

小麦抗性糊精的酸热法制备、表征及消化特性分析

王 昂¹, 韩四海^{1,2*}, 岳崇慧^{1,2}, 刘建学^{1,2}, 罗登林^{1,2},
李佩艳^{1,2}, 王 萍^{1,2}, 郭金英^{1,2}

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 洛阳 471023; 2. 河南省食品原料工程技术研究中心, 洛阳 471023)

摘 要: **目的** 探讨酸热法制备小麦抗性糊精的理化特征及消化特性。**方法** 以小麦淀粉为原料, 采用酸热法制备小麦抗性糊精, 对其表面结构、红外光谱、结晶性、流变学和热力学特性进行表征, 并对其体外消化特性进行探讨。**结果** 酸热处理有效地促进小麦淀粉的糊精化, 淀粉晶体结构发生改变, 淀粉颗粒形貌由规则、光滑的扁椭圆形转变为不规则致密块状。红外光谱分析表明, 小麦抗性糊精与淀粉糖苷键类型分布有所不同。小麦抗性糊精比天然小麦淀粉具有更高的起始温度($100.77^{\circ}\text{C}\pm 0.69^{\circ}\text{C}$)、峰值温度($111.86^{\circ}\text{C}\pm 0.11^{\circ}\text{C}$)、终止温度($124.77^{\circ}\text{C}\pm 0.49^{\circ}\text{C}$)和焓值($8.69^{\circ}\text{C}\pm 0.33^{\circ}\text{C}$)。小麦抗性糊精溶液(10%, *m*:*V*)流变学特性呈现典型的牛顿流体特征, 具有较好的抗剪切性。体外消化分析结果显示, 所制备小麦抗性糊精抗消化性成分含量高达98.37%。**结论** 酸热法制备的小麦抗性糊精具有良好的热转变特性、流变学稳定性和抗消化性。

关键词: 抗性糊精; 流变学特性; 消化特性

Acid-thermal preparation, characterization and digestion properties analysis of wheat resistant dextrin

WANG Ang¹, HAN Si-Hai^{1,2*}, YUE Chong-Hui^{1,2}, LIU Jian-Xue^{1,2}, LUO Deng-Lin^{1,2},
LI Pei-Yan^{1,2}, WANG Ping^{1,2}, GUO Jin-Ying^{1,2}

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2. Henan Engineering Technology Research Center of Food Raw Materials, Luoyang 471023, China)

ABSTRACT: Objective To explore the physicochemical and digestive properties of wheat resistant dextrin prepared by acid-thermal method. **Methods** The resistant dextrin was prepared from wheat starch employing acid-thermal method. Its surface structure, infrared spectrum, crystallinity, rheological and thermodynamic properties were characterized, and the *in vitro* digestion characteristics were analyzed. **Results** The acid-thermal treat could effectively promote the dextrinization of wheat starch. The crystal structure of starch changed, and the morphology of starch particles turned from regular and smooth oblate ellipsoid to irregular dense block. Infrared spectra analysis demonstrated a certain degree of difference in the distribution of glycosidic bond types between dextrin and starch. Wheat resistant dextrin had higher onset temperature ($100.77^{\circ}\text{C}\pm 0.69^{\circ}\text{C}$), peak temperature ($111.86^{\circ}\text{C}\pm 0.11^{\circ}\text{C}$),

基金项目: 河南省重大公益专项(201300110300)、小麦和玉米深加工国家工程实验室开放课题项目(NL2020001)

Fund: Supported by the Major Public Welfare Projects of Henan Province (201300110300), and the National Engineering Laboratory for Deep Processing of Wheat and Corn (NL2020001)

***通信作者:** 韩四海, 博士, 教授, 主要研究方向为食品生物化学、食品质量与安全。E-mail: hansihai@haust.edu.cn

***Corresponding author:** HAN Si-Hai, Ph.D, Professor, College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, No.243, Kaiyuan Street, Luolong District, Luoyang 471023, China. E-mail: hansihai@haust.edu.cn

conclusion temperature ($124.77^{\circ}\text{C}\pm 0.49^{\circ}\text{C}$) and enthalpy value ($8.69^{\circ}\text{C}\pm 0.33^{\circ}\text{C}$) than native wheat starch. The rheological properties of wheat resistant dextrin solution (10%, *m/V*) exhibited typical Newtonian fluid characteristics and had good shear resistance. The results of *in vitro* digestion analysis indicated that the content of resistant fraction of resulting dextrin amounted to 98.37%. **Conclusion** The wheat resistant dextrin prepared by acid-heat method has fine thermal transition properties, shear resistance, rheological stability, and digestion resistibility.

KEY WORDS: resistant dextrin; rheological properties; digestion properties

0 引言

抗性糊精, 又称焦糊精, 是一类可溶的和抗消化性的多糖, 具有低褐变、低黏度、低热量、易加工和耐储存等特点^[1]。抗性糊精可作为功能性膳食纤维, 有助于减缓餐后人体对于糖和中性脂肪的吸收, 具有降低血糖和血脂水平、调节胃肠道功能等活性^[2-5], 作为部分脂类与糖类的代替品广泛应用于各种健康食品中, 深受人们欢迎。

