

干热处理对芸豆子叶细胞内含淀粉结晶结构和体外消化动力学的影响规律研究

王苗苗¹, 何小维¹, 黄强^{1,2}, 张斌¹

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

(2. 华南理工大学珠海现代产业创新研究院, 广东珠海 519175)

摘要:以芸豆为原料, 分离内含淀粉的完整芸豆子叶细胞, 在 120、140、160、180 °C 下干热处理 4 h。通过 X 射线衍射和热分析其淀粉结晶结构, 并基于一阶动力学模型分析其消化动力学。结果表明: 与相同处理条件下的芸豆淀粉相比, 芸豆子叶细胞表皮皱缩, 体积略有减小, 形态趋于球形, 偏光十字略有减弱。芸豆子叶细胞的结晶度有所下降, X 衍射图仍为 C 型, 原子叶细胞的起始糊化温度和糊化焓降低约 0.41 °C 和 4.61 J/g, 在 140 °C 干热处理条件下, 子叶细胞的起始糊化温度和糊化焓降低了 0.73 °C 和 11.70 J/g。在消化性上, 180 °C 处理下的芸豆子叶细胞与未经热处理的细胞相比, 消化程度增加了约 3.02%。但芸豆子叶细胞在 360 min 的水解率 (~8%) 均显著低于芸豆淀粉 (~60%), 可能是由于 α -淀粉酶进入芸豆子叶细胞, 细胞内蛋白质组分对淀粉颗粒形成包裹屏障, 从而阻碍了淀粉酶与细胞内淀粉的结合, 导致了芸豆子叶细胞较慢的体外淀粉消化速率。本研究采用 120 °C~180 °C 干热条件处理芸豆子叶细胞, 是一种较优的加工方式, 可获得低血糖生成指数的芸豆产品。

关键词: 细胞壁; 抗性淀粉; 消化性; 芸豆全食品

文章编号: 1673-9078(2019)09-119-125

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.9.014

Effect of Dry Heat Treatment on the Structural and *in Vitro* Digestion Properties of Starch Granules Encapsulated in Intact Pinto Bean Cells

WANG Miao-miao¹, HE Xiao-wei¹, HUANG Qiang^{1,2}, ZHANG Bin¹

(1. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510640, China)

(2. SCUT-Zhuhai Institute of Modern Industrial Innovation, South China University of Technology, Zhuhai 519175, China)

Abstract: The intact cotyledon cells were isolated from pinto beans and treated with dry heat at 120, 140, 160, 180 °C for 4 h. The crystalline structures of starch were analyzed by X-ray diffraction and differential scanning calorimeter, and the digestion kinetics were analyzed based on the first-order kinetic model. The results showed that compared with the pinto bean starch under the same heating treatment condition, the pinto bean cotyledon cell epidermis shrank, the volume decreased slightly, the shape tended to be spherical, and the polarized cross weakened slightly. The crystallinity of the pinto bean cotyledon cells decreased, but the X-ray diffraction patterns remained to be C type. The initial gelatinization temperature and enthalpy of gelatinization decreased by 0.41 °C and 4.61 J/g, respectively. In terms of digestibility, the digestion extent of pinto bean cotyledon cells treated at 180 °C was increased by 3.02% than that of untreated pinto bean cotyledon cells. However, the hydrolysis rate of cells at 360 min (~8%) was significantly lower than that of pinto bean starch (~60%), which might be due to starch granules were wrapped by the protein components in the cells that hinder the binding of α -amylase to intracellular starch, which leads to slow digestion rate of starch in pinto bean cotyledon cells *in vitro*. The results showed that the dry heat treatment of pinto bean cotyledon cells at 120 °C~180 °C was an excellent processing method and the product with low glycemic index could be obtained.

Key words: cell wall; resistant starch; digestibility; pinto bean whole food

收稿日期: 2018-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31701546), 广东省自然科学基金项目 (2017A030313207)

作者简介: 王苗苗(1993-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 碳水化合物化学与营养

通讯作者: 张斌(1985-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 碳水化合物化学与营养

杂豆是除大豆外各种小宗豆类的总称, 最主要的两种组分是淀粉(50%~60%)和蛋白质(20%~38%), 还富含多种矿物质。我国杂豆品种繁多, 主要有芸豆、豌豆、扁豆和鹰嘴豆等。由于杂豆具有较低的血糖生成指数, 大量文献指出长期摄入杂豆对人体代谢疾病(如糖尿病、心血管疾病、结肠癌等)预防和控制有一定的功效^[1-4]。研究表明, 杂豆较低的消化速率主要是由于其具有厚且坚硬的细胞壁^[5]。在经蒸煮烹饪后, 杂豆仍能够保留完整的细胞壁结构, 阻碍其内含淀粉颗粒在蒸煮过程中的吸水膨胀及糊化^[6], 限制消化液中 α -淀粉酶的可及度及其消化速率^[7,8]。

