梁端阳, 张阳光, 罗文静, 等. 不同温度下高直链玉米淀粉对全麦面粉糊化特性、凝胶行为和抗消化性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 168−176. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010255

LIANG Duanyang, ZHANG Yangguang, LUO Wenjing, et al. Effect of High-amylose Maize Starch at Different Heating Temperatures on the Pasting Properties, Gelation Behaviors and Anti-digestibility of Whole Wheat Flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 168−176. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010255

· 研究与探讨 ·

不同温度下高直链玉米淀粉对全麦面粉糊化特性、凝胶行为和抗消化性的影响

梁端阳[1], 张阳光[1], 罗文静[1], 徐敏鸣[2], 郭佳悦[2], 胡 瑶[2], 刘思源[2,3,*]

（1.天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457;
2.中国农业大学营养与健康系, 北京 100193;
3.中原食品实验室, 河南漯河 462300）

摘 要: 本研究探究了高温蒸煮后高直链玉米淀粉（HA）对全麦面粉（WWF）的糊化特性、凝胶行为以及抗消化性的影响。首先配制了含有不同比例 HA 的高直链全麦复合粉，并通过调整谷朊粉添加量使其蛋白质含量保持在 13.8%，然后研究了该复合粉的粉质特性和在 100 ℃ 和 140 ℃ 热处理下的糊化特性、热特性、凝胶强度和抗消化性等性质。结果表明，添加 HA 增加了面团的吸水率，缩短了面团形成时间。在 100 ℃ 时 WWF 中的小麦淀粉（WHE）可以糊化形成凝胶网络结构，但是 HA 未发生糊化仍以淀粉颗粒形态存在；在 140 ℃ 时，HA 可以完全糊化，颗粒结构完全被破坏。在 100 ℃ 时，复合粉的凝胶硬度并未随着 HA 的增加而持续减小。HA 中直链淀粉-脂质复合物（ALC）的焓值为 3.2 J/g，WWF 中的焓值为 1.9 J/g，添加 HA 后，复合粉的焓值并未发现显著变化。在 100 ℃ 和 140 ℃ 处理后，与 WWF 相比，复合粉的 RDS 含量显著下降（P<0.05），并且 SDS 与 RS 含量之和大于理论预期值，因此添加 HA 可以在其本身的抗消化性效果以外更有效地增强复合体系淀粉的抗消化性。

关键词: 高直链玉米淀粉, 全麦面粉, 糊化特性, 凝胶特性, 抗消化性

中图分类号: TS231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002−0306(2026)01−0168−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010255 本文网刊:

Effect of High-amylose Maize Starch at Different Heating Temperatures on the Pasting Properties, Gelation Behaviors and Anti-digestibility of Whole Wheat Flour

LIANG Duanyang[1], ZHANG Yangguang[1], LUO Wenjing[1], XU Minming[2], GUO Jiayue[2], HU Yao[2], LIU Siyuan[2,3,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
2.Department of Nutrition and Health, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
3.Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe 462300, China）

Abstract: This study investigated the effects of high-amylose maize starch (HA) on the pasting properties, gelation behavior, and anti-digestibility of whole wheat flour (WWF) under different high-temperature cooking conditions. Composite flours were formulated by incorporating varying ratios of HA into WWF, with the protein content standardized at 13.8% through gluten adjustment. The composite flours were evaluated for farinograph properties and pasting behavior, thermal characteristics, gel hardness, and digestibility following heat treatments at 100 ℃ and 140 ℃. Results demonstrated that the addition of HA increased water absorption and reduced dough development time. Wheat starch (WHE) in WWF

收稿日期: 2025−01−23

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目“方便主食食品规模化加工关键技术研究与集成应用”（2021YFD2100200/2021YFD2100204）。

作者简介: 梁端阳（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 功能碳水化合物, E-mail: yyangyiyiyi@163.com。

*** 通信作者:** 刘思源（1990−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 功能碳水化合物, E-mail: siyuan.liu@cau.edu.cn。

could gelatinize and form a gel network at temperatures below 100 ℃, while HA largely retained its granular form. At 140 ℃, HA could be fully gelatinized, with its granular structure completely destroyed. Notably, gel hardness did not show a consistent trend of reduction with increasing HA content. The enthalpy values of amylose-lipid complexes (ALC) in HA and WWF were determined to be 3.2 J/g and 1.9 J/g, respectively. However, no significant changes in enthalpy values were observed in the composite flour after the addition of HA. The RDS content of the composite flour decreased significantly compared to WWF (P<0.05) and the sum of SDS and RS content was greater than the theoretically expected value after treatments at 100 ℃ and 140 ℃. Therefore, the addition of HA could enhance the anti-digestibility of the starch of the composite system more effectively than its own anti-digestibility effect.

Key words: high-amylose maize starch; whole wheat flour; pasting properties; gelation properties; anti-digestibility

由第 10 版《全球糖尿病地图》中的统计数据可知，我国 2021 年糖尿病患病人数约 1.41 亿人，位居世界首位[1]。糖尿病会引起一系列的并发症，因此，严格控制血糖至关重要，通过科学的饮食控制，可以有效稳定血糖水平[2]。全麦面粉（WWF）是制作低 GI 食品的常用原料，但其降低淀粉消化率的能力有限[3]。进一步提高 WWF 的抗消化性，降低其在人体肠道的消化速率，有助于改善淀粉对人体血糖的影响[4]。

抗性淀粉（RS）是一种不能被胃和小肠消化吸收，但进入大肠后通过菌群发酵产生短链脂肪酸的淀粉和淀粉降解物[5−6]。高直链玉米淀粉（HA）是一种商品化的抗性淀粉，其直链淀粉（AM）含量达到 70.0%，颗粒结构密实。长链直链淀粉双螺旋可以在 100 ℃ 以上保持半结晶结构，使其具有相对较高的糊化温度[7]。因 HA 耐高温的特性，与普通淀粉相比，经高温后抗性淀粉成分保留的多，具有较高的抗消化性和较低的血糖指数[8]。因此，HA 作为一种能够延缓食物消化的功能性食品原料，已被广泛应用。

流行病学研究表明，食用全谷物食品可以预防Ⅱ型糖尿病、心血管疾病等[9]，100% 全麦面粉制作的面包已被证明是低 GI 食品，然而全麦面粉比例过多在一定程度上会影响面包的品质[10]。而 HA 具有原淀粉粒细、色白、风味淡、口感好的特点，不会引起面包色泽、质地等品质的大幅度劣变，与传统膳食纤维相比具有明显的优势[11]。将 HA 加入到 WWF 中后，当加热至 100 ℃ 时，HA 基本保持其颗粒结构，而 WWF 中的小麦淀粉（WHE）则发生糊化[12]。从 WHE 中释放的分子链与未糊化的 HA 颗粒相互作用，形成较大的聚集体，从而影响淀粉的消化率。140 ℃ 时，HA 发生糊化，游离的 AM 和支链淀粉（AP）链纠缠在一起，进一步影响复合体系的消化率[13−14]。

