

马铃薯抗性淀粉结构特征及体外消化特性的研究

程冰¹, 张乐乐¹, 安艳霞^{1,2}, 李梦琴^{1,2*}

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 郑州 450002; 2. 农业部大宗粮食加工重点实验室, 郑州 450002)

摘要: **目的** 研究马铃薯抗性淀粉的结构特征与体外消化特性。**方法** 以马铃薯淀粉为对照, 采用红外光谱仪、X射线衍射仪技术(X-ray diffraction, XRD)、差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)等手段研究马铃薯抗性淀粉的碘吸收特性、颗粒形貌、晶型结构形态、热特性。通过模拟体外消化评价马铃薯抗性淀粉的消化性能。**结果** 马铃薯淀粉和抗性淀粉碘吸收曲线最大吸收峰均在 580~600 nm, 马铃薯抗性淀粉分子量分布更集中。马铃薯淀粉为 B 型结晶结构, 马铃薯抗性淀粉为 C 型结晶结构。扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)观察显示, 马铃薯淀粉分子颗粒完整, 表面光滑, 整体呈不规则的椭圆形; 马铃薯抗性淀粉分子为不规则多面体, 分子表面粗糙、有凹陷, 且有少量的层状起伏; 红外光谱分析表明抗性淀粉未出现新的基团。DSC 检测发现, 马铃薯抗性淀粉的热稳定性更高; 马铃薯淀粉和抗性淀粉酶解前 2 h 内消化速率迅速增加, 酶解 2 h 后速率减慢, 消化速率逐渐趋于平缓, 血糖指数分别为 70.42、40.50。**结论** 马铃薯抗性淀粉具有较致密的结晶结构和较强的酶抗性, 抗消化性显著。

关键词: 马铃薯抗性淀粉; 结构特征; 体外消化性

Researched on structural characteristics and *in vitro* digestibility of potato resistant starch

CHENG Bing¹, ZHANG Le-Le¹, AN Yan-Xia^{1,2}, LI Meng-Qin^{1,2*}

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;
2. Key Laboratory of Bulk Grain Processing, Ministry of Agriculture, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT: Objective To study the structure and *in vitro* digestibility of potato resistant starch. **Methods** Compared with potato starch, the iodine absorption characteristics, particle morphology, crystal structure and thermal properties of potato resistant starch were studied by infrared spectroscopy, X-ray diffraction (XRD) and differential scanning calorimetry (DSC). The digestibility of potato resistant starch was evaluated by simulated *in vitro* digestion. **Results** The maximum absorption peaks of iodine absorption curve of potato starch and potato resistant starch were all 580-600 nm, and the molecular weight distribution of potato resistant starch was more concentrated. Potato starch was B-type crystal structure, and potato resistant starch was C-type crystal structure. Scanning electron microscope (SEM) observation showed that potato starch molecular particles were complete, smooth and irregular oval; The molecular surface of potato resistant starch was rough, concave and a little undulating; infrared spectroscopy analysis showed that there was no new group in potato resistant starch. DSC results showed that the thermal stability of potato

基金项目: 河南省科技攻关项目(30801347)

Fund: Supported by the Science and Technology Project of Henan Province (30801347)

*通信作者: 李梦琴, 教授, 主要研究方向为谷物化学与精深加工。E-mail: lmqfood@163.com

*Corresponding author: LI Meng-Qin, Professor, School of Food Science and Technology, College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China. E-mail: lmqfood@163.com

resistant starch was higher; the digestibility rate of potato starch and potato resistant starch increased rapidly within 2 h before enzymatic hydrolysis, and slowed down after 2 h. The digestibility rate tended to be flat, and the glycemic indexes were 70.42 and 40.50, respectively. **Conclusion** Potato resistant starch has dense crystal structure, strong enzyme resistance, and has significant digestibility resistance.

KEY WORDS: potato resistant starch; structural characteristics; *in vitro* digestibility

0 引言

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是茄科茄属一年生草本植物,公元前 8000 到 5000 年的南美秘鲁南部地区最早出现人工栽培,并于 17 世纪左右传入中国^[1]。马铃薯富含优质蛋白质、淀粉、矿物质、无机盐、膳食纤维等营养成分,营养丰富,经济价值较高。马铃薯具有缓急止痛、和胃健脾、强生益体等功效,还可预防胆固醇、慢性胃炎、糖尿病等疾病,其富含的膳食纤维能够促进肠道蠕动,这些优点使其在食品行业具有广泛的用途^[2]。马铃薯在国内种植面积广、产量高且其淀粉比其他淀粉纯度高、质量好、易转化,适宜生产抗性淀粉^[3]。

