

# 湿热处理对不同直链淀粉含量大米淀粉多尺度结构和消化性能的影响

卞华伟<sup>1</sup>, 刘誉繁<sup>2</sup>, 郑波<sup>2</sup>, 朱惠莲<sup>1</sup>, 陈玲<sup>2,3</sup>

(1. 中山大学公共卫生学院, 广东广州 510275) (2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

(3. 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室, 广东广州 510640)

**摘要:** 本文采用体外模拟法和现代化分析技术测定及考察了不同直链含量的大米淀粉经湿热处理后其多尺度结构和消化性能的变化情况, 明晰了湿热处理后大米淀粉多尺度结构和消化性能的关系。结果表明, 湿热处理体系中热能和水分子的协同作用, 一方面对大米淀粉颗粒具有一定的破坏作用, 使得其平均相对分子量降低、双螺旋含量降低、相对结晶度降低、半结晶片层的有序化程度降低,  $M_w > 2 \times 10^7$  的高分子量片段区域逐渐向  $M_w < 1 \times 10^6$  拓宽, 且直链含量较低的大米淀粉破坏程度更为显著。另一方面, 湿热处理促进了降解后的大米淀粉分子链自由运动, 使淀粉分子发生重排和取向, 形成新的单螺旋结构, 有利于大米淀粉慢消化和抗消化性能的提高, 且直链淀粉含量较高的大米淀粉提高的越明显。研究结果为加工淀粉及淀粉基营养健康食品提供了基础数据及理论支撑。

**关键词:** 湿热处理; 大米淀粉; 多尺度结构; 消化性能

文章编号: 1673-9078(2018)12-40-44

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.12.007

## Effect of Heat-moisture Treatment on the Multi-scale Structure and Digestibility of Rice Starch with Different Amylose Content

BIAN Hua-wei<sup>1</sup>, LIU Yu-fan<sup>2</sup>, ZHENG Bo<sup>2</sup>, ZHU Hui-lian<sup>1</sup>, CHEN Ling<sup>2,3</sup>

(1. School of public health, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China) (2. School of Food Science and Engineering South China University of Technology, Guangzhou 510640, China) (3. Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In this paper, the relationship between multi-scale structure and digestibility of rice starch with different amylose content before and after the heat-moisture treatment (HMT) was investigated. The results showed that the thermal energy and water molecules during HMT could degrade starch molecules, unravel double helix, reduce relative crystallinity and decrease the ordered degree of lamellar structure, and the  $M_w > 2 \times 10^7$  area gradually turned to the  $M_w < 1 \times 10^6$ . And these changes were more obvious with the lower amylose content of rice starch. Accompanying the structural disorder and degradation, some molecule rearrangements and orientation occurred to probably form densely packed starch fractions such as new single helix structure, which was conducive to improve the content of slowly digestible starch (SDS) and resistant starch (RS), and these changes were more obvious with the more amylose content of rice starch. The results provide basic data and theoretical support for the processing of starch and starch-based nutritional healthy food.

**Key words:** Heat-moisture treatment; rice starch; multi-scale structure; digestibility

淀粉是人类的主要能源物质, 主要由直链和支链淀粉构成。直链和支链淀粉通过不同的排列组合方式构成淀粉的多尺度结构<sup>[1]</sup>。其中, 直链淀粉对淀粉的结构和性质有着至关重要的影响。直链淀粉是淀粉结构组成之一, 它是淀粉颗粒中无定型区的主要组成部

收稿日期: 2018-08-03

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD04012021); 广东省“扬帆计划”引进创新创业团队专项资助(2014YT02S029)

作者简介: 卞华伟(1970-), 男, 博士, 主任, 研究方向: 临床营养学

通讯作者: 朱惠莲(1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 临床营养学

分, 同时随机分布在支链淀粉簇状结构周围, 破坏支链淀粉结晶的完美度。许多研究者发现直链淀粉含量越高, 淀粉的糊化温度越高、崩解值越小、峰值粘度较低以及剪切稀化现象不明显<sup>[2-4]</sup>。有研究者发现直链淀粉含量越高, 淀粉的消化速率越低<sup>[5,6]</sup>。

