

常压水热处理下红芸豆细胞中淀粉颗粒及其体外消化特性的变化

肖艳^{1,2}, 邓媛元², 张雁², 唐小俊², 刘光², 周鹏飞², 赵志浩², 曾嘉锐², 李萍^{2*}, 刘莹^{1,3*}

(1. 天津科技大学生物工程学院, 天津 300457) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)
(3. 天津科技大学省部共建食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457)

摘要: 为探究不同温度和时间的热处理对杂豆内含淀粉结构及体外消化性的影响, 该研究以红芸豆为对象, 通过常压水热加工获取红芸豆细胞, 并结合形态学、X 射线衍射、热力学性质及体外模拟消化等手段分析其内含淀粉结构及体外消化性变化。结果显示, 80~100 ℃处理的红芸豆细胞均保持形态完整, 细胞内淀粉未完全糊化, 晶体结构被部分破坏但仍保持一定相对结晶度 (12.97%~16.54%)。相较于处理时长, 温度对淀粉结晶结构的影响更为显著。随热处理温度升高 (80~100 ℃) 及时间延长 (25~45 min), 细胞内异硫氰酸葡聚糖探针的荧光强度增强, 淀粉体外消化速率增大 ($0.004\ 6\sim0.006\ 6\ \text{min}^{-1}$), 消化程度升高 (56.25%~69.25%)。80~90 ℃时, 细胞壁通透性是淀粉消化性的主要影响因素; 当升温至 100 ℃时, 淀粉消化性可能受细胞壁通透性和晶体变化共同影响。因此, 调节常压水热加工的温度及时长, 可有效调控红芸豆细胞内含淀粉的消化特性。该研究有助于揭示杂豆在热加工过程中淀粉组分的营养特性变化规律, 为杂豆功能性食品开发提供一定理论指导。

关键词: 红芸豆子叶细胞; 常压水热处理; 细胞壁; 淀粉; 体外消化特性

文章编号: 1673-9078(2026)03-116-125

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.1917

Changes in Starch Granules and *in vitro* Digestibility Properties of Red Kidney Bean Cells under Atmospheric Hydrothermal Treatment

XIAO Yan^{1,2}, DENG Yuanyuan², ZHANG Yan², TANG Xiaojun², LIU Guang², ZHOU Pengfei², ZHAO Zhihao²,
ZENG Jiarui², LI Ping^{2*}, LIU Ying^{1,3*}

(1.College of Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China) (2.Sericultural&Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory Processing, Guangzhou 510610, China) (3.State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

引文格式:

肖艳,邓媛元,张雁,等.常压水热处理下红芸豆细胞中淀粉颗粒及其体外消化特性的变化[J].现代食品科技,2026,42(3): 116-125.

XIAO Yan, DENG Yuanyuan, ZHANG Yan, et al. Changes in starch granules and *in vitro* digestibility properties of red kidney bean cells under atmospheric hydrothermal treatment [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 116-125.

收稿日期: 2024-12-25; 修回日期: 2025-02-28; 接受日期: 2025-03-04

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (32001691); 国家自然科学基金区域联合项目 (U22A20539); 科技创新战略专项资金 (高水平农科院建设) (R2020PY-JX009; R2019YJ-YB1001; R2021PY-QF007)

作者简介: 肖艳 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: yanx0203@foxmail.com

通讯作者: 刘莹 (1989-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品营养与功能食品, E-mail: yingliu@mail.tust.edu.cn; 共同通讯作者: 李萍 (1990-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 功能碳水化合物, Email: liping2019@gdaas.cn

Abstract: Red kidney bean cells were isolated under atmospheric hydrothermal treatment with varying temperatures and incubation periods to elucidate how these conditions affect the structure and *in vitro* digestibility of starch in bean cells. A comprehensive analysis was conducted using a combination of morphological, X-ray diffraction, thermal property, and *in vitro* simulated digestion analyses. Results indicated that red kidney bean cells isolated at 80–100 °C maintained their morphological integrity. The starch within these cells was not fully gelatinized, and the crystal structure was partially disrupted, retaining a degree of relative crystallinity (12.97%~16.54%). Compared to processing duration, temperature imposed a more significant impact on the starch crystal structure. With an increase in heat treatment temperature (80~100 °C) and incubation period (25~45 min), increases were observed in the fluorescence intensity of the intracellular dextran isothiocyanate probe, *in vitro* digestion rate of starch ($0.0046\sim0.0066\text{ min}^{-1}$), and degree of digestion (56.25%~69.25%). Between 80 and 90 °C, cell wall permeability was the major influencing factor of starch digestibility; both cell wall permeability and starch crystallinity simultaneously affected starch digestibility in cells when the temperature rose to 100 °C. Therefore, by modulating the temperature and duration of atmospheric hydrothermal treatment, the digestive properties of starch contained in red kidney bean cells can effectively be regulated. This study identified changes in the nutritional characteristics of starch components in legumes during thermal processing, providing theoretical guidance for the development of legume-based functional foods.

Key words: red kidney bean cells; atmospheric hydrothermal treatment; cell wall; starch; *in vitro* digestibility properties

近年来,不合理的膳食结构导致糖尿病和肥胖症等慢性疾病发病率上升,对公共卫生安全构成巨大挑战,饮食干预已被证明是有效的防控手段^[1,2]。淀粉作为主要的能量来源,与餐后血糖水平密切相关,减少快速消化淀粉的摄入是调控餐后血糖的有效策略之一^[3,4]。杂豆富含慢消化淀粉并具有低血糖应答指数,已被证实能降低患II型糖尿病和肥胖症等慢性疾病的风险^[5,6]。研究表明,杂豆的低血糖应答指数主要归因于其致密的细胞厚壁结构以及细胞内的蛋白质、脂质和非淀粉多糖等基质网络^[7,8]。一方面,完整的细胞壁与内部基质对淀粉起着协同屏障作用,外部消化酶较难穿透细胞壁,从而降低了淀粉对酶的敏感性^[9,10]。另一方面,细胞壁与蛋白质基质会阻碍淀粉颗粒的吸水膨胀与糊化,减少消化酶的扩散及其与淀粉底物的结合程度^[11]。此外,细胞壁还可以通过非特异性结合 α -淀粉酶,进一步降低淀粉的酶解程度^[12]。

然而,杂豆因适口性差和含有植酸、酶抑制剂等抗营养因子^[13],通常需要经过浸泡和热加工处理以改善口感和营养物质的生物可利用性^[14]。热加工处理中的温度、压力和水分等因素的变化可能破坏细胞壁和亚细胞结构,从而影响酶对淀粉的生物可及性^[10,11]。Li等^[9]通过热处理和机械力相结合的方法分离出完整的鹰嘴豆细胞,发现随着干热处理温度升高,细胞内蛋白类抑制组分对淀粉酶活性的抑制作用减弱,淀粉的消化程度逐渐增加。Pallares等^[15]发现,在95 °C下延长菜豆热处理时间(30~180 min),其子叶细胞中淀粉水解率显著提高。Yao等^[16]进一步指出,高湿度压热处理虽未显著改变鹰嘴豆细胞内含淀粉结晶度,但会

通过增加细胞壁通透性提升淀粉消化速率和消化程度。热加工下细胞壁结构的破坏可能促进淀粉的糊化与酶的可及性,同时热处理导致的蛋白质等抑制组分变性失活可能降低对淀粉酶的抑制作用,协同调控淀粉的体外消化特性。

