

詹锦玲, 贾梦, 蔡奕盛, 等. 细胞壁破损对马铃薯细胞胞内淀粉理化特性和消化特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 194–200. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030076

ZHAN Jinling, JIA Meng, CAI Yisheng, et al. Effects of Cell Wall Damage on Physicochemical and Digestibility Properties of Intracellular Starch in Potato Cells[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 194–200. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030076

· 研究与探讨 ·

细胞壁破损对马铃薯细胞胞内淀粉理化特性和消化特性的影响

詹锦玲^{1,2}, 贾梦^{2,3}, 蔡奕盛^{2,3}, 杨天一⁴, 麻荣荣^{2,3,*}, 田耀旗^{2,3,4}

(1. 江南大学生物工程学院, 江苏无锡 214122;

2. 江南大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏无锡 214122;

3. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214122;

4. 江南大学分析测试中心, 江苏无锡 214122)

摘要: 为探究细胞壁的破损对胞内淀粉理化特性影响, 本文通过果胶酶分离马铃薯完整细胞, 而后利用纤维素酶处理 2 和 4 h 制备不同细胞壁破损程度的细胞, 探究其淀粉结构以及胞内淀粉理化特性 (黏度特性、热特性及消化特性) 的变化。结果显示: 随着酶解时间增加, 细胞壁中纤维素被水解, 细胞壁破损程度增加, 淀粉颗粒从胞内溢出, 蛋白含量降低, 细胞粒径减小; 细胞壁的破损促使了淀粉颗粒与水 and 热的相互作用, 从而使马铃薯细胞膨胀度和溶胀度增加, 糊化温度降低, 其中无细胞壁存在的马铃薯淀粉呈现最低的糊化温度 ($T_p=68.49\text{ }^\circ\text{C}$); 由于细胞壁多糖的强吸水性及胞内外淀粉快速吸水溶胀的共同作用, 促使酶解破壁 2 h 的细胞呈现最高的峰值黏度 (4616.0 cP); 完整细胞壁以及破损细胞壁的存在均可抑制淀粉的水解, 细胞壁的破损减弱了其对于消化酶与淀粉接触的阻碍作用, 酶解破壁 4 h 的细胞中抗性淀粉 (RS) 含量比完整马铃薯细胞降低了 4.74%, 且马铃薯淀粉呈现最低的 RS (39.91%)。综上所述, 不同细胞壁破损程度的细胞在功能特性方面呈现显著的差异, 为马铃薯主粮化应用提供了新思路和理论基础。

关键词: 马铃薯, 细胞壁破损, 细胞, 淀粉, 理化特性

中图分类号: TS231

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)18-0194-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030076



本文网刊:

Effects of Cell Wall Damage on Physicochemical and Digestibility Properties of Intracellular Starch in Potato Cells

ZHAN Jinling^{1,2}, JIA Meng^{2,3}, CAI Yisheng^{2,3}, YANG Tianyi⁴, MA Rongrong^{2,3,*}, TIAN Yaoqi^{2,3,4}

(1. School of Biotechnology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. State Key Laboratory of Food Science and Resources, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

4. Analysis and Testing Center, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effect of cell wall damage on the physicochemical properties of intracellular starch. The intact potato cells were isolated using pectinase, and then cells with different degrees of cell wall damage were prepared by cellulase treatment for 2 and 4 h. The changes in intracellular starch structure and physicochemical properties (viscosity property, thermal property and digestion property) were investigated. The results showed that cellulose in the cell walls was hydrolyzed as enzymatic hydrolysis time increased, leading to increased cell wall damage, leakage of starch granules from cells, reduced protein content and decreased cell size. The damage to the cell wall enhanced the interaction

收稿日期: 2025-03-07

作者简介: 詹锦玲 (1987-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 淀粉新资源开发与利用, E-mail: zjinling@jiangnan.edu.cn.

* 通信作者: 麻荣荣 (1992-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 淀粉新资源开发与利用, E-mail: rrra01@jiangnan.edu.cn.

between starch granules and water molecules, resulting in increased swelling power and solubility of potato cells and a lower gelatinization temperature. Potato starch showed the lowest gelatinization temperature ($T_p=68.49\text{ }^\circ\text{C}$). Cells treated with cellulase for 2 h showed the highest peak viscosity (4616.0 cP), this was attributed to the strong water absorption by cell wall polysaccharides and rapid starch swelling inside and outside the cells. Compared with potato starch, the presence of intact and damaged cell walls inhibited the hydrolysis of starch, and the broken cell wall weakened the barrier effect between digestive enzymes and starch. The resistant starch (RS) content in cells treated with cellulase for 4 h was 4.74% lower than that in intact potato cells, while potato starch showed the lowest RS content (39.91%). In summary, cells with varying degrees of cell wall damage exhibited significant differences in functional properties, providing novel insights and a theoretical foundation for the application of potato as a staple food.