为了改善大米淀粉的功能性质特别是消化性能, 许多研究者对其进行改性处理, 其中湿热处理(Heat-moisture treatment, HMT)作为一种物理改性方式, 由于其具有绿色环保和低成本的优点备受广大研究者的关注。湿热处理包括三个主要的条件: 一是

较低的水分条件（一般为10%~35%），二是较高的温度条件（一般为90~120 °C），三是一定的处理时间<sup>[2]</sup>。研究表明，不同直链含量的淀粉受湿热处理后的影响程度各不相同，Elessandra等人<sup>[7]</sup>研究了湿热处理对不同直链含量的大米淀粉的影响，发现直链淀粉含量更高的大米淀粉其糊化温度提高的更加明显，且其峰值粘度、崩解值以及回生值降低的程度更大。Wittawat等<sup>[8]</sup>人研究了湿热处理对普通和蜡质淀粉性质的影响发现湿热处理对普通淀粉的粘度影响更大。由此可见，直链淀粉含量对湿热处理后淀粉结构以及性质的变化具有重要的影响。

因此，本文以直链淀粉含量不同的两种大米淀粉为研究对象，采用现代化分析技术研究湿热处理对两种大米淀粉消化性能及多尺度结构的影响，探讨直链淀粉含量对其消化性能的影响规律，并分析湿热处理对淀粉多尺度结构转变继而影响其消化性能之间的内在关系，为湿热处理加工调控淀粉消化性能提供理论数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与试剂

大米淀粉（直链淀粉含量为 28.9%的大米淀粉命名为 YF；直链淀粉含量为 17.5%的大米淀粉命名为 YJ），来自广东省农科院；猪胰酶和葡萄糖苷酶：购自美国 Sigma-Aldrich 公司；葡萄糖氧化酶-过氧化物酶试剂盒：购自爱尔兰 Megazyme 公司；氢氧化钠：分析纯，购自天津市百世化工有限公司；无水乙醇：分析纯，购自天津化学试剂厂。

### 1.2 主要仪器设备

湿热处理系统，深圳信宜特公司；X 射线衍射仪（Xpert PRO 型 XRD），荷兰 Panalytical 公司；小角 X 射线散射仪（SAXS），奥地利 Anton Paar 公司；固体核磁共振仪（HD400 型），德国 Bruker 公司；多角度光散射仪，美国 WATTY 公司

### 1.3 湿热淀粉样品制备

#### 1.3.1 湿热处理

分别称取两种大米淀粉各 50 g，将水分含量调至 20%（将淀粉与水充分混合后，在 4 °C 低温条件下平衡水分 24 h）。然后将淀粉置于湿热处理系统中，在 100 °C 条件下反应 2 h。反应结束后取出产物，在 45 °C 烘箱干燥 12 h 后粉碎，过 160 目筛，即获得湿热处理后的大米样品，分别命名为 YF20、YJ20。

#### 1.3.2 直链淀粉含量

向 100 mg 的干基淀粉中加入 1 mL 的无水乙醇和 9 mL 的 1 mol/L 的氢氧化钠溶液，在 100 °C 条件下加热 10 min 让其完全溶解。冷却至室温后，将淀粉溶液稀释至 100 mL。向其中取 2.5 mL 与 25 mL 的去离子水混合，然后加入 0.5 mL 的 1 mol/L 醋酸溶液和 0.5 mL 的 0.2% 的碘液，最后用去离子水定容到 50 mL。使用 UV-3802 型分光光度计在 620 nm 波长下检测。根据直链淀粉与支链淀粉纯品制作的标准曲线计算样品中直链淀粉的含量。每个样品测三次。

