DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.17.010

不同来源淀粉抗性糊精的制备及其特性

康志敏[1],杨佳毅[1],樊环环[2],童燕[3],任亚萌[1],张康逸[1*]
(1. 河南省农业科学院 农产品加工研究中心,河南 郑州 450000;2. 济源市农业科学院,河南 济源 459002;3. 安阳市农业科学院,河南 安阳 455099)

摘　要:为探究不同来源淀粉制备的抗性糊精的特性,以木薯淀粉、玉米淀粉、绿豆淀粉、豌豆淀粉为原料,通过酸热法制备抗性糊精,研究其理化特性、结构特性和功能特性。结果表明,糊精相对于淀粉具有更强的耐消化特性、更高的热稳定性、持水性和溶解度,但其热敏性有所下降;绿豆抗性糊精的分子转化更完全;豌豆抗性糊精含量最高,为68.36%;木薯抗性糊精得率最高,为62.46%;玉米抗性糊精持水性最好,为12.01 g/g;木薯、绿豆和豌豆抗性糊精溶解度均在1.97 g/g左右,无显著性差异;豌豆抗性糊精在酸性食品中更加稳定;4种来源淀粉制备的抗性糊精的黏度均较低。

关键词:淀粉;抗性糊精;理化特性;结构特性;功能特性

Preparation and Characterization of Resistant Dextrins from Different Sources of Starch

KANG Zhimin[1], YANG Jiayi[1], FAN Huanhuan[2], TONG Yan[3], REN Yameng[1], ZHANG Kangyi[1*]
(1. Research Center for Agricultural Product Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450000, Henan, China; 2. Jiyuan Academy of Agricultural Sciences, Jiyuan 459002, Henan, China; 3. Anyang Academy of Agricultural Sciences, Anyang 455099, Henan, China)

Abstract: The properties of resistant dextrins prepared from different sources of starch were investigated. Resistant dextrins were produced from cassava starch, maize starch, mung bean starch, and pea starch by acid-heat treatment. Their physicochemical, structural, and functional properties were studied. The results showed that compared with raw starch, dextrins exhibited enhanced digestion resistance, thermal stability, water-holding capacity, and solubility, but weakened thermosensitivity. The resistant dextrin from mung bean starch showed more complete molecular transformation. The resistant dextrin from pea starch had the highest content of 68.36%. The resistant dextrin from cassava starch had the highest yield of 62.46%. The resistant dextrin from maize starch had the best water-holding capacity of 12.01 g/g. The solubility of resistant dextrins from cassava starch, mung bean starch, and pea starch was about 1.97 g/g, with no significant difference. The resistant dextrin from pea starch was more stable in acidic foods. All the four resistant dextrins showed low viscosity.

Key words: starch; resistant dextrin; physicochemical property; structural property; functional property

引文格式:
康志敏,杨佳毅,樊环环,等. 不同来源淀粉抗性糊精的制备及其特性[J]. 食品研究与开发,2026,47(17):77-83.
KANG Zhimin, YANG Jiayi, FAN Huanhuan, et al. Preparation and Characterization of Resistant Dextrins from Different Sources of Starch[J]. Food Research and Development,2026,47(17):77-83.

膳食纤维是从植物中提取或人工合成的含糖大分子物质,不能被人体消化酶消化吸收[1]。而抗性糊精是食用淀粉的一部分被降解,同时发生糖基化转移而生成的一种可溶性膳食纤维[2],又称"难消化性纤维"。抗性糊精是一种低黏度的水溶性膳食纤维,能稳定餐后血糖水平,并有助于胰岛素的平衡反应,具有良好的

基金项目:河南省农业科学院优秀青年科技基金项目(2022YQ27);河南省科技攻关计划项目(222102110035、242102111050、242102110086);院县共建农业科技综合示范县项目(豫农科[2023]66号);郑州市惠民计划项目(2023KJHM0037)
作者简介:康志敏(1986—),女(汉),副研究员,硕士,研究方向:农产品加工。
*通信作者:张康逸(1981—),男,研究员,博士,研究方向:农产品加工。

低血糖生成指数(glycemic index,GI)值,对于那些患有糖尿病或糖尿病前期的人群尤其有益,还能够有效抵抗体内消化酶的消化作用,从而提高食物中膳食纤维的生物利用率[3-4]。此外,由于抗性糊精可以被肠道菌群利用,因此它在维护肠道健康方面也发挥了重要作用[5]。

