

# 不同熟化方式下甘薯咀嚼加工及食团特性的比较分析

范会平<sup>1,2</sup>, 马晨晨<sup>1</sup>, 索标<sup>1,2</sup>, 张艳杰<sup>1,2</sup>, 李真<sup>1,2</sup>, 陈雨蒙<sup>1</sup>, 艾志录<sup>1,2\*</sup>

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 河南郑州 450002)

(2. 农业农村部大宗粮食加工重点实验室, 国家速冻米面制品加工技术研发专业中心, 河南郑州 450002)

**摘要:** 为探究不同熟化方式下甘薯的咀嚼加工行为及食团特性, 该研究考察了熟化方式对甘薯的质构、淀粉含量及淀粉短程有序性的影响, 并进行咀嚼试验, 跟踪分析受试者咀嚼至吞咽点食团的水分含量、咀嚼参数、唾液分泌情况、食团特性以及淀粉消化情况。结果表明: 倒蒸甘薯条和煮甘薯干片的硬度、弹性、胶粘性、内聚性、咀嚼性和回复性均显著高于其他4种熟化甘薯制品 ( $P<0.05$ ), 熟化甘薯制品中淀粉含量及淀粉短程有序性均显著低于鲜甘薯 ( $P<0.05$ )。在不同熟化方式甘薯制品的咀嚼试验中, 咀嚼参数中的一口量、咀嚼次数、咀嚼时间、进食速率存在显著差异 ( $P<0.05$ ); 回收食团的平均中值粒径 ( $D_{50}$ ) (1.55~2.65 mm) 与样品硬度、胶粘性和咀嚼性呈显著正相关 ( $P<0.05$ ); 样品形态以及受试者主观性的差异使样品咀嚼时的平均唾液添加量 (0.41~0.94 g/g 干基) 和平均唾液流速 (45.92~72.65 mg/s) 存在显著差异 ( $P<0.05$ ); 咀嚼后的平均总淀粉消化率最高为蒸制甘薯 (88.35%), 最低为微波甘薯 (34.32%)。该研究为深入研究甘薯消化特性以及甘薯精深加工奠定理论基础。

**关键词:** 熟化方式; 甘薯; 咀嚼; 食团; 消化

文章编号: 1673-9078(2024)01-173-182

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.1.0029

## Comparative Analysis of Chewing Processing and Bolus Characteristics of Sweet Potato Subjected to Different Cooking Methods

FAN Huiping<sup>1,2</sup>, MA Chenchen<sup>1</sup>, SUO Biao<sup>1,2</sup>, ZHANG Yanjie<sup>1,2</sup>, LI Zhen<sup>1,2</sup>, CHEN Yumeng<sup>1</sup>, AI Zhilu<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

(2. Key Laboratory of Staple Grain Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National R&D Center for Frozen Rice & Wheat Products Processing Technology, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** To explore the masticatory processing behaviors and bolus characteristics of sweet potato subjected to different cooking methods, this study investigated the effects of cooking methods on the texture, starch content and the short-range ordered structure of sweet potato. Mastication tests were conducted, and the moisture content, mastication parameters, saliva secretion, bolus characteristics and starch digestion of the bolus were analyzed through tracking the process from chewing to the swallowing point of the subjects. The results showed that the hardness, elasticity, adhesiveness, cohesion, chewiness and recoverability of the inverted steamed sweet potato fries and the dried boiled sweet potato slices were

引文格式:

范会平, 马晨晨, 索标, 等. 不同熟化方式下甘薯咀嚼加工及食团特性的比较分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 173-182.

FAN Huiping, MA Chenchen, SUO Biao, et al. Comparative analysis of chewing processing and bolus characteristics of sweet potato subjected to different cooking methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 173-182.

收稿日期: 2023-01-08

基金项目: 国家重点研发计划重点专项 (2021YFD2100200; 2021YFD2100201); 河南省薯类产品加工工艺与设备研发创新型科技团队项目 (豫科人组 [2017]6 号)

作者简介: 范会平 (1972-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: fanhuiping1972@hotmail.com

通讯作者: 艾志录 (1965-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: zhilafood@sina.com

significantly higher than those of the sweet potato products cooked by other four methods ( $P<0.05$ ). The total starch content and the content of short-range ordered starch structure in the cooked sweet potato products were significantly lower than those in fresh sweet potato ( $P<0.05$ ). In the chewing tests of different cooked sweet potato products, there were significant differences in the chewing parameters, such as one bite size, number of chews, chewing time and eating rate ( $P<0.05$ ). The mean median particle size (D50) (1.55~2.65 mm) of the recovered bolus was positively correlated with the sample's hardness, adhesiveness and chewiness ( $P<0.05$ ). The differences in sample's morphology and subject's subjectivity led to significant differences in the mean amount of added saliva (0.41~0.94 g/g dry basis) and mean saliva flow rate (45.92~72.65 mg/s) during chewing ( $P<0.05$ ). The average total starch digestibility after chewing was the highest for the steamed sweet potatoes (88.35%) with the microwaved sweet potatoes having the lowest average total starch digestibility (34.32%). This study laid a theoretical foundation for further study on digestive characteristics and deep processing of sweet potato.

**Key words:** ripening methods; sweet potato; mastication; bolus; digestion

甘薯是世界第七大主要粮食作物<sup>[1]</sup>, 也是我国的一种重要农作物, 是人类膳食中重要的碳水化合物供应者之一。甘薯营养丰富, 具有抗癌、降血压、预防便秘等生理功能<sup>[2]</sup>, 对人体健康具有重要价值。随着人们生活水平的提高以及保健意识的增强, 甘薯也作为健康食物开始回归消费者的餐桌。

在熟化过程中, 由于食品组成成分和传热方式的不同, 对甘薯生物活性成分、营养物质、质构特性等产生的影响也不同<sup>[3,4]</sup>。淀粉是甘薯中含量最大的组分, 占其干质量的 50%~80%<sup>[5]</sup>, 熟化后甘薯中的淀粉分子晶体结构被破坏、颗粒膨胀和溶解性增大, 提高了淀粉消化性。

人类对食物的消化取决于食物的化学和物理特性及其在不同消化步骤中的变化<sup>[6]</sup>。口腔咀嚼是消化过程的第一步, 旨在为食物的吞咽和消化系统的进一步加工做好准备。固体食物的结构会因为咀嚼行为及唾液的加入而发生不可逆的变化, 如颗粒的减小、酶的水解以及食物颗粒的润湿、软化和聚集, 同时感知食物的质构特性和风味<sup>[7]</sup>。

