

基于动态血糖监测技术的糖缓释主食餐后血糖波动特性研究

李 凯^{1,2} 王世龙^{1,2} 朱 令^{1,2} 尹卓明^{1,2} 王 蕾³ 刘东波^{1,2}

(1. 湖南农业大学园艺学院, 湖南 长沙 410128; 2. 国家中医药管理局亚健康干预技术实验室, 湖南长沙 410128; 3. 长沙能峰生物科技有限公司, 湖南 长沙 410128)

摘要: [目的] 探究动态血糖监测系统 (continuous glucose monitoring system, CGMS) 对进食糖缓释主食餐后血糖波动的影响及特点。[方法] 共纳入 8 名健康成年受试者, 进行为期 15 d 的连续血糖监测 (continuous glucose monitoring, CGM) 并采集餐后静脉血样以观察血糖波动情况。试验期间, 受试者在第 2 天和第 14 天早晨空腹分别摄入葡萄糖水 (对照食物), 第 5、8、11 天早晨空腹分别摄入糖缓释主食、普通大米和低 GI 高抗性淀粉大米, 持续监测餐后 4 h 动态血糖变化及测定静脉血血糖值。监测指标包括葡萄糖目标范围内时间 (time in range within 4 h postprandial, TIR_{4h})、血糖恢复至空腹水平时长 (time to return to fasting blood glucose levels within 4 h postprandial, Tb_{4h})、血糖生成指数 (4-h postprandial glycemic index, GI_{4h}) 及食物血糖负荷 (4-h postprandial glycemic load, GL_{4h})。[结果] 在 5 次食物测试中, 葡萄糖水平平均 TIR_{4h} 为 85.6%, 而糖缓释主食的餐后 TIR_{4h} 达到了 100%, 显著高于葡萄糖水 ($P < 0.05$) 且优于其他 2 种食物。葡萄糖水的平均 Tb_{4h} 值为 112 min, 糖缓释主食为 167 min, 显著高于葡萄糖水 ($P < 0.05$)。动态血糖监测 3 种受试食物 GL_{4h} 结果分别为 55, 60, 47, 普通大米与糖缓释主食 GL_{4h} 值高于低 GI 高抗性淀粉大米, 静脉血血糖监测 3 种受试食物 GL_{4h} 结果分别为 52, 64, 40, 普通大米与糖缓释主食 GL_{4h} 值显著高于低 GI 高抗性淀粉大米 ($P < 0.05$)。基于以上结果, 糖缓释主食的 TIR_{4h} 值为 100%, 显著高于葡萄糖水且优于其他 2 种食物, Tb_{4h} 值为 167 min 显著高于葡萄糖水, GL_{4h} 值显著高于低 GI 抗性淀粉大米。[结论] 糖缓释主食能够显著降低人体餐后血糖波动幅度, 同时保证足够的能量供应。

关键词: 糖缓释主食; 血糖; 动态变化; 血糖生成指数; 血糖负荷

Characterization of postprandial blood glucose fluctuations following consumption of slow-release carbohydrate staple foods by continuous glucose monitoring

LI Kai^{1,2} WANG Shilong^{1,2} ZHU Ling^{1,2} YIN Zhuoming^{1,2} WANG Lei³ LIU Dongbo^{1,2}

(1. College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. State Key Laboratory of Subhealth Intervention Technology, Changsha, Hunan 410128, China;

3. Changsha Nengfeng Biotechnology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects and characteristics of the continuous glucose monitoring system (CGMS) on postprandial blood glucose fluctuations following the consumption of slow-release carbohydrate staple foods. [Methods] This study enrolls eight healthy adult participants for 15-day continuous glucose monitoring (CGM) and collects postprandial venous blood samples to observe blood glucose fluctuations. During the trial, participants consume control food (glucose solution) in the morning on days 2 and 14 after

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 81773850)

通信作者: 刘东波 (1970—), 男, 湖南农业大学教授, 博士。E-mail: chinasaga@163.com

收稿日期: 2025-01-25 **改回日期:** 2025-05-20

引用格式: 李凯, 王世龙, 朱令, 等. 基于动态血糖监测技术的糖缓释主食餐后血糖波动特性研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 144-149.