在食品工业中, 干热处理是一种新型的淀粉物理改性方式, 通常处理温度高于淀粉的糊化温度但低于分解温度, 且水分含量通常小于10%。相比于化学改性, 干热物理改性是一种简单、安全的方式, 可明显改善淀粉性质。Sun等^[9]报道小麦粉在130℃干热处理2 h后, 其粘度值大幅提高, 证明淀粉分子在干热处理过程中可以与非淀粉组分在一定程度结合和相互作用。Chandanasree^[10]报道木薯淀粉在130℃干热处理4 h后, 其起始、峰值、终止温度及焓值均降低, 可能是干热处理后淀粉颗粒结晶结构崩解, 使得其易于糊化, 其结晶类型不变^[11]。

本文以我国具有代表性的杂豆品种芸豆(*Phaseolus vulgaris*)为原料, 无损分离出完整芸豆子叶细胞作为芸豆全食品的研究模型, 随后采用不同干热温度处理, 研究其表观形态、内含淀粉的结晶结构及体外消化性等的变化规律, 以期对芸豆类食品的加工提供科学指导, 为低血糖生成指数健康芸豆食品的设计和制造提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

芸豆, 广州当地市售; 猪胰酶, 10 USP/mg, 美国 Sigma-Aldrich 公司; 异硫氰酸荧光素-葡聚糖和 4-羟基苯甲酰肼, 美国 Sigma-Aldrich 公司; 总淀粉试剂盒, 爱尔兰 Megazyme 公司; 其他化学试剂均为分析纯。

EVO 18 型扫描电子显微镜, 德国 Carl Zeiss 公司; D8 ADVANCE 型 X-射线衍射分析仪, 德国 Bruker 公司; TCSP5 型激光共聚焦显微镜, 德国 Leica 公司; BX-51 型偏光热台显微镜, 日本 Olympus 公司; DSC-8000 型差示扫描量热仪器, 美国 Perkin-Elmer 公司。

1.2 样品制备

1.2.1 完整芸豆子叶细胞的分离

芸豆子叶细胞的分离方法参考 Edwards 等报道的方法^[7]。将芸豆浸泡在 4℃水中过夜, 去壳。取 100 g 芸豆去皮后置于 500 mL 水中, 在 60℃水浴条件下加热搅拌 60 min。将芸豆用研磨破碎, 用 300 目和 100 目的标准筛筛分, 取中间组分, 冷冻干燥后获得完整芸豆子叶细胞。其淀粉含量使用总淀粉试剂盒测定, 总淀粉量为 59.71%。

1.2.2 芸豆淀粉的提取

淀粉提取方法参考 Li 等报道的方法^[12]。将芸豆浸没在 150 mL 的 NaS₂O₂ 溶液中(0.45%, W/W), 置于 4℃过夜, 经去皮、打浆后, 过 300 目标准筛, 滤去蛋白质和细胞壁残渣, 所得滤液经 4000 r/min 离心 10 min, 弃去上清液和底层黄色蛋白质。将淀粉悬浮液置于 450 mL 氯化钠与甲苯混合液中, 搅拌 1 h 后离心, 除去蛋白质和脂类。重复该操作多遍, 直至甲苯层变得清晰, 即不含蛋白质, 40℃干燥过夜, 粉碎得芸豆淀粉。采用总淀粉试剂盒测得总淀粉量为 95.33%。

1.2.3 干热处理芸豆子叶细胞和淀粉

将烘箱温度分别调至 120℃、140℃、160℃、180℃, 取 5 g 芸豆淀粉或芸豆子叶细胞(测得水分 7.33%)干热处理 4 h, 反应后冷却, 密封保存。对照样为不做任何热处理的芸豆淀粉和子叶细胞。根据干热处理的条件将淀粉样品分别命名为 S(未处理的芸豆淀粉), S-120(120℃处理的芸豆淀粉), S-140(140℃处理的芸豆淀粉), S-160(160℃处理的芸豆淀粉), S-180(180℃处理的芸豆淀粉)。芸豆细胞样品命名为 C(未处理的芸豆细胞), C-120(120℃处理的芸豆细胞), C-140(140℃处理的芸豆细胞), C-160(160℃处理的芸豆细胞), C-180(180℃处理的芸豆细胞)。