抗性糊精作为开发新型膳食纤维的一个重要方向, 日益受到食品领域关注。近年来, 人们已经利用玉米^[6-12]、大米^[13]、高粱^[14]、马铃薯^[15]、木薯^[16]、山药^[17]、红香母芋^[18]、绿豆^[19]、荞麦^[20]、燕麦^[21]、小麦^[22]等植物的淀粉, 制备出丰富多样的抗性糊精。制备工艺条件对抗性糊精理化性质和抗消化特性有重要影响^[10]。抗性糊精制备方法包括焙烤法^[6]、酸热法^[20]、干热三步法(预加热、加热和冷却)^[22]、酶法^[23-24]及高温酸解结合酶法^[25]等技术方法。酸热法是在酸热条件下使大分子的淀粉主链断裂分解生成焦糊精, 再经液化酶(α -淀粉酶)和糖化酶酶解, 进一步精制得到抗性糊精^[26], 该方法具有抗性糊精产量和转化率高等特点^[27], 近年来被应用于制备高质量的玉米抗性糊精^[7]、绿豆抗性糊精^[19,28]和荞麦抗性糊精^[20]。我国小麦淀粉资源丰富, 为小麦抗性糊精的开发和应用提供了良好基础。小麦淀粉具有糊化温度低和热稳定性较好等理化特性^[29], 是制备抗性糊精的优良原料。吕行等^[22]报道了“干热三步法”制备高含量小麦抗性糊精, 并对制备工艺条件进行了优化。张宏伟^[30]采用酸热法制备小麦抗性糊精, 发现小麦抗性糊精能够改善排便, 降低大鼠体内脂肪。然而, 有关小麦抗性糊精的热力学特性、流变学特性及消化特性的研究, 目前仍鲜有报道。

本研究以小麦淀粉为原料, 采用高温酸热法制备了小麦抗性糊精, 并对其微观结构、红外光谱、结晶性、热力学、流变学特性及体外消化特性进行了探讨, 以期对小麦抗性糊精的生产加工和应用提供参考, 提高小麦抗性糊精在食品行业的开发潜力。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小麦淀粉(纯度 95%, 无添加, 河南新乡良润全谷物食品有限公司); α -淀粉酶(4000 U/g)、糖化酶(100 U/mg)、 α -淀粉酶(猪胰腺、10 U/mg)、GOD-POD 葡萄糖检测试剂盒(上海

源叶生物科技有限公司); 溴化钾(光谱纯)、盐酸、氢氧化钠、无水乙醇(分析纯)(天津市科密欧化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

TM3030Plus 扫描电子显微镜(日本日立高新技术公司); DSC1 差示扫描量热仪(瑞士 METTLER-TOLEDO 公司); VERTEX70 傅立叶变换红外光谱仪(德国 BRUKER 公司); TA DHR-2 食品流变仪(美国沃特斯公司); D8 ADVANCE X 射线衍射仪(德国布鲁克公司); UV-2600 紫外可见分光光度计(日本 Shimadzu 公司); DXY-5SH 油浴锅(深圳鼎鑫宜实验设备有限公司); LGJ-10D 冷冻干燥机(北京四环科学仪器厂); DH360BS 电热恒温鼓风干燥箱(上海坤天实验仪器有限公司); THZ-82A 恒温振荡器(常州朗越仪器制造有限公司); ES500 电子天平(感量 0.001 g, 昆山巨天仪器设备有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 抗性糊精的制备

小麦抗性糊精的制备采用酸热法, 参考文献[7-8,17]方法并作了修改和优化, 具体步骤: ①将小麦淀粉放置在恒温干燥箱中 60°C 烘干 48 h, 称取烘干后的淀粉 50 g, 喷淋 1% HCl 溶液 5 mL, 喷淋 1% 柠檬酸溶液 2 mL, 充分搅拌, 振荡混合均匀, 60°C 干燥 24 h; ②把样品置于 170°C 油浴加热 80 min, 冷却至室温, 加入 200 mL 蒸馏水搅拌均匀, 用 0.1 mol/L NaOH 溶液调节 pH 至 6.0, 加入浓度为 10% (*m/V*) 的耐高温 α -淀粉酶水溶液 2.5 mL, 于 95°C 酶解 2 h; ③用 0.1 mol/L 盐酸溶液调节 pH 至 4.5, 加入浓度为 10% (*m/V*) 的糖化酶液 2.5 mL, 于 60°C 酶解 2 h, 然后 100°C 灭活 0.5 h; ④水浴冷却至室温, 4000 r/min 离心 15 min, 取上清, 80°C 水浴加热浓缩至 50 mL, 加入 200 mL 无水乙醇沉淀 2 h, 重复 2 次, 得到醇沉抗性糊精; ⑤将醇沉抗性糊精于 -20°C 冷冻 24 h, 真空冷冻干燥得到小麦抗性糊精产品, 研磨后过 150 目筛, 密封保存于阴凉干燥处。

1.3.2 电镜观察

用导电胶带将适量待测样品固定在样品台上, 喷金涂覆 10 nm 金镀层, 放入电镜样品室中, 真空条件下, 加速电压 15 kV, 在 500 和 2000 的放大倍率观察小麦淀粉和小麦抗性糊精的表面结构。

1.3.3 X 射线衍射分析

将待测样品置于玻璃板上, X 射线衍射在管电压 40 kV、管电流 30 mA 条件下工作, Cu 靶 K- α 射线, 扫描范围

5°~50° (2 θ), 扫描步长 0.02°, 0.2 步/s, 用 X 射线衍射仪导出相应曲线。

1.3.4 红外光谱测定

将小麦淀粉及小麦抗性糊精待测样品与溴化钾在 60°C 恒温干燥箱中干燥 24 h, 准确称取 3 mg 待测样品与 300 mg 溴化钾混合, 充分研磨后, 用压片机(15~20 MPa)压制透明的样品薄片, 置于傅立叶红外光谱仪, 扫描 64 次, 分辨率 4 cm⁻¹, 测定 4000~400 cm⁻¹ 红外吸收光谱。

1.3.5 热转变特性分析

采用差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter, DSC)分析小麦抗性糊精的热转变特性。待测样品加入去离子水(*m* 待测样品:*m* 水=1:2), 称取 10 mg 样品加入微坩埚中, 加盖密封, 放置于差示扫描量热仪样品台, 以空坩埚作为对照, 惰性气体为 N₂, 流速 100 mL/min, 以 10°C/min 的速率升温, 温度从 30~150°C。分别测定起始温度(*T*₀)、峰值温度(*T*_p)、终止温度(*T*_e)及焓值(ΔH)的变化。

