

# 怀山药抗性淀粉理化性质及体外消化性研究

## Study on physicochemical properties and digestibility of the resistant starch from *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Huaqing

马丽苹<sup>1,2</sup> 焦昆鹏<sup>1</sup> 罗磊<sup>1,2</sup> 向进乐<sup>1,3</sup>

MA Li-ping<sup>1,2</sup> JIAO Kun-peng<sup>1</sup> LUO Lei<sup>1,2</sup> XIANG Jin-le<sup>1,3</sup>

张晓宇<sup>1,2</sup> 樊金玲<sup>1,2</sup> 朱文学<sup>1,2</sup>

ZHANG Xiao-yu<sup>1,2</sup> FAN Jin-ling<sup>1,2</sup> ZHU Wen-xue<sup>1,2</sup>

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 河南省食品原料工程技术研究中心, 河南 洛阳 471023; 3. 食品加工与安全国家重点实验室, 河南 洛阳 471023)

(1. College of Food & Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China; 2. Henan Engineering Research Center of Food Material, Luoyang, Henan 471023, China; 3. National Experimental Teaching Center of Food Processing and Safety, Luoyang, Henan 471023, China)

**摘要:** 分析比较怀山药淀粉和压热法制备的怀山药抗性淀粉的理化性质及消化特性。结果表明: 怀山药淀粉颗粒表面光滑, 呈不规则且大小不一的椭球形、三角形等形态, 属于 C 型淀粉; 抗性淀粉颗粒特征消失, 呈现表面疏松的片层状结构。2 种淀粉化学结构相似, 抗性淀粉没有形成新的基团。与原淀粉相比, 抗性淀粉分子量分布更加集中。抗性淀粉的糊化峰值温度高于原淀粉的, 因此其热稳定性更高。抗性淀粉的透明度低于原淀粉的。水浴温度低于 75 °C 时, 抗性淀粉的持水性大于原淀粉的, 而当水浴温度高于原淀粉糊化温度时, 原淀粉的持水性明显高于抗性淀粉的; 体外模拟人体消化试验表明, 抗性淀粉比原淀粉更耐消化。

**关键词:** 怀山药; 抗性淀粉; 理化性质; 消化特性

**Abstract:** The physicochemical characteristics and digestibility of native starch from *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Huaqing and its resistant starch produced by autoclave process preparation method have been analyzed and compared in the paper. Results showed that the shape of native starch granules from *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Huaqing was irregular ellipsoid and triangle with a smooth surface. The crystal form of native starch was type C. Resistant starch losing particle characteristic exhibited a lamellar structure with loose surface. Both of them were similar in chemical structure without new

functional group in resistant starch granules. Compared with the native starch, the molecular weight distribution of resistant starch was more concentrated. The peak temperature of resistant starch gelatinization was higher than that of native starch, and the resistant starch had better thermal stability. The transparency of resistant starch was lower than native starch. When bath temperature was lower than 75 °C, the water-holding capacity of resistant starch was greater than that of native starch, and while bath temperature was above the gelatinization temperature of native starch, water-holding capacity of native starch, which was much higher than that of resistant starch. The results of simulating human digestion based on In-Vitro mode showed that resistant starch was more resistant to digestion than native starch.

**Keywords:** *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Huaqing; resistant starch; physicochemical properties; digestibility

怀山药是中国著名的“四大怀药”之一, 也是补中益气、物美价廉的蔬菜品种, 主产于河南温县、武陟等地, 富含糖蛋白、山药多糖、薯蓣皂苷元、淀粉、各种游离氨基酸和黄酮等生物活性成分<sup>[1-2]</sup>。

抗性淀粉是指不被健康个体小肠吸收的膳食淀粉, 与其他膳食纤维类似, 到达结肠后, 被用作结肠微生物的发酵底物, 进而对机体健康产生各种有益的影响<sup>[3]</sup>。研究发现, 抗性淀粉具有改善结肠健康<sup>[4-6]</sup>、控制糖尿病<sup>[7-8]</sup>、降低血液胆固醇水平<sup>[9-10]</sup>、减少生物结石的形成<sup>[11]</sup>和增加矿物质的吸收<sup>[12]</sup>等潜力。抗性淀粉具有挤压特性良好、糊化温度高、口感好、无异味、能增加食物的脆性和减少含油量等功能特