Citation: LI Kai, WANG Shilong, ZHU Ling, et al. Characterization of postprandial blood glucose fluctuations following consumption of slow-release carbohydrate staple foods by continuous glucose monitoring[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 144-149.

fasting and slow-release carbohydrate staple foods, regular rice, and low-GI high-resistant starch rice on days 5, 8, and 11, respectively. Postprandial 4 h blood glucose changes and venous blood glucose levels are monitored. Key metrics include time in range within 4 h postprandial (TIR_{4h}), time to return to fasting blood glucose levels within 4 h postprandial (Tb_{4h}), 4 h postprandial glycemic index (GI_{4h}), and 4 h postprandial glycemic load (GL_{4h}). **[Results]** Among the five food tests, the control food (glucose solution) shows the TIR_{4h} of 85.6%, while the slow-release carbohydrate staple foods achieves the TIR_{4h} of 100%, which is higher than that of glucose solution ($P<0.05$) and superior to the other two food types. The average Tb_{4h} of the glucose solution is 112 min, whereas that of the slow-release carbohydrate staple foods is 167 min, longer than the control ($P<0.05$). CGMS-derived GL_{4h} values for the three test foods are 55, 60, and 47, with regular rice and slow-release carbohydrate staple foods showing higher GL_{4h} than low-GI high-resistant starch rice. Venous blood measurements yield GL_{4h} values of 52, 64, and 40, with regular rice and slow-release carbohydrate staple foods showing higher GL_{4h} than low-GI high-resistant starch rice ($P<0.05$). These findings indicate that the slow-release carbohydrate staple foods exhibit higher TIR_{4h} (100%), Tb_{4h} (167 min), and GL_{4h} than low-GI high-resistant starch rice. **[Conclusion]** Slow-release carbohydrate staple foods significantly attenuate postprandial blood glucose fluctuations while achieving sustained energy provision in the human body.

Keywords: slow-release carbohydrate staple foods; blood glucose; dynamic changes; glycemic index; glycemic load

近年来,全球糖尿病发病率呈显著上升趋势,其主要特征为持续的高血糖状态。对于糖尿病患者而言,控制餐后血糖水平对其治疗有重要作用^[1]。在现代人的日常主食中,精制米面制品占据了重要地位,这些主食通常含有较高比例的快消化淀粉,如白粥在 90~120 min 内即可完全消化,与白糖的吸收速率相近^[2]。糖尿病患者在进食精制米面制品后常出现显著的血糖波动,这种波动不仅加剧胰岛细胞的凋亡过程,同时也加剧氧化应激反应及血管内皮细胞功能损害,进而加速糖尿病并发症的进程,对患者的健康构成严重威胁^[3]。药物控制糖尿病患者血糖存在一些副作用,如低血糖反应、胃肠道不适等^[4]。而合理选择主食,如全谷物、杂豆类等,可以有效帮助糖尿病患者控制血糖^[5]。因此,糖尿病患者群体对能够实现营养均衡且有助于稳定血糖波动的主食需求正日益凸显,其重要性愈发显著。糖缓释主食具有低升糖以及高可利用碳水化合物特性而受到广泛关注,现行《糖缓释主食》团体标准规定糖缓释主食以谷物加工品为主,添加辅料和食品添加剂,经多道工艺加工而成,血糖生成指数 (glycemic index, GI) ≤ 55 ,可利用碳水化合物 ≥ 70 g/100 g^[6]。尽管该标准反映了糖缓释主食具有低升糖特性以及充足的可利用碳水化合物含量,但其未充分体现人体消化过程中葡萄糖的总体释放量及持续且缓慢释放的特性。除此之外,按照团体标准中的通过静脉血观察血糖变化的方式未能持续反映整个消化过程中血糖的变化情况,因此使用动态血糖监测系统(CGMS)持续监测餐后血糖波动情况。前期体外淀粉消化预试验显示,糖缓释主食淀粉在体外消化 2 h 后仍有葡萄糖释放,接近 4 h 淀粉才消化完全,而大米淀粉 2 h 已基本消化完全。因此,为解决糖缓释主食在人体内的消化过程中如何引起血糖波动及葡萄糖总释放量多少的问题,研究拟通过持续监测受试者摄入糖缓释主食餐后 4 h 血糖波动情况,并设计计算相关指标,以期对人体摄入糖缓释主食后的餐后血糖波动情况进行系统评估。