1.3.6 流变学分析

(1) 稳态流变分析

将抗性糊精配制成 10% (*m*:*V*)的抗性糊精-水溶液, 小麦淀粉配制成 10% (*m*:*V*)的淀粉-水溶液, 沸水浴糊化 15 min, 迅速冷却至室温, 在食品流变仪上进行稳态流变检测, 选用 40 mm 平板, 工作间隙为 1 mm, 轻质硅油密封, 初始温度 25°C, 剪切速率 0.1~100 s⁻¹。

(2) 动态流变分析

将 10% (*m*:*V*)淀粉-水溶液沸水浴糊化 15 min 后, 冷却至室温, 分别与 10% (*m*:*V*)的抗性糊精-水溶液进行动态频率检测, 应变为 1%, 范围 0.1~10.0 Hz。记录储能模量(*G'*)与损耗模量(*G''*)的变化。

1.3.7 体外消化性分析

称取 725 mg 猪胰腺 α -淀粉酶与 125 mg 糖化酶, 加入 25 mL 醋酸钠缓冲液(0.5 mol/L, pH 5.2), 搅拌 20 min, 在 4000 r/min 离心 5 min, 收集上清液。精确称取 200 mg 待测样品置于三角锥形瓶中, 添加 20 mL 醋酸钠缓冲液(pH 5.2、0.2 mol/L), 100°C 糊化 0.5 h, 水浴冷却至 37°C, 添加 5 mL 混合酶液振荡酶解(37°C、190 r/min), 分别在 0、20、60、90、120、180 min 时移取 0.5 mL 样品水解液, 加入 4.5 mL 无水乙醇灭酶, 用葡萄糖检测试剂盒(GOD-POD 比色法)在 505 nm 处测定葡萄糖含量, 计算水解率(hydrolysis rate, HR); 易消化组分(readily digestible fraction, RDF)含量; 慢消化组分(slowly digestible fraction, SDF)含量; 抗消化组分(resistant fraction, RF)含量, 相关计算公式如(1)~(4):

$$\text{HR}/\% = \frac{(G_t - G_0) \times 0.9}{M} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{RDR}/\% = \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{M} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{SDR}/\% = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{M} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{RF}/\% = (1 - \text{RDF} - \text{SDF}) \times 100\% \quad (4)$$

式中: *G*_t, 不同时间葡萄糖含量(mg); *G*₀、*G*₂₀、*G*₁₂₀ 依次为 0、20、120 min 葡萄糖含量(mg); *M*, 样品总质量(mg)。

1.4 数据处理

采用 SPSS 27.0 软件对数据处理与分析, 所有实验数据均为 3 次平行实验的平均值, 以平均值或平均值±标准偏差表示。Origin 2021 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 微观结构分析

利用扫描电镜对小麦淀粉和小麦抗性糊精颗粒的尺寸和表面形貌进行了比较(图 1)。小麦淀粉颗粒自然形态为单分散椭圆形颗粒(图 1A、C), 其中包括大小两种类型, A 型颗粒结构较大, 主要为扁平状、椭圆状, 表面光滑; B 型颗粒结构较小, 其颗粒更圆, 更丰满。小麦抗性糊精(图 1B、D)为致密的不规则碎块, 失去小麦淀粉的晶体结构。在酸热处理过程中, 盐酸和柠檬酸作为催化剂, 催化淀粉降解成更多的小分子, 这些小分子在高温下发生转糖苷和再聚合反应, 形成 α -1,2 和 α -1,3 糖苷键, 部分还原端上有分子内脱水形成的缩葡聚糖和 β -1,6 糖苷键结构^[7]。这些新糖苷键的生成, 不仅改变了淀粉的晶体形态, 还使抗性糊精具有抗消化酶能力。本研究结果与“干热三步法”^[22]制备的小麦抗性糊精微观结构存在差异, 后者掺杂较多椭圆形颗粒结构, 部分颗粒还保留着原淀粉晶体结构形状, 可能是由于“干热三步法”处理过程中变性不彻底, 而本研究中, 小麦抗性糊精为质地均匀的致密结构, 基质成分为较短葡萄糖链和缩葡聚糖的聚合物^[7]。

2.2 X 射线衍射分析

为了进一步探讨小麦淀粉糊精化过程中晶体结构的变化, 分别对小麦淀粉和小麦抗性糊精进行了 X 射线衍射分析。如图 2 所示, 小麦淀粉具有典型的谷物淀粉 A 型晶体结构^[31], 衍射曲线在 15.02°、17.63°及 23.18°附近出现衍射峰, 相对结晶度为 22%; 小麦抗性糊精的衍射曲线在 20°附近出现非晶态衍射峰, 峰型较宽, 这是由于酸-热处理使淀粉长直链降解, 高温下发生转葡糖苷化和再聚合作用, 淀粉颗粒失去周期性层状结构, 有序的晶体结构被破坏^[16,32], 这与扫描电镜观察到的结果一致。

2.3 红外光谱分析

小麦淀粉和小麦抗性糊精的红外光谱如图 3 所示。抗性糊精红外光谱在波数 3370 cm⁻¹(对应于小麦淀粉 3396 cm⁻¹和 2931 cm⁻¹)为 O-H 键伸缩振动峰^[19], 与小麦淀粉相比, 抗性糊精 O-H 吸收峰较强并有一定的红移, 表明小麦抗性糊精具有较强的亲水性。2927 cm⁻¹为 C-H 键的伸缩振动吸收峰, 1150 cm⁻¹和 1027 cm⁻¹分别为 C-O-C 的弯曲振动峰和 C-O 的对称振动吸收峰, 1027 cm⁻¹(对应于小麦淀粉 1027 cm⁻¹)与无定形结构有关^[33], 小麦抗性糊精 1027 cm⁻¹特征峰积分面积相较于小麦淀粉有所增大, 意味着淀粉的部分长链

