

湿热处理对大米淀粉多层次结构及消化特性的影响

王宏伟¹, 李晓玺¹, 黄吉东², 陈玲¹

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 华南理工大学淀粉与植物蛋白深加工教育部工程研究中心, 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)(2. 广东中轻枫泰生化科技有限公司, 广东茂名 525427)

摘要: 为了明晰湿热处理前后大米淀粉多层次结构与消化性能之间的关系, 本研究采用体外模拟法测定湿热处理前后大米淀粉的消化性能, 并通过小角 X 射线散射 (SAXS)、X 射线衍射 (XRD) 和凝胶渗透色谱-多角度激光光散射 (GPC-MALS) 等现代分析技术考察湿热处理前后大米淀粉不同层次结构的变化。研究表明, 湿热处理可引起大米淀粉半结晶片层的有序化程度下降, 降低其结晶程度和分子量; 同时, 伴随着淀粉颗粒内部层状、结晶及分子链结构的破坏, 淀粉-脂质复合物的形成及 $M_w > 2 \times 10^7$ g/mol 的高分子量片段的降低和 $M_w < 5 \times 10^6$ g/mol 的低分子量片段比例的增加 (0% 增至 21.3%) 有利于大米淀粉慢消化和抗消化性能的提高, 而当 $M_w < 5 \times 10^6$ g/mol 比例增至 32.1% 时, 可能由于低分子量片段较多, 反而阻碍了慢消化和抗消化性能的提高。研究结果为湿热处理加工技术调控淀粉及淀粉质食品的消化性能提供了理论支撑和基础数据。

关键词: 大米淀粉; 湿热处理; 消化性能; 结构

文章篇号: 1673-9078(2017)6-184-188

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.6.027

Effect of Heat-moisture Treatment on the Digestibility and Multi-scale Structures of Rice Starch

WANG Hong-wei¹, LI Xiao-xi¹, HUANG Ji-dong², CHEN Ling¹

(1. College of Light Industry and Food Science, Ministry of Education Engineering Research Center of Starch & Protein Processing, Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China) (2. Guangdong Zhongqing Font Biochemical Science and Technology Co. Ltd., Maoming 525427, China)

Abstract: To understand the relationship between the multi-scale structures of rice starch and its digestibility before and after heat-moisture treatment (HMT), the digestibility levels of rice starch before and after HMT were determined by *in vitro* simulation. HMT-induced alterations in the multi-scale structures of rice starch were evaluated by small-angle X-ray scattering, X-ray diffraction, and gel permeation chromatography coupled with multi-angle light scattering. The study showed that the degree of the semi-crystalline lamellae order, relative crystallinity, and molecular weight of rice starch were reduced by HMT. Additionally, damage to the crystalline, lamellar, and chain structures inside the starch granules, formation of V amylose-lipid complex, decreased levels of high-molecular weight ($M_w > 2 \times 10^7$ g/mol) fragments, and an increased proportion (0% to 21.3%) of low-molecular weight ($M_w < 5 \times 10^6$ g/mol) fragments favored the formation of slowly digestible starch and resistant starch. However, when the proportion of the starch fragment with $M_w < 5 \times 10^6$ g/mol was increased to 32.1%, excess low-molecular weight fragments lead to the formation of rapidly digestible starch. The results provide a theoretical basis and basic data for the adjustment and control of the digestibility of novel functional starch and/or starchy products by using HMT.

Key words: rice starch; heat-moisture treatment; digestibility; structure

收稿日期: 2017-05-02

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFD04012021); 国家自然科学基金-广东省联合基金重点项目 (U1501214); 广东省“扬帆计划”引进创新创业团队专项资助 (2014YT02S029)

作者简介: 王宏伟 (1988-), 男, 博士研究生, 研究方向: 淀粉新型修饰技术及营养功能研究

通讯作者: 陈玲 (1961-), 女, 教授, 博导, 研究方向: 淀粉新型修饰技术及营养功能研究

作为人类饮食的主要食粮, 大米是人们摄取生存所必需的能量和多种营养素的重要来源, 但其存在易消化吸收、能量高和血糖波动大等不足, 产生较高的血糖指数, 与现代营养健康需求不相符合。淀粉作为大米中的主要成分 (78~89%), 是大米产生高血糖反应的关键。淀粉由直链淀粉和支链淀粉组成, 根据其排列方式的不同, 又可分为多种不同层次的结构 (颗粒结构、层状结构和结晶结构等), 而淀粉多尺度结构

