

干热处理对完整芸豆细胞中内含淀粉结晶结构及其吸油性的影响研究

林晓瑛¹, 宋晶晶¹, 何小维¹, 王志刚², 黄强^{1,3}, 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. 广州市浪奇实业股份有限公司, 广东广州 510660)

(3. 华南理工大学珠海现代产业创新研究院, 广东珠海 519175)

摘要: 本研究将分离完整的芸豆细胞作为芸豆全粉的研究模型, 采用 80~160 °C 不同干热温度对其处理后, 探究温度对其内含淀粉结晶结构及细胞吸油性的影响。结果表明, 干热处理后芸豆细胞仍保持完整形态, 表面发生皱缩。在较低干热温度下(80~120 °C), 随着温度的升高, 芸豆细胞内含淀粉的相对结晶度略有下降(约 3%)。热力学性质测试观察到两个吸热峰, 第一个为芸豆淀粉糊化峰, 第二个为芸豆蛋白变性峰, 两个峰的焓值都随温度升高而减小。在较高干热温度下(140~160 °C), 芸豆细胞内含淀粉的相对结晶度与较低干热温度处理的相比基本不变, 蛋白变性峰消失。本研究发现随着干热温度的升高, 芸豆细胞吸油性逐渐增强, 芸豆细胞的三相接触角逐渐增加(122.0°~145.4°), 但游离油酸体积逐渐下降(0.60~0.05 mL)。较高干热温度下(140~160 °C)吸油稳定性较差。研究结果为芸豆全粉在食品配方中吸油性等应用提供了理论依据。

关键词: 干热处理; 温度; 芸豆细胞; 吸油性

文章编号: 1673-9078(2019)08-35-41

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.8.006

Effects of Dry Heat Treatment on Starch Crystalline Structure and Oil-binding Ability in Whole Pinto Bean Cells

LIN Xiao-ying¹, SONG Jing-jing¹, HE Xiao-wei¹, WANG Zhi-gang², HUANG Qiang^{1,3}, ZHANG Bin¹

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

(2.Guangzhou Lonkey Industrial Co. Ltd., Guangzhou 510660, China)

(3.SCUT-Zhuhai Institute of Modern Industrial Innovation, Zhuhai 519175, China)

Abstract: In this study, intact pinto bean cells were isolated as a research model of whole pinto bean flour, and subjected to dry-heat treatments. The effects of dry-heat temperature (80~160 °C) on the crystalline structure and oil-binding ability of the starch were investigated. The results showed that pinto bean cells still remained intact with surface becoming wrinkled after the dry heat treatment. At lower dry heat temperatures (80~120 °C), the relative crystallinity of the starch in the cells decreased slightly (ca. 3%) with increasing temperature. The thermodynamic analysis revealed the occurrence of two endothermic peaks: The first peak belonged to starch gelatinization, and the second one was the denaturation peak of pinto bean protein. The enthalpy values for both peaks decreased with increasing dry heat temperature. At higher dry heat temperatures (140~160 °C), no change in the relative crystallinity of the starch in the cells was observed along with the disappearance of the protein denaturation peak, as compared with the cells treated at lower temperatures (80~120 °C). It was found that as the dry-heat temperature rose, the oil-binding ability of the starch and the three-phase contact angle of pinto bean cells (122.0°~145.4°) increased gradually, but the volume of free oleic acid decreased (0.60~0.05 mL). The oil-binding stability was poor at higher dry heat temperatures (140~160 °C). The results obtained in this research provided a theoretical basis for the utilization of the oil-binding properties of whole pinto bean flour in food formulations.

Key words: dry-heat treatment; temperature; pinto bean cell; oil-binding ability

收稿日期: 2018-11-10

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); 中央高校基本科研业务费项目 (2017MS100)

作者简介: 林晓瑛(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, 副教授, 研究方向: 碳水化合物化学与营养

杂豆是相对于大豆而言的小宗豆类的总称,含有丰富的蛋白质、碳水化合物、维生素及矿物质等^[1,2],具有很高的营养价值。杂豆粉作为良好的食品添加剂,既能保留食品的风味,又能改善食品的质构,减少脂肪的流失,并提升食品的口感,其吸油性起重要作用。杂豆粉的吸油性与其种类、颗粒尺寸、淀粉或蛋白质含量以及蛋白质分子表面的非极性氨基酸侧链所占比例等因素有关^[3,4]。杂豆粉的吸油性一般通过测定每克豆粉或豆粉蛋白质所吸收的油量来衡量。Kaur 等^[5]研究发现,不同品种鹰嘴豆吸油性有差异,卡布里型比迪西型吸油能力强,且各品种的鹰嘴豆蛋白的吸油性(2.08~3.96 g/g)均显著高于鹰嘴豆粉的吸油性(1.05~1.24 g/g),表明鹰嘴豆蛋白中氨基酸非极性侧链可能结合在油脂的烃基上而提高了鹰嘴豆蛋白的吸油性,说明豆粉的吸油性与所含蛋白有一定关系。