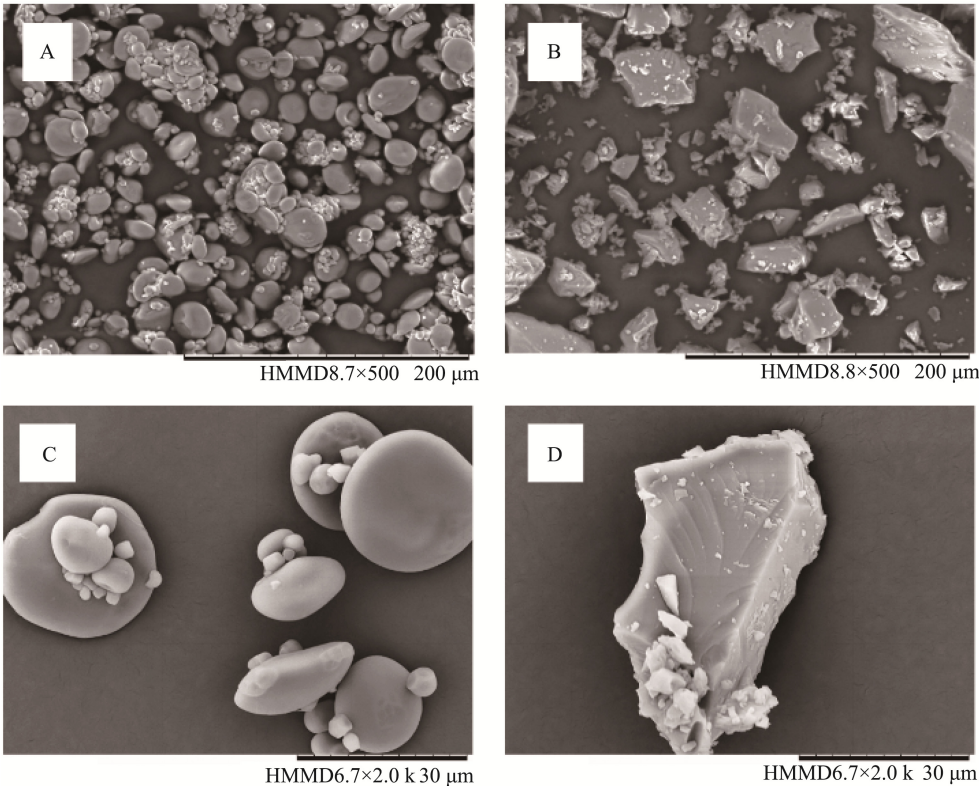


图 1 小麦淀粉(A、C)与小麦抗性糊精(B、D)扫描电镜图
Fig.1 Scanning electron microscopy of wheat starch (A, C) and wheat resistant dextrin (B, D)

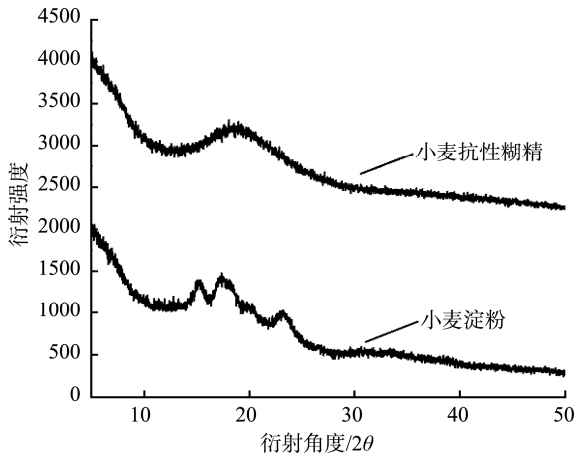


图 2 小麦淀粉和小麦抗性糊精的 X 射线衍射图
Fig.2 X-ray diffraction map of wheat starch and wheat resistant dextrin

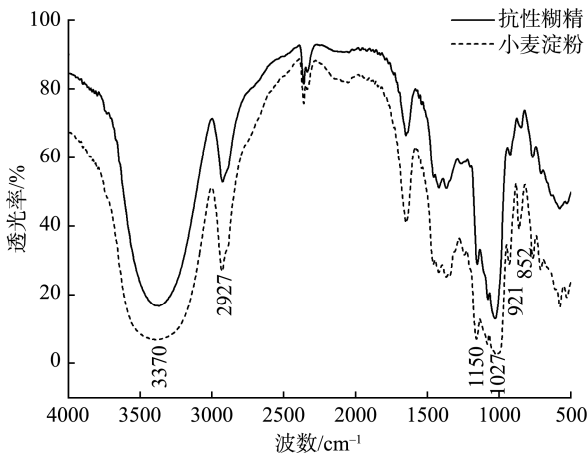


图 3 小麦淀粉和小麦抗性糊精的红外光谱
Fig.3 Infrared spectra of wheat starch and wheat resistant dextrin

有序化结构转变为无定形结构,与电镜观察结果相一致。921 cm^{-1} 和 852 cm^{-1} 特征吸收带与 α -和 β -糖苷键相关^[19],小麦抗性糊精 921 cm^{-1} 和 852 cm^{-1} 特征吸收弱于小麦淀粉,表明糖苷键类型分布产生了一定变化,可能是由于淀粉在酸热反应过程中,长直链中部分 α -1,4 糖苷键遭到破坏,发生转糖苷化和再聚合反应,可能形成了新的耐消化糖苷键^[34]。

2.4 热转变特性分析

采用差示扫描量热法对小麦抗性糊精与天然小麦淀粉的热转变特性进行了分析。如表 1 所示,小麦抗性糊精糊化的起始温度、峰值温度、终止温度和焓值[依次为(100.77±0.69)、(111.86±0.11)、(124.77±0.49)和(8.69±0.33℃)]均显著高于天然小麦淀粉的相对应的值[依次为(55.31±0.89)、(63.08±0.39)、(72.80±1.49)和(6.38±0.51℃)],意味着抗