当前,研究者正持续关注热加工处理对杂豆中淀粉消化特性的影响,但仍存在一定的局限性。现有研究多采用单一因素调控或极端处理条件,难以反映实际加工中多参数协同作用的复杂效应。温度与时间参数的交互作用对细胞壁通透性(孔隙率变化)与基质组分的协同影响机制尚不明确,因此,本研究以红芸豆为研究对象,通过建立热处理分离的子叶细胞模型,分析常压水热处理下温度-时间梯度对细胞壁通透性、淀粉形貌结构及消化动力学的影响。研究结果可为优化杂豆热加工工艺、精准控制杂豆食品的中淀粉的体外消化特性提供理论依据,对开发功能性杂豆健康食品具有重要指导意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料及设备

红芸豆,万谷食美食品有限公司;猪胰酶(P7545)、葡萄糖淀粉酶(A7095)、 α -淀粉酶(A3176)、荧光白(Calcofluor White, CW, 18909)、异硫氰酸荧光素(Fluorescein isothiocyanate, FITC, F7250)和异硫氰酸荧光素-葡聚糖(Fluorescein isothiocyanate-dextran, FITC-dextran, FD70),美国Sigma Aldrich公司;总淀粉含量测定试剂盒(K-TSTA)和D-葡萄糖检测试剂

盒 (K-GLUC), 爱尔兰 Megazyme 公司。

BCE223i 型电子分析天平, 德国 Sartorius 科学仪器公司; ML51-M 型光学显微镜, 广州市明美光电技术有限公司; HT185 型高速台式离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; DSC 3+ 型差示扫描量热仪, 瑞士 Mettler Toledo 公司; D8 Advance 型 X-射线衍射分析仪, 德国 Bruker 公司; A1HD25 型激光共聚焦扫描显微镜, 日本 Nikon 公司; ZNCL-S-10G 型多点智能搅拌器, 上海凌科实业发展有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 红芸豆纯淀粉的提取

采用湿磨法^[17,18]提取红芸豆淀粉。首先, 将红芸豆浸泡在质量分数 0.45% 的焦亚硫酸钠水溶液中, 在 4 °C 下浸泡 10 h 后去皮。去皮后的红芸豆籽粒经过破壁机研磨三次, 所得浆液通过 300 目尼龙布过滤, 直至无淀粉溢出。接着, 将浆液以 4 000 g 的离心力处理 10 min, 弃去上层清液并刮除底部的黄色蛋白质层, 收集中间的白色淀粉。以 1:10 (V/V) 的比例将甲苯加入到 0.1 mol·L⁻¹ 的氯化钠溶液中混合均匀, 将收集的淀粉悬浮在混合溶液中, 使用磁力搅拌器高速搅拌 1 h, 以进一步去除蛋白质。重复此步骤直至甲苯层变清澈。纯化后的淀粉先用去离子水漂洗三次, 再用无水乙醇漂洗两次, 然后在 40 °C 烘箱中干燥 18 h, 用手捻散团块后, 过 200 目筛后保存备用。

1.2.2 完整红芸豆细胞样品的制备

本研究参考 Dhital 等^[11]报道的方法, 稍作修改, 制备红芸豆子叶细胞粉。选取颗粒饱满、种皮完整且有光泽的红芸豆, 在质量分数 1% 的碳酸钠和 1.5% 的碳酸氢钠混合溶液中浸泡 10 h 后, 剥去外皮。将 100 g 去皮的红芸豆籽置于 60 °C 的过量去离子水中, 恒温处理 45 min, 同时使用磁力搅拌棒使红芸豆保持缓慢移动。用研钵轻轻捣碎处理过的红芸豆, 随后转移至组合筛网, 并用流动的去离子水充分洗涤辅助其通过, 收集介于 120~200 目样品筛上的固形物, 随后将样品冷冻干燥, 轻度捏碎后保存备用。

1.2.3 不同热处理程度的红芸豆细胞样品制备

称取约 200 g 去皮红芸豆, 分别置于 80、90、100 °C 的过量热水中。在 300 r·min⁻¹ 的转速下, 使用磁力搅拌器分别搅拌 25、35、45 min, 随后取出样品, 沥干水分, 并迅速放入冰水中降至室温。最后, 样品经过冷冻干燥处理, 轻度碾碎后保存备用。

1.2.4 红芸豆细胞样品的形貌分析

1.2.4.1 普通光学显微镜观察

使用带有偏振光的光学显微镜对样品进行观察^[16]。称取适量细胞粉末样品, 用去离子水配制成 1.0 wt.% 的悬浊液, 吸取适量液体制成无气泡的样片, 放置在载物台上, 设置放大倍数为 400 倍, 待视野清晰后在明场及偏振光下拍摄红芸豆细胞形态。

1.2.4.2 激光共聚焦显微镜观察

参考 Li 等^[9]的方法并稍作修改进行样品的激光共聚焦扫描显微镜观察。称取 50 mg 杂豆细胞样品分散于 350 μL 质量浓度为 1 mg·mL⁻¹ 的异硫氰酸荧光素溶液中, 于 4 °C 条件下避光贮存 10 h。用去离子水反复漂洗去除多余染料, 设置 2 000 g 离心 5 min, 倒掉多余液体。取部分样品到载玻片, 滴入适量荧光白染料涂抹均匀后盖上盖玻片。选择放大倍数为 400 倍, 观察并拍摄 405 和 488 nm 激光波长下样品细胞壁和淀粉的形貌图像。

1.2.5 红芸豆细胞样品的X-射线衍射分析

参考 Zheng 等^[19]的方法分析样品中淀粉的长程晶体结构, 设置衍射电压为 30 kV, 电流为 40 mA, Cu Kα 辐射 ($\lambda=0.154$ nm), 测量角度 $2\theta=4\sim40^\circ$, 步长间隔 0.005°, 扫描速率为 5 °/min。借助 Jade 软件获取细胞样品的非晶态和晶体峰面积, 相对结晶度按晶体峰面积在总衍射面积的占比计算。

1.2.6 红芸豆细胞样品的热特性分析

使用差示扫描量热仪 (Differential Scanning Calorimetry, DSC) 分析红芸豆细胞样品的热力学特性^[20]。准确称取含有 3 mg 淀粉 (干基) 的样品倾倒在铝制坩埚中, 加入 12 μL 纯净水, 密封后室温静置 10 h。以空坩埚作为空白对照, 以 10 °C·min⁻¹ 的速率升温, 在 25~120 °C 范围扫描样品。通过 Mettler Toledo Stare 软件获取样品起始糊化温度 (T_0)、峰值糊化温度 (T_p)、终止糊化温度 (T_c) 以及热焓值 (ΔH)。

1.2.7 红芸豆细胞样品的体外消化特性分析

参考并适度修改 Zheng 等^[21]的方法, 模拟并分析红芸豆细胞样品中的淀粉的体外消化过程。准确称取 500 mg 样品到 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 醋酸钠缓冲液混合均匀后, 将样品管置于 37 °C 恒温水浴锅中, 以 160 r·min⁻¹ 孵育 20 min。随后, 分别向各样品管中加入 5 mL 混合酶溶液 (制备方法: 将 6 g 猪胰腺酶与 40 mL 去离子水混合均匀, 2 000 g 离心 8 min 后取上清液; 再将 31 mL 上清液与 1.61 mL 葡萄糖淀粉酶及

