

不同黏度魔芋葡甘聚糖对食欲和能量摄入量的影响

商龙臣^{1,2,3}, 王 凌^{1,2,3}, 李 晶^{1,2,3}, 李 斌^{1,2,3*}

(1. 华中农业大学食品科技学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学环境食品学教育部重点实验室, 武汉 430070;
3. 湖北省功能食品工程技术研究中心, 武汉 430068)

摘 要: **目的** 探讨食品的黏度特性对受试者餐后食欲和能量摄入量的影响。**方法** 通过网络发布 3 因素进食问卷(three-factor eating questionnaire, TFEQ)招募受试者; 以视觉模拟评分法(visual analogue scales, VAS)记录受试者餐后的饥饿感、饱腹感、进食欲望和期望进食量的变化; 计算受试者的平均食欲率(mean appetite ratings, MAR)及其食欲的曲线下面积(area under the curve, AUC), 并以此作为测试餐饱腹性能的评价指标; 为受试者提供随意午餐并记录其进食至完全满足时的能量摄入量。**结果** 同控制组测试餐相比, 低、中、高黏度测试餐的饱腹感指数(satiety index, SI)依次达到了 127.63%、141.81%和 178.43%。并且, 与控制组受试者相比, 低、中、高黏度组受试者的饱腹感依次提高了 31.50%、46.66%和 78.63%, 饥饿感则分别下降了 28.54%、42.92%和 60.93%。经不同黏度的测试早餐干预后, 在随后的测试午餐实验中, 低、中、高黏度组受试者的能量摄入量相比于控制组依次下降了 6.69%、10.40%和 12.50%。**结论** 食物的黏度对受试者的食欲有显著的影响, 一定范围内, 食物的黏度越大, 其饱腹感指数越大, 受试者的饱腹感也随之增加, 而饥饿感随之减小。因此, 利用魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)的高黏特性可以显著提升食物的饱腹性能, 从而有效抑制受试者餐后的进食欲望并降低其能量摄入量。

关键词: 魔芋葡甘聚糖; 黏度; 食欲; 能量摄入

Effects of konjac glucomannan with different viscosity on appetite and energy intake

SHANG Long-Chen^{1,2,3}, WANG Ling^{1,2,3}, LI Jing^{1,2,3}, LI Bin^{1,2,3*}

(1. College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
2. Key Laboratory of Environment Correlative Dietology, Ministry of Education, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. Functional Food Engineering & Technology Research Center of Hubei Province, Wuhan 430068, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of meal viscosity on postprandial appetite and energy intake. **Methods** The three-factor eating questionnaires (TFEQ) were published online to recruit volunteers, and their perception of hunger, fullness, desire to eat and prospective consumption (PFC) were recorded with the visual analogue scales (VAS). Besides, subjects' mean appetite ratings (MAR) and area under the curve (AUC) for appetite

基金项目: 国家自然科学基金项目(31772015)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (31772015)

*通讯作者: 李斌, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为生物大分子。E-mail: libinfood@mail.hzau.edu.cn

*Corresponding author: LI Bin, Ph.D, Professor, College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China. E-mail: libinfood@mail.hzau.edu.cn

were calculated and used as indicators for evaluating the satiating capacity of the test food. Furthermore, by providing them with the ad libitum lunch, energy intake of the volunteers was examined after they were comfortably full.

Results Compared with control test meal, the satiety index (SI) of the low viscosity, medium viscosity and high viscosity test meal were 127.63%, 141.81% and 178.43%, respectively. Besides, when making a comparison of low, medium and high viscosity group with the control group, satiety increased 31.50%, 46.66% and 78.63%, respectively. While, their hunger decreased by 28.54%, 42.92% and 60.93%, respectively. What's more, after being intervened with the test breakfast, subjects' energy intake of the low, medium and high viscosity group in the ad libitum lunch was respectively lowered by 6.69%, 10.40% and 12.50%, when compared to the control group. **Conclusion** Subjective appetite are significantly affected by food for the viscosity property. Within a reasonable range, the SI of food increases with the viscosity, and the greater viscosity of the food, the greater satiety and the weaker hunger of the subjective sensation. Therefore, the satiating capacity of food can be elevated significantly, and volunteers' postprandial eating desire and energy intake can be strongly inhibited by adding the konjac glucomannan (KGM) with high viscosity into the food.

KEY WORDS: konjac glucomannan; viscosity; appetite; energy intake

1 引言

研究表明肥胖和超重会增加个体患慢性疾病的风险并降低患者的生活质量,全球范围内日益扩大的肥胖和超重群体已成为严峻的公共卫生问题^[1-3]。不良的饮食习惯是导致肥胖的关键病因,而有关研究报道,膳食纤维摄入量的不足与体重的增长之间存在一定的关联^[4-6]。目前,许多国家和地区居民的膳食纤维摄入量远低于推荐摄入量,这可能是肥胖和超重流行的促成因素^[7,8]。因此,提高居民的膳食纤维摄入量或将成为对抗超重和肥胖的高效饮食干预策略。然而,消费者短时间内难以改变的饮食习惯使得大范围内迅速提升其膳食纤维摄入量的饮食干预策略难有成效^[9,10]。基于此,利用高黏度水溶性膳食纤维来强化食品的饱腹性能进而控制体重的饮食干预策略受到了渐增的关注^[11-13]。