抗性淀粉自 1983 年被 ENGLYST 等^[4]首次发现,且被定义为抗性淀粉(resistant starch, RS);1996 年欧洲抗消化淀粉协会对抗性淀粉的概念做了规范,即在健康人体小肠中不被消化吸收的淀粉及其分解物的总称^[5]。抗性淀粉普遍存在于某些天然食品中,如大米、马铃薯和香蕉等^[6]。这种淀粉较其他淀粉具有难降解、体内消化缓慢、血糖生成指数低等特点,可用来开发低热量的降血糖功能性食品^[7]。目前抗性淀粉已引起人们的广泛关注,并成为营养学的研究热点。

目前有关抗性淀粉制备研究较多,但其结构对消化特性的影响机理研究鲜有报道。本研究针对马铃薯抗性淀粉的结构特征、体外消化性进行研究,探讨其结构与消化特性的关系,为马铃薯淀粉的综合利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

UV-2000 紫外可见分光光度计(上海尼龙柯仪器有限公司); Bruker D8 X-射线衍射仪(德国 Bruker 公司); S-3400MII 型扫描电镜(日本 HTTACHI 公司); Spectrum GX 傅里叶红外光谱仪(Perkin Elmer 公司); DSC-214 差式扫描量热仪(瑞士 METTLER TOLEDO 公司)。

马铃薯原淀粉(南京宁楚商贸有限公司); 马铃薯抗性淀粉(上海优乐滋食品有限公司); 胰蛋白酶(250 U/mg)、糖化酶(10000 U/g)(北京索莱宝科技有限公司); 无水乙醇(分析纯,天津市富宇精细化工有限公司); 氢氧化钾(分析纯,天津市永大化学试剂有限公司); 盐酸(1.18 g/mL,

烟台市双双化工有限公司); 碘(分析纯,天津市大茂化学试剂厂); 二硝基水杨酸(化学纯)、溴化钾、葡萄糖、氢氧化钠、酒石酸钾钠、结晶酚、乙酸钠(分析纯)(国药集团化学试剂有限公司); 亚硫酸钠(分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 淀粉的碘吸收特性

称取淀粉样品(20±0.2) mg, 加入 0.5 mL 无水乙醇润湿样品, 加入 2 mol/L 的 KOH 溶液 1 mL, 使样品充分溶解。加入 10 mL 蒸馏水, 用 0.1 mol/L 的 HCl 溶液调节 pH 至 6.5, 定容至 50 mL。准确移取 10 mL 上述溶液, 加入 80 mL 蒸馏水和 2 mL 碘试剂, 定容至 100 mL, 立即混匀。用紫外分光光度计在波长 450~800 nm 范围内扫描, 记录最大吸收波长^[8]。

1.2.2 扫描电镜分析

抗性淀粉颗粒结果通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)来分析, 将粉末用特制双面胶固定在样品台上。扫描条件: 电压 100 V, 加速电压。通过放大不同的倍数来观察样品表面颗粒形态。

1.2.3 红外光谱分析

将样品和溴化钾置于 105 °C 烘干后, 按样品:溴化钾=1:100 的质量比例加入玛瑙研钵中研好后, 置于压片机中压片, 采用傅里叶变换红外光谱法(Fourier transform infrared spectroscopy, FITR)测定, 在波数 400~4000 cm⁻¹ 范围进行马铃薯淀粉及抗性淀粉红外光谱分析。

1.2.4 X-射线衍射

取样品粉末进行 X-射线衍射(X-ray diffraction, XRD)检测, 试验参数: 特征射线 CuKα, 最大电压, 最大电流 60 mA, 扫描范围(5~60)°, 扫描速度为 2°/min。

1.2.5 抗性淀粉的热力学性能分析

采用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)测定。测试条件: 扫描温度 30~230 °C, 扫描速率 10 °C/min。以空坩埚为参比, 载气为氮气, 流速 30 mL/min。

1.2.6 抗性淀粉的体外消化性分析

(1)葡萄糖标准曲线的绘制

葡萄糖标准溶液: 称取大于 100 mg 的葡萄糖, 103 °C 干燥至恒重, 准确称取 100 mg 葡萄糖, 用蒸馏水溶解, 并定容至 1000 mL。

3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS)显色

剂的配制: 将 1.575 g 3,5-二硝基水杨酸和 65.5 mL 2 mol/L NaOH 溶液溶解于 125 mL 含有 46.25 g 酒石酸钾钠的热溶液中, 搅拌均匀, 再加入 1.25 g 结晶酚和 1.25 g 亚硫酸钠, 冷却后用蒸馏水定容至 250 mL, 摇匀后转移至棕色瓶中, 放置 1 周后备用。