**基金项目:** 河南省高等学校重点科研项目计划 (编号: 16A550002); 河南科技大学博士启动基金 (编号: 13480047)

**作者简介:** 马丽苹, 女, 河南科技大学副教授, 博士。

**通信作者:** 朱文学 (1967—), 男, 河南科技大学教授, 博士。

E-mail: zwx@haust.edu.cn

**收稿日期:** 2017-09-06

性,因此可作为食品添加剂用于食品工业,如将其添加到饼干、面条、面包和酸奶等食品中,从而开发高品质功能性食品<sup>[13]</sup>。

据报道<sup>[14]</sup>,怀山药淀粉含量高达20%~30%,是重要的淀粉来源。虽然关于其他品种山药淀粉和抗性淀粉的研究已有报道<sup>[15-16]</sup>,但山药淀粉的组成和含量受到山药品种、生长条件 and 环境因素的影响,同时对由其制备的抗性淀粉也产生一定的影响。目前关于怀山药的研究大多集中在粗加工<sup>[1,17]</sup>、化学成分<sup>[18-19]</sup>和育种<sup>[20-21]</sup>等方面,而对其抗性淀粉的研究鲜见报道。因此,本研究应用压热法制备怀山药抗性淀粉,分析并阐明其基本理化性质、化学结构、热特性和体外消化性等,以期对怀山药抗性淀粉的开发利用提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料和试剂

怀山药:购自河南焦作市温县;

猪胰 $\alpha$ -淀粉酶:10 units/mg,美国 Sigma 公司;

直链淀粉:美国 Sigma 公司;

耐高温 $\alpha$ -淀粉酶:4 万 U/g,江苏锐阳生物科技有限公司;

糖化酶:10 万 U/g,江苏锐阳生物科技有限公司;

透析袋:截留分子量 3 500,合肥博美生物科技有限责任公司;

其他试剂均为国产分析纯。

### 1.2 主要仪器设备

紫外可见分光光度计:UV1800 型,日本岛津公司;

傅里叶变换红外光谱:VERTEX70 型,德国 Bruck 公司;

差示扫描量热仪:DSC1 型,瑞士 Mettler-Toledo 公司;

X-射线衍射仪:D8A 型,德国 Bruck 公司;

多管架自动平衡离心机:TDZ5-WS 型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:101 型,天津跃进器械厂;

电热恒温水浴锅:HH-4 型,北京科伟永兴仪器有限公司;

分析天平:FA1004 型,上海上平仪器公司。

### 1.3 方 法

1.3.1 怀山药原淀粉的制备 新鲜的怀山药经清洗、去皮和切片后浸泡于5%~6%的抗坏血酸溶液中 15 min,匀浆后用 0.2 mol/L 的 NaOH 溶液调 pH 值至 8.5,搅拌 1 h 后过 60 目筛,自来水反复冲洗滤渣至澄清状后,调节滤液 pH 值至 7.0,静置 2 h,取下层悬浊液于 4 500 r/min 离心 10 min,将沉淀置于 55 °C 干燥箱中烘干至恒重,研碎后即可得到怀山药淀粉。制备的怀山药淀粉经双波长法测定直链淀粉含量为 24.40%。

### 1.3.2 怀山药抗性淀粉的制备及纯化

(1) 怀山药抗性淀粉制备:配制 25% 淀粉悬浊液,置于高压灭菌锅中,115 °C 压热处理 100 min,冷却到室温后,置

于 4 °C 冰箱老化 6 h,然后 80 °C 烘干,粉碎并过 60 目筛,即得怀山药粗抗性淀粉。按文献<sup>[22]</sup>所述方法测得抗性淀粉得率为 13.41%。

(2) 酶解纯化怀山药抗性淀粉:称取一定质量怀山药粗抗性淀粉,加蒸馏水,用 pH 6.0 的柠檬酸-磷酸氢二钠缓冲液调节 pH 值到 6.0~7.0,然后加入过量的耐高温 $\alpha$ -淀粉酶,90 °C 酶解 2 h,冷却至室温后,4 mol/L 柠檬酸调 pH 值到 4.0~5.0,加入过量糖化酶,60 °C 水解 1 h 后,4 000 r/min 离心 10 min,弃去上清液,然后依次用 95%,85%,75% 的乙醇冲洗沉淀,4 000 r/min 离心 10 min,弃上清,50 °C 烘干,粉碎,即可得到纯化的怀山药抗性淀粉。

1.3.3 电镜扫描 依次称量已充分干燥的淀粉样品,然后再用导电胶把样品固定在铜台上,喷金后用扫描电镜观察并拍摄。

1.3.4 热力学特性分析 将淀粉样品与水按照 1:3 (g/mL) 的比例配成淀粉乳,取少量加入标准铝坩埚,称重压盖后,于 4 °C 密封平衡 1 d。测量同时,用空坩埚做空白参照。测量温度范围:20~130 °C,升温速率为 10 °C/min。用 Thermal analysis 软件计算得出起始温度  $T_0$ 、峰值温度  $T_p$ 、终止温度  $T_c$  和糊化焓  $\Delta H$  的变化情况。

