

湿热及酶解处理对糯米粉体外消化特性和 血糖生成指数的影响

王东旭, 郭美玲, 李占明, 叶 华, 郭元新*

(江苏科技大学粮食学院, 镇江 212100)

摘 要: **目的** 研究酶解处理、湿热处理和湿热复合酶解处理对糯米粉体外消化特性和血糖生成指数(glycemic index, GI)的影响。**方法** 采用体外消化法测定了不同处理糯米粉的水解度和血糖生成指数值, 并通过 X-射线衍射和激光共焦拉曼光谱实验测定了不同处理糯米的淀粉晶体结构。**结果** 3 种处理的水解度和抗性淀粉(resistant starch, RS)相对含量增加, 慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)相对含量降低; 其中湿热复合酶解处理条件下, RS 相对含量最高, 为 71.31%; 酶解处理条件下, RS 相对含量最低, 为 67.66%。酶解处理、湿热处理和湿热复合酶解处理的 GI 值分别为 79.1、76.0 和 70.6。3 种处理后糯米淀粉的晶体结构发生改变, 3 种处理均使分子短程有序度与结晶度增加, 其中湿热复合酶解处理条件下, 结晶度最高, 为 34.41%。**结论** 湿热复合酶解处理后的糯米粉抗消化特性增强且 GI 值降低, 湿热复合酶解工艺可能通过影响糯米粉的体外消化率来降低 GI 值。

关键词: 糯米粉; 体外消化特性; 血糖生成指数; 湿热处理; 酶解处理

Effects of moisture heat with enzymatic hydrolysis treatment on digestion characteristics *in vitro* and glycemic index of glutinous rice flour

WANG Dong-Xu, GUO Mei-Ling, LI Zhan-Ming, YE Hua, GUO Yuan-Xin*

(School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of enzymatic hydrolysis treatment, moisture heat treatment and moisture heat with enzymatic hydrolysis treatment on the digestion characteristics *in vitro* and glycemic index (GI) of glutinous rice powder. **Methods** The degree of hydrolysis and GI of different treated glutinous rice were measured by digestion *in vitro*, and the starch crystal structure of different treated glutinous rice flour was determined by X-ray diffraction and laser confocal Raman spectroscopy. **Results** The degree of hydrolysis and the relative content of resistant starch (RS) were increased, while the relative content of slowly digestible starch (SDS) decreased in 3 treated group. Under the condition of moisture heat with enzymatic hydrolysis treatment, the relative content of RS was the highest (71.31%), while under the condition of enzymatic hydrolysis treatment, the relative content of RS was the lowest (67.66%). The GI values of enzymatic hydrolysis treatment, moisture heat treatment and moisture heat with enzymatic hydrolysis treatment were 79.1, 76.0 and 70.6, respectively. The crystal structure of glutinous rice

基金项目: 常州市农业科技支撑项目(CE20202008)

Fund: Supported by the Changzhou Agricultural Science and Technology Support Project (CE20202008)

*通信作者: 郭元新, 博士, 教授, 主要研究方向为粮油食品安全与营养健康。E-mail: guoyuanxin@just.edu.cn

*Corresponding author: GUO Yuan-Xin, Ph.D, Professor, School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, No.666, Changhui Road, Dantu District, Zhenjiang 212100, China. E-mail: guoyuanxin@just.edu.cn

starch was changed after 3 kinds of treatments. The molecular short-range order and crystallinity of glutinous rice starch were increased by the 3 kinds of treatments, in which the crystallinity of glutinous rice starch was the highest (34.41%) under the condition of moisture heat with enzymatic hydrolysis treatment. **Conclusion** The anti-digestion characteristics of glutinous rice flour treated by moisture heat with enzymatic hydrolysis are enhanced and the GI value is reduced, the moisture heat with enzymatic hydrolysis process may reduce the GI value by affecting the *in vitro* digestibility of glutinous rice flour.