咀嚼和唾液分泌是吞咽点食团形成过程中互补的两个重要因素, 咀嚼可以刺激牙龈神经受体从而引发唾液分泌。不同类型的食物, 甚至同一类型不同品种的食物质构特性、初始含水量和风味的不同, 均会在咀嚼过程中对唾液分泌产生重要影响<sup>[8,9]</sup>。有研究表明, 咀嚼食物的表面积越大, 润滑它所需的唾液就越多<sup>[10]</sup>。存在于人类唾液中的  $\alpha$ -淀粉酶是最早被认识的酶之一。近年来, 淀粉和  $\alpha$ -淀粉酶的结构和性质的研究显著增加, 有助于人们在分子水平上了解不同植物来源和 / 或不同淀粉类食

品中的淀粉被淀粉酶消化速度差异的原因<sup>[11]</sup>。唾液淀粉酶活性存在差异, 不同个体的唾液淀粉酶水解淀粉的方式也存在差异, 因此即使具有相同的唾液淀粉酶活性, 这些差异也可能对淀粉的整体消化产生影响<sup>[12]</sup>。淀粉代谢的第一阶段主要由  $\alpha$ -淀粉酶催化, 该酶逐渐导致多糖水解, 从而产生葡萄糖、麦芽糖、麦芽三糖和小糊精分子作为主要产物<sup>[13]</sup>。

本研究拟以不同熟化方式甘薯为研究对象, 探究熟化方式对甘薯咀嚼加工行为和食团性质的影响, 为消费者在选择甘薯熟化方式时提供参考, 并为深入研究甘薯消化特性以及甘薯精深加工奠定理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

选用普薯 32 号, 质量在 (240±20) g, 纺锤形, 表面无霉斑、无虫害, 产自郑州。

### 1.2 主要仪器与设备

DHG-9243BS- III 电热鼓风干燥箱, 上海新苗医疗器械制造有限公司; BTP.8XL.0 型冷冻干燥机, 美国 SP Scientific 公司; TA-XAPLUS 型质构仪, 英国 Stable Microsystems 公司; Tensor II 型傅里叶红外光谱仪, 布鲁克科技有限公司; UV-2000 紫外 - 可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司。

### 1.3 样品制备

参考 Wei 等<sup>[14]</sup>的熟化方式并在预实验中进行调整, 熟化标准是甘薯中心无硬块, 得出制备方法如表 1 所示。

表 1 样品制备方法  
Table 1 Sample preparation method

熟化方式	处理方法
鲜甘薯	洗净后晾干表面水分, 备用
倒蒸	蒸锅内水开后, 将清洗干净的甘薯放入, 蒸制甘薯 30 min, 冷却后去皮, 分切成约为 1.3 mm×1.3 mm×5 cm 的条状, 在 60 °C 烤箱内热风烘 7 h, 取出后平衡水分 4 h, 后复蒸 10 min, 取出后 60 °C 烘 4 h, 平衡水分 4 h, 复蒸 10 min, 取出后 35 °C 烘 4 h, 平衡水分
蒸制	蒸锅内水开后, 将清洗干净的甘薯放入, 蒸制甘薯 35 min
烤制	烤箱 200 °C 预热 15 min, 将清洗干净的甘薯放入, 烘烤 50 min (中间翻面一次)
煮干片	甘薯洗净, 纵向切成厚度约为 5 mm 的片状, 40 °C 烘至水分 8% 以下; 薯干与水的质量比为 1:7, 水开后继续煮制 25 min
煮块	甘薯清洗干净去皮, 切成单块质量约 10 g 的块状, 甘薯块与水的质量比为 1:4, 水开后继续煮制 15 min
微波	清洗干净的甘薯放入微波炉 (输出功率 800 W), 微波甘薯时间 8 min (中间翻面一次)

#### 1.4 熟制甘薯质构分析

参考田晴等<sup>[15]</sup>的方法, 采用 P50 探头对甘薯制品进行质构分析, 测前速度为 1 mm/s, 测试速度为 1 mm/s, 测后速度为 2 mm/s, 压缩比为 60%, 测定间隔时间为 5 s。由质构特征曲线得到质构数据。

#### 1.5 淀粉短程有序性的测定

对 1.3 中甘薯制品冷冻干燥, 磨粉过 100 目筛后, 使用傅里叶红外光谱仪对样品进行分析测定, 测定范围为 4 000~400 cm<sup>-1</sup>, 分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>, 扫描次数为 32 次<sup>[16]</sup>。

#### 1.6 咀嚼试验

##### 1.6.1 受试者选择

本研究从食品专业学生中筛选出 8 名年龄在 24±2 岁之间的受试者, 其中 4 名女生, 4 名男生; 要求受试者口腔健康, 无咀嚼吞咽障碍, 对实验食物无过敏反应。

##### 1.6.2 口腔实验

本试验参考 Priyanka 等<sup>[17]</sup>的方法对不同熟化方式甘薯制品进行口腔咀嚼实验, 在上午 10~11 点进行。咀嚼实验开始前, 需要对受试者进行食品感官测试培训, 使受试者能够在自然状态下咀嚼并吐出食团, 同时了解实验过程和实验要求。为避免饥饿或食物消化对咀嚼和吞咽能力的影响, 要求受试者

在咀嚼实验前 1 h 不能进食。

在实验过程中, 更换下一个样品进行咀嚼时, 需要饮用水漱口, 去除口腔残渣。同一样品在每次咀嚼后, 不需要饮用水漱口, 以防止漱口行为导致唾液分泌量增加; 样品第一次的咀嚼食团正常吞咽, 用于确定受试者的咀嚼吞咽阈值, 收集后续平行 3 次的咀嚼食团, 分别为食团 1、食团 2 和食团 3。对回收的食团立即放入 -30 °C 冰箱保存, 待测。受试者需要记录甘薯制品的一口摄入量、从入口到咀嚼至吞咽点的时间和咀嚼次数, 并记录吐出食团的质量。

##### 1.6.3 咀嚼参数计算

咀嚼频率 (Chewing Frequency) 按式 (1) 计算, 进食速率 (Eating Rate) 按式 (2) 计算。

$$F_c = \frac{N_c}{T_c} \quad (1)$$

$$E_r = \frac{B_s}{T_c} \quad (2)$$

式中:

$F_c$ ——咀嚼频率, Hz;

$N_c$ ——咀嚼次数, 次;

$T_c$ ——咀嚼时间, s;

$E_r$ ——进食速率, g/s;