传统血糖监测方法(如毛细血管和静脉血糖监测)仅

能提供瞬时血糖值,无法持续监测血糖波动,难以全面评估低血糖和高血糖风险时段^[7]。连续血糖监测 (continuous glucose monitoring, CGM) 技术在中国已成熟并被广泛应用,在糖尿病管理中发挥重要作用^[8]。试验使用的 CGMS 产品符合 2021 年国家卫生健康委员会发布的血糖监测系统标准,已获国家药品监督管理局第三类医疗器械注册证。该系统通过皮下传感器监测组织间隙液葡萄糖水平,每 3 min 提供一次血糖数值,全面准确反映全天血糖变化趋势^[9]。葡萄糖目标范围内时间 (min in range, TIR) 是 CGM 的关键评估指标^[10],定义为血糖水平维持在 3.9~10.0 mmol/L 目标范围内的时间占比。餐后 4 h 内葡萄糖目标范围内时间 (min in range at 4 hours postprandial, TIR_{4h}) 可用于评估短期血糖波动,反映餐后 4 h 内血糖的平稳程度。餐后 4 h 内血糖恢复至空腹水平时长 (min to return to fasting blood glucose levels at 4 hours postprandial, Tb_{4h}) 可以反映食物在人体餐后 4 h 内的消化和吸收的动态水平^[11]。GI 的定义为个体摄入含 50 g 可利用碳水化合物的食物后,一定时间(至少 2 h)内血糖应答曲线下面积与摄入等量参考食物(如葡萄糖)后的比值,以百分比表示,分为高 GI ($GI>75$)、中等 GI ($55\leq GI\leq 75$) 和低 GI ($GI<55$) 食物^[12],餐后 4 h 血糖生成指数 (food glycemic load at 4 hours postprandial, GL_{4h}) 能够量化糖缓释主食中淀粉缓慢释放葡萄糖的效果^[13]。血糖负荷 (glycemic load, GL) 综合考虑了食物的 GI 值及碳水化合物含量,更全面地反映了人体摄入食物后葡萄糖的总释放水平,餐后 4 h 食物血糖负荷 (food glycemic load 4 hours postprandial min, GL_{4h}) 可反映摄入食物后葡萄糖总释放量^[14]。综合 TIR_{4h} 、 Tb_{4h} 、 GL_{4h} 3 个指标能够为糖缓释主食葡萄糖的总体释放量及缓慢释放特性提供依据。

研究拟连续监测 8 名健康成年受试者摄入葡萄糖水、糖缓释主食、普通大米、低 GI 大米 4 种受试食物餐后 4 h 血糖波动情况,通过静脉血糖验证动态血糖监测的准确性,并通过 TIR_{4h} 、 Tb_{4h} 、 GL_{4h} 等指标对进食糖缓释主食后血糖波动进行全面的评价,以期对相关产品的开发和市

推广提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

糖缓释主食(复合营养米):长沙能峰生物科技有限公司;

普通大米:益海嘉里金龙鱼食品集团股份有限公司;

低 GI 大米:云南丰之盛农业科技有限公司;

一水葡萄糖:重庆和平制药有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

动态血糖仪:I3 型,三诺生物传感股份有限公司;

电饭锅:CKD-Z50 型,广东威成坤电器有限公司;

电子分析天平:AE-2204 型,湘仪天平仪器设备有限公司。

1.2 方法

1.2.1 研究对象 招募试验健康受试者 8 名,男女各 4 名,受试者信息见表 1,编号为 8 的受试者佩戴的 CGMS 在测试期的第 2 天脱落,故退出试验,其余受试者均完成了整个试验过程,受试者年龄在 23~27 岁,体质指数(body mass index, BMI)为 19.3~23.7 kg/m²。正式开始试验前,受试者进行口服糖耐量试验正常^[15],对受试者进行培训,告知其注意事项并签订知情同意书。该研究已获湖南农业大学伦理委员会审批同意,编号为 2022 第 78 号。

1.2.2 纳入与排除标准 参照 2019 年实施的食物血糖生成指数测定方法^[16]的纳入条件:健康成年人(年龄在 18~60 岁),男女各半,非孕妇及乳母;BMI 在正常范围内(18.5~24.0 kg/m²);无糖尿病史(或糖耐量受损),无其他代谢性疾病、消化系统疾病、内分泌系统疾病和精神疾病

表 1 受试者基本信息

Table 1 Basic information of subjects

受试者 编号	性别	年龄/岁	身高/cm	体重/kg	BMI/ (kg·m ⁻²)
1	女	24	156	47	19.3
2	男	27	170	62	21.5
3	女	23	150	47	20.9
4	男	26	169	61	21.4
5	女	25	158	49	19.6
6	女	24	165	53	19.5
7	男	24	185	81	23.7
8	男	25	165	60	22.0

