

# 稻米淀粉消化率的研究进展及其内外影响因素

李颖颖<sup>1,2</sup>, 李霞<sup>1,2,3\*</sup>, 杨杰<sup>1,3</sup>

(1. 江苏省农业科学院粮食作物研究所, 江苏南京 210014) (2. 南京农业大学生命科学学院, 江苏南京 210095) (3. 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏扬州 225009)

**摘要:** 血糖生成指数 (Glycemic Index, GI) 是一种能够衡量人体在食用食物后自身血糖水平变化的有效指标, 对肥胖和糖尿病人群的饮食指导有重大意义。大米作为世界上半以上人口的主食, 通过饮食低 GI 的稻米干预引起低而稳定的餐后血糖反应是控制血糖经济有效的手段, 而体外消化是对体内生理条件进行模拟, 代替体内实验研究食物 GI 特性的一种快速、经济以及可重复性强的重要技术。该文通过总结水稻升糖指数的概念、测定稻米升糖指数的方法、影响稻米淀粉消化率的消化模型、稻米淀粉粒与非淀粉组分之间相互作用 (内在特性) 以及加工 (外在因素) 因子等的研究进展, 在未来还需深入研究抗性淀粉的遗传机制、建立标准化烹饪流程、条件和湿热处理工艺流程以及延缓或抑制淀粉的回生等方面去指导获得低消化率的大米, 且体外消化模型只能测得大米的估计升糖指数, 对接近体内消化的简易有效的理想模型开发还需不断完善。

**关键词:** 水稻; 体外消化模拟; 血糖指数; 淀粉消化率

文章编号: 1673-9078(2024)10-1-13

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.10.1205

## Advances in Evaluation of Rice Starch Digestibility and the Intrinsic and Extrinsic Factors Affecting the Same

LI Yingying<sup>1,2</sup>, LI Xia<sup>1,2,3\*</sup>, YANG Jie<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China) (2. College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China) (3. Collaborative Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops of Jiangsu Province, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** The glycemic index (GI) is an effective indicator of the postprandial glycemic response, and is of great importance for guiding the dietary choices of individuals with obesity or diabetes. Rice is the staple food of more than half of the world's population. Consumption of a low GI rice diet to achieve a low and stable postprandial glucose response is a cost-effective means of controlling the blood glucose levels. *In vitro* digestion simulates the physiological conditions present during digestion. Compared to *in vivo* digestion experiments, *in vitro* digestion allows us to study the GI characteristics of food in a rapid, inexpensive, and reproducible manner. This paper summarizes the research progress on the concept of rice GI, the methods used for measuring rice GI, the digestion models used for evaluating the digestibility of rice starch, and the

引文格式:

李颖颖, 李霞, 杨杰. 稻米淀粉消化率的研究进展及其内外影响因素[J]. 现代食品科技, 2024, 40(10): 1-13.

LI Yingying, LI Xia, YANG Jie. Advances in evaluation of rice starch digestibility and the intrinsic and extrinsic factors affecting the same [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(10): 1-13.

收稿日期: 2023-10-10

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金项目 [CX(23)1001]; 江苏省重点研发计划 (现代农业) (BE2021359); 国家自然科学基金项目 (31571585); 江苏省种业创新“揭榜挂帅”项目 [JBGS(2021)038; JBGS(2021)039]

作者简介: 李颖颖 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水稻营养生理, E-mail: 2361350374@qq.com

通讯作者: 李霞 (1970-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 水稻育种生理, E-mail: jspllx@jaas.ac.cn

interactions between rice starch granules and non-starch components (intrinsic characteristics) and processing factors (external factors). It is necessary to further study the genetics of resistant starch, establish standardized cooking processes, conditions, and heat-moisture treatment processes, and strategies for delaying or inhibiting starch retrogradation to enable the acquisition of rice with low digestibility. As the current *in vitro* digestion model can only estimate the rice GI, future research should be targeted at continuously improving this model to enable it to closely simulate *in vivo* digestion.

**Key words:** rice; simulated *in vitro* digestion; glycemic index; starch digestibility

人们在“吃的饱”和“吃的好”的基础上，又面临营养缺乏和营养过剩的双重挑战，这使得“隐性饥饿”问题变得更加突出，从而引发肥胖症和糖尿病等人数激增<sup>[1]</sup>。例如，2021年中国糖尿病患者数已达1.4亿，其中II型糖尿病约占90%，且预计到2045年全球20~79岁人群的糖尿病患病数将上升至7.83亿人，其中中国居于首位<sup>[2]</sup>。相关研究也已经表明不合理饮食被认为是糖尿病发病的主要因素<sup>[3]</sup>，因此预防和控制II型糖尿病及并发症患者的发生，关键在于掌握科学合理的膳食结构，通过食用低升糖指数的食品无疑是控制糖尿病最经济有效的途径之一，对“健康中国”战略的实施来说，不但有短期效应而且具有长期健康意义。

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是数十亿人口的主食作物，为人体提供能量并满足部分蛋白质等营养成分的需求。据联合国粮农组织的报告，2022~2023年全球稻米消费量估计为5.19亿t，全球稻米人均消费量约为64.4 kg<sup>[4]</sup>。在亚洲，大约20亿人口每天三分之二的卡路里摄入量来自食用大米及其加工产品<sup>[5]</sup>。《中国居民膳食指南(2022)》<sup>[6]</sup>和Jukanti等<sup>[7]</sup>已明确以谷类(稻米等)为主，兼顾食物多样性，对预防相关慢性疾病有重要作用。

人类对于熟精米的消化和肠吸收是完全或接近完全的，然而大米的消化率受到内在特性淀粉自身结构(直链淀粉、支链淀粉、颗粒大小、表面孔径及通道)，营养成分(淀粉、蛋白质、脂质、膳食纤维以及灰分)，成分之间的相互作用(脂质复合物、淀粉-蛋白质以及淀粉-蛋白质-脂质及淀粉晶体类型)，外在因素加工条件(凝胶化程度、回生程度、加工后成分间相互作用的变化)，研磨(淀粉破损度)，改性处理(抗性淀粉等)的影响<sup>[8,9]</sup>。因此，本文主要总结了水稻升糖指数的概念、测定稻米升糖指数的方法、大米淀粉体外消化模型以及影响稻米淀粉消化过程的因素，并简要介绍了淀粉体外消化在水稻低GI种质资源筛选中的应用，最后对该研究未来的研究内容和方向做了展望。

## 1 稻米的升糖指数

### 1.1 升糖指数

升糖指数又称血糖生成指数(Glycemic Index, GI)由加拿大营养学家Jenkins<sup>[10]</sup>首先提出，用于衡量食物进入人体后血糖应答速度的最重要参数。在1997年，FAO/WHO对血糖生成指数进行了定义，即：含50g可利用碳水化合物的食物餐后血糖响应曲线下增值面积与含等量碳水化合物的标准参考食物(葡萄糖或白面包)餐后血糖响应曲线下增值面积的比值。ISO 26641:2010中规定：GI≤55属于低GI食物；55<GI≤70属于中等GI食物；GI>70属于高GI食物。GI值高的食品，葡萄糖释放速度快，肠道消化快吸收完全，血糖峰值高，胰岛素快速上升，血糖波动剧烈；低GI的食品，葡萄糖的释放速度很慢，在肠内停留时间很长，只需少量的胰岛素，血糖波动不大，有利于血糖控制<sup>[11,12]</sup>。因此，低GI食物可以有效改善餐后血糖反应，控制II型糖尿病患者的病情。

### 1.2 大米GI值

通过物理加工去除谷壳和麸皮的只含淀粉状胚乳的谷物，即为精米(White Rice, WR)，精米中淀粉的质量分数约为70%~90%，蛋白质质量分数约为4%~11%以及脂类质量分数约为1%<sup>[13,14]</sup>。不同品种的稻米及其加工产品的GI值不同，一般来说，籼稻GI值比粳稻低，其中普通籼米GI=84、粳米GI=87、糯米GI=95~100。不同有色的糙米GI=48~70，黑米=42.3，蒸谷米GI=47，胚芽米GI=70；大米制品GI=37~92，其中白米饭GI=80、83.2、88，长粒白米GI=56，大米和糙米稀饭GI=57，大米粥GI=69、69.4，黑米粥GI=42.3，粳米粥GI=102，白米加糙米GI=65<sup>[15-18]</sup>。因此，稻米类产品不能笼统地定义为高GI产品或者是低GI食品，而培育低GI的水稻品种无疑是一个控制血糖升高，满足人们对营养健康生活需求的最基础和最