目前常通过酸热法、微波法、酶法、超声波法制备抗性糊精[6-7],其中最普遍的方法是酸热法。酸热法主要以有机酸、无机酸为催化剂,使淀粉在高温条件下分解。Li 等[8]研究发现以豌豆渣为原料,采用酸热法可制备出含量为(42.15±0.16)%的豌豆抗性糊精。Luo 等[9]通过在 150 ℃下加热山药淀粉 60 min,并加入盐酸(0.11% 干基)和柠檬酸(0.2% 干基)来生产酶抗性糊精。酶抗性糊精具有低分子量,约为 6 800 Da,富含非消化性的 α-1,2 糖苷键,在水中的溶解性好,在 pH3.0~7.0 或 85 ℃加热 0.5 h 后仍稳定,表现出高热稳定性和对人工胃液和小肠液的高抵抗性。

现如今人们的饮食结构趋于精细化,也因此导致人体缺乏膳食纤维的摄入,为了应对这一问题,抗性糊精作为一种新型的膳食纤维补充剂被广泛应用于各种食品中。目前对抗性糊精的研究多以一种淀粉为原料,探究其制备工艺、生理特性等,而选用不同来源淀粉的研究较少。因此,本研究采用酸热法分别处理绿豆淀粉、豌豆淀粉、玉米淀粉和木薯淀粉,制备出抗性糊精,并通过傅里叶变换红外光谱、激光共聚焦显微拉曼光谱、差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter,DSC)等检测手段,探究不同来源淀粉抗性糊精的结构特性,同时研究抗性糊精的得率、溶解度、pH 值、持水性、黏度等理化特性,并且通过体外消化模拟试验来确认抗性糊精耐消化特性,以期为不同来源抗性糊精在各类食品中的运用提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

玉米淀粉、木薯淀粉、豌豆淀粉、绿豆淀粉:河南新乡良润全谷物食品有限公司。无水葡萄糖、无水乙醇(均为分析纯):天津市大茂化学试剂厂;糖化酶(200 U/mL)、猪胰-淀粉酶(5 U/mg)、耐高温 α-淀粉酶(2 000 U/g):美国 Sigma 公司;盐酸、氢氧化钠、3,5-二硝基水杨酸、醋酸钠(均为分析纯):天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

BNicolet iS20 傅里叶变换红外光谱、DXR2 激光共聚焦显微拉曼光谱仪:美国赛默飞世尔科技公司;UV752N 紫外分光光度计:上海佑科仪器仪表有限公司;RM 180 Rheomat 黏度仪、FE20K pH 计:瑞士梅特勒-托利多公司;HY-5A 恒温摇床:常州聚辉仪器制造有限公司;DSC-800 差示扫描量热仪:上海 Bosin Tech 公司;DK-S24 恒温水浴锅:上海森信实验仪器有限公司;101-0AS 电热恒温鼓风干燥箱:北京市永明医疗仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 抗性糊精的制备

参考苏有韬等[10]的方法制备抗性糊精并稍作改动。将一定量的淀粉干燥至水分含量低于 5%,配制浓度为 1% 的盐酸,将干淀粉质量 6% 的盐酸以喷雾形式加入到淀粉中,将其干燥至水分含量低于 5%,然后在 170 ℃下热解 1 h,冷却至室温后得到焦糊精,加入 2 倍体积的水并搅拌均匀,用 NaOH 溶液调至 pH6.0,随后继续添加 0.5% 耐高温 α-淀粉酶,于 95 ℃下反应 15 min,继续加入 0.25% 耐高温 α-淀粉酶,在 85 ℃下反应 20 min,然后立即在 100 ℃下灭酶 30 min,冷水浴冷却至室温,4 000 r/min 离心 15 min,在上清液中加入质量比为 1∶4 的 95% 无水乙醇,静置 4 h 后,将沉淀置于 105 ℃电热恒温鼓风干燥箱中至恒重,得到抗性糊精。

1.3.2 傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy,FTIR)的测定

参考刘德志等[11]的方法测定,分别在 4 000~400 cm^{-1} 的频率范围内对淀粉及抗性糊精样品进行傅里叶变换红外光谱分析。

1.3.3 激光共聚焦显微拉曼光谱(laser confocal micro-Raman spectroscopy,LCMRS)的测定

参考项丰娟等[12]的方法测定,利用拉曼光谱仪获取样品的激光共焦显微拉曼光谱图。

1.3.4 热转变特性的测定

参考王昂等[13]的方法测定,通过差示扫描量热仪(differential scanning calorimeter,DSC)分析小麦抗性糊精的热转变特性,分别测定起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)及焓值(ΔH)的变化。