等;无对待测食物过敏史和不耐受史;近 3 个月内未服用影响糖耐量的营养素补充剂,以及未口服避孕药、乙酰水杨酸、类固醇、蛋白酶抑制剂和抗精神病药等药物,能够耐受至少 10 h 的空腹状态。排除标准:在纳入条件之外的情况。

1.2.3 样品信息 此次试验样品为复合营养米(一款糖缓释主食),普通大米,低 GI 抗性淀粉大米(低 GI 大米),一水葡萄糖,样品基本成分测定结果如表 2 所示。葡萄糖水含 50 g 可利用碳水对应该产品为 55 g;复合营养米每 100 g 含有碳水化合物 81.2 g,计算可得 50 g 可利用碳水化合物对应该产品 61.6 g;普通大米每 100 g 含有碳水化合物 75 g,计算可得 50 g 可利用碳水化合物对应该产品 66.7 g;低 GI 抗性淀粉大米(低 GI 大米)每 100 g 含有碳水化合物 75.4 g,计算可得 50 g 可利用碳水化合物对应该产品 66.3 g。

表 2 样品基本成分信息

Table 2 Basic composition information of samples

样品名称	可利用碳水化合物/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)	碳水化合物/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)	能量/ (10 ⁻² kJ·g ⁻¹)	蛋白质/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)	脂肪/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)	膳食纤维/ (10 ⁻² g·g ⁻¹)
复合营养米	75.00	81.2	1 566	7.2	1.7	2.92
普通大米	78.28	75.0	1 412	5.0	1.4	0.00
低 GI 大米	70.10	75.4	1 445	5.6	0.7	5.30

1.2.4 试验方法 在试验前 1 d,8 位受试者统一佩戴 CGMS 并激活。在为期 15 d 的 CGMS 佩戴期间,受试者保持规律的饮食和作息习惯。受试食物进食日期安排:第 2 天进食葡萄糖水,第 5 天进食复合营养米,第 8 天进食普通大米,第 11 天进食低 GI 大米,第 14 天进食葡萄糖水。在食用受试食物的前 1 d,受试者需避免摄入大量高膳食纤维食物,并在测试前 1 d 禁止饮酒,晚上 10:00 后开始禁食禁水。测试当天早晨起床后,受试者应避免剧烈运动。在测试当天早上 7:40 左右,受试者需空腹进食,受试者到达测试地点后静坐 10 min,于 7:40 左右开始进食受试食

物。记录每位受试者第一口进食时间,并在 5 min 内完成进食,受试者可随餐饮用 200 mL 水,并在进食后静坐 4 h。分别在空腹(进食前 5 min),以及进食后 15,30,45,60,90,120,150,180,210,240 min 时抽取受试者的静脉血样,以观察受试者餐后 4 h 的血糖数据变化。

受试品(复合营养米、普通大米、低 GI 大米)均采用电饭锅蒸煮制备。葡萄糖水制备:将 55 g 一水葡萄糖粉末溶解于 200 mL 水中。复合营养米制备:将定量的营养米放入电饭锅中,加入冷水,米水比例为 $m_{\text{米}}:V_{\text{水}}=5:6$ (g/mL),蒸煮 25~30 min 后冷却 5 min 即可食用。普通大米的制备

方法为:将定量的大米放入电饭锅中,加入冷水,米水比例为 $m_{\text{米}}:V_{\text{水}}=5:6$ (g/mL),蒸煮 25~30 min 后冷却 5 min 即可食用。低 GI 大米制备:将定量的大米放入电饭锅中,加入冷水,米水比例为 $m_{\text{米}}:V_{\text{水}}=5:9$ (g/mL),蒸煮 25~30 min 后冷却 5 min 即可食用。

1.2.5 动态血糖变化监测 CGMS 每 3 min 可获取 1 次血糖数值,连续采集受试者餐后 4 h 的血糖数据导入 Excel,计算每位受试者的 TIR_{4h} 、 GI_{4h} 、 GL_{4h} 、 ΔC (进食待测食物后 4 h 内血糖增量变化值)、 T_{max} (餐后血糖峰值对应的时间点)、 Tb_{4h} (餐后 4 h 内血糖回到空腹时间)、 ΔC 峰值、 ΔC 谷值、 ΔC 波动值等指标。