重要途径。

## 2 GI的测定方法

食物GI的测定有两种方法，一种是临床实验，另一种是体外模拟消化。临床试验被要求有资质的机构来完成，其简要步骤为：选取不同性别和年龄的志愿者（国内规定不少于12个人，国际规定不少于10人），实验组食50g待测样品，对照组食等量葡萄糖液或白面包，餐后15、30、45、60、90和120min测定血糖，对数据进行统计分析得出GI值<sup>[19,20]</sup>，测得数值精确，但过程繁琐，所需成本较高。一些国家的大型有机食品公司正在进行有机产品研发，以及在稻米分子育种实验室中大规模筛选低GI原材料的初步研究中，人体试验鉴定很难采用，且涉及伦理约束。已有研究表明，食物样本中碳水化合物消化速度的变化与体外血糖代谢反应时间有很大的正相关性<sup>[21,22]</sup>，拟通过联合使用水解酶类反应器对食物样品进行体外模拟水解，测定水解反应后产生的还原糖量，建立其与人体内脂肪消化产物对该食物引起的体外血糖代谢反应速率的直接对应时间关系，从而可以通过体外方法预测食物样品的GI值，相比于人体动物试验，体外消化技术有成本低、重复性强且不受伦理限制等优点。

体外胃肠道消化模型是根据体内生理功能和条件，模拟食物消化的工具，普遍适用于谷物、蔬菜、肉类食品等。完整的消化系统是由消化道和消化腺两大部分组成，食物在体内消化主要发生两个过程：第一个过程主要包括经牙齿碾磨、舌的搅拌、吞咽，胃肠肌肉的运动，将食物颗粒变小的机械转换过程；第二个过程主要是多聚糖被分解成葡萄糖，蛋白质分解为氨基酸，脂类被分解为甘油及脂肪酸等一系列酶解过程，主要发生在大小肠<sup>[23,24]</sup>。在体外条件下选择适宜的酸碱度、温度和水解酶系，创建与体内相似的消化环境，模拟食物分解过程。简言之，稻米淀粉颗粒的消化实际上是酶向底物扩散，酶向底物吸附底物（即酶-底物复合物的形成）以及水解等三个过程<sup>[25]</sup>。

目前体外模拟消化系统大致可以分为静态模型<sup>[23,26]</sup>，半动态模型<sup>[27,28]</sup>、动态模型<sup>[29,30]</sup>以及细胞培养模型<sup>[31]</sup>，具体见表1，其中静态消化模型目前应用较为广泛，也是最易于操作的方法，国内采用的体外消化体系95%以上为静态模拟体系，动态消化模型目前有中国农业科学院北京畜牧兽医研究所

和湖南中本智能科技发展有限公司分别发明了“单胃动物仿生消化系统”和“全自动单胃动物仿生消化仪”，均只是实现流加消化液和机械排空功能，设计目的是测定饲料能量、蛋白质、氨基酸的消化率<sup>[32-34]</sup>。

静态消化模型中每个相的分泌物比率、pH值以及生物活性剂浓度都是恒定的<sup>[21]</sup>，是在食品体外消化模拟中应用最广泛的模型<sup>[35]</sup>。INVOGEST静态模型是基于一个欧盟资助的COST Action FA1005 INFOGEST（2011-2015）项目构建的用于研究胃肠道食物消化的标准化的、循序渐进的静态体外消化方法，该方法所达成的国际共识，并在2019年完善为INFOGEST 2.0<sup>[23]</sup>。该模型包括前准备阶段：制备模拟液（唾液、胃液、肠道液）和测定酶活性、胆汁和pH值；反应阶段：食物和模拟唾液按比例混合，不同阶段调节pH值，在37℃下孵育，该模型简单易操作，并且可以达到预测的结果。Jenkins首次应用这个系统，验证了食物GI与淀粉消化之间的相关性，并提出了食品GI的参数。Englyst等<sup>[36]</sup>创新性地将淀粉分为20min内即可被迅速消化吸收的快速消化淀粉（Rapidly Digestible Starch, RDS）、20~120min内被完全吸收但水解速度较慢的缓慢消化淀粉（Slowly Digestible Starch, SRS）和120min后仍无法吸收的抗性淀粉（Resistant Starch, RS），并成功地用消化时间的快慢区分淀粉组分。Fernandes等<sup>[37]</sup>利用该模型，对三种水稻品种Carolinowhite-Cw、Carolinobrown-Cb、Carolino Arietebrown-CAb的淀粉消化进行了定性定量的描述，为开发低GI的稻米食谱建立了基础策略。对于低GI食品的研制和原粮品种的筛选来说，INVOGEST模型存在局限性，仅适用于胃、肠端点的取样研究<sup>[27]</sup>，而且测定时间比较长，通常2~4h，添加的酶的种类也比较多，对于低GI稻米初级原粮资源的筛选需要更简化的体外消化步骤。

动态模型更复杂也更接近人体内的消化过程，包括胃的排空、蠕动以及消化过程中pH值、酶的分泌等变化。研究发现，在增加了用于模拟胃肠蠕动的机械装置后，动态消化模型能够更加准确地模拟体内消化过程<sup>[38]</sup>。Kong等<sup>[39]</sup>在2010年开发HGS（Human Gastric Simulator）模型模拟胃消化的动态过程，用于研究胃消化过程中酸和酶的分泌和收缩力等对食物分解和营养释放的影响。但模型设备昂贵，维护成本高，大部分实验室无法实现HGS的构建，不具有普适性。

表 1 目前体外模拟消化模型的比较

Table 1 Comparison of the current *in vitro* digestion models

模型名称	主要参数	应用范围	优缺点	参考文献
静态模型	模拟液酶的比例; pH 值; 温度	用于食品、动物饲料、医药、 食品蛋白质潜在过敏源	重复性强、稳定度高、成本低, 每个消化阶段易评估; 但无法模拟肠道动态消化过程	[23,26]
动态模型	酶分泌、排空和温度蠕动; 消化过程中 pH 值	在几何、物理力学和 生物化学三方面	更接近人体内的消化过程; 但操作也更复杂	[29,30]
半动态模型	食糜的 pH 值; 酶促释放率; 温度	用于世界各地的实验室 和各种食品中	胃阶段营养物的消化及结构 变化的力学研究	[27,28]
细胞培养 模型	细胞系分化速率; 分子渗透性; 转运蛋白表达; 细胞系	通常用于研究营养物的渗透 性, 评估营养物细胞转运 和谷物重金属有效性	细胞系分化迅速, 但维持费昂贵; 易污染; 细胞系大多来源于非人体 组织和癌细胞, 与体内情况存在差异	[31]

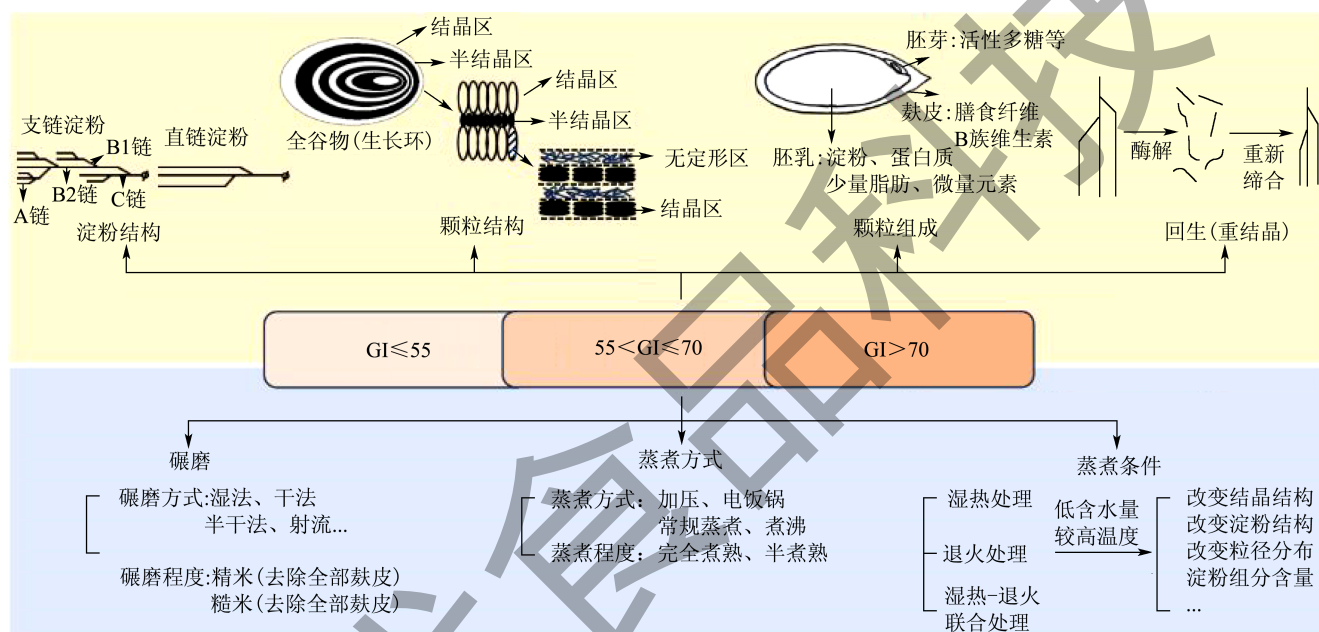


图 1 影响稻米淀粉消化率因素

Fig.1 Factors affecting the digestibility of rice starch

半动态消化模型是 Cabero 等<sup>[40]</sup>在静态 INVOGEST 模型的基础上提出的简化动态模型, 该模型不能模拟胃的蠕动收缩, 但可以模拟 HGS 中的胃连续分泌和排空机制, 可获得营养物质在消化过程中的聚集和组装信息, 集中在模拟胃液 pH 值的动态变化和胃蠕动力、剪切力等力学研究。

