淀粉的老化。淀粉储藏过程中的脱水收缩作用是判断淀粉老化程度的重要指标^[46]。王日思^[44]研究发现短链、中链以及长链菊粉均能有效延缓大米淀粉在老化过程中的脱水收缩作用, 抑制淀粉的老化, 并且通过电镜扫描分析也得了与其一致的结果。大米淀粉在老化 7 d 后会出现较为严重的脱水收缩作用, 呈片层状结构 (图 2a), 而菊粉的加入显著增强了大米淀粉凝胶在老化过程中的持水能力, 凝胶网络所保持的水分在经过升华后会使得体系颗粒结构内部出现大量连续孔洞, 且菊粉聚合度越低, 凝胶持水能力越强, 形成的颗粒孔洞更多 (图 2b、图 2c 和图 2d)^[44]。

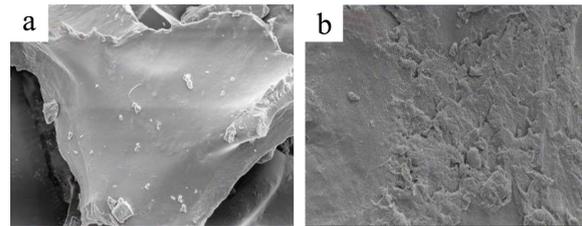


图 1 不同添加量菊粉存在时小麦淀粉凝胶 4 °C 储存 7 d 后的扫描电镜图

Fig.1 SEM of wheat starch gel after storage at 4 °C for 7 days in the presence of different amounts of inulin

注: (a) 小麦淀粉 +0% 菊粉; (b) 小麦淀粉 +5% 菊粉。

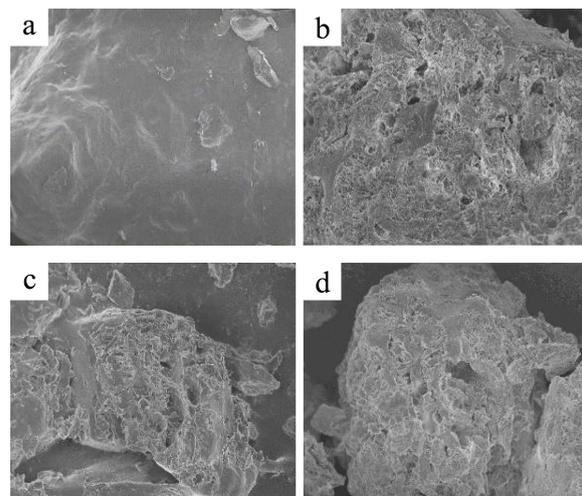


图 2 添加不同聚合度菊粉的大米淀粉老化 7 d 的扫描电镜图

Fig.2 SEM of rice starch with different degree of polymerization of Inulin after retrogradation for 7 days

注: (a) 大米淀粉; (b) 大米淀粉 - 短链菊粉; (c) 大米淀粉 - 中链菊粉; (d) 大米淀粉 - 长链菊粉。

表 1 菊粉对淀粉热力学特性的影响

Table 1 Effect of inulin on the thermodynamic properties of starch

淀粉	糊化				老化					文献
	T_{og}	T_{pg}	T_{cg}	ΔH_g	T_{or}	T_{pr}	T_{cr}	ΔH_r	R	
马铃薯淀粉	↑	↑	↑	↓	↑	—	↑	先↓后↑	先↓后↑	[26]
豌豆淀粉	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	先↓后↑	先↓后↑	[26]
马铃薯淀粉	—	—	—	↑	↑	↓	—	↓	↓	[27]
小麦淀粉	↑	↑	↑	↓	↑	↑	—	—	先↓后↑	[33]
小麦淀粉	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↓	[34]
大米淀粉	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	↓	[44]
小麦淀粉	↑	↑	—	↓	—	—	↓	↓	↓	[45]

注: T_o : 起始温度, T_p : 峰值温度, T_c : 终值温度, ΔH_g : 糊化焓, ΔH_r : 老化焓, R : 老化率。

3 菊粉对淀粉热力学特性的影响

淀粉糊化温度是指淀粉受热丧失双折射性和结晶区消失的临界温度^[47], 糊化焓 ΔH_g 则反映破坏淀粉分子双螺旋结构所需要的能量^[48]。研究发现菊粉能使淀粉糊化温度升高^[44], 而糊化焓值降低^[28,49], 糊化焓值的降低程度随聚合度的减小而增大。糊化焓值的降低可能是由于菊粉与直链淀粉相互作用, 解除了直链淀粉对支链淀粉糊化的抑制, 从而使淀粉糊化所需的能量减少^[50]。另外, 菊粉能阻碍水分子与淀粉颗粒的接触, 使淀粉糊化不完全, 因此糊化焓值降低^[49]。不同聚合度菊粉对淀粉糊化焓值的影响不同, 可能是由于短链菊粉在加热过程中更容易穿插在淀粉分子内部, 导致淀粉晶体稳定性减弱, 糊化焓降低^[28]。也可能是短链菊粉存在大量的外部羟基基团而对水分子的亲和能力更强^[51], 能更大程度的影响淀粉颗粒周围水分子的运动情况, 使得淀粉晶体结构的熔融受到干扰, 降低淀粉的糊化焓值更为明显^[44]。