本研究以 HA 和 WWF 为原料，配制了含有不同比例 HA 的高直链全麦复合粉（WWF-HAG），并通过调整谷朊粉添加量使其蛋白质含量保持在 13.8%，从 100 ℃（WHE 分子-HA 颗粒相互作用）和 140 ℃（WHE 分子-HA 分子相互作用）的不同热加工条件出发，研究了该复合粉的粉质特性和在 100 ℃ 和 140 ℃ 热处理下的糊化特性、热特性、凝胶强度和抗消化性等性质，为研发低 GI 淀粉基食品提供重要的数据支持。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

高直链玉米淀粉（直链淀粉含量 71.0%）　荃银祥玉（北京）生物科技有限公司；全麦面粉（小麦淀粉含量：61.1%；蛋白质含量：13.8%）　新乡良润全谷物食品有限公司；淀粉葡萄糖苷酶（P7095，260 U/mL）、猪胰酶（P7545，8 U/mL）、瓜尔胶　美国 Sigma-Aldrich 公司；D-葡萄糖检测试剂盒（GOPOD 法）　爱尔兰 Megazyme 公司；其他试剂均为分析纯。

JSM-7610F 型 SEM　日本电子株式会社；D8Advance 型 XRD 仪　德国 Bruker 公司；RVA-4800 快速黏度分析仪　澳大利亚 Perten 仪器有限公司；CTX 质构仪　美国 Brookfield 公司；DSC-4000 差示扫描量热仪　美国 PerkinElmer 公司；Farinograph-TS 粉质仪　德国 Brabender 公司；MCR 302e 型流变仪　奥地利 Anton Paar 公司；TD-5M 型离心机　四川蜀科仪器有限公司；XMTD-704 型恒温水浴摇床　常州普天仪器制造有限公司；SCIENTZ-12N/A 真空冷冻干燥机　宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　复合粉的配制及粉质特性的测定　将 HA 和 WWF 以 WHE 含量为基础，配制 HA 比例为 0%、10%、20%、30% 和 100% 的复合粉，并添加谷朊粉使其蛋白质含量为 13.8%，分别命名为 WWF、10%HAG、20%HAG、30%HAG 和 HAG。参照杨艺[15] 的方法测定 WWF-HAG 的粉质特性。以 14.0% 含水量为基础，准确称取 300.0 g WWF-HAG，在程序开始前 20 s 加入适当质量的水，观察粉质仪的稠度变化，当其平均稠度在 500±20 FU 时，记录粉质仪测试结果。

1.2.2　复合粉成糊特性的测定　参考 Gu 等[16] 的方法并稍作修改。使用快速黏度分析仪测试 WWF-HAG 的成糊特性。制备 7.8% 干重的复合粉匀浆 27.5 g，RVA 程序为：在 50 ℃ 下平衡 1 min，以 6 ℃/min 的速率分别加热至目标温度 100 ℃ 和 140 ℃，在目标温度下保持 5 min，以同样速率冷却至 50 ℃，在 50 ℃ 保持 2 min，观察复合粉的糊化

曲线。

1.2.3 复合粉热特性的测定 使用差示扫描量热仪测试淀粉的热特性。参照 Yuan 等[12] 的方法, 在不锈钢中压液体坩埚中准确称取 10 mg 样品, 加入 3 倍质量的蒸馏水, 密封之后放入自封袋中涡旋将两者混匀, 于室温放置 2 h 至充分水合。程序设置为: 以 10 ℃/min 速率从 10 ℃ 扫描至 150 ℃, 以 20 ℃/min 速率迅速冷却至 10 ℃, 再次以 10 ℃/min 速率从 10 ℃ 扫描至 150 ℃ 观察直链淀粉-脂质复合物(ALC)的解离。使用 Pyris Manager 软件分析热转变的起始温度(T_o)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)和焓值(ΔH)。

1.2.4 复合粉凝胶的流变特性测试 参照 Shahsavani 等[17] 的方法并稍作修改。参照 1.2.2 设置 RVA 程序制备糊化凝胶, 将凝胶在室温下放置半小时之后, 使用流变仪进行测试。样品间距设为 1.0 mm, 应力设为 1%, 频率扫描范围为 1~100 rad/s。

1.2.5 复合粉凝胶的微观结构测试 通过扫描电子显微镜观察不同 HA 含量的糊化淀粉凝胶在贮藏期的表面微观形态变化。参考 Huang 等[18] 的方法, 参照 1.2.2 设置 RVA 程序制备糊化凝胶, 将淀粉凝胶冻干后固定在铝载物台上, 表面进行镀金处理后拍照, 放大倍数为 500 倍和 2000 倍。

1.2.6 复合粉凝胶的硬度测定 参照 1.2.2 设置 RVA 程序制备糊化凝胶, 将制备好的凝胶转移至圆形带盖塑料盒内(内径 35 mm)并达到约 20 mm 的高度。将容器盖上盖子并在 4 ℃ 下分别贮藏 0(常温放置 2 h)、3、7 和 14 d, 使用配备有 TA10 探头的质构仪进行测试, 测试触发力为 2 g, 测试速度为 0.5 mm/s, 压缩深度为 8 mm。记录压缩过程中测定的最大正向力作为凝胶硬度。

1.2.7 消化性的测定 将淀粉样品在 RVA 中加热, 参照 1.2.2 设置 RVA 程序, 处理后的凝胶用液氮快速冷冻, 并在冻干机中冻干 48 h, 使用研钵研磨并过 100 目筛, 得到的样品用来测试淀粉的体外消化率。采用 Englyst 等[19] 的方法并稍作修改。精确称量 25 mg 瓜尔胶和 300 mg 淀粉样品(干基), 加入 7.5 mL 蒸馏水和 2.5 mL 乙酸缓冲液[20], 将样品管置于 37 ℃ 恒温水浴摇床中平衡样品 10~15 min。加入 2.5 mL 淀粉葡萄糖苷酶和猪胰酶的混合酶, 充分涡旋, 放回水浴锅中水解淀粉。在样品反应 20 min 和 120 min 时, 分别取出 250 μL 样品, 加入到 10 mL 的 66% 乙醇溶液中, 在 3000×g 下离心 10 min, 取离心后的上清液 50 μL, 用 Megazyme D-葡萄糖检测试剂盒测定酶解 20、120 min 时释放的葡萄糖量。采用以下公式计算不同 RVA 温度下糊化的复合粉的快消化淀粉(RDS: 20 min 内消化)、慢消化淀粉(SDS: 20~120 min 消化)、抗性淀粉(RS: 120 min 内不消化)的含量和理论 SDS 与 RS 含量:

$$RDS(\%) = [(G20 - FG) \times 0.9/TS] \times 100 \quad 式(1)$$

$$SDS(\%) = [(G120 - G20) \times 0.9/TS] \times 100 \quad 式(2)$$

$$RS(\%) = [(TS - RDS - SDS)/TS] \times 100 \quad 式(3)$$

$$理论SDS = (1 - a) \times SDS_{WHE} + a \times SDS_{HAG} \quad 式(4)$$

$$理论RS = (1 - a) \times RS_{WHE} + a \times RS_{HAG} \quad 式(5)$$

式中: G20 和 G120 分别表示 20 min 和 120 min 时的葡萄糖含量; FG 表示空白对照组的葡萄糖含量; TS 表示总淀粉含量; a 为 HA 含量百分比。

