

# 不同原料组成的配方食品体外消化特性研究及其eGI值测定

王怀槟<sup>1</sup>, 柳嘉<sup>2</sup>, 王萌<sup>2</sup>, 安海峰<sup>3</sup>, 陈晶<sup>3</sup>, 李翔<sup>3</sup>, 余稳稳<sup>1\*</sup>

(1.暨南大学食品科学与工程系, 广东广州 510000) (2.中国食品发酵工业研究院有限公司, 北京 100015) (3.雅培营养中国研发中心, 上海 200233)

**摘要:**近年来, 低血糖生成指数 (Glycemic Index, GI) 食品因餐后血糖波动较平稳所带来的系列健康益处而广受消费者青睐。随着特定人群对特殊医学用途配方食品 (简称: 配方食品) 的需求持续增加, 构建可精准预测配方食品 GI 值的体外模型以取代操作繁琐的体内血糖测试已成低 GI 碳水化合物食品的研发与推广的关键步骤。该论文系统研究了 10 款碳水化合物原料组分比例差异明显的配方食品的体外消化特性, 还原糖释放曲线经消化反应动力学拟合后得到的各消化参数进一步与人血糖测试数据进行关联性分析。结果表明, 不同碳水组成的配方食品的体外消化特性显著不同, 且在所有体外消化参数中, AUC<sub>90</sub> 值 (还原糖释放曲线 0~90 min 下的面积大小) 在预测配方食品的 eGI 值方面具有最大的应用潜力, 其预测 GI 值公式为  $eGI=0.0206 \times AUC_{90}-20.6180$  ( $R^2=0.9081$ )。研究结果还表明, 碳水化合物原料组成对 eGI 值的影响因原料类型而有所不同, 其中, 固体玉米糖浆和木薯糊精的添加均会显著提高消化过程中还原糖的释放效率, 两者对餐后血糖升高的贡献几乎相当; 相比之下, 木糖醇对血糖的影响可能小于麦芽糖醇。此外, 适量添加果糖对 eGI 值并未产生显著影响。

**关键词:** 血糖生成指数 (GI); 体外消化; 配方食品; 碳水化合物

文章编号: 1673-9078(2024)10-60-67

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.10.1284

## *In Vitro* Digestive Characterization of Formulated Foods with Different Raw Material Compositions and Determination of Their eGI Values

WANG Huaibin<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>2</sup>, WANG Meng<sup>2</sup>, AN Haifeng<sup>3</sup>, CHEN Jing<sup>3</sup>, LI Xiang<sup>3</sup>, YU Wenwen<sup>1\*</sup>

(1.Department of Food Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510000, China)

(2. China National Research Institute of Food and Fermentation Industries, Beijing 100015, China)

(3. Abbott Nutrition Research & Development Center, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** in recent years, carbohydrate foods with a low glycemic index (GI) have attracted attentions from consumers due to their health benefits, especially their ability to maintain stable postprandial blood glucose levels. With the increasing

引文格式:

王怀槟,柳嘉,王萌,等.不同原料组成的配方食品体外消化特性研究及其eGI值测定[J].现代食品科技,2024,40(10):60-67.

WANG Huaibin, LIU Jia, WANG Meng, et al. *In vitro* digestive characterization of formulated foods with different raw material compositions and determination of their eGI values [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(10): 60-67.

收稿日期: 2024-03-29

基金项目: 中国食品科学技术学会食品科技基金-雅培食品营养与安全专项科研基金(2021-F06); 广东省自然科学基金-面上项目(2023A1515010842)

作者简介: 王怀槟(1998-),男,硕士,研究方向:低GI主食,E-mail:15766797203@163.com

通讯作者: 余稳稳(1989-),男,博士,副教授,研究方向:淀粉结构-功能关系研究,低GI主食,E-mail:yuwenwen@jnu.edu.cn

demand for specialized medical-purpose formula foods (referred to as formula foods) among individuals with specific health conditions, developing *in vitro* methodologies/models to accurately estimate the GI values, as an alternative to labor-intensive *in vivo* blood test, has become of essentially important in the research and promotion of low-GI foods. Therefore, this study has systematically investigated the *in vitro* digestion characteristics of 10 formula foods with distinct ingredient compositions, obtaining various kinetics digestion parameters. These kinetics parameters were further analyzed in relation to human blood glucose test data, so that mathematical equations/models could be established to enable rapid prediction of their GI values. Results showed that the *in vitro* digestion characteristics varied significantly across different sample compositions. Among all digestion parameters,  $AUC_{90}$  (the area under the reducing sugar release curve within 0~90 min) demonstrated the greatest potential for estimating the eGI values of all samples. The predictive equation for GI values is given by  $eGI = 0.0206 \times AUC_{90} - 20.6180$  ( $R^2=0.9081$ ). Moreover, it was also noted that the impacts of carbohydrate composition on eGI values differs depending on the ingredient type. Both solid corn syrup and tapioca dextrins significantly increased the concentration of reducing sugars, with comparable contributions to postprandial blood glucose elevation. In contrast, xylitol had a potentially smaller impact on blood glucose than maltitol. Additionally, the moderate inclusion of fructose did not show a significant effect on eGI values.