的差异性则会影响淀粉的消化速率及程度^[1]。根据淀粉的消化速率和程度, 淀粉通常被分为快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗消化淀粉(RS)三部分^[2]。从营养学的角度看, RS的营养特性包含对结肠微生物的益生元作用, 改变脂质代谢、提高胆固醇代谢和降低结肠炎及结肠癌的风险等方面; 而SDS的功能主要体现在糖代谢, 维持血糖稳定、调控精神面貌及饱腹感等方面。因此, 提高淀粉及淀粉质食品中SDS和RS部分的含量逐渐受到关注^[1], 已成为降低大米或米制品血糖指数的一种行之有效的方法。

目前, 多种改性方法(化学改性、物理改性和生物改性等)被用于调节淀粉的结构, 从而获得人们需求的消化特性。其中物理改性具有节能环保、快速高效和安全性高等一系列优势, 因而人们更倾向于用物理方法改善原淀粉的功能特性。湿热处理(Heat-moisture treatment, HMT)作为一种新型的物理改性方法^[3], 指的是将淀粉颗粒在高于玻璃化转变温度低于糊化温度(90~130 °C)、水分含量为10~30%的环境中作用一定的时间, 处理过程中仅涉及到热和水的作用, 过程简单, 效果显著。前人研究表明, 湿热处理可以提高淀粉的糊化温度及热稳定性, 降低淀粉糊的黏度及颗粒膨胀度^[4,5]。尽管已有从湿热处理影响淀粉颗粒结构和结晶结构来探讨与淀粉消化性能改变的关系, 但其对淀粉消化性能的影响却取决于淀粉的来源及湿热处理条件, 还未能从湿热处理过程中淀粉多层次结构的转变阐明影响淀粉与酶作用, 从而达到调控淀粉消化性能的目的^[6,7]。

因此, 本研究以大米淀粉为研究对象, 采用现代分析方法研究湿热处理条件对大米淀粉消化性能及多层次结构的影响, 阐明不同湿热处理条件对其消化性能的影响规律, 并分析湿热处理对淀粉多层次结构变化与其消化性能之间的内在联系, 为湿热处理加工手段调控大米淀粉的消化性能提供理论支撑和基础数据。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

大米淀粉, 实验室自制, 直链含量13.5%, 游离脂和结合脂含量分别为0.2%和0.18%, 方法参考GB/T 5009.6-2003; 胰 α -淀粉酶(P-7545)、淀粉葡萄糖苷酶(A3306), Sigma公司; 葡萄糖氧化试剂盒(GOPOD), 爱尔兰Megazyme公司; 其他试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

高压反应釜(PE 978), 深圳信宜特公司; 打浆机(HR 1727 PHILIPS), 珠海飞利浦家用电器公司; 恒温水浴锅(HH-4), 江苏省金坛市宏华仪器厂; 恒温干燥箱(DHG-9123A), 上海一恒科学仪器公司; 722型可见分光光度计, 上海第三分析仪器厂; 凝胶渗透色谱(1515), 美国Waters公司; 十八角度激光光散射仪(DAWN HELEOS), 美国Wyatt公司; X射线衍射仪(XPERT PRO), 荷兰Panalytical公司; 差示扫描量热仪(DSC 8000), 美国PE公司; 小角X射线散射仪(AS Synchrotron), 澳大利亚同步辐射中心。

1.3 湿热淀粉样品制备

称取100 g大米淀粉, 调至20%水分含量, 而后转移到湿热处理系统的反应器中, 分别在100 °C、110 °C和120 °C条件下处理2 h。随后将样品从容器中取出, 40 °C干燥24 h。将干燥后的样品研磨, 过200目筛获得湿热处理的大米淀粉样品。根据湿热处理温度的不同, 湿热处理后的大米淀粉样品分别命名为HMT-温度, 其中HMT代表湿热处理, 100代表处理温度。

