

白米饭餐前负荷 3 种水果的餐后血糖和饱腹感反应

卢雪娇¹, 卢家灿¹, 范志红^{1,2*}, 刘岸书¹, 赵文祺¹, 武艺雪¹

(¹ 中国农业大学食品科学与营养工程学院 北京 100083

² 北京食品营养与人类健康高精尖创新中心 北京 100083)

摘要 为探究不同水果餐前负荷的效果差异, 募集 10 位年轻超重受试者, 以含 15 g 可利用碳水化合物的苹果、甜橙或梨为餐前负荷食物, 以含 50 g 可利用碳水化合物的白米饭为正餐食物, 测定各测试餐后 180 min 内的血糖和饱腹感水平, 以及 3 种水果的营养成分和质构特性。结果表明: 餐前负荷 3 种水果均可显著降低餐后血糖波动幅度, 其中, 苹果和甜橙分别使每克可利用碳水化合物引起的血糖增加值显著降低 27.3% 和 34.1%。餐前负荷水果对餐后饱腹感无显著影响。结论: 白米饭餐前 30 min 负荷 3 种水果, 均有益于平缓餐后血糖反应, 其效应可用水果成分及质构特性来解释。

关键词 餐前负荷; 水果; 血糖反应; 饱腹感; 超重人群

文章编号 1009-7848(2022)12-0134-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.12.014

大米是我国居民第 1 位的主食食材, 然而, 其血糖指数 (glycemic index, GI) 较高^[1], 在非糖尿病人群中可能导致餐后血糖的较大波动^[2]。已知餐后高血糖是心血管疾病的重要危险因素^[3], 平缓餐后血糖波动有助于预防糖尿病的发生^[4]。研究表明在正餐前 30 min 先摄入少量食物, 即餐前负荷 (preload), 能够帮助平稳餐后血糖反应^[5]。有少数研究证实, 用猕猴桃^[6]或苹果^[7]作为餐前负荷, 在替代部分米饭, 维持碳水化合物摄入量不变时, 能有效平缓正常体重受试者的餐后血糖波动。水果是高营养密度食物, 是多种维生素、矿物质、植物化学物和膳食纤维的重要来源^[8-9]。流行病学研究表明, 适量摄入水果与降低糖尿病风险相关^[10]。我国膳食指南推荐每天摄入 200~350 g 水果^[11]。然而, 水果餐前负荷的降血糖效果是否具有普适性, 能否在超重肥胖人群中发挥作用, 尚未有研究探讨。同时, 如果保持主食的数量不变, 额外添加水果作为餐前负荷, 对餐后血糖是否仍存在有益影响, 也值得研究。

本研究以超重肥胖人群为研究对象, 以含 15 g 可利用碳水化合物的苹果、甜橙和梨分别作为餐前负荷食物, 以含 50 g 可利用碳水化合物的白米饭为正餐食物, 以白米饭餐前饮水作为对照, 探究白米饭正餐前负荷不同新鲜水果对 10 名年轻超

重受试者餐后血糖及饱腹感的影响。此外, 对水果的质构和化学成分进行测定, 分析产生差异的原因。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

富士苹果 (*Malus pumila* Mill.) 产自山东省烟台市, 丰水梨 (*Pyrus pyrifolia* Nakai cv. Hosui) 产自山东省聊城市, 均购于淘宝网; 南非甜橙 [*Citrus sinensis* (Linn.) Osbeck] 产自南非, 购于中国农业大学家属区市场。福临门长粒香米, 黑龙江省佳木斯市; 乌江涪陵榨菜, 重庆市涪陵榨菜集团股份有限公司。

阿颖葡萄糖粉 ($C_6H_{12}O_6 \cdot H_2O$), 均利博试剂公司。单宁酸标准品、芦丁标准品、没食子酸标准品、碳酸钠、36% 浓盐酸、三氯化铝、半乳糖醛酸、甲醇、无水葡萄糖、氯化钙、无水乙酸钠、苯甲酸、浓硫酸、硫酸钾、无水乙醚、无水乙醇、三水合乙酸钠、钨酸钠、磷钼酸、磷酸、无水碳酸钠、丙酮、亚硝酸钠, 均为国产分析纯试剂, 北京化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

Synergy HT 多功能酶标仪, 美国 BioTek 有限公司; FE20 Five Easy pH 计, 瑞士梅特勒公司; FA2004 电子天平 (精度 0.0001 g), 德国 Sartorius 公司; YP2002 电子天平, (精度 0.01 g), 上海越平科学仪器; 质构仪, TA. XT. Plus, 英国 Stable Micro System 公司; ONE TOUCH UltraEasy

收稿日期: 2021-12-14

第一作者: 卢雪娇, 女, 硕士生

通信作者: 范志红 E-mail: daisyfan@vip.sina.com

稳豪倍易型血糖分析系统,强生(中国)医疗器材有限公司;HBF-370 身体脂肪测量仪器,欧姆龙健康医疗(中国)有限公司;TGL18M 台式高速冷冻离心机,盐城市凯特实验仪器有限公司;SHA-B10 恒温水浴振荡器,江苏金坛容华仪器制造有限公司;DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱,北京联合科仪科技有限公司;WBL1031S 打浆机,美的集团有限公司;MY-HT5093 型电压力锅,美的生活电器制造有限公司。

1.3 方法

1.3.1 测试餐的分组及制备 测试餐共 4 组,分别为:1)水+白米饭(W+50R);2)苹果+白米饭(A+50R);3)甜橙+白米饭(O+50R);4)梨+白米饭(P+50R)。各测试餐总质量恒定,且均为餐前负荷食物+正餐的形式,餐前负荷和正餐的时间间隔为 30 min。其中,作为餐前负荷的苹果、甜橙、梨各含有 15.0 g 可利用碳水化合物,正餐白米饭含有 50.0 g 可利用碳水化合物。各测试餐的组成见表 1。