1.3 光学显微镜观察

将冷冻干燥的样品分散在蒸馏水中, 置于载玻片上, 在正常光和偏振光场下观察干热处理后的芸豆淀粉和芸豆子叶细胞, 拍摄具代表性的颗粒形貌。

1.4 扫描电子显微镜观察

将样品台置于真空条件下进行喷金处理。在扫描电镜下观察淀粉和子叶细胞的表面形貌, 扫描电压为 10 kV, 淀粉和子叶细胞的放大倍数分别为 500 倍和 200 倍。

1.5 X射线衍射分析

用X射线衍射观察淀粉和子叶细胞的结晶度,在40 kV和40 mA下操作,步进间隔为0.02°,扫描速率为0.5 °/min。从4°扫描至30°。相对结晶度依据Hayakawa报道的方法计算相对结晶度^[13]。

1.6 热性质

使用差示扫描量热计分析样品的热性质。将芸豆淀粉(~3 mg)和芸豆子叶细胞(~5 mg)分别配置成淀粉含量为30% (W/W)的淀粉乳,密封于铝盘中在室温平衡2 h。用空皿为参比,以10 °C/min的速率从30至120 °C扫描。通过Pyris软件计算焓值(ΔH),起始温度(T_0),峰值温度(T_p)和终止温度(T_c)。

1.7 淀粉体外消化动力学

淀粉体外消化动力学的测定参考Zhang等^[14]报道的方法。称取芸豆淀粉或子叶细胞(50 mg,以淀粉干基计)置于离心管中,加入10 mL磷酸盐缓冲液,并在37 °C水浴中平衡。加入200 USP猪胰酶后,在0至360 min消化时间内,分别取50 μ L消化液,并加入250 μ L碳酸钠溶液(0.5 M)以终止反应,并在10000

g条件下离心5 min,取上清液。淀粉的麦芽糖当量用对羟基苯甲酸酞肼法测定,于410 nm波长条件下测得吸光值。芸豆淀粉或子叶细胞的淀粉经消化释放出的麦芽糖当量用以下公式计算得到:

$$\text{麦芽糖释放当量}(\%) = \frac{\text{上清液麦芽糖总当量}}{\text{淀粉干基}} \times 100\% \quad (1)$$

淀粉的消化率曲线拟合一级动力学方程得到消化速率常数。

$$C_t = C_\infty (1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

式中: t ,反应时间(min); C_t ,在反应时间 t 时反应物浓度; C_∞ ,反应结束时刻淀粉的消化量; k ,速率常数。

1.8 细胞壁通透性实验

观察细胞壁的通透性参考Zhang等^[15]报道的方法,并略有改动。将1 mg芸豆子叶细胞样品分散在1 mL FITC-葡聚糖溶液(2 mg/mL)中,在离心管中于37 °C混匀3 h,然后将混合物涂布在载玻片上并使用共聚焦观察激光扫描显微镜放大倍数为40 $\times$ 1.25。氩离子激光器的激发波长设定为488 nm,检测波长范围设定为从510 nm至600 nm。用LASAF软件拍摄具有代表性的干热处理后的芸豆子叶细胞光切图像。