1.4 湿热处理样品消化性能及结构的测定

1.4.1 消化性能分析

对于原淀粉和改性淀粉, 淀粉消化性依据Englyst^[2]方法, 稍加改动。12 g猪胰 α -淀粉酶溶于80 mL水中, 搅拌10 min, 4000 r/min离心20 min。约54 mL上清液转移至烧杯中; 3.15 mL的淀粉葡萄糖苷酶和3 mL的水配置淀粉葡萄糖苷酶的混合液; 吸取6 mL加入到 α -淀粉酶溶液中, 并加入4 mL水, 混合酶液现配现用。1 g淀粉溶解于20 mL pH值为5.2的0.1 mol/L的醋酸钠缓冲液中, 沸水中煮沸30 min。淀粉溶液冷却至37 °C, 加入5 mL胰 α -淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶的混合液, 在37 °C水浴锅中以190 r/min进行水解。在不同的时间取0.5 mL混合液, 加20 mL 70%乙醇灭酶。混合液在4000 r/min离心10 min, 水解的葡萄糖含量用葡萄糖氧化酶-过氧化酶试剂盒(GOPOD)测定。根据水解速率的不同, 淀粉被定义为快消化淀粉(20 min内消化的淀粉)、慢消化淀粉(20 min~120 min内消化的淀粉)和抗消化淀粉(2 h内不消化的淀粉)。

1.4.2 层状结构分析

将含水量为60%的淀粉样品置于样品台上, 通过

Pilatus 1M 探测器 (面积为 169×172 mm, 像素尺寸为 172×172 μm) 收集样品的散射花样, 采用 ScatterBrain 软件获得 $0.015 < q < 0.20 \text{ \AA}^{-1}$ (q 为散射矢量) 范围内小角 X 射线散射曲线, 通过 Bragg 公式对散射量与散射角度之间进行转化, 经扣除背景、归一化处理后进行分析计算。

1.4.3 结晶结构分析

将预先平衡水分的待测淀粉粉末样品平铺于样品池中制好样, 放入 X 射线衍射仪样品台中进行测试, 采用波长为 0.1542 nm 的单色 Cu-K α 射线。测试管压 40 kV、管流 40 mA, 扫描区域 $2\theta=4^\circ\sim 40^\circ$, 步长 0.033°, 连续扫描, 扫描时间为 15 s。相对结晶度依据 Vermeylen 等^[8]方法计算。

1.4.4 分子量大小及其分布分析

精确称取 5 mg 的淀粉样品于具塞试管中, 加入 5 mL 溶有 50 mmol/L 溴化锂的二甲基亚砜溶液, 沸水浴煮沸 1 h, 在 60 °C 水浴振荡 12 h。测定前, 样品溶液经过 5.0 μm 滤膜。测试条件: 流动相为含有 50 mM 溴化锂的二甲基亚砜 (超声脱气, 并经 0.2 μm 有机相过滤膜过滤); 色谱柱: 凝胶色谱柱 (Styragel, HMW

6E, WAT 044205, 美国 waters 公司, 7.8×300 mm, 分离范围 $5\times 10^3\sim 1\times 10^7 \text{ g/mol}$); 进样体积 100 μL, 流速 0.7 mL/min, 柱压 424 psi, 测试温度 40 °C, 测试波长 632.8 nm, 流动相的折光指数为 1.4785, 淀粉溶液的 dn/dc 值为 0.074 g/mL, 采用 Astra 软件处理数据^[9]。

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 $p=0.05$, 所有数据均以平均值±SD 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 湿热处理温度对大米淀粉消化性能的影响

表 1 湿热处理温度对大米淀粉消化性能及相对结晶度的影响

Table 1 Effect of temperature in HMT on digestibility and relative crystallinity (RC) of rice starch^A

样品	RDS/%	SDS/%	RS/%	RC/%
大米淀粉	93.9±1.5 ^a	3.5±0.8 ^d	2.6±0.5 ^d	31.9±2.8 ^a
HMT-100	83.1±1.8 ^c	9.2±0.9 ^b	7.7±0.8 ^b	30.9±1.3 ^b
HMT-110	78.0±2.6 ^d	12.0±1.1 ^a	10.0±1.2 ^a	29.7±2.1 ^c
HMT-120	84.0±1.4 ^c	10.1±1.0 ^b	5.9±0.2 ^c	28.6±1.5 ^d

注: 数据表示为平均值±标准偏差, 同一列中不同的字母表示有显著性差异 ($p<0.05$)。

湿热处理前后大米淀粉的 RDS、SDS 和 RS 含量见表 1。由表 1 可知, 大米淀粉经湿热处理后, 大米淀粉的 RDS 含量下降, SDS 和 RS 含量升高, 表明湿热处理能显著降低大米淀粉的消化性能, 并诱导 RDS 转化为 SDS 和 RS, 提高其慢消化和抗消化性能。此外, 随着湿热处理温度的升高, SDS 和 RS 含量逐渐上升, 大米淀粉的慢消化和抗消化性能提高。但当湿热处理温度为 120 °C 时, 湿热处理后大米淀粉的慢消化和抗消化性能却有所下降。为了探明湿热处理过程中温度对大米淀粉消化性能的影响机制, 本研究采用现代分析技术对大米淀粉的聚集态结构和链结构变化进行了系统分析。