1.2.6 静脉血血糖值测定 采集受试者血样送至湖南山水检测中心使用葡萄糖氧化酶法测得血糖值,收集血糖数据。观察每位受试者血糖餐后 4 h 波动情况,并计算 GI_{4h} 、 GL_{4h} 等指标。

1.2.7 相关计算公式

$$\Delta C = \Delta C_1 - \Delta C_2, \quad (1)$$

$$T = \frac{t}{4} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

ΔC_1 ——进食待测食物后 4 h 内血糖增量的最大值; mmol/L;

ΔC_2 ——进食待测食物后 4 h 内血糖增量的最小值; mmol/L;

ΔC ——进食待测食物后 4 h 内血糖增量变化值; mmol/L;

T ——餐后 4 h 内葡萄糖目标范围内时间占比, %;

t ——受试者餐后 4 h 血糖在 3.9~10.0 mmol/L 的时间, h。

GI_{4h} 与 GL_{4h} 的计算参照文献[16]。

2 结果与分析

2.1 餐后血糖的变化

由图 1、图 2 可知,在比较 7 名受试者分别食用 4 种待测食物后的平均血糖波动情况时,5 种食物的静脉血糖峰值出现在餐后 30 min 左右,而动态血糖监测的峰值则出现在餐后 40 min 左右。这可能是由于静脉血糖直接测量的是血液中的葡萄糖浓度,而 CGMS 则是通过监测皮下组织间液中的葡萄糖浓度来间接反映血糖水平。组织间液中的葡萄糖浓度变化相对较慢,通常滞后于血液中的葡萄糖浓度变化,一般延迟 4~10 min^[17]。动态血糖监测值普遍高于静脉血血糖值,可能是由于在炎症或运动等情况下,组织间液中的葡萄糖浓度可能受到局部代谢活动的影响,导致其浓度高于血液中的葡萄糖浓度。此外,动态血糖监测系统的传感器可能存在误差、漂移或受到干扰,这些因素都可能导致测量值偏高^[18]。受试者进食葡萄糖水后动态血糖增量的峰值为 5.17 mmol/L,另 3 种食物的峰值为 2.93、3.75、3.52 mmol/L,受试者进食葡萄糖

水后血糖增量的谷值为 -0.88 mmol/L,另 3 种食物的谷值为 0.01、-0.24、0.21 mmol/L。受试者进食葡萄糖水后静脉血糖增量的峰值为 3.17 mmol/L,另 3 种食物的峰值为 1.71、2.50、2.04 mmol/L,受试者进食葡萄糖水后血糖增量的谷值为 -0.89 mmol/L,另 3 种食物的谷值为 -0.26、-0.22、-0.28 mmol/L。根据动态血糖监测与静脉血糖的波动情况,葡萄糖水餐后血糖增量峰值明显高于其他 3 种受试食物,且进食复合营养米后的血糖波动范围明显更低,且血糖回到空腹的时间相较于葡萄糖水均有明显的延迟。