1.3 数据处理

对于所有实验, 每个样品重复测定 3 次。采用 SPSS 对各项实验数据进行统计, 进行邓肯检验确定统计学显著性差异, 采用方差分析与 Duncan 多重范围检验计算均值差异的统计学意义(P<0.05), 使用 Origin 2022 作图。

2 结果与分析

2.1 高直链玉米淀粉对全麦面粉粉质特性的影响

从粉质曲线中可以得到多个粉质参数, 包括吸水率、面团形成时间、面团稳定时间和断裂时间等。吸水率为稠度达到 500 FU 时的加水量, 以占面粉质量的百分比表示; 影响吸水率的主要因素为面筋蛋白的含量和淀粉结合水的能力[21]。随着 HA 含量的增加, 面团的吸水率增大, 但其增幅未达到统计学显著性水平(P>0.05), 与 WWF 相比差异不显著。吸水率的增大归因于 HA 较高的持水力, 使复合粉在和面的过程中大量吸收水分, 造成面团吸水率的上升[22]; 同时由于 WWF 中含有较多的膳食纤维, 纤维中的羟基基团会影响氢键与水分子的相互作用, 从而影响面团的吸水能力。因此当 HA 含量从 10% 增加到 30% 时, 膳食纤维含量的下降带来的吸水率减小和 HA 含量增加使吸水率上升的叠加效果, 表现为吸水率的相对增加, 但两者的协同作用使面团的吸水率较为稳定, 无显著变化。面团形成时间为面团最大稠度达到 500 FU 时对应的时间, 与面粉的品质呈正相关关系, 随着 HA 添加量的增加, WWF-HAG 的形成时间逐渐缩短, 对于 30%HAG, 面粉的形成时间与 WWF 相比缩短了 4.3 min, 明显影响了复合粉的面粉筋力。面团的稳定时间可以反映面团耐机械搅拌的能力强弱。稳定时间较长的面团相对应的产品会具有更大的比容[22]。由表 1 可见, 添加 10% 的 HA 时, 面团的稳定时间达到最大值, 说明适当的 HA 添加量有利于面团的稳定性, 继续增加 HA 会降低面团的稳定性, 推测是由于 WWF-HAG 样品较高的吸水率, HA 可能会与面筋蛋白竞争水分, 面筋蛋白不能有效地吸附水分形成稳定的面筋网络结构[21]。适当的 HA 添加量(10%)可能由于 HA 本身较强的稳定性而增强面团的稳定时间。断裂时间指面团达到曲线峰高后降低 30 FU 的时间, 到达该值后, 继续搅拌

表 1　不同添加比例 HA 对面粉粉质参数的影响

Table 1　Effect of HA in different proportions on farinograph parameters of flour

样品	吸水率(%)	形成时间(min)	稳定时间(min)	断裂时间(min)
WWF	71.6±0.8^{a}	11.1±0.8^{a}	12.4±0.5^{ab}	17.8±1.1^{a}
10%HAG	71.8±0.3^{a}	9.0±0.1^{b}	13.1±1.8^{a}	14.7±0.9^{b}
20%HAG	72.6±0.8^{a}	7.7±0.4^{bc}	10.7±0.2^{bc}	12.0±0.6^{c}
30%HAG	73.0±0.2^{a}	6.8±0.1^{c}	8.8±0.7^{c}	9.3±0.4^{d}

注：同一列中不同字母表示差异显著（P<0.05），表2~表3同。

面团，会因过度搅拌而使面筋断裂。添加 HA 显著降低了面团的断裂时间（P<0.05），使面团更易断裂。

2.2　高直链玉米淀粉对全麦面粉成糊特性的影响

为了从不同角度了解 WWF 中 WHE 和 HA 的相互作用，在 RVA 中测试了 WWF-HAG 在 100 ℃ 和 140 ℃ 下的糊化曲线，可以模拟不同情况下（分子-颗粒和分子-分子）的黏度变化。

WWF-HAG 的糊化性能变化如图 1 所示。由于 HA 的 AM 含量高于 WWF，添加 HA 增加了 WWF-HAG 体系中的 AM 含量。直链淀粉双螺旋需要高温和能量来无序化，导致其糊化温度高于100 ℃，HA 在 100 ℃ 加热后仍保持结晶和无定形交替组成的层状结构[23]。在 100 ℃ 加热时，由于 HA 较高的糊化温度（表 2），不能充分吸收水分使淀粉颗粒膨胀，HA 仍以颗粒形态存在，游离出的淀粉分子数量有限，WWF-HAG 的糊化黏度值随着 HA 含量的增加而减小，因此，淀粉的溶胀能力与 AM 含量呈负相关[24]。糊化程度降低将有利于增加淀粉的抗消化性。

当加热温度到 140 ℃ 时，与 100 ℃ 相比，WWF 的黏度明显降低。WWF 黏度降低的主要原因是 WHE 在高温下的热降解和触变性分解。HAG 在加热后可产生标准的黏度曲线，但峰值黏度明显低于 WWF。WWF-HAG 曲线显示出两个明显的糊化峰，分别为 WHE 和 HA。随着 HA 添加量的增加，WWF-HAG 峰值黏度逐渐降低，该变化趋势与 100 ℃ 加热时的变化趋势一致。HA 出现糊化峰，这表明该类淀粉颗粒结构被破坏，大量的分子链游离出来。在 HA 添加比例为 30% 时，HA 的峰值黏度没有明显降低，这可能是由于 WWF-HAG 中足够的 HA 溶胀颗粒和游离的 WHE 分子链，溶胀的淀粉颗粒和破裂的颗粒碎片以及游离出的淀粉分子链之间