4.13 mL 去离子水混合制备而成)。在预设的反应时间点 (0~180 min), 分别取 0.15 mL 反应液, 加入 2.85 mL 体积分数 70% 的乙醇溶液中以终止水解, 涡旋混合均匀, 标记为 G_0 、 G_{10} 、 G_{20} 、 G_{40} 、 G_{60} 、 G_{90} 、 G_{120} 和 G_{180} 。将反应液在 1500 g 离心 5 min 后, 使用 K-GLUC 试剂盒测定上清液葡萄糖含量, 淀粉的水解率的计算公式如下:

$$S_H = \frac{G_p}{S_i} \times 0.9 \times 100\% \quad (1)$$

式中:

S_H ——淀粉水解百分比, %;

S_i ——初始淀粉含量, mg;

G_p ——产生的葡萄糖, mg;

0.9——根据葡萄糖与淀粉的摩尔质量比 (162/180=0.9)

计算得出。

在食品科学研究中, 非线性模型因能准确描述随时间变化的消化过程而被广泛用于评估淀粉消化动力学, 该研究使用下列方程拟合淀粉水解曲线^[22]。

$$C = 1 - e^{-kt} \quad (2)$$

式中:

t ——消化反应时间, min;

C ——特定消化时间 t 下样品的消化程度, %;

K ——消化速率常数, min^{-1} 。

Englyst 等^[23]提出的方法被广泛用于定义体外淀粉消化率, 根据酶法水解, 淀粉可分为快消化淀粉 (Rapidly Digestible Starch, RDS)、慢消化淀粉 (Slowly Digestible Starch, SDS) 以及抗性淀粉 (Resistant Starch, RS) 它们的含量可使用下列公式进行计算:

$$D_1 = (G_{20} - G_0) \times \frac{0.9}{E} \times 100\% \quad (3)$$

$$D_2 = (G_{120} - G_{20}) \times \frac{0.9}{E} \times 100\% \quad (4)$$

$$D_3 = (1 - D_1 - D_2) \times 100\% \quad (5)$$

式中:

D_1 ——RDS 含量, %;

D_2 ——SDS 含量, %;

D_3 ——RS 含量, %;

G_0 ——水解前游离还原糖的量, mg;

G_{20} ——酶解 20 min 产生的还原糖, mg;

G_{120} ——酶解 120 min 产生的还原糖, mg;

E ——总淀粉 (TS) 质量分数, %。

1.2.8 红芸豆细胞样品的细胞壁通透性分析

异硫氰酸荧光素-葡聚糖探针的渗透实验参考 Li 等^[24]的方法完成。选用分子量为 70 kDa 的异硫氰酸荧光素-葡聚糖, 将 50 mg 红芸豆细胞样品分散于 500 μL 质

量浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的异硫氰酸荧光素-葡聚糖溶液中, 在 4°C 条件下避光贮存 10 h。移取少量样品到载玻片, 滴入适量荧光白染料, 涂抹均匀后盖上并压紧盖玻片。使用激光共聚焦显微镜, 选择 400 倍放大, 观察并拍摄 405 和 488 nm 激光波长下样品细胞壁和淀粉的形貌图像。

1.2.9 数据分析

各实验数据重复 3 次, 以均值 $\pm$ 标准差表示。使用 SPSS 25、Excel 2019、Origin 9.0 软件分析处理数据, 显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同水热处理下红芸豆细胞样品的显微形貌特征分析

杂豆中最小尺度的组织结构是单个细胞, 杂豆细胞被外部相对刚性和亲水的细胞壁及内部亲脂性的细胞膜包裹。植物细胞壁由初生壁、中间薄层和次生壁构成^[10], 其中中间薄层在细胞黏附中起着重要作用, 它将两个相邻植物细胞的细胞壁粘合在一起^[25], 形成子叶组织网络。松弛或溶解组织的中间薄层, 可有效分离完整的子叶细胞^[26,27]。

不同水热处理程度的红芸豆细胞样品的显微形貌如图 1 所示, 在光学显微镜下观察到完整的红芸豆子叶细胞结构, 淀粉被包裹在细胞壁中。通过异硫氰酸荧光素 (FITC) 和荧光白 (CW) 分别标记淀粉颗粒和细胞壁, 图像显示淀粉颗粒具有明显的内部空腔^[28]。经过 80°C 以上的水热处理后, 红芸豆细胞间散落的杂质较少, 表明细胞间的中间薄层溶解程度较高, 细胞分散度较好。红芸豆细胞内吸水膨胀的淀粉颗粒紧密团聚在细胞壁中, 淀粉颗粒的空腔区域显著减小。随着热处理温度升高 (90°C 和 100°C), 红芸豆细胞样品中淀粉颗粒的双折射强度显著降低, 颗粒形态扭曲膨大, 呈现特征性的“弯曲鞍形”。值得注意的是, 80°C 下不同时间的处理对红芸豆细胞内淀粉的双折射现象的影响并不显著。然而, 在 90°C 和 100°C 下延长处理时间 (35 min 和 45 min) 后, 红芸豆子叶细胞中淀粉的“弯曲鞍形”现象进一步增强, 双折射现象明显减弱。在最大加工程度 (最高温度及最长处理时间) 的样品 (HT- 100°C -45 min) 中仍可观察到少量双折射现象, 表明红芸豆子叶细胞内的淀粉未完全糊化, 仍保留一定程度的有序结构, 此淀粉结构保留模式与 Li 等^[9]报道的热处理后鹰嘴豆细胞内淀粉晶体结构留存现象显示出观测一致性。