1.3.5 抗性糊精的得率

参考张宏伟等[14]的方法,按照公式(1)计算制备的抗性糊精的得率。

$$X = \frac{M}{m} \times 100 \quad (1)$$

式中:X 为抗性糊精的得率,%;M 为制得抗性糊精的质量,g;m 为淀粉的质量,g。

1.3.6 抗性糊精含量的测定

采用 3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid,DNS)比色法,参考宋丽冉等[15]的方法并稍作修改,配制 0~1.0 mg/mL 葡萄糖标准溶液,通过 DNS 法绘制葡萄糖标准曲线,得到回归方程:y=0.571 9x−0.059,相关系数 R^2=0.999 1。测定各抗性糊精样品吸光度,根据葡萄糖标准曲线,按照公式(2)计算抗性糊精含量。

$$Y = 100 - X_1 \times 0.9 \quad (2)$$

式中：Y 为抗性糊精的含量，%；X_1 为还原糖含量，%。

1.3.7 溶解度的测定

参考李泽润等[16]的方法并稍作修改，取 1.0 g 抗性糊精样品于 10 mL 蒸馏水中，搅拌 30 min，5 000 r/min 离心 10 min。将上清液烘干后，准确称量剩余的干物质。每个样品测定 3 次。溶解度按公式(3)进行计算。

$$S = \frac{m_1}{m} \quad (3)$$

式中：S 为溶解度，g/g；m 为抗性糊精样品的质量，g；m_1 为干燥至恒重后玻璃皿表面固形物的质量，g。

1.3.8 持水性的测定

参考李泽润等[16]的方法并稍作修改，准确称取 0.60 g 样品，将样品装入离心管后称量总质量，在离心管中加入 10 mL 蒸馏水后放入 30 ℃水浴，每 5 min 振荡一次，共计 6 次，然后于 3 000 r/min 离心 15 min，弃去液体后称量总质量。持水性按公式(4)进行计算。

$$n = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \quad (4)$$

式中：n 为持水性，g/g；m_2 为离心管与沉淀物的质量，g；m_1 为样品和离心管的总质量，g；m_0 为样品的质量。

1.3.9 pH 值的测定

参考李泽润等[16]的方法并稍作修改，称取 0.2 g 抗性糊精样品于 20 mL 蒸馏水中，在 30 ℃下搅拌 30 min，待溶解完全后测量溶液 pH 值。

1.3.10 黏度的测定

参考宋丽冉等[15]的方法并稍作修改，根据各样品的水分含量计算出需加入蒸馏水的质量，随后将混合物装入黏度仪专用铝盒中。样品在 50 ℃、960 r/min 条件下形成均匀的悬浮液后，控制转速为 160 r/min，将温度升至 95 ℃，保持 4 min 后将温度逐渐下降到 50 ℃，测定各样品的黏度。

1.3.11 体外模拟消化特性的测定

参考王昂等[13]的方法并稍加修改，准确称取 100 mg 抗性糊精样品于 50 mL 具塞离心管中，加入 15 mL 醋酸钠缓冲溶液(pH5.2，0.2 mol/L)，置于 37 ℃水浴恒温摇床中(160 r/min)15 min，然后加入 5 mL 猪胰 α-淀粉酶(290 U/mL)和糖化酶(15 U/mL)的混合酶液，放于 37 ℃的恒温摇床中振荡培养(180 r/min)，分别在 0、20、120 min 时取样 0.5 mL，迅速加入 4.5 mL 的无水乙醇使酶失活，灭酶后的混合液在 4 000 r/min 离心 15 min，通过 DNS 法测定并计算各抗性糊精样品中还原糖含量，根据公式(5)~(7)计算快消化淀粉(rapidly digestible starch，RDS)、慢消化淀粉(slowly digestible starch，SDS)、抗性淀粉(resistant starch，RS)的含量。

$$Q = \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{m} \times 100 \quad (5)$$

$$D = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{m} \times 100 \quad (6)$$

$$H = (1 - Q - D) \times 100 \quad (7)$$

式中：Q 为快消化淀粉含量，%；D 为慢消化淀粉含量，%；H 为抗性淀粉含量，%；G_{20} 为酶解 20 min 时葡萄糖含量，mg；G_0 为还原糖含量，mg；m 为各样品的质量，mg；G_{120} 为酶解 120 min 时葡萄糖含量，mg；0.9 为葡萄糖换算系数。

