

三个食用木薯品种升糖指数的评价

段品顺^{1,2}, 李开绵¹, 叶剑秋¹, 肖鑫辉¹, 羊春秋¹, 薛茂富¹, 韦卓文¹,
张 洁^{1*}

1. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所/农业农村部木薯种质资源保护与利用重点实验室, 海南海口 571101;
2. 云南农业大学农学与生物技术学院, 云南昆明 650201

摘 要: 木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 具有耐贫瘠、耐干旱、抗逆性强等优良特性, 其块根富含碳水化合物, 可为全球 10 亿人提供口粮, 在食用方面发挥着重要作用。升糖指数 (glycemic index, GI) 是表示在一定时间内, 进食含有碳水化合物的食物后血糖升高快慢的指标。升糖指数低的食用木薯, 可以改善血糖水平, 控制体重, 推进木薯食用化和多元化发展, 资源评价可为实现低升糖指数木薯品种选育和生物育种改良提供依据。以国内 3 个受欢迎的食用木薯品种华南 9 号 (SC9)、华南 12 号 (SC12)、华南 6068 (SC6068) 为试验材料, 测定其块根的重要农艺性状及蒸煮前后的总淀粉、快速消化淀粉、慢速消化淀粉、抗性淀粉、直链淀粉、支链淀粉、粗蛋白、粗纤维等品质性状和体外升糖指数。结果表明: 3 个品种平均单株薯质量为 3.31~4.13 kg, 鲜薯淀粉率为 25.07%~27.53%, 干物率为 37.07%~38.91%; 蒸煮前 SC9、SC12 和 SC6068 的 GI 分别为 42.6、43.5 和 43.4, 均属于低升糖指数食物, 蒸煮加工后升糖指数分别为 69.4、66.9 和 64.0, 均属于中升糖指数食物。另外, 各营养成分蒸煮前后变化显著, 其中快速消化淀粉含量和粗纤维含量上升, 抗性淀粉含量和可溶性糖含量显著下降; 对各指标进行相关性分析发现, 升糖指数与快速消化淀粉含量和粗纤维含量呈正相关, 相关系数均为 0.95, 与抗性淀粉含量和可溶性糖含量呈负相关, 相关系数分别为-0.99 和-0.88, 且升糖指数与糊化特性各值均存在相关性。木薯品种差异、加工处理方式、淀粉含量、纤维含量等对升糖指数具有较大影响, 蒸煮前 SC9 升糖指数最低、食味评价最高, 且在加工方面具有较好的稳定性, 因此在 3 个品种中最具开发潜力。

关键词: 木薯; 升糖指数; 农艺性状; 淀粉; 品质性状

中图分类号: S533 **文献标志码:** A

Evaluation of the Glycemic Index of Three Edible Cassava Varieties

DUAN Pinshun^{1,2}, LI Kaimian¹, YE Jianqiu¹, XIAO Xinhui¹, YANG Chunqiu¹, XUE Maofu¹,
WEI Zhuowen¹, ZHANG Jie^{1*}

1. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Germplasm Resources Conservation and Utilization of Cassava, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Haikou, Hainan 571101, China; 2. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China

Abstract: Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) has excellent characteristics such as barren resistance, drought resistance and strong stress resistance. Its roots are rich in carbohydrates, which can provide food rations for 1 billion people around the world, and plays an important role in consumption. The glycemic index (GI) is an indicator of how fast blood sugar rises after eating food containing carbohydrates for a certain period of time. Edible cassava with low glycemic index can improve blood sugar level, control body weight, and promote the edible and diversified development of cassava. Resource evaluation can provide a basis for the improvement of cassava varieties with low glycemic index. With three domestic popular edible cassava varieties for the test materials (SC9, SC12, SC6068), the determination of the

收稿日期 2025-02-28; 接受日期 2025-04-11

基金项目 国家热带植物种质资源库国家木薯产业技术体系项目 (No. CARS-11-HNLKM)。

作者简介 段品顺 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 木薯种质资源评价与筛选。*通信作者 (Corresponding author):
张 洁 (ZHANG Jie), E-mail: zj772277@163.com。

important agronomic traits and cooking before and after the total starch, fast digest starch, slow digestion starch, resistant starch, amylose, amylopectin, crude protein, crude fiber and other quality traits and *in vitro* sugar rise index were evaluated. The average weight of single potato was 3.31–4.13 kg, the starch rate of fresh potato was 25.07%–27.53%, and the dry rate was 37.07%–38.91%. GI of SC9, SC12 and SC6068 was 42.6, 43.5 and 43.4, respectively, which was low glycemic index, 69.4, 66.9 and 64.0, respectively, all belonging to medium glycemic index food. In addition, the nutrient components changed significantly before and after cooking, in which the rapidly digested starch content and crude fiber content increased, the resistant starch content and soluble sugar content decreased significantly. Correlation analysis of each index found that the correlation between the glycemic index and the rapidly digested starch content and crude fiber content, the correlation coefficient was 0.95, with the resistant starch content and soluble sugar content, the correlation coefficient was –0.99 and –0.88 respectively, and the glycemic index and gelatinization characteristics. The differences of cassava varieties, processing methods, starch content and fiber content have a great influence on the glycemic index. Before cooking, SC9 has the lowest glycemic index, the highest taste evaluation, and good stability in processing, so it has the most potential for development among the three varieties.

