

# 不同质构特性西蓝花对口腔加工行为和米饭餐饱腹感的影响

娄鑫玲, 武艺雪, 范志红\*, 赵文祺, 胡嘉惠, 韩悦, 卢雪娇, 刘岸书  
(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为探究同样原料不同质构蔬菜对口腔加工行为、食物摄入和饱腹感的影响, 以两种熟西蓝花为研究对象, 分析健康受试者同时食用西蓝花与米饭或先食用西蓝花、后食用米饭时的口腔加工行为, 并测定食物摄入量及餐后饱腹感相关指标。结果表明: 与同时进食软西蓝花和米饭相比, 先进食硬西蓝花、后进食米饭的处理可增加44%的咀嚼次数、34%的口腔感官暴露时间、57%的单位质量咀嚼次数, 进食速率和米饭摄入量分别降低25%和20%, 并有效抑制餐后饥饿感。结论: 较硬西蓝花可通过促进口腔加工效应从而降低食物摄入并抑制餐后饥饿感, 而这种效应在先进食西蓝花时表现得更为显著。

**关键词:** 西蓝花; 质构; 进食顺序; 口腔加工; 食物摄入; 饱腹感

## Broccoli Texture Modulates Oral Processing Behavior and Satiety of Cooked Rice

LOU Xinling, WU Yixue, FAN Zhihong\*, ZHAO Wenqi, HU Jiahui, HAN Yue, LU Xuejiao, LIU Anshu  
(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** This study aimed to investigate the impacts of vegetables with different textures on food oral processing behavior, food intake and satiety. Broccoli cooked by microwave for different periods of time were tested in this study. The oral processing behavior of simultaneous and sequential consumption of cooked broccoli and rice, *ad libitum* food intake and postprandial satiety were measured in healthy subjects. Results showed that compared with co-ingestion of soft broccoli and seasoned rice (SSR), sequential ingestion of hard broccoli followed by seasoned rice (H + SR) increased the number of chews, the oral sensory exposure time and the number of chews per gram by 44%, 34% and 57%, respectively, and reduced the eating rate by 25% and the rice intake by 20%. Moreover, compared with SSR, H + SR effectively suppressed the perception of postprandial hunger. In conclusion, hard-cooked broccoli helped to reduce food intake and inhibit subjective hunger by enhancing oral processing, and this effect was more significant when the vegetable was first consumed cooked by cooked.

**Keywords:** broccoli; texture; meal sequence; oral processing; food intake; satiety

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220601-003

中图分类号: TS201.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)09-0131-08

引文格式:

娄鑫玲, 武艺雪, 范志红, 等. 不同质构特性西蓝花对口腔加工行为和米饭餐饱腹感的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 131-138. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220601-003. <http://www.spkx.net.cn>

LOU Xinling, WU Yixue, FAN Zhihong, et al. Broccoli texture modulates oral processing behavior and satiety of cooked rice[J]. Food Science, 2023, 44(9): 131-138. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220601-003. <http://www.spkx.net.cn>

全球约10亿成年人患有肥胖<sup>[1]</sup>, 而肥胖与2型糖尿病、心血管疾病、代谢综合征等多种疾病风险相关<sup>[2]</sup>, 已成为一种全球性的公共卫生危机。抑制进食欲望、提高餐后饱腹感, 有利于通过调节食物摄入量从而预防肥胖<sup>[3]</sup>。

饱足感和饱腹感是调节进食欲望的两个要点。饱足感会导致进餐的终止, 使食物摄入量得到控制; 而饱腹感能维持餐后不想进食的状态, 对避免过早启动下一次进食行为至关重要。有研究提示, 用蔬菜与米饭搭配食用,

收稿日期: 2022-06-01

第一作者简介: 娄鑫玲(1998—)(ORCID: 0000-0003-3033-8371), 女, 硕士研究生, 研究方向为营养与食品安全。

E-mail: xinlinglou@cau.edu.cn

\*通信作者简介: 范志红(1966—)(ORCID: 0000-0002-8760-897X), 女, 教授, 博士, 研究方向为食物营养与人体健康。

E-mail: daisyfan@vip.sina.com

可以在减少一餐能量摄入的同时增加餐后4 h内的饱腹感<sup>[4]</sup>, 这可能是因为蔬菜富含膳食纤维及水分<sup>[5]</sup>, 可以在降低餐食能量密度的同时带来饱腹感。

先吃蔬菜的进食顺序也有可能对体质量控制、肥胖预防有益。一项横断面研究表明, 儿童若在用餐时先吃蔬菜, 比先吃米饭/面包、肉/鱼和汤的超重风险更低<sup>[6]</sup>。Imai<sup>[7]</sup>、Sun Lijuan<sup>[8]</sup>等也发现, 用餐时先吃蔬菜可稳定餐后的血糖和胰岛素水平, 血糖和胰岛素水平稳定有利于提升饱腹感<sup>[9]</sup>, 在长期实验中<sup>[7]</sup>有利于控制血脂和体质量。在蔬菜中, 西蓝花 (*Brassica oleracea* var. *italica*) 是一种具有预防癌症、糖尿病、心脑血管疾病的深绿色蔬菜<sup>[10]</sup>, 也是已知饱腹感评分最高的食材之一<sup>[11]</sup>。因此推测, 在用餐时先食用西蓝花可能有利于增加餐后饱腹感, 减少能量摄入。

另一方面, 口腔加工行为也会对食物摄入产生调节作用。研究发现, 在食物成分相同的前提下, 与液体食物相比, 需要咀嚼的固体食物形式会引起更强的饱腹感<sup>[12-13]</sup>。食物的硬度与咀嚼次数、咀嚼频率、每口咀嚼次数、口腔感官暴露时间正相关, 与进食速率负相关<sup>[14-15]</sup>, 而口腔感官暴露时间的延长可能会增加饱腹感<sup>[15]</sup>, 进食速率的降低也与饱腹感的增加<sup>[16]</sup>以及食物摄入量与能量摄入量的减少有关<sup>[17]</sup>。

虽然已有研究表明不同质构的食材会对口腔加工参数产生不同影响<sup>[18]</sup>, 然而目前有关质构对口腔加工、食物摄入和饱腹感影响的研究都是基于不同食物、或相同食物的不同物理状态进行的比较。但不同食物的营养素构成不同, 而营养素构成是影响食物摄入量和饱腹感的重要因素<sup>[19]</sup>, 不同食物之间的比较难以单独体现食物质构和口腔加工的影响。此外, 多数食物是在相同物理状态下食用只是存在较小的质地差异, 这种小差异是否也能带来口腔加工行为、饱腹感和摄食量的变化, 目前还缺乏相关研究证据。同时, 目前鲜见有关在不同进食顺序的情况下探讨食物质构对口腔加工行为影响的报道。考虑到西蓝花的质构特性便于通过烹调进行控制, 本研究拟以健康成年女性为受试者, 以不同烹调处理的西蓝花为研究样品, 分成与米饭同时食用和先后食用西蓝花、米饭两种模式, 探究蔬菜的质构特性与口腔加工行为对一餐食物摄入量和饱腹感的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