KEY WORDS: glutinous rice flour; digestion characteristics *in vitro*; glycemic index; moisture heat treatment; enzymatic hydrolysis treatment

0 引言

糯米及由糯米制作的食品因其独特的味道、质地和营养价值深受我国居民所喜爱,除了直接食用外,糯米通常被加工成糯米粉,然后用于制作汤圆、年糕和青团等颇具中国特色的传统食品^[1]。近年来,随着人们生活节奏的加快,生活习惯和饮食结构等发生了一定的变化,使我国糖尿病患者人数激增^[2-4]。食物的血糖生成指数(glycemic index, GI)值是指碳水化合物在进食后被人体消化与吸收的速度,可作为影响碳水化合物对血糖反应的有效评估标准^[5-7]。GI值较低的食物,吸收速度缓慢不容易增加糖分,血糖的缓慢变化有利于控制血糖,维持血糖平衡^[8-10]。糯米和普通稻米一样,淀粉和蛋白质是其主要组成成分。经食用后,糯米中的淀粉被消化成葡萄糖,吸收入血液,循环到身体各部位细胞,代谢、分解、放出热量,为人体提供能量^[11-14]。糯米中的淀粉98%由支链淀粉组成,具有粘度大、糊化速度快、难回生、吸水程度大等特点^[15-18]。糯米粉是公认的高GI食品,因此如何降低糯米粉的GI值,对促进肠道蠕动、减缓消化效率、维持血糖稳定等均具有积极意义。熊金娟等^[19]研究发现,臭氧处理能降低糯米淀粉的消化率,同时慢消化淀粉和抗性淀粉的含量显著增加,并且快消化淀粉的含量显著降低。王璐等^[20]研究表明,无论新鲜烹调或冷藏,糯性淀粉食物消化速度均较快,需要控制血糖者和控制体质量者应谨慎食用。此外,低GI糯米粉的开发也满足人们对健康饮食的追求,市场潜力大^[21]。高支链淀粉食品在进行低GI开发时,最常用的方法为淀粉改性法,其中主要包括物理方法改性、化学方法改性和酶法改性^[22-26]。GURAYA等^[27]与HAMAKER等^[28]分别使用普鲁兰酶或者 α -淀粉酶水解淀粉,利用水解产物重结晶制备慢消化淀粉含量较高的淀粉产品。TAN等^[29]对面包果淀粉进行湿热处理,湿热处理使缓慢消化淀粉和抗性淀粉含量增加。SILVA等^[30]对稻米淀粉湿热处理的研究表明,湿热处理促进了抗性淀粉含量的增加,同时使米粉中缓慢消化淀粉增加。为了获得较优的处理条件,本研究通过控制酶解处理、湿热处理和湿热复合酶解处理的方式,对糯米体外消化特性和淀粉晶体结构进行研究分析,以期对低GI糯米粉的开发应用及推广提供理论和实践参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

供试粳糯米来自于常州金坛江南制粉有限公司。

淀粉葡萄糖苷酶(70 U/mg)、中性蛋白酶(50 U/mg)、3,5-二硝基水杨酸(美国 Sigma 公司);耐高温 α -淀粉酶(上海阿拉丁生化科技股份有限公司);无水亚硫酸钠、无水葡萄糖、苯酚、酒石酸钾钠、氢氧化钠、无水乙酸钠、乙酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

TU-1810 紫外可见分光光度计[屹谱仪器制造(上海)有限公司]; D8 advance X 射线衍射仪(德国 Bruker 公司); inVia 拉曼光谱仪(英国 Renishaw 公司); DF-101 T 集热式磁力搅拌器(上海力辰邦西仪器科技有限公司); DHG-9240 A 电热鼓风干燥箱、HWS-26 电热恒温水浴锅(上海一恒科学仪器有限公司); 5810 R 高速冷冻离心机(德国 Eppendorf 公司); PHSJ-4 F pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司); MB 25 谷物水分测定仪(宁波奥克斯集团有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 处理分组

实验共设4个处理,处理条件分别是:(1)对照组(CK):按照传统水磨糯米粉加工工艺流程制备糯米粉:取10 g糯米和水以1:3 (m:l)浸泡30 min后将糯米磨碎为米浆,过筛后以4000 r/min离心10 min,离心后的沉淀物用去离子水洗复溶,反复3次,最后取出糯米沉淀物,在55℃的电热鼓风干燥箱中烘干至样品水分含量为14%±0.2%,粉碎后密封保存备用。(2)酶解处理组(E):取10 g糯米和水以1:3 (m:l)浸泡30 min后将糯米磨碎为米浆,而后加入0.8 g中性蛋白酶在50℃水浴和160 r/min的搅拌条件下反应3 h,其他条件同对照组;(3)湿热处理(WH):称取10 g按对照组条件制备的糯米粉,均匀平铺在培养皿内,用微型喷雾装置将蒸馏水喷塞在糯米粉表面,边喷洒边振荡,直至糯米粉水分20%,将糯米粉放入110℃烘箱中处理2 h,处理后密封保存。(4)湿热复合酶解处理(EWH):按酶解处理组条件制备的糯米粉再经过湿热处理组条件制备而得。