Keywords: cassava; glycemic index; agronomic traits; starch; quality characteristics

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.08.004

木薯 (*Manihot esculenta* Crantz) 为大戟科 (Euphorbiaceae) 木薯属 (*Manihot*) 多年生小灌木, 具有耐贫瘠、耐干旱、适应性强等特性^[1], 木薯在工业方面是生物质能源的重要原料, 在食用方面是近 10 亿人的食粮、第三大能量供给, 在巴西、非洲等热带地区, 是重要的人体碳水化合物及淀粉来源。全球已有 100 多个国家种植, 且食用占比很大 (如尼日利亚), 在各国粮食安全中扮演着重要角色^[2]。块根是重要食用部位, 味觉上有甜和苦之分, 具有推广潜力的食用木薯一般是味甜, 氢氰酸含量低于 50 mg/kg (温和性木薯), 而高于 100 mg/kg (烈性木薯) 一般用于加工木薯淀粉^[3]。木薯此前是一种救荒作物, 随着生活水平的提高, 人们逐渐重视饮食健康, 食用木薯不仅能饱腹, 而且因其绿色粗粮且富含淀粉、矿物质及纤维等优点重新回到餐桌, 多样化食品开发效果显著, 人们研制出了木薯羹、木薯蛋糕、木薯饼干、木薯米等一系列美食。

当前高糖、高淀粉、高油脂的不健康饮食正在影响人类健康, 截至 2022 年我国糖尿病患者超过 1.18 亿, 占世界高血糖患者的 22%^[4], 饮食健康始终是广大消费者关心的重大问题, 研究发现合理健康的饮食习惯可以改善个人的身体状况及预防许多慢性疾病, 健康意识高的消费者趋向于选择具有功能性的食品, 因为它能减小患病的风险以及治疗疾病^[5]。

升糖指数 (glycemic index, GI) 在 1981 年由 JENKINS 等^[6]首次提出, 是用来表示一定时间内, 进食含有碳水化合物的食物后血糖升高快慢的指标。根据数值大小, 把食物进行分类: 高 ($GI \geq$

70)、中 ($55 < GI < 70$)、低 ($GI \leq 55$)^[7]。高升糖指数食物释放葡萄糖速度快, 容易导致肥胖和葡萄糖耐受不良等问题; 低升糖食物释放葡萄糖缓慢, 吸收率低, 对稳定胰岛素水平有益, 因此对于糖尿病、肥胖超重及具有心血管疾病患者而言, 更适合进食低升糖食物。对于低升糖食物的研究, 人们发现不同加工方式、蛋白质、脂肪、纤维、淀粉含量等均会影响 GI 的大小^[8], 木薯淀粉消化特性与 GI 联系密切, XU 等^[9]的研究表明, 快速消化淀粉 (RDS) 和慢速消化淀粉 (SDS) 与 GI 表现为正相关, 抗性淀粉 (RS) 与 GI 表现为负相关, 通过酚酸酯化改性木薯淀粉, 降低其 RDS 含量, 可以有效调控 GI。此外粗纤维含量也与 GI 呈负相关, 它可通过阻止消化酶与碳水化合物充分接触, 来减缓淀粉的水解和消化速度^[10], 而粗脂肪和粗蛋白在消化吸收过程中与粗纤维紧密关联, 三者比例的合理搭配有助于营养最大化及降低 GI。糊化特性可反应烹饪过程结构变化对消化速率的影响, 完全糊化的淀粉可显著提高酶解效率, 导致 GI 升高^[11]。目前降低 GI 较好的方法是糖源替换、向食品中添加纤维或优化食物加工过程等, 沈彤等^[12]利用 3 种不同甜味剂来替换蔗糖, 制作出的蛋糕 GI 仅为 30。蔡攀福^[13]在面条中添加 2 种膳食纤维 (OBDF、KGM), 结果使得 3 种面条的 GI 值下降了 15.31%~20.42%。吴琼等^[14]阐明选择合适的原料配比至关重要, 再经过超声及微波辅助处理的加工方式, 可以提升抗性淀粉来降低 GI 值。另外, 选育低升糖指数品种是实现低 GI 的第一步, 也是获得低升糖指数食物的关键, 通过利用杂交育种和人工智能技术锁定

低 GI 的优异特性基因等方法,截至 2023 年国外已筛选出 16 种低升糖水稲品种^[15],小麦、马铃薯等作物在低 GI 上也取得了较大进展^[16-18]。对于谷物、块根、块茎类含较高淀粉的食物,GI 的预测通常是利用模拟人类消化道消化食物过程的方法,人体对淀粉的酶促降解是由唾液淀粉酶开始的,到小肠再由胰酶分解成单糖进行吸收,为人体大脑、红细胞、肾脏、生殖组织等提供能量,该方法在设定的温度和 pH 范围内测定淀粉转化为葡萄糖的量,这种体外方法与体内方法相比具有简便、价格低、高通量、对未被批准为人类食品的材料也可进行测定等优势^[19]。

淀粉占膳食能量摄入的 30%~70%,新鲜木薯块根淀粉含量为 16.55%~34.00%,干木薯中淀粉含量高达 65%以上^[20],因此食用木薯能为人体提供大量能量,但目前针对食用木薯的研究,国内外主要围绕获得低氰氢酸、高花青素、高淀粉及食品加工方法等方面,对食用木薯升糖指数及保健食品开发的研究鲜有报道,因此评价木薯的升糖指数对人类健康和木薯综合利用具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验在海南省儋州市进行,选择 3 个木薯品种华南 9 号(SC9)、华南 12 号(SC12)、华南 6068(SC6068)作为试验材料,材料均取自海南省儋州市国家木薯种质资源圃(109°30'E, 19°30'N),土地平坦,土壤为砖红壤,材料种植期间进行常规田间管理,每年 4—5 月种植,生育期约 16 个月。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 每个小区选取 3~5 株长势基本一致、无病虫害的健康植株,将块根挖出,记录鲜薯重要性状,再从每株中选择 3~5 根薯块进行清洗去皮、切片并充分混匀后分成 2 份,一份蒸煮,一份不蒸煮,最后将鲜薯和熟薯真空冷冻干燥,打粉过 80 目筛低温保存待测。每个指标进行 3 次重复。

1.2.2 块根品质性状测定 总淀粉含量采用 Boxbio 公司淀粉含量检测试剂盒测定;可溶性糖含量参考蒽酮比色法^[21]测定;直链淀粉和支链淀粉含量参考 ISO 6647^[22]测定;氢氰酸含量采用 GB 5009.36 的第一法测定;粗纤维含量参考 GB/T 8310—2013 测定;粗蛋白含量参考 GB 5009.5—2016 中的凯氏定氮法测定;粗脂肪含量采用 GB

5009.6—2016 中的第一法测定;干物质含量采用烘干称重法测定。

1.2.3 鲜薯干物率(DMC)及鲜薯淀粉含量的测定 用泰国进口的鲜薯淀粉测量仪,称 5 kg 左右的鲜薯在空气中的质量为 w_1 (g) 和鲜薯在水中的质量为 w_2 (g),根据国际热带农业中心制定的公式^[23-24]计算:

$$DMC = \left(158.3 \times \frac{w_1}{w_1 w_2} - 142.0 \right) \times 100\%$$

$$\text{鲜薯淀粉含量} = \left(210.8 \times \frac{w_1}{w_1 w_2} - 213.4 \right) \times 100\%$$