白米饭的烹调方法:称取含 50.0 g 可利用碳水化合物的大米 66.1 g,加入 1.5 倍去离子水,在电饭煲“蒸煮”模式下蒸煮 30 min。

表 1 测试餐的组成

Table 1 The component of test meals

| 测试餐 | 水果/ g | 熟米饭/ g | 榨菜/ g | 水/ g | 可利用 碳水化 合物/g | 总质量/ g |
|-------|----------|-----------|----------|---------|--------------------|-----------|
| W+50R | - | 143.1 | 10.0 | 240.4 | 50.0 | 393.5 |
| A+50R | 134.8 | 143.1 | 10.0 | 105.6 | 65.0 | 393.5 |
| O+50R | 191.6 | 143.1 | 10.0 | 48.8 | 65.0 | 393.5 |
| P+50R | 240.4 | 143.1 | 10.0 | - | 65.0 | 393.5 |

1.3.2 样品中营养素含量的测定 脂肪含量测定参考 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》^[2];蛋白质含量测定参考 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》^[3];粗纤维含量的测定参考 GB/T 5009.10-2003《植物类食品中粗纤维的测定》^[4];糖类含量测定采用非标高效液相方法(SXA03-FB-015);总多酚含量测定采用福林-酚法^[5];总黄酮含量测定采用三氯化铝显色法^[6];单宁含量测定参照侯曼玲^[7],略作修改;果胶含量测定参考 NY/T 2016-2011《水果及

其制品中果胶含量的测定分光光度法》^[8]。

1.3.3 不同水果质构测试方法 3 种水果的质构测试均采用质地剖面分析法(texture profile analysis, TPA),均使用 P/50 探头(直径 50 mm 的不锈钢圆柱形探头),HDP/90 平台测试。甜橙与苹果、梨属不同果实类型,使用不同测试模式^[9]。

苹果和梨的 TPA 测试参考潘秀娟等^[20]的方法并加以改进。制样方法:沿果梗将果实纵向均匀分成两瓣,使用内径 14 mm 的打孔器取样 4 次,然后用切分宽度 4.5 mm 的双刀切取居中部位小圆柱体试样。测试模式:Compression;测前速率 1.00 mm/s;测试速率 0.5 mm/s;测后速率 1.00 mm/s;两次压缩中间停顿 5 s;压缩距离 2.7 mm;触发力值 10 g;触发类型:自动;数据采集速率 200 pps。

甜橙制样方法:剥去果皮,分离瓢瓣,取 1 块瓢瓣置于探头下进行测试。测试模式:Compression;测前速率 40 mm/s;测试速率 30 mm/s;测后速率 40 mm/s;压缩距离 10 mm;数据采集速率 200 pps;触发类型:自动;触发值 15 g。

定义第 1 次压缩时的最大峰值为样品的硬度(hardness),单位为 N;第 2 次压缩所做正功与第 1 次压缩所做正功之比为样品的凝聚性(cohesiveness);硬度、凝聚性和弹性的乘积为咀嚼度(chewiness),单位为 N;第 1 次压缩循环过程中返回样品所释放的弹性能与压缩时探头的耗能之比为回复性(resilience)。

1.3.4 血糖反应试验

1.3.4.1 受试者 根据 Brouns 等^[21]的分析,受试者人数为 10 的餐后血糖反应试验结果具有 80% 的把握度。网上招募 18~27 岁的超重肥胖受试者,纳入条件: BMI ≥ 24 kg/m² 或女性体脂率 $\geq 30\%$, 男性体脂率 $\geq 20\%$;近 6 个月内未节食减肥;近 6 个月未经常服用维生素或矿物质补充剂;生活作息规律不熬夜;女性月经周期规律;无代谢性疾病;无糖尿病家族史;无进食障碍,如神经性厌食症、暴食症等;无消化系统疾病或肠胃不适;无抽烟、饮酒习惯;对测试餐无过敏现象;非竞技类运动员。本试验经中国农业大学人体研究伦理委员会批准(伦理号:CAUHR-2019006),与 11 名受试者签订书面协议。要求受试者在试验期间避免剧烈运动、抽烟饮酒、暴饮暴食和熬夜等行为,保证

在试验前1d按照日常饮食方式规律进食。为保证研究质量,于两次不同时间点对受试者进行50g口服葡萄糖耐量试验(50g oral glucose tolerance test, 50g-OGTT),数据稳定、无显著差异者方可将数据纳入研究。试验期间1位受试者因时间问题中途退出,最终10人的数据被纳入研究。

1.3.4.2 血糖反应试验流程及指标测定 受试者于试验前1d晚上20:00点开始禁食,经12h禁食后于早上8:20到达实验室,静坐约5min后测定空腹血糖。于8:30开始进食餐前负荷食物(开始进食时间记为0时刻),要求在5min内进食完毕。30min时给予正餐(白米饭),要求在10min内完成进食。分别于进食开始(0min)及进食开始后15、30、45、60、90、120、150、180min采集指尖血,用血糖仪测定。每位受试者均参加4次试验,根据随机数生成器确定测试餐顺序,两次试验中间至少间隔3d。

参考Wolever等^[22]的梯形法计算各测试餐在0~60、60~120、120~180、0~180min内血糖反应曲线下正面积($iAUC_{0-60}$, $iAUC_{60-120}$, $iAUC_{120-180}$ 和 $iAUC_{0-180}$),以及血糖变化峰值,餐后180min内最大血糖波动幅度(maximum amplitudes of glycemic excursion, MAGE180)。

为排除测试餐碳水化合物含量对血糖特征值的影响,定义每克可利用碳水化合物引起的餐后180min血糖反应曲线下面积(area contributed by per gram of available carbohydrate, AAC)来反映各测试餐血糖的变化情况,计算方法为:

$$AAC = iAUC_{0-180} (\text{mmol} \cdot \text{min/L}) / \text{测试餐可利用碳水化合物含量(g)} \quad (1)$$