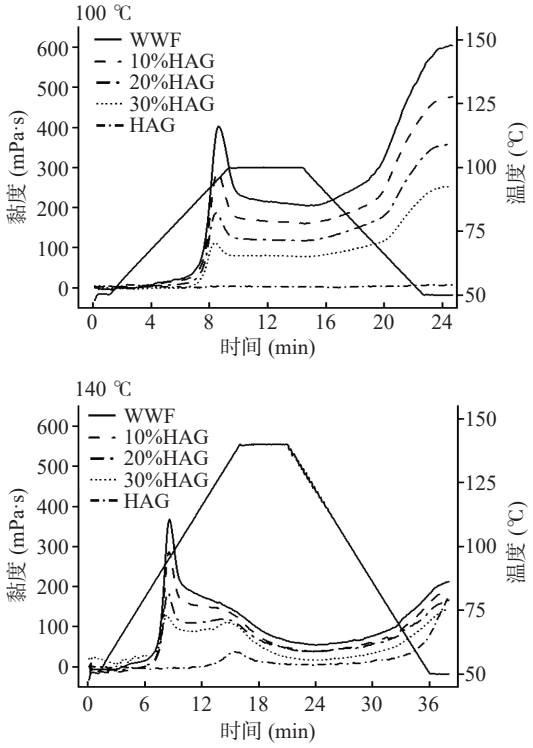


图 1　不同加热温度对不同比例复配粉糊化特性的影响

Fig.1　Effect of different heating temperatures on the pasting characteristics of different proportions of compound powders

形成的网络结构，增加了淀粉体系的黏度。

2.3　高直链玉米淀粉对全麦面粉热特性的影响

图 2 表现出不同复配粉 DSC 第一次扫描、第二次扫描的热特性。HA 的糊化温度 86.7~117.3 ℃，远高于 WWF 的糊化温度 63.7~81.3 ℃（表 2），这归因于存在于 HA 中的 AM、中间组分和较长支链的 AP 形成的长链双螺旋微晶[12]。在第一次扫描中，除 HAG 外的所有样品都具有两个峰，前者为淀粉糊化峰，后者为内源性脂质复合物的解离峰。WWF 和 WWF-HAG 的第一个峰为 WHE 的糊化峰；HAG 中的淀粉糊化峰与内源性脂质复合物的解离峰重叠，显示出一个较大的宽峰。随着 HA 添加量的增加，WHE 的糊化温度没有发生明显变化，但是焓变值逐渐降低，这是由于 WHE 含量的减少，在第一个峰出现的温度条件下，可糊化的淀粉含量变少。第一次扫描之后淀粉糊化发生，淀粉分子链游离出来，在冷却期间发生重结晶，并且也可与脂质形成 ALC[12]。第

表 2　不同复配粉的热特性参数

Table 2　Thermal properties of mixed flour in different proportions

样品	第一次扫描				第二次扫描			
	T_o (℃)	T_p (℃)	T_c (℃)	ΔH (J/g)	T_o (℃)	T_p (℃)	T_c (℃)	ΔH (J/g)
WWF	63.7±0.4^{a}	71.1±0.5^{a}	81.3±0.9^{a}	4.6±0.0^{a}	94.3±0.2^{a}	100.8±0.4^{ab}	113.5±0.4^{ab}	1.9±0.4^{b}
10%HAG	63.7±0.3^{a}	71.0±0.1^{a}	81.3±0.5^{a}	4.1±0.1^{ab}	94.2±0.1^{a}	100.7±0.3^{ab}	112.4±2.3^{b}	1.8±0.1^{b}
20%HAG	63.5±0.0^{a}	70.8±0.3^{a}	81.4±1.2^{a}	3.9±0.9^{ab}	94.0±0.1^{a}	100.4±0.5^{b}	110.8±2.2^{b}	1.9±0.4^{b}
30%HAG	63.7±0.1^{a}	70.9±0.2^{a}	81.2±0.2^{a}	3.1±0.1^{b}	93.9±0.3^{a}	100.3±0.4^{b}	110.4±0.4^{b}	2.0±0.2^{b}
HAG	86.7±2.6	102.8±0.6	117.3±0.6	11.2±1.8	91.1±2.4^{b}	101.2±0.2^{a}	116.3±0.9^{a}	3.2±0.4^{a}

注：起始温度：T_o；峰值温度：T_p；终止温度：T_c；焓值：ΔH。第一次扫描：WWF、10%HAG、20%HAG和30%HAG为小麦淀粉糊化峰，HAG为HA糊化峰和内源性脂质复合物的重叠峰；第二次扫描：直链淀粉-脂质复合物的解离峰。

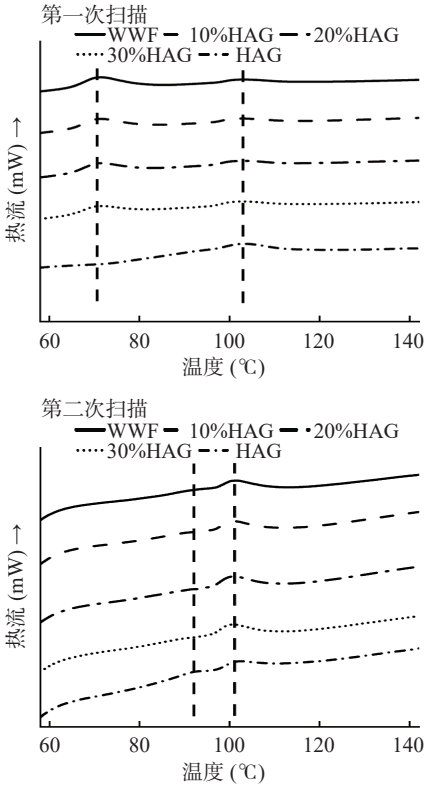


图 2 不同加热温度对不同比例复配粉热特性的影响

Fig.2 Effect of different heating temperatures on the thermal properties of different proportions of compounded powders

二次扫描出现双峰, 第一个小峰的温度低于 100℃, 为淀粉重结晶峰, 第二个峰的温度相对较高, 反映的是 ALC 的解离情况[12,16]。由表 2 可以看出, WWF 与 HAG 中都含有 ALC, WWF 和 HAG 的焓值分别为 1.9 和 3.2 J/g, HA 中的 ALC 含量更高, 但是 WWF 中 ALC 的解离起始温度更高。添加 HA 后, WWF-HAG 中的 ALC 的含量并没有发生显著变化, 表明在 WWF-HAG 中, AM 更易与同为淀粉分子的 AP 相互缠绕作用, 从而减少了可与脂质复合的 AM 的含量。