老化焓 ΔH_r 通常表示支链淀粉在贮存过程中形成的结晶再次加热熔融时所需的能量^[52], ΔH_r 与 ΔH_g 的比值即为老化率, 其值越大, 则表示淀粉老化程度越大^[53]。尹明松^[26]将 5% 和 10% (m/V) 的天然菊粉添加到小麦淀粉、马铃薯淀粉以及豌豆淀粉中, 可引起淀粉老化焓值降低, 抑制其老化行为; 但添加 15% 和 20% 的菊粉反而使淀粉的老化焓值上升。Ji 等^[53]也发现当天然菊粉添加量小于 10% (m/V) 时, 能降低马铃薯淀粉的老化率。韦冷云^[54]发现 3 种不同链长菊粉添加量小于 15% (m/m) 时, 小麦淀粉老化程度均随着菊粉添加量的增加逐

渐降低。这说明在一定范围内, 菊粉能降低淀粉的老化焓值, 延缓淀粉的老化; 当菊粉添加量过高时, 老化焓值反而上升。造成此现象的原因是在添加少量的菊粉以后, 淀粉或菊粉中的羟基通过氢键结合水分, 导致体系中可移动水分减少, 从而减少了淀粉分子链自身的重新排列, 最终抑制了淀粉的老化^[25,26]。也可能是因为低浓度的菊粉能与淀粉分子形成菊粉-淀粉复合物, 使支链淀粉重排变得困难, 从而导致淀粉的老化率降低, 老化行为受到抑制^[49]。而当体系菊粉含量不断增大时, 菊粉能在一定程度上充当增塑剂, 大量菊粉的加入相当于在复合体系中加入大量的水分子, 反而促进了淀粉的老化回生^[26]。菊粉对淀粉热力学特性的影响见表 1。

4 菊粉对淀粉流变特性的影响

在加工淀粉基食品时, 淀粉糊常受高温和高剪切速率等作用, 使其流变特性发生改变, 最终影响产品的感官特性^[55]。淀粉糊作为一种典型的“非牛顿流体”^[56], 为考察剪切应力与剪切速率之间的关系, 常采用幂律模型来对静态剪切数据点进行回归拟合^[57], 其中稠度系数 K 值与体系增稠能力有关, K 值越大, 体系增稠能力越强; 流体指数 n 值 ($0 < n < 1$), n 值越小则体系假塑性越强^[58]。研究表明菊粉的加入能使整个淀粉体系的稠度降低, 并且随着菊粉添加量的增大体系黏度不断降低见表 2。如菊粉能使马铃薯淀粉糊的 K 值降低, 且菊粉链长越短, K 值降低越明显^[27]。小麦淀粉^[54]和 大米淀粉^[59]的稠度系数 K 值随着天然菊粉添加量的增加而减小。李云^[49]发现随着短链菊粉添加量的

增加, 小麦淀粉混合体系的 K 值不断降低, 而中链和长链菊粉反而会增大淀粉体系的 K 值。造成这种现象的原因可能是短链菊粉能稀释体系中淀粉分子的微观浓度, 导致稠度系数下降, 流动性增强, 而中链和长链菊粉的分子链较长, 容易与淀粉相互作用, 使分子间链段的缠结点增加, 从而对流动产生的黏性阻力增强, 导致稠度系数相应增加^[49]。

在动态流变学参数中, 弹性模量 G' 反映体系的固体特性, 其值越大, 体系越难发生变形, 黏性模量 G'' 则反映体系的流体特性^[60]。损耗角正切值 $\tan\delta$ 是 G'' 与 G' 的比值, $\tan\delta$ 值越小, 体系越表现出固体性质, 反之则越表现出流体性质^[61]。研究发现, 当短链菊粉添加量小于 7.5% (m/m) 时, 在振幅为 100 Pa, 频率 1 Hz 的条件下, 小麦淀粉的 G' 和 G'' 值均随短链菊粉含量的增加而增加, 当短链菊粉添加量大于 7.5% 时, G' 和 G'' 反而降低, 且 G' 值始终大于 G'' 值^[62]。说明适量的短链菊粉能提高

淀粉凝胶的稳定性。这可能是因为直链淀粉分子与菊粉相互作用形成三维网络结构, 促进了凝胶的黏弹性, 从而防止凝胶在外力作用下发生变形^[28]。但当过量的菊粉存在时, 填充在网络结构中多余的菊粉与支链淀粉分子在分子间、分子内形成氢键, 使分子链段间的柔韧性增强, 导致网络结构的刚性变弱^[62], 并且菊粉自身分子间也可以发生相互作用来形成弹性较弱的凝胶^[26]。但由于不同种类淀粉的直链淀粉含量有较大差异, 菊粉对不同淀粉黏弹性的影响会有所不同。如在 0.1~25 Hz 频率范围内, 1% 应变下的测试条件下, 天然菊粉浓度从 5% (m/V) 增至 20% 时, 豌豆淀粉混合体系的 G' 和 G'' 值始终显著升高, 且 G' 值大于 G'' 值。这可能是因为菊粉主要是与直链淀粉发生相互作用来提高淀粉凝胶的黏弹性, 而豌豆淀粉具有较高的直链淀粉含量^[63], 所以不同直链淀粉含量淀粉-菊粉复合凝胶呈现出具有差异的黏弹特性^[28]。