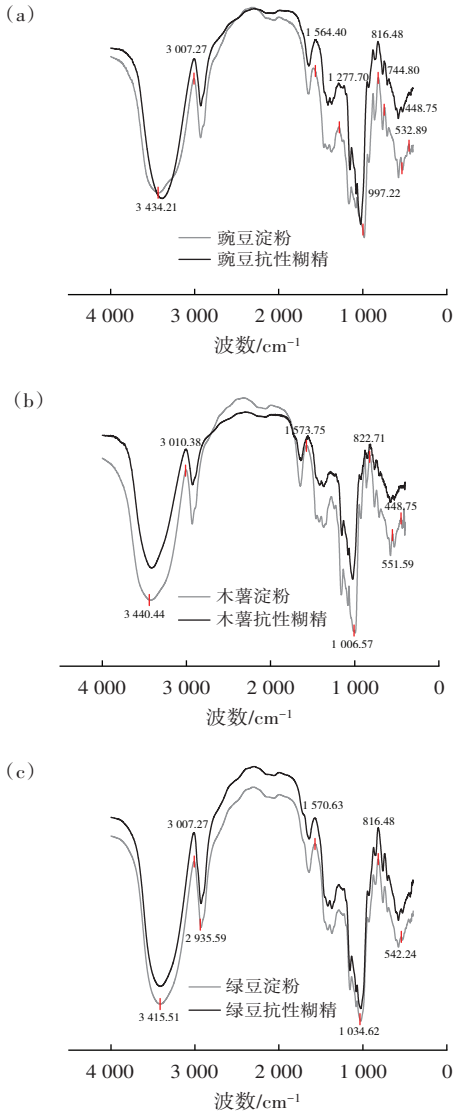
1.4 数据处理

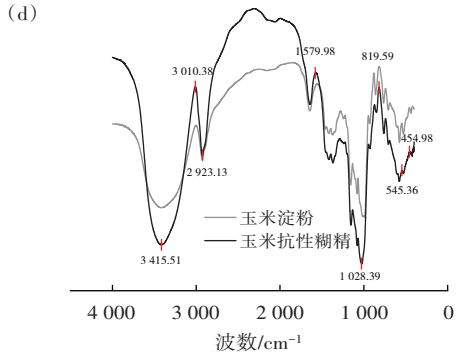
数据均以平均值±标准差表示，每组重复 3 次。采用 SPSS 27.0 软件对数据处理与分析，Origin 2023 制图软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 傅里叶变换红外光谱结果

不同淀粉及抗性糊精的 FTIR 分析结果如图 1 所示。





(a)豌豆淀粉及其抗性糊精;(b)木薯淀粉及其抗性糊精;(c)绿豆淀粉及其抗性糊精;(d)玉米淀粉及其抗性糊精。

图 1　原淀粉和抗性糊精的傅里叶变换红外光谱图

Fig.1　FTIR diagrams of raw starch and resistant dextrins

由图 1 可知,各淀粉与制备得到的抗性糊精的特征吸收峰无明显差异,说明并未产生新的官能团,但是吸收峰强度有较明显变化,说明糊精化过程中糖苷键断裂和重聚合反应程度不同[11]。不同来源的抗性糊精均在 3 400 cm^{-1} 附近处有一个较明显的—OH 伸缩振动峰,说明抗性糊精中有较多亲水性基团,亲水性更强;在 3 007 cm^{-1} 附近出现了一个由 C—H 伸缩振动而形成的吸收峰,1 150 cm^{-1} 附近出现了 C—O—C 的非伸缩振动峰,而 1 024 cm^{-1} 的位置是 C—O 的对称振动吸收峰;800~1 000 cm^{-1} 之间的特征吸收峰出现了一定强度的伸缩振动,主要与 α-糖苷键、β-糖苷键等键相关。因为在糊精化的过程中连接淀粉分子的 α-1,4 糖苷键被破坏,在这个过程中,淀粉分子会出现诱导聚解反应,即它会攻击周围分子的羟基并与短链交联聚合,从而生成新的耐消化糖苷键[17],因此糊精相对于淀粉具有更强的耐消化特性。

2.2　激光共聚焦显微拉曼光谱结果

不同抗性糊精拉曼光谱分析结果如图 2 所示。

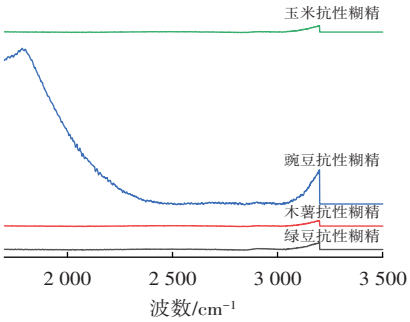


图 2　抗性糊精的激光共聚焦显微拉曼光谱图

Fig.2　Confocal laser Raman spectra of resistant dextrins

由图 2 可知,各种抗性糊精样品在 3 200 cm^{-1} 处均可观察到一个较明显的吸收峰,与 O—H 伸缩振动相对应,这是淀粉分子典型的特征峰,与直链淀粉和支链淀粉有关。而豌豆抗性糊精在 1 780 cm^{-1} 附近出现了一个新的吸收峰,这可能是由羰基引起的,表明改性淀粉形成了酯键[18]。