**Key words:** glycemic index; *in vitro* digestion; formulated foods; carbohydrates

当前, 过度食品加工和长期摄入精细主食已成为影响国民健康的重要因素, 由此导致的退行性疾病、代谢性疾病等慢性非传染性疾病的发病率逐年上升。以糖尿病为例, 据统计, 到 2030 年, 全球将有约 5.78 亿糖尿病患者, 我国患者人数将达 1.3 亿, 是糖尿病第一大国。我国成年人糖尿病患病率为 12.8%, 占全球糖尿病患者的 32.9%, 每年约有 83.4 万人死于糖尿病的各类并发症, 防控任务刻不容缓。此外, 随着我国老龄化进程的加快, 由生活不规律、饮食不平衡等原因导致的非传染性疾病的发病率也逐年上升<sup>[1,2]</sup>。

饮食干预是控制糖尿病等非传染性疾病的基石<sup>[3]</sup>。特医食品 (Foods for Special Medical Purposes, FSMP), 也称为“特殊医学用途配方食品”, 指为了满足进食受限、消化吸收障碍、代谢紊乱或特定疾病状态人群对营养素或膳食的特殊需要, 专门加工而成的配方食品。该产品必须在医生或临床营养师指导下, 单独或与其他食品配合食用 (GB29922-2013)。在消费者普遍关注产品健康属性的当下, 特医食品因其特殊性, 也占据着愈发重要的位置。例如, 根据住院总人数、老年人口数量以及顶级跨国特医食品生产商的收入来估计, 在 2021 年我国共 8 103 万名外科住院患者中, 有 2 130 万人存在营养不良的风险, 占比 26.29% (中华人民共和国国家卫生健康委员会, 2022 年); 统计数据进一步表明, 特医食品在中国的总市场容量约 1 100 亿人民币, 医院营养品达 21.3 亿人民币, 老年营养

产品达 888.9 亿元, 存在着巨大的发展潜力和市场前景。随着国内大众对特殊疾病营养诉求意识的增强, 特定人群对于特医食品的需求持续增加, 如糖尿病患者、蛋白质代谢异常病人等。特医食品产业在我国进入研发和市场拓展双高速增长的时期<sup>[4]</sup>。然而, 特医食品中碳水化合物配料选择受限、产品 GI 值测定困难等问题均制约了产业的发展。因此, 开发一套准确、快速的体外消化模型以预测配方食品的 GI 值, 对食品研发和营养评估具有重要的应用价值。

本研究基于当前应用最广泛的 INFOGEST 静态体外消化模型, 以 10 款不同原料组成的配方食品的体外消化特性为对象, 研究碳水化合物原料组成对餐后血糖的影响, 并采用人体 GI 临床试验, 通过体外消化参数与体内血糖测试数据间的相关性挖掘, 建立体外消化数据与 GI 之间的关联, 最终构建其体外血糖指数估算 (estimated GI, eGI) 模型。

本研究成果将为未来 GI 相关基础研究、研发工作及产业化研发与推广提供有效的估算模型, 助力企业在新产品配方设计时对关键原料的筛选, 推进我国 GI 研究与产业化方面的学术进步, 特别对配方食品中低 GI 属性产品的研发具有积极意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

10 款配方食品的组成如表 1 所示, 原料均采

购于当地市场。配方食品设计依据为 GB 29922-2013《特殊医学用途配方食品通则》及中国居民膳食营养素参考摄入量速查手册（2013 版）。供能成分及供能比为：碳水化合物（含膳食纤维）占 30%~60%、蛋白质占 10%~20%（肾功能正常）、脂质占 20%~35%（肥胖患者脂质供能比）。

胰酶（来源于猪胰腺，P7545），美国 SigmaAldrich 公司；胃蛋白酶（来源于猪胃黏膜，P7000），美国 Sigma-Aldrich 公司；对羟基苯甲酰肼（H810998-25 g），上海麦克林生化科技有限公司；麦芽糖（M104817-500 mg），美国 Sigma-Aldrich 公司；无水葡萄糖，浙江一诺生物科技有限公司。

## 1.2 仪器与设备

HC-2517 离心机，安徽中佳科学仪器有限公司；WA20 恒温水浴锅，维根技术（北京）有限公司；UV1800PC 紫外分光光度计，上海菁华科技仪器有限公司；磁力搅拌器，德国海道尔夫（Heidolph）公司。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 体外消化

胃蛋白酶消化液的配制：每 100 mL 0.02 mol/L HCl 溶液中按 0.133 mg/mL 的质量浓度加入猪胃蛋白酶，溶解后于 4 000 g 转速下离心 10 min，取上清液作为胃蛋白酶消化液。

