

# 基于数字图像分析技术动态监测淀粉糊化过程

谢 钦, 高群玉\*

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东 广州 510640)

**摘 要:** 采用一种基于累积光密度(IOD)值的数字图像分析技术的方法, 动态定量监测 500nm 波长处, A 型(玉米淀粉)、B 型(马铃薯淀粉)、C 型(豌豆淀粉)3 种淀粉在过量水分含量体系中糊化时的结晶程度的变化情况; 建立同一温度点下对应的  $DG_I$  (IOD 法对应的糊化度)和  $DG_D$  (DSC 法对应的糊化度)的直角坐标系, 分析不同淀粉的糊化进程; 绘制温度-IOD 响应差谱图和代表淀粉糊化过程中结晶变化的响应强度的峰形图。结果表明: 3 种淀粉经历了不同的结晶程度从减弱到完全消失的历程, 并且在糊化的不同阶段各有差异, 同时糊化进程也差异明显。这种差异主要和淀粉的结构多样性与组成有关。

**关键词:** 淀粉; 糊化; 积分光密度; 数字图像分析技术

## Dynamic Monitoring of Gelatinization Process by Digital Image Analysis Technique

XIE Qin, GAO Qun-yu\*

(College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangdong 510640, China)

**Abstract:** A new method named as integral optical density method for dynamically monitoring gelatinization process was explored in this study. The dynamic changes of three types of starches such as type A (maize starch), type B (potato starch), and type C (pea starch) were detected during the gelatinization process in excess water system. The results showed that three crystalline types of starch underwent different change processes. This difference is mainly associated with the diversity and composition of starch structure.

**Key words:** starch; gelatinization; integral optical density; digital image analysis technique

中图分类号: TS236.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)09-0072-05

传统的糊化理论认为, 淀粉的糊化是一种由结构规则向不规则转变的相变过程。当原淀粉在水中加热时, 它们的多晶性逐渐消失, 导致结构上的破坏, 随后淀粉多聚物分散在溶液中<sup>[1]</sup>。从 19 世纪开始就有许多研究者提出了各自的淀粉糊化理论, 如多效协同理论<sup>[2]</sup>、有效水分理论<sup>[3]</sup>、晶体稳定理论<sup>[4]</sup>、连续相变理论<sup>[5]</sup>以及三阶段相变理论<sup>[6]</sup>。但这种水热处理导致其结构上的转变过程仍然没有被理解透彻<sup>[7]</sup>。近年来越来越多的研究发现, 淀粉的糊化相变是一个更为复杂的非平衡过程<sup>[8]</sup>, 淀粉的相转变在一个相当宽的温度范围内发生<sup>[1,7,9]</sup>, 不同来源的淀粉经历的相变过程差别极大<sup>[1]</sup>。

原淀粉颗粒的结构是以 4 种不同的尺度进行分层组合的, 包括: 分子尺度、薄层尺度、生长圈尺度和整个淀粉颗粒尺度, 所有这 4 种尺度层次都与糊化现象

有关<sup>[10]</sup>。野生型淀粉颗粒根据其晶胞的几何学特征, 双螺旋堆积密度以及晶体结构中结合水含量多少的不同, 主要分为 A 型和 B 型<sup>[11]</sup>。A 型淀粉每个晶格有 4 个水分子, 而 B 型淀粉有 36 个<sup>[12]</sup>。Donald 等<sup>[13]</sup>研究发现马铃薯淀粉(B 型淀粉)结晶薄层和非结晶背景/生长圈中的淀粉分子密度要小于 A 型, 这种差异在非结晶生长圈中更加明显, 而在非结晶薄层中马铃薯淀粉(B 型)却要高于其他 A 型淀粉。另外还有一种既有 A 型淀粉特征, 又含有 B 型淀粉特征的是 C 型淀粉<sup>[14]</sup>, Bemeller<sup>[14]</sup>认为 C 型淀粉是处于 A 型淀粉和 B 型淀粉之间的一种中间状态。