在中国和日本,魔芋被人们食用或药用已有超过一千年的历史^[14,15]。提取自魔芋球茎的葡甘聚糖,由于具有良好的溶胀、凝胶以及增稠等特性被广泛应用于食品工业^[16]。魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)是已知多糖中黏度最高的多糖,其溶于水后展现出的超高黏度是KGM溶胶的重要流变特征^[17]。而食糜黏度的适当提升往往被认为与一系列对食欲调节有益的生理反应相关,如延缓胃排空、增加胃张力以及延长营养成分在消化道内的运输和吸收等^[18-20]。因此,作为体重管理产品的重要食品配料,KGM因其黏度高、能量低且饱腹能力强而备受青睐^[21,22]。本研究以KGM为研究对象,探讨食品的黏度特性对受试者餐后食欲和能量摄入量的影响,以期可为可溶性膳食纤维用于饱腹感强化型功能食品配料的研究提供理论支撑。

2 材料与方法

2.1 材料、试剂与仪器

不同黏度的KGM购于湖北强森魔芋科技有限公司,葡甘聚糖的含量>90%;测试餐所用的面包和即食面购于当地超市;草莓香精(浙江大好家实业有限公司);胭脂虫红(浙江一诺生物科技有限公司);三氯蔗糖(山东优索化工科技有限公司)。以上材料或试剂均为食品级。

AR200ex 流变仪(美国TA仪器)。

2.2 实验方法

2.2.1 受试者招募

通过网络发布3因素进食问卷(three-factor eating questionnaire, TFEQ)招募健康合格的受试者。要求受试者为非限制性进食者(TFEQ得分 ≤ 13)^[23,24],年龄范围为18~35岁,身体质量指数(body mass index, BMI)为18.5~23.9 kg/m²;无抽烟饮酒等不良生活习惯,无代谢性疾病史,无胃肠疾病史,无手术史;近期每周早餐次数>5,体重变化<3 kg。

该研究经青岛大学医学部伦理委员会审批。试验前为受试者详细讲解试验要求,对视觉模拟评分表的使用作着重解说,直至受试者完全了解该试验后与受试者签订知情同意书。

2.2.2 测试餐的制备和魔芋饮黏度的测定

参考Morell等方法^[25],制备草莓风味魔芋饮。将不同黏度的KGM加入到含草莓香精、胭脂虫红和三氯蔗糖的饮用纯净水中,机械搅拌(250 r/min) 2 h,得到不同黏度的草莓风味魔芋饮。每250 g魔芋饮含魔芋葡甘聚糖1%(湿基),草莓香精0.1%(湿基),胭脂虫红0.001%(湿基),三氯蔗糖0.0075%(湿基)。除了不含魔芋胶,对照组样品的制备

完全与实验组相同。

参考 Wu 等^[26,27]方法,以 AR200ex 流变仪对魔芋饮的黏度进行测定。37 ℃条件下,采用 60 mm 的平行钢板,设定间距为 500 μm,剪切率范围为 0.01~1000 S⁻¹,对样品进行稳态剪切扫描。在相同的检测条件下,采用 Peak Hold 模式,检测魔芋饮在剪切率为 50 S⁻¹时的表观黏度。

2.2.3 主观食欲的检测

参照文献^[28]所述方法,以视觉模拟评分法(visual analogue scales, VAS)记录受试者的主观食欲变化。每名受试者每 2 次试验之间至少间隔 1 周,受试者在试验前一天 22:00 以后禁食,禁食期间可适量饮水,不可饮用含酒精或者咖啡因的饮料。要求受试者在 8:00 前以省力的方式到达目的地,静坐 15 min 后,进行基线食欲问卷。随后为受试者提供测试用早餐,该早餐为一杯 250 g 的草莓风味魔芋饮以及 60 g 的白面包,要求其在 10 min 完成进食,并记录餐后在 t=0、15、30、45、60、90、120、150 和 180 min 时的食欲。

整个测试期间,要求受试者静坐。可以观看或收听轻松愉悦的电视或音乐节目,避免长时间的站立或来回走动;受试者之间不可高声交谈或嬉笑打闹,尤其不可以相互交流自身的食欲感受。

2.2.4 随意餐实验

在受试者进食完测试早餐 180 min 后,将其转移至舒适的休息室内静坐 15 min,立即为其提供午餐,受试者可随意进食直至完全满足为止,记录其餐前餐后的食物重量。测试餐包括 3 种不同口味的即食面以及 2 种不同风味的饮料,受试者可随意选择。

2.3 数据处理

如无特殊说明,数据均以平均值±标准偏差来表示。采用梯形法^[29]计算食欲的曲线下面积(area under the curve, AUC);采用 SPSS 20.0 统计分析软件对各处理的差异进行显著性分析;以 Origin Pro 2016 对样本大小进行估算。

3 结果与分析

3.1 受试者人口统计学特征

28 名符合要求的健康受试者参与了该试验,试验期间有 2 名女性受试者因日程安排冲突而退出了该试验,最终有 26 名受试者完成了整个试验,其中女性受试者有 15 名,男性受试者有 11 名。全部受试者均为健康体重,其 TFEQ 得分为 8.34±3.83,均为非限制进食者(见表 1)。

3.2 测试餐的理化性质

测试早餐由一杯 250 g 的草莓风味魔芋饮以及 60 g 的白面包组成。根据魔芋饮的黏度,将实验组分为低黏度、中黏度和高黏度组。早餐的热量和营养成分如表 2 所示。

表 1 受试者的基线人口统计学特征
Table 1 Participant demographic characteristics at their baseline

n=26		
	均值	标准偏差
年龄	23.23	1.95
身高/cm	168.81	9.01
体重/kg	59.25	10.62
BMI/(kg/m ²)	20.64	2.17
性别	n(%)	
女	15(57.69)	
男	11(42.31)	