Key words: potato; cell wall damage; cell; starch; physicochemical properties

马铃薯属茄属植物(*Solanum tuberosum* L.), 淀粉是其重要成分, 约占总干物质的 70%^[1-2]。在 2015 年, 我国推行了“马铃薯主粮化战略”, 马铃薯作为我国三大主粮(稻米、小麦和玉米)的补充, 被称为第四大主粮作物。马铃薯块茎组织结构由薄壁细胞组成, 其中, 富含果胶的中间薄层将细胞紧密黏结, 形成了密集的六边形细胞阵列, 每个细胞中含有许多不同大小、形状、组成和分布的淀粉颗粒^[3-4]。淀粉、蛋白质及脂质等主要营养组分被“蜂窝状”的细胞壁包裹, 形成完整的细胞结构^[5]。马铃薯全食品是指未经精深加工可保留完整营养组分的马铃薯产品, 细胞结构的完整性对全食品加工特性具有重要作用^[4,6]。马铃薯细胞壁主要由纤维素、半纤维素和果胶组成^[7], 细胞壁作为植物中关键组分, 具有多种功能特性, 如提供机械强度、维持细胞形状、控制细胞膨胀、控制细胞间运输、保护免受其他生物体的侵害, 细胞信号传导和食物储存等^[5]。

先前研究表明马铃薯的微观结构特征, 如薄壁细胞大小、细胞壁组成和厚度对其食用品质具有重要影响^[8]。细胞壁的存在会作为物理屏障阻碍水、热以及消化酶与胞内淀粉的接触, 从而延缓胞内淀粉的溶胀和糊化, 同时抑制消化酶对胞内淀粉的水解^[9-10]。Do 等^[2]发现, 与马铃薯淀粉相比, 马铃薯细胞的糊化温度增加而峰值黏度和崩解值降低。前人研究表明, 在淀粉基全食品中细胞壁的存在会影响胞内淀粉的功能特性, 同时在降血糖方面发挥重要作用^[6,9-10]。李萍^[6]发现, 杂豆细胞细胞壁的破损程度与其胞内淀粉颗粒的消化速率相关, 细胞壁的破损程度越大, 其胞内淀粉的消化速率越快。目前, 马铃薯加工产品主要包括马铃薯淀粉、马铃薯全粉及薯条等。先前研究主要集中于利用预处理、复配及改善加工工艺等, 提高马铃薯产品的食用品质及探究其在主食产品中应用, 而关于马铃薯细胞壁对马铃薯功能特性的影响研究有限。在马铃薯产品加工过程中, 不同的加工方式会对细胞壁造成不同程度损伤, 从而可能会影响其加工特性, 因此探究细胞壁破损对细胞理化特性的影响对调控马铃薯产品品质具有重要意义。

本论文利用果胶酶对马铃薯完整细胞进行分离, 并利用纤维素酶对分离的完整细胞进行破壁, 以

此制备不同细胞壁破损的马铃薯细胞, 并以马铃薯淀粉作为对照, 探究马铃薯细胞壁破损对于细胞结构、糊化特性、热特性、消化特性等理化特性的影响, 从而根据破壁程度调控马铃薯加工特性, 为马铃薯主粮化战略提供了理论依据, 对于推动马铃薯全食品体系的应用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

马铃薯 无锡市大悦城超市; 胰酶(Cat.No.P7545, 酶活: $8\times\text{USP}$)、淀粉葡萄糖苷酶(A7095, $\geq 260\text{ U/mL}$) Sigma-Aldrich 化学有限公司; 果胶酶(2000 U/g)、纤维素酶(50 U/g) 上海源叶生物有限公司; 葡萄糖氧化酶检测试剂盒(GOPOD) 北京利德曼有限公司; 冰乙酸、无水乙醇、盐酸、氢氧化钾、无水乙酸钠 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

BT-9300ST 型激光粒度分布仪 丹东百特仪器有限公司; RVA Rapid-20 型快速黏度分析仪 澳大利亚 Perten 公司; LV100ND POL/DS 型光学显微镜 尼康精机(上海)有限公司; D2 PHASER 型 X 射线衍射仪 德国 Bruker 公司; FE28-Standard 型精密 pH 计、DSC3 型差示扫描量热仪 瑞士 Mettler-Toledo 仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 不同破损程度马铃薯细胞及淀粉的制备 完整马铃薯细胞分离: 将马铃薯洗净, 去皮切成约 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的小块; 配制 2000 mL 的 0.1 mol/L , pH 为 3.5 的柠檬酸缓冲溶液, 并加入 40 mg 果胶酶, 在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 下预热活化 0.5 h; 取 1.6 L 预活化的果胶酶溶液, 加入 250 g 马铃薯块, 在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 下酶解 3 h; 将酶解后马铃薯块在流水下通过双层网筛过筛, 所选用的筛网目数为 100 目和 200 目, 收集 200 目网筛上的马铃薯细胞; 将分离出来的马铃薯细胞于 6000 r/min , 离心 15 min, 收集沉淀; 放入烘箱于 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 干燥 24 h, 即可得到完整的马铃薯细胞^[11]。

制备不同破损程度的马铃薯细胞: 配制 500 mL pH=4.8 的 0.2 mol/L 醋酸-醋酸钠缓冲溶液; 加入 100 mg 纤维素酶, 于 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 下预热活化 0.5 h; 准确称量 20 g 干燥后马铃薯细胞与纤维素酶溶液混合,

分别酶解 2 h 和 4 h 后,于 6000 r/min,离心 15 min,取部分沉淀于显微镜下观察其破损程度;收集离心后沉淀于 60 °C 烘箱中干燥 24 h,即可得到不同细胞壁破损程度的马铃薯细胞。

制备马铃薯淀粉:采用湿磨法分离马铃薯淀粉,将处理好的马铃薯块在破壁机中打浆,然后过 200 目筛,并将其在 4 °C 放置 24 h,将所得沉淀于 60 °C 烘箱中干燥 24 h。干燥完成后取出,磨碎,过筛后得到淀粉^[12]。