胰酶消化液的配制：每 100 mL 0.2 mol/L pH 值 6.0 醋酸钠缓冲液中按 0.25 mg/mL 的质量浓度加入猪胰酶，充分溶解后于 4 000 g 转速下离心 10 min，上清液作为胰酶消化液并于消化开始前置于 37 °C 条件下预热孵化 10 min。

样品前处理：0.5 g 样品与 1.93 mL 去离子水混合后（按 259.5 g 粉：1 L 水的比例），置于 37 °C 磁力搅拌器（300 r/min）中水浴 2 min，模拟口腔消化步骤。

模拟胃消化：口腔消化结束后立即补充 3.07 mL 37 °C 去离子水至 5 mL 后平衡 10 min。加入 5 mL 胃蛋白酶消化液，37 °C 水浴 30 min 模拟胃消化过程。

模拟肠消化：胃消化结束后立即加入 0.1 mol/L NaOH 溶液，调节溶液 pH 至中性。加入 8 mL 胰酶消化液开始肠消化过程。分别在 0、5、10、20、30、45、60、90、120 和 180 min 时间点，取 50 μL 消化液至预先装有 1.95 mL 0.3 mol/L 碳酸钠溶液的 2 mL 离心管内，10 000 r/min 离心 10 min，保留上清液。

### 1.3.2 还原糖浓度测定

上清液中的还原糖浓度采用 PAHBAH 法<sup>[5]</sup>测定，并以 2 mmol/L 麦芽糖作为标准对照。利用公式（1）将还原糖浓度（mmol/L）归一化为每 g 可利用碳水化合物，并以归一化之后的还原糖浓度为纵坐标，消化时间为横坐标，绘制还原糖释放曲线。

$$C_H = 2 \times \frac{\Delta A_s}{\Delta A_{st}} \times 40 \times \frac{100\%}{W \times P} \quad (1)$$

式中：

$C_H$ ——每 g 碳水化合物释放出的还原糖浓度，mmol/L·g；

$\Delta A_s$ ——每个时间间隔的吸光度；

$\Delta A_{st}$ ——麦芽糖标准品的吸光度；

$W$ ——样品质量，g；

$P$ ——可利用碳水化合物的含量，%；

40——从 50 μL 等分试样到 1.95 mL 的稀释倍数。

表 1 10 款配方食品的基本组成成分

Table 1 Basic ingredients of 10 formula foods

总碳水化合物/%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
固体玉米糖浆	52.7	39.9	38.8	29.9	38.7	33.7	34.8	33.8	23.8	23.8
碳水化合物 (54%)	木薯糊精	—	10.0	5.0	10.0	5.0	5.0	—	—	—
	异麦芽酮糖	—	5.0	10.0	15	10.0	15	15.0	15.0	15.0
	麦芽糖醇	—	—	—	—	—	—	—	4	8.0
	果糖	—	—	—	—	—	—	3.0	—	6.0
膳食纤维 (5%)	抗性糊精	—	3.2	4.2	3.2	2.3	0.4	5.3	5.3	5.3
	低聚果糖	5.3	—	—	—	2.0	4.0	—	—	—

注：“—”表示未添加。

### 1.3.3 体内GI测定

获得中国医学科学院北京协和医院伦理审查委员会的审后（伦理审查文号：HS-1763），样品的体内血糖测试参考 ISO26642:2010<sup>[6]</sup>进行。招募 10 名符合要求的健康受试者（男女各半），年龄段为 22~31 岁，BMI 为 18.8~23.0 kg/m<sup>2</sup>，体检合格，口服葡萄糖耐量试验正常，饮食规律，近期无胃肠道疾患和服用任何药物。试验前对受试者进行培训，并签署知情同意书。

根据样品的可利用碳水化合物含量，计算出含等量 25 g 可利用碳水化合物的配方食品，按照 259.5 g 粉：1 L 水的比例冲调后给受试者饮用。在 2 h 内采用指尖采血收集血样。采用贝克曼 AU480 全自动生化仪（CV<3.6%）测定葡萄糖浓度。以时间为横坐标，血糖浓度为纵坐标，制作血糖应答曲线。计算血糖应答曲线下增幅面积，以葡萄糖参照物（GI 值为 100），得到 GI 值。

### 1.3.4 斜率对数（LOS）模型分析

基于先前研究<sup>[7]</sup>，利用公式（2）对还原糖释放曲线进行消化反应动力学模型拟合分析。

$$\ln\left(\frac{dC_t}{dt}\right) = \ln(C_\infty \times k) - kt \quad (2)$$

式中：

$C_t$ ——时间  $t$  (min) 时消化的还原糖浓度，mmol/L·g；

$C_\infty$ ——消化终点时的理论还原糖浓度，mmol/L·g；

$k$ ——还原糖释放系数，min<sup>-1</sup>；

$\frac{dC_t}{dt}$ ——由公式  $(C_{i+2}-C_i)/(t_{i+2}-t_i)$  ( $i=1,2,3,\dots$ ) 得到。

### 1.3.5 平行/混合消化动力学模型拟合

基于 LOS 分析结果，采用使用平行 / 混合消化动力学（Combination of Parallel and Sequential, CPS）模型对还原糖释放曲线进行拟合分析<sup>[8]</sup>。

$$C_t = C_0 + (C_{1\infty}) \times (1 - e^{-k_1 t}) + \text{If}\{t \geq t_{2\text{start}}, [(C_{2\infty}) \times (1 - e^{-k_2(t-t_{2\text{start}})})], 0\} \quad (3)$$