表 1 小麦淀粉和小麦抗性糊精的热力学特性
Table 1 Thermal properties of wheat starch and wheat resistant dextrin

样品	$T_g/^{\circ}\text{C}$	$T_p/^{\circ}\text{C}$	$T_c/^{\circ}\text{C}$	$T_c-T_g/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
小麦淀粉	55.31 ± 0.89^b	63.08 ± 0.39^b	72.80 ± 1.49^b	17.49 ± 2.03^b	6.38 ± 0.51^b
小麦抗性糊精	100.77 ± 0.69^a	111.86 ± 0.11^a	124.77 ± 0.49^a	24.00 ± 1.18^a	8.69 ± 0.33^a

注：同一列中不同的小写字母上标表示存在显著差异($P<0.05$)。

性糊精糊化的热稳定性增加，而热敏性降低，启动糊化及熔化过程所需能量较多，这是由于在酸热反应中淀粉降解成小分子，这些小分子在高温下发生转糖苷和重新聚合作用，使淀粉支链结构增多^[34]。小麦抗性糊精热稳定性高于小麦淀粉的现象，与蜡质玉米抗性糊精^[11]、山药抗性糊精^[17]及蜡质大米抗性糊精^[35]等研究结果相一致。

2.5 流变学特性分析

2.5.1 静态流变学特性

静态流变学分析表明小麦淀粉和小麦抗性糊精呈现出截然不同的剪切应力/剪切速率、黏度/剪切速率特征(图 4)。小麦淀粉呈现典型的非牛顿流体性质，具有剪切变稀特点，通过 Herschel-Bulkley 模型拟合分析，相关系数 $r^2=0.997$ 。抗性糊精溶液在恒温条件下，剪切应力/剪切速率比值保持恒定，黏度随剪切速率的增大保持不变，表现出典型的牛顿流体流变学特性^[36]。相同剪切速率下小麦抗性糊精的剪切应力及黏度均小于小麦淀粉，这是由于酸热法制备时破坏了淀粉颗粒的原有形态，从高分子碳水化合物重新聚合成小分子，降低了分子链缠绕的机率，缠结点减少^[37]。小麦抗性糊精具有良好的抗剪切性能，溶液稳定性好，与许多葡聚糖如交替糖具有一定相似，这些特性可以很好的应用到饮料工业中^[38-39]。

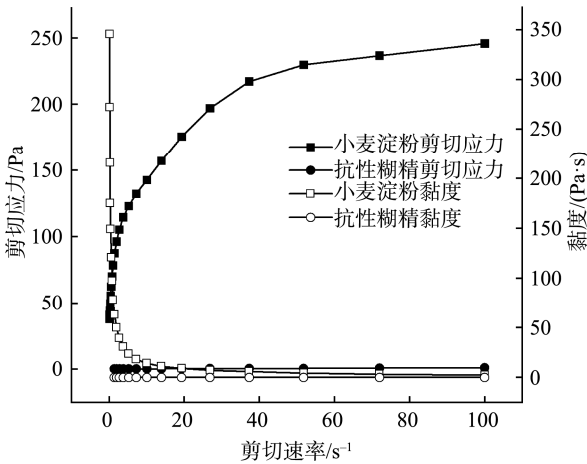


图 4 小麦淀粉及小麦抗性糊精静态流变曲线
Fig.4 Static rheological curves of wheat starch and wheat resistant dextrin

2.5.2 动态流变

小麦淀粉弹性模量(储能模量) G' 和黏性模量(损耗模量) G'' 随角频率的增加呈现上升的趋势，小麦抗性糊精 G'

和 G'' 则相对稳定(图 5)。小麦淀粉的 G' 始终高于 G'' ，表明在频率范围内小麦淀粉表现出弱凝胶的弹性行为，淀粉在糊化和回生过程中会形成三维网络结构表现出凝胶特性，呈现黏弹性固体特征^[40]。 G' 和 G'' 数据的变化，与直链淀粉和支链淀粉的状态变化有关^[37]，抗性糊精的 G' 和 G'' 均低于小麦淀粉，这是因为抗性糊精的溶解度较高，且高度支化的短链分子不易形成稳定的缠结区，三维网络结构的交联减小。

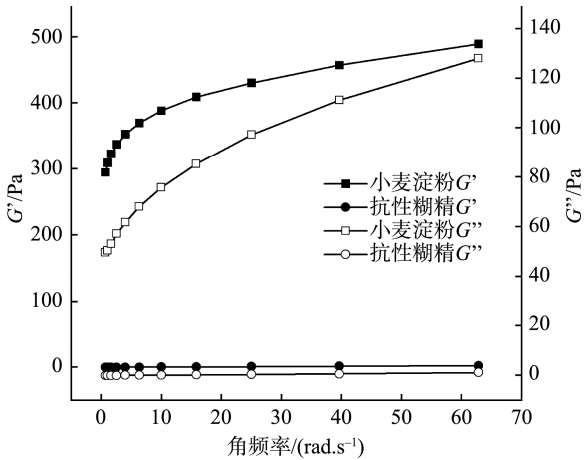


图 5 小麦淀粉及小麦抗性糊精动态流变曲线
Fig.5 Dynamic rheological curves of wheat starch and wheat resistant dextrin