1.3.5 淀粉的碘吸收特性 称取 20 mg 淀粉样品,置于具塞试管中,用无水乙醇润湿样品后,再用 1 mL 2 mol/L 的氢氧化钾充分溶解样品,然后加入 10 mL 蒸馏水,调节 pH 值至 6.0~7.0,加蒸馏水至 50 mL,反复倒置混合均匀后,吸取上述溶液 25 mL 于 100 mL 容量瓶中,再加入 80 mL 蒸馏水和 2 mL 碘试剂,蒸馏水定容后立刻混合均匀,在波长 450~800 nm 内进行扫描。

1.3.6 红外光谱的分析 将淀粉样品和溴化钾置于 105 °C 烘干后,样品和溴化钾按 1:100 的比例加入玛瑙研钵中研好后置于压片机中压片,取出样品薄片在 400~4 000  $\text{cm}^{-1}$  波段进行红外扫描。

1.3.7 X-衍射分析 采用 X-射线衍射仪测定淀粉的晶体特性。衍射条件:特征射线 CuK $\alpha$ ,加速电压 40 kV,管电流 30 mA,测量角度  $2\theta$  为 5°~70°,扫描速度 4°/min。

### 1.3.8 淀粉的透明度和持水性

(1) 透明度:用蒸馏水将淀粉样品配成浓度为 1% 的淀粉乳,沸水糊化 15 min,糊化过程中不断添加蒸馏水以保持淀粉乳体积不发生变化,冷却到室温后,在 620 nm 波长处分别测定放置 0,1,3,6,12 h 时淀粉糊的吸光率。用蒸馏水作为空白参比,设其透光率为 100%,以淀粉糊的透光率值表示淀粉糊的透明度。

(2) 持水性:将 50 mg 淀粉样品分散于 10 mL 水中,置于 45,55,65,75,85 °C 水浴 1 h,冷却至室温后,6 000 r/min 离心 15 min,弃掉上清液,擦干离心管内、外壁所附着的水分后,称沉淀质量,按式(1)计算持水力。

$$WHC = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

WHC——持水力,%;

$m_1$ ——沉淀质量, g;

$m_2$ ——样品质量, g。

1.3.9 体外消化特性分析 采用 In-Vitro 模型系统研究怀山药原淀粉和抗性淀粉的消化特性。

(1) 标准曲线制作:参照史苗苗等<sup>[23]</sup>的方法制备得到的标准曲线方程为: $y=1.4563x+0.0627, R^2=0.9944$ 。

(2) 体外消化性能测定:参照史苗苗等<sup>[23]</sup>的方法略加修改如下:称取淀粉样品 200 mg, 加入 20 mL 磷酸盐缓冲液和 15 mL 猪胰  $\alpha$ -淀粉酶(260 U/mL)溶液, 混匀后装入透析袋中, 然后将透析袋置于盛有 400 mL 磷酸盐缓冲液的烧杯中, 再在 37 °C 恒温震荡水浴中进行消化反应, 然后分别于 1, 2, 3, 4, 5, 6 h 时取出一定量的消化渗析液, 稀释一定倍数后, 测定其中麦芽糖含量。按式(2)~(4)计算整个体系中消化产物量、还原糖释放量和平均消化速度。

$$CHO = C \times D \times (435 - S) \times 0.001, \quad (2)$$

$$V = \frac{CHO}{W_1 \times H}, \quad (3)$$

$$RT = \frac{CHO}{W_0} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

$C$ ——标准曲线得出的麦芽糖含量, mg;

$D$ ——消化液的稀释倍数;

$CHO$ ——体系中产生的水解糖的含量, mg;

435——整个体系的溶液体积, mL;

$S$ ——每次取出的消化液体积, mL;

0.001——换算系数;

$V$ ——平均消化速度, mg/(g·h);

$W_1$ ——样品的质量, g;

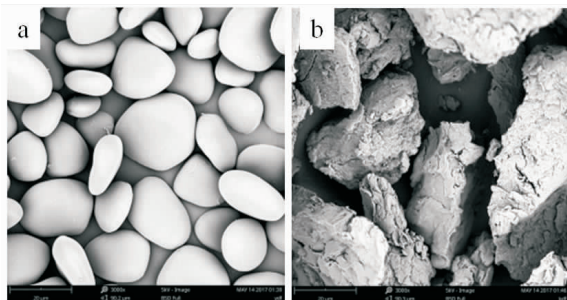
$W_0$ ——总干物质的量, g;

$H$ ——反应时间, h。

## 2 结果与分析

### 2.1 淀粉的超微结构

由图 1(a)可知,原淀粉表面光滑,颗粒完整,呈不规则且大小不一的椭球型、球形、三角形等多种形态。通过压热法制备的抗性淀粉[图 1(b)]颗粒特征消失,呈现疏松的片层状结构。出现此现象可能是高温使淀粉发生糊化,导致其颗粒结构被破坏,而直链淀粉则从淀粉颗粒中溶出,待冷却时,直