1.2.4 快速消化淀粉、慢速消化淀粉和抗性淀粉含量的测定 参考段惠敏^[25]的方法稍作修改。称取 100 mg 木薯冻干粉于 50 mL 离心管中,加入 0.5 mol/L 乙酸钠缓冲液(pH 5.2) 4 mL,混匀后放置在水浴锅保温至 37 °C,加入 1 mL 提前预热至 37 °C 的现配酶液(3260 U/mL 糖化酶与 290 U/mL 胰酶体积比为 1:5),移至 200 r/min 恒温摇床中,温度设置为 37 °C,准时在水解第 0、20、120 min 取样 200 μ L 加入至含有 200 μ L 无水乙醇的离心管中,迅速摇匀,常温下 4000 r/min 离心 10 min,离心完成取 100 μ L 上清液稀释待测。

用 1 mg/mL 葡萄糖标准溶液绘制标准曲线,分别取 0、20、40、60、80、100 μ L 于 2 mL 离心管中,不足 100 μ L 的用超纯水补齐体积,加入 200 μ L DNS 溶液,沸水浴准确保温 2 min,冷却后加超纯水 0.9 mL,混合均匀,静置 10 min 后取 200 μ L 于 96 孔酶标板上,酶标仪测定 540 nm 处的吸光值,测定样品含量,并根据以下公式计算快速消化淀粉含量(RDS)、慢速消化淀粉含量(SDS)、抗性淀粉含量(RS)。RDS=($G_{20}-G_0$) $\times$ 0.9/TS $\times$ 100%; SDS=($G_{120}-G_{20}$) $\times$ 0.9/TS $\times$ 100%; RS=[TS-(RDS+SDS)]/TS $\times$ 100%。式中, G_0 为水解 0 min 产生的葡萄糖质量(mg); G_{20} 为水解 20 min 产生的葡萄糖质量(mg); G_{120} 为水解 120 min 产生的葡萄糖质量(mg);TS 为样品总淀粉质量(mg);0.9 为淀粉与葡萄糖换算系数。

1.2.5 体外升糖指数测定 参考方法及测定步骤同 1.2.4,水解至第 0、15、30、45、60、90、120 min 取样,测定各时间点淀粉水解成葡萄糖的含量,以时间为横坐标,葡萄糖含量为纵坐标绘制水解曲线,用 Origin 的积分计算样品及参考食物(无水葡萄糖)的曲线面积(incremental area under the curve, IAUC),规定无水葡萄糖的水解指数为

100, 根据以下公式求样品的淀粉水解指数 (SHI) 和升糖指数 (GI):

$$SHI = \frac{\text{样品IAUC} \times 100}{\text{参考食物IAUC}}$$

$$GI = 39.71 + (0.549 \times SHI)$$

1.2.6 糊化特性的测定 采用 RVA-tecMaster 快速黏度分析仪测定, 在程序中输入样品含水量后自动计算所需加入的样品质量和水质量, 准确称取样品和水配成淀粉乳放入仪器中, 启动升温程序, 样品在 50 ℃保持 1 min, 然后升至 95 ℃保持 4 min, 最后降回 50 ℃得到黏度曲线, 导出数据获取峰值黏度、最低黏度、最终黏度、崩解值、峰值时间和糊化温度。

1.2.7 食味评价方法 将收获的木薯块根清洗去皮, 去掉中部纤维硬芯, 薯块切成 3~5 cm 方块放入蒸锅中大火隔水蒸, 蒸锅上汽后转中火计时 30~40 min, 邀请 15 人以上组成评定小组品尝打分。参考 NY/T 2669—2014 热带作物品种审定规范进行, 评分细则如表 1。

表 1 食味评分标准
Tab. 1 Scoring criteria for food taste

品鉴项目 Tasting project	评分 (满分: 60 分) Score (full score: 60 points)
香度	0≤不香<5; 5≤较香<8; 8≤香≤10。
苦度	0≤苦<5; 5≤较苦<8; 8≤不苦≤10。
甜度	0≤不甜<5; 5≤较甜<8; 8≤甜≤10。
粉度	0≤不粉<5; 5≤较粉<8; 8≤粉≤10。
黏度	0≤不黏<5; 5≤较黏<8; 8≤黏≤10。
纤维感	0≤多<5; 5≤较多<8; 8≤无≤10。

表 2 不同木薯品种块根主要农艺性状
Tab. 2 Main traits of different cassava varieties

品种 Variety	单株薯质量 Weight per cassava plant/kg	单株薯数 Number of cassava per plant	鲜薯淀粉率 Fresh cassava starch rate/%	干物率 Dry matter rate/%	干物质含量 dry matter content/%	氢氰酸含量 Hydrocyanic acid content/(mg·kg ⁻¹)
SC9	3.76±0.09 ^b	7.33±0.58 ^{ab}	25.07±0.93 ^b	37.07±0.73 ^b	43.80±2.34 ^a	32.20 ^b
SC12	4.13±0.10 ^a	8.67±1.53 ^a	25.93±0.57 ^b	37.75±0.42 ^b	43.30±1.87 ^a	48.32 ^a
SC6068	3.31±0.12 ^c	5.67±0.58 ^b	27.53±0.46 ^a	38.91±0.36 ^a	43.98±3.73 ^a	36.50 ^b

注: 不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference (P<0.05).