取 7 支 25 mL 的具塞试管, 分别加入葡萄糖标准溶液 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mL, 蒸馏水 2.0、1.8、1.6、1.4、1.2、1.0、0.8 mL, 再分别加入 1.5 mL DNS 溶液, 将各试管摇匀后, 沸水浴 5 min, 取出后迅速流水冷却, 以蒸馏水定容至 25 mL, 在 540 nm 下, 以蒸馏水调零, 测量 1~7 号管的吸光度, 以吸光度为横坐标, 以葡萄糖含量为纵坐标, 绘制标准曲线^[9]。

(2) 体外消化性能测定

称取样品 0.5 g 于离心管中, 加入 20 mL 的乙酸钠缓冲液(0.2 mol/L, pH=5.2), 待缓冲溶液与样品充分混合后, 再加入 10 mL 现配的胰蛋白酶(110 U/mL)和 40 μ L 糖化酶(1000 U/mL), 然后将装有样品的离心管于 37 $^{\circ}$ C 的恒温条件下振荡 0、20、30、60、90、120、150、180、240 min, 用 DNS 法测定其还原糖量^[10]。

参考 MARDIANA AHAMAD 等^[11]和 GOÑI 等^[12]的体外消化动力学方法, 建立动力学模型, 体外模拟人体肠道消化系统, 对抗性淀粉消化结果进行一级动力学拟合, 方程为 $C_t = C_{\infty} \times (1 - e^{-kt})$, 用 Origin 23.0 软件进行模型拟合制图, 并计算出平衡浓度 C_{∞} , 水解平衡常数 k , 利用一级反应方程式计算水解曲线下的面积, 详见公式(1)。

样品水解曲线下的面积 = $C_{\infty} (t_f - t_0) - (C_{\infty}/k) [1 - e^{-k(t_f - t_0)}]$ (1)
其中: C_{∞} 为平衡浓度(t_{180}); t_f 为最终时间, 90 min; t_0 为初始时间, 0 min, k 为水解平衡常数。按照公式(2)(3)计算淀粉水解率、水解指数(hydrolysis index, HI), 结合动力学模型计算血糖生成指数(glycemic index, GI)。

$$\text{水解率}(\%) = \frac{\text{取样样点时已水解葡萄糖}}{\text{样品总含量}} \quad (2)$$

$$\text{水解指数}(\text{HI}) = \frac{\text{取样样点的水解率曲线的面积}}{\text{对照样品水解率曲线下的面积}} \quad (3)$$

GI 值的预测: 采用 Goñi 的方法, 通过测定淀粉在 90 min 时水解指数, 代入其 $\text{GI} = 39.71 + 0.549\text{HI}_{90}$ 得到食品的 GI 值。

2 结果与分析

2.1 马铃薯抗性淀粉的碘吸收特性

直链淀粉的碘最大吸收峰在 600~640 nm, 支链淀粉的碘最大吸收峰在 520~560 nm^[13]。从图 1 中可以看出, 马铃薯淀粉和马铃薯抗性淀粉的碘最大吸收峰在 580~600 nm, 介于直链淀粉与支链淀粉之间, 说明都含有直链和支链淀粉; 马铃薯淀粉的淀粉-碘络合物的最大吸收波

长大于抗性淀粉-碘络合物的最大吸收波长, 说明马铃薯淀粉直链淀粉聚合度略大, 这与张灵超^[14]的报告一致。另外, 马铃薯抗性淀粉的碘络合物吸收峰比马铃薯淀粉窄, 说明抗性淀粉分子量分布更集中^[15]。

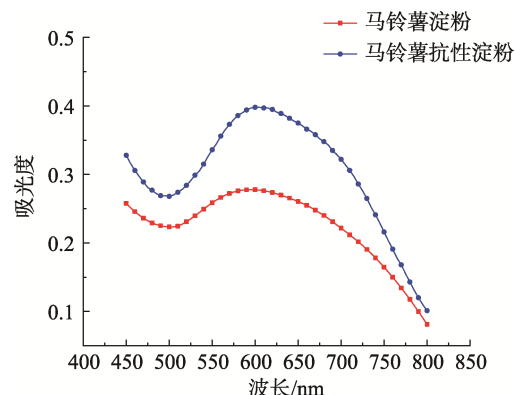


图 1 马铃薯抗性淀粉与马铃薯淀粉的碘吸收曲线
Fig.1 Iodine absorption curves of potato resistant starch and potato starch