1.2.2 显微结构观察 将收集的细胞样品和淀粉用 1% 的刚果红染色(特异性染色细胞壁),在光学显微镜下观察其形态和结构^[13]。

1.2.3 化学组分测定 所有细胞样品在测定组分前使用研磨机破碎。水分含量采用直接干燥法测定^[14];粗蛋白含量采用凯氏定氮法测定^[15];脂肪利用索氏抽提法分析^[16];淀粉利用总淀粉含量测定试剂盒(Megazyme K-TSTA)进行定量分析;纤维素利用纤维素含量测定试剂盒(Megazyme K-TDFR)测定。

1.2.4 粒径分布测定 采用激光粒度分析仪进行测定淀粉及细胞粉粒径分布,取适量样品,置于样品池中,超声分散 2 min,遮光率范围在 5%~10%,测定粒度分布,样品折射率为 1.530%^[17]。

1.2.5 晶体结构测定 将样品分别放入 X 射线衍射仪专用样品盘中,压实、平整后放入 X 射线衍射仪中扫描,获得衍射图谱。计算相对结晶度^[12],公式如下。

$$RC(\%) = \frac{A_c}{A_c + A_a} \times 100$$

其中, A_c 是结晶区面积; A_a 是无定形区面积。

1.2.6 吸水率测定 准确称取 1 g 样品与 20 mL 蒸馏水于离心管中混合,振荡搅拌 0.5 h,3600 r/min 离心 5 min,弃上清液,称量沉淀物的质量^[18]。

$$\text{吸水率}(\%) = \frac{(m_{\text{沉淀}} + m_{\text{离心管}}) - (m_{\text{样品}} + m_{\text{离心管}})}{m_{\text{样品}}} \times 100$$

1.2.7 膨胀度与溶解度测定 称取 0.5 g 淀粉样品分散于 20 mL 蒸馏水中,然后在 90 °C 水浴中加热 30 min,糊化过程中每隔 5 min 振荡一次,加热结束后置于冰水浴中冷却至室温,在 5000 r/min 下离心 20 min,取上清液于铝盒中放入烘箱中 102 °C 蒸发 4 h,干燥至恒重^[19]。计算公式如下:

$$\text{溶解度}(\%) = \frac{m_5 - m_4}{m_1} \times 100$$

$$\text{膨胀度} \left(\frac{g}{g} \right) = \frac{m_3 - m_2}{m_1(1 - S)}$$

其中, m_1 为样品质量; m_2 为离心管质量; m_3 为离心管与沉淀的质量; m_4 为铝盒质量; m_5 为干燥后质量; S 为溶解度。

1.2.8 黏度特性测定 利用快速黏度分析仪测定细胞粉的糊化特性。取 2 g 样品和 20 mL 去离子水于

铝杯中,并使用配套搅拌桨将样品分散。测定程序为:50 °C 保持 60 s,3.75 min 后升至 95 °C,95 °C 保持 150 s,3.75 min 内降至 50 °C 并保持 2 min。转速在开始设置为 960 r/min,保持 10 s,之后保持在 160 r/min 直到结束。

1.2.9 热特性测定 使用差示扫描量热仪(DSC)进行测定,测试条件:将约 4 mg 样品准确称重到铝锅中,并与 10 μ L 水混合,然后将锅密封并在室温下平衡 12 h,之后以 10 °C/min 的加热速率从 25 °C 扫描至 125 °C,使用空铝锅作为参考。

1.2.10 体外消化特性测定 通过体外模拟消化测定样品的消化性能^[20-21]。消化酶配制:取 4.5 g 胰酶溶于 40 mL 去离子水中,涡旋振荡 10 min 使其分散均匀,以 5000 r/min 的转速离心 10 min,取 27 mL 上清液与 3.2 mL 淀粉葡萄糖苷酶混合。首先,称取 0.2 g 样品于离心管中,依次加入 4 mL 去离子水、4 mL 醋酸钠缓冲液(pH5.2),混合均匀后置于 37 °C 水浴摇床中振动 30 min(170 r/min)。之后,取 2 mL 混酶加入混合体系中。分别在 0、10、20、30、45、60、90、120、150、180、240、300 min 时取 0.1 mL 酶解液置于 0.9 mL 乙醇溶液(90%)中,并以 10000 \times g 离心 5 min,取上清液。使用 GOPOD 试剂盒进行测定。计算消化过程中葡萄糖释放量及快速消化淀粉(Rapidly Digestible Starch, RDS)、慢消化淀粉(Slowly Digestible Starch, SDS)和抗性淀粉(Resistant Starch, RS)含量,计算公式如下:

$$RDS(\%) = \frac{0.9 \times (G_{20} - G_0)}{W} \times 100$$

$$SDS(\%) = \frac{0.9 \times (G_{120} - G_{20})}{W} \times 100$$

$$RS(\%) = 100\% - RDS(\%) - SDS(\%)$$

式中: G_0 为酶解前样品中游离葡萄糖的含量,mg; G_{20} 为消化 20 min 后释放葡萄糖含量,mg; G_{120} 为消化 120 min 后释放葡萄糖含量,mg; 0.9 为葡萄糖基转化系数; W 是样品中总淀粉质量,mg。

1.3 数据处理

实验结果为三次测量平均值,结果以平均数 \pm 标准差表示。采用 Origin 2018 对实验结果进行绘图,并采用 SPSS22 软件对数据进行方差分析(ANOVA),采用邓肯多重比较,进行显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同破损程度马铃薯细胞显微结构

由图 1 可知,完整马铃薯细胞中淀粉颗粒紧密堆积,并被细胞壁包裹,呈现圆球状,这和先前所观察的马铃薯细胞结构一致^[2]。胞内由大小不一的淀粉颗粒组成,大部分粒径范围在 15~50 μ m,与先前研究结果一致^[22]。胞内淀粉颗粒的大小差异与淀粉合成酶有关,发育前期主要以小颗粒为主,而发育后期形成大颗粒^[23]。经过酶解破壁 2 h 后的马铃薯细胞可