表 3 3 个品种食味评价得分
Tab. 3 Taste evaluation scores of three varieties

品种 Variety	香度 Fragrance	苦度 Bitterness	甜度 Sweetness	粉度 Powder degree	黏度 Viscosity	纤维感 Fibrous	总分 Total score	排名 Ranking
SC9	9.10	9.30	9.30	9.00	9.00	9.00	54.70	1
SC6068	8.65	8.42	8.69	9.50	7.12	8.00	50.38	2
SC12	7.60	8.20	7.20	8.90	7.60	8.00	47.50	3

1.3 数据处理
采用 Excel 2016 软件计算均值及标准差, 利用 IBM SPSS Statistics 20 软件进行单因素方差分析, 利用 OriginPro 2024b 软件进行绘图和相关性分析, 相关性分析采用皮尔逊 (Pearson) 相关系数。

2 结果与分析

2.1 3 个品种主要农艺性状差异分析

3 个品种的单株薯质量、单株薯数、鲜薯淀粉率和干物率差异显著 (表 2)。3 个品种中 SC12 的单株薯质量和单株薯数最高, 平均单株结薯为 8.67 个, 薯质量为 4.13 kg, 单株薯质量显著高于 SC9 和 SC6068, SC6068 最低, 单株结薯仅有 5.67 个, 薯质量为 3.31 kg。SC6068 的鲜薯淀粉率和干物率最高, 分别为 27.53%和 38.91%, 显著高于 SC9 和 SC12, 3 个品种的干物质含量差异不显著。这表明 3 个品种中 SC12 具有较高的产量, 而 SC6068 虽然产量较低但鲜薯淀粉含量高。3 个品种的氢氰酸含量均低于 50 mg/kg, 在安全食用范围之内, 其中 SC9 的最低, 为 32.20 mg/kg, 与 SC6068 差异不显著, 显著低于 SC12 的 48.32 mg/kg。

2.2 3 个品种食味感官评价

3 个木薯品种的食味评价差异如下 (表 3)。其中 SC9 的香度、苦度、甜度、黏度、纤维感的得分均比 SC6068 和 SC12 高, 但 SC6068 的粉度比 SC9 和 SC12 高, 为 9.50 分, 从总分看, SC9 得到 54.70 分, 排在第一位, SC6068 为 50.38 分, 排在第二位, SC12 为 47.50 分, 排在第三位, 因

此 SC9 在食味上具有一定优势, 而 SC12 在食味上表现一般。

2.3 3 个品种木薯粉的糊化特性分析

3 个品种的糊化特性差异显著 (表 4)。SC9 的峰值黏度和最低黏度分别为 4023 cP 和 1475 cP, 显著高于另外 2 个品种, 崩解值、最终黏度和回生值高于其他 2 个品种, SC6068 的峰值时间和糊化温度最高。3 个品种通过升温加热后, 淀粉的结构受到破坏, 吸水膨胀能力和热稳定性下降, 亲水作用增强, 更容易与水结合形成淀粉糊。

2.4 3 个品种木薯块根蒸煮前后营养成分及升糖指数差异分析

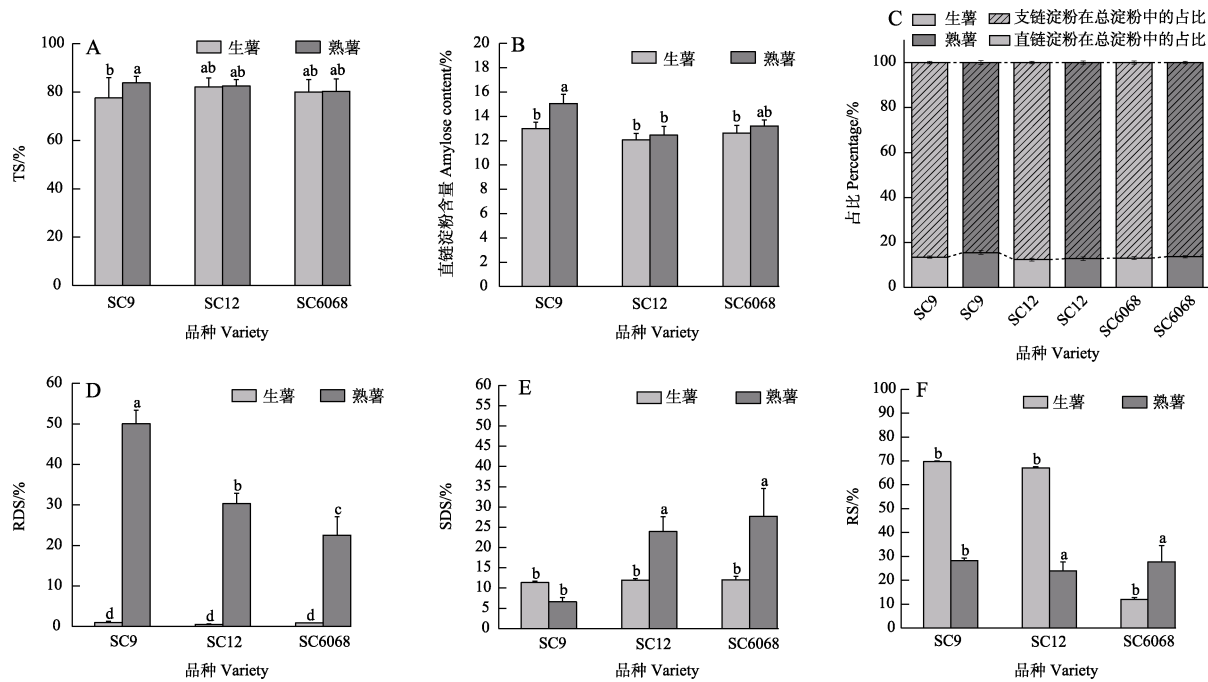
2.4.1 块根淀粉含量差异 如图 1 结果所示, 3 个品种均具有较高的淀粉含量 (77.56%~83.79%),

不同品种蒸煮后的总淀粉含量和直链淀粉含量与蒸煮前相比仅 SC9 显著差异, 其余 2 个品种差异均不显著, 直链淀粉占比与支链淀粉占比变化也不大, 而蒸煮后的 RDS 含量均表现为显著上升, 抗性淀粉 (RS) 均显著下降, SC12 和 SC6068 的 SDS 含量显著上升, 表明蒸煮处理对不同品种总淀粉含量及直/支链淀粉占比的影响较小, 对 RDS、SDS 和 RS 含量的影响较大, 即蒸煮后的木薯粉更容易被酶解消化。3 个品种块根蒸煮后的快速消化淀粉 (RDS) 和慢速消化淀粉 (SDS) 含量差异显著。SC9 熟薯的 RDS 含量最高, 为 50.02%, 极显著高于 SC12 和 SC6068, SC6068 熟薯的 RDS 最低, 为 22.54%。SC6068 熟薯的 SDS 最高, 为 27.70%, SC12 为 23.92%, 二者显著高于 SC9 的 6.57%。