### 1.4 湿热处理样品结构及性质的测定

#### 1.4.1 凝胶渗透色谱-多角度光散射(GPC-MALS)

称取 4 mg 的淀粉样品分散于含有 LiBr 的 DMSO 中，在 75 °C 震荡水浴中溶解 6 h，冷却至室温后用 5 μm 的滤膜进行过滤。流动相为含有 LiBr (50 mM) 的 DMSO 溶液，用 0.22 μm 过滤膜在 PTFE 抽滤器上进行抽滤备用。测试条件为：流速 0.3 mL/min、进样量为 0.1 mL、激光波长为 658 nm、采集时间为 70 min。数据采集完用 Astra5 软件进行分析。

#### 1.4.2 <sup>13</sup>C CP/MAS 核磁共振

将 200~300 mg 的淀粉样品置于一个直径为 4 mm 的旋转圆筒中。扫描次数为 3000，循环间隔时间为 2 s。利用 Tan<sup>[9]</sup>等人的方法对所得到的光谱扣除无定型，得到有序结构部分的光谱，最后对螺旋含量进行计算。

#### 1.4.3 同步辐射小角 X 射线散射 (SAXS)

配制浓度为 60% 的淀粉乳放置于多槽台上，波长为 λ=1.47 Å，采集时间为 1 s。以水的衍射图作为背景，对背景进行归一化和扣除。得到范围为 0.0015 Å<sup>-1</sup><q<0.15 Å<sup>-1</sup> 的衍射图样。q=4πsinθ/λ，2θ 为衍射角，λ 为 X 射线波长。SAXS 图线得到的是相对峰强度 I 关于衍射矢量 q 的函数。而 q 与片层周期厚度 d<sub>Bragg</sub> 的关系为：d<sub>Bragg</sub>=2π/q。片层结构的相关参数可利用公式 (1)<sup>[26]</sup>进行计算：

$$f(r) = \frac{\int_0^{\infty} I(q)q^2 \cos(qr) dq}{\int_0^{\infty} I(q)q^2 dq} \quad \text{公式 (1)}$$

式中：r 为两个散射元之间的距离，d 为片层结构中周期厚度，为 f(r) 的峰值。

如图 3-1 所示，片层结构中的无定型厚度 d<sub>a</sub> 可以通过线性区和 f(r) 最低值的所在的平线的交点得到。片层结构中的结晶层厚度 d<sub>c</sub>=d-d<sub>a</sub>。

#### 1.4.4 X 射线衍射 (XRD)

操作条件为：采用波长为 0.1542 nm 的单色 Cu-Kα

射线,管压为40 kV,管流为40 mA。衍射角的范围从4°到40°,步长为0.033°,扫描速度为10°/min。每个样品测试三次。

### 1.4.5 消化性能测试

将Englyst<sup>[10]</sup>的方法优化后用于测定淀粉中RDS、SDS以及RS含量。测定前提前配好酶液备用。取1g(干基)淀粉样品与锥形瓶中,加入20 mL 0.1 mol/L的醋酸钠缓冲液(pH为5.2),沸水浴30 min。然后冷却至37℃左右,加入5 mL的酶液,置于水浴振荡器中(37℃,170 stoke/min)。20 min后取0.5 mL的混合液于20 mL 70%的乙醇中,离心5 min(4000 r/min)。取0.1 mL上清液于3 mL的GOPOD溶液中,在45℃水浴锅中保温20 min,最后于510 nm处测定吸光值。120 min后,与上述处理方式相同测定样品的吸光度值。

### 1.5 数据分析处理

采用Excel 2013软件建立数据库,通过SPSS19.0统计软件进行数据处理,检验水准取 $p=0.05$ ,所有数据均以 $\bar{x}\pm s$ 表示。采用单因素方差分析(one-way ANOVA),方差齐时组间比较采用Duncan法,方差不

齐时组间比较采用Dunnett's T3法。 $p<0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果与讨论