1.3.2 指标测定

(1)糯米粉消化性能的测定

糯米粉消化性能的测定采用 Englyst 体外模拟消化法^[31]测定样品中快消化淀粉(rapidly digestible starch, RDS)、慢消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)、抗消化淀粉(resistant starch, RS)、水解指数(hydrolysis index, HI)和 GI, HI 和 GI 值的计算分别见公式(1)和(2)。

$$HI/\% = \frac{\text{样品水解曲线下面积}}{\text{参比标准样品水解曲线下面积}} \times 100\% \quad (1)$$

式中, 参比标准样品为白面包。

$$GI = 39.71 + 0.549 \times HI \quad (2)$$

(2)X-射线衍射分析

X-射线发射器的电压等级为 40 kV, 电流等级一般为 40 mA, 扫描范围 4~35°, 采样步长 0.02°, 扫描移动速度 2°/min, 扫描模式设置为连续, 重复次数设置为 1 次。所有粉末的 X-射线衍射实验在室温下完成。所得图谱通过 TOPAS (Version5.0, Bruker AXS, Germany)进行数据处理, 其相对结晶度计算见公式(3)。

$$\text{相对结晶度}/\% = \frac{\text{晶体衍射峰的面积}}{\text{总面积}} \times 100\% \quad (3)$$

(3)激光共聚焦显微拉曼光谱分析

扫描仪器的激光参数设定: 激光波长大小 785 nm, 功率设定 3000 mW, 分辨率设定 7 cm⁻¹, 扫描区域的范围设定 3200~100 cm⁻¹, 每个样品至少需要选取 5 个不同的激光测量点对其进行一次扫描。利用该检测仪器自带的分析软件 wire 2.0 对检测得到的光谱信号进行分析, 得到在光谱波数为 480 cm⁻¹处的半峰宽, 其对糊化或再生过程中淀粉的短程分子顺序的变化较为敏感。半峰宽越高, 则淀粉的短程分子有序度越低。

1.4 数据处理

数据采用 GraphPad Prism 5 软件处理, 所有指标重复 4 次, 取平均值, 数据表示为平均值±标准偏差。

2 结果与分析

2.1 不同处理方法对糯米淀粉消化率的影响

淀粉消化率是影响 GI 值的重要指标之一。不同处理方式对糯米粉中淀粉体外消化速率的影响如图 1 所示, 从图 1 可以看出, 在 40 min 内淀粉消化较快, 40 min 后消化趋于平缓。在相同的消化时间内, 3 种处理均使淀粉消化产物的量减少, 消化率减小, 3 种处理的淀粉消化率均小于对照组。4 种糯米粉经过 3 h 的淀粉酶消化后的消化率分别为 CK 53.9%、E 45.1%、WH 42.8%、EWH 38.1%。

2.2 不同处理方法对糯米粉消化组分、水解率和 GI 值的影响

不同处理方式对糯米粉中消化组分、水解率和 GI 值

的影响见表 1, CK 组糯米淀粉 3 种消化组分含量分别为 18.57%、23.37%和 58.06%。经过 3 种处理后, 糯米粉样品的 RDS 含量显著降低($P<0.05$), E 组糯米粉样品降低至 9.28%、WH 组糯米粉样品降低至 8.35%、EWH 组糯米粉样品降低至 5.57%。与 CK 组相比, RDS 含量分别降低了 50.03%、55.04%、70.00%。同时与 CK 组相比, 3 种处理后 RS 含量均显著上升($P<0.05$), E 组糯米粉样品提高至 67.66%、WH 组糯米粉样品提高至 68.97%、EWH 组糯米粉样品提高至 71.31%。与 CK 组相比, RDS 含量分别提高了 16.53%、18.97%、22.82%, 这可能是因为处理后的淀粉, 结晶度有所增加, 淀粉酶不易与结晶态反应^[29], 因此 RS 含量增加。经计算可得, CK 组糯米淀粉的 HI 为 112.8, GI 为 101.6, 属于高血糖食物。3 种处理后, 糯米淀粉的 HI 和 GI 均显著降低, 这可能是因为晶体的结构与分子有序程度破坏程度较小, 不易水解释放葡萄糖所致^[30]。