干热处理是在不破坏淀粉颗粒结构的前提下,改变淀粉理化性质的一种简单、高效、无污染的新型物理改性方法,分为两阶段,一是将物料进行初步干燥,使其水分含量低于 10%,二是将初步干燥后的物料置于 60 °C 到 200 °C 之间进行一定时间的热处理,使食品原料完成改性的过程。Chiu 等^[6]在专利中声明,将水分含量低于 10% 的谷物粉在 60~200 °C 热处理的过程称为干热处理^[7]。干热处理温度是食品加工过程中影响食品品质的主要因素,对全粉中淀粉的结构性质有影响。Sun 等^[8]对比 130 °C 干热处理 2 h 的黍小米面粉和淀粉,发现干热处理对小米粉的糊、热、形态和结构性质的影响大于相应的淀粉,如干热处理显著提高面粉的峰值黏度(从 652 CP 提高到 2155 CP),而对淀粉峰值黏度影响不大,可能是面粉中非淀粉成分,如蛋白质、脂类和非淀粉多糖对淀粉的影响引起的。而目前对于干热处理对全粉的吸油性相关报导较少。

本文在低于淀粉的糊化温度条件下分离出完整的芸豆子叶细胞作为芸豆全粉的研究模型,采用 X-射线衍射、差示扫描量热仪、扫描电镜、激光共聚焦、三相接触角等测试手段,分析干热处理温度对芸豆细胞内含淀粉结构及吸油性的影响规律,以期对芸豆全粉在食品配方中的应用提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

芸豆,当地市售;油酸,分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;总淀粉含量测定试剂盒(Cat.No.A7095),爱尔兰 Megzyme 公司;尼罗红,显微镜用,美国 Sigma-Aldrich 公司;其他试剂或药品

均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

DSC8000 型差示扫描量热仪,美国 Perkin-Elmer 公司;D/Max2200 型 X-射线衍射分析仪,日本 Rigaku 公司;EVO18 型扫描式电子显微镜,德国 Zeiss 公司;TCS SP5 型激光共聚焦显微镜,德国 Leica 公司;MS 2000 型激光粒度仪,英国马尔文公司;Model FP-2000 型蛋白质分析仪,美国 Leco 公司;OCA40 Micro 型全自动视频微观接触角测量仪,德国 Dataphysics 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 芸豆细胞提取

将芸豆浸泡在水中充分吸水膨胀,去皮后于 60 °C 下磁力搅拌加热 1 h。将芸豆压碎,将豆渣过筛,期间不断用水冲洗,筛上部分经显微镜观察到完整的细胞壁,确认为分离得到的完整芸豆细胞^[9]。将分离得到的芸豆细胞冷冻干燥后存于密封袋,然后置于干燥器常温保存。芸豆细胞的总淀粉含量通过试剂盒测定;蛋白质含量通过蛋白质分析仪测定;脂质含量的测定依据 AOAC 方法 922.06;粒径分布采用激光粒度仪测定。测得淀粉含量 60.3±0.3%,蛋白含量 19.3±0.1%,水分含量 3.4±0.6%,平均粒径为 146.6±0.1 μm。

1.3.2 芸豆细胞干热处理

用 1.3.1 提取得到的芸豆细胞,分别在 80、100、120、140、160 °C 的烘箱中干热处理 120 min。未处理和不同温度干热处理后的芸豆细胞分别记为 PB、PB-80、PB-100、PB-120、PB-140、PB-160。

1.3.3 X-射线衍射分析

使用 X-射线衍射仪,衍射条件是铜靶,电压 44 kV,电流 27 mA, Cu-K α 辐射。测量角度 2 θ 设置为 4~35°,步长为 0.04°,扫描速度 5°/min。通过 Peak Fit 4.0 软件分离结晶峰面积和非晶区域,遵循文献中方法^[10],相对结晶度计算为结晶峰面积与总衍射面积的比率。

1.3.4 热力学性质分析

准确称取的 3 mg 芸豆细胞样品于不锈钢坩埚中,用微型注射器向其中注水,配置成 30% 的淀粉乳,密封坩埚,在室温下平衡 4~5 h,使用空白的坩埚作对比物。将氮气的流速控制为 20 mL/min,扫描速率 10 °C/min,扫描温度范围设置为 30~120 °C。用 Pyris 软件对峰形进行拟合,计算样品的起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)、终止温度(T_c)以及焓值(ΔH)。