### 2.1 平均分子量及分子量分布

采用GPC-MALS技术对湿热处理前后两种大米淀粉的分子量 $M_w$ 和分子量分布情况进行分析,结果如表1所示。由表可知,两种大米淀粉经湿热处理后,直链淀粉均有明显增加,说明湿热处理可能导致大米淀粉支链分子链断裂,形成短直链淀粉。且由表可知,两种大米淀粉的 $M_w$ 分别为 $6.856\times 10^6$  g/mol和 $1.529\times 10^7$  g/mol。经湿热处理后,两种大米淀粉的 $M_w$ 均降低,其中YF的分子量在 $5\times 10^6<M_w<2\times 10^7$  g/mol范围的比例明显降低,在 $1\times 10^6<M_w<3\times 10^6$  g/mol范围的比例明显增加;同时,YJ的分子量在 $M_w>2\times 10^7$  g/mol范围的比例由25.37%降至0,在 $3\times 10^6<M_w<5\times 10^6$  g/mol范围的比例由0.12%增加至14.76%。表明湿热处理可能导致大米淀粉分子链断裂,从而使得小分子量范围的比例增加,大分子量范围比例降低。从平均分子量的降低程度上,YJ比YF降低更为显著。

表1 湿热处理前后两种大米淀粉的平均分子量、直链淀粉含量以及分子量分布

Table 1 Weight average molar mass, amylose content and molecular weight distribution of two kinds of native and HMT-treated rice starches

Sample	Mw/(g/mol)	AC/%	Molecular weight distribution/%			
			<1×10 <sup>6</sup> g/mol	1×10 <sup>6</sup> ~5×10 <sup>6</sup> g/mol	5×10 <sup>6</sup> ~2×10 <sup>7</sup> g/mol	>2×10 <sup>7</sup> g/mol
YF	6.856×10 <sup>6</sup> (1%)	28.9±1.0 <sup>a</sup>	1.00	34.92	62.69	1.36
YF20	2.972×10 <sup>6</sup> (2%)	31.5±1.0 <sup>b</sup>	13.83	55.53	30.64	0
YJ	1.529×10 <sup>7</sup> (2%)	17.5±0.7 <sup>c</sup>	0	0.26	74.11	25.37
YJ20	6.984×10 <sup>6</sup> (2%)	22.5±1.0 <sup>d</sup>	9.53	21.55	68.92	0

注:一行中不同字母标示的数值有显著差异( $p<0.05$ )。

表2 湿热处理前后两种大米淀粉分子螺旋结构含量及NMR图谱出峰位置

Table 2 Spiral structure content and peak position of NMR atlas of two kinds of native and HMT-treated rice starches

Sample	RC%	相对含量/%			峰位置/(×10 <sup>-6</sup> )	
		双螺旋	单螺旋	无定型	C1	C4
YF	28.6±0.6 <sup>c</sup>	33.0±0.2 <sup>d</sup>	7.8±0.8 <sup>c</sup>	59.2±0.9 <sup>c</sup>	98.97, 100.00, 102.02, 103.46	81.74
YF20	27.4±0.5 <sup>d</sup>	31.0±0.9 <sup>c</sup>	10.0±0.7 <sup>a</sup>	57.7±0.4 <sup>bc</sup>	99.07, 100.48, 101.50, 102.81	82.55
YJ	34.0±0.4 <sup>b</sup>	41.6±0.8 <sup>a</sup>	4.9±1.3 <sup>b</sup>	53.5±1.7 <sup>a</sup>	98.33, 100.99, 101.34, 102.77	82.68
YJ20	31.7±0.6 <sup>a</sup>	35.7±0.5 <sup>b</sup>	7.3±0.9 <sup>c</sup>	57.0±0.4 <sup>b</sup>	99.93, 100.87, 101.70, 103.61	82.04

注:一行中不同字母标示的数值有显著差异( $p<0.05$ )。

### 2.2 螺旋结构

两种大米淀粉湿热处理前后的核磁共振碳谱图谱出峰位置及其相应的螺旋结构含量如表2所示。其中

C1所在的化学位移中 $102\times 10^6$ 和 $103\times 10^6$ 所对应的区域表示单螺旋的存在,而 $101.5\times 10^6$ 、 $100.5\times 10^6$ 和 $99.4\times 10^6$ 对应的区域表示有双螺旋的存在<sup>[11]</sup>。