明显观察到细胞壁出现破损, 胞内仍残留部分淀粉颗粒, 这是由于纤维素酶使马铃薯细胞壁部分发生水解, 从而产生破裂使得部分淀粉颗粒向外溢出。观察酶解时间 4 h 的细胞可知, 其细胞壁结构基本完全被破坏, 呈现模糊的轮廓及碎片, 表明随着酶解时间的延长, 细胞壁中纤维素被大量水解, 而导致细胞壁几乎完全破损, 胞内淀粉颗粒基本处于游离状态。此外, 由图 1 可得, 马铃薯淀粉呈大小不一的不规则椭圆及圆形, 细胞结构完全破坏, 且无细胞壁碎片的存在。以上结果表明, 在本研究中马铃薯细胞被完全分离, 同时不同破壁程度的马铃薯细胞被成功制备。

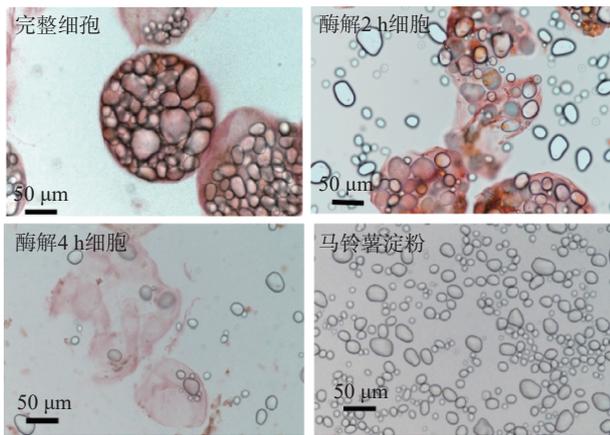


图 1 马铃薯细胞和马铃薯淀粉的显微结构
Fig.1 Microscopic structure of potato cells and potato starch potato

2.2 不同破损程度马铃薯细胞样品组分分析

不同破损程度马铃薯细胞样品组分如表 1 所示。完整细胞中淀粉、蛋白和脂肪含量分别为 73.60%、6.94% 与 1.90%, 与先前报道的马铃薯组分相似^[24-25], 表明完整细胞样品可减少营养组分的流失。由于包裹在细胞内的水分子在干燥过程中不易蒸发, 完整细胞的水分含量高于其他样品。完整细胞呈现出较低的淀粉含量, 这与其较高含量的非淀粉组分有关, 完整细胞中大量的营养组分(淀粉、蛋白及脂质)被包裹在具有刚性结构的细胞壁中, 在分离过程中损失较低^[5]。随着酶解时间的增加, 纤维素含量降低, 细胞壁破损增加, 大量淀粉颗粒溢出, 同时胞内营养组分泄露。一些水溶性蛋白质溶于水, 在样品收集过程中被去除, 导致了样品中蛋白质的流失。不同样品中脂肪含量无显著变化, 这可能与脂肪不溶于水有关。纤维素是构成细胞壁的主要骨架, 因此本研

表 1 马铃薯细胞和马铃薯淀粉的组分

Table 1 Components of potato cells and potato starch

种类	水分(%)	淀粉(%)	蛋白(%)	脂肪(%)	粗纤维(%)
完整细胞	15.03±0.36 ^a	73.60±1.90 ^a	6.94±0.46 ^a	1.90±0.58 ^a	2.72±0.16 ^a
酶解2 h细胞	14.28±0.49 ^{ab}	81.83±2.00 ^b	5.04±0.3 ^b	1.80±0.66 ^a	1.48±0.20 ^b
酶解4 h细胞	14.05±0.71 ^{ab}	84.80±2.98 ^b	3.32±0.67 ^c	1.58±0.11 ^a	0.74±0.10 ^c
马铃薯淀粉	13.29±0.48 ^b	93.70±0.99 ^b	1.15±0.24 ^d	1.00±0.25 ^a	0.38±0.18 ^d

注: 同列标有不同小写字母表示数据差异性显著 ($P < 0.05$), 表2、表4~表6同。

究通过酶解纤维素制备不同破损程度的细胞, 由表 1 可得, 随着酶解时间增加, 粗纤维和蛋白质含量降低, 淀粉含量增加, 进一步表明了实验成功制备了不同破损程度的马铃薯细胞。

2.3 不同破损程度马铃薯细胞的粒度分布

不同破损程度的马铃薯细胞的粒径分布图及相关参数如图 2 和表 2 所示。所有样品除马铃薯淀粉外均呈双峰分布, 第一个峰分布范围在 10~100 μm, 与淀粉粒径有关, 而第二个峰分布范围在 100~700 μm, 与马铃薯细胞粒径大小有关。根据表 2 和图 2 可知, 不同破损程度的马铃薯细胞间的体积平均粒径(D[4,3])呈显著差异 ($P < 0.05$), 其中完整细胞的体积平均粒径最大(196.30 μm), 马铃薯淀粉的体积平均粒径最小(34.07 μm), 这和先前研究所观察到的马铃薯细胞和淀粉的粒径相似^[13,22]。同时由粒径分布图(图 2)可知, 随着破壁程度的增加, 与淀粉相关的峰强度逐渐增强, 表明随着细胞壁结构的破损, 马铃薯淀粉从破裂细胞壁泄露, 完整细胞结构被破坏, 游离淀粉颗粒增多, 从而导致平均粒径减小, 这与显微镜所观察的结果一致。