1.3.5 饱腹感反应试验 饱腹感反应试验与血糖

反应试验为同一批受试者,采用视觉模拟评分法(visual analogue scale, VAS)评估受试者0~180min的饱腹感水平。100mmVAS量表的左端(0)表示“我非常非常饿”,右端(100)表示“我非常非常饱”。受试者于开始进食(0min)、结束进食餐前负荷食物的时刻(E1)、15、30min、结束进食正餐食物的时刻(E2)、45、60、90、120、150、180min根据自身饱腹感情况量表上划线。以0刻度到受试者划线距离(mm)作为受试者各时刻的饱腹感。每位受试者均参加4次试验,两次试验中间至少间隔3d。采用梯形法计算各测试餐在0~60、60~120、120~180、0~180min内饱腹感反应曲线下正面积($iAUC_{0-60}$, $iAUC_{60-120}$, $iAUC_{120-180}$ 和 $iAUC_{0-180}$),以及饱腹感变化峰值、谷值。

为排除测试餐能量对饱腹感特征值的影响,定义每kJ能量引起的180min饱腹感反应曲线下面积(area contributed by per kJ of energy, AE)来反映各测试餐饱腹感的变化情况。计算方法:

$$AE = iAUC_{0-180} (\text{mm} \cdot \text{min/L}) / \text{测试餐能量(kJ)} \quad (2)$$

180min试验结束后,要求受试者在指定食堂购买固定馅料的饺子,任意摄食,并记录各自吃到感觉舒适饱感时所进食的饺子数,用于评估测试餐对第2餐进食量的影响。

1.3.6 数据统计分析 用SPSS 23.0和Excel 2016软件分析处理试验数据。组间差异分析采用单因素重复测量方差分析,相关分析采用Pearson相关分析, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 测试餐营养素含量

各测试餐的营养素含量及能量见表2。

表2 测试餐的营养素含量及能量(每份)

Table 2 Nutritional composition and energy of test meals (per serving)

| 测试餐 | 葡萄糖/ g | 果糖/ g | 蔗糖/ g | 蛋白质/ g | 脂肪/ g | 总多酚/ mg GAE ¹ | 总黄酮/ mg RUE ² | 单宁/mg TAE ³ | 粗纤维/ g | 果胶/g | 能量/kJ |
|-------|-----------|----------|----------|-----------|----------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------|------|---------|
| W+50R | - | - | - | 7.0 | 0.5 | - | - | - | 0.7 | - | 845.6 |
| A+50R | 4.6 | 8.7 | 1.7 | 8.3 | 1.6 | 32.2 | 45.3 | 47.4 | 12.4 | 2.8 | 1 121.9 |
| O+50R | 4.9 | 4.7 | 5.4 | 11.8 | 2.2 | 157.8 | 75.0 | 130.6 | 32.4 | 4.7 | 1 232.6 |
| P+50R | 5.5 | 8.6 | 0.9 | 9.2 | 2.2 | 39.5 | 55.7 | 61.7 | 20.8 | 1.9 | 1 352.8 |

注:¹总多酚含量用没食子酸当量(GAE)表示;²总黄酮含量用芦丁当量(RUE)表示;³单宁含量用单宁酸当量(TAE)表示。

2.2 3 种水果的质构特性

由表 3 可见,3 种水果的硬度、凝聚性和咀嚼度排序均为甜橙>苹果>梨,且梨的各指标数值均

显著低于另外两种水果。回复性排序为甜橙>苹果>梨,3 者间均存在显著性差异。

表 3 水果的质构指标(平均值±标准差)
Table 3 Texture parameters of fruits ($\bar{x} \pm s$)

| 样品 | 硬度/N | 凝聚性 | 咀嚼度/N | 回复性 |
|------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 富士苹果 | 94.65 ± 6.01 ^a | 0.29 ± 0.02 ^a | 20.10 ± 2.79 ^a | 0.14 ± 0.01 ^a |
| 南非甜橙 | 114.99 ± 36.76 ^a | 0.34 ± 0.12 ^a | 24.11 ± 5.22 ^a | 0.22 ± 0.02 ^b |
| 丰水梨 | 73.03 ± 8.96 ^b | 0.23 ± 0.03 ^b | 11.51 ± 2.59 ^b | 0.10 ± 0.02 ^c |

注:同一列中的不同小写字母表示结果存在显著性差异, $P < 0.05$ 。

2.3 受试者基本信息

本试验共纳入 10 位年轻超重受试者的血糖及饱腹感数据,其中 7 位男性,3 位女性。受试者基本信息见表 4。

受试者各测试餐前空腹血糖水平曲线如图 1 所示。除个别点外,空腹血糖浓度(4.4~6.0 mmol/L)

均处于正常范围内。各测试餐的空腹血糖平均值为 5.2 mmol/L 或 5.3 mmol/L,各餐间无显著性差异。在 50 g-OGTT 试验中,每位受试者空腹血糖均在 6.1 mmol/L 以下;有 4 位受试者 2 h 血糖浓度超过 7.8 mmol/L,而低于 11.1 mmol/L。

表 4 受试者基本信息(平均值±标准差)

Table 4 The basic information of subjects ($\bar{x} \pm s$)

| 年龄/岁 | 身高/cm | 体重/kg | BMI/kg·m ⁻² | 体脂率/% |
|------------|-------------|-------------|------------------------|------------|
| 21.0 ± 2.3 | 167.6 ± 9.6 | 79.1 ± 18.0 | 28.3 ± 4.6 | 32.8 ± 4.7 |

受试者各测试餐前空腹血糖水平曲线如图 1 所示。除个别点外,空腹血糖浓度(4.4~6.0 mmol/L)均处于正常范围内。各测试餐的空腹血糖平均值为 5.2 mmol/L 或 5.3 mmol/L,各餐间无显著性差异。在 50 g-OGTT 试验中,每位受试者空腹血糖均在 6.1 mmol/L 以下;有 4 位受试者 2 h 血糖浓度超过 7.8 mmol/L,而低于 11.1 mmol/L。