从表2中可以看出,经湿热处理后,YF和YJ的



双螺旋含量均有明显降低, 且 YJ 降低的程度更为显著, 表明湿热处理破坏了淀粉颗粒内双螺旋分子间的氢键, 从而降低了大米淀粉颗粒内部双螺旋结构的含量, 且直链淀粉含量越低, 破坏作用更显著。而由单

螺旋结构含量的变化可知, 湿热处理有利于促进单螺旋结构的形成。

### 2.3 层状结构

表 3 湿热处理前后两种大米淀粉颗粒的层状厚度

Table 3 Lamellar structural parameters of two kinds of native and HMT-treated rice starches

Sample	$d_{\text{Bragg}}/\text{nm}$	$d/\text{nm}$	$d_a/\text{nm}$	$d_c/\text{nm}$
YF	9.608±0.003 <sup>a</sup>	9.047±0.003 <sup>a</sup>	3.422±0.015 <sup>b</sup>	5.625±0.012 <sup>c</sup>
YF20	9.675±0.001 <sup>b</sup>	9.142±0.003 <sup>b</sup>	3.490±0.002 <sup>c</sup>	5.652±0.004 <sup>ab</sup>
YJ	9.238±0.003 <sup>c</sup>	9.033±0.004 <sup>c</sup>	3.373±0.001 <sup>a</sup>	5.660±0.005 <sup>a</sup>
YJ20	9.344±0.002 <sup>d</sup>	9.118±0.002 <sup>d</sup>	3.477±0.003 <sup>c</sup>	5.641±0.005 <sup>bc</sup>

注: 一行中不同字母标示的数值有显著差异 ( $p < 0.05$ )。

利用小角 X 射线散射技术考察湿热处理对大米淀粉颗粒半结晶层状结构的影响。两种大米淀粉湿热处理前后的小角 X 射线散射曲线和特征参数分别如图 1a 和表 3 所示。由图可见, YF 和 YJ 分别在  $q=0.06542 \text{ \AA}^{-1}$  和  $q=0.06807 \text{ \AA}^{-1}$  处有明显的散射峰, 根据布拉格公式<sup>[9]</sup>:  $d_{\text{Bragg}}=2\pi/q$ , 可以计算淀粉颗粒半结晶层厚度 ( $d_{\text{Bragg}}$ ), 也叫 Bragg 层间距。由表 3 可知, 经湿热处理后, YF 和 YJ 的半结晶层状厚度  $d_{\text{Bragg}}$  均增加, 且 YJ 增加的程度更为显著。

为了进一步了解层状结构的变化, 利用公式 (1) 可计算半结晶层的平均厚度  $d$  以及半结晶层中结晶层的厚度  $d_c$  和无定型层的厚度  $d_a$ 。由表 3 可知, YF 和 YJ 的半结晶层厚度分别为 9.047 nm 和 9.033 nm, 其中无定型层厚度分别为 3.422 nm 和 3.373 nm, 结晶层厚度分别为 5.625 nm 和 5.660 nm。经湿热处理后, 两种淀粉片厚度  $d$  和无定型层厚度  $d_a$  均有所增加, 且 YJ 增加的程度更为显著, 表明 YJ 抵抗湿热破坏作用的能力更弱, 使其层状结构变得更为松散。而 YF 的结晶层厚度增加, YJ 的结晶层厚度降低, 表明湿热处理促进了 YF 淀粉颗粒内分子链的重排反应, 可能是由于 YF 淀粉颗粒内分子链自由运动能力更强, 更容易发生重新排列和聚集, 支链淀粉中未形成螺旋结构的侧链部分相互作用增强而形成螺旋, 使得湿热处理后 YF 淀粉结晶层厚度增加。