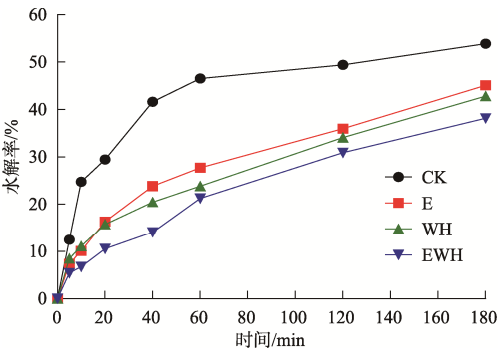


图 1 不同处理方式对糯米粉中淀粉体外消化速率的影响($n=4$)
Fig.1 Effects of different treatments on starch digestion rates of glutinous rice flour ($n=4$)

表 1 不同处理方式对糯米粉中消化组分、水解率和 GI 值的影响(%)

Table 1 Effects of different treatments on nutritional starch fractions, hydrolysis rates and GI values of glutinous rice flour (%)

组别	CK	E	WH	EWH
RDS	18.57±1.04	9.28±0.62*	8.35±0.58*	5.57±0.54*#
SDS	23.37±0.78	23.06±0.67	22.68±0.70	23.12±0.63
RS	58.06±1.25	67.66±1.17*	68.97±1.06*	71.31±1.11*
HI	112.8±2.77	71.7.8±2.06*	66.1±1.84*	56.3±1.35*#
GI	101.6±2.40	79.1±1.82*	76.0±1.55*	70.6±1.52*

注: *表示 CK 组与 E 组或 WH 组比较具有统计差异($P<0.05$), #表示 E 组与 EWH 组比较具有统计差异($P<0.05$)。

2.3 不同处理方法糯米粉淀粉晶体结构分析

采用拉曼光谱和 X-射线衍射对糯米淀粉晶体结构进行分析, 不同处理方法糯米粉的拉曼光谱图和 X 射线衍射

图分别如图 2、3 所示, 通过对 1047 和 1022 cm^{-1} 吸收峰和 A-型衍射峰的分析发现, 经过 3 种处理后糯米淀粉的晶体结构发生改变, 3 种处理均使分子短程有序度与结晶度增加, 分别为 CK 31.2%、E 32.7%、WH 33.7%、EWH 34.41%, 其中湿热联合复合酶解处理条件下, 结晶度最高, 为 34.41%。