2.2 X 射线衍射及相对结晶度

不同晶型的淀粉抗酶解性不同: A 型<B 型<C 型<V 型^[16-17]。图 2 为马铃薯淀粉和马铃薯抗性淀粉 XRD 曲线。图谱中出现多个尖锐的衍射峰, 以此判断出晶体结构存在于淀粉样品中, 结晶数量和质量共同决定了淀粉的抗酶解特性^[14]。由图 2 可知, 马铃薯淀粉在 5.6 $^{\circ}$ 、17.2 $^{\circ}$ 、22.2 $^{\circ}$ 、24.3 $^{\circ}$ 表现强衍射峰, 表现为 B 型结构, 是典型马铃薯淀粉 XRD 图谱^[18]。马铃薯抗性淀粉在 15.3 $^{\circ}$ 、17.4 $^{\circ}$ 、18.3 $^{\circ}$ 、23.2 $^{\circ}$ 表现出强衍射峰, 表现为 C 型结晶结构。C 型结构的抗酶解性大于 B 型, 所以马铃薯抗性淀粉抗酶解性较强。相比于马铃薯淀粉, 马铃薯抗性淀粉出现新峰, 且各特征衍射峰衍射强度都有所增加, 但 B 型结晶结构仍然存在。同时, 马铃薯抗性淀粉在 20.1 $^{\circ}$ 处存在弱衍射峰, 为 V 型结构特征, 推测马铃薯抗性淀粉是排列成晶体阵列的线性淀粉链的单螺旋^[19]。由此可知马铃薯抗性淀粉具有相对稳定的晶体结构, 具有较强的酶解特性, 这与章丽琳等^[3]报道相一致。

2.3 马铃薯抗性淀粉的颗粒形貌分析

如图 3 所示, 马铃薯原淀粉颗粒完整, 表面光滑, 整体呈不规则的椭圆形, 马铃薯抗性淀粉分子变成不规则多面体, 分子表面粗糙, 有凹陷, 且有少量的层状起伏, 附有少量小圆形颗粒。马铃薯淀粉在结构上较为脆弱, 导致对热处理及剪切力较敏感, 如食品加工过程中的杀菌、冷却等环节, 所以马铃薯淀粉在加工成马铃薯抗性淀粉时, 由于化学、物理或生物加工必然会引起一系列淀粉功能性质发生变化^[20]。马铃薯抗性淀粉与原淀粉形貌差异显著, 可能是提取过程破坏了马铃薯淀粉的功能性质, 从而破坏了马铃薯淀粉应有的完整的颗粒形貌。

2.4 红外光谱的分析

从图 4 可以看出,马铃薯淀粉和马铃薯抗性淀粉在 3290 cm^{-1} 附近出现了一个较强并且较宽的吸收峰,此峰是反映薯类中羟基(O-H)伸缩振动的标志;在 2888.97 、 2928.80 cm^{-1} 附近出现了一个中等强度较宽的吸收峰,此峰是反映薯类中-CH 伸缩振动标志;2 种淀粉在 2300 cm^{-1} 左右都出现一个强而尖锐的峰,推测淀粉中可能含有三键或累计双键伸缩振动。 1640 cm^{-1} 左右出现一个较弱的

吸收峰,此峰对应醛基 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩运动;在 996.56 、 1000.91 cm^{-1} 出现的吸收峰,反映了淀粉的不对称环形模式 α -1,4 糖苷键(C-O-C)的骨架振动; 750 cm^{-1} 左右观察到淀粉的特征吸收峰^[21]。马铃薯淀粉及马铃薯抗性淀粉的红外光谱图没有显著差异,其具有相似的主要特征吸收峰,说明马铃薯抗性淀粉没有形成新的基团,但马铃薯抗性淀粉在 2928.80 cm^{-1} 处吸收峰的相对强度增大,说明抗性淀粉分子间氢键作用较强^[22]。

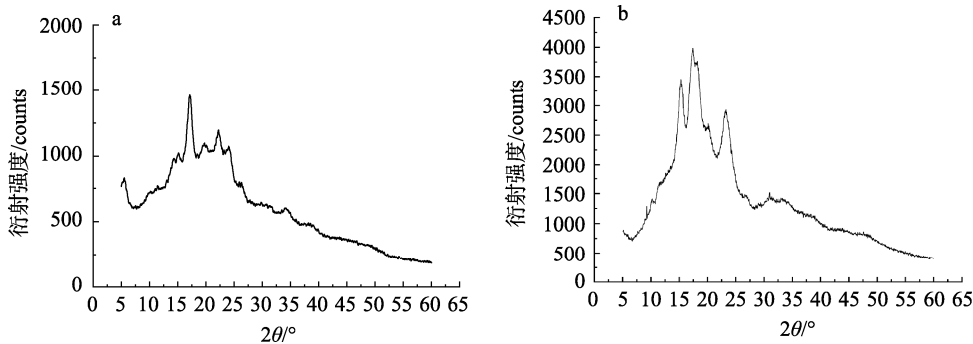


图 2 马铃薯淀粉(a)及马铃薯抗性淀粉(b)的 X-射线衍射图谱
Fig.2 X-ray diffraction patterns of potato starch (a) and potato resistant starch (b)