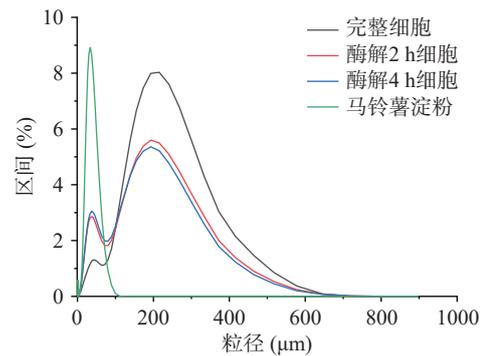


图 2 不同破损程度的马铃薯细胞的粒径分布
Fig.2 Particle size distribution of potato cells with different degrees of damage

表 2 马铃薯细胞和马铃薯淀粉的粒径分布

Table 2 Particle size distribution of potato cells and potato starch

种类	D[4,3](μm)	D10(μm)	D50(μm)	D90(μm)
完整细胞	196.30±0.23 ^a	36.62±0.37 ^a	188.30±0.15 ^a	354.20±0.29 ^a
酶解2 h细胞	147.10±0.21 ^b	20.13±0.02 ^b	127.50±0.10 ^b	314.70±0.50 ^b
酶解4 h细胞	140.30±0.61 ^{bc}	19.67±0.04 ^{bc}	116.40±0.65 ^{bc}	304.20±1.43 ^{bc}
马铃薯淀粉	34.07±0.03 ^d	13.21±0.01 ^d	32.48±0.02 ^d	57.72±0.04 ^d

2.4 细胞壁破损对胞内淀粉晶体结构的影响

马铃薯细胞样品和马铃薯淀粉的 XRD 图谱及相对结晶度如图 3 所示。由图 3 可知, 所有马铃薯样品均出现了尖峰和弥散衍射峰, 其中结晶区呈尖锐的衍射峰, 而非结晶区呈现弥散的衍射峰^[26]。所有样品均在 2θ 为 5.6°、17°、20°、24°呈现尖锐的衍射峰, 表现出典型的 B 型晶体排列^[27]。由图 3 可知, 所有样品的衍射峰位置无显著变化, 表明细胞壁的破损对于马铃薯胞内淀粉颗粒的晶型结构没有影响。完整

的马铃薯细胞呈现较弱的衍射峰,这可能是由于完整细胞的细胞壁组分及非淀粉营养组分对衍射峰的削弱^[19]。通过计算样品中相对结晶度可知,随着细胞壁破损程度的增大,细胞的相对结晶度也随之增大,完整细胞的相对结晶度最低(21.89%),细胞壁完全破损的马铃薯淀粉则呈现出最高的相对结晶度(27.13%)。随着纤维素酶解时间的增加,细胞壁中纤维素被酶解,胞内可溶性组分被释放,导致样品中淀粉含量相对较高,从而呈现出较强的衍射峰强度。

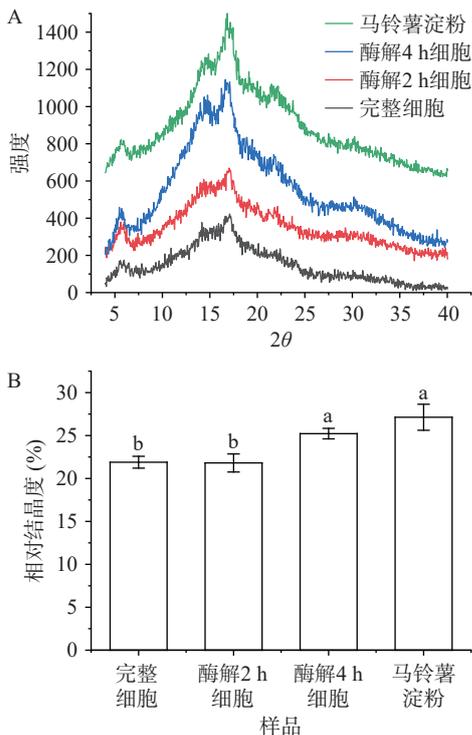


图3 马铃薯细胞与马铃薯淀粉的XRD图(A)和相对结晶度(B)

Fig.3 XRD diagrams (A) and relative crystallinity (B) of potato cells and potato starch

注:不同字母代表样品间显著性差异($P<0.05$)。

2.5 细胞壁破损对胞内淀粉吸水率、膨胀度与溶解度的影响

淀粉的吸水率指的是单位质量的淀粉在特定条件下所能吸收的水量,通常以百分比表示。如表3所示为室温下细胞及淀粉样品的吸水率,马铃薯细胞具有最高的吸水率(70.20%),而马铃薯淀粉的吸水率最低(42.51%),与Kim等^[11]研究结果相似。随着纤维素含量的降低而降低,表明在低温下,吸水率主

要与细胞壁多糖的亲水性有关,而非淀粉颗粒。细胞壁中的主要成分之一是纤维素,这是一种刚性多糖,具有较强的亲水性,因此具有较高纤维素含量的细胞呈现较强的吸水能力^[11]。其中,未经热处理的淀粉颗粒中淀粉分子间以氢键连接并形成致密的结构,水分子难以进入颗粒内部,从而导致较低的吸水率。随着细胞壁破损程度的增加,纤维素含量降低,淀粉相对含量增加,吸水率降低^[5]。

表3 马铃薯细胞和马铃薯淀粉的吸水率、溶解度和膨胀度
Table 3 Water-holding power, solubility and swelling of potato cells and potato starch