### 2.4 结晶结构

两种大米淀粉的 X 射线衍射图如图 1b 所示。由图可见, 两种大米原淀粉在  $2\theta$  约为  $15.1^\circ$ 、 $17.1^\circ$ 、 $18.0^\circ$  以及  $23.0^\circ$  处呈现比较强的衍射特征峰, 表明两种大米淀粉均为 A 型结晶结构。经湿热处理后, 两种大米淀粉颗粒的 A 型特征衍射峰仍清晰可见, 仍主要表现为

A 型结晶结构。通过计算湿热处理前后两种大米淀粉相对结晶度的变化情况 (表 2) 可知, YF 和 YJ 的相对结晶度分别为 28.6% 和 34.0%, 经湿热处理后, YF 和 YJ 的相对结晶度均有明显降低, 且 YJ 降低的程度更为显著。这与前面螺旋结构和颗粒表面短程有序结构的结果变化一致。在湿热处理过程中, 由于水分子的迁移作用, 可导致淀粉分子间氢键断裂, 双螺旋解旋, 部分结晶结构被破坏, 进而相对结晶度降低<sup>[7]</sup>。

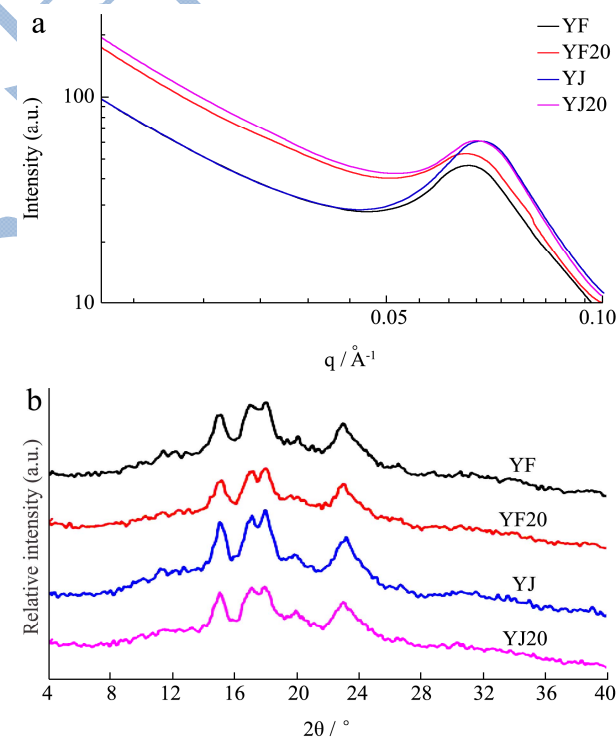


图 1 湿热处理前后两种大米淀粉的 SAXS 和 XRD 曲线  
Fig.1 SAXS and XRD patterns of two kinds of native and HMT-treated rice starches

### 2.5 消化性能

表4 湿热处理前后两种大米淀粉的RDS、SDS、RS含量

Table 4 Paste RDS, SDS and RS content of two kinds of native and HMT-treated rice starches

Sample	RDS/%	SDS/%	RS/%
YF	88.5±1.4 <sup>a</sup>	5.6±1.0 <sup>c</sup>	5.9±0.7 <sup>a</sup>
YF20	75.5±1.0 <sup>b</sup>	9.2±1.0 <sup>a</sup>	15.3±1.2 <sup>d</sup>
YJ	92.5±1.1 <sup>c</sup>	5.7±0.6 <sup>c</sup>	1.8±0.8 <sup>c</sup>
YJ20	82.5±1.4 <sup>d</sup>	7.2±0.4 <sup>b</sup>	10.3±1.3 <sup>b</sup>

两种大米淀粉湿热处理前后的 RDS、SDS、RS 含量如表 4 所示。从结果中可以看到,经湿热处理后二者的 RS 和 SDS 含量均增加,RDS 含量均降低,且 YF 变化的程度更为显著。研究表明,淀粉糊的消化性能主要与淀粉链结构有关,且发现直链含量越高,淀粉消化率越低<sup>[5,6]</sup>。如前所述,湿热处理增加了二者的直链淀粉含量,这可能有消化速率降低有关。另一方面,淀粉的糊化程度也会影响淀粉的消化性能,完整颗粒存在的越多,淀粉消化性能越低<sup>[15]</sup>。湿热处理促进了淀粉分子的重排,加强了淀粉颗粒的稳定性,可能有更多完整颗粒存在,且 YF 被加强的效果更为明显,故 YF 的 RS 和 SDS 含量增加的程度更大。