$B_s$ ——一口量, g。

##### 1.7 食团粒径测定

收集的食团 1 用于测定粒径分布。参考 Marie 等<sup>[18]</sup>的方法并稍作修改, 取一组食团置于 200 mL 水中, 玻璃棒缓慢搅拌至食团分散, 倒入粒径分别为 3.35、2.05、1.70、1.18、0.71、0.42 和 0.11 mm 的 7 个筛网中过筛, 筛网粒径由大到小排列, 用 2 min/L 水流冲洗 3 min; 筛网上物分别收集在铝盒中, 放入烘箱在 105 °C 干燥至恒重, 记录烘后质量, 与铝盒的质量差即为每个筛网上的食团留重。计算出食团的  $D_{50}$ 。

##### 1.8 食团特性表征

收集食团 2 和食团 3 的一部分用于测定湿基水分质量分数 (Wet Base Moisture Content,  $MC_{wet}$ ) (式 3)<sup>[19]</sup>; 另一部分采用真空冷冻干燥法冷冻干燥 48 h, 冻干后样品磨粉过 80 目筛备用。根据式 4 可以计算出食团的干基含水量 (Dry Base Water Content,  $MC_{db}$ )。

$$A = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$B = \frac{A}{1 - A} \quad (4)$$

式中:

$A$ —湿基水分质量分数 ( $MC_{wet}$ ), %;

$M_0$ —食团样品的质量, g;

$M_1$ —食团样品干燥后的质量, g;

$B$ —食团样品的干基含水量 ( $MC_{db}$ ), g。

每克干基食团的唾液增加量 (Saliva Addition, SA) 计算方法按式 (5) 进行。

$$Q=C-D \quad (5)$$

式中:

$Q$ —唾液增加量 (SA), g/g 干基;

$C$ —食团干基含水量 ( $MC_{db\ bolus}$ ), g;

$D$ —初始食物干基含水量 ( $MC_{db\ food}$ ), g。

唾液流速 (Salivary Flow Rate, Sf) 为咀嚼过程中唾液增加量与咀嚼次数的比值如式 (6)。

$$S = \frac{Q \times 1000}{Nc} \quad (6)$$

式中:

$S$ —唾液流速, mg/s。

## 1.9 淀粉含量的测定

不同熟化方式甘薯制品及收集的食团2和食团3, 采用北京索莱宝科技有限公司的总淀粉含量检测试剂盒和直链淀粉含量检测试剂盒测定总淀粉含量和直链淀粉含量; 支链淀粉含量 = 总淀粉 - 直链淀粉。

## 1.10 数据分析

每个样品测定至少3次, 采用SPSS 23进行数据统计, 结果以平均值 ± 标准差 (SD) 表示。方差分析采用ANOVA分析, 多重检验采用Duncan法, 显著性水平为  $P < 0.05$ 。使用Origin 2021绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同熟化方式甘薯的质构差异

由表2可知, 经不同熟化处理后, 甘薯的质构特性产生显著变化。煮甘薯块和煮甘薯干片在熟化时直接与水接触, 食用时表面会沾挂一层水分, 通过预试验发现, 是否擦除表面水分对样品的水分含量影响较大, 但样品的质构特性无显著变化, 为模拟样品入口咀嚼状态, 测定质构时并未擦干表面水分。倒蒸甘薯条在制作时的蒸干循环过程中, 由于甘薯条外干内湿, 内部水分逐渐向表面渗透, 糊化后的淀粉分子相互缠绕, 随着水分的挥发形成了结构紧密且柔软有韧性的甘薯制品, 因此呈现出最高的硬度、弹性、胶粘性、内聚性、咀嚼性和回复性; 煮甘薯干片在前期制备样品时的干燥工序中, 大量

水分的挥发造成物料收缩程度增大, 结构紧密<sup>[20]</sup>, 此时硬度较大, 在后续熟化处理后, 样品略变绵软, 但硬度、弹性、胶粘性、内聚性、咀嚼性和回复性仍高于其他4种熟化甘薯制品; 在蒸制甘薯、烤制甘薯、煮甘薯块、微波甘薯4种熟化方式中, 除弹性外, 其他质构指标均无显著差异, 这说明甘薯在通过蒸制、烤制、煮块、微波处理至可食用状态时, 熟化甘薯的质地相似。

### 2.2 熟化方式对甘薯淀粉含量的影响

与鲜甘薯相比, 熟化后甘薯制品的总淀粉含量显著下降, 且不同熟化方式之间均存在显著差异。蒸制甘薯、煮甘薯干片、煮甘薯块、微波甘薯的总淀粉质量保留率较高, 均在60%以上, 其中煮甘薯块的保留率最高, 约在80%左右; 经过倒蒸和烤制熟化处理后, 甘薯的总淀粉质量保留率较低, 约在50%。出现这种差异的原因可能是在甘薯熟化时, 淀粉受热发生糊化, 同时甘薯中含有大量的 $\beta$ -淀粉酶, 可以使甘薯熟化过程中糊化的淀粉水解为还原糖<sup>[21]</sup>;  $\beta$ -淀粉酶活性受加热温度和保温时间的影响较大, 在60℃时可以保持较好的酶活性, 不能耐受80℃以上的高温<sup>[22]</sup>; 也有研究表明, 食品在熟化过程中, 由于食品加工工艺和组成成分的不同, 会不同程度的改变淀粉的理化性质, 促进其水解<sup>[3]</sup>。

经过不同熟化处理后甘薯内的直链淀粉含量比鲜甘薯均有不同程度的减少。直链淀粉质量保留率在24.69%~69.90%。其中, 烤制甘薯的直链淀粉质量保留率最低, 煮甘薯块保留率最高。鲜甘薯、倒蒸甘薯条、蒸制甘薯、烤制甘薯、煮甘薯干片、煮甘薯块、微波甘薯的淀粉直支比分别为0.13、0.16、0.08、0.06、0.10、0.11、0.10, 说明熟化方式对甘薯制品中淀粉的直支比影响显著。

在傅里叶红外谱图中, 1047  $cm^{-1}$  和 1022  $cm^{-1}$  处的特征峰与淀粉颗粒中的有序结构和无定型结构有关, 可以由1047/1022  $cm^{-1}$  峰强度的比值来研究淀粉的短程有序结构, 比值越大, 说明淀粉分子短程有序度越高<sup>[23]</sup>。由表2可以看出, 与鲜甘薯相比, 倒蒸甘薯条、蒸制甘薯、烤制甘薯、煮甘薯干片、煮甘薯块、微波甘薯的1047/1022  $cm^{-1}$  值分别降低了5.77%、13.37%、9.66%、3.15%、6.63%和5.64%, 这表明不同熟化处理后甘薯的水分含量、加热时间以及物理形态变化使淀粉分子间原有的氢键产生不同程度的破损变形, 从而导致其淀粉短程有序结构的差异; 这种差异与熟化后甘薯中直支链淀粉含量的变化趋势一致, 说明甘薯经不同熟化处理后直支链淀粉含量变化的差异性可能与淀粉结构被破坏程度有关。