指标	完整细胞	酶解2 h细胞	酶解4 h细胞	马铃薯淀粉
吸水率(%)	70.20±3.45 ^a	65.61±1.76 ^b	55.32±2.31 ^c	42.51±1.89 ^d
溶解度(%)	8.21±1.17 ^d	8.99±0.45 ^{bc}	9.39±1.15 ^b	10.64±0.18 ^a
膨胀度(g/g)	9.16±0.06 ^d	14.69±0.05 ^c	15.31±0.39 ^b	18.34±0.05 ^a

注:同行不同小写字母表示同一指标数据具有显著性差异($P<0.05$)。

由表3可知,完整细胞壁呈现较低的膨胀度,这主要是由于细胞壁的存在阻碍了水和热与胞内淀粉的相互作用,同时胞内紧密的细胞质基质限制了淀粉的吸水溶胀^[13]。随着细胞壁破损程度的增加,胞内淀粉与水 and 热的相互作用增强,促使淀粉吸水溶胀。溶解度可用来了解加热过程中淀粉颗粒吸水溶胀破裂进而从颗粒中溶出行为的变化情况。完整细胞呈现较低的溶解度,这主要是由于细胞壁的存在及致密堆积的细胞质基质会阻碍较大的分子链从胞内溶出^[28]。马铃薯淀粉中较高的溶解度是由于淀粉颗粒在无细胞壁的屏障作用下,在糊化过程淀粉颗粒破裂,氢键暴露,促使了水分子与淀粉分子的相互作用,导致更多的淀粉分子溶出,与Guo等^[19]研究结果一致。

2.6 细胞壁破损对胞内淀粉的黏度特性的影响

黏度是影响淀粉基食品加工的重要特性。由表4可得酶解2 h细胞的峰值黏度最高(4616.0 cP),完整细胞的峰值黏度最低(2792.0 cP)。酶解2 h细胞中较高的峰值黏度可能是由于该阶段细胞壁破损程度较低,仍含有较高含量的细胞壁多糖,具有强吸水性的细胞壁多糖可促使样品黏度增加,同时细胞壁的破损使部分水分子能够快速与细胞内外淀粉颗粒相结合,从而使得淀粉颗粒膨胀,在细胞壁多糖和淀粉共同作用下使黏度增加^[11]。随着酶解时间的增加,胞内淀粉基本完全溢出,但仍残留部分的纤维素,因

表4 马铃薯细胞和马铃薯淀粉的黏度特性

Table 4 Viscosity characteristics of potato cells and potato starch

种类	峰值黏度(cP)	谷值黏度(cP)	崩解值(cP)	最终黏度(cP)	回生值(cP)
完整细胞	2792.0±31.1 ^d	1019.0±15.6 ^d	1773.0±53.0 ^a	2979.0±10.6 ^d	1960.0±12.7 ^b
酶解2 h细胞	4616.0±41.1 ^a	3643.0±28.3 ^a	973.0±19.1 ^b	5293.0±40.3 ^a	1650.0±4.9 ^c
酶解4 h细胞	3599.0±53.0 ^b	2977.0±8.5 ^b	622.0±14.9 ^c	5138.0±9.9 ^b	2161.0±73.5 ^a
马铃薯淀粉	3312.0±2.1 ^c	2716.0±2.5 ^c	596.0±24.0 ^d	3549.0±1.4 ^c	833.0±9.2 ^d

注:同列标有不同小写字母表示数据差异性显著($P<0.05$)。

此相比于淀粉, 破裂的细胞仍呈现较高的黏度。在完整马铃薯细胞中, 完整的细胞壁结构中非淀粉聚合物组分与水分之间优先相互作用而限制了水合作用, 进而使得完整细胞的胞内淀粉颗粒的膨胀受到限制, 导致其峰值黏度明显降低^[29]。此外, 完整细胞呈现最高的崩解值, 这可能是因为加热搅拌过程中细胞逐渐破裂, 淀粉从细胞内溢出, 同时淀粉颗粒破裂, 淀粉分子溢出, 细胞及淀粉颗粒的同时崩解, 导致了体系的较大崩解值^[11]。回生值通常是指在冷却过程中, 直链淀粉重排而导致黏度的增加, 回生值为最终黏度和谷值黏度的差值。在本研究中, 相比淀粉, 马铃薯细胞均呈现较高的回生值, 这可能是由于细胞样品在持续的搅拌剪切过程中, 胞内的淀粉分子不断溶出, 且淀粉链之间相互缠结, 从而导致黏度的持续增加, 这与先前研究结果一致^[2,13]。

2.7 细胞壁破损对胞内淀粉热特性的影响

DSC 反映了淀粉从半结晶到无定形的转变过程, 糊化温度与热稳定性有关, 而糊化焓值(ΔH)反映了双螺旋的熔化所吸收或释放的热量^[7]。不同破损程度的马铃薯细胞的热特性参数如表 5 所示, 所有样品均显示出与马铃薯淀粉相变相对应的单个尖锐的吸热峰。同时, 随着细胞壁破损程度的增加, 糊化温度(T_o 、 T_p 、 T_c)呈略微下降的趋势, 但不同样品间糊化温度差异不明显($P>0.05$)。完整细胞具有较高的糊化温度, 这主要是由于细胞壁中的非淀粉聚合物组分(蛋白质、非淀粉多糖等)的存在, 优先与水分子相互作用, 阻碍了水和热与淀粉的水合作用, 从而延缓了淀粉的吸热, 使其糊化温度增加^[6]。细胞壁的破损使淀粉分子暴露于水热环境中, 加速了淀粉分子的糊化, 从而导致较低的糊化温度, 与 Sushil 等^[10]的研究结果一致。随着细胞壁破损程度的增加, 其糊化焓逐渐增加, 同时马铃薯淀粉的 ΔH 显著高于其他马铃薯细胞样品($P<0.05$)。马铃薯细胞中的细胞壁具有一定的吸水性, 能够在一定程度上阻隔水分子与胞内淀粉颗粒结合发生糊化, 因此在细胞壁存在时能够维持一个相对稳定的 ΔH ; 而当细胞壁全部消失使得淀粉颗粒外露的时候, 水分子能够直接与淀粉颗粒结合, 从而吸收环境热量发生糊化, 使得其糊化焓为最高; 且马铃薯淀粉最高的 ΔH (14.35 J/g)可能与其高淀粉含量有关^[13,19]。