表 2 测试早餐的热量和营养成分
Table 2 Calories and nutrients of the test breakfast

	对照	低黏度	中黏度	高黏度
能量/kcal	218.93	218.93	218.93	218.93
脂肪/g	7.22	7.22	7.22	7.22
蛋白质/g	4.4	4.4	4.4	4.4
碳水化合物/g	33.56	33.56	33.56	33.56
钠/mg	138.4	138.4	138.4	138.4
KGM/g	0	2.5	2.5	2.5

魔芋饮的稳态剪切扫描结果如图 1 所示。采用 Williamson 模型^[30,31]对扫描结果进行拟合分析,结果如表 3 所示。该模型方程为: $\frac{\eta_a}{\eta_0} = \frac{1}{1 + (\lambda_w \dot{\gamma})^n} \cong \frac{1}{1 + (\lambda_w \dot{\gamma})^n}$, 其中, η_a 是剪切率为 $\dot{\gamma}$ (S⁻¹)时的表观黏度(Pa·S); η_0 为零剪切黏度,是剪切率无限趋近于零时的理论黏度。 η_0 越大,意味着在相同的剪切率条件下,流体的应变速率越小,即黏度越大; λ_w 是 Williamson 时间常量,表示的是与溶胶结构崩解有关的松弛时间; N 是常数项,反应的是流体的假塑性, N 越大表明流体的假塑性越大; n 为流动指数, $0 < N \approx 1 - n < 1$, n 越大,则流体的流动性越好。结合图 1 和表 3 可以看出,Williamson 方程可以很好的描述魔芋饮的稳态流动行为,方程和曲线具有很好的相关性($r^2 > 0.999$)。

由表 3 的拟合结果可知,低、中、高黏度的魔芋饮的零剪切黏度分别为 0.46、19.10 和 89.89 Pa·S,其流动指数也随之依次减小,分别为 0.34、0.29 和 0.14,表明样品的流动性随黏度的增大而迅速降低。食糜流动性的减弱,可能有利于食物在胃肠道内的停留,延缓营养物质的运输和吸收,从而增强受试者的饱腹感。

图 2 为样品在剪切率为 50 S⁻¹时的表观黏度。通常认为,口腔的咀嚼和胃的收缩蠕动所产生的有效剪切率为 50 S⁻¹^[32,33]。因此,样品在该剪切率下表现出的黏度即

为受试者在咀嚼和吞咽时能感受到的有效黏度。所以, 相比于零剪切黏度, 样品在剪切率为 50 S^{-1} 时的黏度更适合用来描述食品在进食过程中的流动性。并且, 结合图 2 和表 3 可知, 样品在剪切率为 50 S^{-1} 时的黏度值远小于样品的零剪切黏度值, 且剪切率越大, 表观黏度越小。这主要是因为 KGM 溶胶为典型的非牛顿流体, 具有剪切变稀的特性^[34]。

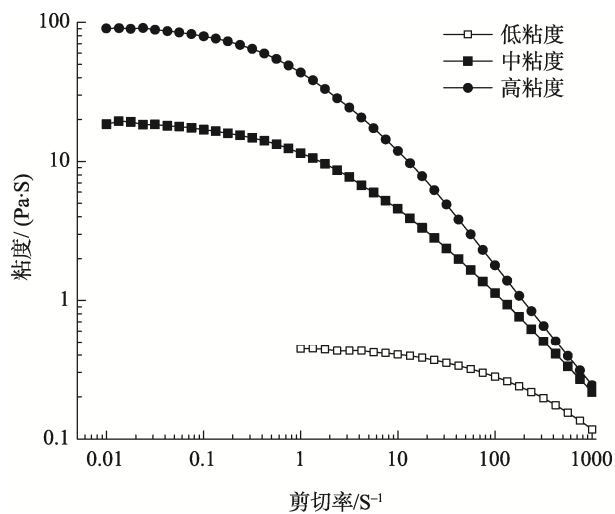


图 1 魔芋饮稳态剪切扫描
Fig.1 Steady shear flow behavior of konjac drink

3.3 样本大小估算

在其他因素(如标准偏差、效应量等)不变的条件下, 样本越大, 其检验效能($1-\beta$)越高, 因而也就越能代表抽样总体。因此, 在试验条件允许的情况下, 研究者们往往趋向于选择大样本。然而, 考虑到时间、人力和物力等因素, 过大的样本量往往并不具备现实可行性。基于此, 样本大

小的选择需从多方面考虑。
样本大小估算不仅可以确定实验所需的最小有效样本大小, 提高实验的可行性, 同时也是对实验的假设检验结果作进一步地性能评价, 判断统计分析结果的有效性。最小有效的样本大小主要由实验的标准偏差和期望的检验效能所决定, 因此, 基于实验所观测到的标准偏差, 若样本的检验效能可达到统计学要求, 则该样本大小即为有效, 基于该样本大小的差异分析才具有统计学意义。本研究中, 基于试验所观测到的标准偏差, 采用配对样本 t 检验, 计算了观测不同效应量所需的最小样本, 结果如表 4 所示。

表 3 魔芋饮的 Williamson 拟合参数
Table 3 Fitting parameters of Williamson model for konjac drink