表 2 菊粉对淀粉流变学特性的影响

Table 2 Effect of inulin on the rheological properties of starch

淀粉	菊粉聚合度 (DP)	对淀粉流变学特性的影响	文献
马铃薯淀粉	DP<10 DP≥10 DP>23	淀粉糊 K 值降低, 且随着菊粉聚合度的降低, K 值降低越明显, 但当添加量大于 5% (m/m) 时, 短链菊粉反而会使体系 K 值有所上升, 而添加中链、长链菊粉的体系 K 值始终下降; 除了添加 5% 短链菊粉以外, 菊粉-淀粉复合体系的 n 值均低于原淀粉; 在 5% 应变力, 角频率 0.1~100 rad/s 的测试条件下, 短链菊粉使淀粉糊 G' 值升高, 而添加了中链菊粉和长链菊粉的淀粉糊 G' 值下降, G'' 值变化不明显。	[27]
小麦淀粉	DP≤10 2<DP<60 DP≥23	短链菊粉添加量大于 5% (m/m) 时, 体系的 K 值显著降低, n 值显著升高; 中链菊粉添加量大于 5% 时, 体系 K 值反而上升且均大于原淀粉, n 值先降低后升高; 长链菊粉添加量大于 5% 时, 体系 K 值先降低, n 值先升高, 添加量达到 10% 时, 体系 K 值达到最大值, n 值达到最小值, 随后添加量超过 10% 时, 体系 K 值下降, n 值上升。	[49]
豌豆淀粉	DP 2~60	添加 5%~20% (m/V) 的菊粉均能使体系 G' 和 G'' 值显著增大, 作用效果为 20%>15%>10%>5%, 并且 G' 值始终大于 G'' 值。	[28]
小麦淀粉	DP<10 DP10~23 DP>23	不同链长菊粉的加入均能使体系 K 值降低, n 值增大; 在 10% 的应变力, 角频率 0.1~100 rad/s 下进行扫描, 短链菊粉使体系 G' 和 G'' 值增大, 长链菊粉使体系 G' 和 G'' 值降低, 而中链菊粉对其影响较小。	[54]
大米淀粉、马铃薯淀粉	平均 DP 20	体系 K 值随菊粉添加量的增加而降低, 而 n 值不断增大。	[59,64]

5 菊粉对淀粉凝胶性质的影响

淀粉凝胶的质构特性是评价淀粉基食品品质和加工性能的重要指标^[65], 其中硬度值通常用来表征淀粉凝胶的老化程度^[66]。研究发现天然菊粉添加量在 20% 以内时能使在 4 °C 下保存 24 h 的豌豆^[28]和甘薯淀粉^[32]凝胶硬度降低, 凝胶质地变得柔软。这可能是因为菊粉分子间会相互作用形成比淀粉凝胶弱的凝胶网络结构^[28], 并且菊粉凝胶的形成还会

阻止菊粉-淀粉凝胶的形成及淀粉分子之间的相互作用, 最终降低了凝胶体系的硬度^[26]。天然菊粉添加量从 5% 增至 15% 时, 菊粉-小麦淀粉^[25]和菊粉-大米淀粉^[59]复合凝胶体系在 4 °C 下保存 7 d 后, 凝胶硬度均随菊粉添加量的增加而降低, 这可能是因为菊粉对淀粉颗粒溶胀起到抑制作用^[25], 使得溢出的直链淀粉分子减少^[67]。此外, 凝胶硬度还与回生过程中淀粉分子的重结晶和有序结构的形成有关^[68]。菊粉能降低淀粉凝胶的硬度, 也可能是因

为菊粉容易渗透到淀粉内部,导致淀粉分子链之间的距离增加,从而减少了淀粉分子间羟基形成的氢键。同时,存在于淀粉分子内部的菊粉可能通过羟基与淀粉分子形成氢键,干扰淀粉回生过程中有序结构的形成,从而导致凝胶硬度的降低^[33]。由于菊粉与不同类型的淀粉在凝胶形成过程中分子间的作用力大小和作用方式各有差异,从而间接导致淀粉凝胶的质构特性变化不同^[69],如尹明松^[26]发现天然菊粉添加量在10%以内时能使于4℃下保存24h的马铃薯淀粉凝胶和小麦淀粉凝胶的硬度增加,这可能是因为菊粉作为一种具有亲水性的小分子糖,可以与浸出的直链淀粉相互作用或嵌入由直链淀粉/支链淀粉形成的网状结构中,形成更加稳定的三维网络结构,进而提高了凝胶体系的硬度;并且由于淀粉凝胶硬度与直链淀粉含量呈正相关^[70],而马铃薯淀粉中直链淀粉含量较少,自身容易形成弱凝胶,进而菊粉对其改善作用更加明显。淀粉凝胶的质构特性变化不仅与淀粉本身的种类有关,还与加入菊粉的聚合度以及浓度有关。Kou等^[62]将5%~10% (m/m)的3种不同聚合度的菊粉添加到小麦淀粉中,发现于室温下陈化30min后的淀粉凝胶硬度升高,而当菊粉添加量达到15%~20%时,凝胶硬度又有所降低,其中短链菊粉对其凝胶硬度的提升最为显著。李云^[49]也发现短链菊粉对淀粉凝胶硬度的影响最显著,这是因为链长越短的菊粉与淀粉分子的氢键作用越强,从而形成的菊粉-淀粉凝胶越稳定;但当菊粉过量时,凝胶硬度又会有一定程度的下降,这是由于过量菊粉的自聚集,通过位阻阻碍了直链淀粉之间的缠结,从而破坏有序结构和凝胶的稳定性。