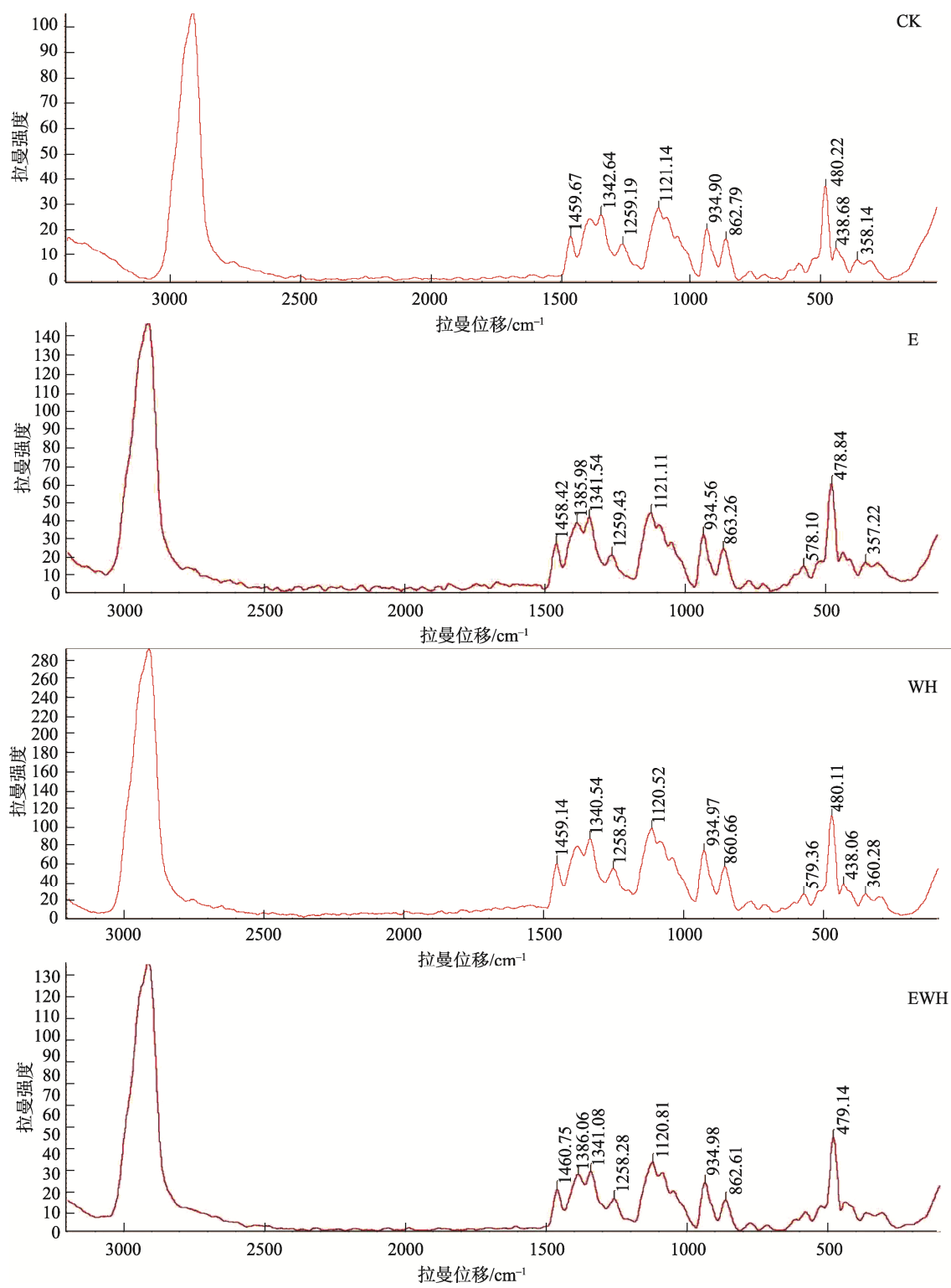


图 2 不同处理方法糯米粉的拉曼光谱图

Fig.2 Raman spectrograms of glutinous rice flour with different treatments

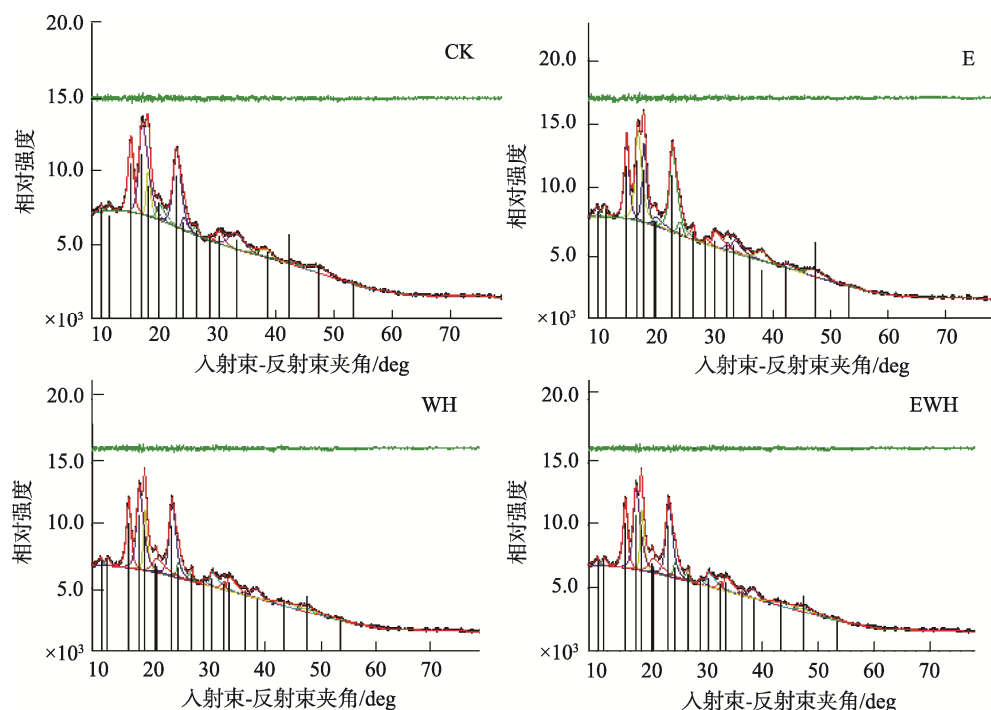


图 3 不同处理方法糯米粉的 X 射线衍射图

Fig.3 XRD patterns of glutinous rice flour with different treatments

3 结论与讨论

本研究发现, 酶解处理、湿热处理和湿热复合酶解处理均可改变糯米粉的体外消化特性和淀粉晶体结构, 其中湿热复合酶解处理的体外消化率最低, RS 含量最高, HI 和 GI 值最低。

3 种处理的水解度和抗性淀粉相对含量增加, 慢消化淀粉相对含量降低; 其中湿热复合酶解处理条件下 RS 相对含量最高; 酶解处理条件下, RS 相对含量最低。酶解处理、湿热处理和湿热复合酶解处理的 GI 值分别为 79.1、76.0 和 70.6。3 种处理后糯米淀粉的晶体结构发生改变, 3 种处理均使分子短程有序度与结晶度增加, 其中湿热复合酶解处理条件下, 结晶度最高为 34.41%。湿热复合酶解工艺可能通过影响糯米粉的体外消化率来降低 GI 值, 本研究为低 GI 值糯米粉及加工产品的开发提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] QIN Y, LIU C, JIANG S, *et al.* Functional properties of glutinous rice flour by dry-heat treatment [J]. *PLoS One*, 2016, 11(8): e0160371.
- [2] MA R. Epidemiology of diabetes and diabetic complications in China [J]. *Diabetologia*, 2018, 61(6): 1249–1260.
- [3] JUAN J, YANG H. Prevalence, prevention, and lifestyle intervention of gestational diabetes mellitus in China [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(24): 9517.
- [4] HU C, JIA W. Diabetes in China: Epidemiology and genetic risk factors and their clinical utility in personalized medication [J]. *Diabetes*, 2018, 67(1): 3–11.
- [5] LENNERZ B, LENNERZ JK. Food addiction, high-glycemic-index carbohydrates, and obesity [J]. *Clin Chem*, 2018, 64(1): 64–71.