魔芋饮	η_0 /(Pa·S)	λ_w /s	N	$\dot{\gamma}_c$ / S^{-1}	n	r^2
高黏度	89.89	0.95	0.86	1.06	0.14	0.9997
中黏度	19.10	0.52	0.71	1.92	0.29	0.9998
低黏度	0.46	0.01	0.66	198.34	0.34	0.9998

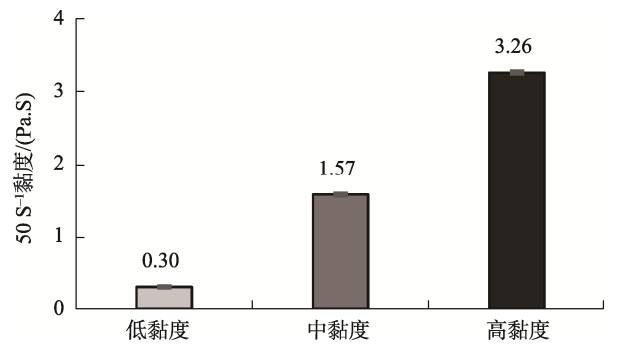


图 2 魔芋饮在 50 S^{-1} 剪切率时的表观黏度($n=3$)
Fig.2 Apparent viscosity of KGM drink at shear rate of 50 S^{-1} ($n=3$)

表 4 给定效应量下 VAS 用于食欲评价中所需样本大小($\alpha=0.05, 1-\beta=0.8$)
Table 4 Sample size estimates to detect a given change in VAS ratings in a paired design study ($\alpha=0.05, 1-\beta=0.8$)

配对组	对照-低黏度组			对照-中黏度组			对照-高黏度组		
效应量	10%	15%	20%	10%	15%	20%	10%	15%	20%
平均食欲率									
饥饿感	24	12	8	17	9	6	19	10	7
饱腹感	17	9	6	20	11	7	21	11	7
进食欲望	17	9	6	20	10	7	22	11	7
期望进食量	22	11	8	25	12	8	26	13	9
AUC									
饥饿感	24	12	8	18	9	7	20	11	7
饱腹感	18	10	7	20	10	7	23	12	8
进食欲望	21	11	7	23	12	8	24	12	8
期望进食量	22	11	8	25	13	8	24	12	8

关于饮食行为学的相关研究中,样本的检验效能通常需达到 0.8,而样本所能观测得到的最小效应量变化应不大于 10%^[35-37]。因此,在本研究中,将检验效能设定为 0.8,基于试验所观测得到标准偏差,估算检测不同效应量所需最小样本的大小。由表 4 可知,若要求样本检测出较小效应量的变化,则所需的样本较大。当效应量为 20%时,最多 9 名受试者可使样本对所有食欲的检验效能都达到 0.8;而效应量为 10%时,除了期望进食量的平均食欲率(mean appetite ratings, MAR)需要 26 名受试者才能使样本的检验效能达到 0.8,对于其他指标的各项食欲,24 名受试者可使样本的检验效能达到 0.8。总体而言,假设要观测所有实验组任意食欲评分 10%效应量的变化,则 26 名受试者可达到实验要求。若以饥饿感和饱腹感的 MAR 和 AUC 为主要参考,则 24 名受试者足以满足实验要求。

3.4 受试者的主观食欲

视觉模拟评分法已成功应用于评价受试者的主观食欲,其内容主要包括饥饿感、饱腹感、进食欲望和期望

进食量^[38,39]。本研究中,受试者进食前的基线食欲及其进食后的主观食欲变化如图 3 所示。同基线食欲相比,受试者完成进食后,其饥饿感、进食欲望和期望进食量迅速减小至最小值,而饱腹感则迅速增大至最大值。随着时间的延长,受试者的饥饿感、进食欲望和期望进食量逐渐增大,其饱腹感则逐渐减小。

整体看来,同对照组相比,测试餐的黏度越大,受试者的饱腹感越强,而饥饿感、进食欲望和期望进食量则越小。而胃肠道内食糜体系的黏度之所以能对受试者主观食欲产生影响,可能主要是因为胃黏膜中存在的一些传入神经能够传导机械刺激,食糜体系黏度的增大,会延长食物在胃内的停留时间,从而强化食物对胃的机械刺激^[40-42],增强饱腹感;而在小肠内,高黏食糜体系会延缓其内部营养物质在小肠中的运输和吸收,增加营养物质与小肠黏膜的相互作用,并促进某些食欲调节肽(如胰高血糖素样肽-1,胆囊收缩素肽-8 等)的释放,从而提升受试者的饱腹感^[43,44]。