热台偏光显微镜是一种常用的研究淀粉糊化的仪器。它利用淀粉的晶体特性, 即在偏振光下出现的双折射光的原理, 关注淀粉颗粒在 500nm 波长处的规则结构<sup>[10]</sup>。传统上当有 2% 和 98% 的颗粒失去偏光时的温度

收稿日期: 2011-04-22

基金项目: 国家“973”计划项目(2007AA10Z309); 广东省教育部产学研结合项目(2009B090300274)

作者简介: 谢钦(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事碳水化合物功能性材料研究。E-mail: danielxieqin@gmail.com

\* 通信作者: 高群玉(1965—), 女, 教授, 博士, 主要从事淀粉改性及碳水化合物功能材料研究。E-mail: qygao@scut.edu.cn

分别被定义为糊化起始温度和糊化终止温度,后者也常被称为双折射结束点温度<sup>[15]</sup>。但是淀粉在糊化过程中,淀粉的双折射光并不是在一瞬间消失,并且传统采用计数的方式——数颗粒消失的数量,甚至不是一个几何参数<sup>[16]</sup>,因此无法表征出某个时间点淀粉糊化的真实情况。

光密度(OD)是生物医学特别是分子生物学实验样品中所要测定的基本参数之一,它体现了图像某一像素点对应的阳性物质的相对含量。而要得到样品上某一部位总的相对含量,就需要将目标区域内各像素点上的OD值累加起来,称之为累积光密度(IOD)<sup>[17]</sup>。

淀粉的双折射光在糊化过程中经历了减弱直至全部消失的过程,假设淀粉颗粒的结晶结构为“阳性物质”,因为其强弱与它在偏振光下的双折射光亮度成正比,利用专业图像处理软件 Image-Pro Plus 5.0 分析淀粉在糊化过程中拍摄到的双折射光的数字图片,计算出反映淀粉结晶结构强弱的 IOD 值,以此动态定量可以表征淀粉在糊化过程中结晶程度(DC)的变化情况。

本实验的目的在于利用上述基于数字图像分析技术的方法,选择3种具有典型晶型的淀粉如A型的玉米淀粉、B型的马铃薯淀粉和C型的豌豆淀粉,动态定量地监测淀粉在糊化过程中结晶的消失情况,国内外尚未见类似报道。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

玉米淀粉(A型) 广东鹏锦实业有限公司;马铃薯淀粉(B型) 嵩天集团有限公司;豌豆淀粉(C型) 烟台东方蛋白有限公司;均为食品级。

### 1.2 仪器与设备

THMSE600型热台 日本 Linram 公司;偏光显微镜(配有 Micro Publisher 3.3 RTV 型数码相机) 日本 Olympus 公司;DSC8000 型示差扫描量热仪(DSC) 美国 PerkinElmer 公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 偏光图片的采集

淀粉乳(水分含量约 80%)适量,密封于两片圆形盖玻片之间置于装配有数码相机的热台偏光显微镜下,先以 5℃/s 升温至 40℃,然后以 2℃/s 升温,在不同温度点拍摄得到淀粉糊化过程的数码图片,实验记录的温度范围为 40~80℃和 40~60℃阶段每 5℃,60~76℃每 2℃采集一张数码照片。另外将一个视频监控器连接照相机输出颗粒双十字的在线图像。图片保存格式为 Tiff,分辨率 2048 × 1536 像素,不同淀粉颗粒大小不一样,选用合适的放大倍数,以使视野中颗粒的数量在 1000 颗以上。

#### 1.3.2 糊化度的表征

累积光密度法(IOD 法): IOD 法检测淀粉的糊化度,表征的是淀粉颗粒相对初始状态的结晶结构的损失程度,对应的是用 IOD 值表征淀粉的糊化程度。用 Image-Pro Plus 5.0 计算出每张数码图片的 IOD 值为初测 IOD 值,定义所有双折射光消失的图片的 IOD 值为背景 IOD 值。