- [6] VEGA-LÓPEZ S, VENN BJ, SLAVIN JL. Relevance of the glycemic index and glycemic load for body weight, diabetes, and cardiovascular disease [J]. *Nutrients*, 2018, 10(10): 1361.
- [7] KAUR B, RANAWANA V, HENRY J. The glycemic index of rice and rice products: A review, and table of GI values [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2016, 56(2): 215–236.
- [8] SCHLESINGER S, CHAN DSM, VINGELIENE S, *et al.* Carbohydrates, glycemic index, glycemic load, and breast cancer risk: A systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies [J]. *Nutr Rev*, 2017, 75(6): 420–441.
- [9] VLACHOS D, MALISOVA S, LINDBERG FA, *et al.* Glycemic index (GI) or glycemic load (GL) and dietary interventions for optimizing postprandial hyperglycemia in patients with T2 diabetes: A review [J]. *Nutrients*, 2020, 12(6): 1561.
- [10] VENN BJ, GREEN TJ. Glycemic index and glycemic load: Measurement issues and their effect on diet-disease relationships [J]. *Eur J Clin Nutr*, 2007, 61: 122–131.
- [11] GUO L, ZHANG J, HU J, *et al.* Susceptibility of glutinous rice starch to digestive enzymes [J]. *Carbohydr Polym*, 2015, 128: 154–162.
- [12] JIRARATSATIT J, MANGKLABRUKS A, KEOPLUNG M, *et al.* Glycemic effects of rice and glutinous rice on treated-type II diabetic subjects [J]. *J Med Assoc Thai*, 1987, 70(7): 401–409.
- [13] SUN L, MIAO M. Dietary polyphenols modulate starch digestion and glycaemic level: A review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2020, 60(4): 541–555.
- [14] SINGH J, KAUR L, SINGH H. Food microstructure and starch digestion