6 菊粉对淀粉冻融稳定性的影响

淀粉基食品贮藏、运输过程中的反复冻融会对产品的质地和外观造成不利影响^[71,72]。析水率是评价淀粉凝胶在冻融过程中对抗不良物理变化能力的主要指标^[73],析水率越大则表示淀粉冻融稳定性越差^[74]。菊粉对淀粉冻融稳定性的影响与菊粉的浓度以及聚合度有关。如刁苏晨^[59]研究发现添加天然菊粉5%、10%以及15% (m/m)都能使大米淀粉的析水率明显减低,冻融稳定性提高,作用效果为5% > 10% > 15%。韦冷云^[54]在小麦淀粉中添加3种不同链长的菊粉,发现其对淀粉凝胶析水率的影响不

同:当短链和中链菊粉添加量为5% (m/m)时,淀粉凝胶析水率下降,但随添加比例的增加,析水率逐渐增大甚至高于原淀粉;而加入长链菊粉的凝胶体系,其析水率均要高于原淀粉,且随菊粉含量的增加而不断增大。电镜扫描分析也验证了这一结果,未添加菊粉的小麦淀粉由于冰晶的反复形成和熔融,使得淀粉分子链不断发生重排,析出水分,凝胶内部形成大量孔洞^[75](图3a)。而添加少量短链和中链菊粉改变了小麦淀粉的表观形态,孔洞明显减少(图3b和图3d)^[54],这可能与更少的可冻结水含量,更强的与水结合能力以及更加稳定的凝胶结构有关。同时,聚合度较低的菊粉对支链淀粉和直链淀粉的回生具有较高的抑制作用,这一特性也会提高原淀粉的冻融稳定性。Ye等^[76]也发现菊粉通过提高大米淀粉凝胶的持水能力,减少冻结水量来有效降低大米淀粉凝胶的析水率,提高冻融稳定性。且因聚合度较低的菊粉具有更强的持水能力^[77],从而能更有效的提高淀粉凝胶的冻融稳定性。菊粉能提高淀粉糊的冻融稳定性,可能是因为菊粉具有较高的亲水性,能将淀粉凝胶体系中部分游离水固定并转化为结合水^[76],阻碍水转移形成冰晶,并防止水分子从基质中释放出来,从而抑制淀粉凝胶的脱水收缩作用,降低淀粉凝胶的析水率^[78]。

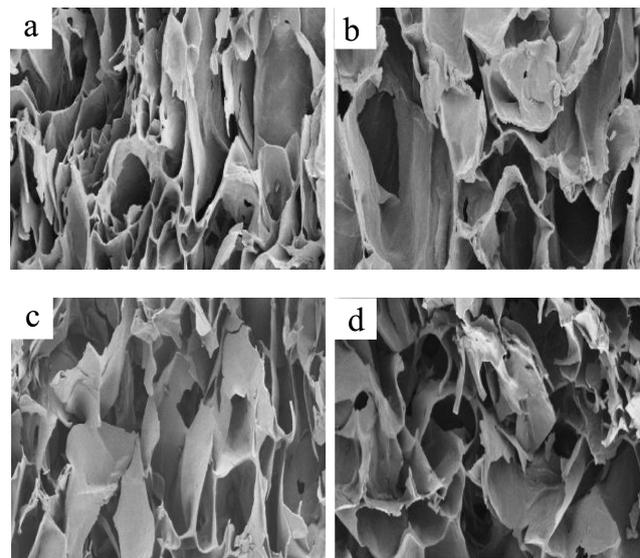


图3 小麦淀粉-不同链长菊粉混合体系电镜扫描图

Fig.3 SEM of wheat starch-Inulin with different degree mixing system

注:(a)小麦淀粉;(b)小麦淀粉+5%短链菊粉;(c)小麦淀粉+5%中链菊粉;(d)小麦淀粉+5%长链菊粉。

7 菊粉对淀粉消化性的影响

淀粉作为人类膳食能量的主要来源之一^[79]，其消化特性对餐后血糖指数和胰岛素分泌的控制有着重要影响^[80]。根据淀粉的消化特性可将其划分为快消化淀粉（RDS）、抗性淀粉（RS）以及慢消化淀粉（SDS）三类^[81]。其中 SDS 和 RS 均对糖尿病和肥胖症等有一定的预防和控制作用^[82,83]。因此，富含 SDS 和 RS 的食品具有较低的血糖指数^[84]。添加一定量的天然菊粉可以有效降低马铃薯淀粉的血糖指数^[64]，不同链长的菊粉均能有效降低小麦淀粉的血糖指数，且短链菊粉的作用效果最好^[54]。尹明松^[26]研究发现天然菊粉能使小麦、马铃薯以及豌豆淀粉中 RDS 和 SDS 的含量显著下降，RS 含量上升。刁苏晨^[59]发现