表 2 熟化方式对甘薯的物理、化学指标和质构特性的影响  
 Table 2 Effects of ripening methods on physical, chemical indexes and texture characteristics of sweet potato

熟化方式	淀粉特性				质构特性						
	总淀粉质量 分数/%	直链淀粉质量 分数/%	水分质量 分数/%	淀粉短程 有序性	硬度/g	弹性	胶粘性	内聚性	咀嚼性	回复性	
鲜甘薯	69.24±0.88 <sup>a</sup>	8.14±0.17 <sup>a</sup>	71.69±0.64 <sup>b</sup>	0.91±0.00 <sup>a</sup>	-	-	-	-	-	-	
倒蒸	33.93±0.31 <sup>g</sup>	2.30±0.21 <sup>e</sup>	25.12±0.53 <sup>e</sup>	0.85±0.00 <sup>e</sup>	5 406.90±533.77 <sup>a</sup>	0.54±0.01 <sup>a</sup>	2 366.46±189.84 <sup>a</sup>	0.43±0.02 <sup>a</sup>	1 287.22±112.17 <sup>a</sup>	0.11±0.01 <sup>a</sup>	
蒸制	42.02±0.96 <sup>e</sup>	3.02±0.12 <sup>d</sup>	73.50±1.24 <sup>b</sup>	0.78±0.00 <sup>f</sup>	683.37±67.55 <sup>e</sup>	0.38±0.12 <sup>b</sup>	61.76±7.40 <sup>e</sup>	0.09±0.00 <sup>e</sup>	23.78±10.07 <sup>e</sup>	0.02±0.00 <sup>b</sup>	
烤制	36.66±1.01 <sup>f</sup>	2.01±0.18 <sup>f</sup>	65.65±2.23 <sup>e</sup>	0.82±0.00 <sup>e</sup>	583.18±78.34 <sup>e</sup>	0.27±0.06 <sup>e</sup>	60.46±11.01 <sup>e</sup>	0.11±0.02 <sup>e</sup>	16.64±5.97 <sup>e</sup>	0.02±0.00 <sup>b</sup>	
煮干片	49.24±0.73 <sup>e</sup>	5.56±0.17 <sup>b</sup>	72.10±2.69 <sup>b</sup>	0.88±0.00 <sup>b</sup>	1 679.72±315.56 <sup>b</sup>	0.33±0.03 <sup>bc</sup>	468.86±162.03 <sup>b</sup>	0.26±0.06 <sup>b</sup>	154.86±68.97 <sup>b</sup>	0.10±0.02 <sup>a</sup>	
煮块	55.74±1.40 <sup>b</sup>	5.69±0.10 <sup>b</sup>	81.77±2.26 <sup>a</sup>	0.85±0.00 <sup>d</sup>	648.15±71.38 <sup>e</sup>	0.27±0.06 <sup>e</sup>	56.43±12.18 <sup>e</sup>	0.09±0.02 <sup>e</sup>	15.52±4.84 <sup>e</sup>	0.02±0.00 <sup>b</sup>	
微波	44.60±1.20 <sup>d</sup>	4.19±0.07 <sup>e</sup>	57.64±4.60 <sup>d</sup>	0.85±0.01 <sup>e</sup>	757.03±92.74 <sup>e</sup>	0.18±0.04 <sup>d</sup>	74.54±19.49 <sup>e</sup>	0.10±0.02 <sup>e</sup>	13.43±5.24 <sup>e</sup>	0.03±0.00 <sup>b</sup>	

注: 同一列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), “-”表示无此项, 下同。

表 3 熟化方式对甘薯咀嚼参数的影响

Table 3 Effect of ripening methods on chewing parameters of sweet potato

熟化方式	一口量/g	咀嚼次数/次	咀嚼时间/s	咀嚼频率/Hz	进食速率/(g/s)
倒蒸	1.97±0.70 <sup>c</sup>	24.54±7.25 <sup>a</sup>	21.46±6.15 <sup>a</sup>	1.17±0.25 <sup>b</sup>	0.10±0.04 <sup>c</sup>
蒸制	8.92±4.39 <sup>ab</sup>	10.96±3.71 <sup>c</sup>	8.36±2.75 <sup>c</sup>	1.36±0.45 <sup>ab</sup>	1.14±0.63 <sup>a</sup>
烤制	8.94±3.61 <sup>ab</sup>	8.58±3.39 <sup>c</sup>	6.50±1.89 <sup>c</sup>	1.32±0.41 <sup>ab</sup>	1.42±0.53 <sup>a</sup>
煮干片	7.42±2.62 <sup>b</sup>	18.21±6.34 <sup>b</sup>	12.62±4.62 <sup>b</sup>	1.47±0.29 <sup>a</sup>	0.67±0.38 <sup>b</sup>
煮块	9.29±2.18 <sup>a</sup>	11.29±4.39 <sup>c</sup>	7.80±2.55 <sup>c</sup>	1.42±0.30 <sup>a</sup>	1.37±0.65 <sup>a</sup>
微波	9.26±2.06 <sup>a</sup>	17.71±6.15 <sup>b</sup>	12.30±3.23 <sup>b</sup>	1.44±0.28 <sup>a</sup>	0.83±0.38 <sup>b</sup>

### 2.3 熟化方式对甘薯咀嚼参数的影响

在咀嚼过程中,受试者的咀嚼参数包括一口量、咀嚼次数、咀嚼时间、咀嚼频率和进食速率等。由表 3 可以看出,不同熟化方式甘薯的一口量大小存在显著差异,其中一口量最小的倒蒸甘薯条的咀嚼次数和咀嚼时间最多,一口量最大的煮甘薯块咀嚼次数和咀嚼时间最少,这可能与它的硬度和咀嚼性直接相关。倒蒸甘薯条的咀嚼循环次数和咀嚼时间明显高于其他 5 种甘薯制品,但水分含量最低、硬度和咀嚼性最高,这说明咀嚼时间和次数与食物的含水量和质构有直接关系。通过不同次数和时间的咀嚼,可以使食团达到吞咽的一致性。在咀嚼频率方面,不同熟化方式甘薯间差异性不大,平均值在 1.17~1.47 Hz。不同熟化方式甘薯样品的进食速率之间存在显著差异,可能是由于其质构特性的差异导致一口量大小、咀嚼次数、咀嚼时间和进食速率的差异。