西蓝花 (产地河北) 为市售; 食用盐 中盐北京市盐业公司; 鸡精 上海太太乐食品有限公司; 长粒香米 中粮福临门; 蚝油 佛山市海天调味食品股份有限公司; 酱油 李锦记 (新会) 食品有限公司; 香油 嘉里粮油 (天津) 有限公司; 五香粉、白胡椒粉 上海味好美食品有限公司。

### 1.2 仪器与设备

FA 2004千分之一天平 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; LQ-C20002天平 上海瑶新电子科技有限公司; TA. XT. plus质构仪 英国SMS公司; M1-L201B微波炉、MY-HT5093型电压力锅 美的生活电器制造有限公司; SPL6506BM摄像头 飞利浦 (中国) 投资有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 西蓝花烹调

每份取250 g西蓝花, 切成花球直径3 cm、茎长2 cm的小朵置于聚丙烯保鲜盒 (181 cm×128 cm×88 cm) 中, 加入62.5 g超纯水, 轻轻摇晃至每朵西蓝花表面均沾有水分, 然后将保鲜盒放入微波炉800 W分别加热2.5、3.0、3.5、4.0、4.5 min。随后加入0.94 g盐和0.31 g鸡精混匀备用。

#### 1.3.2 感官评价

对烹调后的5种西蓝花进行定量描述, 其中色泽、多汁性、风味的评价标准参考文献<sup>[20]</sup>并略作修改, 如表1所示。采用视觉模拟评分法 (visual analogue scale, VAS)<sup>[21]</sup>评价加热处理不同时间的5种西蓝花样品的硬度 (游动标尺0~10 cm依次表示硬度由软到硬) 与耐嚼性 (游动标尺0~10 cm依次表示耐嚼性由容易咀嚼到不易咀嚼)。筛选15名经过培训的评价员 (18~26岁) 建立感官评价小组, 对样品进行随机编号, 每名评定成员单独进行评价, 相互不接触交流, 样品评定间歇用清水漱口。

表1 感官评分标准  
Table 1 Criteria for sensory evaluation of cooked broccoli

感官	描述	评分
色泽	色泽浅绿, 茎部略呈透明, 有光泽	5
	色泽较深, 有光泽	4
	色泽鲜绿, 茎部呈绿色且透明, 比较干, 无光泽	3
	菜花部深绿, 茎部浅绿	2
	色泽深绿有部分菜花出现黄色, 有蔫的状态	1
多汁性	富含汁水, 有西蓝花特有的味道	5
	有较多汁水	4
	有些汁水	3
	稍有些汁水	2
	干蔫状态, 没有汁水	1
质地	保有西蓝花竖直状态, 内部稍软且带有脆感	5
	形态完整, 内部稍软, 无脆感	4
	质地松软, 无脆感, 有一点韧性	3
	质地非常松软, 无脆感, 形态稍有破损	2
	形态破损, 入口软烂或形态不变, 似生时状态	1
风味	有典型的西蓝花风味, 鲜嫩适口且有一点甜度, 有清香味	5
	有西蓝花风味, 适口, 无甜度	4
	无特殊风味, 口感适中	3
	无特殊风味, 口感稍差	2
	无西蓝花独特风味, 入口太干或过烂	1
整体喜好度	根据个人喜好评分, 1为极不喜欢, 10为极度喜欢 (满分)	1~10

### 1.3.3 质构特性测定

取西蓝花生样(记为RB)、微波2.5 min(记为HB)组和微波4.5 min(记为SB)组样品,参考朱瑞欣<sup>[22]</sup>、卢家灿<sup>[23]</sup>的方法并略作修改进行质构特性分析。

#### 1.3.3.1 穿刺测试

将西蓝花茎部切为0.5 cm的薄片,选用P/2探头、HDP/90平台进行穿刺测试。测前速率1.5 mm/s、测试速率1.0 mm/s、测后速率10.0 mm/s、测试距离10 mm、触发力5.0 g、数据获取率200 pps。至少进行10次平行测定。穿刺强度为穿刺测试特征应力-时间曲线的特征应力峰值/N,穿刺弹性定义为从触发零点到破裂点之间的水平距离/mm。

#### 1.3.3.2 剪切测试

将西蓝花切去花球部分使用茎部进行剪切测试,剪切位置在茎部二分之一处。选用HDP/BS刀具。使用Compression模式,测前速率10.0 mm/s、测试速率1.0 mm/s、测后速率10.0 mm/s、测试距离15 mm、触发力5.0 g、数据获取率200 pps。至少进行10次平行测定。最大剪切力为特征应力-时间曲线特征应力峰值,剪切韧性为曲线下正面积,剪切脆性为曲线正峰个数。

### 1.3.4 口腔加工行为分析

#### 1.3.4.1 测试餐制备

测试餐由西蓝花样品和调味米饭组成。参考1.3.1节方法制备西蓝花样品后立刻呈递给受试者;调味米饭制作后暂存于60℃保温箱备用。调味米饭的烹调方法参考文献[24]并略作调整。称取550 g大米于电饭锅中,加入16.5 mL香油、22 mL酱油、5.5 g蚝油、1.65 g五香粉、1.1 g白胡椒粉和1 050 g水,搅拌均匀,蒸煮模式烹煮30 min。经预实验证实,调味米饭具有良好的感官接受性,无需菜肴即可愉快进食。测试餐分为共同进食和先吃蔬菜两种模式给予受试者。

**共同进食模式:**将西蓝花与调味米饭同时提供给受试者,要求两者混合进食。其中包括两个处理:1) 250 g微波加热4.5 min的较软西蓝花和不限量的调味米饭共同进食(记为SSR组);2) 250 g微波加热2.5 min的较硬西蓝花和不限量的调味米饭共同进食(记为HSR组)。

**先吃蔬菜模式:**先提供西蓝花,待西蓝花进食结束后立即提供调味米饭。其中包括两个处理:1) 先食用250 g微波加热4.5 min的较软西蓝花,全部吃完后不限量进食调味米饭(记为S+SR组);2) 先食用250 g微波加热2.5 min的较硬西蓝花,全部吃完后不限量进食调味米饭(记为H+SR组)。

#### 1.3.4.2 研究对象

招募并筛选27名健康的18~27岁的健康女性为受试者。纳入标准如下:身体质量指数在18.5~23.9 kg/m<sup>2</sup>;过去两个月内体质量稳定,一年内未进行节食减肥;无口腔疾病或牙敏感,未佩戴牙套;三餐、作息规律;

对西蓝花或米饭无过敏史;无任何消化系统疾病或胃肠不适状况;不吸烟、不饮酒;无任何代谢性疾病;无进食紊乱症。与受试者签订书面协议,并要求其在每次试验的前一天规律饮食,每次试验当天早上在固定时间进食固定内容的早餐,避免熬夜。