1.3.5 吸油性的测定

根据 Seguchi 等^[11]的方法稍作修改。准确称取 0.50 g 不同干热处理温度的芸豆细胞于 15 mL 离心管中, 加入 5.0 mL 蒸馏水, 涡旋混匀后, 再加入 1.0 mL 用尼罗红染色的油酸, 震荡后涡旋 90 s。室温放置 30 min 后观察游离油酸体积。吸油后的芸豆细胞分别记为 PB+O、PB-80+O、PB-100+O、PB-120+O、PB-140+O、PB-160+O, 将吸油后的样品放置 5 d 后, 重新测游离油酸体积, 用以表征芸豆细胞吸油后的储藏稳定性。

1.3.6 颗粒形貌

1.3.6.1 偏光显微镜

将芸豆细胞分散于水和甘油的混合液中, 配成 2% 的分散液, 取一滴于载玻片上, 盖上盖玻片, 将其放于样品台上, 选择合适放大倍数和亮度, 在偏振光场下观察并拍摄芸豆细胞形貌特征。

1.3.6.2 扫描电子显微镜

将芸豆细胞和吸油后的样品, 均匀的分散在粘有导电胶的样品台表面, 将样品台置于真空条件下进行喷金后, 用扫描电镜拍摄具有代表性的芸豆细胞形貌。

1.3.6.3 激光共聚焦显微镜

以丙二醇配置浓度为 0.01% (W/W) 的尼罗红溶液作为染料, 取 1 mL 吸油后样品, 用 10 μ L 的尼罗红染料进行染色。观测时, 直接吸取下层沉淀物观察, 用 10 $\times$ 和 20 $\times$ 物镜观察, 选择 488 nm 的 Ar/Kr 离子激发波长, 扫描密度 1024 $\times$ 1024, 采集并保存图像。

1.3.7 芸豆细胞的三相接触角

将样品压成圆片, 将油酸倒入石英玻璃槽中约 2/3 处, 并将待测样品圆片浸没其中。采用悬滴法在样品圆片表面上滴 15 μ L 的去离子水, 用接触角测定仪测量并计算固体-水-油的三相接触角。

1.3.8 数据分析

各组实验数据均重复三次, 每次至少两个平行, 采用 SPSS 19.0 数据统计分析计算平均值和标准偏差, 并采用 Microsoft Excel 2016 作图。

2 结果与讨论

2.1 干热温度对芸豆细胞颗粒形态的影响

不同干热处理温度下芸豆细胞分别在扫描电镜和偏振光场下的颗粒形态如图 1 所示, 从图中可以看出, 芸豆细胞大多呈椭圆形, 颗粒大小均一, 可明显观察到淀粉颗粒被包裹在芸豆细胞壁内, 在偏光场中可以看到清晰的偏光十字。随着干热处理温度的升高, 芸豆细胞表面发生皱缩, 偏振光场中的双折射现象并未减弱。说明在干热处理过程中, 由于水分含量的限制, 淀粉颗粒只发生了膨胀并未发生糊化。

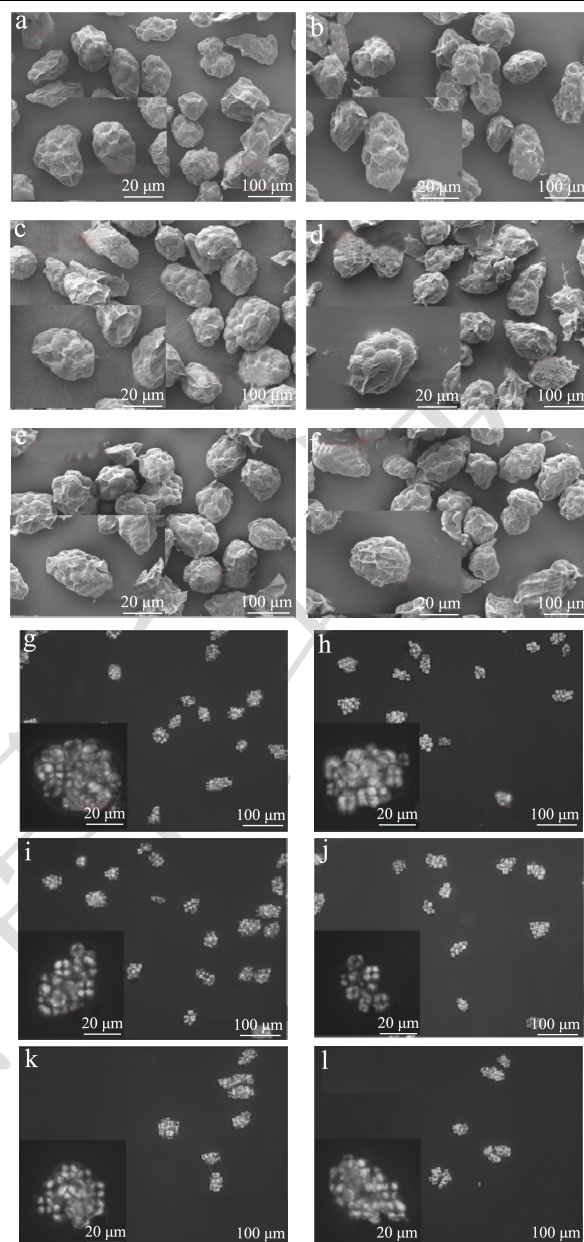


图 1 不同干热温度处理后芸豆细胞的扫描电镜和偏振光图

Fig. 1 Scanning electron microscope and polarized light images of different dry heat treatment temperature of pinto bean cells