2.4 各测试餐餐后血糖反应

将餐后各时间点血糖浓度减去空腹血糖浓度得到血糖变化值,各测试餐的餐后血糖反应曲线如图 2 所示。进食餐前负荷后的 15 min 和 30 min,餐前负荷水果组血糖有所上升;进食米饭 30 min 后,即 60 min 时,3 个餐前负荷水果组的血糖浓度均显著低于 W+50R 组。除 120 min 时 O+50R 组与 P+50R 组血糖浓度有显著差异,其它各时间点 3 个餐前负荷水果组之间均无显著差异。

由表 5 可见,白米饭餐前负荷水果后 MAGE180 较对照组显著降低 21%~36%,其中 A+50R 和 O+50R 组分别使餐后血糖峰值显著降低 35.5%和 32.3%。O+50R 组的 iAUC60-120 显著低

于 W+50R 组。比较单位碳水化合物含量引起的血糖上升,结果发现与 W+50R 组相比,A+50R 和 O+50R 分别使 AAC 显著降低 27.3%和 34.1%。

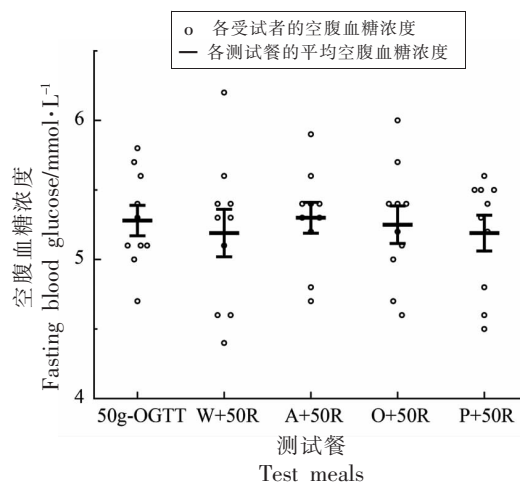
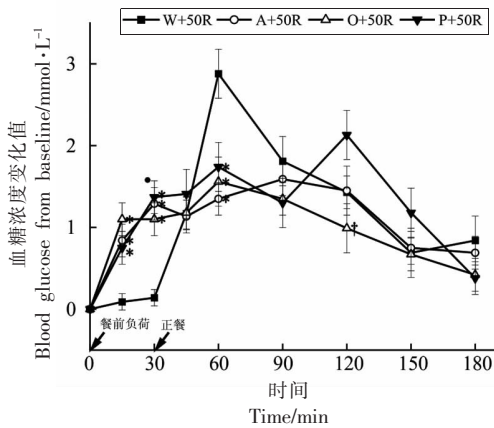


图 1 受试者各测试餐的空腹血糖浓度(平均值±标准误)($n = 10$)

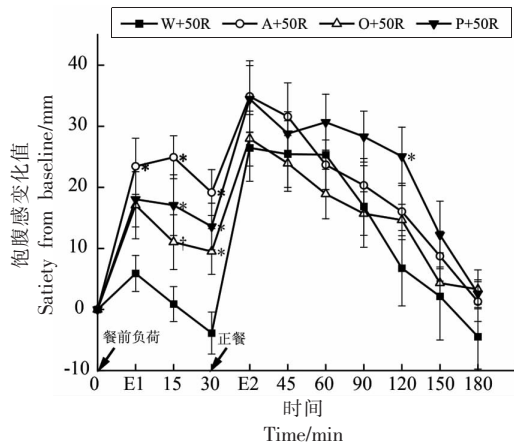
Fig.1 Fasting blood sugar in test meals of all subjects ($\bar{x} \pm s$) ($n = 10$)



注: * 相同时间, 与 W+50R 组有显著性差异 ($P < 0.05$);
† 相同时间, O+50R 组与 P+50R 组有显著性差异 ($P < 0.05$)。

图2 测试餐的餐后血糖反应曲线 (平均值±标准误) ($n=10$)

Fig.2 Postprandial blood glucose concentration changes of test meals ($\bar{x} \pm s$) ($n = 10$)



注: * 相同时间, 与 W+50R 组有显著性差异 ($P < 0.05$);
† 相同时间, A+50R 组与 O+50R 组有显著性差异 ($P < 0.05$)。

图3 测试餐的饱腹感反应曲线 (平均值±标准误) ($n=10$)

Fig.3 Satiety changes of test meals ($\bar{x} \pm s$) ($n = 10$)

2.5 各测试餐后饱腹感反应

如图3所示, 15 min 时 A+50R 和 P+50R 组饱腹感变化值显著大于 W+50R, 30 min 时 3 个餐前负荷水果组的饱腹感变化值均显著大于 W+50R。而进食正餐白米饭后, 仅 120 min 时 P+50R 组饱腹感显著高于 W+50R 组, 其它时间点未发现显著性差异。

由表6饱腹感反应特征值可知, 3个餐前负荷水果组的饱腹感谷值较 W+50R 组显著升高, 而饱腹感峰值无显著性差异。对比不同时间段饱腹感反应曲线下面积 iAUC, 仅 0~60 min 时 A+50R 组显著高于 W+50R 组。

受试者第2餐实际进食的饺子数在各测试餐和对照组间均无显著性差异, 如图4所示。

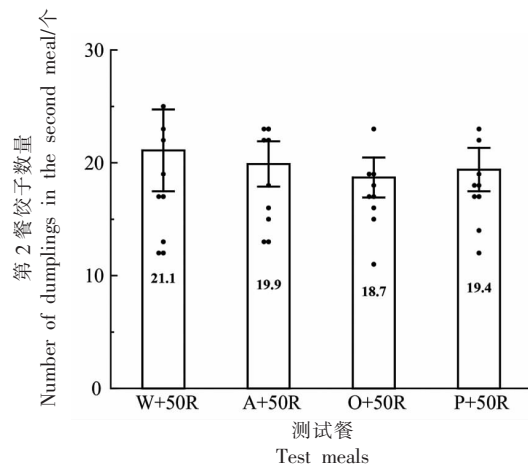


图4 第2餐摄入饺子的数量 (平均值±标准误) ($n = 10$)