添加一定量的天然菊粉后，大米淀粉中 RDS 和 SDS 的含量降低，RS 的含量上升，且混合体系的水解程度也随菊粉添加量的增加逐渐降低。Ji 等^[28,53]也发现天然菊粉能降低豌豆淀粉和马铃薯淀粉中 RDS 和 SDS 含量，而 RS 含量增加。由此可见，菊粉可以在一定程度上抑制淀粉的水解程度及速度。菊粉影响淀粉消化特性主要作用机理见图 4，菊粉能影响淀粉的消化可能是因为菊粉可以包裹在淀粉颗粒表面，从而阻碍淀粉分子与酶接触，使得淀粉酶酶解变得缓慢^[54]。此外，还有可能是因为菊粉对水分子的强亲和力，使其在糊化过程中与淀粉分子竞争体系自由水，而淀粉糊化可用水减少，淀粉颗粒吸水膨胀受到抑制，导致部分淀粉颗粒糊化不完全，从而使抗性淀粉含量增加^[26]。

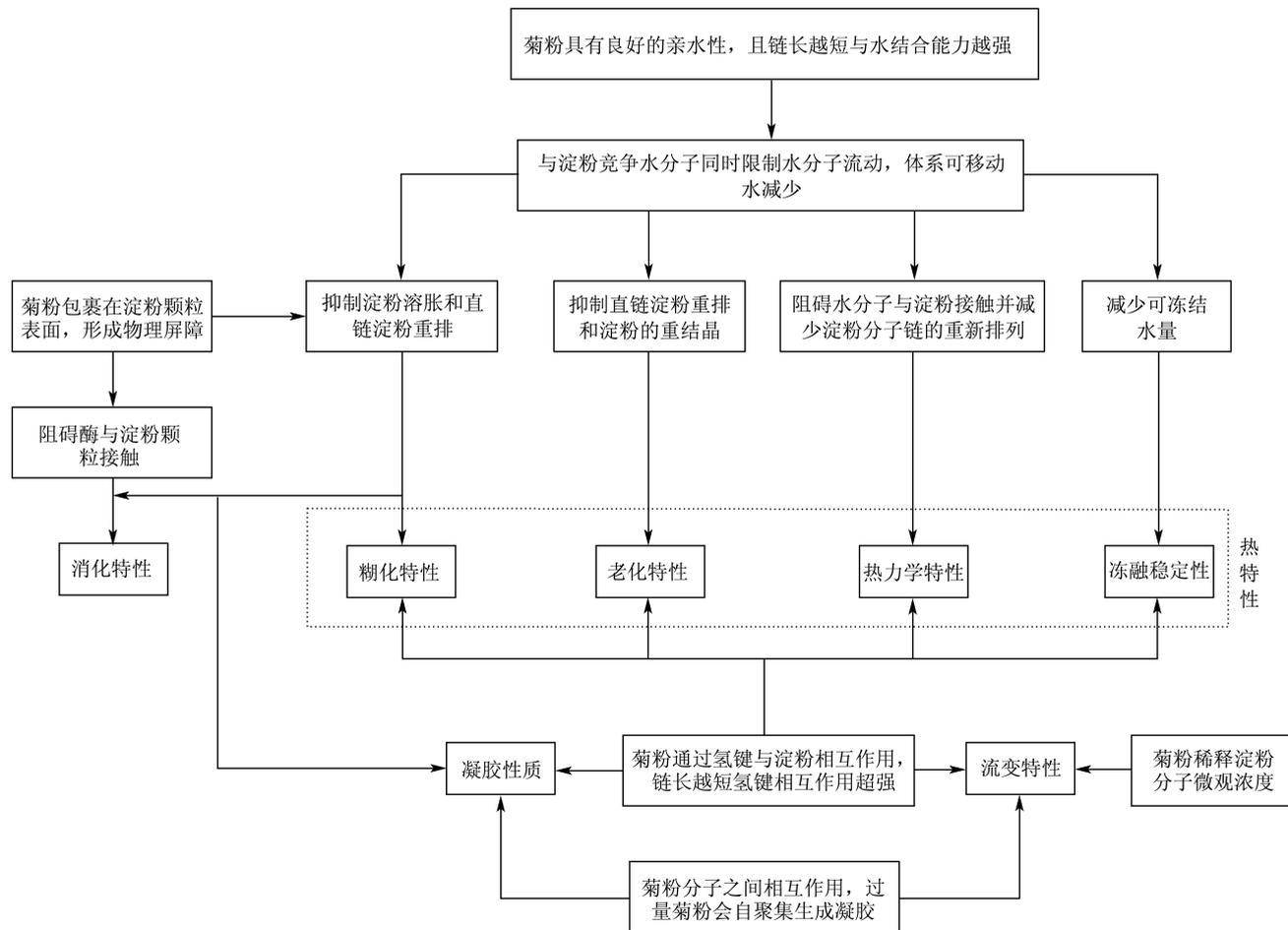


图 4 菊粉影响淀粉热特性及消化特性主要作用机理

Fig.4 The main mechanism of action of inulin affecting the thermal properties and digestibility of starch