2.4 高直链玉米淀粉对全麦面粉凝胶流变特性的影响

储能模量(G')表示每个变形循环中样品存储或回收的能量, 反映淀粉凝胶弹性; 损耗模量(G")表示每个变形循环中样品耗尽或损失的能量, 反映淀粉凝胶黏性[23]。热加工后得到复配淀粉凝胶的 G'和 G"见图 3。随着角频率从 1 rad·s^{-1} 增加至 100 rad·s^{-1}, 所有 WWF-HAG 凝胶的 G'和 G"均呈现出增加的趋势, 且 G'基本大于 G", 展示出高分子凝胶行为[25]。随着 HA 添加量的增加, 凝胶的 G'和 G"在不同的温度下表现出不同的变化趋势, 表明糊化温度会对 WWF-HAG 凝胶的黏弹性产生明显影响。在 100 ℃ 加热时, 由于 HA 未糊化, WWF-HAG 体系的水合能力减弱, 因此随着 HA 添加量的增加复合体系的 G'和 G"整体呈现出下降的趋势。但在 140 ℃ 加热时, 淀粉糊化程度增加, HA 由于本身较高的 AM 含量, HA 糊化后释放出的淀粉分子链可以填充在凝胶

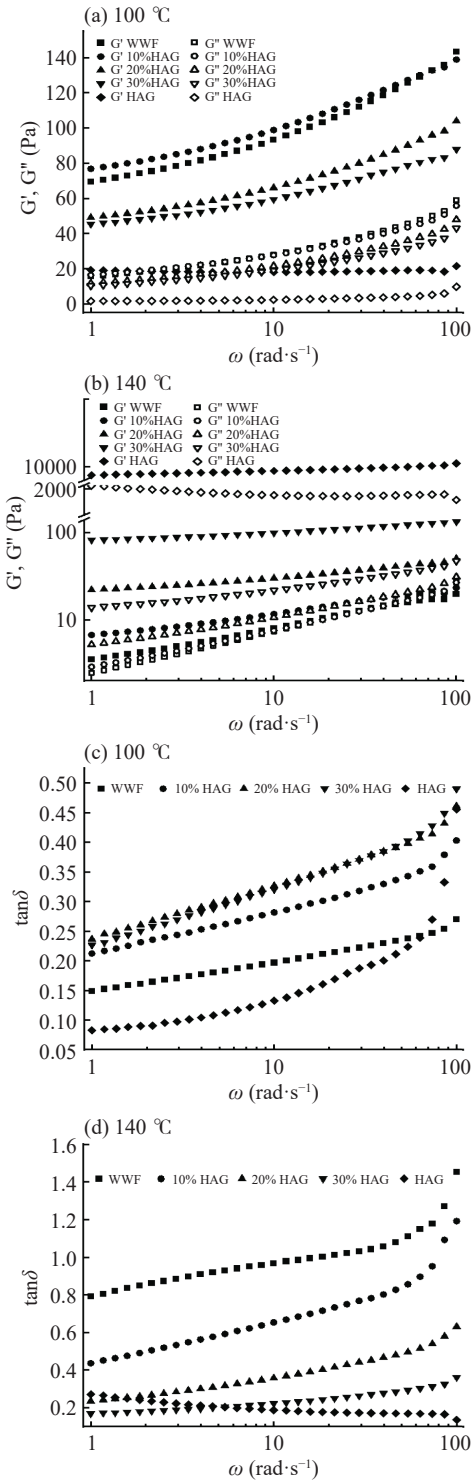


图 3 不同加热温度对不同比例复配粉流变特性的影响

Fig.3 Effect of different heating temperatures on the rheological properties of different proportions of compounded powders

网络结构中形成更坚固的凝胶, 两类淀粉之间的相互作用增强, 从而表现出随着 HA 添加量的增加 G'和 G"升高的现象。

tan δ(损耗因子)是 G"与 G'的比值, 该比值越大表明淀粉凝胶体系的流动性越强, 反之凝胶体系的刚性越强[26]。在 100 ℃ 加热时, WWF-HAG 的 tan δ 随着 HA 添加比例的增加而增加, 表明复合凝胶的流动性越来越强。添加量为 20% 和 30% 时, tan δ

变化不大，这表明在 20% 的添加量下，WWF 和 HA 的流动性到达一个基本的平衡点，不会继续降低凝胶的刚性。在 140 ℃ 加热时，WWF-HAG 的 tan δ 随着 HA 添加比例的增加而减小，表明复合体系的刚性越来越强。由 140 ℃ 的 RVA 糊化曲线可以看出 HAG 具有更明显的回生趋势（较大的回生斜率），因此在 140 ℃ 条件下添加 HA 会显著增加样品的刚性。

2.5　高直链玉米淀粉对全麦面粉微观结构的影响

通过扫描电子显微镜观察不同 HA 含量的复合粉糊化凝胶在贮藏期的表面微观形态变化。如图 4 所示，随着贮藏期的增长，凝胶开始变得破碎，网络结构变得混乱，孔洞内壁变薄，呈现更不均匀的凝胶网络结构。这是因为在回生过程中，凝胶持水能力的降低，导致出现凝胶收缩的现象，形成更加无序的凝胶结构[27]，复合淀粉凝胶的形貌均匀性降低。在