式中：

$C_0$ ——时间 0 min 时的还原糖浓度，mmol/L·g；

$C_{1\infty}$  和  $C_{2\infty}$ ——理论状态下可消化组分 1 和 2 的最高可释放的还原糖浓度，mmol/L·g；

$k_1$  和  $k_2$ ——组分 1 和 2 的释放速率常数，min<sup>-1</sup>；

$t_{2\text{start}}$ ——组分 2 开始消化的时间，min。

### 1.3.6 数据分析

数据以平均值 ± 标准误差表示。使用 SPSS 软件（版本 26.0）进行单变量均值方差分析（ANOVA），在

$P < 0.05$  的显著性水平下，使用 Duncan 多重范围检验进行多重均值比较。主成分分析、线性回归分析以及聚类分析均使用 SPSS 软件进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 体外消化

如图 1 所示，不同样品在肠消化过程中的还原糖释放效率存在明显差异。还原糖释放速率依次为：2>1>3>5≈6>4>7>9>8>10。果糖作为天然低 GI 碳水化合物，木糖醇和麦芽糖醇则属于部分可利用碳水化合物，而异麦芽酮糖在体内消化较为缓慢。因此，与木薯糊精和固体玉米糖浆相比，这类碳水化合物原料在餐后引发的血糖反应更低<sup>[9,10]</sup>。随着配方 8、9 和 10 中麦芽糖醇与果糖含量的提高，还原糖释放速率显著降低。侯梦雅等<sup>[11]</sup>研究也表明，随着膳食纤维添加量的增加，面包的消化速率明显减缓，GI 值降低，并在餐后 2 h 内表现出更好的血糖稳定效果。

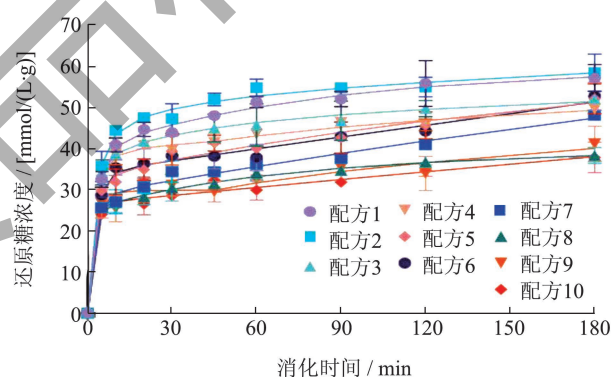


图 1 样品还原糖释放曲线

Fig.1 Reducing sugar release curves for all samples

注：点：实验数据；线：理论数据。

总体上，随着固体玉米糖浆及木薯糊精含量的降低、膳食纤维含量的提高，还原糖释放速率逐渐减低。

### 2.2 LOS拟合分析

图 2 展示了采用 LOS 模型对样品还原糖释放曲线（样品 1）进行拟合分析的结果。结果表明，在肠消化过程中，样品中存在两种还原糖释放速率明显不同的组分。在大概前 15 min 内，还原糖的释放速率显著高于 15 min 之后，表明样品中同时含有快、慢两个消化组分。LOS 拟合的相关系数分别为 0.992 6 和 0.948 8，表明 LOS 模型能够较好地模拟样品的消化过程。因此，基于 LOS 分析结果，进一步采用 CPS 模型对消化行为进行拟合分析，结果如图 1 和表 2 所示。

表 2 不同配方食品平行/混合消化动力学模型 (CPS) 拟合后的系列体外消化参数

Table 2 Series of *in vitro* digestion parameters after fitting parallel/mixed digestion kinetic models (CPS) for different formulated foods

项目	配方 1	配方 2	配方 3	配方 4	配方 5
$k_1$	0.325 9 ± 0.010 4	0.394 6 ± 0.220 7	0.605 1 ± 0.425 1	0.365 9 ± 0.113 4	0.394 0 ± 0.099 8
$k_2$	0.012 7 ± 0.002 6	0.017 3 ± 0.022 7	0.013 9 ± 0.018 7	0.008 6 ± 0.007 1	0.005 0 ± 0.003 9
$C_{1\infty}$	40.735 3 ± 1.893 4	43.854 5 ± 5.416 9	38.810 1 ± 3.004 8	39.557 8 ± 3.297 0	34.381 5 ± 2.733 7
$C_{2\infty}$	18.976 8 ± 7.579 2	42.332 2 ± 38.341 9	51.136 2 ± 50.349 4	17.049 4 ± 7.096 7	38.698 3 ± 24.623 2
$t$	4.999 2 ± 0.001 2	3.221 0 ± 0.000 0	8.037 3 ± 2.779 9	28.846 3 ± 22.844 9	10.000 0 ± 0.000 0
AUC <sub>90</sub>	4 113.49 ± 7.63	4 374.33 ± 4.03	3 851.85 ± 197.79	3 629.93 ± 59.84	3 380.87 ± 181.67
AUC <sub>120</sub>	5 731.15 ± 55.76	6 033.62 ± 31.22	5 315.57 ± 294.71	5 009.55 ± 69.11	4 738.92 ± 257.79
AUC <sub>180</sub>	9 100.26 ± 249.10	9 463.45 ± 208.98	8 339.78 ± 413.14	7 891.94 ± 136.07	7 669.90 ± 469.97