### 2.4 回收食团的粒径分布

熟化方式对甘薯食团粒径分布的影响如图 1。受试者之间的粒径分布存在显著差异,但大多数受试者的同种甘薯制品的咀嚼食团的粒径分布曲线具有相同的形状(图 1a)<sup>[24]</sup>。粒径分布结果可以表示为每个筛网上回收的食团质量的累计百分比(图 1b)。D<sub>50</sub> 值可以代表食团中颗粒的大小,D<sub>50</sub> 值高表示食团中有较大颗粒。从粒径分布曲线中可以看出,6 种样品的中值粒径存在显著性差异,倒蒸甘薯条、蒸制甘薯、烤制甘薯、煮甘薯干片、煮甘薯块、微波甘薯的 D<sub>50</sub> 分别为 2.65、1.93、1.96、1.88、1.55、2.02 mm,这与 Marie 等<sup>[18]</sup>研究中天然食物咀嚼后食团 D<sub>50</sub> 范围是 0.82~3.04 mm 的结果一致。

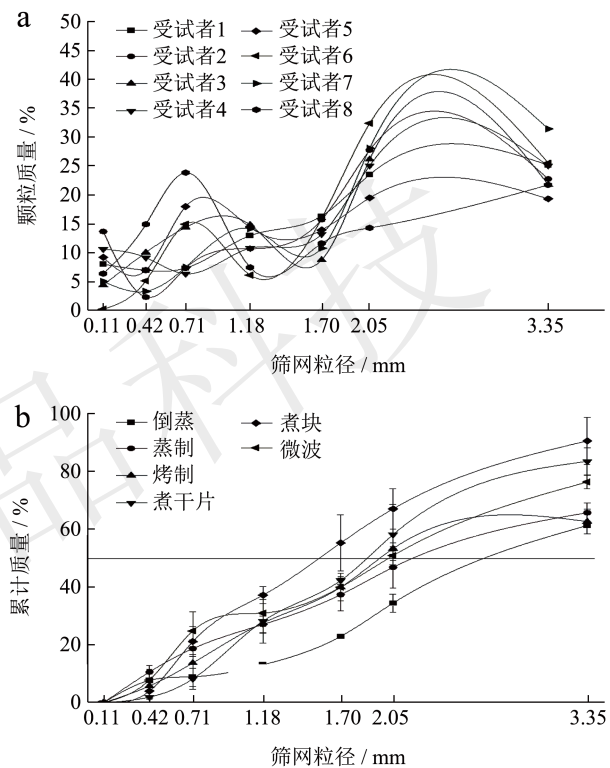


图 1 熟化方式对甘薯食团粒径分布的影响

Fig.1 Effect of ripening methods on particle size distribution of sweet potato bolus

注:图 a 为 8 位受试者咀嚼微波甘薯至吞咽点时食团的粒径分布示例图;图 b 为不同粒径颗粒累计质量占回收食团总质量的百分比,根据每条曲线确定每种样品的中值粒径(D<sub>50</sub>)。

### 2.5 质构特性与咀嚼参数和D<sub>50</sub>的相关性分析

由表 4 可知,一口量与硬度、胶粘性、内聚性、咀嚼性呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与弹性、回复性呈显著负相关( $P < 0.05$ );咀嚼时间与硬度、胶粘性呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与内聚性、回复性、咀嚼性呈显著正相关( $P < 0.05$ );咀嚼次数与硬度、胶粘性、内聚性、回复性呈显著正相关( $P < 0.05$ );咀嚼频率与咀嚼性呈显著负相关( $P < 0.05$ );进食速率与硬度、胶粘性、内聚性、回复性、咀嚼性呈

显著负相关 ( $P < 0.05$ )。这说明食物的质构特性对咀嚼行为有很大影响。食物硬度越大,一口量越小,同时需要更多较咀嚼次数和咀嚼时间来分解食物粒度并分泌唾液润滑至食团达到吞咽点<sup>[25]</sup>,以至于进食速率低。不同熟化方式甘薯制品的咀嚼频率与咀嚼性呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ),这是因为在咀嚼过程中,个体可以根据食物的物理特性控制咀嚼强度和下颌幅度,从而控制咀嚼频率<sup>[26]</sup>。

$D_{50}$ 与硬度、胶粘性和咀嚼性呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ),这与Chen等<sup>[27]</sup>的研究发现不同类型食物的硬度越大,则食团的颗粒越小的研究结果略有不同,其原因可能是由于熟化后甘薯制品较大的胶粘性,会使食物在咀嚼过程中有一部分颗粒粘附在牙齿及口腔周围,当咀嚼至食团达到吞咽点的润滑度时,粘附在牙齿及口腔周围的食物颗粒会随着舌头的收集行为作为可吞咽食团的一部分,从而导致 $D_{50}$ 较大。

表4 咀嚼参数、 $D_{50}$ 与质构特性的相关性

Table 4 Correlation between chewing parameters,  $D_{50}$  and Texture characteristics

指标	一口量	咀嚼次数	咀嚼时间	咀嚼频率	进食速率	$D_{50}$
硬度	-0.997**	0.941**	0.845*	-0.771	-0.889*	0.875*
胶粘性	-0.997**	0.929**	0.824*	-0.797	-0.870*	0.879*
内聚性	-0.965**	0.917*	0.861*	-0.619	-0.907*	0.799
弹性	-0.881*	0.696	0.546	-0.791	-0.665	0.717
回复性	-0.839*	0.835*	0.840*	-0.369	-0.876*	0.648
咀嚼性	-0.990**	0.916*	0.800	-0.829*	-0.847*	0.885*

注: \*表示显著相关性,  $P < 0.05$ , \*\*表示极显著相关性,  $P < 0.01$ 。

## 2.6 熟化方式对甘薯食团特性的影响

回收的吞咽点食团特性如表5所示。由食团的水分含量可以计算出平均唾液增加量和平均唾液流速。

食物含水量是引发吞咽的重要标志之一<sup>[28]</sup>。在

咀嚼后,食团水分含量的变化主要是由于唾液分泌造成。不同熟化方式甘薯制品的水分含量具有显著差异。在咀嚼后甘薯制品中水分含量增加最大的是倒蒸甘薯条,最小的是煮甘薯块,说明样品原始水分含量越低,需要分泌更多的唾液才能润滑食物至吞咽点,食团唾液增加量增加也就越多<sup>[29]</sup>。如图2所示,倒蒸甘薯条、蒸制甘薯、烤制甘薯、煮甘薯干片、煮甘薯块、微波甘薯的最高唾液增加量分别为1.22、0.60、0.77、1.34、0.77、1.00 g/g干基,最低唾液增加量分别为0.50、0.20、0.20、0.38、0.16、0.46 g/g干基。由于受试者咀嚼到达吞咽点的主观性差异大,所以导致了唾液增加量和唾液流速的显著差异。可以看到在吞咽点时,受试者间的唾液增加量不同,所以造成不同受试者的吞咽点食团水分含量不同。由此可以推断出每个人的安全吞咽点范围不同,存在较大的个体差异性。