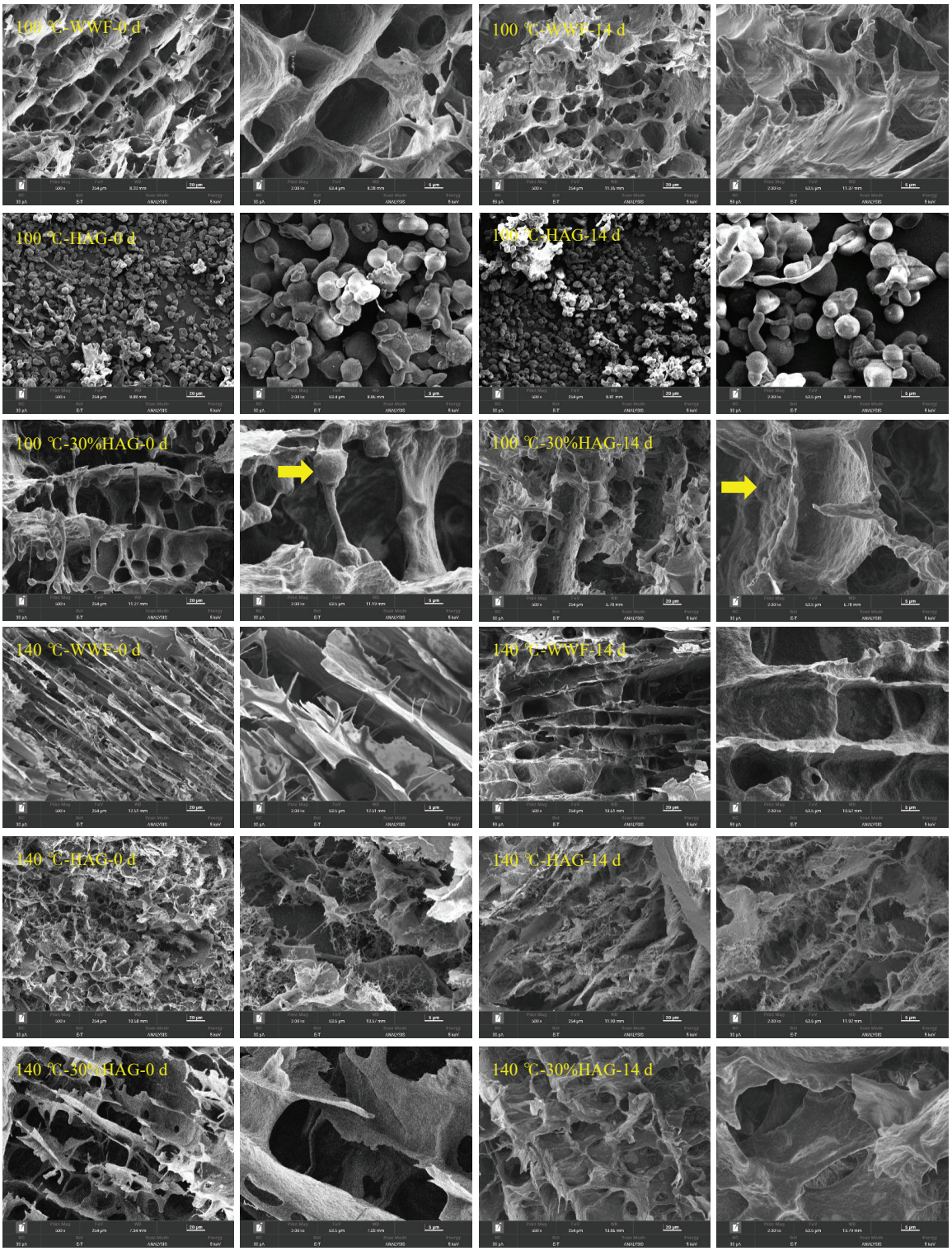


图 4　不同加热温度对不同复配粉微观结构的影响

Fig.4　Effect of different heating temperatures on the microscopic structure of different proportions of compounded powders

100 ℃ 时, WWF 中的 WHE 完全糊化, 充分溶胀之后的 WHE 在冷却后能够形成凝胶网络结构增加凝胶强度, 而未糊化的 HA 的淀粉颗粒填充在孔洞之中, 可以进一步增加凝胶强度[28]。在 140 ℃ 时, 由于 HA 充分糊化, 溶胀的淀粉颗粒消失, AM 的进一步增加将产生具有更紧密间隔的连接区和更紧密网络的凝胶, 存在更高程度的 AM 聚集。

2.6 高直链玉米淀粉对全麦面粉凝胶硬度的影响

复配体系的淀粉回生表现为 AM 的重结晶和较弱的 AP 的回生。如图 5 所示, 在 100 ℃ 时, WWF-HAG 的胶凝能力较弱的原因是 HA 的糊化程度较低, 100 ℃ 加热后因 T_c 较高而膨胀能力有限(表 2), 不能形成坚固的凝胶网络, 而含有较高 AP 含量的 WHE 较难回生[28], 因此随着 HA 添加量的增加, 凝胶硬度会降低。在 HA 添加量为 20% 和 30% 时, 凝胶的硬度并无显著差异, 这与流变的 tan δ 变化相对应。在贮藏期为 3 d 和 7 d 时, 凝胶的硬度没有随着 HA 添加量的增加而有规律的降低, 这是由于淀粉在贮藏期时发生回生, 形成凝胶网络结构时淀粉颗粒会填充在凝胶网络中而使结构更加紧实。因此, 在 WWF-HAG 中, HA 的增加使可糊化的淀粉减少, 从而使凝胶的硬度降低, 但是, 在贮藏期, 由于淀粉回生现象的发生, 颗粒的存在会相对地增强凝胶硬度。

与 100 ℃ 加热后形成的凝胶相比, WWF 的凝胶硬度在 140 ℃ 加热后降低, 这是由于 WWF 中的 WHE 淀粉颗粒/残余物对更苛刻的蒸煮条件的耐受性较差[29], 较长的蒸煮时间和在高压下施加的剪切导致颗粒崩解而引起触变性, 并且较高的加热温度可能导致热降解并降低淀粉的分子量[30]。在 140 ℃ 时, 凝胶硬度随着 HA 的增加而增大, 因为在该温度下 HA 可以充分糊化, 随着添加量的增加, 有更多的游离 AM 可用于凝胶网络的形成, 出现更高程度的淀粉分子链的聚集回生[14]。随着贮藏期的增长, 由于快速的 AM 回生和缓慢的 AP 重结晶, 使凝胶的硬度增加。

在 100 ℃ 和 140 ℃ 时, 发现贮藏 3 d 的 HAG 凝胶硬度明显高于其他贮藏期。由于淀粉回生, 理论上来说 HAG 会随着贮藏期的增加, 硬度也随之增加[31]。但是由于 HAG 中谷朊粉的存在, 使 HAG 的混合粉体系具有一定量的蛋白质, 有研究发现, 蛋白质与淀粉的混合物在贮藏一周后, 弱结合水的峰基本不变[32], 表明在长期的贮藏过程中可能不会发生高 AM 的淀粉的聚集, 蛋白质的空间位阻减少了淀粉链间分子结合和氢键形成, 影响了淀粉的回生。

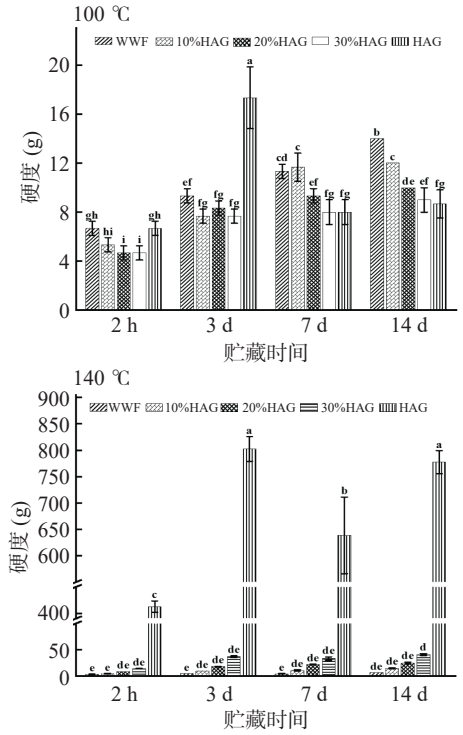


图 5 不同加热温度对不同比例复配粉凝胶强度的影响

Fig.5 Effect of different heating temperatures on the gel hardness of different proportions of compounded powders