项目	配方 6	配方 7	配方 8	配方 9	配方 10
$k_1$	0.378 4 ± 0.073 9	0.356 1 ± 0.027 0	1.335 5 ± 0.932 2	0.400 4 ± 0.048 0	0.418 3 ± 0.089 4
$k_2$	0.000 3 ± 0.000 2	0.002 0 ± 0.001 0	0.015 2 ± 0.010 9	0.010 7 ± 0.014 8	0.000 7 ± 0.000 2
$C_{1\infty}$	34.512 5 ± 2.116 2	29.928 5 ± 0.155 7	25.235 2 ± 0.034 6	29.806 4 ± 1.633 4	27.534 9 ± 1.092 7
$C_{2\infty}$	487.290 3 ± 294.409 2	69.781 1 ± 31.254 3	15.647 6 ± 5.008 9	196.246 3 ± 266.838 7	109.015 7 ± 46.783 4
$t$	4.917 1 ± 0.110 4	11.098 0 ± 1.552 9	0.927 9 ± 1.312 3	44.778 3 ± 0.310 7	14.999 0 ± 7.069 7
AUC <sub>90</sub>	3 337.17 ± 64.98	2 944.88 ± 1.87	2 741.99 ± 95.33	2 692.83 ± 161.37	2 573.93 ± 137.25
AUC <sub>120</sub>	4 662.28 ± 44.97	4 153.82 ± 0.85	3 818.29 ± 106.88	3 756.15 ± 198.18	3 575.13 ± 202.00
AUC <sub>180</sub>	7 566.93 ± 63.82	6 828.68 ± 9.41	6 063.97 ± 58.19	6 051.01 ± 138.30	5 743.87 ± 351.24

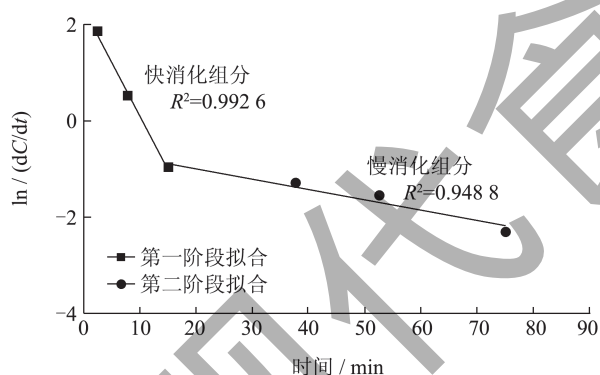


图 2 LOS 分析结果 (配方 1 为例)

Fig.2 Results of LOS analysis (formulation 1 as an example)

### 2.3 CPS模型拟合分析

如表 2 所示, 所有样品的消化曲线拟合结果显示, 其  $k_1$  值都显著大于  $k_2$ 。这表明样品在初始阶段的消化均较快, 而后期的消化速率显著降低。除消化动力学参数外, 消化曲线下面积 (Area Under the Curve, AUC) 在分析体外消化特性及预测估算血糖指数 (eGI) 方面展现出较大潜力<sup>[12]</sup>。因此, 进一步计算了不同消化时间段内 (90、120 及 180 min) 的 AUC 值。结果表明, AUC<sub>90</sub>、AUC<sub>120</sub> 和 AUC<sub>180</sub> 的大小与还原糖消化曲线的变化趋势高度一致, 为理解

样品的体外消化特性提供了重要参考。

### 2.4 体内血糖测试

对还原糖释放速率不同的 3 个配方食品 (2、6、10) 进行了人血糖测试 (每款食品均采用随机设计, 包括 2~3 次参考食品和 1 次试验食品的独立测试), 并得到血糖应答曲线。

如图 3 所示。三款配方食品的血糖应答曲线均显著低于葡萄糖参照食品, 其临床血糖指数 (Glycemic Index, GI) 和升糖负荷 (Glycemic Load, GL) 值如表 3 所示。试验结果表明, 以葡萄糖为参考物 (GI=100), 配方 10 的 GI=38, 可以归类为低 GI 食物; 配方 6 的 GI 值为 58, 属于中 GI 食物; 配方 2 的 GI 值为 64, 同样属于中 GI 食物。