多种刺激物都会影响唾液分泌,刺激可以是口腔内的,如味觉或机械刺激,也可以是口腔外的,如环境因素、气味或食欲<sup>[30]</sup>。由表5可知,不同熟化方式甘薯制品在咀嚼中的平均唾液流速为45.92~72.65 mg/s,这与Motoi等<sup>[29]</sup>研究的固体食物在咀嚼过程中的唾液流速结果(唾液流速范围48.98~79.67 mg/s)基本一致。蒸制甘薯、烤制甘薯、煮甘薯块、微波甘薯的质构特性无显著差异,但烤制甘薯的平均唾液流速显著高于其他3种,这可能是由于烤制甘薯较其他熟化方式甘薯具有更多的风味化合物<sup>[31]</sup>,刺激了唾液的分泌;煮甘薯干片的平均唾液流速较高的原因可能是其特征是水分内外分布不均,外部湿润,内部干面,所以会刺激分泌更多唾液来润滑食物到达吞咽点;但倒蒸甘薯条质地最硬,内部组织结构致密,而平均唾液流速却并没有显著高于其他几种熟化方式,这可能是由于咀嚼过程中的唾液流速是逐渐下降的<sup>[32]</sup>,所以虽然咀嚼时间较长,但在后续咀嚼阶段的唾液分泌较少,从而导致唾液流速较低。

表5 熟化方式对甘薯的食团特性的影响

Table 5 Effect of ripening methods on food mass characteristics of sweet potato

熟化方式	初始食物干基水分质量分数/%	食团干基水分质量分数/%	平均唾液增加量/(g/g干基)	平均唾液流速/(mg/s)
倒蒸	33.55±0.07 <sup>c</sup>	127.23±23.68 <sup>f</sup>	0.94±0.24 <sup>a</sup>	45.92±5.40 <sup>c</sup>
蒸制	277.36±4.68 <sup>b</sup>	318.54±17.20 <sup>c</sup>	0.41±0.17 <sup>c</sup>	50.37±8.75 <sup>bc</sup>
烤制	191.17±6.49 <sup>c</sup>	238.68±23.47 <sup>d</sup>	0.48±0.23 <sup>c</sup>	71.84±8.48 <sup>a</sup>
煮干片	258.60±9.65 <sup>b</sup>	349.60±40.43 <sup>b</sup>	0.91±0.36 <sup>a</sup>	72.65±12.69 <sup>a</sup>
煮块	448.58±12.40 <sup>a</sup>	490.41±28.82 <sup>a</sup>	0.42±0.25 <sup>c</sup>	50.47±6.20 <sup>bc</sup>
微波	136.07±10.86 <sup>d</sup>	199.51±27.33 <sup>c</sup>	0.63±0.27 <sup>b</sup>	51.07±6.77 <sup>bc</sup>

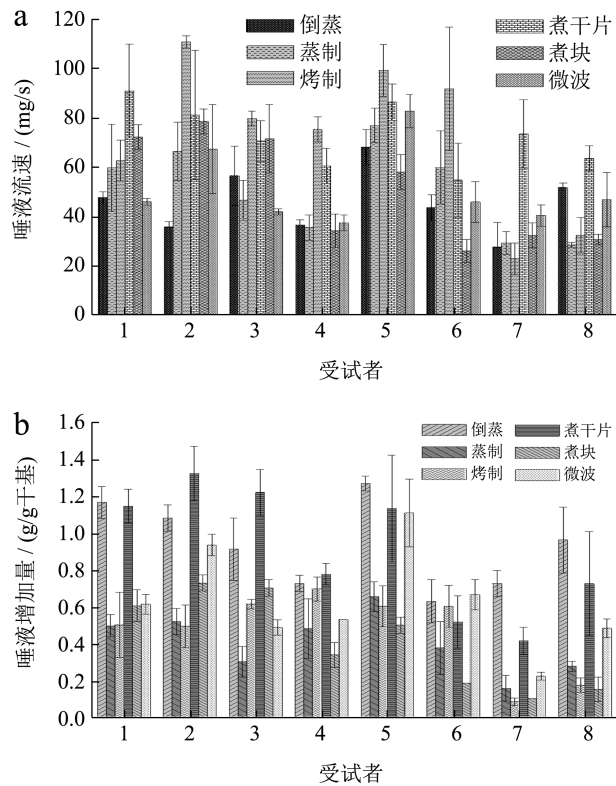


图 2 不同受试者吞咽点食团的唾液增加量和唾液流速

Fig.2 Different subjects swallowed the amount of saliva added and saliva flow rate of the swallowing point

注: (a) 唾液流速; (b) 唾液增加量。

### 2.7 食团中淀粉含量

图 3a 和 3b 显示了吞咽点时不同熟化甘薯制品中的总淀粉含量和直链淀粉含量, 可以看出, 经过口腔加工后食团中总淀粉含量和直链淀粉含量均显著下降。图 3c 中不同熟化方式甘薯制品咀嚼加工后的淀粉消化率具有明显差异。虽然熟化后甘薯制品中淀粉的短程有序结构与经过咀嚼加工后淀粉消化率的变化趋势一致, 但 Wang 等<sup>[33]</sup>指出淀粉的有序结构程度并不是淀粉消化的决定因素; 原因之一可能是不同熟化方式不同程度地破坏了甘薯的物理淀粉结构, 如颗粒的大小和损伤程度、结晶度以及直支链淀粉比值<sup>[34,35]</sup>, 增加了唾液中淀粉酶的有效作用表面及作用的敏感性, 进而影响了碳水化合物的消化和吸收。而同种甘薯制品的 8 位受试者回收食团中的总淀粉和直链淀粉消化情况同样存在差异, 这可能是由于不同受试者之间的唾液增加量和唾液淀粉酶活性不同造成的, 说明受试者个体间差异也是导致淀粉消化率产生差异的重要原因<sup>[36]</sup>。