Fig.4 The number of dumplings at second meal ($\bar{x} \pm s$) ($n = 10$)

表5 测试餐的餐后血糖反应特征值 (平均值±标准误) ($n = 10$)

Table 5 The postprandial glycemic response characteristics of test meals ($\bar{x} \pm s$) ($n = 10$)

| 测试餐 | MAGE ₁₈₀ / mmol·L ⁻¹ | 血糖峰值/ mmol·L ⁻¹ | iAUC ₀₋₆₀ / mmol·min·L ⁻¹ | iAUC ₆₀₋₁₂₀ / mmol·min·L ⁻¹ | iAUC ₁₂₀₋₁₈₀ / mmol·min·L ⁻¹ | iAUC ₀₋₁₈₀ / mmol·min·L ⁻¹ | AAC/mm ² ·g ⁻¹ |
|-------|---|-------------------------------|--|--|---|---|--------------------------------------|
| W+50R | 3.3 ± 0.3 ^a | 3.1 ± 0.2 ^a | 45.7 ± 4.0 | 119.0 ± 11.5 ^a | 56.7 ± 11.3 | 221.4 ± 17.3 | 4.4 ± 0.3 ^a |
| A+50R | 2.1 ± 0.2 ^b | 2.0 ± 0.2 ^b | 60.0 ± 7.0 | 89.8 ± 11.0 ^{ab} | 55.4 ± 7.9 | 205.2 ± 21.5 | 3.2 ± 0.3 ^b |
| O+50R | 2.2 ± 0.2 ^b | 2.1 ± 0.2 ^b | 62.4 ± 7.4 | 78.9 ± 10.7 ^b | 44.2 ± 9.7 | 185.5 ± 22.2 | 2.9 ± 0.3 ^b |
| P+50R | 2.6 ± 0.3 ^b | 2.4 ± 0.3 ^{ab} | 66.4 ± 8.8 | 97.1 ± 15.3 ^{ab} | 76.3 ± 15.9 | 239.7 ± 35.2 | 3.7 ± 0.5 ^{ab} |

注: 同一列中的不同小写字母表示结果存在显著性差异, $P < 0.05$ 。

表 6 测试餐的饱腹感反应特征值(平均值±标准误)($n=10$)Table 6 The satiety response characteristics of test meals ($\bar{x} \pm s$) ($n=10$)

| 测试餐 | 饱腹感峰值/ mm | 饱腹感谷值/ mm | iAU ₀₋₆₀ / mm·min | iAUC ₆₀₋₁₂₀ / mm·min | iAUC ₁₂₀₋₁₈₀ / mm·min | iAUC ₀₋₁₈₀ / mm·min | AE/mm· min·kJ ⁻¹ |
|-------|--------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| W+50R | 30.4 ± 5.4 | -10.8 ± 3.7 ^a | 825.5 ± 192.6 ^a | 1 158.5 ± 278.5 | 545.3 ± 236.8 | 2 529.2 ± 641.6 | 3.0 ± 0.8 |
| A+50R | 40.3 ± 5.1 | -4.0 ± 1.5 ^b | 1 525.7 ± 210.4 ^b | 1 214.1 ± 233.5 | 647.5 ± 192.7 | 3 387.4 ± 601.4 | 3.0 ± 0.5 |
| O+50R | 32.1 ± 3.5 | -4.1 ± 1.5 ^b | 1 049.8 ± 195.6 ^{ab} | 1 009.7 ± 155.2 | 457.5 ± 91.1 | 2 517.0 ± 379.4 | 2.0 ± 0.3 |
| P+50R | 39.0 ± 4.3 | -2.7 ± 1.1 ^b | 1 342.5 ± 225.2 ^{ab} | 1 685.1 ± 258.1 | 818.5 ± 244.5 | 3 846.1 ± 639.6 | 2.8 ± 0.5 |

注:同一列中的不同小写字母表示结果存在显著性差异, $P<0.05$ 。

2.6 相关性分析

各测试餐成分与血糖反应特征值的相关性分析结果见表 7。总可利用碳水化合物及葡萄糖含量与血糖 iAUC₀₋₆₀ 呈显著正相关关系,果胶含量与血糖 iAUC₆₀₋₁₂₀ 及 AAC 呈显著负相关关系,总黄酮含量与血糖 iAUC₆₀₋₁₂₀ 呈显著负相关关系。

3 种水果的质构指标与血糖反应特征值的相关性分析结果见表 8。硬度与血糖 iAUC₁₂₀₋₁₈₀ 呈显

著负相关关系,凝聚性与血糖 iAUC₁₂₀₋₁₈₀、iAUC₀₋₁₈₀ 及 AAC 均呈极显著负相关关系,回复性与血糖 iAUC₆₀₋₁₂₀ 呈显著负相关关系。

血糖反应特征值与饱腹感反应特征值的相关性分析结果见表 9。血糖 iAUC₀₋₆₀ 与饱腹感谷值呈显著正相关,血糖 iAUC₁₂₀₋₁₈₀ 与饱腹感 iAUC₆₀₋₁₂₀ 以及 iAUC₁₂₀₋₁₈₀ 显著正相关。