#### 1.3.4.3 特征值测定

受试者上午11:50进入实验室,静坐10 min后开始食用测试餐,要求进食时间不超过45 min。整个进食过程使用摄像头进行录像,并要求受试者在进食过程中注意力集中,禁止看手机、聊天等行为。每两次试验之间间隔至少2 d。分析方法参考van Eck等<sup>[25]</sup>的方法:观察记录进食期间的咀嚼次数、筷数、口腔感官暴露(oro-sensory exposure, OSE)时间、筷间间隔时间、进食时间、进食速率、能量摄入速率、每口咀嚼次数、每口摄入量、每口咀嚼时间、单位质量咀嚼次数。筷数定义为进食时间内使用筷子将食物送入口中的次数;OSE时间定义为每一口样品放入口中到样品吞咽的累计时间;筷间间隔时间定义为上一口样品吞咽到下一口样品放入口中的累计时间;进食速率定义为摄入的总食物质量与进食时间的比值;能量摄入速率定义为摄入食物总能量与进食时间的比值。

#### 1.3.5 饱腹感试验

受试者与1.3.4节口腔加工行为分析中的受试者相同。记录受试者进食不同测试餐时的食物摄入量,并采用VAS<sup>[21]</sup>对受试者进餐前及进餐开始后0~240 min的饱腹感、饥饿感、进食欲望和预期进食量进行评价,评价时间点为进食前(0 min)、进食结束时,以及进食开始后的30、45、60、90、120、150、180、210、240 min。饱腹感相关指标以0 min为基线计算变化值,采用梯形法则<sup>[26]</sup>计算测试餐在0~60、60~120、120~180、180~240、0~240 min内曲线与x坐标轴之间的曲线下增加面积(incremental area under curve, iAUC),分别记为iAUC<sub>0~60</sub>、iAUC<sub>60~120</sub>、iAUC<sub>120~180</sub>、iAUC<sub>180~240</sub>以及iAUC<sub>0~240</sub>。通过饥饿感曲线最高点与最低点数值确定峰值、谷值,峰值与谷值间差值为餐后240 min内最大饥饿感波动幅度(maximum amplitudes of hunger excursion in 240 min, MAHE<sub>240</sub>)。

### 1.4 数据处理与分析

采用SPSS 23.0、Excel 2021软件对数据进行处理。结果以平均值±标准误表示。采用t检验进行两两比较,采用单因素方差分析比较多组之间的显著性差异,方差齐性检验后若方差齐( $P>0.1$ ),使用Duncan进行事后检验;若方差不齐,用Dunnett T3进行事后检验, $P<0.05$ 表示差异显著。对口腔加工行为、饱腹感反应进行Pearson相关分析。使用GraphPad Prism 7.0软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 各烹调时间下西蓝花的感官评价

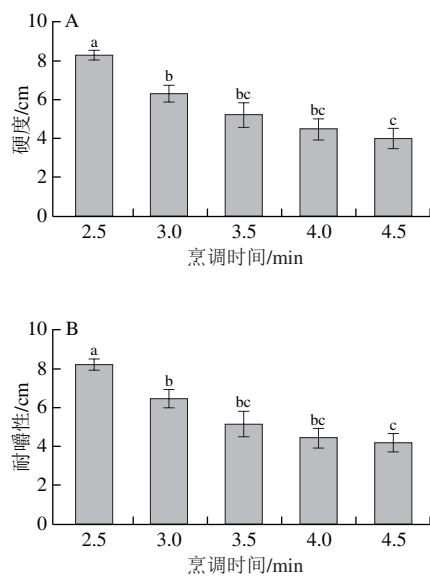
不同烹调时间下西蓝花的感官评分如表2所示。微波2.5 min西蓝花的质地得分最高，且显著高于微波4.5 min的西蓝花 ( $P < 0.05$ )，其余感官指标和整体喜好度均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。不同烹调时间下西蓝花硬度和耐嚼性的VAS评分结果如图1所示。微波2.5 min西蓝花的硬度和耐嚼性评分最高，分别为8.55和8.22，且与微波4.5 min西蓝花差异显著 ( $P < 0.05$ )。因此，后续实验选择整体喜好度没有显著差异且感官品质、硬度、耐嚼性差异显著的2.5 min组和4.5 min组进行测定与分析。

表2 西蓝花的感官评分

Table 2 Quantitative description of broccoli cooked for different periods of time

烹调时间/min	色泽	多汁性	质地	风味	整体喜好度
2.5	4.0±0.3 <sup>a</sup>	2.9±0.2 <sup>a</sup>	4.9±0.1 <sup>a</sup>	3.7±0.4 <sup>a</sup>	6.7±0.6 <sup>a</sup>
3.0	3.2±0.4 <sup>a</sup>	3.6±0.2 <sup>a</sup>	4.7±0.2 <sup>ab</sup>	3.9±0.2 <sup>a</sup>	7.2±0.2 <sup>a</sup>
3.5	3.2±0.3 <sup>a</sup>	3.4±0.3 <sup>a</sup>	3.7±0.3 <sup>bc</sup>	3.5±0.3 <sup>a</sup>	6.9±0.6 <sup>a</sup>
4.0	3.5±0.3 <sup>a</sup>	3.7±0.3 <sup>a</sup>	3.9±0.3 <sup>bc</sup>	3.5±0.3 <sup>a</sup>	6.5±0.6 <sup>a</sup>
4.5	3.7±0.4 <sup>a</sup>	3.5±0.3 <sup>a</sup>	3.5±0.2 <sup>c</sup>	3.4±0.3 <sup>a</sup>	6.3±0.5 <sup>a</sup>

注：相同指标肩标小写字母不同表示存在显著差异 ( $P < 0.05$ )；表3~5同。



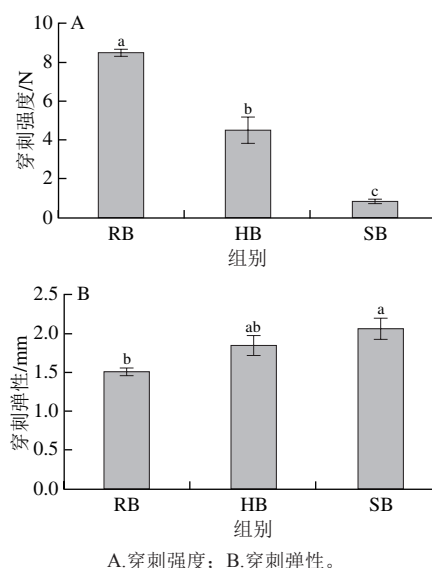
A. 硬度；B. 耐嚼性。小写字母不同表示存在显著差异 ( $P < 0.05$ )；图2~3同。

图1 VAS法分析西蓝花的硬度和耐嚼性评分

Fig. 1 Hardness and chewiness of broccoli measured by visual analogue scale

### 2.2 不同硬度下西蓝花的质构特性分析结果

如图2所示，RB的穿刺强度最大，为8.48 N，HB组其次，SB组最小，为0.79 N。SB组的穿刺弹性显著大于RB组 ( $P < 0.05$ )，HB组与其他两组的穿刺弹性无显著差异。