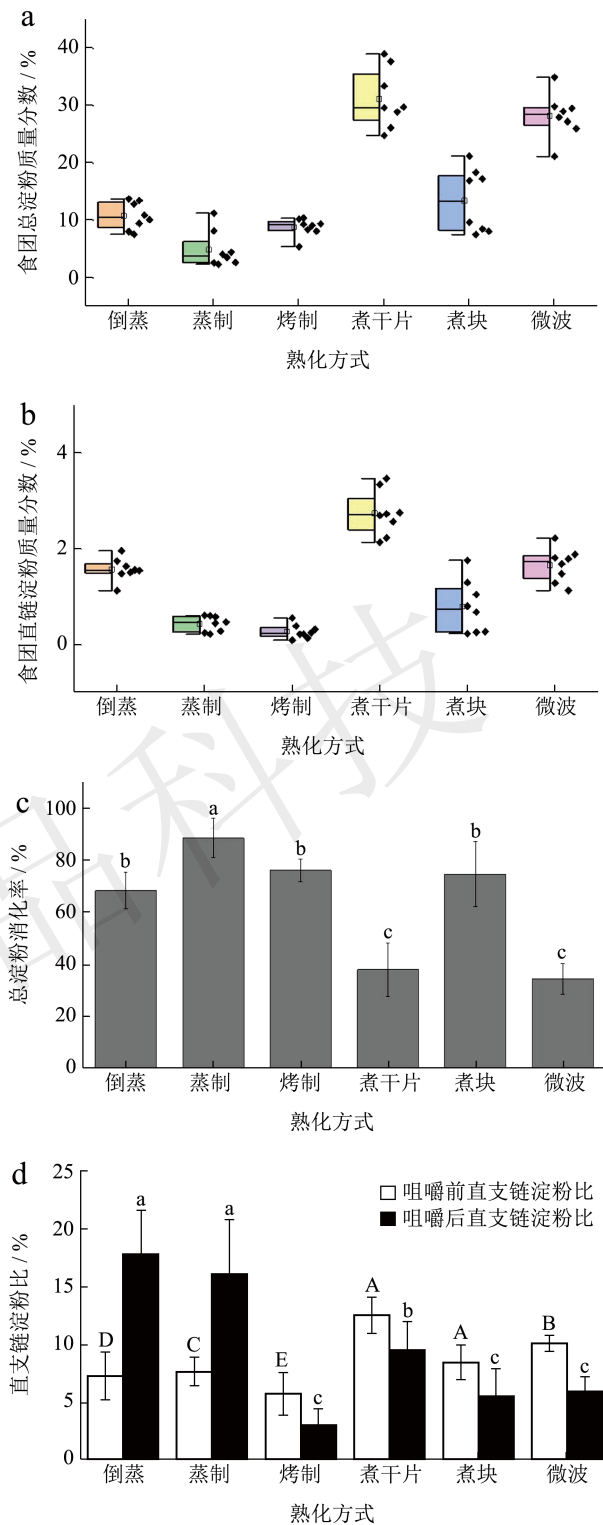


图 3 吞咽点时食团淀粉含量和淀粉消化情况

Fig.3 Starch content and starch digestion of bolus at swallowing point

注: 图 c 中柱上不同小写字母表示不同熟化方式甘薯食团淀粉消化率具有显著差异 ( $P < 0.05$ ); 图 d 中柱上不同大写字母表示不同熟化方式甘薯咀嚼前直支链淀粉比具有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示不同熟化方式甘薯咀嚼后直支链淀粉比具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。



图 3d 可以看出,不同熟化方式甘薯制品在咀嚼前后的直支链淀粉比值。咀嚼后甘薯食团中直支链淀粉含量较咀嚼前的甘薯制品均有所降低,可能是因为唾液中 $\alpha$ -淀粉酶是内切淀粉酶,可以随机分裂直链淀粉和支链淀粉中的 $\alpha$ -1,4糖苷键,生成葡萄糖、麦芽糖、麦芽三糖和小糊精分子<sup>[37]</sup>。烤制甘薯、煮甘薯干片、煮甘薯块和微波甘薯咀嚼后食团中的淀粉直支比同咀嚼前有一定降低,而倒蒸甘薯条、蒸制甘薯的淀粉直支比有一定升高,这进一步验证了唾液淀粉酶分裂直支链淀粉的随机性。说明影响甘薯淀粉消化率的因素并不是单一的,而是多重因素共同作用的结果。

### 3 结论

通过考察熟化方式(倒蒸、蒸制、烤制、煮干片、煮块、微波)对甘薯质构、淀粉含量及淀粉短程有序性的影响,分析不同熟化方式下甘薯的咀嚼加工行为及食团特性,发现不同熟化处理能改变甘薯的质构特性、降低甘薯中的淀粉含量及淀粉短程有序性。不同熟化方式甘薯制品在咀嚼时的一口量、咀嚼次数、咀嚼时间和进食速率均存在显著差异;相关性分析表明,存在差异的原因与熟化甘薯制品的硬度、胶粘性、内聚性、回复性和咀嚼性显著相关。回收食团的平均中值粒径与样品硬度、胶粘性和咀嚼性呈显著正相关。样品形态差异以及受试者咀嚼至吞咽点时的主观性差异是导致样品咀嚼时唾液分泌情况出现显著差异的主要原因。不同熟化方式甘薯制品咀嚼后食团中的淀粉消化率存在明显差异;其中,总淀粉消化率最高为蒸制甘薯,最低为微波甘薯;咀嚼后倒蒸甘薯条、蒸制甘薯的淀粉直支比较咀嚼前升高,咀嚼后烤制甘薯、煮甘薯干片、煮甘薯块和微波甘薯的淀粉直支比同咀嚼前降低;甘薯的淀粉消化率是多重因素共同作用的结果。

研究不同受试者对熟化甘薯的咀嚼特性,分析食团在吞咽点时的淀粉含量差异,可以为消费者在选择甘薯熟化方式时提供参考,并为深入研究甘薯消化特性以及甘薯精深加工奠定理论基础。