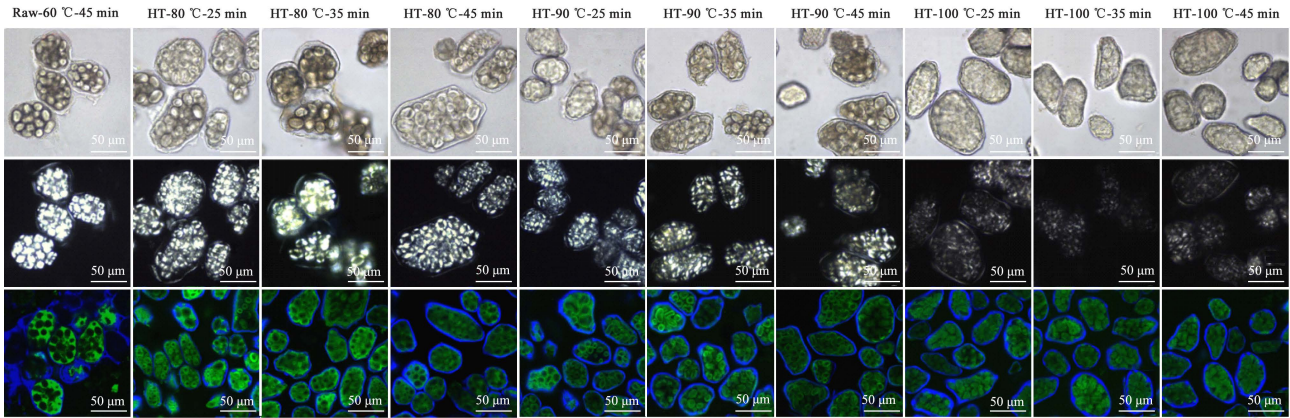


图 1 不同水热处理下红芸豆细胞样品的普通光学、偏振光及激光共聚焦显微镜图像

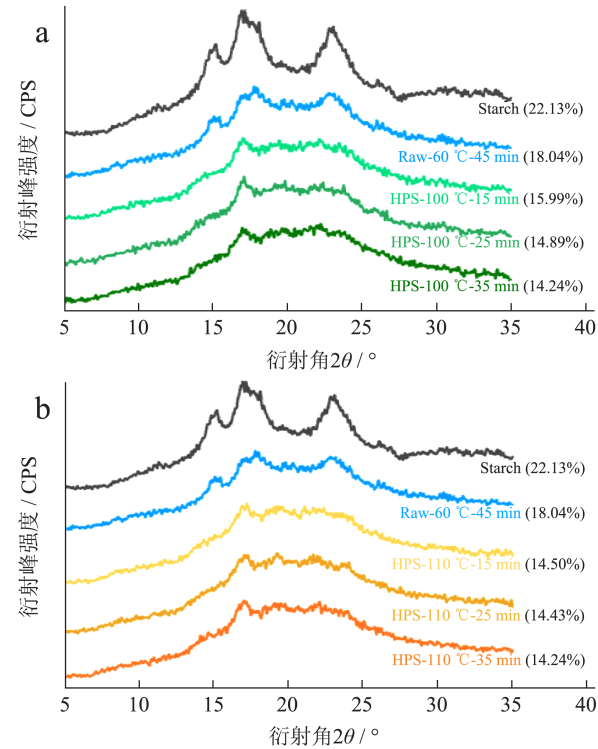
Fig.1 Light, polarized light and confocal scanning laser microscopic images of red kidney bean cells incubated with different hydrothermal treatments

注: Raw 为 60 °C 分离的红芸豆细胞, HT 为水热处理 (Hydrothermal Treatment)。图中标尺 (50 μm)。

2.2 不同水热处理下红芸豆细胞样品的晶体结构分析

X- 射线衍射 (X-Ray Diffractogram, XRD) 常用于研究淀粉分子结晶度的类型和长程结构。图 2 展示了不同水热处理程度的红芸豆细胞样品及纯淀粉的 X-射线衍射情况。红芸豆纯淀粉呈现典型的 C 型特征衍射峰, 相对结晶度最高 (22.13%), 该特征参数验证了此前关于杂豆淀粉晶型结构的相关报道^[29]。与纯淀粉相比, 60 °C 分离的红芸豆子叶细胞内淀粉的整体晶型并未改变, 但 15°、17°、23° 处的衍射峰强度减弱且变窄, 18° 的 A 型特征衍射峰明显, 相对结晶度略微降低 (18.04%), 这可能归因于细胞中蛋白质及脂质等对淀粉衍射峰的屏蔽影响^[8,30]; 经 80 °C 系列水热处理后的红芸豆细胞中淀粉保持 C 型衍射峰, 但峰型明显减弱, 5.6° 的 B 型特征峰消失, 15° 衍射峰变窄, 相对结晶度 (16.16%~16.54%) 显著低于 60 °C 分离的样品 (18.04%), 说明热处理降低了淀粉的晶体结构。但 80 °C 下不同时间处理的样品间的结晶度无显著差异, 这与偏光显微镜的结果相一致。90 °C 及 100 °C 处理的样品中淀粉的 15° 衍射峰逐渐消失, 17° 峰型有不同程度保留, 23° 的衍射峰强度减弱, 表明高温处理下红芸豆细胞样品中淀粉的 B 型结构更为突出, 其中 100 °C 处理的样品尤为明显, 其相对结晶度显著低于 80 °C 处理的细胞样品。这可能归因于高温处理进一步破坏了细胞内淀粉的晶体结构, 同时高温处理促进了淀粉晶体结构的重排, 从而促进了 B 型结构的形成。此外, 所有样品中均可观察到一定程度的 20° 衍射峰, 可能是淀粉 - 脂质复合物形成所致。在该研究中, 对

于不同温度下处理不同时间的红芸豆细胞, 处理温度对淀粉结晶结构的影响可能较处理时间更为显著。值得注意的是, 本研究中, 100 °C 处理的样品相对结晶度 (12.97%~14.08%) 显著高于文献^[31]报道的压热处理鹰嘴豆细胞的相对结晶度 (5.07%~11.66%), 这可能与两种加工方式的差异有关: 压热处理促进了淀粉分子链的移动与重排^[32], 期间可能存在机械力作用破坏晶体结构^[33,34]。此外, 红芸豆中的直链淀粉含量较高 (质量分数约 35%), 这可能增强其热稳定性, 延缓结晶度下降^[35]。



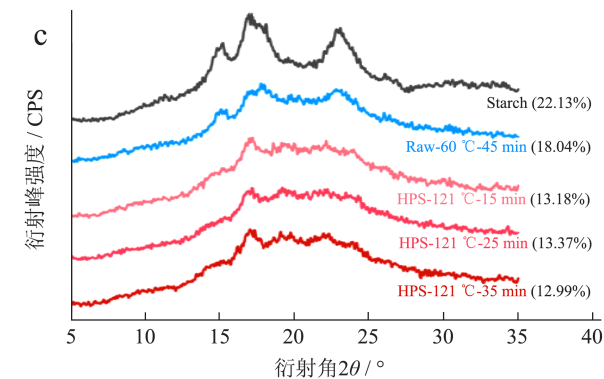


图2 纯淀粉与水热处理红芸豆细胞内淀粉的 X 射线衍射图谱及相对结晶度

Fig.2 X-ray diffraction pattern and crystallinity analysis of native starches and starches within red kidney bean cells under hydrothermal treatments

注：Starch 为红芸豆淀粉颗粒，Raw 为 60 °C 分离的红芸豆细胞，HT 为水热处理（hydrothermal Treatment），下同。图中括号内的数字为样品的相对结晶度。

2.3 不同水热处理下红芸豆细胞样品的热力学性质分析

不同温度及时间水热处理的红芸豆细胞样品的热力学温度 (T_0 、 T_p 、 T_c) 与热焓值 (ΔH) 如表 1 所示。红芸豆淀粉呈现吸热单峰，且具有最高的焓值变化 (19.33 J/g)。如图 3 所示，60 °C 分离的红芸豆细胞内淀粉的热力学曲线开始出现吸热双峰（峰 I，51~95 °C 和峰 II，92~103 °C），与之前关于鹰嘴豆细胞的报道有所不同^[16,36]，这可能与不同豆类的蛋白质组分差异有关。其中，峰 I 的 T_0 、 T_p 、 T_c 显著升高，热焓值显著降低，表明样品中淀粉微晶解螺旋难度增大；峰 II 可能与红芸豆细胞内的蛋白质的存在有关^[37]，蛋白质变性会产生吸热峰，并可能与淀粉形成复合物^[38]，影

响淀粉的膨胀与糊化的同时增强了淀粉的晶体结构熔融的强度^[39]。经过系列水热处理后，相较于 60 °C 分离的红芸豆细胞，80 °C 水热处理 25 min 的红芸豆细胞内淀粉（HT-80 °C-25 min）的峰 I 热力学温度显著升高，且热焓值也显著升高（HT-80 °C-25 min，7.48 J·g⁻¹），可能在该温度和处理时间下，红芸豆细胞内淀粉分子发生了结构重组，分子链倾向于形成更稳定的螺旋结构，从而增加了解旋难度。80 °C 处理 45 min 后，样品峰值 I 的热力学温度 (T_p) 发生右移，峰型变宽，热焓值进一步增加，这可能归因于随着时间的延长细胞内淀粉分子进一步发生结构重组^[40]。