(a) 原淀粉 (b) 抗性淀粉

图 1 原淀粉及抗性淀粉的电镜扫描图

Figure 1 Scanning electron microscopy of raw starch and resistant starch

链淀粉会重新排列形成双螺旋结构而形成非常稳定的结晶结构,进而在耐高温  $\alpha$ -淀粉酶和糖化酶的作用下,粗抗性淀粉中的可溶性淀粉颗粒被酶解,从而使纯化抗性淀粉呈现表面疏松的片状结构<sup>[24]</sup>。怀山药抗性淀粉表面疏松的结构可能也是其吸水能力增加的原因之一。

### 2.2 淀粉的热力学特性

怀山药原淀粉及其抗性淀粉的 DSC 图谱见图 2,其对应曲线参数见表 1。由表 1 可知,怀山药原淀粉的糊化温度为 76.41 ~ 89.49 °C,在 83.33 °C 处有吸热峰,糊化焓为 74.47 J/g;抗性淀粉的糊化温度高于原淀粉,为 103.77 ~ 109.64 °C,在 107.21 °C 处有吸热峰,糊化焓为 141.44 J/g。怀山药抗性淀粉的糊化温度高于原淀粉,与玉米、小麦和马铃薯淀粉及其抗性淀粉的热特性相似<sup>[25]</sup>,但与这些抗性淀粉相比,怀山药抗性淀粉的吸热峰温度较低,可能与其晶体结构不致密、结晶度不高有关。淀粉颗粒经压热处理制备抗性淀粉时,淀粉链重排形成更致密的结晶结构,因此在糊化时没有发生吸水膨胀,也就没有形成糊化吸热峰。抗性淀粉的晶体结构热稳定性高,因此需要更多的热量使其发生非晶化相变,故导致其相变吸热峰吸热焓增大<sup>[26]</sup>。怀山药抗性淀粉具有较高的热稳定性,可以经受大多数食品加工过程。

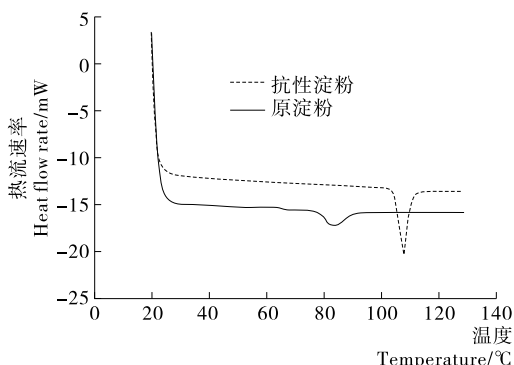


图 2 怀山药原淀粉及抗性淀粉的热力学特性曲线图

Figure 2 The thermodynamic characteristic curve of raw starch and resistant starch from *Dioscorea oppositifolia* Thunb. cv. Huaqing

表 1 原淀粉及抗性淀粉的热力学特性参数表

Table 1 The thermodynamic parameters of starch and resistant starch

种类	$T_o/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
原淀粉	76.41±0.04	83.33±0.12	89.49±0.05	74.47±0.10
抗性淀粉	103.77±0.52	107.21±0.34	109.64±0.06	141.44±0.12

### 2.3 淀粉的碘吸收特性

直链淀粉的最大吸收峰在 600~640 nm,支链淀粉的最大吸收峰在 520~560 nm<sup>[27]</sup>。由图 3 可知,抗性淀粉-碘复合物的最大吸收峰在 580 nm,位于直链淀粉与支链淀粉之间,且由直链淀粉处向支链淀粉处偏移,表明怀山药淀粉经压热处理后改变了直链淀粉构象,其络合碘分子的数目减少,颜色变浅,吸光值减小,最大吸收波长向较短波长方向移

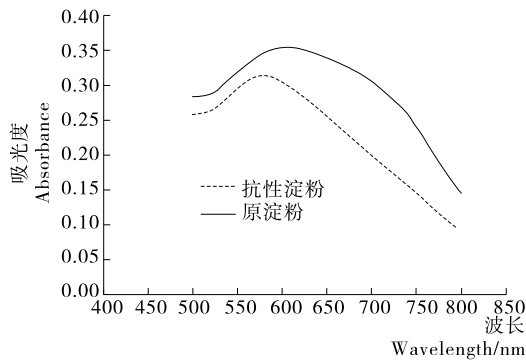


图3 怀山药原淀粉及抗性淀粉的碘吸收曲线

Figure 3 Iodine absorption curves of raw starch and its RS from *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Huaqing