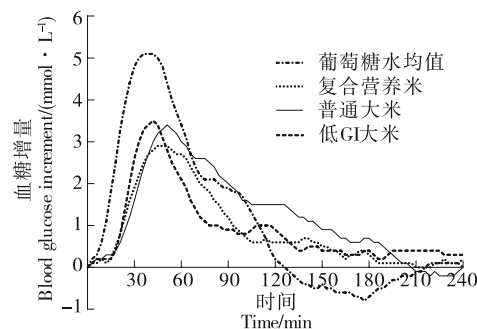


图 1 4 种食物的平均动态血糖增量

Figure 1 Average dynamic blood glucose increments across four food types

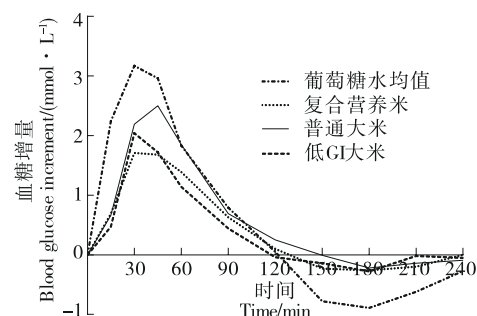


图 2 4 种食物的平均餐后静脉血糖增量

Figure 2 Average venous blood glucose increments across four food types

2.2 4 种食物的 ΔC 峰值、 ΔC 谷值、 ΔC 波动值、 T_{max} 及 Tb_{4h} 值的比较

由表 3 可知,摄入复合营养米和低 GI 大米后的 ΔC 峰值显著低于其他两种食物 ($P < 0.05$),表明这两种食物在控制餐后血糖升高方面表现更佳。 ΔC 谷值代表食物餐后血糖低于基线血糖的部分,摄入葡萄糖水后的 ΔC 谷值较低,提示其出现低血糖风险相对较高。 ΔC 波动值用于粗略评估进食后 4 h 内的血糖波动水平,尽管 3 种食品与葡萄糖水均存在显著性差异 ($P < 0.05$),但进食复合营养米和低 GI 大米的波动水平更低。在进食复合营养米、普通大米、低 GI 大米 3 种食物后,受试者 T_{max} 差异不显著,集中在 35~45 min。 Tb_{4h} 可作为评估葡萄糖缓释特性的重要

表 3 4 种食物的 ΔC 峰值、 ΔC 谷值、 ΔC 波动值、 $T_{\max}$ 值以及 Tb_{4h} 值[†]

Table 3 ΔC peak, ΔC valley, ΔC fluctuation, $T_{\max}$, and Tb_{4h} of each food type

受试食物	ΔC 峰值/(mmol·L ⁻¹)	ΔC 谷值/(mmol·L ⁻¹)	ΔC 波动值/(mmol·L ⁻¹)	$T_{\max}$ /min	Tb_{4h} /min
葡萄糖水	5.1±0.97 ^a	-0.8±1.22 ^b	5.9±1.63 ^a	36.9±24.27	112.3±6.11 ^b
复合营养米	2.9±0.96 ^b	0.0±0.15 ^{ab}	2.9±0.70 ^b	45.1±43.68	167.5±11.38 ^a
普通大米	3.7±1.06 ^{ab}	-0.2±0.41 ^{ab}	3.9±0.82 ^b	48.6±24.96	189.7±7.92 ^a
低 GI 大米	3.5±1.08 ^b	0.2±0.28 ^a	3.3±0.64 ^b	37.3±62.33	176.4±7.27 ^a

[†] 同列字母不同表示在 $P<0.05$ 水平下存在显著差异。

指标,反映了食物在人体中消化完全后血糖恢复至空腹水平所需的时间。 Tb_{4h} 指标出现在糖尿病患者自我管理 中较多^[19],患者常会关注餐后血糖是否回到餐前水平,而 Tb_{4h} 指标可反映食物完全消化的时长,并体现食物的缓慢 消化与葡萄糖缓慢释放的效果。进食 4 种食物后,受试者 Tb_{4h} 差异较大,与葡萄糖水相比,其他 3 种食物均与其有 显著性差异($P<0.05$),且均大于 160 min,表明糖缓释主 食的葡萄糖缓慢释放特性。

2.3 4 种食物 TIR_{4h} 值的比较

在 CGMS 中, TIR 是衡量血糖稳定性和安全性的关键 指标^[20]。由表 4 可知,复合营养米与葡萄糖水相比 TIR_{4h} 值 存在显著性差异($P<0.05$)。具体而言,复合营养米的餐后 血糖波动始终处于安全范围内,其 TIR_{4h} 达到了 100%,且优 于其他 3 种食物的,体现出其在餐后血糖稳定性和安全性 方面的优势。因此,建议在糖缓释主食团体标准中添加 TIR_{4h} 达到 100% 指标严格控制血糖平稳程度。

表 4 4 种食物的 TIR_{4h} 值[†]

Table 4 TIR_{4h} values of four types of food

受测食物	$TIR_{4h}/\%$	受测食物	$TIR_{4h}/\%$
葡萄糖水	85.6±9.71 ^a	普通大米	98.8±1.91 ^b
复合营养米	100.0±0.00 ^b	低 GI 大米	97.5±3.90 ^b

[†] 同列字母不同表示在 $P<0.05$ 水平下存在显著差异。

2.4 3 种食物 GI_{4h} 值的比较

GI_{4h} 能够反映食物在餐后 4 h 消化过程中葡萄糖的释 放速度及释放量。由表 5 可知,普通大米、复合营养米、低 GI 大米 3 种食物的动态血糖 GI_{4h} 值之间无显著差异,其中 普通大米的 GI_{4h} 值最高,其次是复合营养米,低 GI 大米最 低, GI_{4h} 值分别为 80,70,67。3 种食物的静脉血糖 GI_{4h} 值 无显著差异,普通大米的 GI_{4h} 值最高,其次是复合营养大 米,低 GI 大米最低, GI_{4h} 值分别为 85,66,57。动态血糖仪 与静脉血糖检测方法得出的结果高度一致,在统计学上 验证了动态血糖仪测量结果的准确性。普通大米在餐后 4 h 的葡萄糖释放量较大,而复合营养米与低 GI 大米的 GI_{4h} 值相近,显示出较高的葡萄糖释放量,并具有缓慢释 放的特性。