经过更高温度（90 °C 和 100 °C）水热处理细胞样品的峰 I 热力学温度向更低温度移动，表明此时淀粉晶体结构的熔融要更容易，这可能归因于更高温度下，淀粉分子的晶体结构破坏程度加大，部分糊化淀粉重结晶结构的形成。随着处理温度的升高，淀粉颗粒膨胀和糊化程度增加，淀粉的回生现象增强，从而导致结晶结构的转变。在 90 °C 和 100 °C 下不同处理时间（25~45 min）的细胞样品峰 I 的热力学温度及焓值的差异均不显著，一定程度上说明了内部晶体结构趋于稳定。100 °C 热处理的淀粉分子内部的峰 II 消失，这与 Yao 等^[16]高温处理下鹰嘴豆细胞内淀粉的热力学性质显示单吸收峰的变化情况近似，可能归因于高温处理下细胞内部的蛋白质完全变性，淀粉-脂质/蛋白质等复合物的结构强度降低而易被破坏^[40]。值得注意的是，低于 90 °C 分离的红芸豆细胞内淀粉的热力学双峰现象（峰 I 和峰 II）与 Yao 等^[16,20]报道的鹰嘴豆细胞单峰特征存在显著差异，这可能源于杂豆蛋白质组分不同引起的在热变性时间差异，从而引起峰型的差异^[41]。该差异提示，豆类品种特异性可能通过蛋白质-淀粉相互作用影响热加工下淀粉分子结构变化的作用机制，但仍需进一步验证。

表 1 不同水热处理下红芸豆细胞内淀粉的热特性
Table 1 Thermal properties of starches in red kidney bean cells incubated with different hydrothermal treatments

样品	峰 I				峰 II			
	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
Starch	61.39±0.13 ^c	72.21±0.08 ^c	82.19±0.24 ^c	19.33±0.11 ^a	—	—	—	—
Raw-60 °C-45 min	74.50±0.13 ^b	80.62±0.25 ^d	87.49±0.08 ^d	5.27±0.14 ^e	92.56±0.23 ^d	97.59±0.10 ^d	101.66±0.06 ^d	4.87±0.08 ^a
HT-80 °C-25 min	84.19±0.12 ^a	87.11±0.42 ^b	92.14±0.26 ^b	7.48±0.36 ^d	94.33±0.28 ^b	98.89±0.59 ^b	102.52±0.68 ^c	4.31±0.17 ^b
HT-80 °C-35 min	84.17±0.12 ^a	85.61±0.10 ^c	91.20±0.15 ^c	8.73±0.14 ^{bc}	94.27±0.35 ^b	98.56±0.34 ^{bc}	102.84±0.09 ^{bc}	3.83±0.08 ^c
HT-80 °C-45 min	84.50±0.15 ^a	90.78±0.09 ^a	95.84±0.09 ^a	8.95±0.20 ^b	97.33±0.39 ^a	100.44±0.34 ^a	103.36±0.29 ^{ab}	1.53±0.03 ^c
HT-90 °C-25 min	51.51±0.56 ^d	60.06±0.10 ^{fg}	70.43±0.12 ^h	5.26±0.36 ^e	92.27±0.30 ^d	98.11±0.10 ^{cd}	102.53±0.49 ^c	3.63±0.27 ^c
HT-90 °C-35 min	51.37±0.23 ^d	59.89±0.35 ^{fg}	70.08±0.28 ^h	5.30±0.26 ^e	93.69±0.14 ^c	98.89±0.35 ^b	103.73±0.55 ^{ab}	2.61±0.12 ^d
HT-90 °C-45 min	51.35±0.36 ^d	59.61±0.19 ^g	70.20±0.08 ^h	5.31±0.13 ^e	93.50±0.19 ^c	98.28±0.09 ^{bc}	102.63±0.26 ^{bc}	2.44±0.16 ^d
HT-100 °C-25 min	50.40±0.39 ^e	60.17±0.34 ^f	74.73±0.19 ^f	8.81±0.12 ^{bc}	—	—	—	—
HT-100 °C-35 min	50.77±0.08 ^e	60.11±0.10 ^f	73.74±0.25 ^g	8.37±0.51 ^{bc}	—	—	—	—
HT-100 °C-45 min	50.52±0.34 ^e	60.00±0.29 ^{fg}	74.03±0.29 ^g	8.17±0.61 ^c	—	—	—	—

注：同列数字右肩不同的小写字母表示数据具有显著差异 ($P<0.05$)。

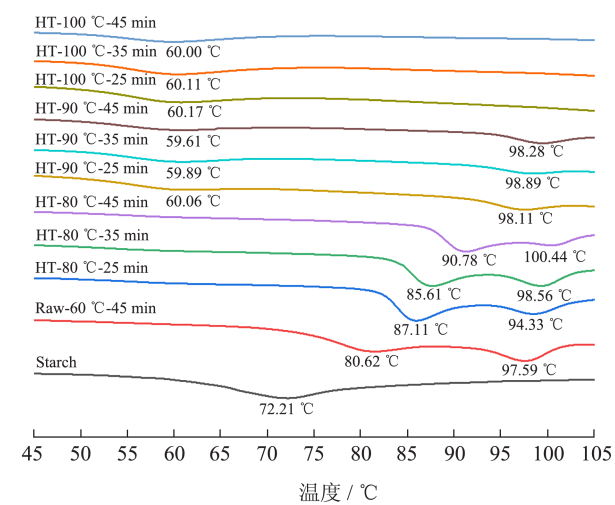


图 3 不同水热处理下红芸豆细胞内淀粉的热力学曲线

Fig.3 Thermograms of starch in red kidney bean cells under various hydrothermal treatments

注：图中曲线下的温度为峰值温度（peak temperature）。

2.4 不同水热加工处理下红芸豆细胞样品的细胞壁通透性分析

消化酶进入细胞和水解产物扩散出细胞的程度主要取决于细胞壁的孔隙率^[18]，该研究利用荧光探针渗透细胞壁来模拟这一过程。为探究不同热加工处理程度对红芸豆细胞壁的影响，采用 70 kDa 的异硫氰酸荧光素 - 葡聚糖探究细胞壁的通透性，其激光共聚焦显微镜图像中。黑色区域代表红芸豆细胞结构，蓝色区域代表细胞壁结构。如图 4 所示，60 °C 分离的红芸豆细胞样品（Raw-60 °C-45 min）细胞壁完整，细胞内部无明显可见的绿色荧光区域，表明其细胞壁完整性较高。然而，经不同温度及时间的常压水热处理后，随着温度升高和时间延长，细胞内部绿色荧光逐渐增强。特别是 90 °C 水热处理后，细胞内部可见明显的绿色荧光，说明细胞壁通透性增加， α -淀粉酶可能穿透细胞壁进入细胞内部，这可能与水热过程中果胶的解聚及浸出有关，导致细胞壁强度降低和孔隙率增大^[42]。100 °C 处理后，细胞内部绿色荧光进一步增强，说明更多异硫氰酸荧光素 - 葡聚糖探针渗透进入细胞壁，且随热处理时间延长，荧光现象增强。但 100 °C 处理的红芸豆细胞内部仍存在部分未被荧光剂浸染的区域（黑色区域），表明部分细胞内结构仍然致密，可能影响酶对淀粉的可及性。Li 等^[24]曾报道，细胞壁孔隙度取决于植物来源，不同处理方式可改变细胞壁通透性，从而影响了内含营养素的利用程度。