注: 图 a~f: 扫描电镜图, 图 g~l: 偏振光图; PB (图 a、g) 表示芸豆细胞, PB-80 (图 b、h)、PB-100 (图 c、i)、PB-120 (图 d、j)、PB-140 (图 e、k)、PB-160 (图 f、l) 分别表示 80、100、120、140、160 $^{\circ}$ C 干热处理后的芸豆细胞。

2.2 干热温度对芸豆细胞结晶结构的影响

不同干热处理温度后芸豆细胞中淀粉的 X 射线衍射图如图 2 所示, 样品均在 15.0 $^{\circ}$ 、17.0 $^{\circ}$ 及 23.0 $^{\circ}$ 附近有 3 个较明显的衍射特征峰, 属于典型的 C 型淀粉结晶结构^[12]。大多数豆类淀粉的 X 射线衍射结果属于 C 型, 即一种 A 型和 B 型混合的淀粉结晶类型^[13]。随着干热处理温度的升高, 芸豆细胞中淀粉的晶型并未发

生改变, 17.0°附近的衍射峰逐渐合并为一个峰。在较低干热温度下(80~120 °C), 相对结晶度有小幅下降, 下降了约 3%, 可能是由于淀粉颗粒结晶区的晶体熔融和不完全结晶、无定型区的部分再生造成的^[14], 在较高干热温度下(140~160 °C), 相对结晶度不再进一步变化。

2.3 干热温度对芸豆细胞热力学性质的影响

不同干热温度处理后芸豆细胞的热力学特征值如表 1 所示, 表明较低的干热温度下(80~120 °C), 出现两个吸热峰, 吸热峰 I 为芸豆细胞内淀粉的糊化峰, 是由于支链淀粉双螺旋结晶结构熔融解旋形成的, 而吸热峰 II 可能是芸豆细胞内蛋白的变性峰, 因为芸豆蛋白的变性温度在 110.2 °C^[15]。随着干热处理温度的增加, 峰 I 中起始糊化温度 T_0 降低, 表明干热处理使芸豆细胞内淀粉发生一定膨胀, 从而更易发生糊化; 峰 II 的蛋白变性峰的起始温度 T_0 降低, 焓值也随之降低, 说明干热处理使芸豆细胞内蛋白发生部分变性。

表 1 不同干热温度处理后芸豆细胞的热力学性质¹

Table 1 Thermal properties of different dry heat treatment temperature of pinto bean cells¹

样品 ²	吸热峰 I				吸热峰 II			
	$T_0^3/^\circ\text{C}$	$T_p^3/^\circ\text{C}$	$T_c^3/^\circ\text{C}$	$\Delta H^3/(\text{J/g})$	$T_0^3/^\circ\text{C}$	$T_p^3/^\circ\text{C}$	$T_c^3/^\circ\text{C}$	$\Delta H^3/(\text{J/g})$
PB	68.8±0.2 ^f	74.8±0.5 ^b	94.5±0.4 ^c	7.7±0.2 ^d	99.5±0.3 ^d	104.2±0.5 ^c	109.5±0.5 ^c	2.3±0.1 ^d
PB-80	68.2±0.0 ^e	74.7±0.2 ^b	92.4±0.1 ^{ab}	6.4±0.2 ^d	98.1±0.6 ^c	103.3±0.4 ^b	109.2±0.1 ^c	2.0±0.1 ^c
PB-100	67.7±0.2 ^d	74.1±0.3 ^a	92.9±0.1 ^b	5.6±0.3 ^c	97.4±0.3 ^b	102.8±0.0 ^b	108.2±0.2 ^b	1.7±0.2 ^b
PB-120	66.1±0.2 ^c	73.8±0.1 ^a	92.0±0.6 ^a	3.7±0.4 ^a	94.3±0.1 ^a	99.8±0.0 ^a	104.5±0.3 ^a	0.3±0.1 ^a
PB-140	64.3±0.3 ^b	86.5±0.0 ^c	99.6±0.2 ^e	5.0±0.2 ^b	-	-	-	-
PB-160	63.4±0.1 ^a	86.4±0.1 ^c	98.2±0.7 ^d	5.9±0.0 ^c	-	-	-	-

注: ¹ 所有数据取三次实验结构的平均值并标注标准偏差, 每一列中标注不同字母表示平均值显著不同 ($p<0.05$)。 ² PB: 芸豆细胞; PB-80、PB-100、PB-120、PB-140、PB-160: 分别表示 80、100、120、140 和 160 °C 干热处理后的芸豆细胞。 ³ T_0 : 初始温度; T_p : 峰值温度; T_c : 终止温度; ΔH : 焓值。