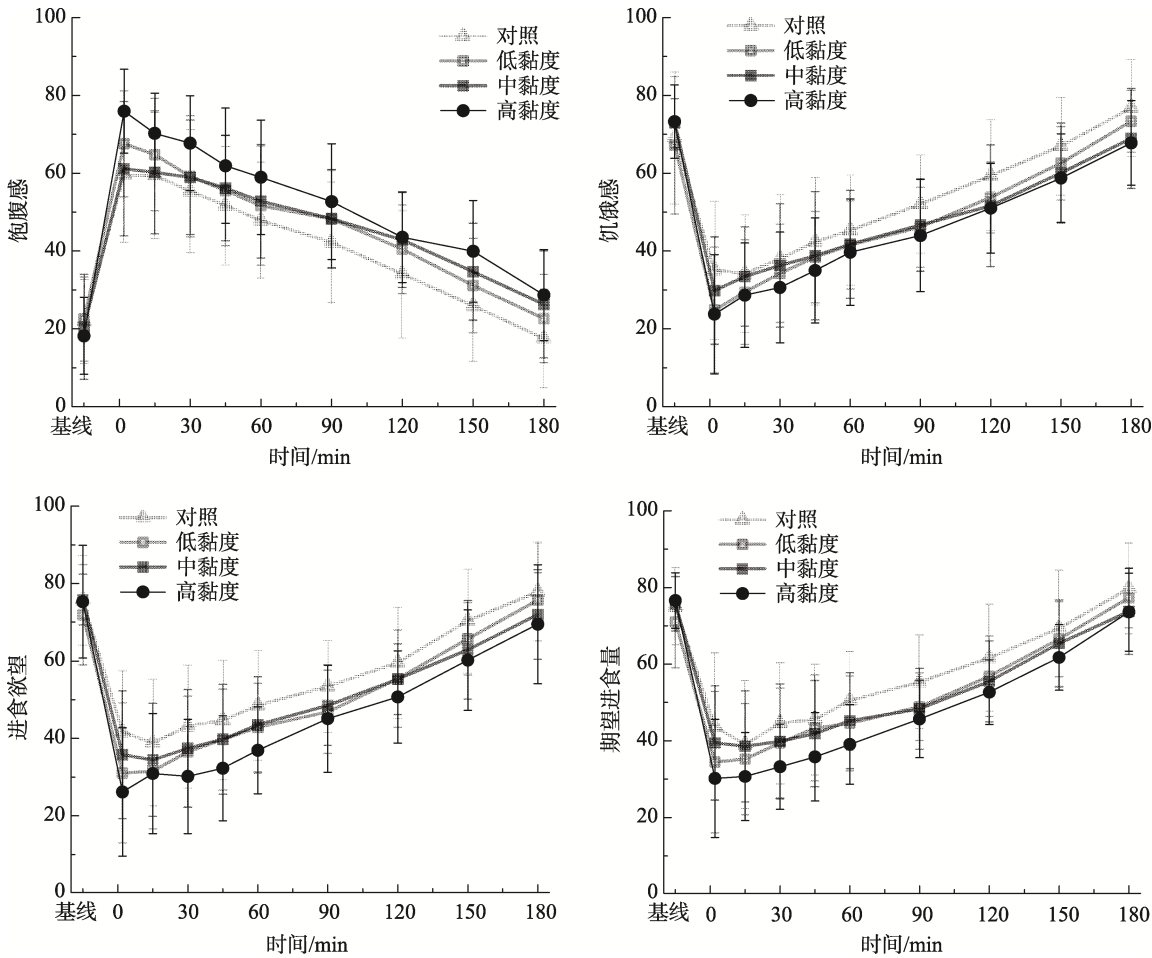


图 3 受试者食欲的视觉模拟评分(n=26)
Fig.3 Visual analogue ratings for subjective appetite (n=26)

AUC 可以综合地反应受试者在进食后一定时间内的食欲响应, 因此, 相关研究者通常以 AUC 来评价食物的饱腹感指数(satiety index, SI)^[45,46]。另有研究认为, 利用 AUC 可以预测受试者的后续能量摄入量^[47]。本研究中, 受试者 3 h 食欲响应的 AUC 如图 4 所示。同对照组相比, 中黏度和高黏度组受试者的饥饿感、饱腹感、进食欲望和期望进食量均存在显著性差异($P<0.05$); 但是, 除了低黏度组的进食欲望存在显著性($P=0.041$)以外, 该组受试者的饥饿感、饱腹感和期望进食量均没有表现出显著性差异。参考文献^[48]所述 SI 计算方法可知, 低、中、高黏度测试餐的 SI 分别为 127.63%、141.81%和 178.43%。进一步计算分析可知, 相比于对照组, 低、中、高黏度组受试者的饥饿感分别下降了 28.54%、42.92%和 60.93%, 进食欲望分别下降了 36.13%、39.10%和 66.73%, 而期望进食量则依次下降了 1.09%、20.45%和 48.80%。事实上, 包括对照组在内的 4 组测试餐是等能量的, 其对受试者的食欲却有着不同的影响。由此看来, 仅通过改变食物的物性, 如适当增加流体食物的黏度, 也可能达到强化食物饱腹能力的目的, 从而有效地干预受试者的食欲。

3.5 随意餐实验

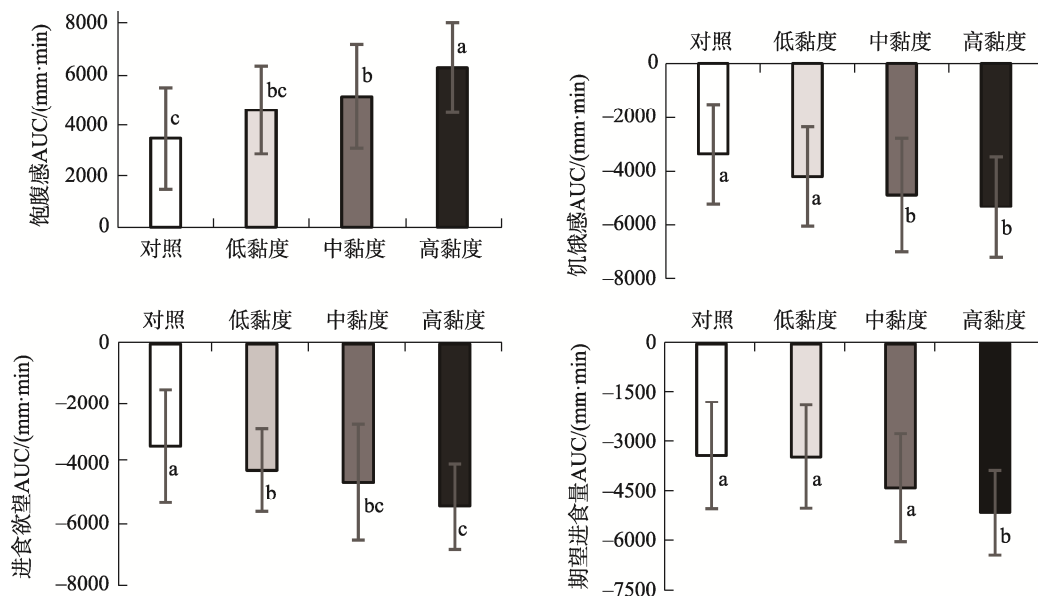
为进一步评价 KGM 对受试者食欲的干预效果, 本研究进行了随意餐实验。随意餐的能量含量如表 5 所示, 受试者的能量摄入量如图 5 所示。同对照比, 低、中、高黏度组的能量摄入量分别减少了 6.69%、10.40%和 12.50%。其中, 低黏度组并未表现出显著性差异, 而中、高黏度组均表现出了显著性差异($P<0.05$)。由此可知, 流体食物的黏