注: 图中不同字母表示差异显著(P<0.05)。

2.7 高直链玉米淀粉对全麦面粉抗消化性的影响

如表 3 所示, 在 100 ℃ 和 140 ℃ 的温度下加热后, HAG 中的 RS 含量分别为 37.9% 和 37.8%, 而 WWF 只含有 19.8% 和 24.9% 的 RS。除 140 ℃ 下处理的 30%HAG 外, 随着 HA 添加比例的增加, 复配体系的 RDS 含量逐渐减少。此外, WWF-HAG 中的 RS 和 SDS 比例之和大于基于单独淀粉消化结果计算的理论预期值(表 3)。该结果说明, 一方面 HA 由于本身耐消化进而降低复配体系的淀粉消化性, 另一方面淀粉之间的相互作用能够进一步降低消化性。

在 100 ℃ 时, 由于 HA 不能充分糊化, 仍能保持大部分稳定的双螺旋结晶。HA 可以保持较为完整

表 3 不同比例复配粉在不同温度下糊化后的 RDS、SDS 和 RS 含量

Table 3 RDS, SDS, and RS content of different proportions of compounded powders after pasting at different temperatures

样品	100 ℃					140 ℃				
	RDS(%)	SDS(%)	RS(%)	实际SDS+RS(%)	理论SDS+RS(%)	RDS(%)	SDS(%)	RS(%)	实际SDS+RS(%)	理论SDS+RS(%)
WWF	63.3±0.6^{a}	16.9±2.7^{ab}	19.8±2.1^{b}	36.7	36.7	72.7±1.1^{a}	2.4±0.3^{b}	24.9±1.4^{b}	27.3	27.3
10%HAG	61.4±0.8^{b}	19.1±4.1^{ab}	19.5±3.3^{b}	38.6	38.1	66.1±0.3^{b}	8.9±1.4^{ab}	25.0±1.8^{b}	33.9	29.8
20%HAG	60.1±0.7^{bc}	18.0±0.9^{ab}	21.9±1.6^{b}	39.9	39.5	61.3±0.4^{c}	13.4±4.4^{a}	25.3±4.0^{b}	38.7	32.3
30%HAG	58.9±0.2^{c}	22.7±5.5^{a}	18.4±5.8^{b}	41.1	40.9	63.1±1.9^{c}	18.5±7.5^{a}	18.4±9.4^{b}	36.9	34.8
HAG	49.4±0.2^{d}	12.7±1.5^{b}	37.9±1.7^{a}	50.6	50.6	47.6±0.8^{d}	14.6±0.9^{a}	37.8±1.7^{a}	52.4	52.4

注: RDS: 快消化淀粉; SDS: 慢消化淀粉; RS: 抗性淀粉。理论SDS和RS之和为实验计算值。

的溶胀颗粒结构，WWF 中的 WHE 游离出来的淀粉链与 HA 的溶胀颗粒发生相互作用，在冷却过程中形成复合凝胶结构，进而降低了淀粉的消化性。

在 140 ℃ 时加热样品，HA 可以完全糊化，淀粉颗粒吸热膨胀破裂，淀粉链游离出来，游离出的淀粉链可以在冷却过程中相互缠绕形成凝胶。与 100 ℃ 相比，在 140 ℃ 时加热后 WWF 的 RDS 增加，这是由于 WWF 中的 WHE 的淀粉颗粒/凝胶对更苛刻的蒸煮条件的抵抗力较差，在更高温度加热时，对淀粉破坏更为严重，增加了淀粉的消化性，这也与 WWF 在 0 d 的质构结果相对应；即在 140 ℃ 下处理的 WWF 的硬度小于 100 ℃ 处理的硬度。添加 HA 后，WWF-HAG 的抗消化性增强，且所有 WWF-HAG 样品的 SDS 和 RS 之和都大于理论值。线性分子具有更好的分子流动性，AM 的缠结和相互作用比分子量相似的 AP 更强[33]。因此当在 WWF 中添加 HA 时，增加的 AM 分子具有更好的分子流动性，可以相互渗透 AP 分子，造成分子缠结，有利于样品形成凝胶，且由于分子间加强的相互作用而形成更强的凝胶。

3　结论

本研究通过 RVA、DSC、XRD、SEM 和体外消化等研究了高直链玉米淀粉与全麦面粉的复合粉的糊化特性、凝胶硬度以及消化特性等。添加高直链玉米淀粉增加了面团的吸水率，缩短了面团形成时间。在 100 ℃ 的加热条件下，HA 仍以颗粒形式存在，其颗粒在 WHE 形成的凝胶网络结构中分散，进而使结构更加紧实。而在 140 ℃ 下加热时，HA 和 WHE 都完全糊化，糊化后的两种淀粉都以分子形态存在。DSC 的二次扫描发现，ALC 的含量并没有显著提高，这是因为外源性添加的更多 AM 促进了淀粉分子链之间的相互缠结，进一步降低了淀粉的消化率。本研究揭示了在 WWF 中加入 HA 后，经过两种不同温度的热加工后都可有效降低淀粉消化率，为开发具有降血糖效果的低 GI 淀粉基食品提供了新的思路。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] KUMAR A, GANGWAR R, AHMAD ZARGAR A, et al. Prevalence of diabetes in India: A review of IDF diabetes atlas 10th edition[J]. Current Diabetes Reviews, 2024, 20(1): e130423215752.

[2] 张淑仪, 许祥, 张林华, 等. 高直链玉米淀粉添加对挤压荞麦面条结构、蒸煮品质及消化特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 116−124. [ZHANG Shuyi, XU Xiang, ZHANG Linhua, et al. Effect of high amylose corn starch on the structure, cooking quality and starch digestibility of extruded buckwheat noodles[J]. Food Science, 2023, 44(6): 116−124.]

[3] GÓMEZ M, GUTKOSKI L C, BRAVO-NÚÑEZ Á. Understanding whole-wheat flour and its effect in breads: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(6): 3241−3265.

[4] 金树人, 黄继红. 中国小麦淀粉生产的发展与前景[J]. 广西轻工业, 2005, 21(4): 5−8,4. [JIN Shuren, HUANG Jihong. The development and future of wheat starch production in China[J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2005, 21(4): 5−8,4.]

[5] 高雪丽, 赵丹, 李光辉, 等. 添加抗性淀粉对红薯粉条理化性能及结构的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 114−120. [GAO Xueli, ZHAO Dan, LI Guanghui, et al. Effect of resistant starch on the physicochemical properties and structure of sweet potato starch noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 114−120.]