2.4 干热温度对芸豆细胞吸油性的影响

图 3 为不同干热温度处理后芸豆细胞吸油情况以及与油酸结合后上层游离油酸的体积, 将吸油后的芸豆细胞放置 5 d 来衡量其稳定性。图 3a 显示较低干热温度下(80~120 °C), 芸豆细胞吸油后沉降离心管底部, 未吸附的油酸浮于上方, 较高干热温度下(140~160 °C), 芸豆细胞聚集成团且附着在离心管管壁上。图 3c 显示, 随着干热温度的增加, 游离油酸的体积逐渐减少, 从 0.60 mL 下降到 0.05 mL, 表明干热处理会提高芸豆细胞的吸油性。放置 5 d 后结果如

在较高的干热温度下(140~160 °C), 热流峰 II 完全消失, 说明此干热处理温度已经使芸豆蛋白完全变性, 在热力学性质检测中不再出现蛋白的变性峰。

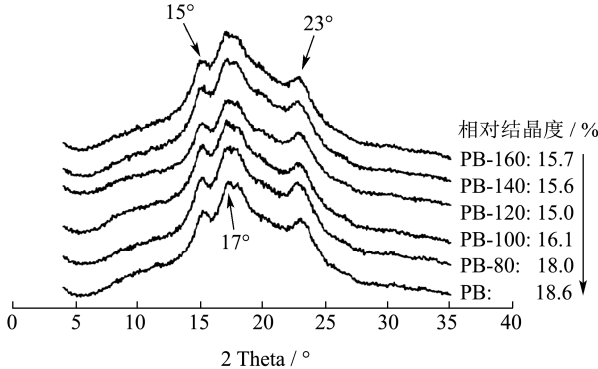


图 2 不同干热温度处理后芸豆细胞的 X 射线衍射图谱

Fig.2 X-ray diffraction of different dry heat treatment temperature of pinto bean cells

注: PB 表示芸豆细胞; PB-80、PB-100、PB-120、PB-140、PB-160 分别表示 80、100、120、140、160 °C 干热处理后的芸豆细胞。

图 3d 所示, PB 和 PB-80 稳定性最好, 上层游离油酸的体积几乎没有变化; 干热温度超过 100 °C 之后的样品都有一定的油酸游离出来, 其中样品 PB-140 和 PB-160 吸油稳定性最差。由于油酸与芸豆细胞的结合并不稳定, 干热处理对芸豆细胞壁的通透性造成影响, 且干热温度越高, 对细胞壁通透性的破坏越大^[16], 从而放置一段时间后油酸又有部分游离出来。在实际加工中, 若采用较高的干热温度(140~160 °C), 芸豆细胞虽有较高的吸油性, 但经过贮藏, 有较多油析出, 影响产品的外观和口感, 100~120 °C 是相对既能吸油、又有较高吸油稳定性的干热处理温度。