度可以有效干预受试者的餐后能量摄入, 黏度的适当提高可以增强受试者的饱腹感, 抑制进食欲望, 并减少其后续的能量摄入。

4 结论与讨论

改变食物的组成以增强食物的饱腹性能, 在购买和消费过程中建立智能的外部刺激, 提升饱腹感强化型食品的风味和可接受性, 是实现饱腹感膳食干预策略的 3 条主要且相互关联的途径。本研究从根本入手, 利用 KGM 提高食物的黏度, 在不增加能量摄入量的前提下, 可一定程度强化食物的饱腹性能, 从而对受试者的食欲进行有效地干预, 并降低受试者后续食物和能量的摄入。研究结果显示, 与控制组相比, 低、中、高黏度魔芋饮在剪切率为 50 S^{-1} 时的黏度分别增加了 0.30、1.57 和 $3.26\text{ Pa}\cdot\text{S}$, 其饱腹感指数则分别提高到了 127.63%、141.81%和 178.43%, 而受试者的饱腹感分别提高了 31.50%、46.66%和 78.63%, 饥饿感则分别下降了 28.54%、42.92%和 60.93%。随意午餐的研究结果也显示, 经不同黏度的测试早餐干预后, 低、中、高黏度组受试者的能量摄入量相比于对照组则依次下降了 6.69%、10.40%和 12.50%。

由此可知, 食物的黏度对受试者的食欲有显著的影响。一定范围内, 食物的黏度越大, 其饱腹感指数越大, 受试者的饱腹感也随之加强, 而饥饿感则在一定程度上受到了抑制。因此, 通过提高食品的黏度来达到抵抗超重和肥胖的膳食干预策略具有一定的可行性。然而, 本研究所选取的样本为 26 名 $\text{BMI}=20.64\pm 2.17$ 的健康非限制性进食者,



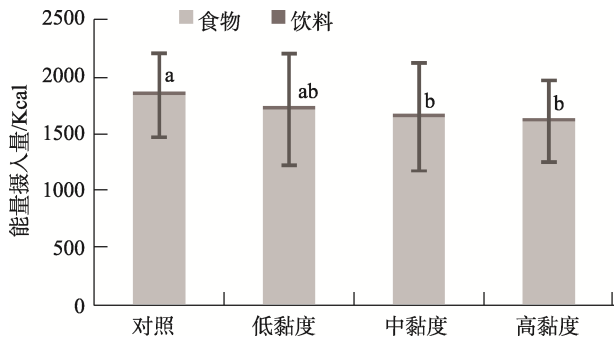
注: 同一图中的不同上标表示数值经配对 t 检验在 $P<0.05$ 水平上有显著性差异。

图 4 3 h 食欲响应的 AUC ($n=26$)

Fig.4 3 h AUC for subjective appetite ratings ($n=26$)

表 5 随意午餐的营养成分和能量含量
Table 5 Energy and nutrition content of the ad libitum lunch

	风味即食面			风味饮料	
	泡菜	卤香	豆豉	苹果	柠檬
能量/(kcal/100 g)	435.8	489.7	489.3	13.4	13.4
脂肪/(g/100 g)	7	8.1	7.2	0	0
蛋白质/(g/100 g)	23.8	25.8	27.7	0	0
碳水化合物/(g/100 g)	47	55.4	52.3	3.3	3.3
钠/(mg/100 g)	2380	1648	1768.6	30	42



注：同一图中的不同上标表示数值经配对 t 检验在 $P<0.05$ 水平上存在显著性差异。

图 5 受试者随意午餐的能量摄入量($n=26$)

Fig.5 Mean energy intake of subjects at ad libitum lunch ($n=26$)

虽然经过分析讨论，研究结果具有统计学意义，但对于是否可将本研究结果外推至肥胖超重人群、老年、儿童或限制性进食者等其他特殊人群，仍需谨慎。除此之外，本研究未对受试者进行长期的跟踪调查，对受试者其后长期的饮食行为(如补偿性进食)未做更深入的记录和分析。因此，该膳食干预策略对于长期体重管理目标的实现是否切实有效，仍有待进一步的论证。

参考文献

[1] Lamerton TJ, Torquati L, Brown WJ. Overweight and obesity as major, modifiable risk factors for urinary incontinence in young to mid-aged women: A systematic review and meta-analysis [J]. *Obes Rev*, 2018, 19(12): 1735–1745.