2.6 体外消化

利用 α -淀粉酶与糖化酶对比分析测定了小麦抗性糊精和小麦淀粉的体外消化率。小麦淀粉的水解率随时间的增加而增加，呈矩形双曲线型，小麦抗性糊精的水解率呈现平缓趋势，表明小麦抗性糊精具有较强的消化性(图 6A)。小麦淀粉 RF 含量为 23.00%，可消化淀粉含量为 77.00%，其中 RDF 和 SDF 含量分别为 27.84%和 49.16%；而小麦抗性糊精的 RF 含量高达 98.37%，RDF 和 SDF 含量仅为 0.65%和 0.98%(图 6B)。小麦抗性糊精的 RF 含量增高的机制为酸热处理使小麦淀粉的 α -1,4 和 α -1,6 糖苷键断裂，小麦抗性糊精中 RDF 和 SDF 比例降低而 RF 比例明显增加现象，与之前的报道^[41-42]一致。糊精化过程中，通过转苷作用形成 $\alpha(\beta)$ -1,2 和 $\alpha(\beta)$ -1,6 的耐消化糖苷键，形成高度支化的葡聚糖，是消化酶抵抗力的主要来源^[19,43]。小麦抗性糊精的抗消化特性，符合膳食纤维的功能特性，有利于降低餐后血糖和维持胰岛素水平^[44]，有望成为一种优良的新型膳食纤维来源。

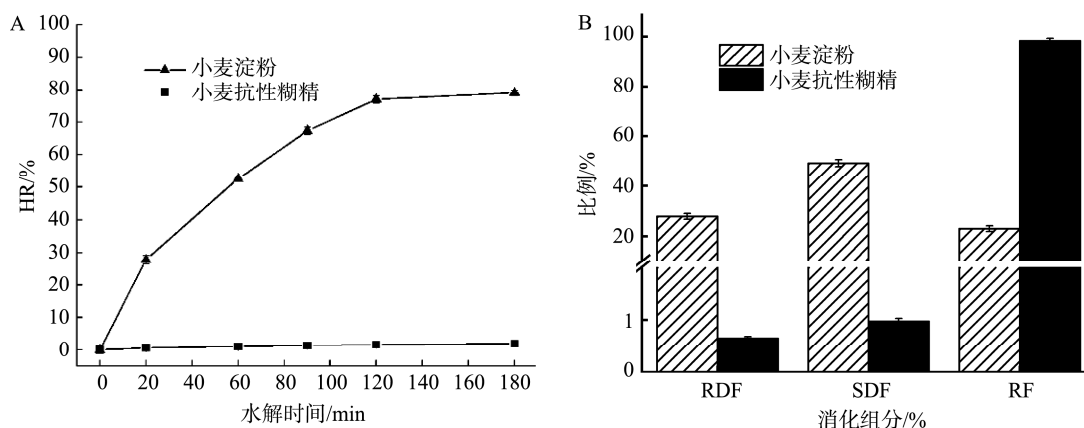


图6 小麦淀粉与小麦抗性糊精水解速率(A)及体外消化组分(B)

Fig.6 Hydrolysis rates of wheat starch and wheat resistant dextrin (A) and *in vitro* digestion fractions (B)

3 结 论

本研究采用酸热法制备了高含量的小麦抗性糊精, 并对其进行了电镜观察、红外光谱分析、X 射线衍射分析、流变学测定和体外抗消化分析。在酸热(盐酸+柠檬酸, 170℃)条件下小麦淀粉糊精化较为彻底, 淀粉颗粒形貌由规则、光滑的扁椭球形转变为不规则致密块状, 淀粉晶体结构消失, 耐消化糖苷键及高度支链结构生成。小麦抗性糊精比天然小麦淀粉具有更高的热转变温度(T_0 、 T_p 和 T_c)和 ΔH , 显示较好的热稳定性。流变学分析表明, 糊精溶液呈现典型的牛顿流体特性, 具有良好的抗剪切性和流变学稳定性。体外消化分析结果显示, 小麦抗性糊精对 α -淀粉酶与糖化酶具有较强的抵抗性, 抗消化性成分含量高达 98.37%, 远高于小麦淀粉中抗性组分含量(23.00%)。小麦抗性糊精具有良好的流变学特性、水溶性、热稳定性和较强的抗消化性, 可作为优良的膳食纤维原料, 应用于饮料、糖果、巧克力、乳品、肉制品、面制品、低热量糕点等食品^[45-47], 以满足人们日益增长的对健康饮食的需求。

参考文献

- [1] LI ZR, LIU Y, HUANG YH, *et al.* Identification of the key structure, preparation conditions and properties of resistant dextrin for indigestibility based on simulated gastrointestinal conditions [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2022, 57(11): 7233–7244.
- [2] WANG SL, ZHANG SY, HUANG SM, *et al.* Resistant maltodextrin alleviates dextran sulfate sodium-induced intestinal inflammatory injury by increasing butyric acid to inhibit proinflammatory cytokine levels [J]. *Bio Med Res Int*, 2020, (2020): 1–9.
- [3] HOB DEN MR, COMM ANE DM, GUERIN-DEREM AU X L, *et al.* Impact of dietary supplementation with resistant dextrin (NUTRIOSE®) on satiety, glycaemia, and related endpoints, in healthy adults [J]. *Eur J Nutr*, 2021, 60(8): 4645–4645.
- [4] 刘娜, 魏霞, 苏昕宇, 等. 抗性糊精的减肥通便作用评价[J]. *食品与药*

品, 2019, 21(5): 376–380.