2.2 湿热处理对大米淀粉层状结构的影响

利用小角 X 射线散射技术考察了湿热处理对大米淀粉颗粒半结晶层状结构的影响情况, 图 1a 和表 2 分别为在不同温度条件下湿热处理前后大米淀粉的小

角 X 射线散射曲线和特征参数。图中 0.06 \AA^{-1} 左右的小角 X 射线散射峰源自于淀粉的半结晶片层结构, 可用于考察淀粉半结晶层状结构的变化。由图 1a 可见, 大米淀粉经不同温度的湿热处理后, 大米淀粉的半结晶层状厚度 (d)、无定形层状厚度 (d_a) 及结晶层状厚度 (d_c) 未发生明显的变化。但峰面积有一定程度地降低, 特别是当处理温度大于 110 °C 时, 峰面积显著降低。由于半结晶层状结构排列的有序化程度越高, 峰面积越大^[10], 表明湿热处理过程中随着温度的提高, 大米淀粉层状结构排列的有序化程度降低。

根据 Donald^[11]提出的淀粉层状结构的次晶模型, 片层堆叠为有限的半结晶区域镶嵌在无限的背景区域中, $\Delta\rho_u=(\rho_u-\rho_a)$ 增大可增强小角度区域散射强度和在不改变峰位置的情况下降低峰的分辨率; $\Delta\rho=(\rho_c-\rho_a)$ 增大则会引起包括小角 X 射线散射峰强度在内的散射曲线整体强度的上升。其中, ρ_a 、 ρ_u 和 ρ_c 分别代表支链淀粉无定形区的电子云密度、直链淀粉背景区域的

电子云密度和支链淀粉结晶区的电子云密度。从图 1a 可以看出,随着处理温度的提高,低 q 区域的电子云密度和峰位置 q 区域的电子云密度呈现增加趋势,结果导致 $\Delta\rho$ 和 $\Delta\rho_0$ 值的升高,说明高温条件下湿热处理

可更加明显的破坏大米淀粉的无定形区,并且这种破坏相较支链淀粉的结晶区和直链淀粉的无定形背景区更大。

表 2 湿热处理前后大米淀粉的层状结构参数

Table 2 Lamellar structural parameters of native and HMT-treated rice starches

样品	半结晶层状厚度/nm	无定形层状厚度/nm	结晶层状厚度/nm	峰面积	峰强度/a.u.
大米淀粉	8.98±0.02 ^a	2.82±0.01 ^a	6.16±0.03 ^a	10.30±0.01 ^a	1.57±0.21 ^b
HMT-100	8.99±0.03 ^a	2.82±0.03 ^a	6.17±0.02 ^a	10.23±0.01 ^a	1.55±0.13 ^b
HMT-110	8.99±0.02 ^a	2.83±0.02 ^a	6.16±0.01 ^a	9.92±0.02 ^b	1.58±0.22 ^b
HMT-120	9.01±0.01 ^a	2.82±0.01 ^a	6.19±0.05 ^a	9.76±0.06 ^c	1.65±0.16 ^a

