

尹娴婷, 陈晓宇, 胡嘉莉, 等. 米饭咀嚼过程中质地感知差异形成解析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 258–263. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120021

YIN Xianting, CHEN Xiaoyu, HU Jiali, et al. Analysis of Difference Formation in Textural Perception during Chewing Process of Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 258–263. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120021

· 分析检测 ·

米饭咀嚼过程中质地感知差异形成解析

尹娴婷¹, 陈晓宇¹, 胡嘉莉¹, 朱 玲^{1,*}, 张 晖¹, 洪 雁¹, 徐 杰², 张雅媛³

(1. 江南大学食品学院, 江苏无锡 214000;

2. 丰益(上海)生物技术研发中心有限公司, 上海 200137;

3. 广西壮族自治区农业科学院农产品加工研究所, 广西南宁 530000)

摘要: 本文优选籼米和粳米为实验材料, 以人体口腔咀嚼参数为依据, 设定仿生咀嚼时的唾液添加量以及咀嚼次数等条件, 分析了食团颗粒度、水分含量、渗漏固形物含量、还原糖含量等理化指标, 探究米饭咀嚼过程中质地感知差异化形成的原因。结果显示, 三种米的组成相近, 但糊化特性和结晶结构不同。监测米饭质地的动态变化过程, 发现咀嚼过程中米饭的受力由 44~66 N 减小为 20~21 N, 稻花香 2 号米饭呈现出较高的耐咀嚼性和粘牙性, 野香优莉丝米饭粘牙性低且质地松散。分析咀嚼后食团的特性, 发现野香优莉丝米饭咀嚼后形成的食团颗粒度最小且渗漏固形物含量最高、水分含量上升了 1.84%, 显著高于两种粳米 ($P < 0.05$); 稻花香 2 号米饭咀嚼后呈现出最高的还原糖含量 (43.50~64.55 mg/g), 滋味感知最优。米饭仿生质地指标的解析及食团理化特性的测定能全面化、数据化表征咀嚼过程中米饭质地感知差异形成的原因, 这对于深入解析米饭质地形成以及大米食味品质评价具有一定的实际意义。

关键词: 米饭, 咀嚼, 理化特性, 质地解析

中图分类号: TS213.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)23-0258-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120021



本文网刊:

Analysis of Difference Formation in Textural Perception during Chewing Process of Rice

YIN Xianting¹, CHEN Xiaoyu¹, HU Jiali¹, ZHU Ling^{1,*}, ZHANG Hui¹, HONG Yan¹,
XU Jie², ZHANG Yayuan³

(1. Schools of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214000, China;

2. Wilmar (Shanghai) Biotechnology Research & Development Center Co., Ltd., Shanghai 200137, China;

3. Agro-Food Science and Technology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530000, China)

Abstract: Indica and Japonica rice were selected as test materials to investigate the difference formation in textural perception, particle size, water content, leakage solid content and reducing sugar content of rice bolus during chewing process were analyzed by using *in vivo* oral masticatory properties as a reference and setting salivary addition amounts, chewing times *in vitro*. The results showed that the three types of rice were similar in composition, but their gelatinization characteristics and crystalline structures were different. Monitoring the dynamic textural perception of rice, it was found that the force worked on rice decreased from 44~66 N to 20~21 N, Daohuaxiang No.2 rice had a higher chewiness and adhesiveness, while Yexiangyousi rice had a lower adhesiveness and loose texture perception during *in vitro* chewing. Through analyzing the characteristics of rice bolus in simulated chewing process, results indicated that the moisture content

收稿日期: 2023-12-08

基金项目: 国家自然科学基金 (31872906); 江苏省自然科学基金 (BK20210459); 国家自然科学基金青年科学基金 (32202069); 博士后科学基金 (2022M710475)。

作者简介: 尹娴婷 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 健康谷物食品开发, E-mail: yxt19981111@163.com。

* 通信作者: 朱玲 (1985-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 健康谷物食品开发, E-mail: zhuling@jiangnan.edu.cn。

of rice bolus of Yexiangyoulisi rice increased by 1.84%, significantly higher than the other Japonica rice ($P<0.05$). The rice bolus of Yexiangyoulisi rice had the smallest particle size and the highest leakage solid content. Daohuaxiang No.2 rice had the highest reducing sugar content (43.50~64.55 mg/g) and showed optimal taste perception. The analysis of simulated texture index of rice and the determination of physicochemical properties of rice bolus can comprehensively and digitally characterize the difference formation in textural perception during chewing process, which has certain practical significance for analyzing the texture formation in depth and evaluating the eating quality of rice.