动。另外,抗性淀粉-碘复合物的吸收峰比原淀粉窄,说明怀山药抗性淀粉的分子质量分布比较集中<sup>[28]</sup>。

### 2.4 淀粉的红外光谱分析

由图4可知,原淀粉和抗性淀粉均有以下吸收峰:  $3\ 365.87\ \text{cm}^{-1}$  和  $3\ 433.84\ \text{cm}^{-1}$  处为缔合-OH的伸缩振动峰;  $2\ 933.55\ \text{cm}^{-1}$  和  $2\ 936.25\ \text{cm}^{-1}$  处为饱和-CH的伸缩振动峰;  $1\ 653.66\ \text{cm}^{-1}$  和  $1\ 651.80\ \text{cm}^{-1}$  处为醛基C=O的伸缩振动峰;  $1\ 161.93\ \text{cm}^{-1}$  和  $1\ 158.92\ \text{cm}^{-1}$  处为与伯醇羟基相连的C-O伸缩振动峰;  $993.79\ \text{cm}^{-1}$  和  $1\ 000.82\ \text{cm}^{-1}$  处为与仲醇羟基相连的C-O-C伸缩振动峰;  $861.99\ \text{cm}^{-1}$  和  $857.00\ \text{cm}^{-1}$  处为D-吡喃葡萄糖的吸收带峰。比较原淀粉和抗性淀粉红外图谱也可发现,怀山药淀粉在  $929.38\ \text{cm}^{-1}$  处有D-吡喃葡萄糖的非对称伸缩振动,在  $766.68\ \text{cm}^{-1}$  处有D-吡喃葡萄糖的对称性伸缩振动,而怀山药抗性淀粉在这些波段均没有吸收峰,说明原淀粉经压热处理后D-吡喃结构被破坏。总体而言,压热处理前后淀粉的化学结构相似,没有生成新的基团,说明压热法制备怀山药抗性淀粉主要发生了物理变化。

### 2.5 淀粉的结晶结构

根据淀粉颗粒X射线衍射图,可以将淀粉样品划分为A、B、C3种结晶型,其中C型普遍认为是A型与B型的混合物<sup>[15]</sup>。由图5可知,怀山药原淀粉的X-衍射图谱分别在  $2\theta$  为  $5.76^\circ$ ,  $11.40^\circ$  左右有中强衍射峰,在  $2\theta$  为  $15.12^\circ$ ,  $17.25^\circ$ ,

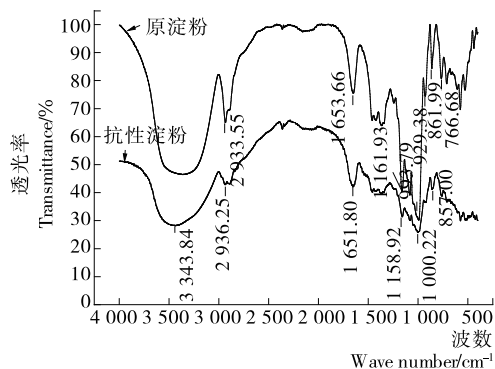


图4 原淀粉和抗性淀粉的红外光谱图

Figure 4 Infrared spectra of raw starch and resistant starch

$23.03^\circ$ 左右有强衍射峰,证明怀山药原淀粉属于C型淀粉,与已报道的淮山药淀粉和长山药淀粉晶型一致<sup>[15,29]</sup>。而怀山药抗性淀粉仅在  $16.85^\circ$ ,  $22.49^\circ$  有较强衍射峰,而且峰形较为弥散,表明压热处理使怀山药淀粉的分子结构被打乱后重新排列,导致结晶结构发生了改变,具体表现为部分特征峰的消失。

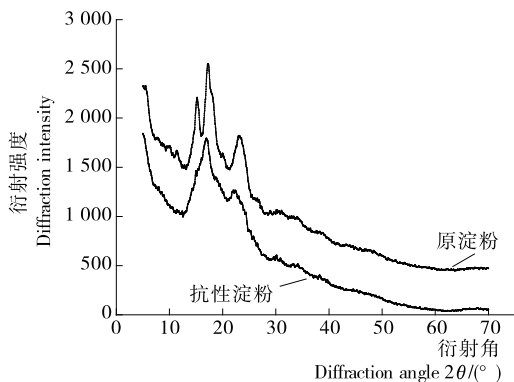


图5 怀山药原淀粉及抗性淀粉的X-射线衍射图谱

Figure 5 X-ray diffraction patterns of raw starch and its purified resistant counterpart

### 2.6 淀粉的透明度和持水性

淀粉糊的透明度能够反映淀粉与水互溶能力以及膨胀程度,直接影响淀粉产品的用途、外观和可接受性。淀粉糊的透明度常用透光率表示,透光率越高,则淀粉糊的透明度越好,所加工的淀粉产品亮度越高<sup>[30]</sup>。由图6(a)可知,怀山药原淀粉糊在各个时间点的透光率均比其抗性淀粉的高,与张丽芬等<sup>[29]</sup>报道的淮山药抗性淀粉结果一致。这可能是由于抗性淀粉中直链淀粉含量高,而直链淀粉分子相互缔合使光线散射增强造成的。因此,怀山药抗性淀粉比较适合应用于黏稠且透明度低的饮料中,以增加饮料的悬浮度和不透明度。