注:数据表示为平均值±标准偏差,同一列中不同的字母表示有显著性差异($p < 0.05$)。

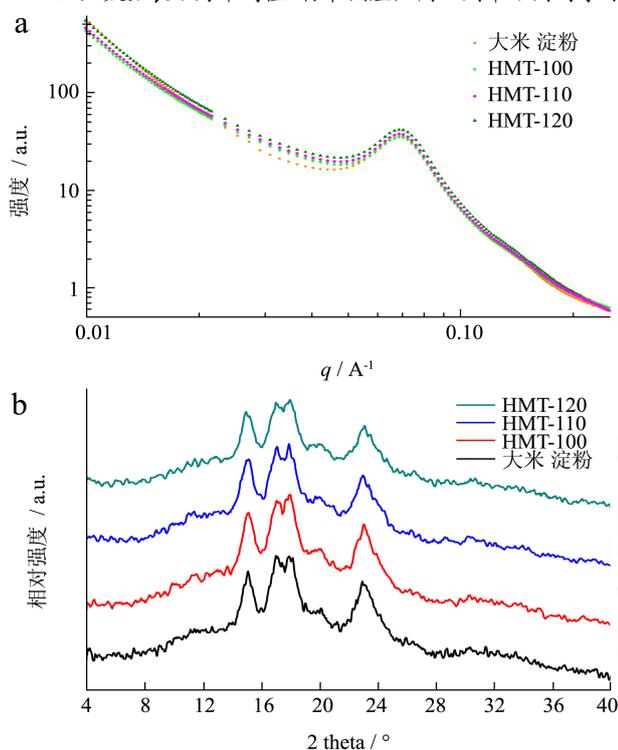


图 1 湿热处理前后大米淀粉的 SAXS 和 XRD 曲线

Fig.1 SAXS and XRD patterns of native and HMT-treated rice starches

2.3 湿热处理对大米淀粉结晶结构的影响

图 1b 为湿热处理前后大米淀粉的 X 射线衍射曲线。由图可见,大米原淀粉的结晶形态为 A 型,即在衍射角 2θ 约为 15° 、 17° 、 18.1° 和 23.3° 处呈现比较强的衍射特征峰。经湿热处理后,大米淀粉仍保持结晶结构,晶型并没有发生改变。其中, 19.8° 处的衍射峰代表直链-脂质复合物的形成,且随着湿热处理温度的提高,淀粉分子链和脂质之间能够形成 V-型淀粉-脂质复合物,有利于提高淀粉中的 RS 含量。利用 X 射线衍射曲线进一步分析了湿热处理温度对大米淀粉相对结晶度的影响情况,结果见表 1。由表可知,随

着湿热处理温度的增加,大米淀粉的相对结晶度逐渐降低。这可能是由于湿热处理过程中,热能促进了淀粉分子链的运动及水分子在淀粉颗粒内部的迁移,从而导致淀粉颗粒内部氢键的断裂,破坏了晶格的有序化排列,降低了大米淀粉的相对结晶度^[12,13]。

2.4 湿热处理对大米淀粉分子量大小及其分布的影响

湿热处理前后大米淀粉的分子量 M_w 、均方根旋转半径 R_g 及分子量分布见表 3。由表可知,大米淀粉经湿热处理后,其 M_w 值降低,这是由于湿热处理导致淀粉链的破坏或断裂,进而引起大米淀粉分子量的下降。对比大米淀粉分子量随湿热处理过程中温度的变化可知,随着湿热处理温度的提高,其 M_w 值呈不断下降趋势。 R_g 值表明湿热处理后淀粉颗粒尺寸变小,与 M_w 值相一致。湿热处理后,大米淀粉中 $M_w > 4 \times 10^7$ g/mol 的比例随着湿热处理温度的升高而不断下降,低分子量部分 ($< 1 \times 10^7$ g/mol) 增至 48.5%,其中, $M_w < 5 \times 10^6$ g/mol 的部分增加到 32.1%,而分子量在 $5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$ g/mol 的淀粉分子增至 16.4%,由上述结果可知湿热处理对大米淀粉分子量大小及分布的变化有很大的影响,显著的降低了淀粉的分子量。而淀粉分子链的降解和短链片段的增加,有可能促进湿热处理过程中链的可移动性及链-链之间的相互作用。我们前期对不同直链淀粉含量的玉米淀粉进行湿热处理,发现湿热处理会降低玉米淀粉的分子量,低分子量片段比例的增加能够促进淀粉链之间的相互作用,形成致密的有序化结构,从而提高淀粉的抗消化性能^[14]。此外,祖岩岩^[15]研究了不同生长期木薯淀粉分子量大小及其分布对淀粉消化性能的影响,结果发现当木薯淀粉分子量分布集中在 $1 \times 10^7 \sim 2 \times 10^7$ g/mol 时,淀粉分子容易形成抗消化淀粉,但淀粉分子中较多的低

分子量片段却会促进其消化。本研究中,当大米淀粉在小于 110 °C 的温度条件下进行湿热处理时,其慢消化和抗消化性能均提高,说明 $M_w > 2 \times 10^7$ g/mol 的高分子量组分的降低和 $M_w < 5 \times 10^6$ g/mol 的低分子量组分的增多有利于大米淀粉慢消化和抗消化淀粉的形

成。但当处理温度为 120 °C 时, $M_w < 5 \times 10^6$ g/mol 的低分子量组分进一步提高,其慢消化和抗消化性能均降低,说明低分子量部分过度增多,反而不利于大米淀粉慢消化和抗消化性能的提升。