表 4 3 个木薯品种的糊化特性
Tab. 4 Gelatinization characteristics of the three cassava varieties

品种 Variety	峰值黏度 Peak viscosity/cP	最低黏度 Minimum viscosity/cP	崩解值 Collapse value/cP	最终黏度 Final viscosity/cP	回生值 Back birth value/cP	峰值时间 Peak time/min	糊化温度 Desilization temperature/℃
SC9	4023±163 ^a	1475±37 ^a	2547±134 ^a	2141±63 ^a	665±26 ^a	3.96±0.04 ^{ab}	72.50±0.41 ^b
SC12	3568±35 ^b	1279±13 ^b	2289±23 ^{ab}	1924±27 ^b	645±15 ^a	3.73±0.02 ^b	72.23±0.15 ^b
SC6068	3418±115 ^b	1301±25 ^b	2117±91 ^b	1922±49 ^b	621±25 ^a	4.03±0.03 ^a	74.51±0.18 ^a

注: 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).



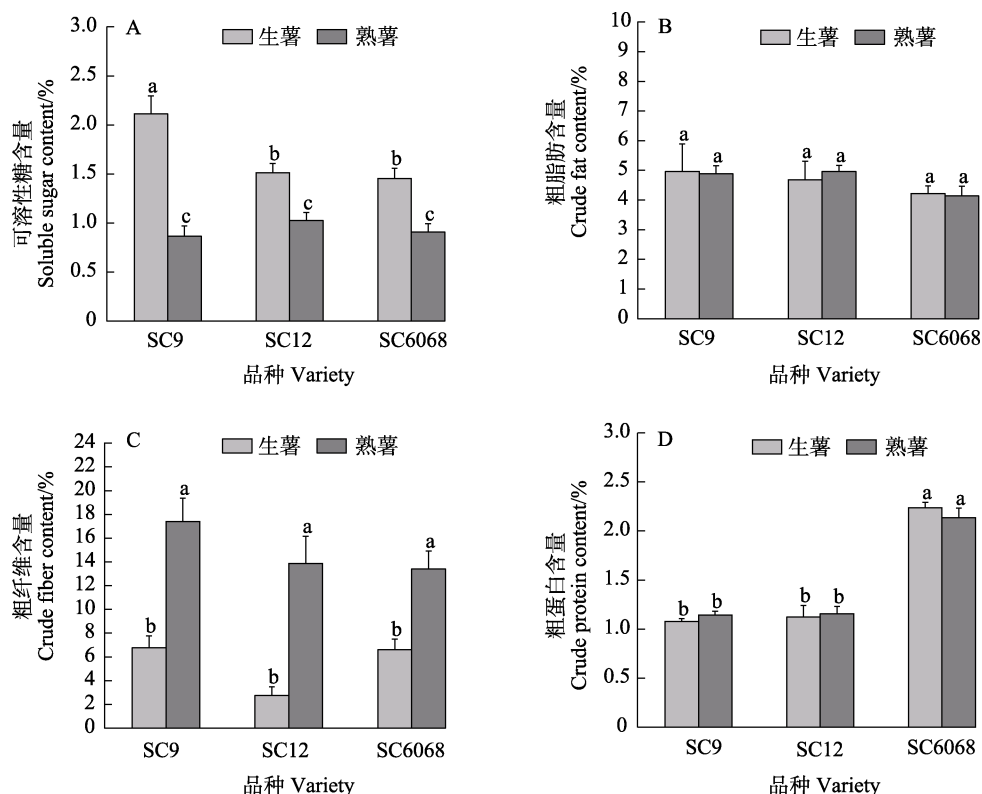
不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 1 3 个木薯品种蒸煮前后淀粉含量差异

Fig. 1 Differences in starch content before and after cooking of three cassava varieties

2.4.2 其他品质性状差异分析 不同品种间及蒸煮前后的可溶性糖、粗脂肪、粗纤维和粗蛋白含量差异显著 (图 2)。3 个品种中 SC9 鲜薯的可溶性糖含量最高, 为 2.11%, 显著高于 SC12 (1.51%) 和 SC6068 (1.45%), 而蒸煮后的可溶性糖含量均显著下降。SC9 和 SC6068 品种中的粗脂肪含量

蒸煮后有不同程度下降, 其中 SC9 的鲜薯粗脂肪含量最高, 为 4.97%, 蒸煮后降低到 4.88%。3 个品种鲜薯的粗纤维含量在 2.76%~6.77%之间, 蒸煮后显著上升至 13.41%~17.40%, 升高了 2~3 倍。SC6068 蒸煮前后的粗蛋白含量均显著高于 SC9 和 SC12, 分别为 2.24%和 2.14%。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 2 3 个木薯品种蒸煮前后其他品质性状差异

Fig. 2 Other quality-trait differences before and after cooking of three cassava varieties

2.4.3 体外升糖指数差异 图 3 结果表明, 3 个品种蒸煮前后的升糖指数 (GI) 具有显著差异, 蒸煮前 SC9、SC12、SC6068 的 GI 分别为 42.6、43.5 和 43.4, 均低于 55, 属于低升糖指数食物, 蒸煮后 GI 分别显著上升至 69.4、66.9 和 64.0, SC6068 升糖指数最低, 排在第一位, SC9 和 SC12 的升糖指数显著高于 SC6068, 排在第二和第三位, 从蒸煮前和蒸煮后的淀粉消化率曲线可以明显看出, 熟木薯比生木薯更容易被消化释放葡萄糖, 释放速率由快到慢, 而生木薯随时间的延长消化速率基本不变, 虽然蒸煮后 GI 值升高。