细胞培养模型通常衍生自胎儿啮齿动物的肠上皮细胞或癌性肿瘤细胞, 与其他细胞系相比, 癌细胞具有快速分化的优点, 细胞系取决于模拟的消化器官和底物性质, 是评价碳水化合物和纤维成分渗透性的重要模型, 通常被制药工业用于评价潜在药物吸收机制的手段<sup>[41]</sup>。营养学家和细胞生物学家使用该模型来评估营养物质的细胞转运、新型化合物对疾病的影响, 近年来, 主要集中在砷、铅和镉等元素对大米的生物有效性的研究中<sup>[42]</sup>, Aziz

等<sup>[43]</sup>和 Omer 等<sup>[44]</sup>通过体外模拟消化 /Caco-2 细胞模型来研究重金属污染大米消化后生物有效性以及可能存在的健康风险, 该模型主要显示营养物的渗透性, 而不是反映真实的体内吸收情况。因此, 应根据研究目的选择不同的消化模型, 除静态消化模型外, 其它系统更接近于人体真实的消化过程, 但是需要的设备比较昂贵, 直接用于农业和食品企业的较少。虽然体外消化模型已经有很多成功的报告, 但是该方法只能测得食品的估计升糖指数, 对接近体内消化的简易有效的理想模型开发, 还需不断完善和进一步评估和认证。

### 3 影响大米淀粉消化的因素

大米淀粉组分和比例、淀粉颗粒以及结构等内在因素和外在条件均会对稻米淀粉体外消化速率产

生较大差异,如淀粉分子的颗粒结构、晶型、层状结构、直链淀粉和支链淀粉的含量及比例变化等<sup>[45]</sup>;另一方面,稻米采用不同的工艺处理时也会使淀粉颗粒结构、聚集状态及回生作用产生变化,而影响淀粉的消化性,如图1可见,大米的微量成份、颗粒特征、组织结构、稻米种植或加工管理方式等变化以及经常食用大米者的食用习惯等均或多或少影响GI指标的变化。下面主要从大米淀粉消化内在和外在的因素,介绍影响大米外消化的因素。

### 3.1 内在因素

大米是由多种营养成分组成的复杂体系,包括淀粉、蛋白质、脂质、膳食纤维以及微量组分,淀粉是影响GI的主要营养素之一<sup>[46]</sup>。按照体外消化过程的不同,淀粉可以分成三种类型:快速消化淀粉(RDS)、缓慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS),其中RS是当前被公认的影响稻米GI的重要参数<sup>[47]</sup>。大米淀粉具有丰富的多样性,可分离出易消化性、耐酸性强、高直链淀粉以及高抗性淀粉等不同特性的淀粉,因此,通过改变淀粉组分而开发低GI品种稻米,对于淀粉类食品和制药等领域极其重要且应用广泛<sup>[48-50]</sup>。

#### 3.1.1 淀粉颗粒组成

##### 3.1.1.1 直链淀粉与支链淀粉

直链淀粉的结构主要是一种线性葡聚糖,主要由 $\alpha$ -1,4键组成(>99%), $\alpha$ -1,6键连接的支链较少<sup>[51]</sup>,植物来源不同其直链淀粉的平均聚合度约为800~5000<sup>[52]</sup>,如玉米、小麦、大米、大麦等典型谷物聚合度分布在190~3880,而马铃薯、木薯、甘薯等块茎类淀粉聚合度分布在440~9770<sup>[53]</sup>。水稻品种按照直链淀粉占淀粉中的质量分数,可以被划分为0%~2%的糯性水稻,5%~12%的极低直链淀粉含量水稻,12%~20%的低直链淀粉含量水稻,20%~25%的中直链淀粉以及大于25%的高直链淀粉含量水稻。直链淀粉含量在稻米消化过程中发挥主要作用,通常直链淀粉含量越高,分子链越长、分子量越大,淀粉越难消化,血糖上升越慢,对应的GI越低<sup>[54-56]</sup>。Lin等<sup>[57]</sup>以遗传背景相同但直链淀粉含量不同(质量分数1%~15%)的15种大米淀粉作为研究材料,结果表明糯性品种淀粉的水解速度较快,在早期为单一水解相,但水解速率随着直链淀粉含量的增大而减小,表现为两相反应。

对于不同品种的大米,淀粉的消化能力在很大

程度上是由直链淀粉的含量决定的,但是支链淀粉的结构对大米淀粉消化能力也有重要影响。支链淀粉是一种高度支化的葡聚糖,结构较为复杂,主要由许多短的 $\alpha$ -1,4链组成,这些链在分支点通过 $\alpha$ -1,6糖苷键相互连接<sup>[58]</sup>,单元链可分为A链、B链和C链,其中A链是最外侧的链,通过 $\alpha$ -1,6糖苷键连接,它的还原端连接在B链上,不再形成分支,B链又分为平均链长13~24的B1,平均链长25~36的B2以及平均链长大于36的B3,支链淀粉中有且只有一条带还原性末端的C链<sup>[52]</sup>,聚合度在8200~12800之间,且籼稻支链淀粉的聚合度明显低于粳稻<sup>[59]</sup>。在普通稻米淀粉中支链淀粉约占70%,而在糯性水稻的淀粉约占95%左右<sup>[54]</sup>。尤其是长链支链淀粉模仿了直链淀粉的结构,不仅可发挥直链淀粉的功能,也可以增加大米的粗蛋白含量,降低了大米的消化率<sup>[60,61]</sup>。淀粉酶作用淀粉时需要结合在淀粉链的末端,相比直链淀粉,支链淀粉具有更多的端点,更容易被淀粉酶降解,因此食用支链淀粉含量较高的大米血糖上升更快<sup>[62]</sup>。研究显示:Singh等<sup>[63]</sup>通过分析直链/支链淀粉不同比例的糯米体外消化性,发现具有高比例直链/支链淀粉有更低的溶胀能力,且表明溶胀能力降低会抑制酶对淀粉粒的消化,导致较低的消化率。

##### 3.1.1.2 抗性淀粉

抗性淀粉是指在健康个体的小肠中不能被吸收的淀粉或淀粉降解产物,富含RS的食物中,葡萄糖的释放速率会变慢,对食物的消化吸收程度也会降低,具有良好的稳定餐后血糖水平、肠道保护、控制体重的效果<sup>[64]</sup>。虽然热米饭中抗性淀粉含量一般低于1%,冷米饭中抗性淀粉含量略微增加,含量也在1.0%~2.1%之间<sup>[65]</sup>,但是较多的研究表明:抗性淀粉是影响稻米GI值的主要因素。抗性淀粉包括5种类型,即RS1、RS2、RS3、RS4和RS5,其中,RS1为物理包埋淀粉,在谷物或种子等中,被完整的细胞壁所包裹,但在肠道中没有分解这种细胞壁的酶类,导致其不被吸收消化;RS2为天然淀粉颗粒,一般存在于薯类中,结构紧密,对消化酶有很强的抗性;RS3为回生淀粉,是一种在回生或再结晶的糊化淀粉冷却时产生的,为抗性淀粉的重要组成部分,也是目前研究的热点。RS4是一种对淀粉进行化学修饰,使其分子结构发生变化,从而对淀粉酶产生抗性。RS5为一种由直链淀粉非极性区与脂间疏水性区交互作用而产生的一种

结构,是直链淀粉与脂质的复合体,对 $\alpha$ -淀粉酶产生抗性<sup>[66]</sup>。

抗性淀粉由结晶区和无定形区组成,结晶区主要由结晶的直链淀粉构成,抗性淀粉抗淀粉酶类消化的能力源于直链淀粉晶体<sup>[64]</sup>;一般地,直链淀粉含量较高的天然大米淀粉的RS含量也较高<sup>[67]</sup>。