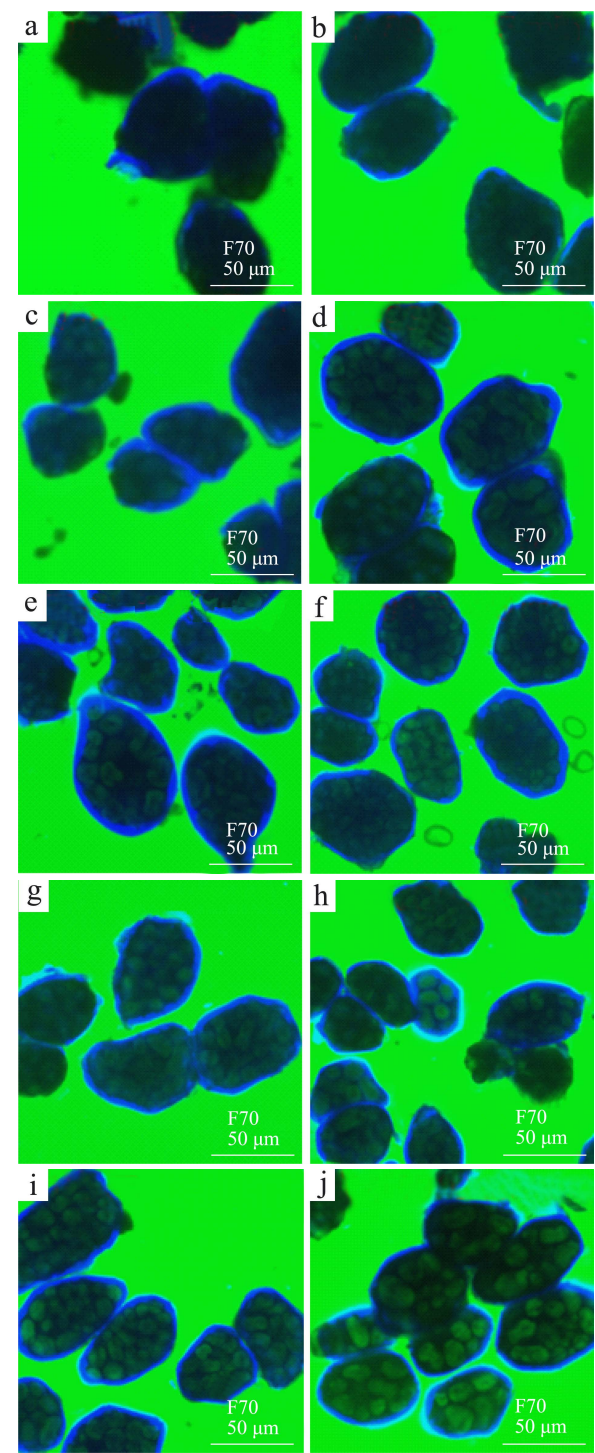


图 4 不同水热处理下红芸豆细胞样品的激光共聚焦显微镜图像

Fig.4 Confocal scanning laser microscopic images of red kidney bean cells incubated with different hydrothermal treatments

注：a 为 Raw-60 °C-45 min，b 为 HT-80 °C-25 min，c 为 HT-80 °C-35 min，d 为 HT-80 °C-45 min，e 为 HT-90 °C-25 min，f 为 HT-90 °C-35 min，g 为 HT-90 °C-45 min，h 为 HT-100 °C-25 min，i 为 HT-100 °C-35 min，j 为 HT-100 °C-45 min。F70 为 Fluorescein isothiocyanate-dextran 70 kDa，标尺（50 μm）。

表 2 不同水热处理下红芸豆细胞内淀粉的体外消化特征参数

样品	RDS/%	SDS/%	RS/%	SDS+RS/%	k/min^{-1}	$C_{180}/\%$
Raw-60 ℃-45 min	13.91 ± 0.38 ^b	22.49 ± 0.8 ^{7d} e	63.31 ± 0.64 ^a	85.79 ± 0.55 ^a	0.0036	48.18 ± 0.37 ^j
HT-80 ℃-25 min	22.29 ± 0.28 ^e	21.36 ± 0.09 ^e	56.29 ± 0.27 ^b	77.65 ± 0.19 ^b	0.0046	56.25 ± 0.19 ⁱ
HT-80 ℃-35 min	24.73 ± 0.19 ^f	21.97 ± 0.69 ^{de}	53.29 ± 0.86 ^c	75.27 ± 0.19 ^c	0.0049	58.67 ± 0.11 ^h
HT-80 ℃-45 min	25.91 ± 0.29 ^e	22.00 ± 0.59 ^{de}	51.72 ± 0.36 ^d	73.72 ± 0.74 ^{de}	0.0053	61.73 ± 0.22 ^g
HT-90 ℃-25 min	25.68 ± 0.48 ^{ef}	24.76 ± 0.47 ^{ab}	49.68 ± 0.22 ^e	74.44 ± 0.67 ^{cd}	0.0056	63.57 ± 0.11 ^f
HT-90 ℃-35 min	26.98 ± 0.84 ^d	24.77 ± 0.59 ^{ab}	48.17 ± 0.57 ^f	72.94 ± 0.97 ^{def}	0.0058	65.10 ± 0.18 ^e
HT-90 ℃-45 min	28.30 ± 0.19 ^c	24.26 ± 0.91 ^{bc}	47.62 ± 0.88 ^{fg}	71.88 ± 0.17 ^f	0.0061	66.83 ± 0.29 ^d
HT-100 ℃-25 min	27.69 ± 0.86 ^{cd}	25.54 ± 0.05 ^{ab}	46.77 ± 0.81 ^g	72.31 ± 0.86 ^{ef}	0.0062	67.61 ± 0.11 ^c
HT-100 ℃-35 min	29.85 ± 0.56 ^b	25.60 ± 0.98 ^a	43.98 ± 0.85 ^h	69.58 ± 1.35 ^g	0.0065	69.16 ± 0.11 ^b
HT-100 ℃-45 min	32.93 ± 0.59 ^a	23.14 ± 0.45 ^{cd}	44.22 ± 0.85 ^h	67.37 ± 0.85 ^h	0.0066	69.65 ± 0.19 ^a