### 2.5 eGI模型构建

基于 3 款配方食品的临床 GI 值, 采用线性回归分析构建了消化参数 (AUC 值) 与其临床 GI 值之间的函数关系 (见表 4)。结果显示, 与 AUC<sub>120</sub> 和 AUC<sub>180</sub> 相比, AUC<sub>90</sub> 所构建的 GI 值估算公式的  $R^2$  值更高, 表明其在预测 GI 值方面具有更高的准确性和可信度。因此, 拟采用 AUC<sub>90</sub> 构建的模型作

为预测 eGI 值的参数。

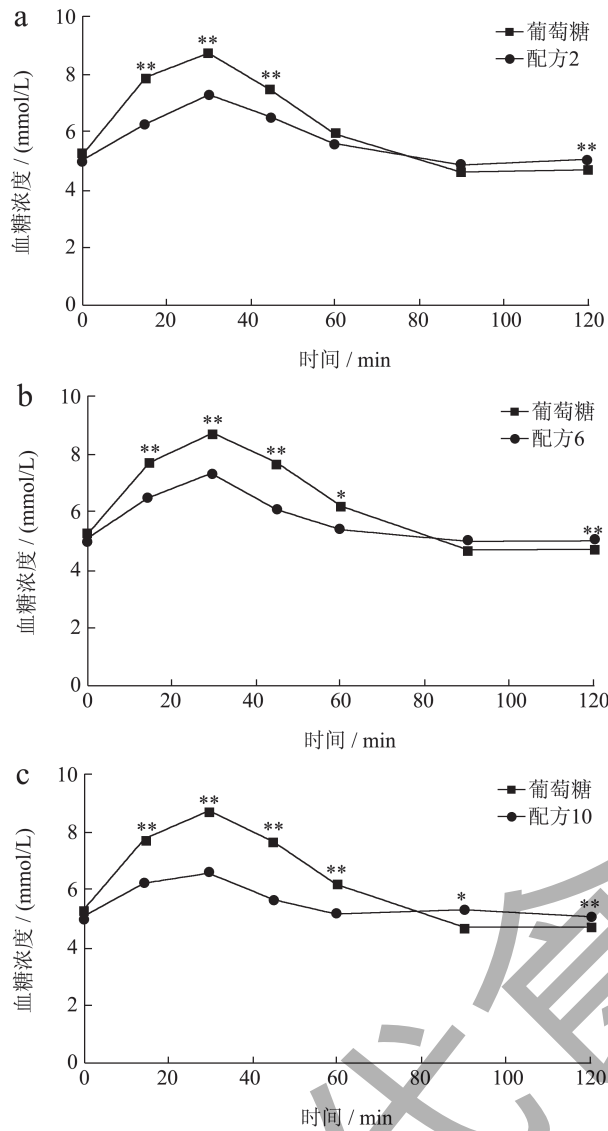


图3 三款配方食品 2 h 体内血糖应答曲线

Fig.3 In vivo glucose response curves for three formulas in 2 h

表3 三款配方食品GI测试结果(体内)

Table 3 In vivo GI test results of three formulas

编号	GI 值	SE	SD	GL 值
配方 2	64	6	18	21
配方 6	58	4	13	19
配方 10	38	4	13	12

根据表 4 中的函数关系，进一步对 10 款配方食品的 eGI 值进行了分析(见图 4)。结果表明，对于已测定临床 GI 值的 3 款样品，其 eGI 值与实际临床 GI 值非常接近；而对于其余 7 款样品，其 eGI 值的变化趋势也与还原糖释放曲线的趋势保持一致。这些结果表明，体外消化模型在预测配方食品的 eGI 值方面表现出较高的有效性和可靠性。

表 4 基于不同消化模型参数建立的配方食品 eGI 值测定函数关系

Table 4 Functional relationships for the determination of eGI values of formulated foods based on different digestive model parameters

消化参数参数	函数关系
AUC <sub>90</sub>	eGI=0.020 6×AUC <sub>90</sub> -20.618 0, R <sup>2</sup> =0.908 1
AUC <sub>120</sub>	eGI=0.015×AUC <sub>120</sub> -21.352 0, R <sup>2</sup> =0.901 3
AUC <sub>180</sub>	eGI=0.009 5×AUC <sub>180</sub> -22.336 0, R <sup>2</sup> =0.872 5

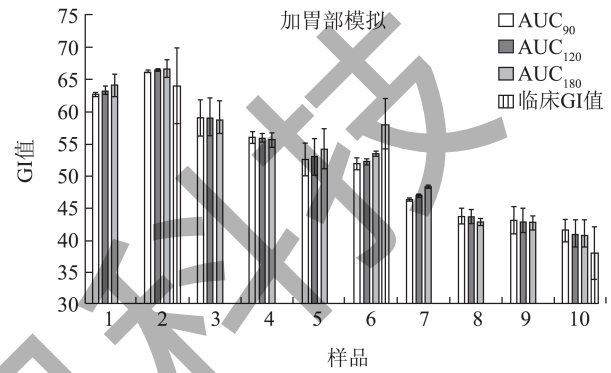


图4 基于表 4 不同配方食品临床 GI 值与其 eGI 值的对比  
Fig.4 Comparison of clinical GI values of different formulated foods with their eGI values based on table 4