较多的遗传研究显示,抗性淀粉是影响GI的主要因素且RS含量主要受基因控制,生态环境对RS含量的影响较小,已表明编码颗粒结合淀粉合成酶(GBSS)、可溶性淀粉合成酶(SS)和淀粉分支酶(SBE)的基因是决定水稻RS含量的主效基因,因此,调节食品的抗性淀粉含量也成为创制低GI食品的重要靶标<sup>[48]</sup>。近年来,通过理化诱变、RNA干扰和基因编辑技术创制了多个与*SBEIIa*、*SBEIIb*和*SSIIIa*等淀粉合成相关基因突变的高抗性淀粉材料和品系,具有低GI值,如‘优糖稻3号’是由上海市农业科学院作物育种栽培研究所利用系谱法选育而成的富含抗性淀粉的功能水稻新品种,最终得到RS含量达到13.2%的遗传稳定突变体‘优糖稻3号’,其GI值为48.53<sup>[68]</sup>,且抗稻瘟病。高抗性淀粉稻米虽具有调节餐后血糖和增加饱腹感,但普遍口感硬,粘性小,食味差,因此,通过分子标记辅助选择育种体系把香味、优质食味相关性状导入已有的高抗性淀粉水稻品种中获得食味和功能兼顾的新品种,将是未来研究的重点方向。原小年等<sup>[69]</sup>测得119份籼稻、粳稻精米粉中RS含量,质量占比均值为1.9%,最高者为立新粳(4.5%),其直链淀粉含量也较高,也可用于后续高抗性淀粉育种改良的优异材料。

### 3.1.2 淀粉颗粒结构

淀粉颗粒结构也是影响淀粉体外消化特性的重要因素,包括淀粉颗粒的大小、形状、通道、孔隙、生长环、片层结构、光滑度以及稻米种质来源等<sup>[70]</sup>。淀粉颗粒形态有球形、椭圆形、卵圆形、不规则形和多角形等<sup>[71]</sup>。颗粒大小范围在2~8 $\mu\text{m}$ 之间,但突变体水稻颗粒的形态和大小会发生部分改变<sup>[72]</sup>。由于稻米淀粉颗粒大小相差很小,关于淀粉颗粒大小和消化特性之间的关系报道并不一致,如Chen等<sup>[73]</sup>研究8种糯稻品种和Chung等<sup>[74]</sup>研究籼稻长粒稻,粳稻中粒稻Calrose,意大利短粒稻Arborio和白糯米Glutinous均表明颗粒越大消化速率越低,而蔡金文<sup>[75]</sup>研究粳稻品种桂花黄、日本晴、武香9915、武运粳8号和中华11以及籼稻品种

9311、黄花占、龙特甫、特青和桂朝2号与Dhital等<sup>[76]</sup>研究粳稻品种日本晴、以日本晴为亲本产生的*SBEIIb*下调的*hp-BEIIb*和*ami-BEIIb*以及籼稻品种IR36和以IR36为亲本的*SBEIIb*突变体*IR36ae*均表明淀粉颗粒大小和消化性之间则无相关性。一般来说,淀粉颗粒比表面积增加时,酶的可及性增大,从而导致消化率增加。淀粉颗粒也会被来自外部的蛋白质基质包围,起到物理屏障的作用,限制淀粉酶结合底物,降低籽粒淀粉消化的速率,且稻米淀粉颗粒较为光滑,稻米淀粉又是不易被消化吸收<sup>[77]</sup>,可见,淀粉颗粒大小和结构特点对稻米的消化特性的影响是复杂的。

### 3.1.3 蛋白质、脂质和膳食纤维

蛋白质是水稻中仅次于淀粉的第二大主要成分,在不同的水稻品种的干物质占比约为4%~13%<sup>[4]</sup>,米糠的蛋白质含量是精米中的2倍。稻米的蛋白质根据溶解度可分为四大组分,即白蛋白(水溶性)、球蛋白(盐溶性)、谷蛋白(碱溶性)和醇溶蛋白(醇溶性),其中谷蛋白是主要成分质量占比为80%,而醇溶蛋白在大米蛋白质成分中占微小比例<sup>[78]</sup>。不同的蛋白质类型和含量导致不同的淀粉水解率,这可能与蛋白质结构和相互作用的差异有关<sup>[79]</sup>。研究发现,蛋白质含量越高,对淀粉水解的先天抗性越强<sup>[80]</sup>。任欣等<sup>[81]</sup>研究天然长粒型籼米粉中的蛋白质通过蛋白酶处理后,增强了体外消化淀粉酶与淀粉的作用通道,消化率有所增加。而且据报道,蛋白质水解物对淀粉水解率的抑制作用比完整蛋白质产生的抑制作用更强<sup>[77]</sup>,Lu等<sup>[82]</sup>的研究也报道了酶水解产生的氨基酸和肽可抑制 $\alpha$ -淀粉酶的活性。

脂质在米糠中质量占比约15.0%~19.7%,而精米中脂类比例小,其中包含在淀粉颗粒内部的淀粉脂质,以及在淀粉颗粒之外的非淀粉脂质,但是它们能够通过凝胶化或糊化来对消化性产生影响,并且还具有重要的功能特性<sup>[83]</sup>。内源性和外源性脂质均可与淀粉结合,前者直接与淀粉相互作用,而后者在糊化过程中与淀粉发生反应,内源性脂类降低淀粉消化率的效率高于内源性蛋白质<sup>[84]</sup>。另一方面,脂质与蛋白质主要通过和淀粉之间的相互作用,形成(包括增加短程分子有序度、结晶度和螺旋含量),从而调节淀粉的消化率<sup>[85]</sup>,进而影响淀粉的理化性质。Ye等<sup>[86]</sup>研究观察到无脂米粉的淀粉消化率略低于不含蛋白质的样品,表明脂质在米粒和米粉的作用是不同的,还需要深入研究。

膳食纤维主要来源于米糠中其质量分数为19%~29%，最常见的组分是纤维素、阿拉伯木聚糖和果胶<sup>[87]</sup>，Ullah等<sup>[88]</sup>研究表明，食用米糠纤维后，血清中葡萄糖含量有所改善。另一方面，食物中含有的功能性成分如多酚、多糖、单宁和植酸等抗营养因子可以抑制淀粉酶的活性，稻米抛光后会大大减少多酚、阿魏酸和 $\gamma$ -氨基丁酸<sup>[89]</sup>，因此，食用糙米是降低血糖最好的方法<sup>[90]</sup>，但糙米的口感较差，难以被大米消费者接受，因此，改善水稻糙米的品质，给消费者提供既美味又健康的食品是未来水稻育种工作者的新挑战。淀粉中其它非常微量的元素，都是以离子的形态出现，例如钾，镁等，该部分对消化率的影响研究尚不多。

### 3.1.4 回生作用

回生是直链淀粉（短期）和支链淀粉（长期）的重结晶，对淀粉食品的质构、风味、保水性、保质期和总体接受性有深远的影响，在许多情况下，淀粉的回生被认为是在淀粉类食品储存过程中发生的不良过程<sup>[91]</sup>。大米蒸煮后在合适的贮藏温度下（约4℃），淀粉分子的重新排序出现淀粉回生现象，导致食物的质构变硬，并增加米饭的RS含量，从而可降低淀粉的消化率<sup>[92]</sup>。李明远<sup>[93]</sup>以软糯大米为研究对象，蒸煮后测得GI为87.23，经20min的短时间常温放置，GI有所下降（87.19），但不明显。而在-4℃保存20min后GI降至86.48，抗性淀粉的质量分数由对照组的38.27%增至39.76%，表明低温条件对蒸煮米进行回生处理减缓了大米在胃肠中的消化，从而减慢了血糖的上升速率，降低了GI值<sup>[94]</sup>。龙杰等<sup>[95]</sup>研究低3个不同直链淀粉含量水稻品种的大米回生的表现，即非糯的低直链淀粉含量的粳稻（秋光）、非糯的低直链淀粉含量籼稻（云辉290）和高直链淀粉籼稻（优优128），它们未回生制作的方便米饭的快消化淀粉含量均高于回生1d方便米饭的，其中直链淀粉含量最高云辉290大米的降低最显著，也证实了回生处理能有效降低米饭的淀粉消化率。Benmoussa等<sup>[96]</sup>研究12种直链淀粉含量相近（质量分数15.84%~17.18%）品种的米粉烹调后冷却回生处理的消化率，结果表明：长链、中短支链淀粉线性链含量与SDS呈正相关，与RDS呈负相关，极短支链与SDS呈负相关。Liang等<sup>[99]</sup>提出，无定形区域的直链淀粉分子最初可能会被淀粉酶水解，但随后分子在稻米重构（回生）过程中可能会重新缩合并变得具有抵抗力，而

使回生的稻米不容易被消化，可见，从降低淀粉消化率的角度来说，适当回生即能降低淀粉类食品的GI。因此，未来进一步寻找有效的方法来延缓或抑制淀粉的回生在食品工业中有重要意义。