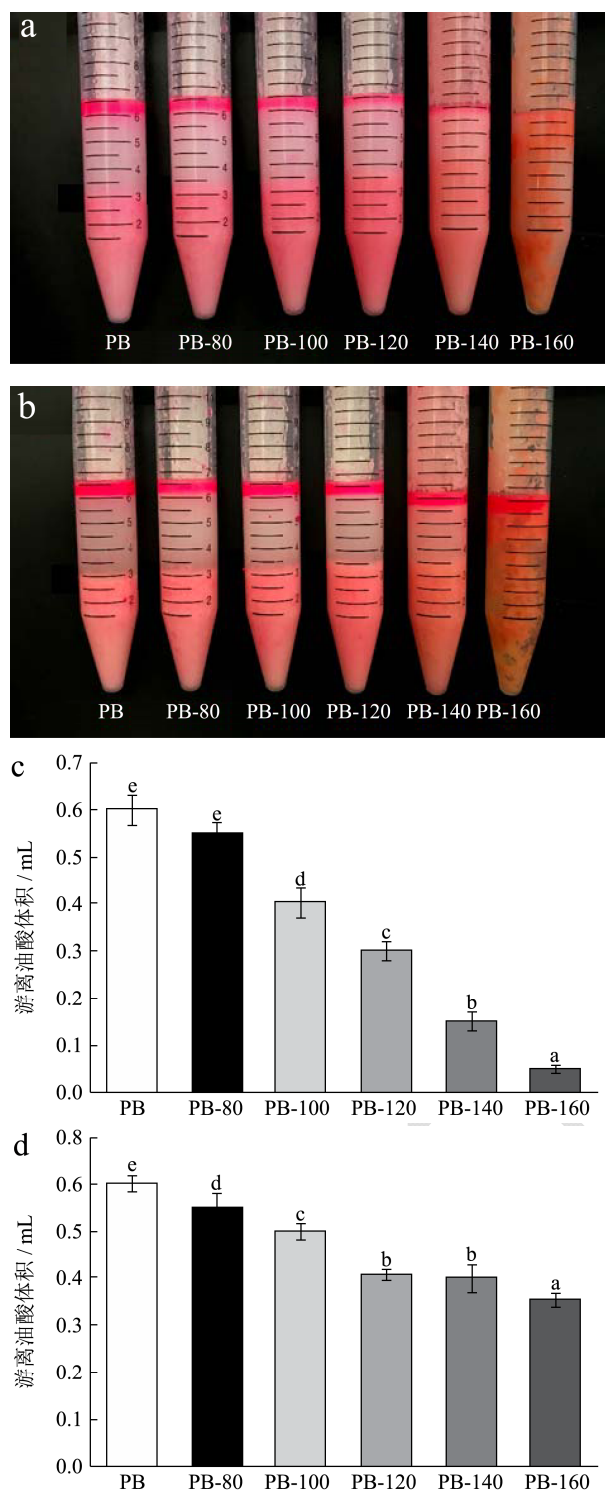


图3 不同干热温度处理后芸豆细胞吸油性及上层游离油酸的体积

Fig.3 Photographs of oil binding of pinto bean cells after different dry heat treatment temperature and volume of free oleic acid

注: a: 初始吸油现象; b: 放置5 d后吸油现象; c: 初始游离油酸体积; d: 放置5 d后游离油酸体积; PB表示芸豆细胞; PB-80、PB-100、PB-120、PB-140、PB-160分别表示80、100、120、140、160℃干热处理后的芸豆细胞。

2.5 不同干热温度处理的芸豆细胞吸油后的显微镜形态

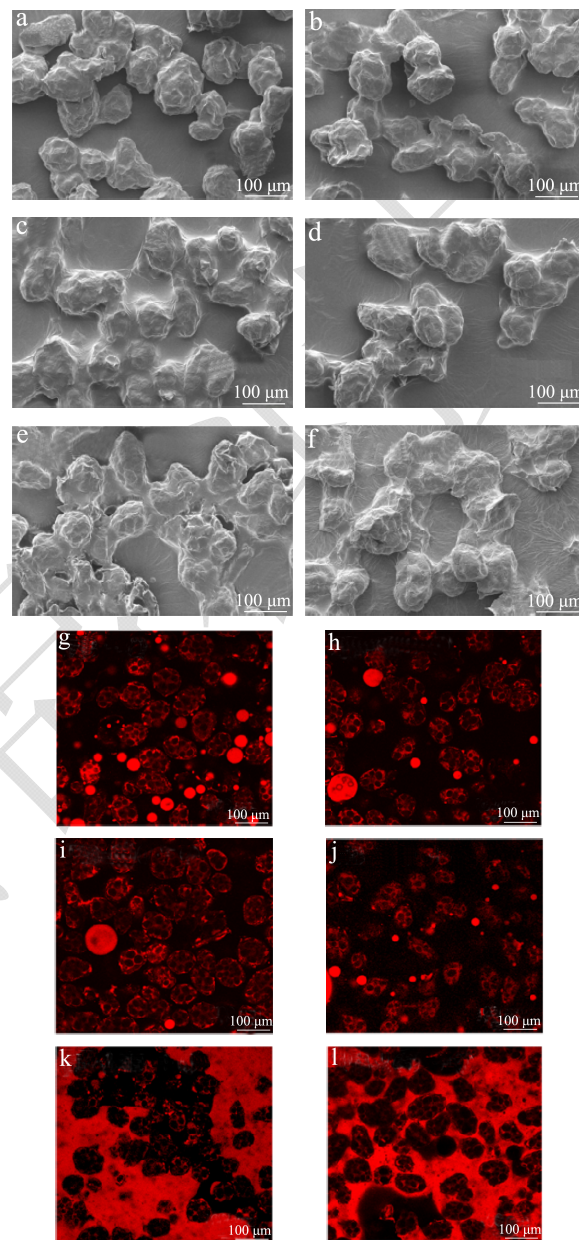


图4 干热处理后芸豆细胞结合油酸扫描电镜和激光共聚焦图
Fig.4 Scanning electron microscopy (SEM) and confocal laser scanning microscopy (CLSM) images of different dry heat treatment temperature of pinto bean cells

注: 图 a~f: 扫描电镜图, 图 g~l: 激光共聚焦图; PB+O (图 a、g) 表示芸豆细胞, PB-80+O (图 b、h), PB-100+O (图 c、i), PB-120+O (图 d、j), PB-140+O (图 e、k), PB-160+O (图 f、l) 分别表示 80、100、120、140、160℃干热处理后的芸豆细胞。