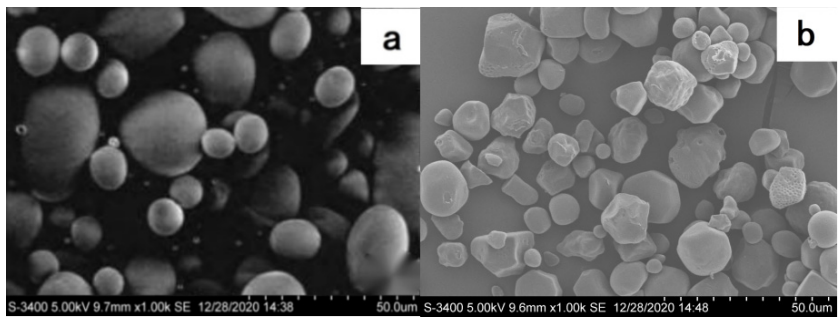


图 3 马铃薯淀粉(a)及马铃薯抗性淀粉(b)颗粒扫描电子显微镜图
Fig.3 Scanning electron micrographs of potato starch (a) and potato resistant starch (b) granules

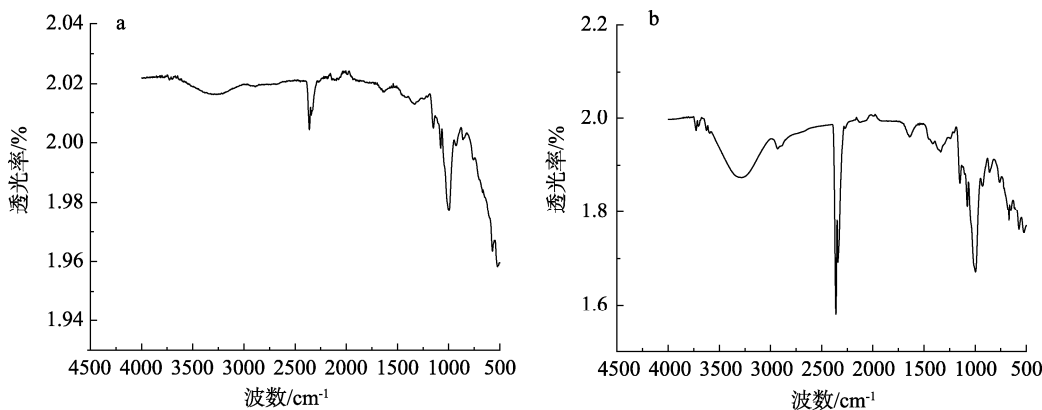


图 4 马铃薯淀粉(a)及抗性淀粉(b)的红外谱图
Fig.4 Infrared spectrograms of potato starch (a) and resistant starch (b)

2.5 马铃薯抗性淀粉的结晶特性分析

淀粉的热力学性质可以很好的反映其结构在加工过程中的变化。由表 1 可以得出, 马铃薯抗性淀粉的 T_0 、 T_p 、 T_c 都大于马铃薯淀粉, 说明马铃薯抗性淀粉具有较高的糊化温度^[23]。LOPEZRUBIO 等^[24]研究发现热焓值的变化来源于支链淀粉晶体的融化及晶体堆积和双螺旋结构的破坏。马铃薯抗性淀粉的热焓值大于马铃薯淀粉, 说明了马铃薯抗性淀粉具有更致密的双螺旋结构, 因此破坏这种结构需要更多的热量^[24]。

为了更好地定量分析马铃薯淀粉及马铃薯抗性淀粉的性质, 本研究对糊化焓(ΔH)及峰值温度与起始温度之差(T_p-T_0)之间的商值进行统计分析, 此商值被称为峰高指数(peak height index, PHI)。PHI 与 ΔH 成正比例关系, 与 T_c (糊化温度范围)呈反比例关系, 因此 PHI 表示吸热峰的相对形状。PHI 值大表现为窄小尖锐的吸收峰, 说明淀粉分子分布集中, 颗粒形状规则; PHI 值小表现为宽大平缓的吸收峰, 说明分子分布分散, 颗粒形状凌乱^[25]。马铃薯抗性淀粉的峰高指数的大于马铃薯淀粉, 表明了马铃薯抗性淀粉分子分布比较集中, 颗粒形状比较规则。这与碘吸收特性测定结果一致。