2.3　抗性糊精 DSC 结果

玉米抗性糊精、木薯抗性糊精、绿豆抗性糊精、豌豆抗性糊精 DSC 测定结果如表 1 所示。

表 1　各种抗性糊精 DSC 测定结果

Table 1　Results of DSC determination of various resistant dextrins

样品	焓值(ΔH)/(J/g)	起始糊化温度(T_0)/℃	峰值糊化温度(T_p)/℃	终止温度(T_c)/℃
玉米淀粉	13.1±2.6^{C}	62.2±2.5^{B}	71.7±2.1^{B}	83.1±3.2^{A}
木薯淀粉	14.7±3.4^{B}	60.3±2.9^{B}	70.3±3.6^{B}	79.6±2.3^{A}
绿豆淀粉	13.9±1.7^{C}	68.5±0.8^{A}	77.9±2.4^{A}	82.1±1.6^{A}
豌豆淀粉	16.4±2.8^{A}	66.4±3.7^{A}	75.3±1.9^{A}	80.8±2.3^{A}
玉米抗性糊精	13.2±0.2^{c}	106.1±3.9^{b}	109.9±2.3^{b}	119.03±3.5^{b}
木薯抗性糊精	5.7±3.4^{d}	121.8±1.1^{a}	124.5±0.2^{a}	125.8±1.2^{a}
绿豆抗性糊精	26.1±2.4^{a}	109.8±3.1^{b}	126.9±3.9^{a}	128.9±5.6^{a}
豌豆抗性糊精	15.9±0.6^{b}	102.9±2.3^{b}	106.9±4.8^{b}	114.2±10.3^{b}

注:同列不同小写字母表示各抗性糊精间存在显著性差异(P<0.05);同列不同大写字母表示各淀粉间存在显著性差异(P<0.05)。

由表 1 可知,各抗性糊精的焓值、起始糊化温度、峰值糊化温度、终止温度均高于各淀粉,说明抗性糊精糊化过程中增强了热稳定性,但其热敏性有所下降[19],启动糊化和熔化需要相对更高的能量,这可能是因为淀粉被分解成小分子后在高温条件下会发生转糖苷和重新聚合现象,从而增加了淀粉的支链结构[13]。相比之下,绿豆抗性糊精的焓值,峰值温度要高于其他 3 种抗性糊精,说明绿豆抗性糊精的分子转化更完全。

2.4　抗性糊精得率测定

抗性糊精的得率如表 2 所示。

表 2　各种抗性糊精得率

Table 2　Yields of various resistant dextrins

样品	得率/%
玉米抗性糊精	56.22±0.93^{b}
木薯抗性糊精	62.46±1.52^{a}
绿豆抗性糊精	54.36±0.62^{b}
豌豆抗性糊精	45.92±1.92^{c}

注:不同小写字母表示存在显著性差异(P<0.05)。

由表 2 可知,木薯淀粉制备的抗性糊精得率最高,为 62.46%,而豌豆淀粉制备的得率最低,为 45.92%,玉米和绿豆制备的抗性糊精得率分别为 56.22%、54.36%。淀粉来源对抗性糊精的得率影响很大,可能是因为热处理会引发颗粒内部淀粉分子的重新排列,

而高直链淀粉和高支链淀粉都可能是高度抗性糊精的来源[20]。若考虑抗性糊精得率，可选择木薯淀粉为原料。

2.5 葡萄糖标准曲线的绘制及抗性糊精含量

葡萄糖标准曲线如图 3 所示，各种抗性糊精含量结果如表 3 所示。

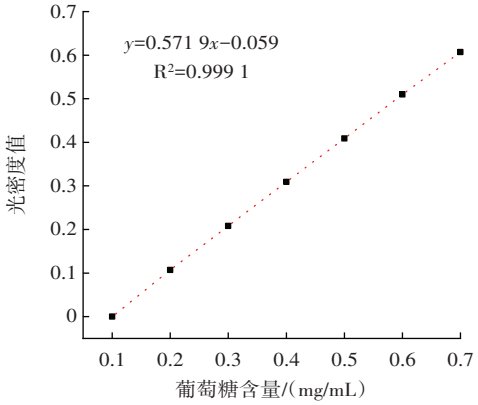


图 3 葡萄糖标准曲线

Fig.3 Glucose standard curve

表 3 各种抗性糊精含量

Table 3 Content of various resistant dextrins

样品	抗性糊精含量/%
玉米抗性糊精	63.17±0.22[c]
木薯抗性糊精	65.30±0.49[b]
绿豆抗性糊精	56.30±0.07[d]
豌豆抗性糊精	68.36±0.22[a]