- LIU N, WEI X, SU XY, *et al.* Evaluation of weight reducing and laxative effect of resistant dextrin [J]. *Food Drugs*, 2019, 21(5): 376–380.
- [5] YE Z, ARUMUGAM V, HAUGABROOKS E, *et al.* Soluble dietary fiber (fibersol-2) decreased hunger and increased satiety hormones in humans when ingested with a meal [J]. *Nutr Res*, 2015, 35(5): 393–400.
- [6] 张新武, 朱博博, 黄继红, 等. 抗性糊精的焙烤制备工艺技术研究[J]. *农产品加工*, 2018, (11): 33–36.
- ZHANG XW, ZHU BB, HUANG JH, *et al.* Study on baking preparation technology of resistant dextrin [J]. *Farm Prod Process*, 2018, (11): 33–36.
- [7] 马梦垚, 靳福姬, 侯乐贵, 等. 正交实验设计优化抗性糊精制备工艺[J]. *食品与发酵科技*, 2019, 55(4): 40–45.
- MA MY, JIN HY, HOU LG, *et al.* Optimization of resistant dextrin preparation by orthogonal experimental design [J]. *Food Ferment Sci Technol*, 2019, 55(4): 40–45.
- [8] 张颖, 朱晓雯, 钱和, 等. 高纯度难消化糊精的制备工艺及其特性研究 [J]. *食品工业科技*, 2015, 36(10): 293–296.
- ZHANG Y, ZHU XW, QIAN H, *et al.* Study on preparation process and properties of high purity indigestible dextrin [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(10): 293–296.
- [9] LEE DJ, KIM JM, LIM ST. Characterization of resistant waxy maize dextrins prepared by simultaneous debranching and crystallization [J]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 112: 106315.
- [10] 李泽润, 田延军, 黄艳红, 等. 不同制备工艺对抗性糊精构效的影响 [J/OL]. *食品科学*, 2022, 1–11. <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-SPKX20220630004.htm>
- LI ZR, TIAN YJ, HUANG YH, *et al.* Study on structure-activity relationship of resistant dextrin based on different preparation techniques [J/OL]. *Food Sci*, 2022, 1–11. <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-SPKX20220630004.htm>
- [11] XIE AJ, LEE DJ, LIM ST. Characterization of resistant waxy maize dextrins prepared by simultaneous debranching and crystallization followed by acidic or enzymatic hydrolysis [J]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 121: 106942.

- [12] BAI YJ, CAI LM, DOUTCH J, *et al.* Structural changes from native waxy maize starch granules to cold-water-soluble pyrodextrin during thermal treatment [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(18): 4186–4194.
- [13] WANG Y, HUANG ZH, LIU ZJ, *et al.* Preparation and characterization of octenyl succinate beta-limit dextrin [J]. *Carbohydr Polym*, 2020, 229: 115527.
- [14] 张婷, 李佳瑶, 安双双, 等. 高粱抗性糊精的制备工艺优化及结构表征[J]. *食品科技*, 2020, 342(4): 238–243.
- ZHANG T, LI JY, AN SS, *et al.* Preparation process optimization and structure characterization of sorghum resistant dextrin [J]. *Food Sci Technol*, 2020, 342(4): 238–243.
- [15] KAPUSNIAK K, NEBESNY E. Enzyme-resistant dextrin from potato starch for potential application in the beverage industry [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 172: 152–158.
- [16] TRITHAVISUP K, KRUSONG K, TANANUWONG K. In-depth study of the changes in properties and molecular structure of cassava starch during resistant dextrin preparation [J]. *Food Chem*, 2019, 297: 124996.
- [17] 徐佩琳, 罗水忠, 潘丽华, 等. 山药抗性糊精的微波预处理-酶解制备及其性质研究[J]. *农产品加工*, 2018, (9): 1–5.
- XU PL, LUO SZ, PAN LH, *et al.* Preparation and characterization of yam resistant dextrin by microwave pretreatment-enzymolysis method [J]. *Farm Prod Process*, 2018, (9): 1–5.
- [18] 顾品品, 张燕萍. 不同处理方式对红香芋抗性糊精性质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(15): 30–35.
- GU PP, ZHANG YP. Effects of different treatment methods on the properties of red taro resistant dextrin [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(15): 30–35.
- [19] 刘德志, 王维浩, 全志刚, 等. 绿豆抗性糊精的结构表征及抗消化特性研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(11): 119–125.
- LIU DZ, WANG WH, QUAN ZG, *et al.* Study on structure characterization and anti digestion properties of mung bean resistant dextrin [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(11): 119–125.
- [20] 苏有韬, 王维浩, 魏春红, 等. 荞麦抗性糊精制备工艺的条件优化及其结构表征[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(7): 85–91.
- SU YT, WANG WH, WEI CH, *et al.* Optimization of preparation conditions and structure characterization of buckwheat resistant dextrin [J]. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2022, 37(7): 85–91.
- [21] CHEN W, ZHANG T, MA Q, *et al.* Structure characterization and potential probiotic effects of sorghum and oat resistant dextrins [J]. *Foods*, 2022, 11(13): 1877.
- [22] 吕行, 黄继红, 纪小国, 等. “干热三步法”制备抗性糊精的工艺及其表征[J]. *食品工业*, 2019, 40(2): 95–99.
- LV X, HUANG JH, JI XG, *et al.* Technology and characterization of preparation of resistant dextrin by “dry heat three-step method” [J]. *Food Ind*, 2019, 40(2): 95–99.
- [23] LIU Z, LIU J, REN L, *et al.* Preparation of high-quality resistant dextrin through pyrodextrin by a multienzyme complex [J]. *Food Biosci*, 2022, 47: 101701.
- [24] 徐慧, 王珊珊, 田延军, 等. 响应面法优化抗性糊精制备工艺[J]. *中国酿造*, 2020, 39(5): 120–124.
- XU H, WANG SS, TIAN YJ, *et al.* Optimization of resistant dextrin preparation process by response surface methodology [J]. *Chin Brew*, 2020, 39(5): 120–124.
- [25] 李泽西, 张睿逸, 何萌, 等. 高温酸解结合酶法改性制备高品质抗性糊精[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(12): 1–7.
- LI ZX, ZHANG RY, HE M, *et al.* Thermal-acid treatment combined with enzymatic modification for high-quality resistant dextrin preparation [J]. *Chin Food Addit*, 2022, 33(12): 1–7.
- [26] 李泽润, 朱坤福, 田延军, 等. 抗性糊精的生产方法及应用概述[J]. *中国调味品*, 2022, 47(6): 196–199.
- LI ZR, ZHU KF, TIAN YJ, *et al.* Production method and application overview of resistant dextrin [J]. *Chin Cond*, 2022, 47(6): 196–199.
- [27] 孔刘娟, 刘峰, 栾庆民, 等. 抗性糊精制备方法、功能特性及在食品中应用研究[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(3): 179–183.
- KONG LJ, LIU F, LUAN QM, *et al.* Study on preparation, functional characteristics of resistant dextrin and its application in food [J]. *Chin Food Addit*, 2020, 31(3): 179–183.
- [28] 李良玉, 刘晚霞, 李朝阳, 等. 绿豆抗性糊精的高效纯化技术及分子特性研究[J]. *中国食品学报*, 2020, 22(10): 134–141.
- LI LY, LIU WX, LI CY, *et al.* High efficient purification technique and molecular characteristics of the *Phaseolus radiates* L. resistant dextrin [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 22(10): 134–141.
- [29] 项丰娟, 苏磊, 张秀南, 等. 小麦淀粉的研究现状[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(16): 212–219.
- XIANG FJ, SU L, ZHANG XN, *et al.* Research status of wheat starch [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(16): 212–219.
- [30] 张宏伟. 小麦抗性糊精的制备、对排便和脂肪的影响及其在面包上的应用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2021.
- ZHANG HW. The study of preparation and functional properties of wheat resistant dextrin and its application in bread [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2021.
- [31] 林江涛, 孙灵灵, 岳清华. 不同粒度小麦淀粉粉的理化特性分析[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(8): 193–198, 192.
- LIN JT, SUN LL, YUE QH. Analysis of physicochemical properties of wheat flour starch with different particle sizes [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2022, 38(8): 193–198, 192.
- [32] MAO H, CHEN Z, LI J, *et al.* Structural comparisons of pyrodextrins during thermal degradation process: The role of hydrochloric acid [J]. *Food Chem*, 2021, (349): 129174.
- [33] 王嘉俊, 郑瑜雪, 柴子淇, 等. 湿热和初化处理对莜麦淀粉结构及消化特性的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(20): 6659–6666.
- WANG JJ, ZHENG YX, CHAI ZQ, *et al.* Effects of heat-moisture and annealing treatment on the structure and digestive properties of naked oat starch [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(20): 6659–6666.
- [34] 李洪岩, 毛慧佳, 周梦莎, 等. 酸热加工对焦糊精结构和理化性质的影响研究进展[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(11): 22–30.
- LI HY, MAO HJ, ZHOU MS, *et al.* Research progress in acid and thermal treatment affecting structure and physicochemical properties of pyrodextrin [J].