淀粉持水性表示羟基与淀粉分子链由共价结合所产生的结合水量的大小。由图6(b)可知,当水浴温度低于  $75^\circ\text{C}$  时,怀山药抗性淀粉的持水性大于原淀粉的持水性,即抗性淀粉具有更大的持水能力,可能是抗性淀粉制备过程中,糊化后淀粉分子在凝沉过程中分子重排形成具有疏松的片层结构[图1(b)],短直链淀粉分子增多,从而使葡萄糖单元外侧的亲水羟基增多,因而吸水能力增强。然而当水浴温度为  $85^\circ\text{C}$  时,原淀粉的持水性明显增加,显著高于抗性淀粉的,可能是由于该温度高于怀山药淀粉的糊化温度 ( $83.3^\circ\text{C}$ ),原淀粉糊化时大量吸水造成的。

### 2.7 淀粉的体外消化性

相同时间内,消化产物量越多,表示越容易消化。由图7(a)可知,原淀粉与抗性淀粉消化产物的量均随消化时间的延长而增加。但与原淀粉相比,经相同消化时间后,抗性淀粉消化产物的量明显低于原淀粉的,可能是抗性淀粉形成了较稳定的晶格,胰淀粉酶较难与其发挥作用。表2说明随着消化时间的延长,原淀粉和抗性淀粉还原糖释放率增加,但抗性淀粉增加幅度较小,说明抗性淀粉更耐消化。

表 2 原淀粉、抗性淀粉 RS 还原糖释放率

Table 2 Release rate of reducing sugar in raw starch and resistant starch

时间/h	原淀粉/%	抗性淀粉/%
1	13.50±0.14	9.81±0.82
2	13.66±0.26	11.58±1.46
3	17.63±0.87	12.08±0.40
4	18.90±0.16	12.74±0.22
5	21.09±1.80	14.07±0.60
6	24.03±1.83	15.04±1.88

由图 7(b)可知,随着消化时间的延长原淀粉与抗性淀粉的消化速率都减小,尤其是前 3 h,二者的平均消化速率下降较快,而 3 h 之后,消化速率呈现缓慢下降趋势。在相同消化时间时,抗性淀粉的平均消化速率均明显小于原淀粉的。试验所用的猪胰  $\alpha$ -淀粉酶为内切酶,能够对淀粉的  $\alpha$ -1,4 糖苷键进行无规则的水解产生更多的还原糖,但是随着消化时间的延长,大的淀粉分子被水解成小的分子,与酶结合的位点减少,反应速率就减慢,产物的生成速率减慢,但整个体系的产物量是增加的<sup>[16]</sup>。猪胰  $\alpha$ -淀粉酶在水解淀粉时,酶分子首先扩散到淀粉颗粒表面与淀粉链的特定区域结合进行分子的固定,然后催化淀粉链水解。与原淀粉相比,抗性淀粉因淀粉链经过蜷曲折叠形成了坚实的抗酶解的晶体结构,因而更耐消化<sup>[23]</sup>。

### 3 结论

本试验采用碱法制备怀山药淀粉,继而采用压热法制得其抗性淀粉。与原淀粉相比,怀山药抗性淀粉颗粒特征消失,表面疏松呈片层结构,在一定温度范围内持水性增加,热稳定性更高且在体外更耐消化。因此,怀山药淀粉经改性后,淀粉糊性质得到显著改善,更适用于食品加工,尤其是黏稠食品、低透明度饮料、果冻和乳制品等领域。

后期将进一步研究怀山药抗性淀粉在机体内的抗消化作用、益生作用及其机制,深入探讨其肠道保健潜力,为怀山药淀粉资源的有效利用提供理论依据。

### 参考文献

- [1] 陆海波,赵华,田梁,等.怀山药黄酒酿造工艺[J].食品与发酵工业,2016,42(1):76-80.
- [2] 周玥,郭华,周洁.铁棍怀山药中主要营养成分的研究[J].中国食物与营养,2011,17(3):69-71.
- [3] SÁNCHEZ-ZAPATA E, VIUDA-MARTOS M, FERNÁNDEZ-LÓPEZ J, et al. Resistant starch as functional ingredient[J]. Polysaccharides: Bioactivity and Biotechnology, 2015, Doi: 10.1007/978-3-319-16298-034.
- [4] CHEN Bi-xiao, MORIOKA S, NAKAGAWA T, et al. Resistant starch reduces colonic and urinary p-cresol in rats fed a tyrosine-supplemented diet, whereas konjac mannan does not [J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2016, 80(10):1995-2000.