8 结论与展望

淀粉在实际生产中存在老化、沉淀、水分流失以及抗剪切力差等问题,使得淀粉的开发利用受到限制。将菊粉与淀粉复配,不仅能通过改善淀粉糊化、流变等特性来提高淀粉基食品的加工性能和品质,还能在降低淀粉血糖指数的同时增加营养价值,这为扩大淀粉的应用范围提供了一种新的思路。菊粉-淀粉复配体系能产生不同于单一淀粉的理化性能:菊粉能与淀粉通过物理吸附或者非共价作用结合在淀粉颗粒表面,抑制淀粉颗粒的膨胀和直链淀粉的浸出;并且菊粉自身具有的高亲水性,能限制糊化过程中淀粉颗粒周围水分子的运动,进一步减少直链淀粉的浸出量,从而抑制直链淀粉重排聚集和有序结构的形成,延缓淀粉老化;菊粉与淀粉之间存在的氢键相互作用,改变了原本淀粉分子之间以及淀粉与水分子之间的相互作用,并且菊粉自身分子之间也能互相作用来形成一定的三维网络结构;此外,菊粉通过附着在淀粉颗粒表面来形成物理屏障,阻碍消化酶与淀粉的接触,降低淀粉酶解的速率,从而影响淀粉消化。

菊粉-淀粉的复配效果与菊粉的浓度、聚合度以及淀粉种类等密切相关。不同聚合度的菊粉以及不同来源的淀粉都会导致菊粉对淀粉体系热特性和消化特性等的影响和作用机理存在差异。因此,系统地探明菊粉与淀粉之间的作用机理,是获得理想的菊粉-淀粉复配体系的关键所在。此外,在后续的研究中,可以进一步探究不同种类淀粉与不同聚合度菊粉之间的复配效应,菊粉与其他外源添加物或菊粉与其他物理方法是否有协同增效的作用等。

参考文献

- [1] AMAGLIANI L, O'REGAN J, Kelly A L, et al. Chemistry, structure, functionality and applications of rice starch [J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 291-300.
- [2] JI X Y, LUO Y, SHEN M Y, et al. Effects of carboxymethyl chitosan on physicochemical, rheological properties and in vitro digestibility of yam starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 192: 537-545.
- [3] 侯蕾,韩小贤,郑学玲,等.不同种类淀粉理化性质的比较[J].*粮食加工*,2015,40(2):32-37.
- [4] XIE J, DING S Y. Composite modification of starch and adsorption capacity of starch microspherical aerogel [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 226: 102-110.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] XU L, REN J Y, WANG X, et al. Effects of sugar beet pectin on the pasting, rheological, thermal, and microstructural properties of wheat starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 127328.
- [8] COMPART J, SINGH A, FETTKE J, et al. Customizing starch properties: A review of starch modifications and their applications [J]. *Polymers*, 2023, 15(16): 3491.
- [9] YE S J, BAIK M Y. Characteristics of physically modified starches [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2023, 32(7): 875-883.
- [10] MASINA N, CHOONARA Y E, KUMAR P, et al. A review of the chemical modification techniques of starch [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 157: 1226-1236.
- [11] BANGAR S P, ASHOGBON A O, SINGH A, et al. Enzymatic modification of starch: A green approach for starch applications [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 287: 119265.
- [12] 刘延浩,樊俊玮,王路.天然淀粉改性技术方法与应用研究进展[J].*卫生研究*,2023,52(6):1023-1028.
- [13] LI H C, HU K L, CHEN J R, et al. Effect of trehalose on the properties of potato starch-lycium barbarum polysaccharide composite Gel [J]. *Food Biophysics*, 2024,19: 85-95.
- [14] WANG J, MA Q H, CAI P X, et al. On the investigation of composite cooling/heating set gel systems based on rice starch and curdlan [J]. *Food Chemistry*, 2024, 438(16): 137960.
- [15] YUE C H, TANG Y, QI W W, et al. Influences of Na₂CO₃, NaHCO₃, K₂CO₃ on the rheological, water distribution, and microstructural properties of 5% long-chain inulin dough and quality of steamed bread [J]. *LWT*, 2023, 176: 114501.
- [16] LUO D L, LIANG X P, XU B C, et al. Effect of inulin with different degree of polymerization on plain wheat dough rheology and the quality of steamed bread [J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 75: 205-212.
- [17] 张泽生,刘亚萍,李雨蒙,等.菊粉的研究与开发[J].*中国食品添加剂*,2017(10):183-188.
- [18] GUPTA N, JANGID A K, POOJA D, et al. Inulin: A novel and stretchy polysaccharide tool for biomedical and nutritional applications [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 132: 852-863.
- [19] SINGH R S, SINGH T, LARROCHE C. Biotechnological applications of inulin-rich feedstocks [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 273: 641-653.
- [20] 高丰衣,黄梦丽,张阳,等.菊粉面条的研制[J].*食品工业*, 2022,43(10):105-108.