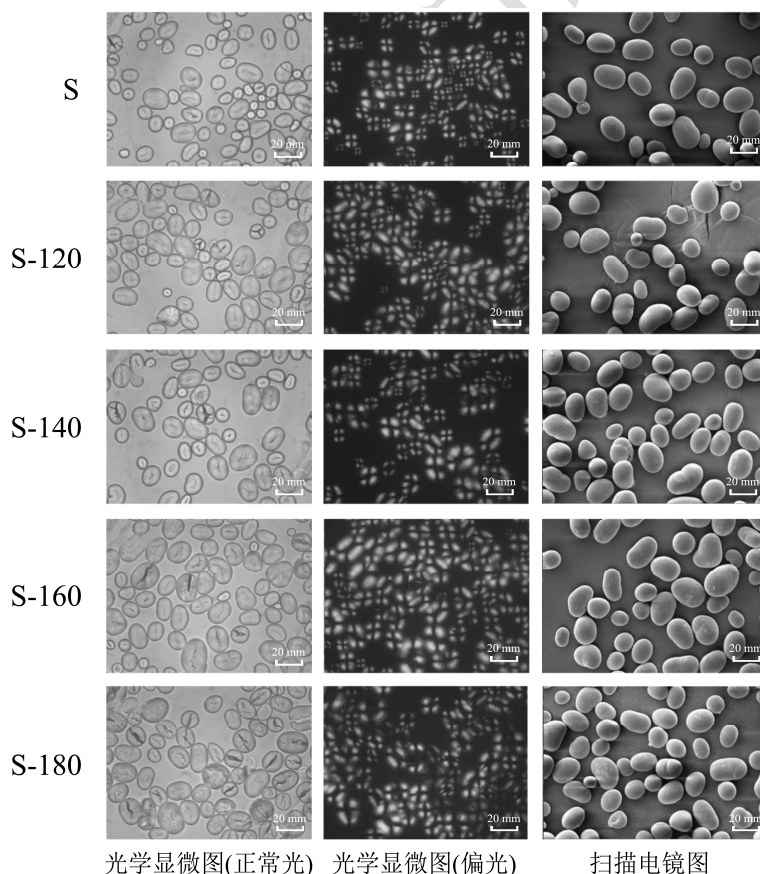


图1 干热处理的芸豆淀粉光学显微图和扫描电镜图

Fig.1 Light micrographs and scanning electron micrographs of pinto bean starches before/after dry heat treatment

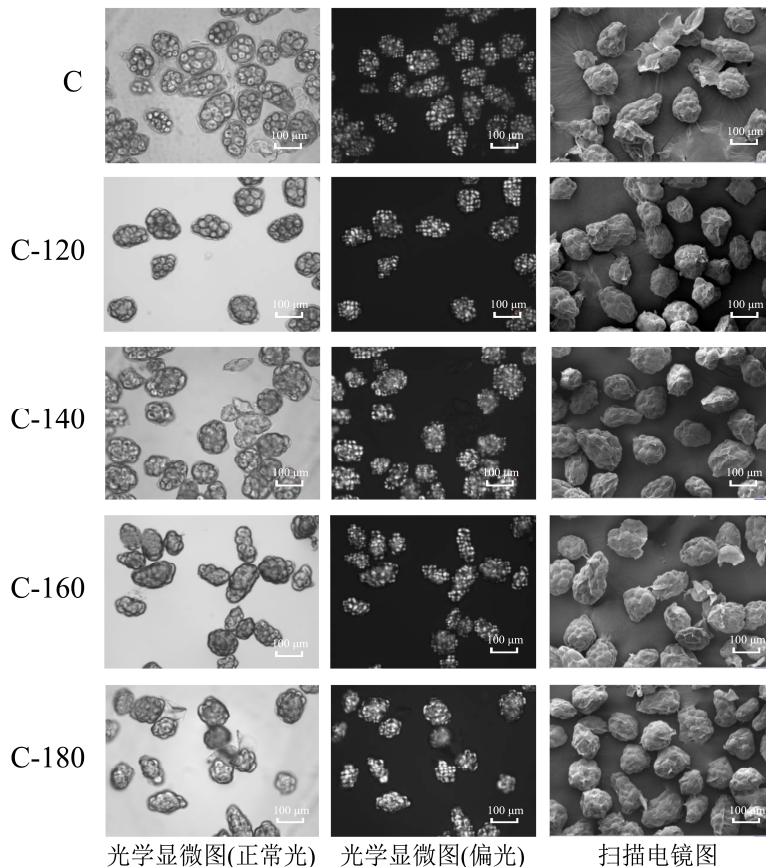
2 结果与讨论

2.1 干热处理对芸豆淀粉和子叶细胞显微结构的影响

干热处理后的芸豆淀粉的光学显微镜图和扫描电子显微镜图如图 1 所示。芸豆淀粉呈球形或椭球形, 粒径大小约在 15~40 μm 之间, 与 Hoover 等报道的数据相符^[16]。淀粉颗粒表面光滑, 并有明显的脐点, 偏光十字清晰可见。随着干热处理温度的增加, 淀粉脐点处裂痕增加, 偏光十字略有减弱, 可能是高温处理破坏了部分淀粉结晶有序结构^[10], 但淀粉颗粒表面形

态并未发生变化。淀粉颗粒的脐点一般被认为是淀粉颗粒生长的起点, 没有其他部分有序, 因此更加容易受到破坏。汝远等^[17]采用干热处理玉米淀粉, 发现干热处理可以解旋部分双螺旋结构, 降低糊化温度。

芸豆子叶细胞的分离参考 Edwards 等的方法^[7], 确保细胞完整分离并避免淀粉糊化。干热处理后的芸豆子叶细胞的光学显微镜和扫描电子显微镜照片如图 2 所示。完整的芸豆子叶细胞呈椭球形或球形, 颗粒直径约为 50~150 μm , 周围可观察少量细胞壁碎片。图 2 中, 分离的芸豆细胞表面出现了一定皱缩现象, 是因为冷冻干燥过程中细胞壁脱水而致^[6]。随着干热温度的增加, 芸豆子叶细胞在偏振光场下的双折射现象略微减弱, 细胞表面并未发生明显改变。