表 7 测试餐营养成分与血糖反应特征值相关性分析($n=10$)Table 7 The correlation analysis between nutritional composition and glycemic characteristics of test meals ($n=10$)

| 营养成分 | | 血糖峰值 | MAGE ₁₈₀ | iAUC ₀₋₆₀ | iAUC ₆₀₋₁₂₀ | iAUC ₁₂₀₋₁₈₀ | iAUC ₀₋₁₈₀ | AAC |
|-----------|-------------|--------|---------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|---------|
| 总可利用碳水化合物 | Pearson 相关性 | -0.940 | -0.918 | 0.957* | -0.898 | 0.070 | -0.243 | -0.864 |
| | 显著性(双侧) | 0.060 | 0.082 | 0.043 | 0.102 | 0.930 | 0.757 | 0.136 |
| 葡萄糖 | Pearson 相关性 | -0.883 | -0.855 | 0.988* | -0.856 | 0.173 | -0.141 | -0.805 |
| | 显著性(双侧) | 0.117 | 0.145 | 0.012 | 0.144 | 0.827 | 0.859 | 0.195 |
| 果胶 | Pearson 相关性 | -0.870 | -0.881 | 0.692 | -0.983* | -0.495 | -0.735 | -0.976* |
| | 显著性(双侧) | 0.130 | 0.119 | 0.308 | 0.017 | 0.505 | 0.265 | 0.024 |
| 总黄酮 | Pearson 相关性 | -0.857 | -0.844 | 0.905 | -0.951* | -0.129 | -0.417 | -0.899 |
| | 显著性(双侧) | 0.143 | 0.156 | 0.095 | 0.049 | 0.871 | 0.583 | 0.131 |

注:* 显著相关, $P<0.05$;** 极显著相关, $P<0.01$ 。

表 8 水果质构指标与血糖反应特征值相关性分析($n=10$)Table 8 The correlation analysis between texture parameters of fruits and glycemic characteristics of test meals ($n=10$)

| 质构指标 | | 血糖峰值 | MAGE ₁₈₀ | iAUC ₀₋₆₀ | iAUC ₆₀₋₁₂₀ | iAUC ₁₂₀₋₁₈₀ | iAUC ₀₋₁₈₀ | AAC |
|------|-------------|--------|---------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|----------|
| 硬度 | Pearson 相关性 | -0.862 | -0.888 | -0.785 | -0.940 | -0.998* | -0.997 | -0.996 |
| | 显著性(双侧) | 0.338 | 0.305 | 0.425 | 0.222 | 0.041 | 0.050 | 0.058 |
| 凝聚性 | Pearson 相关性 | -0.820 | -0.849 | -0.734 | -0.964 | -1.000** | -1.000** | -1.000** |
| | 显著性(双侧) | 0.388 | 0.355 | 0.475 | 0.171 | 0.010 | 0.000 | 0.008 |
| 咀嚼度 | Pearson 相关性 | -0.936 | -0.953 | -0.880 | -0.868 | -0.972 | -0.969 | -0.965 |
| | 显著性(双侧) | 0.229 | 0.195 | 0.316 | 0.331 | 0.150 | 0.160 | 0.168 |
| 回复性 | Pearson 相关性 | -0.598 | -0.639 | -0.483 | -0.999* | -0.944 | -0.949 | -0.953 |
| | 显著性(双侧) | 0.592 | 0.558 | 0.679 | 0.032 | 0.213 | 0.204 | 0.195 |

注:* 显著相关, $P<0.05$;** 极显著相关, $P<0.01$ 。

表9 血糖反应特征值与饱腹感反应特征值相关性分析($n=10$)Table 9 The correlation analysis between glyceimic characteristics and satiety characteristics of test meals ($n=10$)

| 血糖反应指标 | | 饱腹感 峰值 | 饱腹感 谷值 | 饱腹感 iAUC ₀₋₆₀ | 饱腹感 iAUC ₆₀₋₁₂₀ | 饱腹感 iAUC ₁₂₀₋₁₈₀ | 饱腹感 iAUC ₀₋₁₈₀ | 饱腹感 AE |
|-------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------|
| 血糖 | Pearson 相关性 | 0.653 | 0.988* | 0.696 | 0.457 | 0.461 | 0.639 | -0.414 |
| iAUC ₀₋₆₀ | 显著性(双侧) | 0.347 | 0.012 | 0.304 | 0.543 | 0.539 | 0.361 | 0.586 |
| 血糖 | Pearson 相关性 | 0.532 | 0.236 | 0.348 | 0.983* | 0.951* | 0.823 | 0.544 |
| iAUC ₁₂₀₋₁₈₀ | 显著性(双侧) | 0.468 | 0.764 | 0.652 | 0.017 | 0.049 | 0.177 | 0.456 |

注:* 显著相关, $P<0.05$;** 极显著相关, $P<0.01$ 。

3 讨论

本研究证实,餐前 30 min 额外摄入含 15 g 可利用碳水化合物 3 种水果,均能在一定程度上平缓年轻超重受试者白米饭餐的餐后血糖反应,其中,苹果和甜橙的效果优于梨。这提示水果餐前负荷的平缓血糖作用可能是一个普遍现象,不仅限于苹果和猕猴桃,甚至吃水果额外增加了碳水化合物摄入量的情况下,仍有平缓餐后血糖的效应。不同水果的作用差异可能与水果的营养成分及质构特性有关。相关性分析表明,水果中的总黄酮含量和果胶含量与 60~120 min 的血糖曲线下面积负相关。流行病学及动物研究表明,某些膳食多酚能够改善血糖反应^[23]。另有体外试验发现,水果中酚类物质具有 α -葡萄糖苷酶抑制活性^[24-25],进而可以降低消化速率,压制餐后血糖快速上升。其中苹果多酚提取物还被发现能够降低健康成年人进食含淀粉或蔗糖食物后的血糖反应^[26]。果胶属于可溶性膳食纤维,富含果胶的食物基质有利于延缓细胞内容物释放和胃排空^[27-28],因此有益于改善餐后血糖反应。本研究中,餐前负荷甜橙组的酚类化合物及果胶含量显著高于餐前负荷苹果和梨组(表 2),可能是白米饭餐前负荷甜橙降低餐后血糖反应的原因之一。