### 3 结论

本文探讨了湿热处理对不同直链淀粉含量大米淀粉消化性能及链结构、层状结构、结晶结构、螺旋结构等多尺度结构变化的影响。研究发现湿热处理对淀粉结构有一定的破坏作用,使得分子链发生断裂,淀粉的双螺旋含量减少,结晶度降低,且直链淀粉含量越低的淀粉抵抗湿热处理破坏作用的能力越弱。同时,湿热处理可促进分子间的取向重排,形成新的单螺旋结构,提高了淀粉颗粒的稳定性,从而增强大米淀粉淀粉的慢消化和抗消化性能。本研究的结果为加工获得不同消化性能的新型淀粉基食品提供理论指导。

### 参考文献

- [1] Liu Q. Understanding starches and their role in foods [J]. Food carbohydrates: Chemistry, physical properties and applications, 2005: 309-305
- [2] Park I M, Ibáñez A M, Zhong F, et al. Gelatinization and pasting properties of waxy and non-waxy rice starches [J]. Starch-Stärke, 2007, 59(8): 388-396
- [3] Patindol J, Gu X, Wang Y J. Chemometric analysis of the gelatinization and pasting properties of long-grain rice starches in relation to fine structure [J]. Starch - Stärke, 2009, 61(1): 3-11
- [4] Chung H J, Liu Q, Lee L, et al. Relationship between the structure, physicochemical properties and *in vitro* digestibility of rice starches with different amylose contents [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 968-975
- [5] Syahariza Z A, Sar S, Hasjim J, et al. The importance of amylose and amylopectin fine structures for starch digestibility in cooked rice grains [J]. Food Chemistry, 2013, 136(2): 742-749
- [6] Xu J, Kuang Q, Wang K, et al. Insights into molecular structure and digestion rate of oat starch [J]. Food Chemistry, 2017, 220: 25-30
- [7] Tan X, Li X, Chen L, et al. Effect of heat-moisture treatment on multi-scale structures and physicochemical properties of breadfruit starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 161: 286-294
- [8] Jiranuntakul W, Puttanlek C, Rungsardthong V, et al. Microstructural and physicochemical properties of heat-moisture treated waxy and normal starches [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(2): 246-258
- [9] Wang H, Zhang B, Chen L, et al. Understanding the structure and digestibility of heat-moisture treated starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 88: 1-8
- [10] Jane J, Xu A, Radosavljevi M, et al. Location of amylose in normal starch granules. I. Susceptibility of amylose and amylopectin to cross-linking reagents [J]. Cereal Chemistry, 1992, 69: 405-410
- [11] Kozlov S. S., Blennow A., Krivandin A. V., et al. Structural and thermodynamic properties of starches extracted from GBSS- and GWD suppressed potato lines [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2007, 40: 449-460
- [12] Liu X, Wu J H, Xu J H, et al. The impact of heat-moisture treatment on the molecular structure and physicochemical properties of Coix seed starches [J]. Starch-Stärke, 2016, 68(7-8): 662-674
- [13] Zeng F, Ma F, Kong F, et al. Physicochemical properties and digestibility of hydrothermally treated waxy rice starch [J]. Food chemistry, 2015, 172: 92-98
- [14] Wang H, Liu Y, Chen L, et al. Insights into the multi-scale structure and digestibility of heat-moisture treated rice starch

[J]. Food chemistry, 2018, 242: 323-329

[15] Wang S, L. Copel. Molecular disassembly of starch granules during gelatinization and its effect on starch digestibility: A review [J]. Food and Function, 2013, 4(11): 1564-1580

现代食品科技