光学显微图(正常光) 光学显微图(偏光) 扫描电镜图
图 2 干热处理后芸豆子叶细胞光学显微图和扫描电镜图

Fig.2 Light micrographs pictures and scanning electron micrographs of pinto bean cotyledoncells after dry heat treatment

2.2 干热处理对芸豆淀粉和子叶细胞结晶结构的影响

干热处理后的芸豆淀粉和子叶细胞的 X 射线衍射图如图 3 所示。芸豆淀粉和子叶细胞在 5.6、15.0、17.1、18.0、22.7°均有明显的衍射峰, 结晶类型属于 C 型^[18]。据报道, 杂豆淀粉一般具有 C 型结晶结构, 即同时具有 A 型和 B 型的 X 射线衍射峰^[19]。随着干热处理温

度(120 和 140 $^{\circ}\text{C}$) 的升高, 5.6 和 15.0 处衍射峰逐渐减弱直至消失, 当处理温度高于 140 $^{\circ}\text{C}$ 后, 17.1 和 18.0 处的双峰变成单峰, 可能是由于淀粉分子侧链的双螺旋结构断裂^[7]。淀粉相对结晶度是表征淀粉颗粒结晶性质的一个重要参数, 表 1 统计了干热处理对芸豆淀粉和子叶细胞的影响规律。随着干热处理温度的增高(120 $^{\circ}\text{C}$ 和 140 $^{\circ}\text{C}$), 芸豆淀粉的相对结晶度由 32.2% 降低到 25.2%, 高温可能破坏了淀粉部分结晶有序结构^[11]。随着干热处理温度的进一步增高(160 $^{\circ}\text{C}$ 和

180 ℃), 芸豆淀粉的结晶度并未进一步下降。

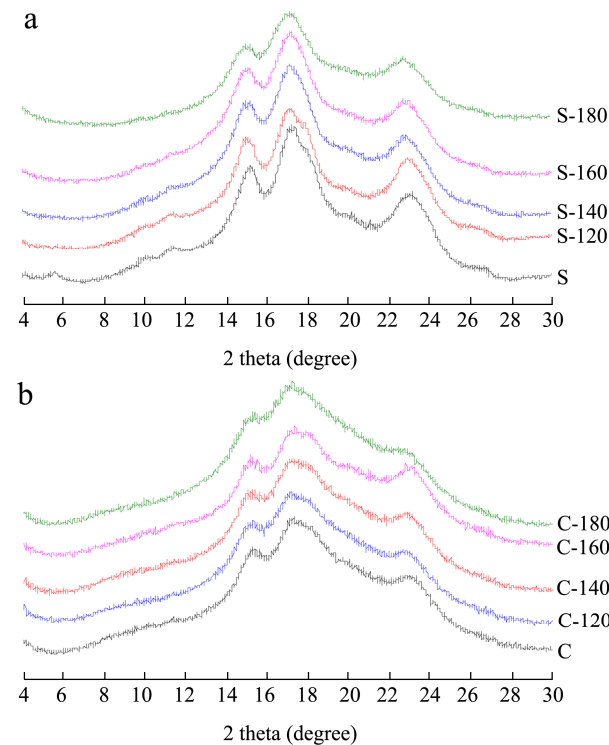


图3 干热处理后芸豆淀粉(a)和子叶细胞(b)的X-射线衍射图

Fig.3 X-ray diffractograms of dry heat treated pinto bean starches (a) and cotyledon cells (b)

芸豆子叶细胞的X射线衍射峰与芸豆淀粉的衍射峰相比变得平缓, 结晶度相比于芸豆淀粉低10%左右, 这是由于细胞壁及其蛋白质组分阻碍了X射线的衍射, 导致衍射峰强度降低。芸豆子叶细胞在5.6°处衍射峰经冷冻干燥后消失。随着干热处理温度的增高(120~180 ℃), 芸豆细胞的结晶度由23.1%大幅降低到14.2%。这说明干热处理不仅破坏了无定形区, 也

破坏了结晶区。这与双折射强度减弱相一致。与芸豆淀粉相比, 干热处理对子叶细胞的相对结晶度变化幅度较小, 结合之前光学显微镜结果推测, 可能是由于子叶细胞内部的淀粉颗粒的糊化受到了细胞壁以及蛋白质等组分更多的限制, 从而使得淀粉颗粒内部的有序结构的变化有限。