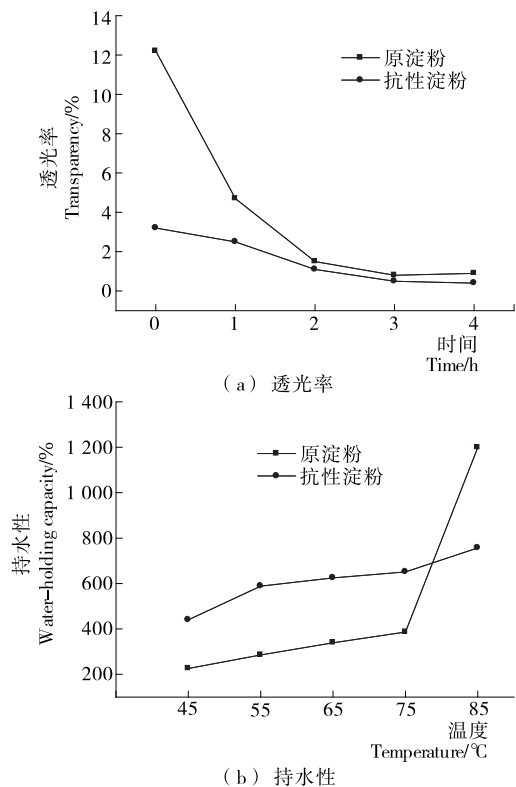


图 6 原淀粉和抗性淀粉的透光率和持水性  
Figure 6 Transparency and water-holding capacity of raw starch and resistant starch

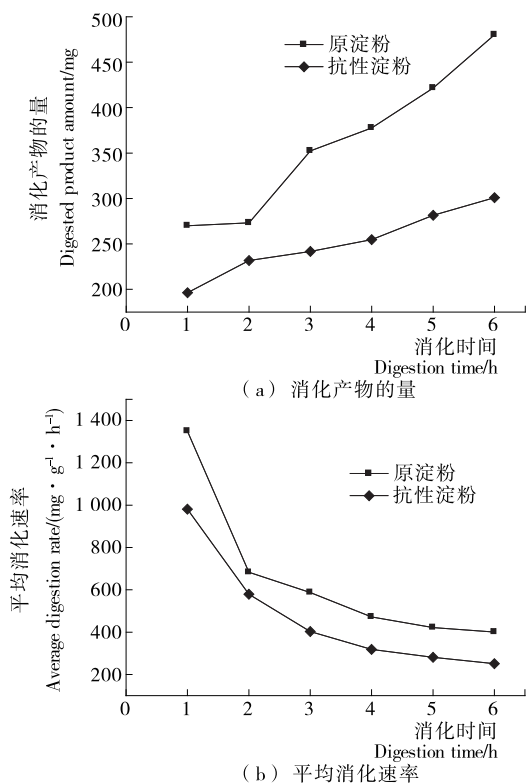


图 7 怀山药原淀粉和抗性淀粉消化产物的量和平均消化速率

Figure 7 Digested product amount and average digestion rate of raw starch and resistant starch