注：不同小写字母表示存在显著性差异（P<0.05）。

由表 3 可知，豌豆淀粉制备的抗性糊精含量最高，为 68.36%，绿豆淀粉制备的抗性糊精含量最低，为 56.30%，玉米淀粉制备的抗性糊精含量为 63.17%，木薯淀粉制备的抗性糊精含量为 65.30%。若考虑抗性糊精含量，可选择豌豆淀粉为原料。

2.6 持水性和溶解度

玉米淀粉及其抗性糊精、木薯淀粉及其抗性糊精、绿豆淀粉及其抗性糊精、豌豆淀粉及其抗性糊精的持水性和溶解度如表 4 所示。

由表 4 可知，各淀粉制备抗性糊精后的持水性和溶解度均明显提高，可能在糊精化的过程中，淀粉颗粒的结构被破坏，得到具有更多羟基和可溶性小分子物质的抗性糊精。玉米抗性糊精的持水性最高，为 12.01 g/g；豌豆抗性糊精、木薯抗性糊精和绿豆抗性糊精的持水性没有显著性差异，分别为 10.52、10.83、11.02 g/g。玉米抗性糊精具有较高持水力，可能是因为其表面有较多羟基，这些羟基会与水分子形成氢键，故具有较好持水性[21]。若考虑抗性糊精持水性，可选

表 4 各种抗性糊精的持水性和溶解度

Table 4 Water-holding capacity and solubility of various resistant dextrins

样品	持水性/(g/g)	溶解度/(g/g)
玉米淀粉	2.10±0.01[B]	0.03±0.02[A]
木薯淀粉	1.81±0.08[C]	0.02±0.09[A]
绿豆淀粉	2.43±0.11[A]	0.01±0.15[A]
豌豆淀粉	1.71±0.14[D]	0.01±0.05[A]
玉米抗性糊精	12.01±0.41[a]	1.89±0.06[b]
木薯抗性糊精	10.83±0.01[b]	1.93±0.04[ab]
绿豆抗性糊精	11.02±0.19[b]	2.02±0.06[a]
豌豆抗性糊精	10.52±0.13[b]	1.95±0.01[ab]

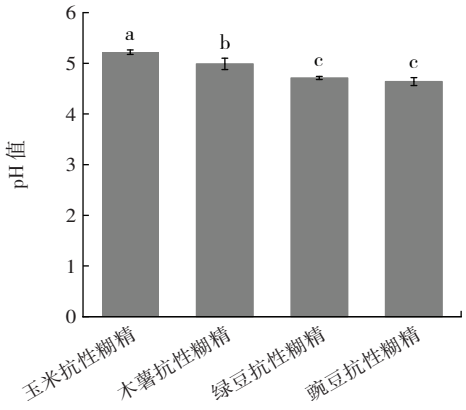
注：同列不同小写字母表示各抗性糊精间存在显著性差异（P<0.05）；同列不同大写字母表示各淀粉间存在显著性差异（P<0.05）。

择玉米淀粉为原料。

此外，绿豆抗性糊精的溶解度最高，为 2.02 g/g，其与木薯抗性糊精和豌豆抗性糊精的溶解度没有显著性差异；玉米抗性糊精、木薯抗性糊精和豌豆抗性糊精的溶解度没有显著性差异，分别为 1.89、1.93、1.95 g/g。各抗性糊精溶解性好的原因可能是在酸热条件下，淀粉的结晶区被严重破坏，然后经酶解纯化后淀粉原有的空间结构被打破，分解为小分子糖类，从而提高了抗性糊精的溶解度[21]。

2.7 pH 值

玉米抗性糊精、木薯抗性糊精、绿豆抗性糊精、豌豆抗性糊精的 pH 值如图 4 所示。



不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图 4 各种抗性糊精的 pH 值

Fig.4 pH of various resistant dextrins

由图 4 可知，玉米抗性糊精 pH 值最高为 5.22，木薯抗性糊精的 pH 值为 4.99，绿豆抗性糊精和豌豆抗性糊精的 pH 值无显著性差异，分别为 4.71、4.64。总体来看，不同来源抗性糊精的 pH 值均低于 6，呈弱酸