表 5 马铃薯细胞和马铃薯淀粉的 DSC 分析
Table 5 DSC analysis of potato cells and potato starch

样品	T_o ($^{\circ}C$)	T_p ($^{\circ}C$)	T_c ($^{\circ}C$)	ΔH (J/g)
完整细胞	67.59±0.56 ^a	70.49±0.47 ^a	74.73±0.33 ^a	11.12±0.85 ^b
酶解 2 h 细胞	67.06±0.17 ^a	70.11±0.14 ^a	74.56±0.21 ^a	11.43±0.38 ^b
酶解 4 h 细胞	66.78±0.60 ^a	69.59±0.88 ^a	74.17±0.94 ^a	11.70±0.36 ^b
马铃薯淀粉	65.77±0.78 ^b	68.49±0.80 ^b	74.14±0.52 ^a	14.35±0.23 ^a

2.8 马铃薯细胞破损对胞内淀粉消化特性影响

不同破损程度的马铃薯细胞中 RDS、SDS、RS

的含量如表 6 所示。马铃薯淀粉呈现最高的 RDS 含量和最低的 RS 含量, 主要是由于游离淀粉颗粒增加了消化酶与淀粉颗粒的接触, 从而导致淀粉水解速率的增加^[7]。完整马铃薯细胞具有完整的细胞结构, 细胞壁的物理阻碍作用使得消化酶不能直接与淀粉颗粒进行接触, 进而降低了淀粉水解成葡萄糖的速度, 促使了抗性淀粉含量的增加^[26]。先前研究表明, 豆类细胞壁的存在可显著降低胞内淀粉的水解速率, 且细胞壁破损会减弱对消化酶的物理屏障作用^[30]。在本研究中, 随着马铃薯细胞破损程度的增大, 其胞内 RS 的含量逐渐减少, 主要是由于纤维素酶的作用使细胞壁破裂, 且纤维素含量降低, 对消化酶的阻碍作用减弱, 加速了胞内淀粉的水解。此外, 残留的细胞壁多糖如纤维素可以与消化酶非特异性催化结合, 因此, 相比于纯淀粉, 破碎细胞仍存在较高含量的抗性淀粉^[31-32]。

表 6 马铃薯细胞和马铃薯淀粉的体外消化特性
Table 6 *In vitro* digestive performance of potato cells and potato starch

样品	RDS(%)	SDS(%)	RS(%)
完整细胞	26.03±0.36 ^d	20.32±0.26 ^c	53.65±0.62 ^a
酶解 2 h 细胞	27.36±0.21 ^c	22.36±0.01 ^b	50.28±0.20 ^b
酶解 4 h 细胞	28.36±0.27 ^b	22.46±0.08 ^b	48.91±0.20 ^b
马铃薯淀粉	36.44±0.22 ^a	23.65±0.04 ^a	39.91±0.18 ^c

注: 同列标有不同小写字母表示数据差异性显著($P<0.05$)。

3 结论

本研究通过纤维素酶水解制备了不同细胞壁破损程度的马铃薯细胞, 解析细胞壁破损对于淀粉结构及细胞粉理化特性的影响机制。结果表明, 随着破壁程度的增加, 胞内淀粉颗粒溢出, 胞内非淀粉营养成分损失, 细胞平均粒径减少。细胞壁的破裂减弱了细胞壁的物理屏障作用, 促进了胞内外淀粉分子与水分子的相互作用, 从而增加了马铃薯细胞中淀粉的膨胀度和溶解度。同时, 由于细胞壁多糖的强吸水性以及胞内外淀粉颗粒的吸水溶胀促进了黏度的增加, 使酶解 2 h 的细胞呈现最高的峰值黏度。随着马铃薯细胞壁破损程度的增加, 细胞壁对水和热的阻碍作用减弱, 导致马铃薯细胞的糊化温度逐渐降低, 且胞内淀粉和酶的接触程度增加, 加速了淀粉的水解, 使 RDS 的含量增大, RS 的含量减少。综上所述, 不同破壁程度的马铃薯细胞呈现出不同的功能特性, 可根据实际需求选择合适的样品来调控淀粉功能特性, 对马铃薯在食品产业的应用提供了新思路。后续研究可进一步探究马铃薯细胞粉在不同应用产品体系中的结构和加工特性的差异, 以实现马铃薯细胞粉在食品产业的应用。