本研究中,苹果和甜橙的硬度、凝聚性、咀嚼度及回复性均显著高于梨,降低餐后血糖峰值及 AAC 的作用也较梨明显。此前研究表明,食物质地越坚硬,咀嚼性越强,食物消化速率越慢^[29],有利于避免餐后血糖的快速上升。和完整水果相比,无需咀嚼的果泥果汁的血糖上升速度更快^[30]。本研究中凝聚性与血糖 iAUC₀₋₁₈₀ 及 AAC 均呈极显著负相关,提示质构特性可能是影响不同水果餐前负荷效果的重要因素之一。

苹果的多酚和果胶含量虽不及甜橙,但这两种水果在降低餐后血糖峰值、MAGE₁₈₀ 及 AAC 的幅度上是相似的。此前研究发现餐前负荷和苹果糖组分一致的糖水,可在一定程度上起到平缓餐后血糖的作用^[7]。也有研究指出土豆餐前负荷 10 g 果糖能够显著减小餐后血糖曲线下面积^[31],其原理可能是小剂量果糖通过增强肝脏葡萄糖代谢,降低高 GI 膳食的血糖反应^[32-33]。本研究中苹果的果糖含量约为甜橙的 2 倍(如表 2),解释了苹果餐前负荷效果较好的部分原因。

本研究中受试者进食水果后 30 min 内的饱腹感增加,餐前负荷水果组的饱腹感 iAUC₀₋₁₈₀ 均高于或相当于对照组,各组间第 2 餐摄入食物无显著差异,表明餐前摄入水果不会显著影响食欲和下一餐的食物摄入量。不同水果在 0~180 min 的饱腹感曲线下面积无显著差异,而餐前负荷梨 120 min 的饱腹感分值显著高于米饭对照,可能是因为餐前负荷梨 120 min 的血糖值较高。相关性分析也表明,血糖 iAUC₁₂₀₋₁₈₀ 与饱腹感 iAUC₁₂₀₋₁₈₀ 显著正相关,即 120 min 后的血糖水平相对较高,有利于维持下一餐之前的良好饱腹感,这对预防因餐前饥饿而导致摄入过多热量有所帮助^[34]。

本研究中餐前食用的水果质量在 134~240 g 之间,均低于或介于膳食指南中 200~350 g 的推荐摄入量,具有良好的实操性。流行病学研究提示长期摄入苹果和梨有利于预防糖尿病^[35],而糖尿病患者适量摄入水果有利于预防心血管疾病等并发症^[10],说明以餐前负荷水果作为平缓餐后血糖的方法既简单又安全。然而,由于本研究的受试者均为年轻健康超重人群,且仅是 1 餐后的研究。此研究的结果是否适用于糖尿病患者,长时间水果餐前负荷是否能持续起到平缓餐后血糖的效果,

还需大量的人体试验验证。

总之,本研究结果证实,即便餐前负荷水果是额外摄入,增加了 1 餐的总碳水化合物数量,仍有利于平缓餐后血糖波动,这种作用可能与水果质构和成分有关。餐前 30 min 摄入水果时通过何种机制引起餐后血糖峰值的下降,仍有待于进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] LIN M A, WU M, LU S, et al. Glycemic index, glycemic load and insulinemic index of Chinese starchy foods[J]. *World Journal of Gastroenterology*, 2010, 16(39): 4973-4979.
- [2] ROBERT S D, ISMAIL A A, ROSLI W I W. Reduction of postprandial blood glucose in healthy subjects by buns and flat breads incorporated with fenugreek seed powder[J]. *European Journal of Nutrition*, 2016, 55(7): 2275-2280.
- [3] DICKINSON S, BRAND-MILLER J. Glycemic index, postprandial glycemia and cardiovascular disease[J]. *Current Opinion in Lipidology*, 2005, 16(1): 69-75.
- [4] RAZ I, CERIELLO A, WILSON P W, et al. Post hoc subgroup analysis of the HEART2D trial demonstrates lower cardiovascular risk in older patients targeting postprandial versus fasting/premeal glycemia[J]. *Diabetes Care*, 2011, 34(7): 1511-1513.
- [5] 王琳琳, 范志红. 餐前负荷对餐后血糖的影响[J]. *中国食物与营养*, 2019, 25(6): 67-71.
WANG L L, FAN Z H. Effect of consuming food as preload on postprandial glycemic response[J]. *Food and Nutrition in China*, 2019, 25(6): 67-71.
- [6] LUBRANSKY A, MONRO J, MISHRA S, et al. Postprandial glycaemic, hormonal and satiety responses to rice and kiwifruit preloads in Chinese adults: a randomised controlled crossover trial [J]. *Nutrients*, 2018, 10(8): 1110.
- [7] LU J C, ZHAO W Q, WANG L L, et al. Apple preload halved the postprandial glycaemic response of rice meal in healthy subjects[J]. *Nutrients*, 2019, 11(12): 2912.
- [8] DREHER M L. Whole fruits and fruit fiber emerging health effects [J]. *Nutrients*, 2018, 10(12): 1833.
- [9] KRISHNASWAMY K, GAYATHRI R. Nature's bountiful gift to humankind: vegetables & fruits & their role in cardiovascular disease & diabetes [J]. *Indian Journal of Medical Research*, 2018, 148(5): 569-595.
- [10] DU H, LI L, BENNETT D, et al. Fresh fruit consumption in relation to incident diabetes and diabetic vascular complications: A 7-y prospective study of 0.5 million Chinese adults [J]. *Plos Medicine*, 2017, 14(4): e1002279.
- [11] 中国营养学会. 中国居民膳食指南 2016 版[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2016: 56-57.
Chinese Nutrition Society. Chinese dietary guidelines 2016[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2016: 56-57.
- [12] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard. Determination of fat: GB 5009.6-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-2.
- [13] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-3.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard. Determination of protein: GB 5009.5-2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-3.
- [14] 中华人民共和国卫生部中国国家标准化管理委员会. 植物类食品中粗纤维的测定: GB/T 5009.10-2003 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 1-3.
Ministry of Health of the People's Republic of China. Standardization Administration of China. Determination of crude fiber in plant foods: GB/T 5009.10-2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 1-3.
- [15] SINGLETON V L, ORTHOFER R, LAMUELA-RAVENTOS R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent[J]. *Methods in Enzymology*, 1999, 299: 152-178.
- [16] XU B J, YUAN S H, CHANG S K C. Comparative analyses of phenolic composition, antioxidant capacity, and color of cool season legumes and other se-