表 1 马铃薯淀粉和马铃薯抗性淀粉的热力学参数 Table 1 DSC parameters of potato starch and potato resistant starch		
样品	马铃薯淀粉	马铃薯抗性淀粉
$T_0/^{\circ}\text{C}$	60.7	178.6
$T_p/^{\circ}\text{C}$	65.2	182.4
$T_c/^{\circ}\text{C}$	71.1	191.6
$(T_c-T_0)/^{\circ}\text{C}$	10.4	13.0
ΔH	12.37	156.6
PHI	2.75	41.21

注: T_0 : 起始温度; T_p : 峰值温度; T_c : 结束温度; ΔH : 糊化焓。

2.6 马铃薯抗性淀粉的体外消化特性分析

图 5 为马铃薯淀粉与抗性淀粉的体外消化速率, 在前 2 h 内, 淀粉在胰蛋白酶及糖化酶作用下分解为小分子的还原糖, 消化率迅速增加; 随着消化时间的延长, 大的淀粉分子被水解, 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, 但整个系统的产物量仍在增加^[26]。在相同的消化时间里, 马铃薯淀粉的消化速率大于马铃薯抗性淀粉, 表明马铃薯抗性淀粉使机体血糖值升高较慢。

通过 Origin 23.0 软件拟合一级动力学模型(图 6), 得到动力学公式, 马铃薯淀粉水解率动力学公式为: $C_t=48.06\times(1-e^{-0.016t})$, $r^2=0.9953$; 马铃薯抗性淀粉水解率动力学公式为: $C_t=7.21\times(1-e^{-0.021t})$, $r^2=0.9519$ 。计算得到马铃薯淀粉的 HI_{90} 为 55.93, 血糖指数为 70.42, 属于高血糖指数产品($70<GI$)。马铃薯抗性淀粉的 HI_{90} 为 26, 血糖指数为 40.50, 属于低血糖指数产品($GI<55$), 故马铃薯抗性淀粉能有效降低食品的血糖指数。马铃薯淀粉及抗性淀粉的动力学方程特征参数、水解指数、血糖指数如表 2 所示。

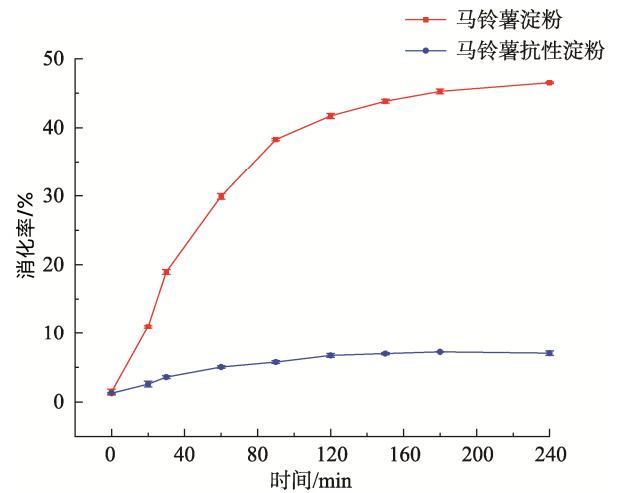


图 5 马铃薯淀粉及马铃薯抗性淀粉的体外消化速率
Fig.5 In vitro digestion rates of potato starch and potato resistant starch

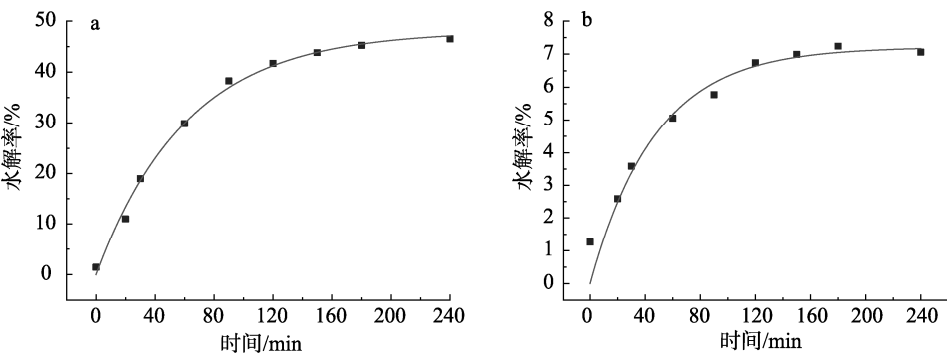


图 6 马铃薯淀粉(a)和抗性淀粉(b)的体外消化一级动力学拟合曲线
Fig.6 First order kinetics fit curves of in vitro digestion of potato starch (a) and resistant starch (b)