- [21] 李烜,罗登林,向进乐,等.菊粉的性质、功能及在食品中的应用进展[J].中国粮油学报,2021,36(4):185-192.
- [22] SHOAI B M, SHEHZAD A, OMAR M, et al. Inulin: Properties, health benefits and food applications [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 147: 444-454.
- [23] 张之握.菊粉的特性、功能及其在食品中的应用[J].中国果菜,2022,42(8):51-55.
- [24] 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.
- [25] 穆婉菊.菊糖与淀粉、蛋白相互作用及对面团的影响[D].天津:天津科技大学,2019.
- [26] 尹明松.菊粉对不同晶型淀粉结构和理化特性的影响及在馒头中的应用研究[D].郑州:郑州轻工业大学,2022, 000162.
- [27] WITCZAK T, WITCZAK M, ZIOBRO R. Effect of inulin and pectin on rheological and thermal properties of potato starch paste and gel [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 124: 72-79.
- [28] JI X L, YIN M S, HAO L R, et al. Effect of inulin on pasting, thermal, rheological properties and *in vitro* digestibility of pea starch gel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193: 1669-1675.
- [29] 冯志强,余颜圃,王艳,等.沙蒿胶对糯米淀粉糊化特性和流变特性的影响[J].轻工学报,2023,38(1):18-26.
- [30] LI C. Recent progress in understanding starch gelatinization-An important property determining food quality [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 293: 119735.
- [31] 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.
- [32] ZHANG L W, WANG X F, LI S S, et al. Effect of inulin on the pasting, textural, and rheological properties of sweet potato starch [J]. CyTA-journal of Food, 2019, 17(1): 733-743.
- [33] LUO D L, LI Y, XU B C, et al. Effects of inulin with different degree of polymerization on gelatinization and retrogradation of wheat starch [J]. Food Chemistry, 2017, 229: 35-43.
- [34] 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,2017,32(2):24-29.
- [35] 罗登林,姚金格,徐宝成,等.不同聚合度菊粉的吸附特性[J].食品科学,2017,38(1):67-73.
- [36] WANG R S, WAN J, LIU C M, et al. Pasting, thermal, and rheological properties of rice starch partially replaced by inulin with different degrees of polymerization [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 92: 228-232.
- [37] 卢玉容,郭秀兰,侯彩云,等.菊糖在食品加工中的特性及应用[J].食品研究与开发,2018,39(12):194-199.
- [38] 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.
- [39] PERESSINI D, SENSIDONI A. Effect of soluble dietary fibre addition on rheological and breadmaking properties of wheat doughs [J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49(2): 190-201.
- [40] 刘璐.非淀粉多糖对淀粉消化性的影响及其作用机制[D].天津:天津科技大学,2018.
- [41] GONZALEZ-TOMÁS L, COLL-MARQUE S J, Costell E. Viscoelasticity of inulin-starch-based dairy systems. Influence of inulin average chain length [J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(7): 1372-1380.
- [42] 王宏伟,许可,张艳艳,等.淀粉老化的影响因素及其检测技术研究进展[J].轻工学报,2021,36(1):17-29.
- [43] 裴斐,倪晓蕾,孙昕炆,等.低聚果糖对大米淀粉回生特性的影响[J].食品科学,2022,43(2):27-33.
- [44] 王日思.不同分子量段可溶性膳食纤维对大米淀粉性质的影响[D].南昌:南昌大学,2020.
- [45] XU F, LI X Q, LI J H, et al. The interaction between inulin and wheat starch and effects of inulin on frozen storage quality of noodles [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(5): 2423-2431.
- [46] WU Y, CHEN Z, LI X, et al. Retrogradation properties of high amylose rice flour and rice starch by physical modification [J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(3): 492-497.
- [47] 许亮,向珣朝,杨博文,等.水稻淀粉糊化温度表征差异的比较[J].中国粮油学报,2019,34(4):63-68.
- [48] 张晶,张美莉.超高压处理对燕麦淀粉颗粒特性、热特性及流变学特性的影响[J].食品科学,2020,41(23):114-121.
- [49] 李云.菊粉与小麦淀粉相互作用的研究[D].洛阳:河南科技大学,2017.
- [50] 钟蓓.黄原胶和瓜尔豆胶对小麦淀粉特性影响的研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [51] LI Y, MA X, LIU X. Physicochemical and rheological properties of cross-linked inulin with different degree of polymerization [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 318-325.
- [52] 房子蔚,王雨生,于真,等.油酸和麦芽糖醇混合物对玉米淀粉老化特性的影响[J].食品科学,2022,43(20):109-116.
- [53] JI X L, CHEN J, JIN X Y, et al. Effect of inulin on thermal properties, pasting, rheology and *in vitro* digestion of potato starch [J]. Starch-Stärke, 2023, 75(7-8): 2200217.
- [54] 韦冷云.菊糖对小麦淀粉理化性质及体外消化的影响[D].合肥:安徽农业大学,2017.
- [55] 谭沙,朱仁威,刘庆庆,等.外源添加剂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.
- [56] 郭佳欣,张慧君,刘鑫宇,等.玉米淀粉和马铃薯淀粉糊化后的流变性及其热力学性质比较[J].中国果菜,2022, 42(3):1-5,39.
- [57] LI G T, ZHU F. Rheological properties in relation to molecular