淀粉颗粒的实际 IOD 值 = 初测 IOD 值 - 背景 IOD 值 (1)

$$DG_I = \left(1 - \frac{\text{实际IOD值}}{\text{40℃时的IOD值}}\right) \times 100 \quad (2)$$

式中: DG<sub>I</sub> 为 IOD 值法测得的糊化度。

DSC 焓变积分法(DSC 法): 用仪器自带的 Pyris 软件,分析淀粉的糊化焓值谱图。某温度点的糊化度为从峰起始点到该温度的积分面积占整个糊化温度范围内积分面积的百分比。

$$DG_D \% = \int_{t_0}^t f(x) dx \quad (3)$$

式中: t 为某特定温度点 /℃; t<sub>0</sub> 为起始糊化温度 /℃; DG<sub>D</sub> 为 DSC 法测得的糊化度。

#### 1.3.3 变响应差模型

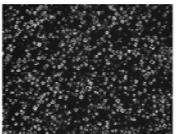
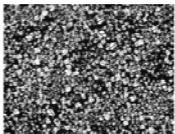
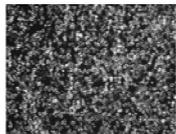
绘制方法: 定义为某一温度下的晶变响应差为该温度条件下基于 IOD 法测得的糊化度 DG<sub>I</sub> 与上一温度采集点糊化度之差。以温度为横轴,晶变响应差为纵轴,将散点经张力样条函数拟合,绘制得到晶变响应差峰谱图。每个样品进行 4 次平行实验,所得结果用 Excel 软件计算分析,曲线由 Curve Expert-Pro 绘制、拟合得到。

## 2 结果与分析

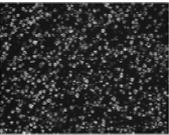
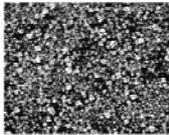
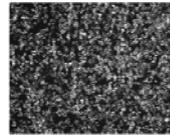
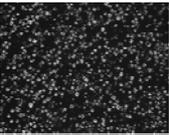
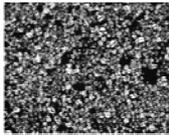
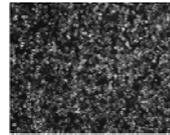
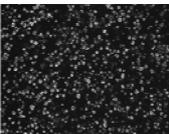
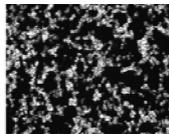
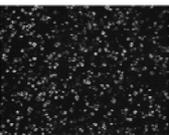
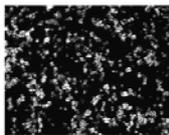
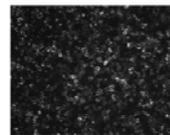
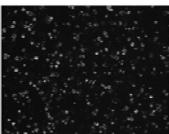
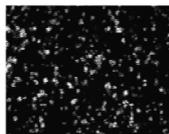
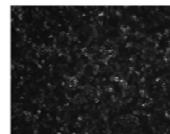
### 2.1 淀粉糊化过程的显微观测及其糊化历程

表 1 A、B、C 型淀粉在热台偏光显微镜下不同温度点的显微照片及其对应的 DG<sub>I</sub>

Table 1 Micrographs of starches type A, type B and type C at different temperatures during heating process under the conditions of normal light and corresponding DG<sub>I</sub>