表 3 湿热处理前后大米淀粉的重均分子量 (M_w) 及其分布Table 3 Weight average molar mass (M_w) and its distribution of native and HMT-treated rice starches

样品	分子量/(g/mol)	均方根旋转半径/nm	分子量分布/%				
			<5×10 ⁶ g/mol	5×10 ⁶ ~1.0×10 ⁷ g/mol	1×10 ⁷ ~2×10 ⁷ g/mol	2×10 ⁷ ~4×10 ⁷ g/mol	>4×10 ⁷ g/mol
大米淀粉	4.13×10 ⁷ (2%)	127.0(2.0%)	0	0	29.7	48.5	21.8
HMT-100	2.66×10 ⁷ (1%)	123.5(0.7%)	10.2	18.0	15.5	40.3	16.0
HMT-110	2.31×10 ⁷ (1%)	120.6(0.5%)	21.3	13.9	18.6	28.7	17.5
HMT-120	2.25×10 ⁷ (1%)	118.4(0.7%)	32.1	16.4	17.2	21.4	12.9

3 结论

本研究探讨了不同温度条件下湿热处理对大米淀粉消化性能及层状结构、结晶结构和链结构等多层次结构变化的影响规律。大米淀粉经湿热处理后,将引起大米淀粉的半结晶片层的有序化程度下降、降低其结晶程度和分子量;同时,伴随着淀粉颗粒内部多层次结构的破坏,淀粉-脂质复合物的形成及 $M_w > 2 \times 10^7$ g/mol 的高分子量组分的降低和 $M_w < 5 \times 10^6$ g/mol 的低分子量组分的增多则有利于淀粉分子聚集形成致密的有序化结构,从而增强大米淀粉的慢消化和抗消化性能。本研究的结果不仅有助于分析淀粉结构对其消化性能的影响机制,还可通过调控湿热处理的条件获得具有不同消化行为的新型淀粉质食品。

参考文献

- [1] Fuentes-Zaragoza E, Riquelme-Navarrete M, Sánchez-Zapata E, et al. Resistant starch as functional ingredient: a review [J]. Food Research International, 2010, 43(4): 931-942
- [2] Englyst H N, Kingman S M, Cummings J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(2): 33-50
- [3] Hoover R. The impact of heat-moisture treatment on molecular structures and properties of starches isolated from different botanical sources [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2010, 50(9): 835-847
- [4] Elessandra Da Rosa Zavareze E, Dias A R G. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: a review [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 317-328
- [5] Jacobs H, Delcour J A. Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular structure: a review [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(8): 2895-2905
- [6] Ji Hong Ahn, Baek H, Kim K, et al. Slowly digestible sweetpotato flour: Preparation by heat-moisture treatment and characterization of physicochemical properties [J]. Food Science Biotechnology, 2013, 22(2): 383-391
- [7] Hyun-Jung Chung, Liu Qiang, Hoover R. Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(3): 436-447
- [8] Vermeulen R, Goderis B, Delcour J A. An X-ray study of hydrothermally treated potato starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64(2): 364-375
- [9] Zhang Bin-jia, Chen Ling, Li Xiao-xi, et al. Understanding the multi-scale structure and functional properties of starch modulated by glow-plasma: A structure-functionality relationship [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 50: 228-236
- [10] Witt T, Douch J, Gilbert E P, et al. Relations between molecular, crystalline, and lamellar structures of amylopectin [J]. Biomacromolecules, 2012, 13(12): 4273-4282
- [11] R Cameron, Donald A. Small-angle X-ray scattering study of the annealing and gelatinization of starch [J]. Polymer, 1992, 33(12): 2628-2635
- [12] Tester R F, Morrison W R. Swelling and gelatinization of cereal starches: effects of amylopectin, amylose, and lipids [J]. Cereal Chemistry, 1990, 67(6): 551-557
- [13] Lan H, Hoover R, Jayakody L, et al. Impact of annealing on the molecular structure and physicochemical properties of normal, waxy and high amylose bread wheat starches [J].

- Food Chemistry, 2008, 111(3): 663-675
- [14] Wang Hong-wei, Zhang Bin-jia, Chen Ling, et al. Understanding the structure and digestibility of heat-moisture treated starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 88: 1-8
- [15] 祖岩岩.不同消化性能木薯淀粉在不同生长期结构与性质的研究[D].广州:华南理工大学,2016
- ZU Yan-yan. Study on structure and properties of cassava starch with different digestibility during different growth time [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016

现代食品科技