- [5] ZHANG Yi, ZENG Hong-liang, WANG Ying, et al. Structural characteristics and crystalline properties of lotus seed resistant starch and its prebiotic effects[J]. Food Chemistry, 2014, 155: 311-318.
- [6] JIMINEZ J A, UWIERA T C, ABBOTT D W, et al. Impacts of resistant starch and wheat bran consumption on enteric inflammation in relation to colonic bacterial community structures and short-chain fatty acid concentrations in mice[J]. Gut Pathogens, 2016, 8(1): 67.
- [7] 王蕾蕾, 何芳, 樊慧茹, 等. 高抗性淀粉大米血糖生成指数测定及对糖尿病患者血糖调控的干预研究[J]. 营养学报, 2017, 39(2): 197-199.
- [8] KLOSTERBUER A S, THOMAS W, SLAVIN J L. Resistant starch and pullulan reduce postprandial glucose, insulin, and GLP-1, but have no effect on satiety in healthy humans[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(48): 11 928-11 934.
- [9] NICHENAMETLA S N, WEIDAUER L A, WEY H E, et al. Resistant starch type 4-enriched diet lowered blood cholesterol and improved body composition in a double blind controlled cross-over intervention [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2014, 58(6): 1 365-1 369.
- [10] 黄志强, 唐健, 白永亮, 等. 抗性淀粉及其防治肥胖症的研究进展[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 250-253.
- [11] FUENTES-ZARAGOZA E, RIQUELME-NAVARRETE M J, SANCHEZ-ZAPATA E, et al. Resistant starch as functional ingredient: A review[J]. Food Research International, 2010, 43(4): 931-942.
- [12] SCHOLZ-AHRENS K E, ADE P, MARTEN B, et al. Prebiotics, probiotics, and synbiotics affect mineral absorption, bone mineral content, and bone structure[J]. Journal of Nutrition, 2007, 137(3): 838-846.
- [13] 朱平, 孔祥礼, 包劲松. 抗性淀粉在食品中的应用及功效研究进展[J]. 核农学报, 2015, 29(2): 327-336.
- [14] 李昌文, 刘延奇, 李延涛. 怀山药淀粉性质研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(8): 23-26.
- [15] 王丽霞, 王敬臻, 张金玲, 等. 长山山药淀粉的制备及性能[J]. 食品科学, 2017(9): 156-161.
- [16] 宋洪波, 张丽芳, 安凤平, 等. 压热法制备淮山药抗性淀粉及其消化性[J]. 中国食品学报, 2014, 14(7): 59-65.
- [17] 任广跃, 刘亚男, 乔小全, 等. 基于变异系数权重法对怀山药干燥全粉品质的评价[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 53-59.
- [18] 张社利, 许文静, 张会菊, 等. 高效液相色谱法测定怀山药中的薯蓣皂苷元[J]. 理化检验: 化学分册, 2013, 49(1): 33-34, 38.
- [19] ZHANG Li-jing, WANG Mao-shan. Optimization of deep eutectic solvent-based ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Dioscorea opposita* Thunb [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 95: 675-681.
- [20] 赵喜亭, 宋志辉, 赵月丽, 等. 怀山药种栽质量分级标准研究[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2017, 45(3): 118-124.
- [21] 李海兵, 周娜, 赵姣, 等. 怀山药种质资源的包埋玻璃化超低温保存与植株再生[J]. 植物学报, 2010, 45(3): 379-383.
- [22] 刘树兴, 杨麒, 赵广蒙. 直链淀粉含量对小麦 RS3 型抗性淀粉得率的影响[J]. 食品科技, 2016(12): 226-231.
- [23] 史苗苗, 高群玉. 抗性淀粉直链淀粉含量测定及消化性研究[J]. 食品工业科技, 2011(5): 105-107, 112.
- [24] 曾红华. 抗性淀粉的理化性质及其益生效应[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013; 20.
- [25] 李光磊, 李新华. 抗性淀粉应用特性研究[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(6): 78-81.
- [26] COOKE D, GIDLEY M J. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinization: origin of the enthalpic transition[J]. Carbohydrate Research, 1992, 227: 103-112.
- [27] 赵力超, 于荣, 刘欣, 等. 大米抗性淀粉制备工艺优化及特性分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 277-285.
- [28] KWEON M R, SHIN M S. Comparison of enzyme resistant starches forming during heat-moisture treatment and retrogradation of high amylose corn starches [J]. Agricultural Chemistry and Biotechnology, 1997, 40(6): 508-513.
- [29] 张丽芳, 宋洪波, 安凤平, 等. 淮山药淀粉及其抗性淀粉理化性质的比较[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(3): 24-29.
- [30] 杜双奎, 王华, 聂丽洁. 芸豆淀粉理化特性研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(8): 31-35.

(上接第 40 页)

- [8] 罗忠圣, 周镁, 黄秀平, 等. 九头狮子草对小鼠的抑菌、止痒、抗炎作用[J]. 中国老年学杂志, 2016, 36(3): 555-557.
- [9] 覃容贵, 李淑芳. 九头狮子草的抗菌作用研究[J]. 贵阳医学院学报, 2006, 25(2): 130-131.
- [10] 覃容贵, 罗忠圣. 九头狮子草醇提物药效学的实验研究[J]. 中药材, 2006, 29(9): 961-963.
- [11] 陈奇, 卞如濂, 陈修. 中药药理研究方法学[M]. 2 版. 北京: 人民卫生出版社, 2006; 274.
- [12] 徐叔云, 卞如濂, 陈修. 药理实验方法学[M]. 4 版. 北京: 人民卫生出版社, 2010; 1 651.
- [13] 张璐. 脂肪酸及其衍生物抑菌活性定量构效关系研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010; 53.
- [14] 张希, 杨明, 宋飞. 脂肪酸及其衍生物的抑菌活性[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2013, 39(2): 155-160.
- [15] SUN C Q, OCONNOR C J, ROBERTON A M. Antibacterial actions of fatty acids and monoglycerides against helicobacter pylori[J]. Fems Immunology & Medical Microbiology, 2003, 36(1/2): 9-17.
- [16] WALTERS D, RAYNOR L, MITCHELL A, et al. Antifungal activities of four fatty acids against plant pathogenic fungi[J]. Mycopathologia, 2004, 157(1): 87-90.
- [17] 叶湘涓, 熊兴耀, 涂洪强, 等. 桉柑籽油的化学成分分析及其对高脂血症大鼠血脂的影响[J]. 食品与机械, 2009, 25(2): 62-64.
- [18] DESBOIS A P, SMITH V J. Antibacterial free fatty acids: activities, mechanisms of action and biotechnological potential [J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2010, 85(6): 1 629-1 642.
- [19] 李燕, 戴佳锐, 马赛箭, 等. 天然食品防腐剂及其在鲜切果蔬中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 230-233.