Key words: rice; chewing; physicochemical property; texture analysis

口腔是米饭质地的感知器官, 米饭口腔加工是指牙齿、舌头、上下颚以及唾液等协同作用下其形态、结构发生多维动态变化的过程^[1-2]。国内外有关米饭质地的感官评价主要是描述人体真实的咀嚼感受。日本研究人员提出感官硬度、黏度以及二者的比值是稻米食味等级划分的主要依据^[3]。韩国这方面研究较有特色, 引入了触觉、咀嚼声等指标, 并将滋味精细划分为甜度、咸味、酸味和苦味, 来探究米饭的质地以及食味品质差异^[4]。我国现行标准 GB/T 15682-2008 中适口性涵盖了硬度和黏性, 强调米饭黏附牙齿的程度、臼齿压力及嚼劲^[5-6], 但受主观性影响, 感官感知难以对大量米饭样本的质地进行快速、有效的鉴定, 缺乏直观、量化的指标。因此, 仅依赖大米表观特性和个体主观描述, 缺乏对其组分结构与咀嚼感知关联性的深度认识和挖掘, 难以精准全面地反映米饭质地感知的结果。

除感官评价外, 仪器分析法主要是围绕米饭的理化指标与感官评价之间的相关性预测米饭质地^[7-8]。“食味计”、“味度仪”可基于米饭淀粉、蛋白质组成、保水膜厚度、黏附层等指标间接评判其质地, 但评价结果仍与真实值存在差距; 质构仪是通过模拟口腔下压的方式对米饭进行全质构分析, 但测定过程未考虑口腔环境中唾液、牙齿以及酶的影响, 导致预测结果不够精准^[9-10]。因此, 构建仿生口腔咀嚼以分析米饭咀嚼后的食团特性, 实现感官感受的定量表征, 对解析米饭质地差异化是非常有必要的。

本研究优选三种组成相近的大米为实验材料, 基于人体口腔咀嚼特征, 构建仿生多重咀嚼模式。测定米饭转变为食团过程中的力学特性, 将所获取的力与功转换为可反映口腔质地感知的硬度、粘牙性以及耐咀嚼性等参数。在此基础上, 监测食团颗粒度、水分含量、渗漏固形物以及还原糖含量的变化, 反映为口腔感知米饭咀嚼爽滑度和滋味特性。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

经企业预选并提供组成相近的三种大米: 籼米(野香优莉丝)、粳米(吉宏 6 号和稻花香 2 号) 益海嘉里集团; 猪胰 α -淀粉酶(酶活 ≥ 10 U/mg) 美国 Sigma 公司; 氯化钠、氯化钾、碳酸氢钠、无水乙醇 国药集团化学试剂有限公司; 总淀粉、直链淀粉试剂盒 Megazyme 官网。

HC-800Y 型高速多功能粉碎机 武义海纳电器

有限公司; IH 型可功率调节电饭煲 九阳股份有限公司; Brabender Viscograph-E 粘度分析仪 布拉本德技术公司; D2 型 X-射线衍射仪 德国布鲁克仪器公司; TA.XT Plus 型物性分析仪 美国 SMS 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 基本组分测定 大米用磨粉机粉碎后过 60 目筛, 得到大米粉。水分含量参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》直接干燥法测定。蛋白质含量参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法测定。还原糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法测定^[11]。总淀粉含量、直链淀粉含量分别采用 Megazyme 总淀粉试剂盒和直链淀粉试剂盒测定。

1.2.2 结晶结构测定 通过 X-射线衍射获取大米粉的晶体结构和相对结晶度, 扫描角度为 $5^{\circ}\sim 40^{\circ}$, 目标电压为 40 kV, 扫描角度为 0.03° /每个步长^[12]。用 Jade 6.0 对衍射图像分析并计算相对结晶度。

1.2.3 糊化特性测定 称取 40 g 左右的大米粉(按 14% 水分含量校正)加入 400 mL 去离子水放入 Brabender 粘度分析仪。程序设定如下: 转速 75 r/min, 扭矩 700 cmg, 35°C 到 95°C 升温速率 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 95°C 保持 30 min, 95°C 到 50°C 降温速率 $1.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 在 50°C 保持 30 min, 得到籼米和粳米的糊化温度、峰值黏度、终值黏度和崩解值^[13]。

1.2.4 米饭的蒸煮 称取 200 g 米, 淘洗 3 次, 米水比 1:1.5, 利用九阳电饭煲快蒸煮模式(300 W 加热功率 15 s 加热一次)煮饭, 蒸煮完成后, 保温 10 min。

1.2.5 米饭适口性评分 米饭的适口性评分参照国家标准 GB/T 15682-2008《粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》并适当修改^[14]。组成 10