温度 /℃	A 型淀粉(× 200)	B 型淀粉(× 100)	C 型淀粉(× 100)
40			
DG <sub>I</sub> /%	0	0	0

续表 1

温度/℃	A型淀粉(×200)	B型淀粉(×100)	C型淀粉(×100)
55	 DG <sub>t</sub> /% 3.2	 DG <sub>t</sub> /% 2.9	 DG <sub>t</sub> /% 9.2
60	 DG <sub>t</sub> /% 8.0	 DG <sub>t</sub> /% 6.7	 DG <sub>t</sub> /% 22.9
64	 DG <sub>t</sub> /% 17.3	 DG <sub>t</sub> /% 37.1	 DG <sub>t</sub> /% 49.9
66	 DG <sub>t</sub> /% 35.5	 DG <sub>t</sub> /% 56.8	 DG <sub>t</sub> /% 59.9
68	 DG <sub>t</sub> /% 66.6	 DG <sub>t</sub> /% 76.2	 DG <sub>t</sub> /% 70.7
72	 DG <sub>t</sub> /% 98.7	 DG <sub>t</sub> /% 96.6	 DG <sub>t</sub> /% 88.4
76	 DG <sub>t</sub> /% 100	 DG <sub>t</sub> /% 99.9	 DG <sub>t</sub> /% 97.3

由表 1 可知, 淀粉在糊化过程中, 经历了膨胀、偏光十字减弱直至消失的过程, 不同的糊化阶段, 颗粒有着全部糊化(偏光完全消失)、部分糊化(偏光面积减少, 亮度减弱)以及未糊化(偏光基本没有变化)3 种状态, 特别在糊化中期, 大部分淀粉都处于部分糊化这一中间状态。IOD 值是偏光部分的积分面积和 OD 值都相关的积分函数, 面积对应的是淀粉结晶结构数量的多少, OD 值则与淀粉结晶结构的强弱成正比, 因此 IOD 法比起传统的利用数偏光十字数量<sup>[15]</sup>的方法更能真实、准确地反映淀粉结晶的损失程度。

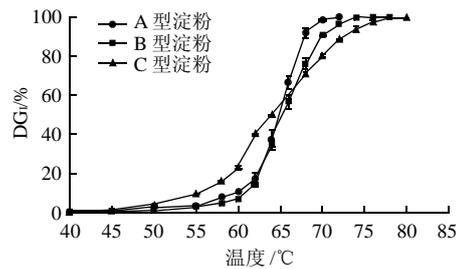


图 1 A、B、C 型淀粉在升温过程中的温度-DG<sub>t</sub>关系图  
Fig.1 Relationship between temperature and DG<sub>t</sub> of starches type A, type B and type C during heating process

由图 1 可知, 3 条曲线反映出 3 种晶型的淀粉在糊化过程中, 经历了不同的结晶程度从逐渐减少至完全消失的历程。在糊化的前期( $< 60^{\circ}\text{C}$ )和后期( $> 68^{\circ}\text{C}$ ), A 型与 B 型的 DG<sub>t</sub> 差异不大, 糊化中期( $60\sim 68^{\circ}\text{C}$ ), B 型的 DG<sub>t</sub> 大于 A 型, C 型淀粉的 DG<sub>t</sub> 在  $66^{\circ}\text{C}$  之前大于 A、B 型淀粉, 约  $68^{\circ}\text{C}$  后小于 A、B 型淀粉, A 型淀粉和 B 型淀粉的 DG<sub>t</sub> 的上升速率分别在  $64^{\circ}\text{C}$  和  $62^{\circ}\text{C}$  急剧增大,  $68^{\circ}\text{C}$  后逐渐减小, C 型淀粉在  $62^{\circ}\text{C}$  之前经历了 DG<sub>t</sub> 上升速率逐渐增大的过程, 随后上升速率降低并稳定在一定值,  $72^{\circ}\text{C}$  后 DG<sub>t</sub> 上升速率逐渐降低直至为零。