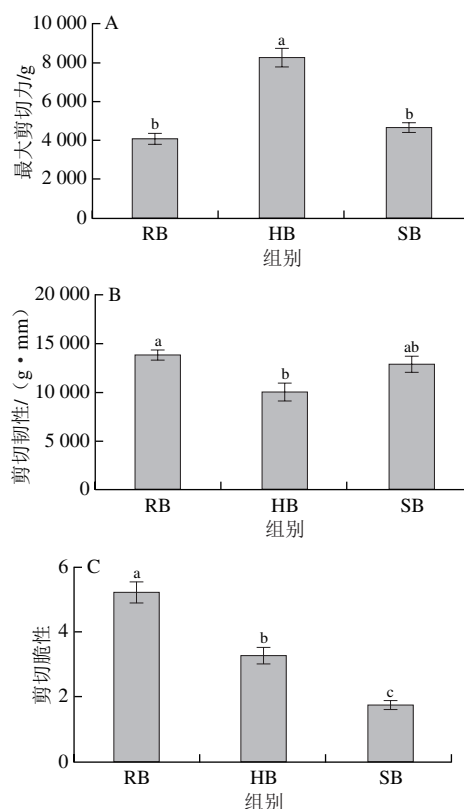


A. 穿刺强度；B. 穿刺弹性。

图2 西蓝花的穿刺质构特性

Fig. 2 Texture properties of broccoli measured by puncture tests

如图3所示，HB组具有最大的剪切力 (8 267.93 g) 且与其他两组差异显著 ( $P < 0.05$ )。HB组的剪切韧性显著低于RB组 ( $P < 0.05$ )，SB组的剪切韧性大于HB组 ( $P = 0.083$ )。各组间剪切脆性均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )，RB组最大 (5.22)，SB组最小 (1.73)。



A~C. 分别为最大剪切力、剪切韧性、剪切脆性。

图3 西蓝花的剪切质构特性

Fig. 3 Texture properties of broccoli measured by shear tests

2.3 不同测试餐下的口腔加工行为

各组测试餐的口腔加工行为特征值如表3所示。与进食软西蓝花的SSR组和S+SR组相比,先进食硬西蓝花的H+SR组咀嚼次数分别高出44%和25%。类似地,H+SR组的OSE时间亦显著长于其他3组,比SSR、HSR、S+SR组分别增加了34%、18%和27%。在筷间间隔时间上,H+SR组比HSR组和S+SR组分别缩短了26%和30%。

表3 口腔加工行为特征值

Table 3 Characteristic parameters of oral processing behavior

口腔加工行为	SSR	HSR	S+SR	H+SR
咀嚼次数	1 163.11±76.41 <sup>b</sup>	1 447.82±101.49 <sup>ab</sup>	1 343.89±91.35 <sup>b</sup>	1 673.96±114.51 <sup>a</sup>
筷数/次	61.93±3.82 <sup>a</sup>	68.37±3.60 <sup>a</sup>	65.67±3.87 <sup>a</sup>	59.41±3.24 <sup>a</sup>
OSE时间/s	816.13±46.52 <sup>b</sup>	924.83±58.47 <sup>b</sup>	860.37±48.65 <sup>b</sup>	1 093.42±67.51 <sup>a</sup>
筷间间隔时间/s	96.83±11.47 <sup>ab</sup>	106.73±9.26 <sup>a</sup>	111.93±7.62 <sup>a</sup>	78.52±7.54 <sup>b</sup>
进食时间/min	15.22±0.82 <sup>b</sup>	17.19±1.05 <sup>ab</sup>	16.26±0.81 <sup>ab</sup>	19.18±1.16 <sup>a</sup>
进食速率/(g/min)	35.14±1.70 <sup>a</sup>	32.12±1.93 <sup>a</sup>	31.61±1.93 <sup>a</sup>	26.52±1.34 <sup>b</sup>
能量摄入速率/(kJ/min)	113.11±7.15 <sup>a</sup>	99.28±7.17 <sup>a</sup>	98.76±7.88 <sup>a</sup>	72.53±5.86 <sup>b</sup>
每口咀嚼次数	20.25±1.63 <sup>b</sup>	22.77±2.02 <sup>ab</sup>	22.38±2.04 <sup>ab</sup>	30.87±2.82 <sup>a</sup>
每口摄入量/g	8.75±0.42 <sup>a</sup>	7.88±0.39 <sup>a</sup>	7.76±0.37 <sup>a</sup>	8.43±0.37 <sup>a</sup>
每口咀嚼时间/s	14.28±1.00 <sup>b</sup>	14.73±1.27 <sup>ab</sup>	14.53±1.31 <sup>ab</sup>	20.15±1.65 <sup>a</sup>
单位质量咀嚼次数/(次/g)	2.35±0.17 <sup>b</sup>	2.90±0.21 <sup>b</sup>	2.88±0.21 <sup>b</sup>	3.68±0.34 <sup>a</sup>

各组的进食时间范围为15.21~19.18 min,其中H+SR组的进食时间比SSR组多26%。H+SR组的进食速率比SSR、HSR、S+SR组分别降低了25%、17%、16%,而能量摄入速率分别降低了33%、24%、24%。在每口咀嚼次数、每口咀嚼时间方面,H+SR组比SSR组分别高52%、41%。类似地,H+SR组的单位质量咀嚼次数显著高于其他3组,比SSR、HSR、S+SR组分别增加了57%、27%和28%。

2.4 不同测试餐下的食物摄入量与餐后饱腹感

2.4.1 调味米饭摄入量

各组自由摄入调味米饭的数量如表4所示。在摄食量和摄入能量方面,H+SR组显著低于SSR组( $P<0.05$ ),并有明显低于HSR组的趋势( $P=0.064$ )。

表4 自由摄食米饭摄入量

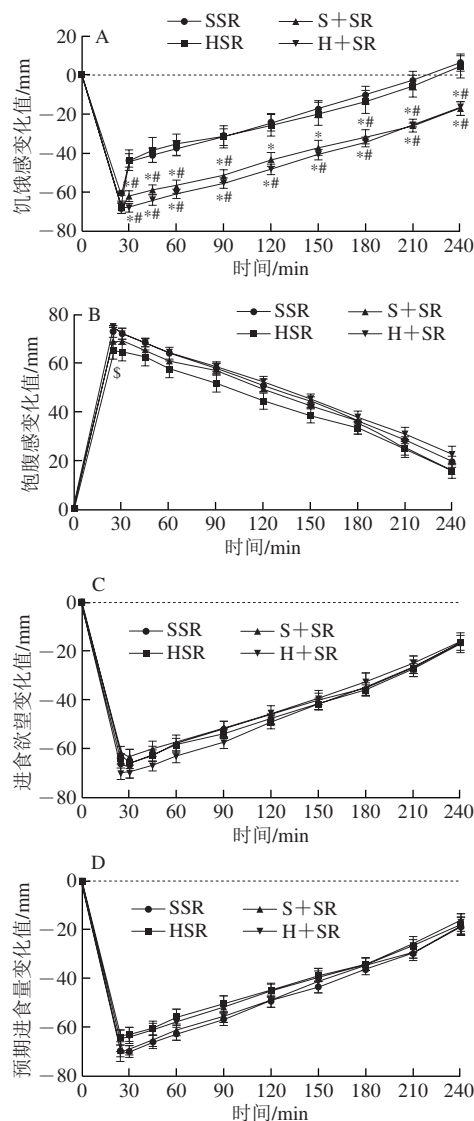
Table 4 Food intake of rice in ad libitum test meals