2.5 3 种食物 GL_{4h} 值的比较

GL 不仅考虑了食物的血糖生成指数 GI,即食物中碳

表 5 3 种食物的 GI_{4h} 值

Table 5 GI_{4h} values of three types of food

受测食物	GI_{4h}	
	动态血糖	静脉血糖
普通大米	80.4±9.37	85.5±44.68
复合营养米	70.1±26.04	66.7±19.29
低 GI 大米	67.8±20.08	57.9±21.50

水化合物转化为血糖的速度和能力,还考虑了食物中实 际碳水化合物的含量,更能反映人体在食物摄入后葡萄糖 的释放水平^[21]。 GL_{4h} 值越大,表明食物中葡萄糖的释放量 越大,释放的总能量也越大。血糖监测结果(见表 6)显示, 普通大米的 GL_{4h} 值最高,为 60,其次是复合营养米的 GL_{4h} 值为 55,低 GI 大米的 GL_{4h} 值最小为 47,并且与其他 2 种食 物无显著性差异。静脉血糖监测结果显示,普通大米的 GL_{4h} 值最高为 64,其次是复合营养米的 GL_{4h} 值为 52,低 GI 大米 GL_{4h} 最小为 40,并且与其他两种食物存在显著性差异 ($P<0.05$)。结果表明,复合营养米与普通大米的 4 h 葡萄 糖释放量相近,能够保证人体所需的足够能量供应。

表 6 3 种食物的血糖 GL_{4h} 值[†]

Table 6 GL_{4h} values of three types of food

受测食物	GL_{4h}	
	动态血糖	静脉血糖
普通大米	60.5±6.77	64.3±33.51 ^a
复合营养米	55.2±20.32	52.7±15.10 ^a
低 GI 大米	47.8±13.49	40.5±15.07 ^b

[†] 同列字母不同表示在 $P<0.05$ 水平下存在显著差异。

3 结论

通过比较糖缓释主食与葡萄糖水、普通大米、低血糖 生成指数高抗性淀粉大米对健康人餐后 4 h 血糖波动的 影响,发现糖缓释主食在提供接近普通大米的葡萄糖能 量供应的同时,还使得餐后血糖波动平缓且处于安全血 糖范围。因此,餐后 4 h 内葡萄糖目标范围内时间达到 100%,餐后 4 h 内血糖恢复至空腹水平时长值大于 160 min,以及餐后 4 h 食物血糖负荷值大于 50 的指标可 以作为判断糖缓释主食对人体餐后血糖波动的重要指

标,这3个指标分别反映糖缓释主食的餐后血糖稳定性、淀粉的慢消化特性以及能量释放的充足性,体现了糖缓释主食在人体消化过程中葡萄糖的总释放量及持续缓慢释放特性,有助于解决因精细化饮食导致的机体营养失衡问题。