3 种淀粉结构上的差异导致了其糊化历程的差异。淀粉在过量水中糊化时, 第一步是非结晶生长圈吸水后的迅速膨胀, 由于整个体系是由非结晶支柱交联起来的, 所以与之结合的结晶薄层被破坏, 这便降低了颗粒的结晶度<sup>[10]</sup>。表 1 中淀粉的结晶程度在糊化前期的降低主要是由淀粉颗粒在水热条件下的细微膨胀, 以及双螺旋从微晶一侧脱离导致的<sup>[10]</sup>。随着温度的升高, 淀粉颗粒开始剧烈膨胀, 同时也拥有更多的能量使微晶上并排的双螺旋单体脱离, 此时 DG<sub>t</sub> 急剧增大 A 型淀粉的糊化温度比 B 型淀粉高, 且 B 型在更低温度下 DG<sub>t</sub> 便开始急剧增加。这可能是由于马铃薯淀粉有电荷磷酸基团, 弹性更大的非结晶曲或者含水更高的结晶区, 而更易发生淀粉-水相互作用, 在较低温度下更易发生膨胀<sup>[18]</sup>。A 型淀粉在糊化中期的 DG<sub>t</sub> 上升速率比 B 型快。这可能与 B 型淀粉分子规则结构与远程规则结构的更好的稳定性有关<sup>[19]</sup>, 这也与非结晶薄层更高的淀粉分子密度有关<sup>[13]</sup>, 所以 B 型淀粉在糊化过程中结晶结构减弱过程的呈现一定的延迟。C 型淀粉表现出的糊化的阶段性更明显, 这主要与它的颗粒晶型分布特性有关。Bogacheva 等<sup>[19]</sup>研究发现, C 型淀粉颗粒外层分布的为 A 型多聚物, B 型多聚物则位于这层包裹之下颗粒中心的位置, 这种结构对 C 型淀粉的糊化行为有重大影响, 因为颗粒外层的多晶部分(主要是 A 型多聚物)比中心的多晶部分(主要是 B 型多聚物)结构更紧密, 糊化温度更

高。从表 1 可以看出, C 型淀粉中心的结晶结构在糊化初期很快失去, 但是与 A 型、B 型比较, C 型外层的结晶结构消失更缓慢, 使 C 型淀粉在较高温度时( $> 68^{\circ}\text{C}$ )拥有更低的  $DG_i$  与  $DG_i$  上升速率, 虽然 C 型淀粉在糊化初期比 A、B 型淀粉更能抵抗膨胀<sup>[11]</sup>, 但是却出现更高的  $DG_i$ , 这可能是由于最先吸水膨胀的 B 型多聚物部分降低了附近结晶区域的糊化温度, 加速了其崩解过程<sup>[20]</sup>, 因此, 认为 C 型淀粉的多晶分布特性, 以及上述加速作用和膨胀抑制特性之间的动态平衡, 决定了 C 型淀粉糊化的多阶段性。

### 2.2 淀粉的糊化进程模型

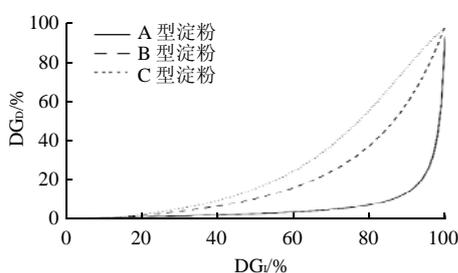


图 2 A、B、C 型淀粉对应同一温度下的  $DG_i$ - $DG_D$  关系图  
Fig.2 Relationship between  $DG_i$  and  $DG_D$  of starches type A, type B and type C at the same temperature

图 2 将同一温度点下对应的  $DG_i$  和  $DG_D$  建立直角坐标系, 反映了淀粉以结晶减弱至消失表示的糊化进程 (GP) 与以净焓热变化情况表示的糊化进程之间的关系。GP 曲线相关性  $R^2$  分别为 0.964、0.990、0.988。3 种淀粉 IOD 法表征的 GP 比 DSC 法更快, 即在 IOD-GP 的前阶段,  $DG_D$  缓慢增加, 后阶段快速增加, 这种趋势对 A 型淀粉最明显, 在  $DG_D$  达到 90% 前,  $DG_D$  只完成不到 20%, 在 GP<sub>i</sub> 后阶段( $> 90\%$ ),  $DG_D$  急剧增加。对于 B 型淀粉,  $DG_D$  与 GP<sub>i</sub> 表现出更小的差异性, 当  $DG_i$  约为 70%,  $DG_D$  缓慢增加至 20% 左右, 随后上升速率加快。C 型淀粉与 B 型淀粉的 GP 趋势相似, 但同一  $DG_i$  条件下其对应的  $DG_D$  更大。