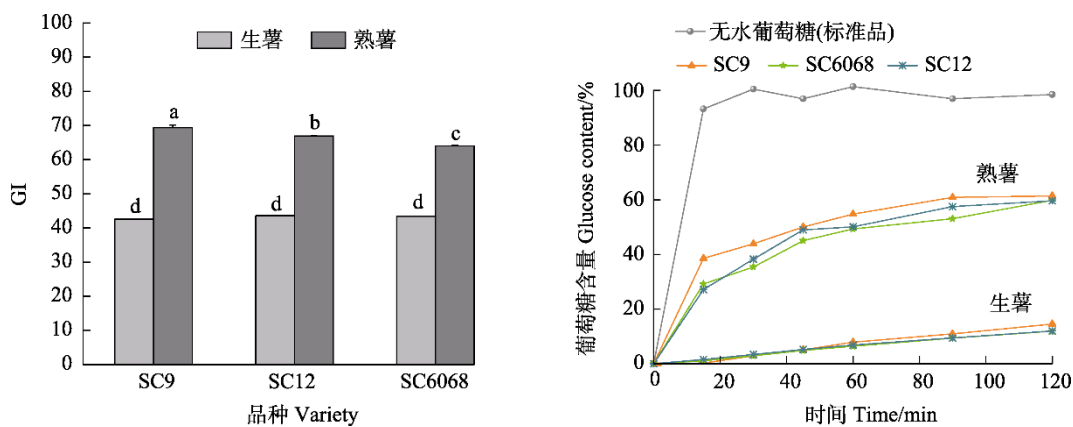
2.5 木薯块根的升糖指数与各营养成分的相关性分析

木薯块根 GI 值受到多个指标影响 (图 4)。

在淀粉方面, GI 与 RDS 呈极显著正相关, 相关系数为 0.95, 与 RS 呈极显著负相关, 相关系数为 -0.99。在其他营养成分方面, GI 与粗纤维含量呈极显著正相关, 相关系数为 0.95; 与可溶性糖呈显著负相关, 相关系数为 -0.88。在糊化特征中, GI 与峰值黏度、崩解值、峰值时间、糊化温度呈极显著负相关, 相关系数分别为 -0.95、-0.95、-0.94 和 -0.99; 与回生值呈极显著正相关, 相关系数为 0.96; 与最低黏度呈显著负相关, 相关系数为 -0.91。

3 讨论

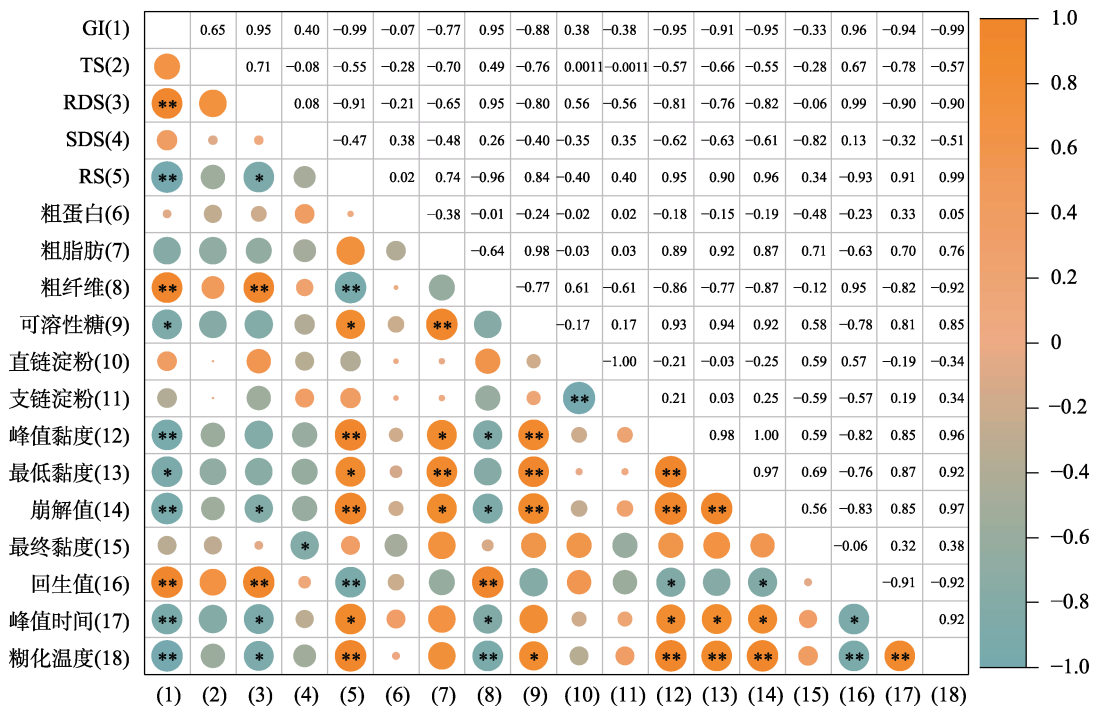
木薯升糖指数的评价是筛选低升糖指数食用木薯种质的前提。本研究选取了 3 种广受欢迎的食用木薯品种, 这些品种以其低氢氰酸含量、高



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 3 3 个木薯品种蒸煮前后升糖指数差异

Fig. 3 Differences in the glycemic index before and after cooking of three cassava varieties



*表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。
* indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

图 4 木薯块根升糖指数与各营养成分的相关性分析

Fig. 4 Analysis of correlation between glycemic index and each nutrient composition in cassava block root

淀粉含量和优良的口感（软糯且香甜）而受到市场的青睐，发现未经烹饪处理的木薯粉具有更低的 GI 值，属于低 GI 食品，采用蒸煮法作为加工手段，木薯样品的 GI 值显著增加，这可能是与蒸煮后样品中总碳水化合物含量的增加有关，这一结果与已报道文献^[26]相一致。多项研究表明抗性淀粉具有预防糖尿病和调节肠道菌群的作用，与升糖指数间存在负相关关系，本研究结果与此相符^[27-29]。此外，传统的高碳水化合物食物食用后

会导致血糖快速升高，如煮熟的长粒茉莉香米 GI 为 91.08^[30]，甘薯干为 77.50~99.49^[31]；而本研究中的木薯与之不同，3 个木薯品种蒸煮前 GI 在 42.6~43.5 之间，处于低升糖指数范围，蒸煮后升至 64.0~69.4，虽大幅增加，但均未超过 70，处于中升糖指数范围，说明木薯在低升糖食品开发中相对更具优势。