参考文献

- [1] AHMED S, ZHOU X, PANG Y H, et al. Genetic diversity of potato genotypes estimated by starch physicochemical properties and microsatellite markers[J]. *Food Chemistry*, 2018, 257: 368–375.
- [2] DO D T, SINGH J, OEY I, et al. Isolated potato parenchyma cells: Physico-chemical characteristics and gastro-small intestinal digestion *in vitro*[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 105972.
- [3] TRONCOSO E, ZÚNIGA R, RAMÍREZ C, et al. Microstructure of potato products: Effect on physico-chemical properties and nutrient bioavailability[J]. *Foods*, 2009, 3(2): 41–54.
- [4] 丁丽. 马铃薯细胞壁对淀粉体外消化性的影响机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. [DING L. Effects of physical structure of potato cell wall on *in vitro* starch digestion properties[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.]
- [5] XIONG W Y, 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.
- [6] 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. [LI P. Mechanistic study of the structural features and digestion properties of starches in intact pulse cells[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.]
- [7] DING L, XIE Z Q, FU X, et al. Structural and *in vitro* starch digestion properties of potato parenchyma cells: Effects of gelatinization degree[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 113: 106464.
- [8] SINGH N, KAUR L, EZEKIEL R, et al. Microstructural, cooking and textural characteristics of potato (*Solanum tuberosum* L) tubers in relation to physicochemical and functional properties of their flours[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 85(8): 1275–284.
- [9] 李瑞红. 鹰嘴豆细胞壁结构对淀粉凝胶化行为及其消化性的影响[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023. [LI R H. Effects of chickpea cell wall structure on starch gelatinization behavior and digestibility[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023.]
- [10] SUSHIL D, BHATTARAI R R, GORHAM JD, et al. Intactness of cell wall structure controls the *in vitro* digestion of starch in legumes[J]. *Food & Function*, 2016, 7(3): 1367–1379.
- [11] KIM E J, KIM H S. Physicochemical properties of dehydrated potato parenchyma cells with ungelatinized and gelatinized starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 117: 845–852.
- [12] SHU L, DHITAL S, JUNEJO S A, et al. Starch retrogradation in potato cells: Structure and *in vitro* digestion paradigm[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 286: 119261.
- [13] SHIN E H, BAIK M Y, KIM H S. Comparison of physicochemical properties of starches and parenchyma cells isolated from potatoes cultivated in Korea[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2015, 24: 955–963.
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB/T 5009.3-2016 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB/T 5009.3-2016 Determination of moisture in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB/T 5009.5-2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB/T 5009.5-2016 Determination of protein in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB/T 5009.6-2016 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB/T 5009.6-2016 Determination of fat in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [17] DO D T, SINGH J, OEY I, et al. Modulating effect of cotyledon cell microstructure on *in vitro* digestion of starch in legumes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 112–122.
- [18] WAN L Y, WANG X D, LIU H Y, et al. Retrogradation inhibition of wheat starch with wheat oligopeptides[J]. *Food Chemistry*, 2023, 427: 136723.
- [19] GUO P, YU J L, WANG S, et al. Insights into the starch gelatinization behavior inside intact cotyledon cells[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 163: 541–549.
- [20] CHANG R R, XU K J, ZHANG R, et al. A combined recrystallization and acetylation strategy for resistant starch with enhanced thermal stability and excellent short-chain fatty acid production[J]. *Food Chemistry*, 2024, 430: 136970.
- [21] LU X X, MA R R, ZHAN J L, et al. Starch digestion retarded by wheat protein hydrolysates with different degrees of hydrolysis[J]. *Food Chemistry*, 2023, 408: 135153.
- [22] 刘强. 影响马铃薯淀粉 Ghost 结构与性质的因素及机制探究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022. [LIU Q. Study on the factors and mechanisms affecting the structure and properties of potato starch ghost[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.]
- [23] 刘婕, 艾菊, 高冬丽. 马铃薯块茎不同发育时期淀粉合成相关基因表达与淀粉颗粒大小分析[J]. *云南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 42(5): 32–36. [LIU J, AI J, GAO D L. Analysis of starch synthesis related gene expression and starch granule size during tuber developmental stages of potato[J]. *Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2022, 42(5): 32–36.]
- [24] 周童童, 梁单, 刘伟, 等. 不同中薯系列马铃薯淀粉组成与理化性质的差异分析[J]. *核农学报*, 2022, 36(4): 766–776. [ZHOU T T, LIANG S, LIU W, et al. Components and physicochemical properties of starches from different zhongshu series potato cultivar[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(4): 766–776.]
- [25] 杨娟, 程力, 洪雁, 等. 不同工艺制备的马铃薯全粉理化性质比较[J]. *食品与生物技术学报*, 2019, 38(8): 148–154. [YANG J, CHENG L, HONG Y, et al. Effect of different preparation process on physicochemical properties of potato power[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2019, 38(8): 148–154.]
- [26] 孙秋月, 王若桦, 吴非. 超声波和酯化复合处理马铃薯淀粉的性质分析[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(14): 119–124. [SUN Q Y, WANG R H, WU F. Properties analysis of potato starch treated by ultrasonic and esterification[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(14): 119–124.]
- [27] DING L, HUANG Q, LI H T, et al. Controlled gelatinization of potato parenchyma cells under excess water condition: Structural and *in vitro* digestion properties of starch[J]. *Food & Function*, 2019, 10(9): 5312–5322.
- [28] LEE H, KIM H S. Isolation and physicochemical property of individual parenchyma cells from mealy sweet potato[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2020, 29: 521–529.
- [29] XIONG W Y, 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.
- [30] BERG T, SINGH J, HARDACRE A, et al. The role of cotyledon cell structure during *in vitro* digestion of starch in navy beans[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(2): 1678–1688.
- [31] WANG B X, CHEN S Y, HUANG S Y, et al. Comparative study on the structural and *in vitro* digestion properties of starch within potato parenchyma cells under different cooking methods[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 223: 1443–1449.
- [32] BHATTARAI R R, DHITAL S, MENSE A, et al. Intact cellular structure in cereal endosperm limits starch digestion *in vitro*[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 81: 139–148.