### 参考文献

- [1] LARYEA D, KOOMSON D, ODURO I, et al. Evaluation of 10 genotypes of sweet potato for fries [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(2): 58598.
- [2] 徐梦瑶,赵祥颖,张立鹤,等.甘薯的营养价值及保健作用[J].中国果菜,2017,37(5):17-21,47.
- [3] ANGUITA M, GASA J, MARTÍN-ORÚE J F, et al. Study of the effect of technological processes on starch hydrolysis, non-starch polysaccharides solubilization and physicochemical properties of different ingredients using a two-step *in vitro* system [J]. Animal Feed Science and Technology, 2006, 129(1-2): 99-115.
- [4] NWOSISI S, NANDWANI D, RAVI R. Texture profile analysis (Tpa) of organic sweetpotato (*Ipomoea batatas*) cultivars as affected by different processing methods [J]. Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, 2019, 8(6): 1254-1259.
- [5] WANG S, NIE S, ZHU F. Chemical constituents and health effects of sweet potato [J]. Food Research International, 2016, 89(1): 90-116.
- [6] BJÖRCK I, GRANFELDT Y, LILJEBERG H, et al. Food properties affecting the digestion and absorption of carbohydrates [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1994, 59(3 Suppl): 699S-705S.
- [7] CHEN J. Food oral processing-A review [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(1): 1-25.
- [8] ARANCIBIA C, JUBLLOT L, COSTEKK E, et al. Flavor release and sensory characteristics of o/w emulsions. Influence of composition, microstructure and rheological behavior [J]. Food Research International, 2011, 44(6): 1632-1641.
- [9] LABOURÉ H, REPOUX M, COURCOUX P, et al. Inter-individual retronasal aroma release variability during cheese consumption: Role of food oral processing [J]. Food Research International, 2014, 64: 692-700.
- [10] GUINARD J X, ZOUMAS-MORSE C, WALCHAK C, et al. Relation between saliva flow and flavor release from chewing gum [J]. Physiology & Behavior, 1997, 61(4): 591-596.
- [11] BUTTERWORTH P J, WARREN F J, ELLIS P R. Human  $\alpha$ -amylase and starch digestion: An interesting marriage [J]. Starch-Stärke, 2011, 63(7): 395-405.
- [12] PERRY G H, DOMINY N J, CLAW K G, et al. Diet and the evolution of human amylase gene copy number variation [J]. Nature Genetics, 2007, 39(10): 1256-1260.
- [13] 史春余,王汝娟,梁太波,等.食用型甘薯块根碳水化合物代谢特性及与品质的关系[J].中国农业科学,2008,11: 3878-3885.
- [14] WEI S, LU G, CAO H, et al. Effects of cooking methods on starch and sugar composition of sweet potato storage roots [J]. Plos One 2017, 12(8): e0182604.
- [15] 田晴,王学清,胡亚亚,等.不同烘烤时间及温度对冀粉1号香气成分、质构及感官的影响[J].食品工业科技,2020, 41(15):244-249.
- [16] 张仲柏,牛黎莉,汪月,等.X-射线和红外光谱研究马铃薯蛋

- 糕老化特性[J].食品与生物技术学报,2019,38(8):119-125.
- [17] PRIYANKA S, SIVAKAMASUNDARI S K, MOSES J A, et al. Effect of varietal differences on the oral processing behavior and bolus properties of cooked rice [J]. International Journal of Food Engineering, 2021, 17(3): 177-188.
- [18] JALABERT-MALBOS M L, MISHELLANY-DUTOUR A, WODA A, et al. Particle size distribution in the bolus after mastication of natural foods [J]. Food Quality and Preference, 2007, 18(5): 803-812.
- [19] ECK A V, HARDEMAN N, KARATZA N, et al. Oral processing behavior and dynamic sensory perception of composite foods: Toppings assist saliva in bolus formation [J]. Food Quality and Preference, 2019, 71: 497-509.
- [20] 楚倩倩,任广跃,段续,等.不同预处理方式对热风干燥黄花菜褐变及干燥特性的影响[J].食品科学:2023, 44(7): 81-88.
- [21] NABUBUYA A, NAMUTEBI A, BYARUHANGA Y, et al. Amylolytic activity in selected sweetpotato (*Ipomoea batatas* Lam) varieties during development and in storage [J]. Food and Nutrition Sciences, 2012, 3(5): 660-668.
- [22] 项超,沈升法,吴列洪,等.甘薯块根淀粉酶特性及糖化效应研究[J].中国粮油学报,2021,36(5):56-61.
- [23] 孙悦.无定型淀粉有序结构表征及对消化性的影响[D].天津:天津科技大学,2018.
- [24] PEYRON M A, MISHELLANY A, WODA A. Particle size distribution of boluses after mastication of six natural foods [J]. Journal of Dental Research, 2004, 83(7): 578-582.
- [25] MIYAWAKI S, OHKOCHI N, KAWAKAMI T, et al. Changes in masticatory muscle activity according to food size in experimental human mastication [J]. Journal of Oral Rehabilitation, 2001, 28(8): 778-784.
- [26] FOSTER K D, WODA A, PEYRON M A. Effect of texture of plastic and elastic model foods on the parameters of mastication [J]. Journal of Neurophysiology, 2006, 95(6): 3469-3479.
- [27] CHEN J, KHANDELWAL N, LIU Z, et al. Influences of food hardness on the particle size distribution of boluses [J]. Archives of Oral Biology, 2013, 58(3): 293-298.
- [28] LIU D X, REN X, ASIMI S, et al. Changes in oral processing parameters of three rice varieties [J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(4): 622-630.
- [29] MOTOI L, MORGENSTERN M P, HEDDERLEY D I, et al. Bolus moisture content of solid foods during mastication [J]. Journal of Texture Studies, 2013, 44(6): 468-479.
- [30] ENGELEN L, DE WIJK R A, PRINZ J F, et al. The relation between saliva flow after different stimulations and the perception of flavor and texture attributes in custard desserts [J]. Physiology & Behavior, 2003, 78(1): 165-169.
- [31] 赵俊梅,王学清,韩美坤,等.不同类型甘薯最佳烹饪方式评价[J].中国粮油学报,2022,37(8):102-110.
- [32] 刘登勇,邓亚军,韩耀辉,等.红烧肉咀嚼过程中唾液分泌对食团特性和吞咽动作的影响[J].食品工业科技, 2017,38(13): 42-47,52.
- [33] WANG S J, WANG S K, LIU L, et al. Structural orders of wheat starch do not determine the *in vitro* enzymatic digestibility [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(8): 1697-1706.
- [34] HUANG J, LIN L, WANG J, et al. *In vitro* digestion properties of heterogeneous starch granules from high-amylose rice [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 10-22.
- [35] SVIHUS, B, HERVIK A K. Digestion and metabolic fates of starch, and its relation to major nutrition-related health problems: a review [J]. Starch-Stärke. 2016, 68(3-4): 302-313.
- [36] NANTANGA K K M, CHAN E, SULEMAN S, et al. Differences in structures of starch hydrolysates using saliva from different individuals [J]. Starch-Stärke, 2013, 65(7-8): 709-713.
- [37] KIKANI B A, SUTHAR S, JOSHI D. Nanomaterials: An efficient support to immobilize microbial alpha-amylases for improved starch hydrolysis [J]. Starch-Stärke, 2022, 74(9-10): 2200093.