Bogracheva 等<sup>[20]</sup>认为 DSC 探测到的糊化焓变是近程和远程规则结构的吸热解离与颗粒膨胀的放热过程组合的结果。Waigh 等<sup>[10]</sup>则从结晶的角度解释了淀粉的糊化, 认为糊化是自组装之间的联合作用, 支链淀粉并排的双螺旋的分离, 以及加热时总体结晶结构的崩解。在过量水分含量( $m_{\text{水}}:m_{\text{淀粉}} > 1.5$ )条件下, 淀粉的 DSC 谱图显示的单峰是由 G 峰(螺旋-螺旋解离)和 M1 峰(支链淀粉螺旋解离)的合并而来<sup>[15]</sup>。螺旋-螺旋解离对应的主要是淀粉结晶有序结构的降低, 而双螺旋解离则是分子有序结构的降低。Biliaderis<sup>[21]</sup>认为, 淀粉结构中双螺旋的

损失比结晶的损失对 DSC 热焓值得贡献要大。Cooke 等<sup>[22]</sup>的研究也证实以上结论, 同时他们还指出, 淀粉结晶结构的损失主要和淀粉颗粒的前期膨胀有关, 而双螺旋的损失则主要发生在膨胀后期。因此  $DG_i$  所反映的糊化进程主要与 G 峰对应,  $DG_D$  则与 G 峰和 M1 峰的和对应。

淀粉在 DSC 显示的起峰温度前便发生不同程度的膨胀, 这种膨胀的热效应往往不是很明显, 但是对颗粒的整体结晶情况影响较大, 因此 GP<sub>i</sub> 比 GP<sub>D</sub> 先启动。随着温度进一步增加, 便有了足够的能量破坏所有剩下的远程有序结构并导致螺旋卷曲转变(分子有序结构的损失), 表现为 GP<sub>D</sub> 的不断增大。

玉米淀粉在 GP 图上表现出的最大的  $DG_D$  滞后性, 可能与以下几个原因有关: 首先, A 型淀粉与 B 型相比, 支链淀粉双螺旋长度更短, 因此 M1 峰更宽<sup>[15]</sup>, 笔者推测, 原本合并的 G 峰和 M1 峰在温度轴上也相距更远; 其次, 玉米淀粉的结晶的损失对淀粉糊化总热焓的贡献要低于其他两种淀粉。豌豆淀粉的 GP 曲线并不处于 A、B 型之间, 而处于最上端。可能与野生型豌豆淀粉拥有更少的结晶支链淀粉、双螺旋结构和支链-脂质复合物有关, 即结晶损失对淀粉糊化总热焓的贡献要更多。综上所述, 不同淀粉因其结构和组成的差异, 在糊化过程中表现出不同的 GP 特征曲线。

### 2.3 淀粉糊化的晶变响应差模型

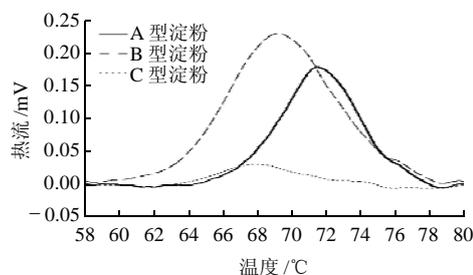


图 3 A、B、C 型淀粉的 DSC 扫描谱图  
Fig.3 DSC scanning thermograms of starches type A, type B and type C