指标	SSR	HSR	S+SR	H+SR
调味米饭摄入量/g	234.03±13.42 <sup>a</sup>	222.84±11.94 <sup>ab</sup>	211.32±15.16 <sup>ab</sup>	186.17±13.56 <sup>b</sup>
调味米饭摄入能量/kJ	1 411.00±80.89 <sup>a</sup>	1 323.52±67.22 <sup>ab</sup>	1 274.07±91.37 <sup>ab</sup>	1 122.48±81.73 <sup>b</sup>

2.4.2 餐后饱腹感相关指标变化曲线及特征值

受试者的餐后饱腹感相关指标变化如图4所示。在饥饿感评价中,30~90 min以及180~240 min时间段共同进食组的饥饿感变化值显著高于另外两组( $P<0.05$ );120、150 min时SSR组饥饿感变化值显著高于S+SR、H+SR组( $P<0.05$ ),HSR组的饥饿感显著高于H+SR( $P<0.05$ ),且240 min时SSR、HSR组饥饿感甚至比空腹时更高。和先后进食西蓝花、米饭的方式相比,

共同进食米饭和西蓝花组的饥饿感回升更快,而相同进食顺序、不同质构特性测试餐给予组的饥饿感无显著差异( $P>0.05$ )。刚进食结束时,H+SR组的饱腹感变化值显著高于HSR( $P<0.05$ )。各组之间的进食欲望、预期摄入量在各时间点均无显著差异。



A~D:分别为饥饿感、饱腹感、进食欲望和预期进食量变化值。  
\*.与SSR组存在显著差异( $P<0.05$ );#.与HSR组存在显著差异( $P<0.05$ );\$. HSR组与H+SR组存在显著差异( $P<0.05$ )。

图4 VAS法测量的餐后饱腹感相关指标变化

Fig. 4 Changes in postprandial satiety parameters of test meals measured by visual analogue scale

饥饿感曲线特征值如表5所示。共同进食组饥饿感峰值和最大饥饿感波动幅度MAHE<sub>240</sub>显著高于先吃蔬菜组( $P<0.05$ ),而iAUC<sub>0~60</sub>、iAUC<sub>60~120</sub>、iAUC<sub>180~240</sub>以及iAUC<sub>0~240</sub>均显著低于先吃蔬菜组( $P<0.05$ )。在120~180 min之间,SSR组的iAUC显著低于S+SR、H+SR组( $P<0.05$ ),且HSR组显著低于H+SR组( $P<0.05$ )。

表5 饥饿感特征值

特征值	SSR	HSR	S+SR	H+SR
峰值	6.74±4.38 <sup>a</sup>	8.67±4.70 <sup>a</sup>	-13.71±3.20 <sup>b</sup>	-17.25±3.29 <sup>b</sup>
谷值	-72.28±1.95	-71.77±3.28	-66.76±2.78	-70.27±2.01
MAHE <sub>240</sub>	79.03±5.37 <sup>a</sup>	80.44±5.09 <sup>a</sup>	53.05±2.88 <sup>b</sup>	53.02±3.27 <sup>b</sup>
iAUC <sub>0~60</sub>	3 081.35±113.85 <sup>b</sup>	2 896.01±153.46 <sup>b</sup>	3 718.14±148.62 <sup>a</sup>	3 991.40±122.02 <sup>a</sup>
iAUC <sub>60~120</sub>	1 869.41±249.53 <sup>b</sup>	1 921.42±324.63 <sup>b</sup>	3 023.90±164.84 <sup>a</sup>	3 293.10±144.43 <sup>a</sup>
iAUC <sub>120~180</sub>	1 281.98±225.86 <sup>c</sup>	1 409.08±310.19 <sup>bc</sup>	2 310.50±178.82 <sup>ab</sup>	2 459.15±151.59 <sup>a</sup>
iAUC <sub>180~240</sub>	721.00±183.07 <sup>b</sup>	831.01±255.87 <sup>b</sup>	1 531.86±179.36 <sup>a</sup>	1 583.93±160.47 <sup>a</sup>
iAUC <sub>0~240</sub>	6 953.75±731.24 <sup>b</sup>	7 329.62±968.55 <sup>b</sup>	10 584.39±609.77 <sup>a</sup>	11 327.58±516.21 <sup>a</sup>

## 2.4.3 口腔加工行为与食物摄入和餐后饥饿感的相关性

如表6所示,能量摄入速率与食物摄入总质量及总能量摄入之间存在极显著正相关,进食速率与食物摄入总质量和总能量摄入呈极显著正相关。每口咀嚼次数、每口咀嚼时间与食物摄入总质量、总能量摄入呈极显著负相关,单位质量咀嚼次数与食物摄入总质量、总能量摄入呈极显著负相关。在饥饿感曲线特征值中,咀嚼次数、OSE时间、进食时间和单位质量咀嚼次数与曲线峰值呈显著负相关,而进食速率及能量摄入速率与峰值呈显著正相关。咀嚼次数和单位质量咀嚼次数与MAHE<sub>240</sub>呈显著负相关关系,而进食速率与其呈显著正相关。咀嚼次数、OSE时间、进食时间、每口咀嚼次数、每口咀嚼时间、单位质量咀嚼次数与饥饿感曲线的iAUC<sub>0~60</sub>、iAUC<sub>60~120</sub>、iAUC<sub>120~180</sub>、iAUC<sub>0~240</sub>呈显著正相关,而进食速率、能量摄入速率与其呈极显著负相关。类似地,咀嚼次数、OSE时间、进食时间、单位质量咀嚼次数与饥饿感曲线的iAUC<sub>180~240</sub>呈显著正相关,而进食速率与其呈显著负相关( $P<0.05$ )。

表6 口腔加工行为与食物及能量摄入和饥饿感特征值的相关性结果  
Table 6 Correlation analysis between oral processing behavior and food and energy intake or postprandial hunger response