2.3 干热处理对芸豆淀粉和子叶细胞热力学性质的影响

干热处理后的芸豆淀粉和子叶细胞的糊化温度以及焓值如表1所示。随着干热处理温度的升高, 芸豆淀粉和细胞的起始、峰值、终止糊化温度和焓值均变小。由表1可知, 较低的干热温度条件下(<160 ℃), 芸豆淀粉的糊化焓和糊化温度与原淀粉相比仅略有降低, 说明此处理温度未明显影响大部分淀粉的双螺旋结构。而在180 ℃干热处理条件下, 芸豆淀粉的糊化焓和糊化温度明显低于其他干热温度条件的样品。可能是在180 ℃高温下, 淀粉已发生部分降解, 双螺旋结构已经出现解旋^[9]。

芸豆子叶细胞的焓值明显低于淀粉, 可能是细胞壁和蛋白质的存在, 限制了淀粉吸水糊化, 而导致了较低的焓值^[6]。随着干热处理温度的不断升高(120 ℃和140 ℃), 起始、峰值以及终止糊化温度都逐渐降低, 而焓值从9.32 J/g急剧降低到0.87 J/g。进一步升高干热处理温度(160 ℃和180 ℃)后, 无法检测到芸豆子叶细胞含淀粉的糊化吸热峰。Ji等^[11]干热处理玉米淀粉, 发现与未处理样品相比, 糊化焓值出现降低, 可能是热处理引起淀粉颗粒崩解。

表1 干热处理对芸豆淀粉和子叶细胞的热力学性质、结晶度的影响

Table 1 Thermal properties and crystallinity of pinto bean starches and cotyledon cells after dry heat treatment.

样品	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$	结晶度/%
S	67.24±0.27 ^a	73.83±0.0 ^a	80.55±0.30 ^b	13.93±0.66 ^a	32.2
S-120	65.66±0.07 ^{ab}	73.42±0.35 ^a	80.16±0.10 ^b	13.66±0.20 ^a	28.3
S-140	65.67±0.21 ^{ab}	73.34±0.23 ^a	79.92±0.33 ^b	12.57±0.01 ^{ab}	25.2
S-160	67.38±0.26 ^a	72.67±0.23 ^a	78.07±0.14 ^b	11.31±1.19 ^b	26.3
S-180	51.19±1.24 ^c	59.16±1.18 ^b	66.91±0.66 ^c	2.98±0.06 ^d	27.2
C	66.83±0.08 ^{ab}	73.32±0.04 ^a	84.37±0.63 ^a	9.32±0.65 ^c	23.1
C-120	65.45±0.71 ^{ab}	73.15±0.02 ^a	80.06±1.60 ^b	1.23±0.02 ^e	16.2
C-140	64.94±0.76 ^b	72.50±0 ^a	80.87±0.98 ^b	0.87±0.05 ^e	17.2
C-160	-	-	-	-	14.2
C-180	-	-	-	-	14.2

注: 所有数据取三次实验结构的平均值并标注标准误差, 每一列中标注不同字母表示平均值显著不同 ($p<0.05$); C: 芸豆; S: 芸豆淀粉; 120, 140, 160 和 180 代表干热处理的温度; T_g : 起始温度, T_p : 峰值温度, T_c : 终止温度, ΔH : 焓值。

糊化焓值反映的是淀粉结晶层分子的有序双螺旋结构。在干热处理的过程中, 淀粉颗粒内双螺旋结构遭到破坏。但与淀粉不同, 子叶细胞内含淀粉颗粒的吸水膨胀会受到限制, 结合前文偏光显微镜结果以及 X 射线衍射结果推测, 芸豆子叶细胞内含淀粉的短链双螺旋结构易被干热处理破坏, 而长链双螺旋结构在糊化的过程中不易被差示扫描量热仪检测到, 导致了干热处理的子叶细胞内含淀粉具有较小或消失的吸热峰, 与 X 射线衍射数据存在一定的不一致现象。