- structure of quinoa starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 114: 767-775.
- [58] 胡珊珊,王颖,孙剑锋,等.羟丙基木薯淀粉流变特性的研究[J].食品科学,2012,33(17):73-77.
- [59] 刁苏晨.菊糖对大米淀粉物化特性及米糕品质的影响[D].合肥:安徽农业大学,2017.
- [60] 韩雪琴.大米淀粉与食源性多酚相互作用的研究[D].广州:华南理工大学,2021.
- [61] 陈金凤,汪月,马云翔,等.马铃薯淀粉对面团流变学特性及酥性饼干品质的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(5): 121-127.
- [62] KOU X R, LUO D L, LI Y, et al. Effect of inulin with different degree of polymerisation on textural and rheological properties of wheat starch-Effect of inulin on gel properties of starch [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(11): 2576-2585.
- [63] ZHOU D T, MA Z, YIN X X, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of field pea starch modified by physical, enzymatic, and acid treatments [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 386-394.
- [64] 汪名春,韦冷云,朱培蕾,等.菊糖对马铃薯淀粉糊流变特性及体外消化的影响[J].中国粮油学报,2016,31(6):47-51.
- [65] 王艳,王睿,张艳艳,等.基于主成分分析和模糊数学构建亲水胶体影响汤圆品质的综合评价模型[J].食品科学, 2022,43(14):68-75.
- [66] 宋锦宏,陈龙,赵建伟,等.小分子糖对淀粉性质的影响研究进展[J].粮油食品科技,2023,31(3):1-8.
- [67] 琚魏波,王亮,荣亚萍,等.不同添加剂对马铃薯淀粉凝胶特性的影响[J].食品工业,2023,44(1):47-52.
- [68] XIAO W H, SHEN M Y, REN Y M, et al. Mesona chinensis polysaccharides promote molecular crosslinking and gel formation of debranched waxy maize starch [J]. LWT, 2021, 148: 111773.
- [69] 黄峻榕,唐晓东,蒲华寅.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.
- [70] TIAN J M, QIN L K, ZENG X F, et al. The role of amylose in gel forming of rice flour [J]. Foods, 2023, 12(6): 1210.
- [71] 焦健,刘裕,王悦,等.黄原胶对变性淀粉冻融稳定性的影响[J].中国粮油学报,2023,38(3):86-93.
- [72] FU Y, ZHOU J J, LIU D Z, et al. Effect of mulberry leaf polysaccharides on the physicochemical, rheological, microstructure properties and *in vitro* starch digestibility of wheat starch during the freeze-thaw cycles [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 109057.
- [73] 叶佳琪,吴正奇,李露,等.糯性淀粉凝胶冻融特性及品质改良的研究进展[J].食品科技,2018,43(1):252-257.
- [74] 高金梅,黄倩,郭洪梅,等.冻融循环处理对玉米淀粉凝胶结构及颗粒理化特性的影响[J].现代食品科技,2017, 33(2):181-189.
- [75] 钟蓓,许喜林.黄原胶和瓜尔豆胶对小麦淀粉冻融稳定性的影响[J].现代食品科技,2016,32(6):118-121.
- [76] 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.
- [77] LUO D L, LIANG X P, XU B C, et al. Effect of inulin with different degree of polymerization on water redistribution of steamed bread [J]. Journal of Cereal Science, 2017, 76: 289-295.
- [78] ZHAI Y H, XING J L, LUO X H, et al. Effects of pectin on the physicochemical properties and freeze-thaw stability of waxy rice starch [J]. Foods, 2021, 10(10): 2419.
- [79] CHEN N, WANG Q, WANG M X, et al. Characterization of the physicochemical, thermal and rheological properties of cashew kernel starch [J]. Food Chemistry: X, 2022, 15: 100432.
- [80] 王崇崇.膳食纤维和阿魏酸对馒头品质及淀粉消化性的影响机理研究[D].无锡:江南大学,2023.
- [81] GEBRE B A, ZHANG C C, LI Z J, et al. Impact of starch chain length distributions on physicochemical properties and digestibility of starches [J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137641.
- [82] 黄峻榕,任瑞珍,蒲华寅,等.慢消化淀粉的消化特性、测定及制备[J].中国粮油学报,2015,30(3):134-139.
- [83] MA M T, WANG Y J, WANG M X, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of legume starches [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 249-255.
- [84] 龚永强,刘静,余振宇,等.抗性、慢消化淀粉的制备及其控血糖机理的研究进展[J].中国粮油学报,2022,37(1): 187-195.