表 2 马铃薯淀粉及抗性淀粉的动力学方程特征参数、水解指数、血糖指数

Table 2 Characteristic parameters, hydrolysis indexes, blood glucose indexes of potato starch and potato resistant starch

样品	C_{∞}	k	HI ₉₀	GI
马铃薯淀粉	48.06	0.016	55.93	70.42
马铃薯抗性淀粉	7.21	0.021	26	40.50

3 结 论

本研究发现马铃薯抗性淀粉的分子质量分布较马铃薯淀粉集中; 马铃薯淀粉为 B 型结晶结构, 马铃薯抗性淀粉为 C 型结晶结构; SEM 观察显示马铃薯抗性淀粉分子为不规则多面体, 表面粗糙、有凹陷、且有少量的层状起伏; 马铃薯抗性淀粉的 T_0 、 T_p 、 T_c 、 (T_c-T_0) 、 ΔH 都高于马铃薯淀粉, 说明其分子质量比较集中、晶体结构比较紧密。经体外消化实验发现: 在前 2 h 内, 酶解速率迅速增加, 酶解 2 h 后速率减慢, 消化速率逐渐趋于平缓, 马铃薯抗性淀粉的血糖指数大于马铃薯淀粉, 所以马铃薯抗性淀粉具有抗酶解的特性, 可有效降低血糖指数。

目前关于抗性淀粉理化性质及结构特征的研究很多, 但是对于其理化性质及其结构特征对体外消化作用的机制、关系及分子水平的研究很少, 需要进一步的研究。本实验目的是研究马铃薯天然抗性淀粉的结构特征及体外消化特性的关联性, 但马铃薯淀粉在结构上较为脆弱, 马铃薯抗性淀粉提取过程中易遭到破坏, 使马铃薯抗性淀粉的研究受到了较大的限制。因此, 为满足马铃薯抗性淀粉在研究应用中所需要的特性, 需要对其进行适当结构修饰以满足各种加工性能和产品性能。马铃薯抗性淀粉具有有序的致密的分子晶体结构、较强的酶抗性, 可应用于功能性保健食品的开发。本研究结果可为开发马铃薯抗性淀粉的系列食品提供依据。

参考文献

[1] 樊佳玫, 俞东宁, 韩备竞, 等. 螺杆挤压对马铃薯淀粉消化性及血糖指数的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(14): 3749–3754.
FAN JM, YU DN, HAN BJ, *et al.* Effects of screw extrusion on starch digestibility and glycemic index in potato [J]. J Food Saf Qual, 2018, 9(14): 3749–3754.

[2] 买玉花, 王彩霞, 贺晓光. 马铃薯饼干的工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(5): 155–161.
MAI YH, WANG CX, HE XG, *et al.* Potato biscuits process optimization [J]. J Food Res Dev, 2019, 40(5): 155–161.

[3] 章丽琳, 曾希珂, 张喻, 等. 马铃薯抗性淀粉理化性质的研究[J]. 中国酿造, 2016, 35(7): 117–122.
ZHANG LL, ZENG XK, ZHANG Y, *et al.* Studies on the physicochemical properties of potato resistant starch [J]. China Brew, 2016, 35(7): 117–122.

[4] ENGLYST HN, KINGMAN SM. Classification and measurement of

nutritionally important starch fractions [J]. Eur J Clin Nutr, 1992, (2): 33–50.

[5] BAGHURST RA. Dietary fiber, nonstarch polysaccharide and resistant starch [J]. Food Aust, 1996, 48(3): 1–35.

[6] 饶雪甜, 尹洁琼, 蔡锦红, 等. 青香蕉抗性淀粉提取工艺优化及物理特性研究[J]. 食品工业, 2017, 38(2): 26–31.
RAO XT, YIN JQ, CAI JH, *et al.* Study on extraction process optimization and physical properties of resistant starch from green banana [J]. Food Ind, 2017, 38(2): 26–31.

[7] 闫国森, 郑环宇, 孙美馨, 等. 抗性淀粉生理功能及作用机制的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 339–346.
YAN GS, ZHENG HY, SUN MX, *et al.* Research progress on physiological function and action mechanism of resistant starch [J]. Food Sci, 2020, 41(21): 339–346.

[8] TAKEDA C, TAKEDA Y, HIZUKURI S. Physicochemical properties of lily starch [J]. Cere Chem, 1983, 60: 212–216.

[9] 薛慧, 张国治, 吕飞杰, 等. 抗性淀粉测定方法的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2012, (4): 57–60.
XUE H, ZHANNG GZ, LV FJ, *et al.* Study on the determination method of resistant starch [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2012, (4): 57–60.