## 3.2 外在因素

### 3.2.1 碾磨程度及方法

大米经常以碾磨谷物的形式食用，去除麸皮层，被称为白米或精米。精米比糙米具有更好的烹饪和食用质量，但稻米碾磨过程中的机械力和产生较高的温度，会导致营养物质的显著损失，包括蛋白质、脂质、膳食纤维、矿物质和其他营养物质<sup>[97]</sup>，加工精度及方式均会影响稻米淀粉的结构，随着碾磨度的增加，煮熟的米饭的蒸煮时间和硬度降低，白度增加<sup>[98]</sup>。由于缺乏麸皮层，精米淀粉颗粒更容易膨胀，淀粉微晶在比整个糙米更低的温度下完全融化<sup>[99]</sup>，导致精米淀粉的快速消化。王绪坤等<sup>[100]</sup>和于巍等<sup>[101]</sup>均表示糙米的营养价值更高，GI值更低，更适合亚健康人群的食用。因此，糙米的轻度碾磨（即部分保留麸皮层）被提出并应用于生产既具有理想的质地又含有更多营养成分的稻米。

Tian等<sup>[102]</sup>研究显示用湿法（Wet-milled Rice Flour, WRF）、干法（Dry-milled Rice Flour, DRF）、半干法（Semi-dry-milled Rice Flour, SRF）和射流（Jet-milled Rice Flour, JRF）四种碾磨方式对早籼稻（贵超大米）米粉的体外水解存在显著差异，水解率依次为JRF（90.59%）、DRF（87.20%）、SRF（85.10%）和WRF（83.78%），表明SRF和WRF具有较好的理化性质和淀粉消化率。由于WRF的高能耗和高用水量，SRF更适合于制备低GI加工的米粉产品，这种现象可能与颗粒大小和受损淀粉含量有关，在JRF中，颗粒尺寸最小，损坏淀粉含量最高，增加了颗粒的表面积，使其更容易与消化酶接触和反应，从而使水解产物增加。在未来的研究中，将利用半干米粉制备血糖指数较低的各类米粉制品，如米线、米糕等，并对其体内淀粉消化率进行评估。

### 3.2.2 加工方式

#### 3.2.2.1 蒸煮方式

加工烹调方式主要会对食物质构、营养特性以及消化特性造成影响，不同烹调的方式、时间、压力等通过影响淀粉糊化程度、食物颗粒大小、淀粉和水解酶接触机会等，进而对食物的GI值产生影

响<sup>[78]</sup>。欧美国家关于不同品种的大米和不同烹调方式下(蒸、煮和炒)大米的 GI 值均有报道,以葡萄糖为参照,GI 值在 38~94 之间<sup>[103]</sup>。龙杰等<sup>[95]</sup>研究低直链淀粉非糯粳稻(秋光)、低直链淀粉非糯籼稻(云辉 290)和高直链淀粉籼稻(优优 128),采用电饭锅蒸煮(含水量  $m/m$  为 57.9%~58.3%)和常规方式蒸煮(含水量  $m/m$  为 56.8%~57.5%)两种方式处理,结果显示,与电饭锅蒸煮相比,常规方式蒸煮米饭中 RDS 含量得到极大降低,SDS 含量明显升高,因此在降低淀粉消化率方面,常规蒸煮方式更适用。Orrawan 等<sup>[104]</sup>研究了通过加压蒸煮、煮沸、过滤和蒸煮制备大米中的淀粉组分,其中,蒸煮时 RDS 含量最低,SDS 含量最高,糊化淀粉水解速率增加是由于淀粉颗粒内部的氢键被打破,使它更容易被酶攻击。高直链淀粉中淀粉水解率的降低归因于正常烹调条件下直链淀粉的不完全糊化,Tamura 等<sup>[105]</sup>通过在沸水中煮 10 min(部分煮熟)和 20 min(完全煮熟)来研究蒸煮程度对消化率的影响,完全煮熟的样品比半熟的样品有更高的水解指数和估计 GI 值,可见,较高的淀粉消化率与凝胶化程度有关,与烹饪设备无关,但仍需要进一步优化烹饪时间和水量来比较不同的烹饪方法,才可能烹制出消化率较低的大米。

### 3.2.2.2 蒸煮条件

大米烹调加工时会破坏其淀粉颗粒或形态,破坏的程度则主要由加工方法、加热时长和水分含量决定。如在过多的水中进行热处理后,通常会观察到淀粉颗粒形态的完全破坏,而在少水条件下烹煮,其淀粉颗粒形态破坏则小得多,从而获得消化程度较小的大米<sup>[106]</sup>。通常在相对低的含水量[一般为 10%~35% ( $m/m$ )]和相对高的温度(一般为 90~120 °C)下对淀粉进行物理改性的工艺称为湿热处理(Heat-moisture Treatment, HMT)<sup>[107]</sup>。在 HMT 过程中,淀粉分子结构的变化、直链淀粉-脂质复合物、结晶度、颗粒大小、颗粒分布等随 HMT 条件(温度、水分含量和加热时间)的不同而不同<sup>[108,109]</sup>。李志远<sup>[107]</sup>研究将高抗性淀粉低谷蛋白大米 HR213 和普通大米 SXG100 制得的精米粉加入去离子水调节米粉浓度为 80% 时,在 120 °C、120 min 条件下,HMT 对 HR213 米粉的消化率有最大程度的下降。Borah 等<sup>[85]</sup>通过热-冷循环处理研究 Bora 水稻品种消化率的影响,发现在 4~45 °C,5 d 为周期的循环处理后,水稻中 SDS 的质量分数明显升高,最高从 18.01% 上升到 82.81%,并在该过程中形成

了更多的 V 型晶体复合物,这也是一种在缓慢消化过程中形成的复合结构,有利于降低稻米的消化率。

低温退火处理(Annealing, ANN)和 ANN-HMT 组合处理对大米淀粉消化率也有影响,经 ANN 处理的糯米淀粉,增加了 RDS 含量,降低了 SDS 和 RS 含量,具有较高的淀粉体外消化率,分析这种处理可能由于淀粉颗粒孔隙率的增加和结晶度的降低,增加了淀粉酶与底物的可及性<sup>[110]</sup>;而经 ANN-HMT 处理的糯米淀粉中 RDS 和 SDS 含量均增加,而 RS 含量降低,该烹煮条件下的大米,消化率更高,推测这可能是 ANN-HMT 联合处理进一步破坏了淀粉晶体结构<sup>[111]</sup>。一般来说,烹饪处理持续时间越长、水分含量越高,淀粉颗粒形态的破坏程度越大<sup>[112]</sup>。可见,不同烹饪方法均会影响稻米的消化率,但目前信息尚分散,还没有标准化烹饪流程和条件,可以有效指导大米消费者获得低消化率的大米,还需今后加强大米湿热处理工艺流程的研究。

## 4 淀粉体外消化方法在水稻低 GI 种质资源筛选中的应用

稻米与加工食品不同,水稻育种工作者则更关注稻米原粮,也就是精米的 GI 特性,因此,快速简便地鉴定其 GI 特性则尤为迫切。自 20 世纪 80 年代末开始,国内外对低 GI 水稻品种进行了大量筛选工作,稻米 GI 值范围较广,据报道在 45~100 之间<sup>[6]</sup>,亦或是研究者选取了不同检测 GI 的方法。Fitzgerald 等<sup>[113]</sup>利用体外检测的方法测定了 235 个水稻品种的 GI 值,携带  $wx$  位点的品种,平均 GI 值高达 89.7,含  $Wx^b$  位点的品种为 72.04,含有  $Wx^a$  位点的品种 GI 平均值为 60.53。目前市场上中低 GI 品种也多含高直链淀粉,如 Doongara (28%,澳大利亚)、Bangladeshi 等 (27%)<sup>[114]</sup> 和 Basmati 等 (27%)<sup>[115]</sup>。最近国际水稻所通过 GWAS、靶向基因关联研究、淀粉结构分析以及精米 GI 体内外测定等结合,分析了包含 240 万个 SNP 的 305 个籼稻资源的重测序数据,进一步预测了 2 个位于更小区域的导致 GI 从中到高变异的热点基因关联区域,并筛选到直链淀粉质量分数在 20% 以上的,其 GI 通常处于中低范围,进一步证明了在自然界中有中低 GI 值的稻种资源<sup>[116]</sup>。迄今为止,国内也培育出一系列低升糖值数的水稻品系,如浙辐 201、粤泰优 220、功米 3 号、宜糖 1 号、降糖稻 1 号、优糖稻 2 号和优糖稻 3 号<sup>[117-121]</sup>等。水稻低 GI 特性是数量性状,对其遗传机制的研究则有限<sup>[122]</sup>,最近刘巧