性，因此具有较强的耐酸性，添加到各种酸性食品中也可保持稳定性[22]，故各来源抗性糊精均可在酸性条件的食品中添加。

2.8 黏度

淀粉颗粒随温度升高而吸水膨胀，悬浊液渐变为溶胶状态，黏度随着粉质颗粒的粉碎而迅速降低到最小值，随后降温使体系内分子团聚成凝胶。各抗性糊精样品的黏度测定结果如表 5 所示。

表 5 各种抗性糊精的黏度

Table 5 Viscosity of various resistant dextrins

样品	峰值	谷值	分解	最终黏度/cp	回生值/cp	峰值时间/min	黏合温度/℃
玉米抗性糊精	12	1	11	3	2	1.07	50.50
豌豆抗性糊精	2	−1	3	1	2	1.07	50.50
木薯抗性糊精	4	0	4	1	1	1.07	50.50
绿豆抗性糊精	4	−1	5	1	2	1.07	50.50

由表 5 可知，各抗性糊精的黏度均非常小，且当温度从 50 ℃升到 95 ℃，几分钟后降到 50 ℃时，不同抗性糊精的黏度数值前后变化不大，这说明各抗性糊精均具有较高热稳定性。

2.9 模拟体外消化率

不同淀粉及其抗性糊精模拟体外消化率结果如图 5 所示。

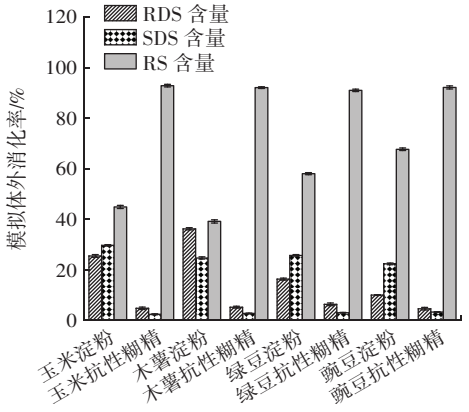


图 5 淀粉及其抗性糊精的模拟体外消化结果

Fig.5 Simulated *in vitro* digestion of starch and resistant dextrins

由图 5 可知，各淀粉抗性糊精的 RDS 和 SDS 含量明显低于各淀粉，而抗性糊精的 RS 含量明显高于淀粉，进一步说明抗性糊精具有良好的抗消化特性。各抗性糊精中的 RS 含量均较高，可能是因为酸热处理使原淀粉的 α-1，4 糖苷键和 α-1，6 糖苷键严重断裂。在糊精化过程中，通过转苷作用形成 α-1，2 和 α-1，6 的耐消化糖苷键和高度支化的葡聚糖，是消化酶抵抗力的主要来源[5,23]。各抗性糊精均具有较好抗消化性能，这与膳食纤维的特性相吻合，有助于减少餐后血糖升高并保持胰岛素的稳定，因此有潜力成为一种高质量的新型膳食纤维来源[24]。

3 结论

本文以玉米淀粉、木薯淀粉、绿豆淀粉、豌豆淀粉为原料，在酸热条件下制备抗性糊精，结果表明：与各淀粉相比，抗性糊精均具有较好的抗消化性、耐酸性、持水性、溶解度和较低的黏度，木薯抗性糊精得率最高且具有更好的热稳定性；玉米抗性糊精的持水性最好。该研究结果呈现了不同来源抗性糊精的优点，可为抗性糊精在实际生产的工业化应用提供参数借鉴。虽然本文研究了各种抗性糊精的特性，但其实际应用及安全性却并未研究，后续可将抗性糊精添加到低 GI 食品、饮料、乳制品等食品中，也可尝试增加毒理学方面的试验。

参考文献：

[1] GUAN Z W, YU E Z, FENG Q. Soluble dietary fiber, one of the most important nutrients for the gut microbiota[J]. Molecules, 2021, 26(22): 680.

[2] 宋丽冉 . 高粱抗性糊精制备及结构表征[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2023: 5.
SONG Liran. Preparation and structural characterization of sorghum resistant dextrin[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023: 5.

[3] 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 Liujuan, LIU Feng, LUAN Qingmin, et al. Study on preparation, functional characteristics of resistant dextrin and its application in food[J]. China Food Additives, 2020, 31(3): 179-183.

[4] 李昱辉, 刘湘霞, 黄才创 . 抗性糊精研究进展及市场前景[J]. 轻工科技, 2022, 38(6): 11-13, 16.
LI Yuhui, LIU Xiangxia, HUANG Caichuang. Research progress and market prospect of resistant dextrin[J]. Light Industry Science and Technology, 2022, 38(6): 11-13, 16.