[2] Bray GA. Medical consequences of obesity [J]. *J Clin Endocr Metab*, 2004, 89(6): 2583–2589.

[3] Lavie CJ, Milani RV, Ventura HO. Obesity and cardiovascular disease: Risk factor, paradox, and impact of weight loss [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2009, 53(21): 1925–1932.

[4] Yi L, Inge H, Stefanie V, *et al.* Fibre intake among the belgian population by sex–age and sex–education groups and its association with bmi and waist circumference [J]. *Brit J Nutr*, 2011, 105(11): 1692–1703.

[5] Chen KN, Zhao QY, Li XF, *et al.* Dietary fiber intake and endometrial cancer risk: A systematic review and meta–analysis [J]. *Nutrients*, 2018, 10(7): 15–16.

[6] O'Grady J, O'Connor EM, Shanahan F. Review article: Dietary fibre in the era of microbiome science [J]. *Aliment Pharmacol Ther*, 2019, 49(5): 506–515.

[7] López-Olmedo N, Carriquiry AL, Rodríguez-Ramírez S, *et al.* Usual intake of added sugars and saturated fats is high while dietary fiber is low in the mexican population [J]. *J Nutr*, 2016, 146(9): 1856S.

[8] Hosseini-Esfahani F, Koochakpoor G, Daneshpour MS, *et al.* The interaction of fat mass and obesity associated gene polymorphisms and dietary fiber intake in relation to obesity phenotypes [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(9): 112–115.

[9] Rekhy R, Mcconchie R. Promoting consumption of fruit and vegetables for better health. Have campaigns delivered on the goals? [J]. *Appetite*, 2014, 79(4): 113–123.

[10] Wengreen HJ, Madden GJ, Aguilar SS, *et al.* Incentivizing children's fruit and vegetable consumption: Results of a united states pilot study of the food dudes program [J]. *J Nutr Educ Behav*, 2013, 45(1): 54–59.

[11] Fiszman S, Varela P. The role of gums in satiety/satiation. A review [J]. *Food Hydrocoll*, 2013, 32(1): 147–154.

[12] Hansen TT, Andersen SV, Astrup A, *et al.* Is reducing appetite beneficial for body weight management in the context of overweight and obesity? A systematic review and meta–analysis from clinical trials assessing body weight management after exposure to satiety enhancing and/or hunger reducing products [J]. *Obes Rev*, 2019.

[13] 商龙臣, 李晶, 李斌. 膳食纤维饱腹感的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(2): 372–379.

Shang LC, Li J, Li B. Research progress of dietary fiber and its satiating capacity [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(2): 372–379.

[14] Behera SS, Ray RC. Nutritional and potential health benefits of konjac glucomannan, a promising polysaccharide of elephant foot yam, *amorphophallus konjac* k. Koch: A review [J]. *Food Rev Int*, 2017, 33(1): 22–43.

[15] Yang D, Yuan Y, Wang L, *et al.* A review on konjac glucomannan gels: Microstructure and application [J]. *Int J Mol Sci*, 2017, 18(11): 2250–2252.

[16] Jing L, Ye T, Wu X, *et al.* Preparation and characterization of heterogeneous deacetylated konjac glucomannan [J]. *Food Hydrocoll*, 2014, 40(40): 9–15.

[17] Zhao X, Li J, Jin W, *et al.* Preparation and characterization of a novel ph–response dietary fiber: Chitosan–coated konjac glucomannan [J]. *Carbohydr Polym*, 2015, 117(2): 1–10.

[18] Shang LC, Jin WP, Tian J, *et al.* A review of nutriology of food hydrocolloids [J]. *Sci Found China*, 2018, 26(1): 43–54.

[19] Rebello CJ, Chu YF, Johnson WD, *et al.* The role of meal viscosity and oat beta–glucan characteristics in human appetite control: A randomized crossover trial [J]. *Nutr J*, 2014, 13(10): 348–350.

[20] Camps G, Mars M, de Graaf C, *et al.* Empty calories and phantom fullness: A randomized trial studying the relative effects of energy density and viscosity on gastric emptying determined by mri and satiety [J]. *Am J Clin Nutr*, 2016, 104(1): 73–80.

[21] Onakpoya IJ, Heneghan CJ. Effect of the novel functional fibre, polyglycoplex (pgx), on body weight and metabolic parameters: A systematic review of randomized clinical trials [J]. *Clin Nutr*, 2015, 34(6): 1109–1114.