GI 值的确定是一个复杂的过程，受多种因素影响，在评价食用木薯的 GI 时，除了品种差异、

生长周期和栽培条件外,还需关注指标之间的相互作用,本研究对不同品种的淀粉和营养成分进行相关性分析,可知RDS、RS、粗纤维、糊化特性等是影响升糖指数的主要因素。经过热处理后,大部分淀粉解聚成更小的颗粒^[32],糊化度增加,淀粉颗粒膨胀、变形、破裂,分子有序性的减弱和双螺旋结构的解离导致更容易被酶水解^[33],使得RDS在总淀粉中的比例增加,RS随之减少,GI值升高。同时蒸煮会加速多糖分子的糖苷键断裂,释放寡糖,提高纤维含量^[34],蒸煮还能改变纤维的形态,使其更利于消化道中的酶降解。热处理使木薯的峰值黏度明显降低,这与GOMES等^[35]的研究一致,而崩解值的显著降低表示木薯粉具有更强的耐高温能力,稳定性增加,本研究中SC9具有最高的峰值黏度和崩解值,说明该品种淀粉机械稳定性更好,在食品加工中能形成更黏稠的食品,在口感和风味上相对其他品种更具优势,另外,SC9有最高的回生值,说明在回生过程中更容易形成抗性淀粉从而增加饱腹感,适合减肥人群食用。

参考文献

- [1] 张振文,李开绵,叶剑秋,许瑞丽.木薯光合作用特性研究[J].云南大学学报(自然科学版),2007(6):628-632.
ZHANG Z W, LI K M, YE J Q, XU R L. Studies on the characteristics of cassava photosynthesis[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2007(6): 628-632. (in Chinese)
- [2] 陈松笔,蔡杰,安飞飞,朱文丽,罗秀芹,薛晶晶,薛茂富,李汉丰,韦卓文,黄三文,李开绵.木薯育种现状及发展趋势[J].中国科学:生命科学,2024,54(10):1833-1842.
CHEN S B, CAI J, AN F F, ZHU W L, LUO X Q, XUE J J, XUE M F, LI H F, WEI Z W, HUANG S W, LI K M. Current status and development trend of cassava breeding[J]. Scientia Sinica (Vita), 2024, 54(10): 1833-1842. (in Chinese)
- [3] CHAUMING L. 巴西木薯[J].上海蔬菜,2024(5):106-108.
CHAUMING L. Brazilian cassava[J]. Shanghai Vegetables, 2024(5): 106-108. (in Chinese)
- [4] XU Y, LU J L, LI M, WANG T G, WANG K, CAO Q Y, DING Y, XIANG Y, WANG S Y, YANG Q Q, ZHAO X, ZHANG X Y, XU M, WANG W Q, BI Y F, NING G. Diabetes in China part 1: epidemiology and risk factors[J]. The Lancet Public Health, 2024(9): 1089-1097.
- [5] MAHR U N, LADISLAUS M K, FAIMA A K, FAHAD A A, MUHAMMAD A R, IMTIAZ H, ANGEL A, ELENA B, JOAO M R. Impact of resistant starch: absorption of dietary minerals, glycemic index and oxidative stress in healthy rats[J]. Clinical Nutrition ESPEN, 2024, 62: 1-9.
- [6] JENKINS D J, WOLEVER T M, TAYLOR R H, BARKER H, FIELDEN H, BALDWIN J M, GOFF D V. Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1981, 34(3): 362-366.
- [7] 王贞,陈和清.低升糖指数饮食与新血管疾病的关系[J].实用心脑血管病杂志,2015,23(2):159-160.
WANG Z, CHEN H Q. The relationship between low glycemic index diet and neovascular disease[J]. Practical Journal of Cardiac Cerebral Pneumal and Vascular Disease, 2015, 23(2): 159-160. (in Chinese)
- [8] BONSEMBLANTE L, TARGHER G, MAFFEIS C. Type 2 diabetes and dietary carbohydrate intake of adolescents and young adults: what is the impact of different choices[J]. Nutrients, 2021, 13(10): 3344.
- [9] XU T, ZHONG Y H, CHEN Q, WU L P, JI S Y, YANG B W, ZHANG Y Z, SHEN J F, LU B Y. Modulating the digestibility of cassava starch by esterification with phenolic acids[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107432.
- [10] SOMARATNE G M, PRASANTHA B D R, DUNUWILA G R, CHANDRASEKARA A, WIJESINGHE D G N G, GUNASEKARA D C S. Effect of polishing on glycemic index and antioxidant properties of red and white basmati rice[J]. Food Chemistry, 2017, 237: 716-723.
- [11] ZHU J, LIU Q, GILBERT R G. The effects of chain-length distributions on starch-related properties in waxy rices[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 339: 122264.
- [12] 沈彤,杨莹莹,张烨,汪瑶,王淑娟,陶志杰.低糖老式蛋糕研制及其升糖指数测定[J].科技创新与应用,2023,13(23):80-83.
SHEN T, YANG Y Y, ZHANG Y, WANG Y, WANG S J, TAO Z J. Development of low sugar old-fashioned cake and determination of its glycemic index[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(23): 80-83. (in Chinese)
- [13] 蔡攀福.低升糖指数高纤维面条的研发[D].广州:华南理工大学,2017.
CAI P F. Development of high-fiber noodles with low glycemic index[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [14] 吴琼,吴兴阁,刘静.基于食品加工技术降低淀粉制品升糖指数的研究进展[C]//中国家用电器协会.2022年中国家用电器技术大会论文集.美的集团中央研究院,2023:2420-2423.
WU Q, WU X G, LIU J. Review on reducing the Glycemic Index Value (GI) of starch products based on food process-