[5] 李泽润, 田延军, 黄艳红, 等 . 超高压对抗性糊精制备过程的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(2): 83-89.
LI Zerun, TIAN Yanjun, HUANG Yanhong, et al. Effects of ultra-high pressure on preparation of resistant dextrin[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(2): 83-89.

[6] 陈新阳, 赵朋辉, 刘莹莹, 等 . 小麦抗性糊精制备工艺优化、结构表征及其体外消化[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(17): 110-117.
CHEN Xinyang, ZHAO Penghui, LIU Yingying, et al. Process optimization, structural characterization and *in vitro* digestibility of wheat resistant dextrin[J]. Food Research and Development, 2023, 44(17): 110-117.

[7] 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 Zerun, ZHU Kunfu, TIAN Yanjun, et al. Production method and application overview of resistant dextrin[J]. China Condiment, 2022, 47(6): 196-199.

[8] LI L Y, HE T F, LING Y, et al. Preparation, structure characterization and functional properties of pea dregs resistant dextrin[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2023, 7: 1182642.

[9] LUO S Z, WU X Z, XU P L, et al. Enzyme-resistant dextrin from Chinese yam starch for potential application in beverage industry: Preparation, physicochemical properties and *in vitro* digestion[J]. Current Topics in Nutraceutical Research, 2019, 17(2): 140-147.

[10] 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 Youtao, WANG Weihao, WEI Chunhong, et al. Optimization of preparation conditions and structure characterization of buckwheat resistant dextrin[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(7): 85-91.

[11] 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 Dezhi, WANG Weihao, QUAN Zhigang, et al. Study on structure characterization and anti digestion properties of mung bean resistant dextrin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 119-125.

[12] 项丰娟, 王书军, 秦仁炳 . 玉米淀粉在水-离子液体混合溶液中的相转变机制研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(14): 38-46.
XIANG Fengjuan, WANG Shujun, QIN Renbing. Nature of phase transitions of maize starch in water-ionic liquid mixtures[J]. Food Research and Development, 2020, 41(14): 38-46.

[13] 王昂, 韩四海, 岳崇慧, 等 . 小麦抗性糊精的酸热法制备、表征及消化特性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(8): 222-229.
WANG Ang, HAN Sihai, YUE Chonghui, et al. Acid-thermal preparation, characterization and digestion properties analysis of wheat resistant dextrin[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(8): 222-229.

[14] 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 Hongwei. The study of preparation and functional properties of wheat resistant dextrin and its application to bread[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2021.

[15] 宋丽冉, 严洪冬, 李良玉, 等 . 高粱抗性糊精制备工艺的优化及其结构和体外消化特性研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 262-271.
SONG Liran, YAN Hongdong, LI Liangyu, et al. Optimization of preparation process of sorghum resistant dextrin and its structure and *in vitro* digestion properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 262-271.

[16] 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]. 食品科学, 2023, 44(11): 79-85.
LI Zerun, TIAN Yanjun, HUANG Yanhong, et al. Effect of different preparation techniques on the structure-activity of resistant dextrin[J]. Food Science, 2023, 44(11): 79-85.

[17] LE THANH-BLICHARZ J, BŁASZCZAK W, SZWENGIEL A, et al. Molecular and supermolecular structure of commercial pyrodextrins[J]. Journal of Food Science, 2016, 81(9): C2135-C2142.

[18] 汪鑫 . 冷冻球磨/OSA 改性青稞淀粉的制备及结构和性质研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
WANG Xin. Preparation, structure and properties of highland barley starch modified by OSA with frozen ball milling[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023.

[19] 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 Chemistry, 2019, 297: 124996.

[20] LU J D, ZHANG T T, HAN Y L, et al. Structural characterization and functional properties of resistant dextrins prepared from different starch sources[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 282: 137124.

[21] CHEN W 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] KAPUSNIAK J, KAPUSNIAK K, PTAK S, et al. Products of thermolysis of potato starch treated with hydrochloric and citric acids as potential prebiotics[J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2014, 6(3): 347-356.

[23] WANG Y, HUANG Z H, LIU Z J, et al. Preparation and characterization of octenyl succinate β-limit dextrin[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 229: 115527.

[24] LEE D J, KIM J M, LIM S T. Characterization of resistant waxy maize dextrins prepared by simultaneous debranching and crystallization[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106315.

加工编辑:张岩蔚
收稿日期:2025-04-19