## 2.6 线性回归分析

由上述研究结果可知，在所有体外消化参数中，AUC<sub>90</sub> 值在预测 eGI 方面展现出最大的应用潜力。进一步研究了在碳水化合物总质量一致的情况下(见表 1)，各碳水化合物组份对 AUC<sub>90</sub> 值的影响。

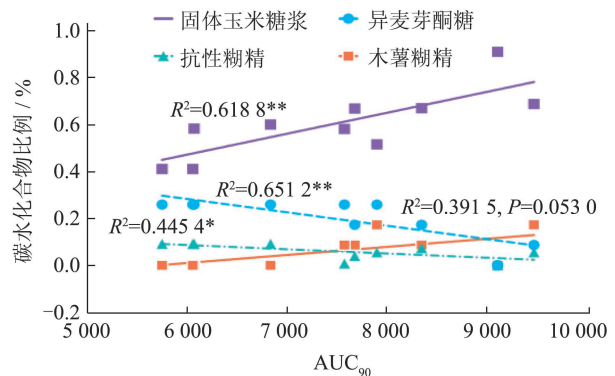


图5 原料组分比重与 AUC<sub>90</sub> 值的线性回归分析 (n=10)

Fig.5 Linear regression analysis of the weight proportion of different carbohydrate components and AUC<sub>90</sub> values (n=10)

如图 5 所示，AUC<sub>90</sub> 值与原料中固体玉米糖浆的比例呈显著正相关 (P<0.01)，而与异麦芽酮糖和抗性糊精的比例呈显著负相关。此外，木薯糊精

的比例与  $AUC_{90}$  值也存在正相关关系 (图 5)。这些结果表明, 提高原料中固体玉米糖浆和木薯糊精的比例会导致  $AUC_{90}$  值升高, 从而引起更高的 eGI 值, 不利于餐后血糖的控制; 相反, 增加异麦芽酮糖和抗性糊精的比例则能有效降低 eGI 值, 有助于控制餐后血糖水平。

## 2.7 主成分分析与聚类分析

根据表 1 所列的配方组成信息, 为了在保持碳水化合物总质量一致的前提下, 探讨除固体玉米糖浆外其他碳水化合物组分对  $AUC_{90}$  值的影响, 对这些组分与  $AUC_{90}$  值进行了主成分分析。如图 6 所示, 前两个主成分 (PC1 和 PC2) 共解释了 69% 的数据变异, 这表明其他因素也会影响  $AUC_{90}$  值。例如, 消化过程中消化酶浓度的波动等。PC1 和 PC2 分别解释了 51% 和 18% 的变异。

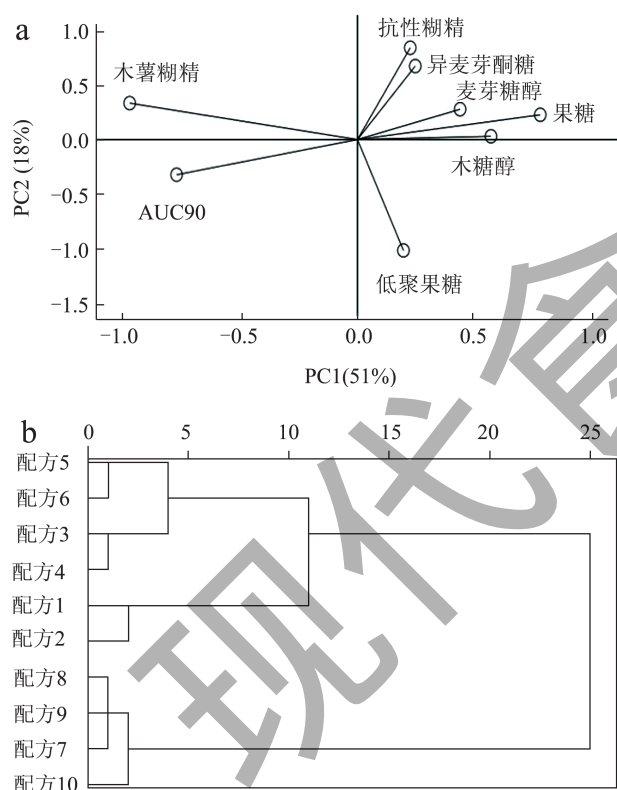


图 6 主成分分析 (a) 和聚类分析 (b)

Fig. 6 Principal component analysis (a) and cluster analysis (b)