- ing technology[C]//China Household Electrical Appliances Association. Proceedings of the 2022 China Household Appliance Technology Conference. Midea Corporate Research Center, 2023: 2420-2423. (in Chinese)
- [15] 莫志军, 蒋林青, 胡继银, 杨烨, 孙小成, 蒋小军, 陶卫, 王明, 张冬娥, 欧丽君. 低升糖指数水稻研究进展及发展前景[J]. 杂交水稻, 2023, 38(5): 6-13.
MO Z J, JIANG L Q, HU J Y, YANG Y, SUN X C, JIANG X J, TAO W, WANG M, ZHANG D E, OU L J. Research progress and development prospects of low glycemic index rice[J]. Hybrid Rice, 2023, 38(5): 6-13. (in Chinese)
- [16] WU X H, LIU Y W, LIU J, CAO L S, XIE J H, LIU X J. Research progress in low glycemic index ingredients in wheat based food processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014(17): 362-365.
- [17] 燕子豪, 汪丽萍, 谭斌, 刘艳香, 乔聪聪, 田晓红, 郑先哲. 谷物食品血糖生成指数研究进展[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(3): 147-156.
YAN Z H, WANG L P, TAN B, LIU Y X, QIAO C C, TIAN X H, ZHENG X Z. Advances in glycemic index of cereal foods[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(3): 147-156. (in Chinese)
- [18] 李华, 吴庆峰, 薛晴晴, 李玉栋, 刘鑫慧. 低血糖指数食品的研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 119-126.
LI H, WU Q F, XUE Q Q, LI Y D, LIU X H. Research progress on low-glycemic index foods[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(2): 119-126. (in Chinese)
- [19] LES C. Assessing the glycemic impact of starch by *in vitro* methods[J]. Food Bioscience, 2024(60): 104434.
- [20] 王旭, 张继月, 张雨桐, 陈小爱, 徐飞, 张彦军. 特色热带作物淀粉研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2024, 54(10): 1907-1938.
WANG X, ZHANG J Y, ZHANG Y T, CHEN X A, XU F, ZHANG Y J. Research progress of starch from characteristic tropical crops[J]. Scientia Sinica (Vita), 2024, 54(10): 1907-1938. (in Chinese)
- [21] MASUKO T, MINAMI A, IWASAKI N, MAJIMA T, NISHIMURA S I, LEE Y C. Carbohydrate analysis by a phenol-sulfuric acid method in microplate format[J]. Analytical Biochemistry, 2005, 339(1): 69-72.
- [22] International Organization for Standardization. Internationale name: riz determination de la teneur en amylose: ISO6647: 1987[S]. Suisse: ISO, 1987.
- [23] 肖鑫辉, 叶剑秋, 王明, 许瑞丽, 张洁, 万仲卿. 木薯种质资源淀粉特性分析与评价[J]. 热带作物学报, 2021, 42(2): 339-348.
XIAO X H, YE J Q, WANG M, XU R L, ZHANG J, WAN Z Q. Analysis on starch properties in cassava germplasm resources[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(2): 339-348. (in Chinese)
- [24] 叶剑秋, 张洁, 肖鑫辉, 吴传毅, 薛茂富, 李开绵. 54 份哥伦比亚木薯种质的育种特性评价[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2017, 51(6): 809-816, 824.
YE J Q, ZHANG J, XIAO X H, WU C Y, XUE M F, LI K M. Breeding characteristics evaluation of 54 cassava germplasm from Columbia[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition), 2017, 51(6): 809-816, 824. (in Chinese)
- [25] 段惠敏. 低升糖型马铃薯品种(系)筛选[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022.
DUAN H M. Screening of low glycemic index potato varieties (lines)[D]. Lanzhou: College of Agriculture Gansu Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [26] ABHILASHA S, PINKY R, MILAN K L, BRAJESH S, NITASHA T, SUSHIL S C, DHARMENDRA K S D. Effect of cooking methods on glycemic index and *in vitro* bioaccessibility of potato (*Solanum tuberosum* L.) carbohydrates[J]. LWT-Food Science & Technology, 2020(127): 109363. (in Chinese)
- [27] 董志雄, 郑恺, 丁文平, 常宪辉, 陈曦. RS2 型抗性淀粉对米线品质及消化特性的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(6): 131-138.
DONG Z X, ZHENG K, DING W P, CHANG X H, CHEN X. Effects of RS2 resistant starch on the quality and digestive characteristics of rice noodles[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(6): 131-138. (in Chinese)
- [28] 涂师运, 王娟, 盛鸥. 超微/普通粉碎下香蕉粉及其抗性淀粉的性质比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 199-206.
TU S Y, WANG J, SHENG O. Comparison of the properties of banana powder and its resistant starch under ultrafine/ordinary crushing[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 199-206. (in Chinese)
- [29] ZHU Y Y, DONG L, HUANG L, SHI Z X, DONG J L, YAO Y, SHEN R L. Effects of oat β -glucan, oat resistant starch, and the whole oat flour on insulin resistance, inflammation, and gut microbiota in high-fat-diet-induced type 2 diabetic rats[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 69: 1-11.
- [30] ZENG J T, CHOI N D, RYU H S. Determining the optimal recipe for long-grain jasmine rice with sea tangle *Laminaria japonica*, and its effect on the glycemic index[J]. Fisheries and Aquatic Sciences, 2014, 17(1): 47-57.
- [31] LIU B Y, ZHANG Z G, HU W W, ZHANG C C, CAO Y, CAI J, WU W C. Sensory qualities and digestibility of traditional Chinese dried sweet potato prepared with different

- cultivars and the relationship with starch characteristics[J]. *Applied Food Research*, 2025, 5(1): 100656.
- [32] MONICA R M, PABLO D R, ANA Z Z S G, MA D L P S C, JOSE A A A, JOSE J C P, GEORGINA C D. Morphometric and crystallinity changes on jicama starch (*Pachyrhizus erosus*) during gelatinization and their relation with *in vitro* glycemic index[J]. *Starch-Starke*, 2017, 69: 7-8.
- [33] YAN X D, DAVID J M, LUO S J, LIU C M, YE J P. Recent advances in the impact of gelatinization degree on starch: structure, properties and applications[J]. *Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides*, 2024, 340: 122273.
- [34] 吴娜娜, 王磊鑫, 吕莹果, 谭斌. 挤压蒸煮加工对脱脂米糠可溶膳食纤维增加及膳食纤维结构性质的影响[J]. *粮油食品科技*, 2022, 30(2): 77-84.
- WU N N, WANG L X, LYU Y G, TAN B. Effect of extrusion cooking on the enhancement of soluble dietary fiber and structure properties of dietary fiber in defatted rice bran[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2022, 30(2): 77-84. (in Chinese)
- [35] GOMES A M M, SILVA C E M D, NAGILA M P S. Effects of annealing on the physicochemical properties of fermented cassava starch (polvilho azedo)[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005, 60(1): 1-6.