2.4 淀粉体外消化动力学

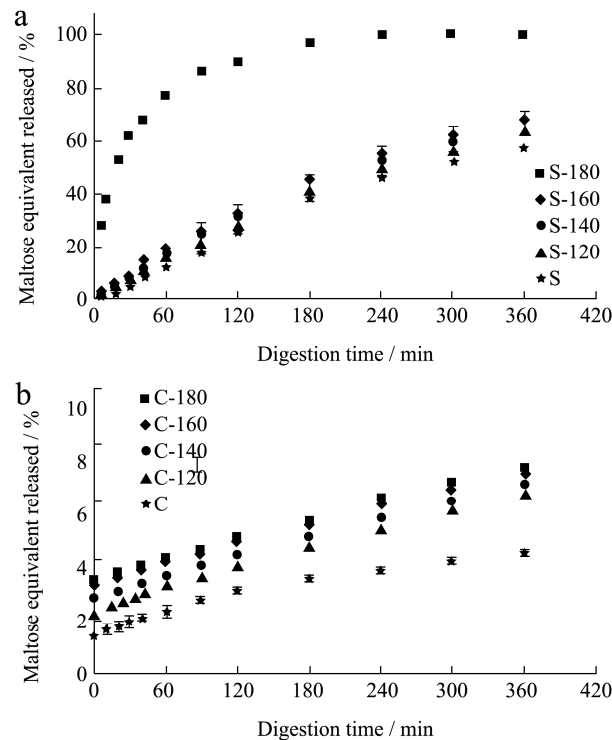


图 4 芸豆淀粉及子叶细胞内含淀粉的消化曲线图

Fig.4 Digestograms of dry heat treated pinto bean starch and intact cotyledon cells

注: a: 淀粉; b: 细胞。

干热处理后的芸豆淀粉和子叶细胞的淀粉体外消化动力学如图 4 所示。为了更好的从消化速率的角度分析其消化性质的不同, 将消化数据带入 Goni 的一级动力学方程^[20]可以得到消化速率, 以便更加直观的比较样品, 如表 2。干热处理后的芸豆淀粉和子叶细胞消化过程曲线可较好的拟合 Goni 的一级动力学方程 ($R^2>0.9$)。随着干热处理温度增加, 芸豆淀粉消化速率和 360 min 的消化程度显著增加。值得注意的是 180 °C 干热处理的淀粉样品的消化速率和消化程度大幅提高 (0.171 min^{-1} , 99.70%), 这与热力学性质中该样品焓值和起始糊化温度较低相一致 (表 1), 可能是

180 °C 高温使得淀粉颗粒中大部分支链淀粉双螺旋结构降解, 变得易于被淀粉酶消化。汝远等^[17]发现在 150 °C 处理玉米淀粉 4 h 后, 淀粉溶解指数显著升高, 可能是干热使淀粉颗粒结构松散, 直链淀粉被浸出。与芸豆淀粉相比, 芸豆细胞的内含淀粉消化速率 (0.0001 min^{-1}) 和程度 (<8%) 较低。值得注意的是, 干热温度并不能改变芸豆子叶细胞内含淀粉消化速率。与未经干热处理的子叶细胞相比 (4.21%), 干热处理只能提高 2%~3% 的最终消化程度 (表 2)。

表 2 干热处理对芸豆淀粉和子叶细胞中淀粉消化速率以及消化终点麦芽糖释放量

Table 2 Apparent digestion rate coefficient (k , min^{-1}) and reducing sugar released (%) after 360 min digestion of dry heat treated pinto bean starches and cotyledon cells.

样品	麦芽糖释放量/%	k/min^{-1}
S	57.03 ± 1.37^d	0.0025
S-120	63.65 ± 0.38^c	0.0028
S-140	66.24 ± 0.09^b	0.0031
S-160	68.39 ± 2.33^b	0.0032
S-180	99.70 ± 0.88^a	0.0171
C	4.21 ± 0.36^f	0.0001
C-120	6.35 ± 0.12^{ef}	0.0001
C-140	6.66 ± 0.21^{ef}	0.0001
C-160	6.97 ± 0.13^{ef}	0.0001
C-180	7.23 ± 0.06^e	0.0001

注: 所有数据取三次实验结构的平均值并标注标准误差, 每一列中标注不同字母表示平均值显著不同 ($p<0.05$)。

2.5 激光共聚焦显微观察

为了探究子叶细胞细胞壁的通透性变化, 本文选用一种分子尺寸与 α -淀粉酶相近 (约 6.6 nm) 的荧光染料 FITC-葡聚糖 (分子量: 20 ku), 模拟淀粉酶进入完整芸豆子叶细胞的过程, 并采用激光共聚焦显微镜进行观察。芸豆子叶细胞经不同干热温度下处理后, 用 FITC-葡聚糖模拟酶分子大小, 未经处理的子叶细胞内部无 FITC-葡聚糖发出的绿色荧光信号。而经干热处理后的芸豆子叶细胞内部均有部分荧光, 说明用 FITC-葡聚糖分子可以进入干热处理后的芸豆子叶细胞, 并与细胞中的蛋白质等组分结合^[21]。说明高温干热处理会对子叶细胞的细胞壁通透性造成不可逆的破坏, α -淀粉酶尺度大小的分子可以通过细胞壁^[22]。从图 4 可见, 子叶细胞内蛋白质组分对淀粉颗粒形成包裹屏障, 从而阻碍了淀粉酶与细胞内淀粉的结合, 导致了芸豆子叶细胞的较慢的体外淀粉消化速率。