- [22] Aoe S, Kudo H, Sakurai S. Effects of liquid konjac on parameters related to obesity in diet-induced obese mice [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2015, 79(7): 1141–1146.
- [23] 张婷婷, 郝圆圆, 袁红网, 等. 中文版三因素饮食问卷 r21 在我国大学生人群中测评的效度和信度检验 [J]. *护理研究*, 2016, 30(33): 4137–4141.
- Zhang TT, Hao YY, Yuan HW, *et al.* Validity and reliability of Chinese version of three-factor eating questionnaire r21 for assessment of sample of college students [J]. *Nurs Res China*, 2016, 30(33): 4137–4141.
- [24] Stunkard AJ, Messick S. The three-factor eating questionnaire to measure dietary restraint, disinhibition and hunger [J]. *J Psychosom Res*, 1985, 29(1): 71–83.
- [25] Morell P, Fisman SM, Varela P, *et al.* Hydrocolloids for enhancing satiety: Relating oral digestion to rheology, structure and sensory perception [J]. *Food Hydrocoll*, 2014, 41(20): 343–353.
- [26] Wu Y, Guo R, Cao NN, *et al.* A systematical rheological study of polysaccharide from sophora alopecuroides l. seeds [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 180(15): 63–71.
- [27] Huang Q, Jin WP, Ye SX, *et al.* Comparative studies of konjac flours extracted from amorphophallus guripingensis and amorphophallus riverei: Based on chemical analysis and rheology [J]. *Food Hydrocoll*, 2016, 57(12): 209–216.
- [28] Flint A, Raben A, Blundell JE, *et al.* Reproducibility, power and validity of visual analogue scales in assessment of appetite sensations in single test meal studies [J]. *Int J Obes*, 2000, 24(1): 38–48.
- [29] Pruessner JC, Kirschbaum C, Meinlschmid G, *et al.* Two formulas for computation of the area under the curve represent measures of total hormone concentration versus time-dependent change [J]. *Psychoneuroendocrinology*, 2003, 28(7): 916–931.
- [30] Nwokocha LM, Williams PA. Solution characteristics and thermorheology of prosopis africana seed polysaccharide [J]. *Food Hydrocoll*, 2016, 56(19): 201–206.
- [31] Razavi SM, Cui SW, Ding H. Structural and physicochemical characteristics of a novel water-soluble gum from lallemantia royleana seed [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 83(8): 142–151.
- [32] Naji S, Razavi SMA, Karazhiyan H. Effect of thermal treatments on functional properties of cress seed (*Lepidium sativum*) and xanthan gums: A comparative study [J]. *Food Hydrocoll*, 2012, 28(1): 75–81.
- [33] Zaremba SMM, Gow LF, Drummond S, *et al.* Effects of oat beta-glucan consumption at breakfast on ad libitum eating, appetite, glycemia, insulinemia and glp-1 concentrations in healthy subjects [J]. *Appetite*, 2018, 128(5): 197–204.
- [34] Jin W, Xu W, Li Z, *et al.* Degraded konjac glucomannan by γ -ray irradiation assisted with ethanol: Preparation and characterization [J]. *Food Hydrocoll*, 2014, 36(9): 85–92.
- [35] Costabile G, Griffio E, Cipriano P, *et al.* Subjective satiety and plasma ppy concentration after wholemeal pasta [J]. *Appetite*, 2018, 125(2): 172–181.
- [36] Emilien CH, Hsu WH, Hollis JH. Effect of resistant wheat starch on subjective appetite and food intake in healthy adults [J]. *Nutrition*, 2017: 69–74.
- [37] Wolever TM, Van Klinken BJ, Bordenave N, *et al.* Reformulating cereal bars: High resistant starch reduces *in vitro* digestibility but not *in vivo* glucose or insulin response; whey protein reduces glucose but disproportionately increases insulin [J]. *Am J Clin Nutr*, 2016, 104(4): 995–1003.
- [38] Holt GM, Owen LJ, Till S, *et al.* Systematic literature review shows that appetite rating does not predict energy intake [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2017, 57(16): 3577–3582.
- [39] Rumbold PL, Doddreynolds CJ, Stevenson E. Agreement between paper and pen visual analogue scales and a wristwatch-based electronic appetite rating system (pro-diary©), for continuous monitoring of free-living subjective appetite sensations in 7–10 year old children [J]. *Appetite*, 2013, 69(13): 180–185.
- [40] Powley TL, Phillips RJ. Gastric satiation is volumetric, intestinal satiation is nutritive [J]. *Physiol Behav*, 2004, 82(1): 69–74.
- [41] Yu K, Ke MY, Li WH, *et al.* The impact of soluble dietary fibre on gastric emptying, postprandial blood glucose and insulin in patients with type 2 diabetes [J]. *Asia Pac J Clin Nutr*, 2014, 23(2): 210–218.
- [42] Repin N, Kay BA, Cui SW, *et al.* Investigation of mechanisms involved in postprandial glycemia and insulinemia attenuation with dietary fibre consumption [J]. *Food Funct*, 2017, 8(6): 2142–2154.
- [43] Maljaars PWJ, Peters HPF, Mela DJ, *et al.* Ileal brake: A sensible food target for appetite control. A review [J]. *Physiol Behav*, 2008, 95(3): 271–281.
- [44] Cummings DE, Joost O. Gastrointestinal regulation of food intake [J]. *J Clin Invest*, 2007, 117(1): 13–23.
- [45] Tremblay A, Bellisle F. Nutrients, satiety, and control of energy intake [J]. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2015, 40(10): 971–979.
- [46] 潘海坤, 王淑颖, 范志红. 糯小米和大黄米的餐后血糖反应和饱腹感评价 [J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(2): 13–18.
- Pan HK, Wang SY, Fan ZH. Postprandial glycemic response and satiety evaluation of glutinous millet and proso millet [J]. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2017, 32(2): 13–18.
- [47] Drapeau V, King N, Hetherington M, *et al.* Appetite sensations and satiety quotient: Predictors of energy intake and weight loss [J]. *Appetite*, 2007, 48(2): 159–166.
- [48] Holt SH, Miller JC, Petocz P, *et al.* A satiety index of common foods [J]. *Eur J Clin Nutr*, 1995, 49(9): 675–690.

(责任编辑: 苏笑芳)

作者简介



商龙臣, 博士, 主要研究方向为环境食品学。

E-mail: shanglongchen@webmail.hzau.edu.cn



李斌, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为生物大分子。

E-mail: libinfood@mail.hzau.edu.cn