- lected food legumes [J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(2): S167-S177.
- [17] 侯曼玲. 食品分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 137-138.
- HOU M L. Food analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 137-138.
- [18] 中华人民共和国农业部. 水果及其制品中果胶含量的测定分光光度法: NY/T 2016-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 1-5.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of pectin content in fruit and derived product -Spectrophotometry method: NY/T 2016-2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011: 1-5.
- [19] 刘亚平, 李红波. 物性分析仪及 TPA 在果蔬质地测试中的应用综述[J]. 山西农业大学学报 (自然科学版), 2010, 30(2): 188-192.
- LIU Y P, LI H B. Review on the application of texture analyzer and TPA in the assessment for fruits and vegetables texture[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Nature Science Edition)*, 2010, 30(2): 188-192.
- [20] 潘秀娟, 屠康. 质地仪质地多面分析(TPA)方法对苹果采后质地变化的检测[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 166-170.
- PAN X J, TU K. Comparison of texture properties of post-harvested apples using texture profile analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(3): 166-170.
- [21] BROUNS F, BJORCK I, FRAYN K N, et al. Glycaemic index methodology[J]. *Nutrition Research Reviews*, 2005, 18(1): 145-171.
- [22] WOLEVER T. Effect of blood sampling schedule and method of calculating the area under the curve on validity and precision of glycaemic index values [J]. *British Journal of Nutrition*, 2004, 91(2): 295-300.
- [23] KIM Y, KEOGH J, CLIFTON P. Polyphenols and glycaemic control[J]. *Nutrients*, 2016, 8(1): 17.
- [24] MIAO J, LI X, ZHAO C, et al. Active compounds, antioxidant activity and α -glucosidase inhibitory activity of different varieties of *Chaenomeles* fruits[J]. *Food Chemistry*, 2018, 248: 330-339.
- [25] DE OLIVEIRA RAPHAELLI C, DOS SANTOS PEREIRA E, CAMARGO T M, et al. Apple phenolic extracts strongly inhibit α -glucosidase activity [J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2019, 74(3): 430-435.
- [26] CASTRO-ACOSTA M L, STONE S G, MOK J E, et al. Apple and blackcurrant polyphenol-rich drinks decrease postprandial glucose, insulin and incretin response to a high-carbohydrate meal in healthy men and women[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2017, 49: 53-62.
- [27] YU K, KE M, LI W, et al. The impact of soluble dietary fibre on gastric emptying, postprandial blood glucose and insulin in patients with type 2 diabetes [J]. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 2014, 23(2): 210-218.
- [28] ARGYRI K, SOTIROPOULOS A, PSAROU E, et al. Dessert formulation using sucralose and dextrin affects favorably postprandial response to glucose, insulin, and C-peptide in type 2 diabetic patients [J]. *The Review of Diabetic Studies: RDS*, 2013, 10(1): 39-48.
- [29] CHAMBERS L. Food texture and the satiety cascade [J]. *Nutrition Bulletin*, 2016, 41(3): 277-282.
- [30] BOLTON R P, HEATON K W, BURROUGHS L F. The role of dietary fiber in satiety, glucose, and insulin-studies with fruit and fruit juice[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 1981, 34(2): 211-217.
- [31] HEACOCK P M, HERTZLER S R, WOLF B W. Fructose prefeeding reduces the glycaemic response to a high-glycaemic index, starchy food in humans[J]. *Journal of Nutrition*, 2002, 132(9): 2601-2604.
- [32] GEIDL-FLUECK B, GERBER P A. Insights into the hexose liver metabolism-glucose versus fructose [J]. *Nutrients*, 2017, 9(9): 1026.
- [33] PETERSEN K F, LAURENT D, YU C L, et al. Stimulating effects of low-dose fructose on insulin-stimulated hepatic glycogen synthesis in humans[J]. *Diabetes*, 2001, 50(6): 1263-1268.
- [34] WYATT P, BERRY S E, FINLAYSON G, et al. Postprandial glycaemic dips predict appetite and energy intake in healthy individuals [J]. *Nature Metabolism*, 2021, 3(4): 523-529.
- [35] GUO X, YANG B, TANG J, et al. Apple and pear consumption and type 2 diabetes mellitus risk: a meta-analysis of prospective cohort studies[J]. *Food & Function*, 2017, 8(3): 927-934.

Postprandial Glycemic and Satiety Responses to Three Kinds of Fruits Preloads

Lu Xuejiao¹, Lu Jiaca¹, Fan Zhihong^{1,2*}, Liu Anshu¹, Zhao Wenqi¹, Wu Yixue¹

(¹College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083

²Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health, Beijing 100083)

Abstract To investigate the impact of different fresh fruits preloads on acute postprandial glycemic and satiety responses, 10 young overweight volunteers consumed apple, orange or pear preload containing 15 g available carbohydrates before a rice meal containing 50 g available carbohydrates. The postprandial blood glucose and satiety parameters in 180 min as well as the texture properties and chemical composition of the three fruits were measured. The results indicated that all fruit preloads decreased the maximum amplitudes of glycemic excursion significantly compared with the control group. Apple and orange preload achieved 27.3% and 34.1% reduction of the area under glycemic curve contributed by per gram of available carbohydrate. The self-reported satiety scores did not differ significantly among test meals and the control meal. In conclusion, this study demonstrated that preloading of 3 fruits 30 min before white rice meal could mitigate postprandial glycemic response in young overweight subjects, while the effect might partly be explained by the composition and texture characteristics of fruits.

Keywords preload; fruits; glycemic response; satiety; overweight subjects