指标	咀嚼次数	OSE时间	进食时间	进食速率	能量摄入速率	每口咀嚼次数	每口咀嚼时间	单位质量咀嚼次数	
摄入总质量	Pearson相关系数	-0.074	-0.153	-0.140	0.504**	0.738**	-0.301**	-0.370**	-0.400**
	显著性(双侧)	0.444	0.114	0.148	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
摄入总能量	Pearson相关系数	-0.110	-0.187	-0.172	0.527**	0.763**	-0.326**	-0.392**	-0.429**
	显著性(双侧)	0.259	0.052	0.075	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
峰值	Pearson相关系数	-0.239*	-0.212*	-0.208*	0.254**	0.190*	-0.156	-0.121	-0.219*
	显著性(双侧)	0.013	0.027	0.031	0.008	0.049	0.108	0.211	0.023
MAHE <sub>240</sub>	Pearson相关系数	-0.198*	-0.145	-0.144	0.210*	0.179	-0.113	-0.055	-0.190*
	显著性(双侧)	0.040	0.134	0.137	0.030	0.063	0.244	0.575	0.048
iAUC <sub>0~60</sub>	Pearson相关系数	0.254**	0.287**	0.261**	-0.338**	-0.321**	0.285**	0.302**	0.297**
	显著性(双侧)	0.008	0.003	0.006	0.000	0.001	0.003	0.001	0.002
iAUC <sub>60~120</sub>	Pearson相关系数	0.317**	0.303**	0.313**	-0.424**	-0.410**	0.300**	0.272**	0.360**
	显著性(双侧)	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002	0.004	0.000
iAUC <sub>120~180</sub>	Pearson相关系数	0.291**	0.288**	0.304**	-0.394**	-0.358**	0.234*	0.217*	0.313**
	显著性(双侧)	0.002	0.003	0.001	0.000	0.000	0.015	0.024	0.001
iAUC <sub>180~240</sub>	Pearson相关系数	0.220*	0.204*	0.212*	-0.239*	-0.181	0.145	0.126	0.200*
	显著性(双侧)	0.022	0.035	0.028	0.013	0.061	0.135	0.194	0.038
iAUC <sub>0~240</sub>	Pearson相关系数	0.292**	0.290**	0.297**	-0.382**	-0.348**	0.252**	0.237*	0.316**
	显著性(双侧)	0.002	0.002	0.002	0.000	0.000	0.008	0.014	0.001

注: \*显著相关( $P<0.05$ ); \*\*极显著相关( $P<0.01$ )。

## 3 讨论

本研究以质构硬度有显著差异、但感官喜好度一致的熟西蓝花作为试验材料,以西蓝花与米饭共同进食、先后食用西蓝花、米饭两种模式进行实验,探究不同质构特征西蓝花对口腔加工行为、食物摄入和饱腹感相关指标的影响。

实验发现,在先进食蔬菜的情况下,H+SR组的咀嚼次数、OSE时间、单位质量咀嚼次数显著高于S+SR组,进食速率、能量摄入速率则显著低于S+SR组。这说明控制西蓝花的烹调时间可以有效改变其质构特性,从而改变口腔加工行为和食物摄入节奏。

咀嚼可能加强口腔和机械感受器的动态反馈,有利于机体更快地感知到已摄入大量食物<sup>[27]</sup>。有系统研究表明,进食速率对食物摄入量有显著影响<sup>[28-29]</sup>,也是能量摄入的重要决定因素<sup>[30]</sup>。一项横断面研究发现,与进食速率较低的人相比,进食速率较快的人每天平均多摄入440 kJ热量,体质量平均高5 kg<sup>[31]</sup>,降低20%的进食速率可减少10%~15%的自主能量摄入<sup>[32]</sup>。本研究中,H+SR组的进食速率比SSR、HSR、S+SR组分别降低了25%、17%、16%,而能量摄入量分别降低了18%、14%、10%。

此前有研究表明,食物硬度的增加会导致OSE时间延长、每口咀嚼次数增加<sup>[33]</sup>,而硬度又与进食速率存在强负相关关系<sup>[34]</sup>。Bolhuis<sup>[35]</sup>和Lasschuijt<sup>[36]</sup>等在改变食物质构的摄食实验中发现,更硬的食物会导致每克食物的咀嚼时间更长、咀嚼次数更多,从而降低了进食速率,使食物摄入量显著减少13%~22%。而食物OSE时间的延长有助于味觉接触和头相反应,使机体更快地感受到饱足感<sup>[33,37-38]</sup>,从而有助于降低进食量。类似地,本研究中相关性分析结果表明,进食速率、能量摄入速率与摄入总能量之间有极显著正相关关系,每口咀嚼次数与摄入总能量之间存在极显著负相关关系,而OSE时间与其也存在明显相关关系( $r=0.052$ )。

然而,在共同进食情况下,SSR组和HSR组在以上指标中均无明显差异,这可能是因为在本研究,较硬西蓝花和较软西蓝花具有相似的感官喜好度,硬度和软度并没有达到令人不适的程度。当西蓝花和调味米饭一起咀嚼时,质地更软、黏性更高的米饭会降低口中食物的整体硬度,从而淡化了西蓝花硬度差异对口腔加工行为的影响。然而,在先吃蔬菜的模式下,H+SR组的OSE时间、单位质量咀嚼次数显著高于HSR组,进食速率、能量摄入速率则显著低于HSR组。这提示先吃蔬菜的模式能够更好地凸显出食物质构差异对口腔加工行为和食物摄入行为的影响,这种现象鲜见于以往研究中。

本研究发现,在4种测试餐条件下,先吃蔬菜的H+SR和S+SR两组都能有效抑制餐后饥饿感的回升

和波动,且H+SR组米饭摄入量显著低于SSR组,即H+SR组可以在摄入更少量米饭的前提下抑制餐后的饥饿感,这可能与口腔加工行为有关。Ferriday等<sup>[39]</sup>让受试者进食20种1674 kJ的不同市售预包装餐食后发现,较慢的能量摄入速率、较长的OSE时间与更强的餐后饱腹感相关。有研究表明,增加每口咀嚼次数会提升相关肠道激素的水平,并增加主观饱腹感<sup>[29]</sup>。也有研究发现,和单位质量食物咀嚼15次相比,咀嚼40次可以降低餐后饥饿感,这在一定程度上与餐后胃饥饿素浓度降低、葡萄糖依赖性促胰岛素多肽、胰高血糖素样肽-1和胆囊收缩素的浓度升高有关<sup>[40-41]</sup>。然而也有荟萃分析研究认为咀嚼次数的增加和进食速率的降低有助于增加饱腹感,但影响程度较小<sup>[28]</sup>。在本研究中,口腔加工行为参数与饱腹感之间虽然显著相关,但相关系数较小,与该研究结果一致。

值得注意的是,先后进食西蓝花、米饭的H+SR、S+SR两组饥饿感曲线变化值显著低于共同进食的HSR、SSR两组,而相同进食顺序、不同质构的两种测试餐组之间则无显著差异,这提示就减缓饥饿感的效果而言,进食顺序的调整可能比质构调整更有效。有研究发现,先吃蔬菜和鸡肉,10 min后再吃面包和橙汁的进食顺序,对主观饱腹感并无显著影响,却可以有效抑制餐后180 min时的胃饥饿素水平<sup>[42]</sup>。本研究发现,自由摄食时先吃西蓝花的进食顺序对口腔加工行为也存在一定的影响,由此推测,与共同进食组相比,先吃蔬菜组对餐后饥饿感的抑制作用,可能与增加口腔加工行为和调节胃肠激素水平两方面的共同作用有关。