参考文献

- [1] CHAPMAN F A, MAGUIRE J J, NEWBY D E, et al. Targeting the apelin system for the treatment of cardiovascular diseases [J]. *Cardiovasc Res*, 2023, 119(17): 2 683-2 696.
- [2] 王枫. 不同食物消化时间不同[J]. *家庭医药(快乐养生)*, 2014 (5): 16-17.
WANG F. Different foods have different digestion mins[J]. *Family Medicine (Happy Health)*, 2014(5): 16-17.
- [3] 张倩, 屈岭, 史晓虎, 等. 糖尿病患者血糖波动与中医证候的关联性研究[J]. *中华中医药杂志*, 2024, 39(2): 956-961.
ZHANG Q, QU L, SHI X H, et al. Study on the association between glucose variability of patients with diabetes mellitus and traditional Chinese medicine syndrome[J]. *China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy*, 2024, 39(2): 956-961.
- [4] MELANDER S A, LARSEN A T, KARSDAL M A, et al. Are insulin sensitizers the new strategy to treat Type 1 diabetes? a long-acting dual amylin and calcitonin receptor agonist improves insulin-mediated glycaemic control and controls body weight[J]. *British Journal of Pharmacology*, 2024, 181(12): 1 829-1 842.
- [5] YING T, ZHENG J H, KAN J T, et al. Effects of whole grains on glycemic control: a systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies and randomized controlled trials[J]. *Nutrition Journal*, 2024, 23(1): 47.
- [6] 湖南省食品标准化协会. 糖缓释主食: T/HNSP 001—2022[S]. 长沙: 湖南省食品标准化协会, 2023.
Hunan Provincial Food Standardization Association. Slow-release carbohydrate staple foods: T/HNSP 001—2022[S]. Changsha: Hunan Provincial Food Standardization Association, 2023.
- [7] 孙厦厦, 何文静, 王爱民. 动态血糖监测系统对2型糖尿病患者的评估应用进展[J]. *医学综述*, 2016, 22(1): 115-118.
SUN X X, HE W J, WANG A M. The application progress of continuous glucose monitoring system in type 2 diabetes assessment[J]. *Medical Recapitulate*, 2016, 22(1): 115-118.
- [8] MARAK M C, CALHOUN P, DAMIANO E R, et al. Testing the real-world accuracy of the dexcom G6 pro CGM during the insulin-only bionic pancreas pivotal trial[J]. *Diabetes Technology & Therapeutics*, 2023, 25(11): 817-821.
- [9] FRECKMANN G. Basics and use of continuous glucose monitoring (CGM) in diabetes therapy[J]. *Journal of Laboratory Medicine*, 2020, 44(2): 71-79.
- [10] BATTELINO T, ALEXANDER C M, AMIEL S A, et al. Continuous glucose monitoring and metrics for clinical trials: an international consensus statement[J]. *Lancet Diabetes Endocrinol*, 2023, 11(1): 42-57.
- [11] VLACHOS D, MALISOVA S, LINDBERG F A, 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): 1 561.
- [12] GIUBERTI G, GALLO A. Reducing the glycaemic index and increasing the slowly digestible starch content in gluten-free cereal-based foods: a review[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(1): 50-60.
- [13] CUI C L, WANG Y, YING J, et al. Low glycemic index noodle and pasta: cereal type, ingredient, and processing[J]. *Food Chemistry*, 2024, 431: 137188.
- [14] HOSSEINI E, KHODAVANDLOO M, SABET S A, et al. Relationship between dietary glycemic index and glycemic load and sperm-quality parameters in Iranian men: a cross-sectional study[J]. *BMC Nutrition*, 2024, 10(1): 34.
- [15] CHANG L N, LIU Y, GU Y A, et al. Inadequate glucagon suppression during ogtt in prediabetes: a systematic review and meta-analysis[J]. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 2024, 109(10): 2 673-2 680.
- [16] 国家卫生健康委员会. 食物血糖生成指数测定方法: WS/T 652—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
National Health Commission of the People's Republic of China. Standard for determination of food glycemic index: WS/T 652—2019[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [17] KLARA F, MARTIN A, JAN K, et al. Review of present method of glucose from human blood and body fluids assessment[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, 211: 114348.
- [18] SIEGMUND T, HEINEMANN L, KOLASSA R, et al. Discrepancies between blood glucose and interstitial glucose-technological artifacts or physiology: implications for selection of the appropriate therapeutic target[J]. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 2017, 11(4): 766-772.
- [19] 黄秀, 杨篷, 习小丽, 等. 自我血糖监测联合数字化血糖管理改善2型糖尿病患者血糖控制的作用探讨[J]. *同济大学学报(医学版)*, 2023, 44(3): 373-380.
HUNG X, YANG P, XI X L, et al. Self-blood glucose monitoring with digital management improves blood glucose control in patients with type 2 diabetes[J]. *Journal of Tongji University (Medical Science)*, 2023, 44(3): 373-380.
- [20] 唐浩, 王宇, 刘艳存, 等. 葡萄糖目标范围内时间对血糖管理影响的研究进展与启示[J]. *全科护理*, 2024, 22(8): 1 451-1 455.
TANG H, WANG Y, LIU Y C, et al. Research progress and enlightenment on the impact of min in range on blood glucose management[J]. *Chinese General Practice Nursing*, 2024, 22 (8): 1 451-1 455.
- [21] REYNOLDS A, CUMMINGS J, MANN J. Association of glycaemic index and glycaemic load with type 2 diabetes, cardiovascular disease, cancer, and all-cause mortality[J]. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 2024, 12(8): 515-516.