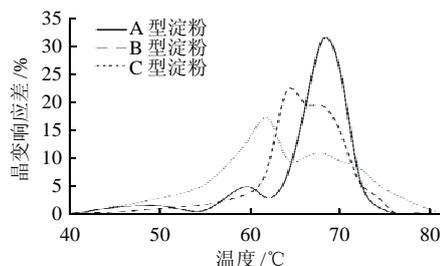


图 4 A、B、C 型淀粉基于温度-IOD 的晶变响应差谱图  
Fig.4 Relationships of IOD response value of starches type A, type B and type C with temperature

由图3可知, A、B、C型淀粉的焓热响应峰型为典型的单峰, 糊化峰值温度分别为71.8、69.1、69.9℃; 由图4可知, 3个峰表现出明显的多峰性。A型有两个明显的峰, 峰值温度分别为59.7、68.4℃, 第二个峰值温度比DSC对应的低3.4℃; B型在64.4℃处有明显尖峰, 温度比DSC扫描图谱对应的低4.7℃, 同时有一个肩峰位于它的右侧。C型淀粉有两个明显的峰, 峰值温度分别为61.8、67.7℃, 前面已述C型淀粉的多晶性和多阶段糊化行为, 推测第一个峰对应的是C型淀粉内部的B型结构部分, 第二个峰对应的为C型淀粉外层的A型结构部分。将它们与单纯A、B型淀粉从图4反映的峰值温度比较, 分别低2.6、0.7℃。综上所述, 实验认为从晶变响应差谱图反映出, 不仅仅C型淀粉因为其特殊组成, 拥有结晶多样性, A、B型淀粉这类传统认为晶型单一的淀粉, 同样表现出结晶的多样性, 这从A型淀粉存在的主峰的左侧峰以及B型淀粉主峰的右肩峰可以看出。C型淀粉中A型部分的峰值糊化温度与单纯的A型淀粉相差不大(0.7℃), 而B型部分对应的要低2.6℃, 这可能与C型淀粉中心B型结构部分比单纯的B型淀粉晶体结构更疏松, 以及在糊化过程中更早吸水膨胀有关。

### 3 结 论

本研究采用一种基于累积光密度(IOD)值的数字图像分析技术的方法, 动态定量监测了500nm波长条件下, A型(玉米淀粉)、B型(马铃薯淀粉)和C型(豌豆淀粉)淀粉在过量水分含量体系中糊化时的结晶程度变化情况。结果表明, 3种淀粉经历了不同的结晶程度从减弱到完全消失的历程, 并且在糊化的不同阶段各有差异。A型淀粉比B型淀粉糊化温度高, 结晶结构的损失速率更快; C型淀粉在较低温度下, 结晶部分的损失最大, 在糊化后期结晶部分的损失小, 速率更慢; 另外, C型淀粉的糊化历程表现出多阶段性, 这与其颗粒结构的多晶分布特性有关。

DG<sub>D</sub>和DG<sub>I</sub>关系图显示, A、B、C型淀粉在糊化过程中的进程表现出较大差异。IOD法表征的GP比DSC法更快, 而A型淀粉最为明显。在过量水分含量下, A型淀粉与B、C型淀粉相比, 原本合并的G峰和M1峰在温度轴上可能相距更远; 其次, A型淀粉的结晶的损失对淀粉糊化总热焓的贡献要低于其他两种淀粉; 3种淀粉中, C型淀粉结晶损失对淀粉糊化总热焓的贡献最多。

A、B型两种传统被认为结晶单一的淀粉, 在糊化过程中同样表现出结晶多样性, 晶变响应差谱图显示, A型淀粉在糊化主峰左侧有较明显侧峰, B型淀粉在糊化主峰右侧有较明显肩峰。