注：同列数字右肩不同的小写字母表示数据具有显著差异 ($P<0.05$)。 k 为消化速率系数， C_{180} 为180 min时的消化程度。

2.5 不同水热加工处理程度的红芸豆细胞内含淀粉的体外消化特性

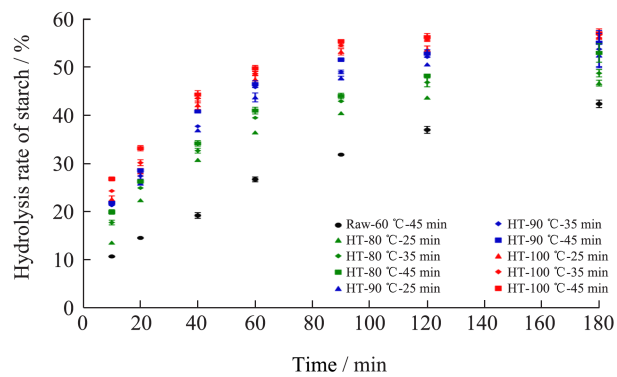


图 5 不同水热处理下红芸豆细胞内淀粉的体外消化曲线图

Fig.5 *In vitro* digestion curves of starches in red kidney bean cells incubated with different hydrothermal treatments

研究淀粉的体外消化特性有助于预测其餐后血糖反应，为糖尿病和肥胖患者提供科学膳食指导^[20]。淀粉体外消化特性的评估需结合组分含量与动态过程分析，以全面揭示其消化机制与血糖调控潜力^[43,44]。本研究采用两种方法：快速消化淀粉（RDS）、慢消化淀粉（SDS）和抗性淀粉（RS）的组分含量分析（表2），以及一阶动力学模型拟合的消化速率与消化程度（图5及表2），旨在分别从静态组分分布与动态消化过程两个维度解析红芸豆细胞内淀粉的消化特性差异。如表2所示，60℃分离的红芸豆细胞样品中RDS含量最低（13.91%），RS含量最高（63.31%），表明未充分热处理的细胞壁屏障作用显著限制了淀粉的酶解。随着处理温度升高和时间延长（80~100℃，25~45min），RDS比例增加（由13.91%增加至32.93%），RS含量降低（从63.31%降至43.98%），而SDS含量有所上

升（由22.49%升至25.60%）。在相同处理时间下，温度升高使RS比例显著减少；在相同温度下，处理时间延长，RS比例也减少，但降幅相对较小。这一现象可能与细胞壁通透性增加及部分RS向RDS转化有关。值得注意的是，尽管RS比例随温度和时间上升而下降，但其与SDS的总和仍显著高于常见谷物类食品^[45,46]，表明红芸豆细胞经热处理后仍具备较好的血糖调控潜力。

为进一步验证上述结论，本研究通过一阶动力学模型评估淀粉的消化速率与消化程度。图5展示了经不同水热处理的红芸豆细胞内含淀粉的体外消化曲线，其一阶动力学拟合的消化速率及消化程度如表2所示。红芸豆细胞样品的消化速率变化范围为0.0036~0.0066 min⁻¹，消化程度变化顺序为：Raw-60℃-45 min < HT-80℃-25 min < HT-80℃-35 min < HT-80℃-45 min < HT-90℃-25 min ≈ HT-90℃-35 min < HT-90℃-45 min ≈ HT-100℃-25 min < HT-100℃-35 min ≈ HT-100℃-45 min。结果显示，60℃分离的红芸豆细胞样品的淀粉消化速率及消化程度均最低（0.0036 min⁻¹，48.18%，而经80~100℃热处理的样品中，淀粉消化速率及消化程度随温度和时间显著上升（0.0046~0.0066 min⁻¹，55.21%~72.34%）。80℃处理的HT-80℃-35 min样品（0.0049 min⁻¹）与HT-80℃-25 min样品（0.0046 min⁻¹）淀粉消化速率无明显差异，却显著低于HT-80℃-45 min样品（0.0053 min⁻¹），90℃处理的样品也呈现相同趋势。但值得注意的是，80及90℃处理下样品内淀粉的结晶度无显著变化（如图2及表1所示），说明80℃处理35 min及45 min样品的晶体结构可能进一步稳定（相较于25 min升高或无显著差异的热力学温度和热焓值）。以上结果表明，在80~90℃下常压水热处理的红芸豆细胞内淀粉的消化性与细胞壁通透性变化紧

密关联,而非是淀粉晶体结构变化主导的结果,这与前人研究中报道的关于高压处理增加细胞壁通透性并提高淀粉消化率的情况相符^[47]。然而,经 100 ℃ 热处理后,样品中淀粉的体外消化速率和程度随着处理时间延长显著增加,这可能归因于细胞壁通透性及细胞内淀粉晶体变化(如图 2 所示,对应样品显著降低的相对结晶度)协同作用的结果。

3 结论

本研究探讨了常压水热处理下不同处理温度和时间对红芸豆细胞中淀粉结构及其体外消化特性的动态响应规律。结果显示,红芸豆细胞在常压水热处理下能保持细胞形态的完整性,相较于 60 ℃ 分离的红芸豆细胞样品(Raw-60 ℃-45 min, 18.04%),不同水热处理程度的红芸豆细胞内淀粉的结晶度均有所降低(12.97%~16.54%),但淀粉并未完全糊化,仍保留一定的晶体结构。热力学性质表明,不同温度下处理不同时间会引起红芸豆细胞内淀粉结构的差异性重组。体外消化特性分析结果表明,80~90 ℃ 处理下的红芸豆细胞壁的通透性显著影响胞内淀粉的消化特性,而 100 ℃ 处理下细胞壁透过性及细胞内淀粉晶体变化则协同影响细胞内淀粉的体外消化特性。通过调节水热处理的工艺参数,可有效控制红芸豆细胞内 RDS/SDS/RS 的比例(SDS 与 RS 含量之和降低 7.54%~17.82%),揭示了其在低血糖指数食品开发中的应用潜力。该研究为杂豆健康食品的开发提供了新的视角。未来还可进一步探讨涉及温度、压力和水分等多因素协同的处理方式对杂豆细胞内淀粉变化的影响,以及细胞壁多糖(如果胶、纤维素)的热降解产物对消化酶活性的潜在影响,从而更全面的揭示杂豆食品体系的健康效应机制。