在 PC1 维度上, 与图 5 的结果一致, 除了固体玉米糖浆外, 木薯糊精的含量与  $AUC_{90}$  值显著正相关, 并主要集中于 PC1 的左侧。相反, 糖醇类 (如木糖醇和麦芽糖醇)、果糖以及抗性糊精等碳水化合物聚集于 PC1 的右侧, 表明这些物质与  $AUC_{90}$  值呈负相关关系, 有助于餐后血糖的控制。

虽然抗性糊精和低聚果糖均被认为是膳食纤维,

但低聚果糖的增加似乎更容易导致  $AUC_{90}$  值升高。这可能与其分子结构和消化特性有关。低聚果糖的分子量较小, 在体外消化过程中容易被水解为单糖或二糖, 这些小分子会直接贡献于还原糖的测定; 相比之下, 抗性糊精具有较长的分子链结构, 难以完全降解, 即便分解也多以寡糖形式存在, 不完全转化为单糖, 导致还原糖浓度相对较低。这一结果表明, 不同碳水化合物组分对  $AUC_{90}$  值的影响存在显著差异, 对配方设计的血糖控制效果具有重要意义。

根据因子分析结果, 进一步对所有样品进行了聚类分析 (见图 6)。结果显示, 配方 7~10 的样品彼此较为接近, 并与其他 6 个样品的距离较远, 尤其是样品 7~9 之间的相似性更为显著。这表明, 果糖的添加对样品的  $AUC_{90}$  值未产生显著影响。此外, 与麦芽糖醇相比, 木糖醇对  $AUC_{90}$  值的贡献较小, 暗示木糖醇可能在控糖效果方面优于麦芽糖醇。这一结果可能与二者在体内不同的代谢途径有关。同时, 样品 1 和 2 的距离较近, 表明木薯糊精与固体玉米糖浆在  $AUC_{90}$  值上的贡献较为相似, 均有提升样品 eGI 值的趋势。

## 3 结论

在所有体外消化参数中, 研究表明,  $AUC_{90}$  值在预测配方食品的 eGI 值方面具有最大的应用潜力。同时, 碳水化合物原料的组成对样品 eGI 值的影响因原料类型而有所不同。其中, 固体玉米糖浆和木薯糊精的添加均显著提高了还原糖的浓度, 两者对餐后血糖升高的贡献几乎相当; 相比之下, 木糖醇对血糖的影响可能小于麦芽糖醇。此外, 适量添加果糖对 eGI 值并未产生显著影响。

需要强调的是, 食物的餐后血糖反应受多种因素共同影响, 如个体的饮食习惯、消化吸收及代谢效率之间的差异, 以及不同食品组分之间的相互作用。因此, 在通过体外消化测试预测 / 评估碳水化合物食品的 GI 值时, 合理的体外消化实验设计、完善的数据分析模型、标准品的测试及对 GI 值测定模型的评估与校正, 都是实现食品 GI 值体外快速测定的关键环节。

## 参考文献

- [1] 王怀楦, 彭星光, 刘宏生, 等. 碳水化合物食品血糖生成指数值体外、体内预测方法的研究进展 [J]. 食品科学, 2023, 44(15): 407-417.

- [2] REYNOLDS A, MANN J, CUMMINGS J, et al. Carbohydrate quality and human health: a series of systematic reviews and meta-analyses [J]. *The Lancet*, 2019, 393(10170): 434-445.
- [3] 中国糖尿病医学营养治疗指南(2013)[J]. *糖尿病天地(临床)*, 2016, 10(7): 289-307.
- [4] 吴怡, 朱强. 特殊医学用途配方食品产业的发展及治理[J]. *中国食物与营养*, 2024, 30(5): 24-28.
- [5] MORETTI R, THORSON J S. A comparison of sugar indicators enables a universal high-throughput sugar-1-phosphate nucleotidyltransferase assay [J]. *Analytical Biochemistry*, 2008, 377(2): 251-258.
- [6] STANDARDIZATION I O F. Food Products-determination of the Glycaemic Index (GI) and Recommendation for Food Classification [M]. ISO, 2010.
- [7] BUTTERWORTH P J, WARREN F J, GRASSBY T, et al. Analysis of starch amylolysis using plots for first-order kinetics [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(3): 2189-2197.
- [8] YU W, ZHOU X, LI C. Application of first-order kinetics modeling to reveal the nature of starch digestion characteristics [J]. *Food & Function*, 2021, 12(15): 6652-6663.
- [9] 刘代骏. 异麦芽酮糖饮料的血糖指数测定[D]. 武汉: 武汉体育学院, 2013.
- [10] RYTZ A, ADELIN D, LÊ K A, et al. Predicting glycemic index and glycemic load from macronutrients to accelerate development of foods and beverages with lower glucose responses [J]. *Nutrients*, 2019, 11(5): 1172.
- [11] 侯梦雅, 郭政利, 陈媚依, 等. 不同比例全麦粉全麦面包的感官品质和稳糖效果比较[J]. *现代食品科技*, 2023, 39(12): 29-34.
- [12] WANG H, PENG X, ZHANG K, et al. A more general approach for predicting the glycemic index (GI) values of commercial noodles [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 119: 105226.