泉团队发现了体外缓慢消化速率与稻米优良的适口性均与淀粉结构参数存在相关性,且也存在分别与两特性独立相关的淀粉结构特性,可为水稻育种家开发同时具有缓慢消化速率且适口性好的品种提供最佳方案<sup>[123]</sup>。目前,低GI水稻品种的培育多是以创制高抗性淀粉水稻材料为主,因高RS含量的水稻材料也通常伴随着高直链淀粉含量的性状,即是通过增加直链淀粉含量或增加长支链淀粉的比例来实现,这些高抗性淀粉材料始终存在产量低和食味品质差的问题,优质食味的低GI水稻品种的选育受体内筛选方法的限制,培育的水稻品种还非常少。现有的体外筛选方法虽已有较多报道,但用于批量筛选水稻遗传资源的研究尚不多,而且体外筛选还存在检测时间长、样品需要量较大以及成本高等问题,还难以用于大规模水稻育种。最近,有研究探索优化稻米淀粉体外消化试验方法<sup>[124]</sup>,使用可溶性纯淀粉作为对照,在60 min内测得样品的淀粉水解率,并用市销低GI产品验证得到的估测GI与其值差异不显著,并应用于水稻品种的筛选,培育出了低GI的水稻品种—南粳丝苗<sup>[125]</sup>,且该方法所需时间短,有效性亦可,对大批量水稻原粮的筛选提供了较好的应用前景。今后,建立的以稻米原粮为研究材料的淀粉体外消化方法,评估稻米的GI,筛选遗传群体,将为低GI水稻遗传特性的揭示及低GI水稻品种的培育提供重要基础。

## 5 展望

随着中国社会经济的发展,人们对健康生活需求越来越高,要求大米从吃饱到吃好、再到吃得健康,低GI大米营养全面,契合人们对养生健康的追求。作为重要的主食之一,大米淀粉消化率的研究进展已经做了一系列研究,尤其是体外消化模型的改进已经取得很大进展,但是应用于低GI水稻的基础理论和应用研究却很少,目前优化的体外淀粉消化的方法虽可用于大批量估测稻米原粮的eGI值,但从口腔到大肠完整的模拟消化系统体外并不能完全模拟,与体内真实的消化过程还存在差距,构建一个被医学、食品和遗传育种工作者广泛认可和应用的体外消化模型是一个需要今后多学科长时间积累及不断地改进技术来实现。虽然目前通过提高直链淀粉和抗性淀粉的含量已经创制出低GI大米产品,如但对于抗性淀粉含量的遗传控制机制的研究了解有限,并且此类大米存在产量低和适口性差等的缺陷,并不被消费者认可,且目前仅宜糖1

号、功米3号等个别品种被较大面积应用于生产。另一方面,大米淀粉体外消化率还受到各种内外因素的影响,如烹饪流程、条件和湿热处理工艺流程等,探索加工工艺的标准化以及延缓或抑制淀粉的技术方法均有待深入研究。升糖指数是人类对食品的血糖反应,涉及遗传、食品以及医学等多学科,今后利用系统生物学、全基因组序列选择、分子生理学方法和营养基因组学研究等多学科手段的相互融合,全面解析水稻低GI遗传特性,进而从分子水平着手创制产量高、适口性好和具有多重抗性的低GI水稻新品种,或者通过工艺较为简易的碾磨或物理改性处理得到消化率较低的大米,也将是未来研究需要重视的方向。此外,低GI稻米研究既要注重品种开发,也应注重大米烹饪方法的标准化和饮食习惯的建立,满足世界上以稻米为主食的健康食品需求,最终为人类健康谋福祉。

## 参考文献

- [1] 胡时开,胡培松.功能稻米研究现状与展望[J].中国水稻科学,2021,35(4):311-325.
- [2] HONG S, POUYA S, SUVI K, et al. IDF diabetes atlas: Global, regional and country-level diabetes prevalence estimates for 2021 and projections for 2045 [J]. Diabetes Research and Clinical Practice, 2022, 183: 109219.
- [3] PARK S, PARK K. Association between the level of adherence to dietary guidelines and depression among Korean patients with type 2 diabetes mellitus [J]. Journal of Psychosomatic Research, 2021, 145: 110463.
- [4] 《中国统计年鉴2022》[EB/OL].国家统计局,(2022-09-01).<http://www.stats.gov.cn/gk/>.
- [5] NAFIYA Q, AHMED I W. *In vitro* digestibility of rice starch and factors regulating its digestion process: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 291: 119600.
- [6] 《中国居民膳食指南(2022)》在京发布[J].营养学报,2022,44(6):521-522.
- [7] JUKANTI A K, PAUTONG P A, LIU Q, et al. Low glycemic index rice a desired trait in starchy staples [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 106: 132-149.
- [8] BUTARDO V M, SREENIVASULU N, JULIANO B O. Improving rice grain quality: state-of-the-art and future prospects [J]. Methods in Molecular Biology, 2019, 1892: 19-55.
- [9] JULIANO B O, BECHTEL D B. The rice grain and its gross composition [J]. Rice: Chemistry and Technology, 1985, 11: 17-57.
- [10] JENKINS D J, WOLEVER T M, TAYLOR R H, et al.

- Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1981, 34(3): 362-366.
- [11] STROCCHI A, LEVITT M. D. Measurement of starch absorption in humans [J]. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 1991, 69: 108-110.
- [12] AYENAMPUDI B S, RAMANATHAN P, RANGARAJAN M J. Effect of modified starch from sweet potato as a fat replacer on the quality of reduced fat ice creams [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(4): 2426-2434.
- [13] PRABHU N T, PRASHANTHA K. A review on present status and future challenges of starch based polymer films and their composites in food packaging applications [J]. Polymer Composites, 2018, 39(7): 2499-2522.
- [14] YIN X X, HU Z J, ZHENG Y X, et al. Multi-scale structure characterization and *in vivo* digestion of parboiled rice [J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134502.
- [15] RANAWANA D V, HENRY C J K, LIGHTOWLER H J, et al. Glycaemic index of some commercially available rice and rice products in Great Britain [J]. International Journal of Food Sciences and Nutrition, 2009, 60, 4(s4): 99-110.
- [16] 莫志军, 蒋林青, 胡继银, 等. 低升糖指数水稻研究进展及发展前景[J]. 杂交水稻, 2023, 38(5): 1-8.
- [17] KAUR B, RANAWANA V, HENRY J. The glycemic index of rice and rice products: A review, and table of GI values [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56 (2): 215-236.
- [18] 徐瑶, 刘晓风, 杨月欣, 等. 碳水化合物质量指标以及血糖生成指数影响因素的进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 502-509.
- [19] WOLEVER M T, MEYNIER A, JENKINS L A, et al. Glycemic index and insulinemic index of foods: an interlaboratory study using the ISO 2010 method [J]. Nutrients, 2019, 11(9): 2218.
- [20] MANSUR A R, JEONG G A, LEE C J. Preparation, physicochemical properties, and *in vivo* digestibility of thermostable resistant starch from malic acid-treated wheat starch [J]. Food Research International, 2022, 162(PB): 112159.
- [21] KAI L, WANG S, LE C, et al. Discovery of a low-glycemic index potato and relationship with starch digestion *in vitro* [J]. British Journal of Nutrition, 2013, 111(4): 699-705
- [22] MICHELLE R T, ASGAR F, ABISHEK B S, et al. Intrinsic and extrinsic factors affecting rice starch digestibility [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 88: 10-22.
- [23] BRODKORB A, EGGER L I, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991-1014.
- [24] LIU W L, KONG Y Y, YE A Q, et al. Preparation, formation mechanism and *in vitro* dynamic digestion behavior of quercetin-loaded liposomes in hydrogels [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 104(C): 105743.
- [25] LEHMANN U, ROBIN F. Slowly digestible starch-its structure and health implications: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18(7): 345-355.
- [26] LIN X J, CHEN P X, ROBINSON L, et al. Lipid digestibility and bioaccessibility of a high dairy fat meal is altered when consumed with whole apples: Investigations using static and dynamic *in vitro* digestion models [J]. Food Structure, 2021, 28: 100191.
- [27] MACKIE A, MULET-CABERO A I, Torcello-Gomez A. Simulating human digestion: Developing our knowledge to create healthier and more sustainable foods [J]. Food & Function, 2020, 11: 9397-9431.
- [28] MULET-CABERO A, EGGER L, PORTMANN R, et al. A standardised semi-dynamic *in vitro* digestion method suitable for food-an international consensus [J]. Food & Function, 2020, 11(2): 1702-1720.
- [29] REYNAUD Y A, MANCH A, et al. Food-dependent set-up of the DiDGI dynamic *in vitro* system: Correlation with the porcine model for protein digestion of soya-based food [J]. Food Chemistry, 2021, 341(P2): 128276
- [30] IQBAL S, ZHANG P, WU P, et al. Evolutions of rheology, microstructure and digestibility of parboiled rice during simulated semi-dynamic gastrointestinal digestion [J]. LWT, 2021, 148: 111700.
- [31] GRETCHEN J, MAHLER M L, RAYMOND P G. Characterization of Caco-2 and HT29-MTX cocultures in an *in vitro* digestion/cell culture model used to predict iron bioavailability [J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2008, 20(7): 494-502.
- [32] 赵峰, 张宏福, 卢庆萍, 等. 单胃动物仿生消化系统及基于该系统模拟单胃动物消化的方法. 北京市: CN101482460B[P]. 2011-11-09.
- [33] 邓耀辉, 陈开宇. 一种全自动单胃动物仿生消化仪. 湖南省: 201410292430.5[P]. 2016-12-07.
- [34] 邓耀辉, 陈开宇. 一种胃肠道仿生消化装置. 湖南省: 201410289798.6[P]. 2014-11-05.
- [35] LUCAS-GONZÁLEZ R, VIUDA-MARTOS M, PÉREZ-ALVAREZ J A, et al. *In vitro* digestion models suitable for foods: Opportunities for new fields of application and challenges [J]. Food Research International, 2018, 107: 423-436.
- [36] 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): S33-50.
- [37] FERNANDES J M, MADALENA D A, PINHEIRO A C,