[10] 张灿, 张康逸, 朱笑鹏, 等. 菊粉改善酥性饼干的品质及降低消化速率[J]. 现代食品科技, 2020, 36(2): 166–171.
ZHANG C, ZHANG KY, ZHU XP, *et al.* Inulin improves the quality of crisp biscuit and reduces the digestion rate [J]. Mod Food Sci Technol, 2020, 36(2): 166–171.

[11] MARDIANAAHAMAD Z, NOORAZIA-HABDUL A. *In vitro* starch hydrolysis and estimated glycemic index of bread substituted with different percentage of chempedak (*Artocarpus integer*) seed flour [J]. Food Chem, 2009, 117(1): 64–68.

[12] GOÑI I, GARCIA-ALONSO A, SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. Nutr Res, 1997, 17(3): 427–437.

[13] 陈平生, 黄智君, 王娟. 不同热处理方式对大蕉抗性淀粉理化性质的影响[J]. 现代食品科技, 2012, 28(1): 9–13, 51.
CHEN PS, HUANG ZJ, WANG J. Effects of different heat treatment methods on physicochemical properties of plantains resistant starch [J]. Mod Food Sci Technol, 2012, 28(1): 9–13, 51.

[14] 张灵超. 马铃薯块茎抗性淀粉形成的影响因素及理化特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
ZHANG LC. Study on the factors affecting the formation of resistant starch in potato tuber and its physical and chemical properties [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.

[15] 李光磊, 刘秀芳, 曾洁. 抗性淀粉分子结构特征研究[J]. 食品工业科技, 2008, (8): 156–159.
LI GL, LIU XF, ZENG J. Study on molecular structure of resistant starch [J]. Food Ind Sci Technol, 2008, (8): 156–159.

[16] DEMIRKESEN-BICAK H, TACER-CABA Z, NILUFER-ERDIL D. Pullulanase treatments to increase resistant starch content of black chickpea (*Cicer arietinum* L.) starch and the effects on starch properties [J]. Int J Biol Macromole, 2018, 111(7): 505–513.

[17] 张焕新. 抗性淀粉酶法制备及其特性与应用的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012.

- ZHANG HX. Preparation of resistant amylase and its characteristics and application [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012.
- [18] 李远, 辛士刚, 赵秀红, 等. 瓜尔豆胶对马铃薯淀粉消化性和糊化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 61–65, 72.
- LI Y, XIN SG, ZHAO XH, *et al.* Effects of guar gum on the digestibility and pasting properties of potato starch [J]. Food Ind Sci Technol, 2019, 40(8): 61–65, 72.
- [19] 刘珂. 热处理、交联反应对马铃薯淀粉性质的对比研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- LIU K. Comparative study on the properties of potato starch by heat treatment and crosslinking reaction [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [20] 张馨文. 马铃薯氧化淀粉对面团特性及面制品品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- ZHANG XW. Effects of oxidized potato starch on dough properties and qualities of flour products [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014.
- [21] 王胜男. 马铃薯全粉性质和应用性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2018.
- WANG SN. Study on the properties and application of potato powder [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2018.
- [22] 赵郁聪, 王婧, 靳刘萍, 等. 不同淀粉原料对淀粉-壳聚糖复合膜性能的影响[J]. 包装工程, 2021, 42(7): 151–158.
- ZHAO YC, WANG J, JIN LP, *et al.* Properties of starch-chitosan composite films based on different starches [J]. Packag Eng, 2021, 42(7): 151–158.
- [23] 徐忠, 王胜男, 孙月, 等. 马铃薯雪花全粉与淀粉的结构与性质分析[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(16): 46–50.
- XU Z, WANG SN, SUN Y, *et al.* Analysis of the structure and properties of the potato whole powder and starch [J]. Food Res Dev, 2018, 39(16): 46–50.
- [24] LOPEZRUBIO A, FLANAGAN BM, GILBERT EP, *et al.* A novel approach for calculating starch crystallinity and its correlation with double helix content: a combined. XRD and NMR study [J]. Biopolymers, 2008, 89(9): 761–768.
- [25] 刘敏. 不同方法制备的马铃薯抗性淀粉结构与性质的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- LIU M. Study on structures and properties of potato resistant starch prepared with different methods [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [26] 宋洪波, 张丽芳, 安风平, 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.
- SONG HB, ZHANG LF, AN FP, *et al.* Preparation and digestibility of resistant starch from yam [J]. Chin J Food Sci Technol, 2014, 14(7): 59–65.

(责任编辑: 郑丽王欣)

作者简介



程 冰, 硕士, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: 1518050822@qq.com



李梦琴, 教授, 主要研究方向为谷物化学与精深加工。

E-mail: lmqfood@163.com