参考文献

- [1] LI X, SHI Y, WEI D, et al. Impact of a high dietary fiber cereal meal intervention on body weight, adipose distribution, and cardiovascular risk among individuals with type 2 diabetes [J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2023, 14:1283626.
- [2] BANASZAK M, GÓRNA I, PRZYSŁAWSKI J. Non-pharmacological treatments for insulin resistance: effective intervention of plant-based diets: a critical review [J]. *Nutrients*, 2022, 14(7): 1400.
- [3] VLACHOS D, MALISOVA S, LINDBERG F A, et al. Glycemic index (GI) or glycemic load (GL) and dietary interventions for optimizing postprandial hyperglycemia in patients with T2 diabetes: a review [J]. *Nutrients*, 2020, 12(6): 1561.
- [4] MURILLO S, MALLOL A, ADOT A, et al. Culinary strategies to manage glycemic response in people with type 2 diabetes: A narrative review [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1025993.
- [5] RAMDATH D D, RENWICK S, HAWKE A, et al. Minimal effective dose of beans required to elicit a significantly lower glycemic response than commonly consumed starchy foods: predictions based on *in vitro* digestion and carbohydrate analysis [J]. *Nutrients*, 2023, 15(21): 4495.
- [6] 张婷,袁艺,王鑫,等.杂豆分类、营养功效及其产品开发的研究进展[J].*食品工业科技*,2023,44(4):428-437.
- [7] JUNEJO S A, WU C, FU X, et al. The influence of pulse cell wall structure and cellular protein matrix on the *in vitro* digestion kinetics of starch: a dual encapsulation mechanism [J]. *Food Research International*, 2024, 197: 115220.
- [8] AJALA A, KAUR L, LEE S J, et al. Native and processed legume seed microstructure and its influence on starch digestion and glycaemic features: a review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 133: 65-74.
- [9] LI P, DHITAL S, FU X, et al. Starch digestion in intact pulse cotyledon cells depends on the extent of thermal treatment [J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126268.
- [10] XIONG W, DEVKOTA L, ZHANG B, et al. Intact cells: "nutritional capsules" in plant foods [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(2): 1198-1217.
- [11] DHITAL S, BHATTARAI R R, GORHAM J, et al. Intactness of cell wall structure controls the *in vitro* digestion of starch in legumes [J]. *Food & Function*, 2016, 7(3): 1367-1379.
- [12] BHATTARAI R R, DHITAL S, WU P, et al. Digestion of isolated legume cells in a stomach-duodenum model: three mechanisms limit starch and protein hydrolysis [J]. *Food & Function*, 2017, 8(7): 2573-2582.
- [13] COMINELLI E, SPARVOLI F, LISCIANI S, et al. Antinutritional factors, nutritional improvement, and future food use of common beans: a perspective [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 992169.
- [14] ALPOS M, LEONG S Y, OEY I. Combined effects of calcium addition and thermal processing on the texture and *in vitro* digestibility of starch and protein of black beans (*Phaseolus vulgaris*) [J]. *Foods*, 2021, 10(6): 1368.
- [15] PALLARES A P, MIRANDA B A, TRUONG N Q A, et al. Process-induced cell wall permeability modulates the *in vitro* starch digestion kinetics of common bean cotyledon cells [J]. *Food & Function*, 2018, 9(12): 6544-6554.
- [16] YAO Y Y, LI P, DENG Y Y, et al. Variation in structural and *in vitro* starch digestion of pulse cotyledon cells imposed by temperature-pressure-moisture combinations [J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 18: 100625.
- [17] WANG K, HASJIM J, WU A C, et al. Variation in amylose fine structure of starches from different botanical sources [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(19): 4443-4453.
- [18] 李萍.杂豆细胞壁对胞内淀粉结构及消化性的影响机理研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [19] ZHENG J, WANG N, HUANG S, et al. *In vitro* digestion and structural properties of rice starch modified by high methoxyl pectin and dynamic high-pressure microfluidization [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 274: 118649.

- [20] 姚月月,邓媛元,魏振承,等.热诱导Desi鹰嘴豆细胞中淀粉结构及体外消化性的变化[J].食品工业科技,2023,44(6):74-81.
- [21] ZHENG B, TANG Y, XIE F, et al. Effect of pre-printing gelatinization degree on the structure and digestibility of hot-extrusion 3D-printed starch [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107210.
- [22] DHITAL S, SHRESTHA A K, GIDLEY M J. Relationship between granule size and *in vitro* digestibility of maize and potato starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(2): 480-488.
- [23] ENGLYST K, ENGLYST H, HUDSON G J, et al. Rapidly available glucose in foods: an *in vitro* measurement that reflects the glycemic response [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1999, 69(3): 448-454.
- [24] LI H, GIDLEY M J, DHITAL S. Wall porosity in isolated cells from food plants: implications for nutritional functionality [J]. Food Chemistry, 2019, 279: 416-425.
- [25] BOURON S, LEBŒUF E, MOUILLE G, et al. QUASIMODO1 encodes a putative membrane-bound glycosyltransferase required for normal pectin synthesis and cell adhesion in *Arabidopsis* [J]. Plant Cell, 2002, 14(10): 2577-2590.
- [26] OTTO T, BAIK B K, CZUCHAJOWSKA Z. Microstructure of seeds, flours, and starches of legumes [J]. Cereal Chemistry, 1997, 74(4): 445-451.
- [27] KADAM S S, SUBRAMANYAM P, JAWALE H K, et al. Improvement in cooking quality of horse gram (*Dolichos biflorus*) by pre-soaking treatment with salt solution [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 1981, 31(2): 171-174.
- [28] LI P, DHITAL S, ZHANG B, et al. Surface structural features control *in vitro* digestion kinetics of bean starches[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 343-351.
- [29] REN Y, YUAN T Z, CHIGWEDERE C M, et al. A current review of structure, functional properties, and industrial applications of pulse starches for value-added utilization [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(3): 3061-3092.
- [30] JUNEJO S A, DING L, FU X, et al. Pea cell wall integrity controls the starch and protein digestion properties in the INFOGEST *in vitro* simulation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 182: 1200-1207.
- [31] 姚月月.热诱导鹰嘴豆中淀粉结构变化及体外消化酵解特性的影响研究[D].天津:天津科技大学,2023.
- [32] HOOPER R, SOSULSKI F W. Composition, structure, functionality, and chemical modification of legume starches: a review [J]. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 1991, 69(1): 79-92.
- [33] 秦仁炳,王书军,项丰娟,等.淀粉-脂质复合物在热加工过程中的结构变化及其对体外消化性影响[J].食品科学,2021,42(1):47-51.
- [34] ARROQUI C, NORIEGA M J, IBAÑEZ F C, et al. Impact of a dual treatment on resistant starch level and techno-functional properties of pea and faba bean flours [J]. Starch-Stärke, 2025, 77(2): 2400111.
- [35] 李露,黄艳蓉,扶雄,等.不同品种杂豆子叶细胞体外大肠发酵特性差异及调控机制[J].现代食品科技,2023,39(11):1-10.
- [36] 王苗苗,丁丽,张新,等.不同加工方式下芸豆子叶细胞内淀粉结构及体外消化特性的对比分析[J].现代食品科技,2021,37(1): 101-110.
- [37] WANG Z. Impact of red kidney bean protein on starch digestion and exploring its underlying mechanism [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253(6): 127023.
- [38] LU Z H, DONNER E, YADA R Y, et al. Physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of potato starch/protein blends [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 154: 214-222.
- [39] WANG S, COPELAND L. Molecular disassembly of starch granules during gelatinization and its effect on starch digestibility: a review [J]. Food & Function, 2013, 4(11): 1564.
- [40] LI P, ZHANG B, LIU R, et al. Insights into the relations between cell wall integrity and *in vitro* digestion properties of granular starches in pulse cotyledon cells after dry heat treatment [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(2): 528-535.
- [41] 陈振家,王晓闻,荆旭,等.不同温度处理对红芸豆蛋白热稳定性及结构的影响[J].农业工程学报,2020,36(19):306-312.
- [42] WU H C, BULGAKOV V P, JINN T L. Pectin methylesterases: Cell wall remodeling proteins are required for plant response to heat stress [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9(16): 1612.
- [43] XIONG W, ZHANG B, HUANG Q, et al. Variation in the rate and extent of starch digestion is not determined by the starch structural features of cooked whole pulses [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 83: 340-347.
- [44] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991-1014.
- [45] GU Y, CHEN B, XU R, et al. Effects of heat treatment at different moisture of mung bean flour on the structural, gelation and *in vitro* digestive properties of starch [J]. Food Chemistry, 2024, 443: 138518.
- [46] YAO M, TIAN Y, YANG W, et al. The multi-scale structure, thermal and digestion properties of mung bean starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 131: 871-878.
- [47] LI P, ZHANG B, DHITAL S. Starch digestion in intact pulse cells depends on the processing induced permeability of cell walls [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 225: 115204.