- J Food Sci Biotechnol, 2022, 41(11): 22–30.
- [35] SHI M, GAO Q. Physicochemical properties, structure and *in vitro* digestion of resistant starch from waxy rice starch [J]. Carbohydr Polym, 2011, 84: 1151–1157.
- [36] ZHEN Y, ZHANG T, JIANG B, *et al.* Purification and characterization of resistant dextrin [J]. Foods, 2021, 10(1): 185.
- [37] 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 SR, JU RH, *et al.* Research progress in application of starch rheological properties in food processing [J]. Food Ind, 2022, 43(10): 212–215.
- [38] 田芬, 欧凯, 冯玉红, 等. 水溶性膳食纤维对无脂酸乳饮料稳定性的影响[J]. 饮料工业, 2017, 20(5): 49–53.
- TIAN F, OU K, FENG YH, *et al.* Effect of water-soluble dietary fiber on the stability of fat-free acidified milk drinks [J]. Bever Ind, 2017, 20(5): 49–53.
- [39] ZHANG Y, XIE YF, GUO YH, *et al.* The mechanism about the resistant dextrin improving sensorial quality of rice wine and red wine [J]. J Food Process Preserv, 2017, 41(6): e13281.
- [40] 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-Food Sci Technol, 2021, 150: 112010.
- [41] HAN X, KANG J, BAI Y, *et al.* Structure of pyrodextrin in relation to its retrogradation properties [J]. Food Chem, 2018, 242: 169–173.
- [42] WEIL W, WEIL RC, KEAWSOMPONG S, *et al.* Pyrodextrins from waxy and normal tapioca starches: Molecular structure and *in vitro* digestibility [J]. Carbohydr Polym, 2021, 252: 117140.
- [43] TRITHAVISUP K, SHI YC, KRUSONG K, *et al.* Molecular structure and properties of cassava-based resistant maltodextrins [J]. Food Chem, 2022, 369: 130876.
- [44] HUANG Z, WANG J, CHEN Y, *et al.* Effect of water-soluble dietary fiber resistant dextrin on flour and bread qualities [J]. Food Chem, 2020, 317: 126452.
- [45] 黄政, 孙江文, 徐勇, 等. 抗性糊精的研究与应用进展[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2018, 31(4): 418–427.
- HUANG Z, SUN JW, XU Y, *et al.* Advance on research and application of resistant dextrin [J]. J Hainan Norm Univ (Nat Sci Ed), 2018, 31(4): 418–427.
- [46] 彭辉, 刘绍, 黄染林, 等. 抗性糊精饼干的研制及其血糖生成指数测定[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(21): 7821–7828.
- PENG H, LIU S, HUANG RL, *et al.* Development and determination of glycemic index value of a resistant dextrin biscuit [J]. J Food Saf Qual, 2020, 11(21): 7821–7828.
- [47] 李方华, 窦光朋, 杜倩, 等. 抗性糊精在低热量蛋糕中代替蔗糖的应用研究[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(31): 124–127.
- LI FH, DOU GM, DU Q, *et al.* Resistant dextrin replacing sugar in low calorie cake [J]. China Food Addit, 2020, 31(31): 124–127.

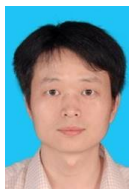
(责任编辑: 韩晓红 郑 丽)

作者简介



王 昂, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 1257429902@qq.com



韩四海, 博士, 教授, 主要研究方向为食品生物化学、食品质量与安全。

E-mail: hansihai@haust.edu.cn