不同干热温度处理的芸豆细胞吸油后的扫描电子显微镜形态和激光共聚焦显微镜形态如图5所示。从

扫描电镜图中可以看出, 未干热处理以及在较低干热温度下(80~120 °C)吸油后的芸豆细胞, 表面可明显观察到覆盖的油酸较少, 仅有少量芸豆细胞呈现被油酸包裹的状态, 而在较高的干热温度下(140~160 °C), 视野范围内可见到油酸包裹芸豆细胞, 且在油酸的包裹下连成片。

激光共聚焦显微图中红色代表油酸, 从图可知, 在较低干热温度下(80~120 °C), 红色区域主要出现在细胞内部, 表明油酸已经通过细胞壁进入芸豆细胞内部, 随着温度的升高, 视野内游离的油滴逐渐减少, 说明吸油能力逐渐增加, 与之前的实验结果一致。通常蛋白质的疏水基团埋藏在蛋白质内部, 干热处理可造成蛋白疏水基团暴露, 提高其表面疏水性^[17]。在干热处理过程中, 芸豆细胞内蛋白发生了变性, 蛋白质表面的疏水性有所增加^[18], 进而影响了芸豆细胞的吸油性。在较高干热温度下(140~160 °C), 大量芸豆细胞被油酸包裹且连成片状, 与图 3a 的絮凝现象一致, 说明吸油方式为大量油酸裹在细胞外表面, 因此吸油性较差, 贮藏一段时间就释放出油酸。

2.6 三相接触角

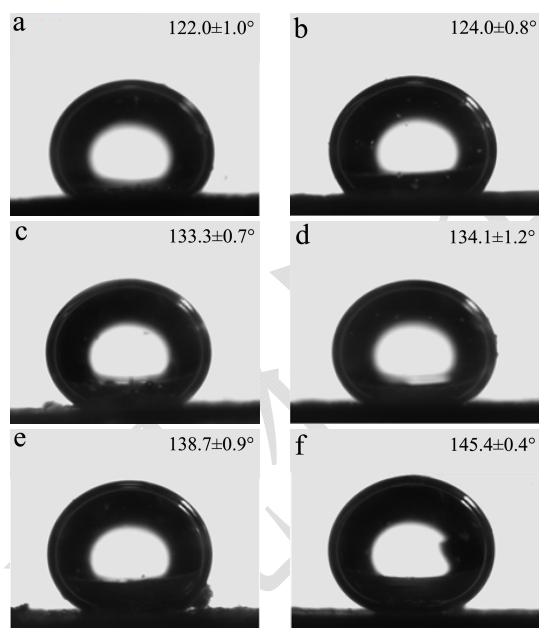


图 5 不同温度干热处理后芸豆细胞的三相接触角图及角度

Fig.5 Image of three-phase contact angle of different dry-heated treatment temperature of pinto bean cells

注: PB(a)表示芸豆细胞, PB-80(b)、PB-100(c)、PB-120(d)、PB-140(e)、PB-160(f)分别表示80、100、120、140、160 °C干热处理后的芸豆细胞。

为进一步验证不同温度干热处理后芸豆细胞表面疏水性的变化, 对其接触角进行测定, 结果如图 6。测量接触角是评价固体颗粒表面亲水或疏水的最直接

方式。根据杨氏方程理论, $\theta < 90^\circ$, 则固体表面是亲水性的; 若 $\theta > 90^\circ$, 则固体表面是疏水性的。由图看出, 不同干热温度处理后的芸豆细胞三相接触角均大于 90° , PB-160 的三相接触角最大(145.4°), PB 的三相接触角最小(122.0°), 表明芸豆细胞表面具有很强的疏水性, 且随着干热处理温度的增加, 芸豆细胞的三相接触角角度增大, 其表面疏水性增强, 因此吸油性增强。

3 结论

完整的芸豆子叶细胞经过不同温度干热处理后, 仍保持完整的形态, 其表面发生皱缩, 仍为 C 型结晶结构。在较低干热温度下(80~120 °C), 随着温度升高, 其内含淀粉相对结晶度略有下降, 下降约 3%。热力学性质测试观察到两个吸热峰, 第一个为芸豆淀粉糊化峰, 第二个为芸豆蛋白变性峰, 淀粉糊化峰的焓值和蛋白变性峰的焓值随温度升高而减小。在较高干热温度下(140~160 °C), 芸豆细胞内含淀粉的相对结晶度基本不变, 蛋白变性峰消失。干热处理温度对芸豆细胞的吸油性产生影响, 随温度升高而吸油性增强, 游离油酸体积下降(0.60~0.05 mL), 在较低干热温度下(80~120 °C), 吸油沉降, 在较高干热温度下(140~160 °C), 吸油发生团聚。当温度高于 100 °C 时, 芸豆细胞吸油稳定性变差, 可能是干热处理对细胞壁通透性和细胞中蛋白质的影响导致的。随着干热处理温度升高, 芸豆细胞三相接触角角度增加(122.0°~145.4°), 表明其疏水性随着干热处理温度升高而增强。