此前有关改变进食顺序的研究多集中于降低餐后血糖反应的角度<sup>[7-8]</sup>,且发现先摄入较多有咀嚼性的蔬菜可有效降低餐后血糖波动,而打成浆的蔬菜则不能有效降低餐后血糖反应<sup>[43]</sup>,这提示咀嚼行为可能介导了先吃蔬菜控制餐后血糖的机制。有研究发现,增加测试餐的每口咀嚼次数和延长OSE时间会导致葡萄糖的早期吸收,从而刺激更高的胰岛素反应,有助于维持血糖水平、增强餐后饱腹感<sup>[44]</sup>。类似地,在摄入米饭前进食大量需要咀嚼的蔬菜(如豆角、菜花)也利于增加饱腹感<sup>[23]</sup>。较长的咀嚼时间会增加味觉感受器的活性,从而刺激更多胰岛素分泌<sup>[45]</sup>,而胰岛素作为餐后饱腹感的独立预测因子,被认为会产生厌食效应,可能是咀嚼提升饱腹感的关键因素<sup>[46]</sup>。Wu Yixue等<sup>[47]</sup>发现,先吃硬西蓝花再吃米饭增加了餐后胰岛素的分泌,这可能是该进食模式有助于抑制餐后饥饿感的原因之一。

总之,本研究发现,与共同进食模式相比,在先进食西蓝花的模式下,食物硬度对口腔加工行为和饥饿感具有更显著的影响。先后进食硬西蓝花和米饭的方式,不仅可以减少米饭的摄入,还能显著抑制餐后饥饿感的回升和波动,这可能与咀嚼次数增加、OSE时间延长

以及进食速率降低有关。通过进食模式和口腔加工方式两种因素的相互作用而有效降低进食速率,是一个简便且安全的膳食措施,有利于预防因为摄食过量导致的肥胖问题,值得进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] HOFFMAN D J, POWELL T L, BARRETT E S, et al. Developmental origins of metabolic diseases[J]. *Physiological Reviews*, 2021, 101(3): 739-795. DOI:10.1152/physrev.00002.2020.
- [2] HAN T S, LEAN M E. A clinical perspective of obesity, metabolic syndrome and cardiovascular disease[J]. *Journal of the Royal Society of Medicine Cardiovascular Disease*, 2016, 5: 1-13. DOI:10.1177/2048004016633371.
- [3] BELLISLE F, DREWNOWSKI A, ANDERSON G H, et al. Sweetness, satiety, and satiety[J]. *The Journal of Nutrition*, 2012, 142(6): 1149S-1154S. DOI:10.3945/jn.111.149583.
- [4] CHANG U J, HONG Y H, SUH H J, et al. Lowering the energy density of parboiled rice by adding water-rich vegetables can decrease total energy intake in a parboiled rice-based diet without reducing satiety on healthy women[J]. *Appetite*, 2010, 55(2): 338-342. DOI:10.1016/j.appet.2010.07.007.
- [5] GUSTAFSSON K, ASP N G, HAGANDER B, et al. Satiety effects of spinach in mixed meals: comparison with other vegetables[J]. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 1995, 46(4): 327. DOI:10.3109/09637489509012564.
- [6] TANI Y, FUJIWARA T, OCHI M, et al. Does eating vegetables at start of meal prevent childhood overweight in Japan? A-CHILD study[J]. *Frontiers in Pediatrics*, 2018, 6: 134. DOI:10.3389/fped.2018.00134.
- [7] IMAI S, FUKUI M, KAJIYAMA S. Effect of eating vegetables before carbohydrates on glucose excursions in patients with type 2 diabetes[J]. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 2014, 54(1): 7-11. DOI:10.3164/jcbs.13.
- [8] SUN Lijuan, GOH H J, GOVINDHARAJULU P, et al. Postprandial glucose, insulin and incretin responses differ by test meal macronutrient ingestion sequence (PATTERN study)[J]. *Clinical Nutrition*, 2020, 39(3): 950-957. DOI:10.1016/j.clnu.2019.04.001.
- [9] LEHMANN U, ROBIN F. Slowly digestible starch: its structure and health implications: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2007, 18(7): 346-355. DOI:10.1016/j.tifs.2007.02.009.
- [10] YAGISHITA Y, FAHEY J W, DINKOVA-KOSTOVA A T, et al. Broccoli or sulforaphane: is it the source or dose that matters?[J]. *Molecules*, 2019, 24(19): 3593. DOI:10.3390/molecules24193593.
- [11] BUCKLAND N J, JAMES STUBBS R, FINLAYSON G. Towards a satiety map of common foods: associations between perceived satiety value of 100 foods and their objective and subjective attributes[J]. *Physiology & Behavior*, 2015, 152: 340-346. DOI:10.1016/j.physbeh.2015.07.001.
- [12] MARTENS M J I, LEMMENS S G T, BORN J M, et al. A solid high-protein meal evokes stronger hunger suppression than a liquefied high-protein meal[J]. *Obesity*, 2011, 19(3): 522-527. DOI:10.1038/oby.2010.258.
- [13] MOURAO D M, BRESSAN J, CAMPBELL W W, et al. Effects of food form on appetite and energy intake in lean and obese young adults[J]. *International Journal of Obesity*, 2007, 31(11): 1688-1695. DOI:10.1038/sj.ijo.0803667.
- [14] FORDE C G, VAN KUIJK N, THALER T, et al. Oral processing characteristics of solid savoury meal components, and relationship with food composition, sensory attributes and expected satiety[J]. *Appetite*, 2013, 60: 208-219. DOI:10.1016/j.appet.2012.09.015.
- [15] CAMPBELL C L, WAGONER T B, FOEGEDING E A. Designing foods for satiety: the roles of food structure and oral processing in