- [J]. *Adv Food Nutr Res*, 2013, 70: 137–179.
- [15] ZHANG H, LIU Y, ZHOU J, *et al.* Amylopectin is the anti-fatigue ingredient in glutinous rice [J]. *Int J Biol Macromol*, 2014, 63: 240–243.
- [16] LI H, YANG J, YAN S, *et al.* Molecular causes for the increased stickiness of cooked non-glutinous rice by enzymatic hydrolysis of the grain surface protein [J]. *Carbohydr Polym*, 2019, 216: 197–203.
- [17] SEOW EK, TAN TC, LEE LK, *et al.* Effects of honey types and heating treatment on the textural, thermal, microstructural, and chemical properties of glutinous rice flour gels [J]. *J Texture Stud*, 2020, 51(6): 909–916.
- [18] KEERATIPIBUL S, LUANGGSAKUL N, LERTSATCHAYARN T. The effect of thai glutinous rice cultivars grain length and cultivating locations on the quality of rice craker [J]. *Food Sci Technol*, 2008, 41: 1934–1943.
- [19] 熊金娟, 陶倩, 丁文平, 等. 臭氧处理对糯米淀粉消化特性的影响研究 [J]. *食品科技*, 2017, 42(9): 166–170.
- XIONG JJ, TAO Q, DING WP, *et al.* Effect of ozone treatment on digestibility of waxy rice starch [J]. *Food Sci Technol*, 2017, 42(9): 166–170.
- [20] 王璐, 范志红, 史海燕, 等. 几种糯性食物的淀粉消化特性 [J]. *食品科学*, 2010, 31(17): 359–363.
- WANG L, FAN ZH, SHI HY, *et al.* Starch digestion characteristics of several waxy cereal foods [J]. *Food Sci*, 2010, 31(17): 359–363.
- [21] RANAWANA DV, HENRY CJ, LIGHTOWLER HJ, *et al.* Glycaemic index of some commercially available rice and rice products in great Britain [J]. *Int J Food Sci Nutr*, 2009, 60: 99–110.
- [22] MASINA N, CHOONARA YE, KUMAR P, *et al.* A review of the chemical modification techniques of starch [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 157: 1226–1236.
- [23] MANIGLIA BC, CASTANHA N, LE-BAIL P, *et al.* Starch modification through environmentally friendly alternatives: A review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2021, 61(15): 2482–2505.
- [24] VAN DMM, LEEMHUIS H. Starch modification with microbial alpha-glucanotransferase enzymes [J]. *Carbohydr Polym*, 2013, 93(1): 116–121.
- [25] BEMILLER JN, HUBER KC. Physical modification of food starch functionalities [J]. *Annual Rev Food Sci Technol*, 2015, 6: 19–69.
- [26] WANG S, COPELAND L. Effect of acid hydrolysis on starch structure and functionality: A review [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2015, 55(8): 1081–1097.
- [27] GURAYA HS, JAMES C, CHAMPAGNE HS. Effect of enzyme concentration and storage temperature on the formation of slowly digestible starch from cooked debranched rice starch [J]. *Starch*, 2001, 53(3–4): 131–139.
- [28] HAMAKER BR, HAN X. Slowly digester starch: USA, PCT/US2004/002566 [P]. 2004-08-12.
- [29] TAN X, LI X, CHEN L, *et al.* Effect of heat-moisture treatment on multi-scale structures and physicochemical properties of breadfruit starch [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 161: 286–294.
- [30] SILVA WM, BIDUSKI B, LIMA KO, *et al.* Starch digestibility and molecular weight distribution of proteins in rice grains subjected to heat-moisture treatment [J]. *Food Chem*, 2017, 219: 260–267.
- [31] ENGLYST HN, KINGMAN SM, CUMMINGS JH. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *Eur J Clin Nutr*, 1992, 46: 33–50.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



王东旭, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与卫生。
E-mail: wdx@just.edu.cn



郭元新, 博士, 教授, 主要研究方向为粮油食品安全与营养健康。
E-mail: guoyuanxin@just.edu.cn