参考文献

- [1] Nosworthy M G, Franczyk A, Zimoch-Korzycka A, et al. Impact of processing on the protein quality of pinto bean (*Phaseolus vulgaris*) and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) flours and blends, as determined by *in vitro* and *in vivo* methodologies [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(19): 3919-3925
- [2] Rehman Z-U, Shah W H. Thermal heat processing effects on antinutrients, protein and starch digestibility of food legumes [J]. Food Chemistry, 2005, 91(2): 327-331
- [3] Chau C F, Cheung P C K, Wong Y S. Functional properties of protein concentrates from three Chinese indigenous legume seeds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(7): 2500-2503
- [4] Sathe S K, Salunkhe D K. Functional properties of the great northern bean (*Phaseolus vulgaris* L.) proteins: Emulsion, foaming, viscosity, and gelation properties [J]. Journal of Food Science, 1981, 46(1): 71-81

- [5] Kaur M, Singh N. Characterization of protein isolates from different Indian chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars [J]. Food Chemistry, 2007, 102(1): 366-374
- [6] Chiu C W, Schiermeyer E, Thomas D J, et al. Thermally-inhibited non-pregelatinized granular starches and flours and process for their preparation: U.S. Patent 5932017 [P]. 1999-8-3
- [7] 王凯,高群玉.木薯淀粉与黄原胶共混干热改性研究[J].食品工业科技,2011,32(7):75-78
WANG Kai, GAO Qun-yu. Study on dry heating treatment of starch and xanthan blend [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(7): 75-78
- [8] 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]. Carbohydrate Polymers, 2014, 110(4): 128-134
- [9] 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
- [10] Lopez-Rubio A, Flanagan B M, Gilbert E P, 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
- [11] Tabara A, Nakagawa M, Ushijima Y, et al. Effects of heat treatment on oil-binding ability of rice flour [J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2015, 79(10): 1629-1634
- [12] Li W, Zhang F, Liu P, et al. Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical, thermal and morphological properties of mung bean (*Vigna radiata* L.) starch [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103(4): 388-393
- [13] Ambigaipalan P, Hoover R, Donner E, et al. Starch chain interactions within the amorphous and crystalline domains of pulse starches during heat-moisture treatment at different temperatures and their impact on physicochemical properties [J]. Food Chemistry, 2014, 143(5): 175-184
- [14] 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]. Carbohydrate Polymers, 2014, 110: 128-134
- [15] Tan E S, Ying-Yuan N, Gan C Y. A comparative study of physicochemical characteristics and functionalities of pinto bean protein isolate (PBPI) against the soybean protein isolate (SPI) after the extraction optimisation [J]. Food Chemistry, 2014, 152(2): 447-455
- [16] Obatolu V A, Fasoyiro S B, Ogunsunmi L. Processing and functional properties of yam beans (*Sphenostylis stenocarpa*) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2007, 31(2): 240-249
- [17] Wang Z, Li Y, Jiang L, et al. Relationship between secondary structure and surface hydrophobicity of soybean protein isolate subjected to heat treatment [J]. Journal of Chemistry, 2014, 2014: 1-10
- [18] Voutsinas L P, Nakai S, Harwalkar V R. Relationships between protein hydrophobicity and thermal functional properties of food proteins [J]. Canadian Institute of Food Science and Technology Journal, 1983, 16(3): 185-190

(上接第 5 页)

- [14] Chanhee Kang, Qikai Xu, Timothy D Martin, et al. The DNA damage response induces inflammation and senescence by inhibiting autophagy of GATA4 [J]. Science, 2015, 349(6255): 5612
- [15] Park A, Nagase H, Liu L, et al. Mechanism of anthracycline-mediated down-regulation of GATA4 in the heart [J]. Cardiovascular Research. 2011, 90(1): 97-104
- [16] Mazzucco A E, Smogorzewska A, Kang C, et al. Genetic interrogation of replicative senescence uncovers a dual role for USP28 in coordinating the p53 and GATA4 branches of the senescence program [J]. Genes & Development, 2017, 31(19):1933-1938
- [17] Lee J Y, Yu K R, Lee B C, et al. GATA4-dependent regulation of the secretory phenotype *via* MCP-1 underlies lamin A-mediated human mesenchymal stem cell aging [J]. 2018, 50(5): 63

(上接第 61 页)

- [39] Tang C H, Liu F. Cold, gel-like soy protein emulsions by microfluidization: Emulsion characteristics, rheological and microstructural properties, and gelling mechanism [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(1): 61-72
- [40] Binks B P, Horozov T S. Colloidal Particles At Liquid Interfaces [M]. Britain: Cambridge University Press, 2006
- [41] Dickinson E, Yamamoto Y. Rheology of milk protein gels and protein-stabilized emulsion gels cross-linked with transglutaminase [J]. Food Colloids, 2004, 44(6): 326-334

现代食品科技