- satiation and satiety[J]. *Food Structure*, 2017, 13: 1-12. DOI:10.1016/j.foosr.2016.08.002.
- [16] ANGELOPOULOS T, KOKKINOS A, LIASKOS C, et al. The effect of slow spaced eating on hunger and satiety in overweight and obese patients with type 2 diabetes mellitus[J]. *BMJ Open Diabetes Research & Care*, 2014, 2(1): e13. DOI:10.1136/bmjdr-2013-000013.
- [17] VISKAAL-VAN DONGEN M, KOK F J, DE GRAAF C. Eating rate of commonly consumed foods promotes food and energy intake[J]. *Appetite*, 2011, 56(1): 25-31. DOI:10.1016/j.appet.2010.11.141.
- [18] PEYRON M A, LASSAUZAY C, WODA A. Effects of increased hardness on jaw movement and muscle activity during chewing of visco-elastic model foods[J]. *Experimental Brain Research*, 2002, 142(1): 41-51. DOI:10.1007/s00221-001-0916-5.
- [19] SÁNCHEZ-PIMIENTA T G, QUEZADA-SÁNCHEZ A D, RIVERA J A, et al. Nutrient composition of mealtimes and its association with the energy intake of subsequent meals among Mexican adults[J]. *Appetite*, 2021, 164: 105288. DOI:10.1016/j.appet.2021.105288.
- [20] 孟祥忍, 谢静, 王恒鹏, 等. 过热蒸汽对西兰花和胡萝卜品质的影响[J]. *中国调味品*, 2019, 44(8): 114-117. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2019.08.022.
- [21] BLUNDELL J, DE GRAAF C, HULSHOF T, et al. Appetite control: methodological aspects of the evaluation of foods[J]. *Obesity Reviews*, 2010, 11(3): 251-270. DOI:10.1111/j.1467-789X.2010.00714.x.
- [22] 朱瑞欣, 范志红, 郑飞飞. 水煮菠菜的质构、感官和VC保存率分析[J]. *食品科技*, 2017, 42(9): 49-54. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2017.09.010.
- [23] 卢家灿, 赵文祺, 范志红, 等. 五种蔬菜-米饭混合餐饱腹感评分比较[J]. *中国食物与营养*, 2020, 26(5): 57-62. DOI:10.19870/j.cnki.11-3716/ts.2020.05.013.
- [24] 范志红, 武艺雪, 鲁瑾瑜. 营养型米饭调味剂及其制备方法、米饭蒸煮方法: 202010997361.3[P]. (2020-12-25)[2022-06-01]. <https://d.wanfangdata.com.cn/patent/ChJQYXRlbnROZXdTmJyAyMjEyMDcSEENOMjAyMDEwOTk3MzYxLjMaCGglNWdqYmxv>.
- [25] VAN ECK A, WIJNE C, FOGLIANO V, et al. Shape up! How shape, size and addition of condiments influence eating behavior towards vegetables[J]. *Food & Function*, 2019, 10(9): 5739-5751. DOI:10.1039/C9FO01206K.
- [26] WOLEVER T M S. 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. DOI:10.1079/BJN20031054.
- [27] HOLLIS J H. The effect of mastication on food intake, satiety and body weight[J]. *Physiology & Behavior*, 2018, 193: 242-245. DOI:10.1016/j.physbeh.2018.04.027.
- [28] KROP E M, HETHERINGTON M M, NEKITSING C, et al. Influence of oral processing on appetite and food intake: a systematic review and meta-analysis[J]. *Appetite*, 2018, 125: 253-269. DOI:10.1016/j.appet.2018.01.018.
- [29] MIQUEL-KERGOAT S, AZAIS-BRAESCO V, BURTON-FREEMAN B, et al. Effects of chewing on appetite, food intake and gut hormones: a systematic review and meta-analysis[J]. *Physiology & Behavior*, 2015, 151: 88-96. DOI:10.1016/j.physbeh.2015.07.017.
- [30] VAN DEN BOER J, WERTS M, SIEBELINK E, et al. The availability of slow and fast calories in the Dutch diet: the current situation and opportunities for interventions[J]. *Foods*, 2017, 6(10): 87. DOI:10.3390/foods6100087.
- [31] TEO P S, VAN DAM R M, WHITTON C, et al. Association between self-reported eating rate, energy intake, and cardiovascular risk factors in a multi-ethnic Asian population[J]. *Nutrients*, 2020, 12(4): 1080. DOI:10.3390/nu12041080.
- [32] FORDE C G. From perception to ingestion; the role of sensory properties in energy selection, eating behaviour and food intake[J]. *Food Quality and Preference*, 2018, 66: 171-177. DOI:10.1016/j.foodqual.2018.01.010.
- [33] BOLHUIS D P, FORDE C G. Application of food texture to moderate oral processing behaviors and energy intake[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 106: 445-456. DOI:10.1016/j.tifs.2020.10.021.
- [34] AGUAYO-MENDOZA M G, KETEL E C, VAN DER LINDEN E, et al. Oral processing behavior of drinkable, spoonable and chewable foods is primarily determined by rheological and mechanical food properties[J]. *Food Quality and Preference*, 2019, 71: 87-95. DOI:10.1016/j.foodqual.2018.06.006.
- [35] BOLHUIS D P, FORDE C G, CHENG Y, et al. Slow food: sustained impact of harder foods on the reduction in energy intake over the course of the day[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(4): e93370. DOI:10.1371/journal.pone.0093370.
- [36] LASSCHUIJT M P, MARS M, STIEGER M, et al. Comparison of oro-sensory exposure duration and intensity manipulations on satiation[J]. *Physiology & Behavior*, 2017, 176: 76-83. DOI:10.1016/j.physbeh.2017.02.003.
- [37] FORDE C G, ALMIRON-ROIG E, BRUNSTROM J M. Expected satiety: application to weight management and understanding energy selection in humans[J]. *Current Obesity Reports*, 2015, 4(1): 131-140. DOI:10.1007/s13679-015-0144-0.
- [38] DE GRAAF C. Why liquid energy results in overconsumption[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2011, 70(2): 162-170. DOI:10.1017/S0029665111000012.
- [39] FERRIDAY D, BOSWORTH M, GODINOT N, et al. Variation in the oral processing of everyday meals is associated with fullness and meal size; a potential nudge to reduce energy intake?[J]. *Nutrients*, 2016, 8(5): 315. DOI:10.3390/nu8050315.
- [40] ZHU Y, HSU W H, HOLLIS J H. Increasing the number of masticatory cycles is associated with reduced appetite and altered postprandial plasma concentrations of gut hormones, insulin and glucose[J]. *British Journal of Nutrition*, 2013, 110(2): 384-390. DOI:10.1017/S0007114512005053.
- [41] LI J, ZHANG N, HU L Z, et al. Improvement in chewing activity reduces energy intake in one meal and modulates plasma gut hormone concentrations in obese and lean young Chinese men[J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2011, 94(3): 709-716. DOI:10.3945/ajcn.111.015164.
- [42] SHUKLA A P, MAUER E, IGEL L I, et al. Effect of food order on ghrelin suppression[J]. *Diabetes Care*, 2018, 41(5): e76-e77. DOI:10.2337/dc17-2244.
- [43] ZHU R X, LIU M M, HAN Y, et al. Acute effects of non-homogenised and homogenised vegetables added to rice-based meals on postprandial glycaemic responses and *in vitro* carbohydrate digestion[J]. *British Journal of Nutrition*, 2018, 120(9): 1023-1033. DOI:10.1017/S0007114518002489.
- [44] GOH A T, CHOY J Y M, CHUA X H, et al. Increased oral processing and a slower eating rate increase glycaemic, insulin and satiety responses to a mixed meal tolerance test[J]. *European Journal of Nutrition*, 2021, 60(5): 2719-2733. DOI:10.1007/s00394-020-02466-z.
- [45] KATSAROU V, TSOLAKI M. Personalized nutrition by predicting glycemic responses[M]// GALANAKIS C M. *Trends in personalized nutrition*. London: Academic Press, 2019: 55-79. DOI:10.1016/B978-0-12-816403-7.00003-9.
- [46] HEINI A F, KIRK K A, LARA-CASTRO C, et al. Relationship between hunger-satiety feelings and various metabolic parameters in women with obesity during controlled weight loss[J]. *Obesity Research*, 1998, 6(3): 225-230. DOI:10.1002/j.1550-8528.1998.tb00341.x.
- [47] WU Yixue, FAN Zhihong, LOU Xinling, et al. Combination of texture-induced oral processing and vegetable preload strategy reduced glycemic excursion but decreased insulin sensitivity[J]. *Nutrients*, 2022, 14(7): 1318. DOI:10.3390/nu14071318.