### 参 考 文 献:

- [1] RATNAYAKE W S, OTANI C, JACKSON D S. DSC enthalpic transitions during starch gelatinization in excess water, dilute sodium chloride and dilute sucrose solutions[J]. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 2009, 89(12): 2156-2164.
- [2] MARCHANT J L, BLANSHARD J M V. Studies of the dynamics of the gelatinization of starch granules employing a small angle light scattering system starch[J]. *Starch/Stärke*, 1978, 30(8): 257-264.
- [3] DONOVAN J W. Phase transition s of the starch-water system[J]. *Biopolymers*, 1979, 18(2): 263-275.
- [4] EVANS I D, HAISMAN D R. The effect of solutes on the gelatinization temperature range of potato starch[J]. *Starch/Stärke*, 1982, 34(7): 224-231.
- [5] NAKAZAWA F, NOGUCHI S, TAKAHASHI J, et al. Thermal equilibrium state of starch-water mixture studied by differential scanning calorimetry [J]. *Agriculture and Biology Chemistry*, 1984, 48(11): 2647-2653.
- [6] BILIADERIS C G, PAGE C M, MAURICE T J, et al. Thermal characterization of rice starches: a polymeric approach to phase transition of granular starch [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1986, 34(1): 6-14.
- [7] RATNAYAKE W S, JACKSON D S. Starch gelatinization[J]. *Adv Food Nutr Res*, 2009, 55: 221-269.
- [8] SHI Y C. Two- and multi-step annealing of cereal starches in relation to gelatinization[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(3): 1097-1104.
- [9] RATNAYAKE W S, JACKSON D S. A new insight into the gelatinization process of native starches[J]. *Carbohydrate Polymer*, 2007, 67(4): 511-529.
- [10] WAIGH T A, GIDLEY M J, KOMANSHEK B U, et al. The phase transformations in starch during gelatinization: a liquid crystalline approach [J]. *Carbohydrate Research*, 2000, 328(2): 165-176.
- [11] WANG T L, BOGRACHEVA T Y, HEDLEY C L. Starch: as simple as A, B, C[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49: 481-502.
- [12] BULÉON A, COLONNA P, PKANCHOT V, et al. Starch granules: structure and biosynthesis[J]. *Int J Biol Macromol*, 1998, 23(2): 85-112.
- [13] DONALD A M, KATO K L, PERRY P A, et al. Scattering studies of the internal structure of starch granules[J]. *Starch/Stärke*, 2001, 53(10): 504-512.
- [14] BEMELLER J N. *Carbohydrate chemistry for food scientists*[M]. 2nd ed. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 2007: 173-224.
- [15] KANITHA T. *Effect of gelatinization on starch-water interactions*[D]. Bangkok, Thailand: Chulalongkorn University, 1997.
- [16] PARADA J, AGUILERA J M. *in vitro* digestibility and glycemic response of potato starch is related to granule size and degree of gelatinization[J]. *Food Engineering and Physical Properties*, 2009, 74(1): 34-38.
- [17] 汤耀法, 胡江元, 李宽嫒. 光密度和积分光密度[J]. *上海医科大学学报*, 1997, 24(2): 134.
- [18] CHIOTELLI E, PILOSIO G, MESTE M L. Effect of sodium chloride on the gelatinization of starch: a multimeasurement study[J]. *Biopolymers*, 2002, 63(1): 41-58.
- [19] BOGRACHEVA T Y, MORRIS V J, RING S G, et al. The granular structure of C-type pea starch and its role in gelatinization[J]. *Biopolymers*, 1998, 45(4): 323-332.
- [20] BOGRACHEVA T Y, MEARES C, HEDLEY C L. The effect of heating on the thermodynamic characteristics of potato starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 63(3): 323-330.
- [21] BILIADERIS C G. The structure and interactions of starch with food constituents[J]. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 1991, 69(1): 60-78.
- [22] COOKE D, GIDLEY M J. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: origin of the enthalpic transition[J]. *Carbohydrate Research*, 1992, 227: 103-112.