- et al. Rice *in vitro* digestion: application of INFOGEST harmonized protocol for glycemic index determination and starch morphological study [J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(4): 1393-1404.
- [38] 李诺,张东杰,张桂芳,等.体外模拟消化技术研究进展[J].食品与机械,2021,37(3):201-206.
- [39] KONG F, SINGH R P. A human gastric simulator (HGS) to study food digestion in human stomach [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(9): E627-E635.
- [40] MULET-CABERO A I, EGGER L, PORTMANN R, et al. A standardized semi-dynamic *in vitro* digestion method suitable for food an international consensus [J]. Food & Functon, 2020, 11(2): 1702-1720.
- [41] 陈贵,贾慧.体外消化模型的研究进展[J].农产品加工, 2017,9:61-64,68
- [42] WANG C, DUAN H Y, TENG J W. Assessment of microwave cooking on the bioaccessibility of cadmium from various food matrices using an *in vitro* digestion model [J]. Biological Trace Element Research, 2014, 160(2): 276-84.
- [43] OMAR V A, PRAVEENA S M, ARIS A Z, et al. Health risk assessment using *in vitro* digestion model in assessing bioavailability of heavy metal in rice: A preliminary study [J]. Food Chemistry, 2015, 188: 46-50.
- [44] AZIZ R, RAFIQ M T, LI T Q, et al. Uptake of cadmium by rice grown on contaminated soils and its bioavailability/toxicity in human cell lines (Caco-2/HL-7702) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(13): 3599-3608.
- [45] BELLO-PEREZ L A, FLORES-SILVA P C, AGAMA-ACEVEDO A E, et al. Starch digestibility: past,present, and future [J]. Journal of the Science of Food Agriculture, 2020, 100: 5009-5016.
- [46] 王乐惠,张继宁,张鲜鲜,等.我国稻米食味品质的研究进展及其影响因素[J].上海农业学报,2023,39(3):148-154.
- [47] ATKINSON F S, BRAND-MILLER J C, FOSTER-POWELL K, et al. International tables of glycemic index and glycemic load values 2021: a systematic review [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2021, 114(5): 1625-1632.
- [48] SHEN L S, LI J Y, LI Y H. Resistant starch formation in rice: Genetic regulation and beyond [J]. Plant Communications, 2022, 3(3): 100329.
- [49] HOLGER S, DUNTAS L H, RAYMAN M P. The role of selenium in type-2 diabetes mellitus and its metabolic comorbidities [J]. Redox Biology, 2022, 50: 102236.
- [50] OLAYIDE S L L, ROMANO L, BARBARA B, et al. Rheology and functional properties of starches isolated from five improved rice varieties from west Africa [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(7): 1785-1792.
- [51] GHOSH H, MOUMITA, BANERJE E, et al. Studies on genetic variability and identification of sequence variations among cultivars and landraces of rice (*Oryza sativa* L.) for apparent amylose and amylopectin contents [J]. Cereal Research Communications, 2022, 50(4): 1-10.
- [52] CHEN R, MA M T, ZHAO J J, et al. Characterization of multi-scale structure and physico chemical properties of starch from diverse *Japonica* waxy rice cultivars [J]. Journal of Cereal Science, 2023, 109: 103592.
- [53] 韩文芳,林亲录,赵思明,等.直链淀粉和支链淀粉分子结构研究进展[J].食品科学,2020,41(13):267-275.
- [54] 朱国茵,高源远,彭星云.直链淀粉对大米食品品质影响的研究进展[J].现代食品科技,2023,39:1-10.
- [55] PENG W S, YINGTING Z, FANG Q, et al. Understanding the multi-scale structure and physicochemical properties of millet starch with varied amylose content [J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135422.
- [56] 徐锡明,张欣,施利利,等.直链淀粉含量偏低型杂交粳稻组合的稻米品质评价[J].作物杂志,2016,6:44-48.
- [57] LIN L S, ZHANG L, CAI X L, et al. The relationship between enzyme hydrolysis and the components of rice starches with the same genetic background and amylopectin structure but different amylose contents [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 406-413.
- [58] ZHU J, YU W, ZHANG C, et al. New insights into amylose and amylopectin biosynthesis in rice endosperm [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 230: 115656.
- [59] LIANG W X, DING L, GUO K, et al. The relationship between starch structure and digestibility by time-course digestion of amylopectin-only and amylose-only barley starches [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108491.
- [60] BUTARDO V M, ANACLETO R, PARWEEN S, et al. Systems genetics identifies a novel regulatory domain of amylose synthesis [J]. Plant Physiology, 2017, 173(1): 887-906.
- [61] BUTARDO V M, FITZGERALD M A, BIRD A R, et al. Impact of down-regulation of starch branching enzyme IIb in rice by artificial microRNA and hairpin RNA-mediated RNA silencing [J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(14): 4927-4941.
- [62] 肖瑜,杨爽,刘炳利,等.影响糯性谷物淀粉的消化因素及其改性方法[J].食品工业,2019,40(4):263-268.
- [63] SINGH H, LIN J H, HUANG W H, et al. Influence of amylopectin structure on rheological and retrogradation properties of waxy rice starches [J]. Journal of Cereal Science, 2012, 56 (2): 367-373.
- [64] 杨光,丁霄霖.抗性淀粉分子量分布的研究[J].中国粮油学报,2000,5:37-40.
- [65] FUENTES-ZARAGOZA E, RIQUELME-NAVARRETE M J, SANCHEZ-ZAPATA E, et al. Resistant starch