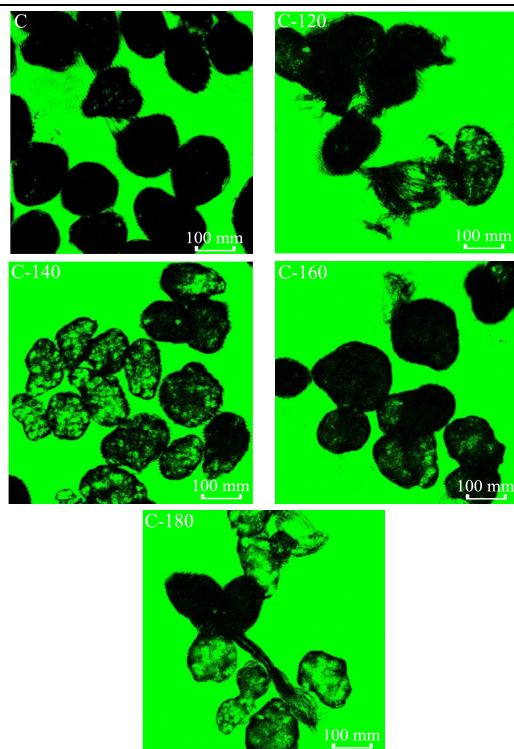


图5 浸于FITC-葡聚糖溶液的完整芸豆子叶细胞的激光共聚焦显微图

Fig.5 CLSM micrographs of intact pinto bean cotyledon cells suspended in FITC-dextran solution

3 结论

本文研究了干热处理温度对完整芸豆子叶细胞内淀粉的结晶结构和消化性的影响规律,研究发现在120~180 °C干热温度下,相比于芸豆淀粉,芸豆子叶细胞均保持较低的消化速率和程度(<10%),这主要是由于细胞内蛋白质组分对淀粉颗粒形成包裹屏障,从而阻碍了淀粉酶与细胞内淀粉的结合,导致了芸豆子叶细胞的较慢的体外淀粉消化速率。在消化动力学方面,随着干热处理温度增加,芸豆子叶细胞消化速率和程度略有增大。实验结果对低血糖生成指数杂豆全食品的设计和制造提供了理论依据。

参考文献

- [1] Jenkins D J, Wolever T M, Taylor R H, et al. Glycemic index of foods: A physiological basis for carbohydrate exchange [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1981, 34(3): 362-366
- [2] Kushi L H, Meyer K A, Jacobs D R J. Cereals, legumes, and

chronic disease risk reduction: Evidence from epidemiologic studies 1-3 [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1999, 70: 451S-458S

- [3] Bahadoran Z, Mirmiran P. Potential properties of legumes as important functional foods for management of type II diabetes: A short review [J]. International Journal of Nutrition and Food Sciences, 2015, 4(2-1): 6-9
- [4] Jang Y, Lee J H, Kim O Y, et al. Consumption of whole grain and legume powder reduces insulin demand, lipid peroxidation, and plasma homocysteine concentrations in patients with coronary artery disease [J]. Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology, 2001, 21: 2065-2071
- [5] 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
- [6] Würsch P, Vedovo S D, Koellreutter B. Cell structure and starch nature as key determinants of the digestion rate of starch in legume [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1986, 43(1): 25-29
- [7] Edwards C. The role of plant cell walls in influencing starch bioaccessibility [D]. London: King's College London, 2014
- [8] 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
- [9] Sun Q, Gong M, Li Y, et al. Effect of dry heat treatment on the physicochemical properties and structure of proso millet flour and starch [J]. Carbohydr Polymers, 2014, 110: 128-134
- [10] Chandanasree D, Gul K, Riar C S. Effect of hydrocolloids and dry heat modification on physicochemical, thermal, pasting and morphological characteristics of cassava (*Manihot esculenta*) starch [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 175-182
- [11] Ji Y, Yu J, Xu Y, et al. Impact of dry heating on physicochemical properties of corn starch and lysine mixture [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91: 872-876
- [12] Li L, Jiang H, Campbell M, et al. Characterization of maize amylose-extender (ae) mutant starches. Part I: relationship between resistant starch contents and molecular structures [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74(3): 396-404

(下转第 162 页)