[6] 邵广德, 曹冶, 蒋小敏. 抗性淀粉对超重/肥胖糖尿病患者糖脂代谢的影响[J]. 名医, 2023(15): 48−50. [SHAO Guangde, CAO Ye, JIANG Xiaomin. Effect of resistant starch on glucose and lipid metabolism in overweight/obese diabetic patients[J]. Renowned Doctor, 2023(15): 48−50.]

[7] SHI Yongcheng, CAPITANI T, TRZASKO P, et al. Molecular structure of a low-amylopectin starch and other high-amylose maize starches[J]. Journal of Cereal Science, 1998, 27(3): 289−299.

[8] LI Haiteng, GIDLEY M J, DHITAL S. High-amylose starches to bridge the "fiber gap": Development, structure, and nutritional functionality[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(2): 362−379.

[9] 楚雅茹, 高楠, 楚炎沛. 我国全麦面包的市场现状[J]. 粮油科学与工程, 2024, 38(3): 20−23. [CHU Yaru, GAO Nan, CHU Yanpei. Market status of whole wheat bread in China[J]. Grain Oil Science and Engineering, 2024, 38(3): 20−23.]

[10] 侯梦雅, 郭政利, 陈媚依, 等. 不同比例全麦粉全麦面包的感官品质和稳糖效果比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 29−34. [HOU Mengya, GUO Zhengli, CHEN Meiyi, et al. Different proportions of whole wheat flour on the sensory quality and glycemic control of whole wheat bread[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 29−34.]

[11] 王凯, 马俊宇, 吴钰冰, 等. 高链玉米淀粉改善面包的品质及消化性能[J]. 现代食品科技, 2018, 34(4): 69−74,231. [WANG Kai, MA Junyu, WU Yubing, et al. Improvement of the quality and digestibility of bread using high amylose maize starch[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(4): 69−74,231.]

[12] YUAN T Z, AI Yongfeng. Pasting and gelation behaviors and *in vitro* digestibility of high-amylose maize starch blended with wheat or potato starch evaluated at different heating temperatures[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107783.

[13] LIU Guodong, JI Na, GU Zhengbiao, et al. Molecular interactions in debranched waxy starch and their effects on digestibility and hydrogel properties[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 166−172.

[14] LIU Guodong, GU Zhengbiao, HONG Yan, et al. Effects of molecular interactions in debranched high amylose starch on digestibility and hydrogel properties[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105498.

[15] 杨艺. 不溶性膳食纤维的添加对面包品质影响机制的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019. [YANG Yi. Study on the mechanism of how added insoluble deitary fiber influence bread quality[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019].

[16] GU Zhonghua, CHENG Gaomin, SHA Xianying, et al. Heat-moisture treatment of freshly harvested high-amylose maize kernels improves its starch thermal stability and enzymatic resistance[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 340: 122303.

[17] SHAHSAVANI MOJARRAD L, RAFE A. Rheological characteristics of binary composite gels of wheat flour and high amylose corn starch[J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(3): 320−327.
[18] HUANG Shiqing, CHAO Chen, YU Jinglin, et al. New insight into starch retrogradation: The effect of short-range molecular order in gelatinized starch[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106921.
[19] ENGLYST K, GOUX A, MEYNIER A, et al. Inter-laboratory validation of the starch digestibility method for determination of rapidly digestible and slowly digestible starch[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 1183−1189.
[20] 曾凯骁, 王鹏杰, 任发政, 等. 高直链玉米Ⅲ型抗性淀粉制备及其结构和特性[J]. 食品科学, 2022, 43(22): 52−59. [ZENG Kaixiao, WANG Pengjie, REN Fazheng, et al. Preparation, structure and properties of high-amylose maize type Ⅲ resistant starch [J]. Food Science, 2022, 43(22): 52−59.]
[21] 于子轩, 樊铭聪, 李言, 等. 高直链玉米淀粉与面筋蛋白比例对复合面条加工适应性的影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 61−68. [YU Zixuan, FAN Mingcong, LI Yan, et al. The impact of high amylose maize starch to gluten protein ratio on the processing adaptability of composite noodles[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 61−68.]
[22] 顾雨辰. 高直链玉米粉对面团特性及馒头品质的影响探究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [GU Y C. Study on the effect of high-amylose corn flour on dough characteristics and quality of Chinese steamed bread[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
[23] 曹正文, 胡荣, 罗盛豪, 等. 超高压处理对高直链和蜡质玉米淀粉复配体系的影响研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(17): 284−293. [CAO Zhengwen, HU Rong, LUO Shenghao, et al. Study on the effect of high hydrostatic pressure treatment on high amylose and waxy corn starch compounding systems[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(17): 284−293.]
[24] LI C L, DHITAL S, GILBERT R G, et al. High-amylose wheat starch: Structural basis for water absorption and pasting properties[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 245: 116557.
[25] 吴晓江, 肖婧楠, 李麟芳, 等. 湿热处理对藜麦淀粉流变和体外消化性质及结构的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 144−151. [WU Xiaojiang, XIAO Jingnan, LI Linfang, et al. Effect of heat moisture treatment on the rheological, *in vitro* digestive properties and structure of quinoa starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 144−151.]
[26] 王然. 直链淀粉含量对玉米淀粉-茶多酚乳液凝胶稳定性质的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 41−47. [WANG Ran. Effect of amylose content on stability of maize starch-tea polyphenol emulsion gels[J]. Food Science, 2024, 45(6): 41−47.]
[27] 巩馨. 大米蛋白对淀粉回生的影响及其应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023. [GONG Xin. Effect of rice protein on starch retrogradation and its application research[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.]
[28] WANG Xinya, LIU Siyuan, AI Yongfeng. Gelation mechanisms of granular and non-granular starches with variations in molecular structures[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 129: 107658.
[29] CHENG Fan, REN Yikai, WARKENTIN T D, et al. Heat-moisture treatment to modify structure and functionality and reduce digestibility of wrinkled and round pea starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 324: 121506.
[30] LIU Siyuan, YUAN T Z, WANG Xinya, et al. Behaviors of starches evaluated at high heating temperatures using a new model of rapid visco analyzer-RVA 4800[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 217−228.
[31] OBADI M, QI Yajing, XU Bin. High-amylose maize starch: Structure, properties, modifications and industrial applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 299: 120185.
[32] LI Wendong, SUN Shenglin, GU Zhengbiao, et al. Effect of protein on the gelatinization behavior and digestibility of corn flour with different amylose contents[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 249: 125971.
[33] McKEE M G, WILKES G L, COLBY R H, et al. Correlations of solution rheology with electrospun fiber formation of linear and branched polyesters[J]. Macromolecules, 2004, 37(5): 1760−1767.