- as functional ingredient: A review [J]. Food Research International, 2010, 43(4): 931-942.
- [66] 魏霞,徐延浩,丁保森,等.抗性淀粉及其遗传改良研究进展[J].长江大学学报(自然科学版),2019,16(8):101-107.
- [67] DING Y, WANG M, SHEN Y, et al. Physicochemical properties of resistant starch and its enhancement approaches in rice [J]. Rice Science, 2021, 28(1): 31-34.
- [68] 杨瑞芳,白建江,万常照,等.高抗性淀粉含量粳稻新品种‘优糖稻3号’的选育[J].上海农业学报,2022,38(2):6-9.
- [69] 原小年,徐姊玥,乔卫华,等.稻米淀粉品质性状的资源筛选和相关基因初步鉴定[J].植物遗传资源学报,2022, 23(6):1756-1765.
- [70] 唐倩.谷氨酰胺酶催化谷物蛋白对大米淀粉理化特性和消化性的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2022.
- [71] ERIK E J, ALLER G, ARNE A J, et al. Starches, sugars and obesity [J]. Nutrients, 2011, 3(3): 341-369.
- [72] MARI H, MOMOKO K, YASUNORI N, et al. Thermal and pasting properties, morphology of starch granules, and crystallinity of endosperm starch in the rice *SSI* and *SSIIa* double-mutant [J]. Journal of Applied Glycoscience, 2015, 62(2): 81-86.
- [73] CHEN R, MA M T, ZHAO J J, et al. Characterization of multi-scale structure and physicochemical properties of starch from diverse *Japonica* waxy rice cultivars [J]. Journal of Cereal Science, 2023, 109: 103592.
- [74] 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.
- [75] 蔡金文.普通水稻淀粉结构和功能特性研究[D].扬州:扬州大学,2015.
- [76] DHITAL S, SHRESTHA A K, GIDLEY M J. Effect of cryo-milling on starches: Functionality and digestibility [J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(4): 152-163.
- [77] WANG S, CHAO C, CAI J, et al. Starch-lipid and starch-lipid-protein complexes: A comprehensive review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(3): 1056-1079.
- [78] 雍明玲.不同食味水稻品种稻米淀粉结构与理化特性及其环境响应[D].扬州:扬州大学,2023.
- [79] LIU Q, JIAO A Q, YANG Y Y, et al. The combined effects of extrusion and recrystallization treatments on the structural and physicochemical properties and digestibility of corn and potato starch [J]. LWT, 2021, 151: 112238.
- [80] LI H T, LI Z F, GLEN P F, et al. Protein-starch matrix plays a key role in enzymic digestion of high-amylose wheat noodle [J]. Food Chemistry, 2021, 336: 127719.
- [81] 任欣,张一,方圆,等.影响淀粉消化的内外因素[J].中国食品学报,2021,21(12):283-292.
- [82] LU X X, MA R R, QIU H G, et al. Mechanism of effect of endogenous/exogenous rice protein and its hydrolysates on rice starch digestibility [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193(PA): 311-318.
- [83] OYEYINKA S A, SINGH S, AMONSOU E O. A review on structural, digestibility and physicochemical properties of legume starch-lipid complexes [J]. Food Chemistry, 2021, 349: 129165.
- [84] LUO J, LIU L, KONIK-ROSE C, et al. Down-regulation of FAD2-1 gene expression alters lysophospholipid composition in the endosperm of rice grain and influences starch properties [J]. Foods, 2021(10): 1169-1176.
- [85] LI L, HUI Y, CHI C D, et al. Effect of protein types on structure and digestibility of starch-protein-lipids complexes [J]. LWT, 2020, 134: 110175.
- [86] YE J P, HU X T, LUO S J, et al. Effect of endogenous proteins and lipids on starch digestibility in rice flour [J]. Food Research International, 2018, 106: 404-409.
- [87] KHATUN A, WATERS D L E, LIU L. A review of rice starch digestibility: Effect of composition and heat moisture processing [J]. Starch Starke, 2019, 7: 9-10.
- [88] ULLAH U, KHALIL A A, SHAUKAT F, et al. Extraction and biomedical properties of polysaccharides [J]. Foods, 2019, 8: 304-309.
- [89] 王浩瑞,李小平.血糖生成指数测定方法及加工方式对谷物血糖生成指数的影响研究进展[J].食品科学,2023, 44(11): 338-347.
- [90] 王宗玄,桑若杰,李旭燕,等.不同谷物粉体特性研究及血糖生成指数体外评价[J].现代食品科技,2023,39(8): 165-170.
- [91] WANG S, LI C, COPELAND L, et al. Starch retrogradation: A comprehensive review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2015, 14(5): 568-585.
- [92] BORAH P K, DEKA S C, DUARY R K. Effect of repeated cycled crystallization on digestibility and molecular structure of glutinous Bora rice starch [J]. Food Chemistry, 2017, 23: 31-39.
- [93] 李明远.蒸煮大米的品质与质构变化规律及消化性研究[D].天津:天津科技大学,2022.
- [94] LI H, LIU B, BESS K, et al. Impact of low-temperature storage on the microstructure, digestibility, and absorption capacity of cooked rice [J]. Foods, 2022, 1: 1642.
- [95] 龙杰,吴凤凤,金征宇,等.蒸煮条件及回生处理对方便米饭消化特性的影响[J].中国粮油学报,2018,33(3):1-7.
- [96] BENMOUSSA M, MOLDENHAUER A K, HAMAKER B R. Rice amylopectin fine structure variability affects starch digestion properties [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(4): 1475-1479.
- [97] LI C, GONG B, HUANG T, et al. *In vitro* digestion rate of fully gelatinized rice starches is driven by molecular size and amylopectin medium-long chains [J]. Carbohydrate

- Polymers, 2020, 254: 117275.
- [98] LI C, HU Y M, GU F T, et al. Causal relations among starch fine molecular structure, lamellar/crystalline structure and *in vitro* digestion kinetics of native rice starch [J]. Food & Function, 2021, 12(2): 682-695.
- [99] TUAÑO A P P, BARCELLANO E C G, RODRIGUEZ M S, et al. Resistant starch levels and *in vitro* Starch digestibility of selected cooked philippine brown and milled rices varying in apparent amylose content and glycemic index [J]. Food Chemistry: Molecular Sciences, 2021, 2: 100010.
- [100] 王绪昆,郑慧心,宋冰梅,等.重组米品质特性及其功能性产品的研究进展[J].包装工程,2021,42(17):96-104.
- [101] 于巍,周坚,徐群英,等.糙米与精米的营养价值与质构特性比较研究[J].食品科学,2010,31(9): 95-98.
- [102] TIAN Y I, DING L, LIU Y G, et al. The effect of different milling methods on the physicochemical and *in vitro* digestibility of rice flour [J]. Foods, 2023, 12(16): 3099.
- [103] 刘波,刘芳,范志红,等.稻米碳水化合物消化速度影响因素的研究进展[J].中国粮油学报,2006,4:11-15.
- [104] ORRAWAN R, SOMCHART S, CHAIYONG T, et al. Effects of cooking, drying and pretreatment methods on texture and starch digestibility of instant rice [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 103(3): 258-264.
- [105] TAMURA M, SINGH J, KAUR L, et al. Impact of the degree of cooking on starch digestibility of rice-an *in vitro* study [J]. Food Chemistry, 2016, 191: 98-104.
- [106] LIU X, LUAN H, JING L Y, et al. A method for characterizing short-range molecular order in amorphous starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 242: 116405.
- [107] 李志远.湿热处理对高抗性淀粉低谷蛋白大米粉体外消化性和理化性质的影响研究[D].镇江:江苏大学, 2022.
- [108] 高雪丽,张梦迪,王梦赟,等.湿热处理对红薯淀粉特性的影响[J].食品工业科技,2023:1-15.
- [109] 王伟良,梁钦梅,王捷,等.湿热处理对芋头淀粉糊化和体外消化性能的影响[J].中国粮油学报,2024,45(5):30-36.
- [110] DIAS A R, ZÁVAREZE E R, SPIER F, et al. Effects of annealing on the physicochemical properties and enzymatic susceptibility of rice starches with different amylose contents [J]. Food Chemistry, 2010, 123(3): 711-719.
- [111] 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.
- [112] ZHANG B, ZHAO K, SU C, et al. Comparing the multi-scale structure, physicochemical properties and digestibility of wheat A- and B-starch with repeated versus continuous heat-moisture treatment [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 519-528.
- [113] FITZGERALD M A, RAHMAN S, RESURRECCION A P, et al. Identification of a major genetic determinant of glycaemic index in rice [J]. Rice, 2011, 4(2): 66-74.
- [114] FATEMA K, RAHMAN F, SUMI N, et al. Glycemic index of three common varieties of Bangladeshi rice in healthy subjects [J]. African Journal of Food Science, 2010, 4(8): 531-535.
- [115] KUMAR A, SAHOO U, BAISAKHA B, et al. Resistant starch could be decisive in determining the glycemic index of rice cultivars [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 348-353.
- [116] ANACLETO R, BADONI S, PARWEEN S, et al. Integrating a genome-wide association study with a large-scale transcriptome analysis to predict genetic regions influencing the glycemic index and texture in rice [J]. Plant Biotechnology Journal, 2019, 17(7): 1261-1275.
- [117] 沈伟桥,舒小丽,张琳琳,等.加工型功能早籼稻新品种“浙辐201”的选育与特性[J].核农学报,2006,20(4):312-314.
- [118] 胡继银,杨耀松.低升糖指数杂交水稻粤泰优马来的选育及应用[J].杂交水稻,2019,34(6):23-25.
- [119] 曾亚文,杜娟,杨树明,等.云南稻核心种质糙米功能成分栽培型差异及其地带性特征[J].光谱学与光谱分析,2010,30(12):3388-3394.
- [120] 张宁,孙健,熊海铮,等.高抗性淀粉含量糖尿病专用粳稻的选育及其特征特性[J].中国稻米,2011,17(6):63-65.
- [121] 杨瑞芳,朴钟泽,万常照,等.高抗性淀粉水稻新品种优糖稻2号的选育及其特征特性[J].中国稻米,2020,26(1):94-95,99.
- [122] 李霞,蒋彦婕,陶亚军,等.低升糖指数水稻研究进展[J].中国水稻科学,2022,36(4):336-347.
- [123] ZHU J H, TAO K Y, SANGEETA P, et al. Using starch structure to choose rices with an optimal combination of palatability and digestibility [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 141: 108763.
- [124] 李颖颖,蒋彦婕,李文奇,等.稻米淀粉体外消化试验方法的优化及应用[J].江苏农业学报,2023,39(2):539-546.
- [125] 蒋彦婕,杨杰,王芳权,等.低血糖生成指数水稻南粳丝苗的选育及应用[J].江苏农业科学,2022,50(18):299-302.