表 1 米饭感官评分标准

Table 1 Sensory scoring standard of rice

评价内容	评价标准	分值(分)
软硬度(10分)	很硬或很软	0~5
	略硬或略软	6~7
	软硬适中	8~10
粘性(10分)	有粘性, 粘牙; 或无粘性	0~5
	有粘性, 基本不粘牙	6~7
	清爽, 有粘性, 不粘牙	8~10
弹性(10分)	米饭干燥, 有渣	0~5
	米饭疏松、无嚼劲	6~7
	米饭有嚼劲	8~10

人的感官评定小组(4 男 6 女, 年龄 23~27 岁, 无口腔方面的疾病)。盛取 10 g 蒸煮完成后的米饭于纸杯中呈递给评定员, 趁热品尝, 对米饭的软硬度、粘性、弹性指标进行打分。具体感官评分标准见表 1。

1.2.6 人工唾液的制备 在每 1 L 水中加入 0.117 g 氯化钠、0.14 g 氯化钾和 2.1 g 碳酸氢钠, 调节 pH6.8~7.0, 使用时加入 5 U/mL 的猪胰 α -淀粉酶(10 U/mg, solid), 配制成模拟人工唾液^[15]。

1.2.7 米饭仿生质地测定 称取 15.0 g 米饭, 加入 0.6 g/g 模拟人工唾液, 可循环压缩探头(TA/MEC)与质构仪的机械臂相连, 选用多重压缩模式(MEC Single Decay), 腔体温度保持在 37 °C, 压缩距离 93 mm, 压缩速度 5 mm/s, 探头循环挤压次数设定为 5、10、15 次^[16]。

1.2.8 食团理化特性测定 样品收集: 称取 15 g 米饭样品放入挤压装置, 加入 0.6 g/g 的模拟人工唾液, 设置循环压缩次数为 5、10、15 次, 每阶段结束后收集食团。

食团颗粒度测定: 取 2 g 样品于玻璃培养皿中, 加入 50 mL 去离子水充分分散后进行拍照^[17]。

食团水分含量测定: 参考 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》进行。

食团渗漏固形物含量测定: 取 0.5 g 样品, 加入 10 mL 去离子水充分振荡后取上清液 1 mL 并称重, 105 °C 烘干水分后剩余样品重量占初始样品重量的百分比为渗漏固形物含量^[18]。

食团还原糖含量: 取 0.5 g 样品, 加入 10 mL 去离子水充分振荡后取上清 0.5 mL, 沸水浴 20 min 灭酶, 采用 3,5-二硝酸水杨酸(DNS)比色法测定还原糖含量。分别配制 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mg/mL 的麦芽糖标准溶液, 绘制麦芽糖标准曲线, 标准曲线回归方程为 $Y=0.4115X+0.0109$ ($R^2=0.9991$), 以麦芽糖含量表示渗漏物中还原糖含量^[11]。

1.3 数据处理

所有实验重复 3 次, 数值以平均值 $\pm$ 标准差表示, 采用 SPSS 26.0 统计软件进行数据分析, 显著性分析采用 Duncan 多重检验, 在 $P<0.05$ 时具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 大米的理化特性

2.1.1 大米的基本组成 三种大米的基本组成如表 2 所示, 总淀粉含量在 77.55%~79.12% 之间、直链淀粉含量在 19.00%~20.30% 之间, 均无显著差异

表 2 大米的基本组成

Table 2 Basic composition of rice

样品	水分(%)	总淀粉(%)	还原糖(%)	蛋白质(%)	直链淀粉(%)
野香优莉丝	13.12 $\pm$ 0.05 ^b	77.58 $\pm$ 1.38 ^a	0.19 $\pm$ 0.01 ^b	7.36 $\pm$ 0.05 ^a	20.30 $\pm$ 0.52 ^a
吉宏6号	13.71 $\pm$ 0.08 ^a	79.12 $\pm$ 0.06 ^a	0.29 $\pm$ 0.00 ^a	6.39 $\pm$ 0.04 ^b	19.50 $\pm$ 0.37 ^a
稻花香2号	13.64 $\pm$ 0.11 ^a	77.55 $\pm$ 1.29 ^a	0.26 $\pm$ 0.03 ^a	6.43 $\pm$ 0.04 ^b	19.00 $\pm$ 0.26 ^a

注: 表中同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 表3~表7同。

($P>0.05$); 野香优莉丝大米的水分含量和还原糖含量显著低于吉宏 6 号大米和稻花香 2 号大米($P<0.05$), 而蛋白质含量显著高于吉宏 6 号和稻花香 2 号大米($P<0.05$)。淀粉是大米的主要组分, 是决定米饭质地的重要因素, 而三种大米总淀粉、直链淀粉含量相近, 很难通过组成直接预测米饭质地^[19]。

2.1.2 大米的糊化特性和结晶结构 如图 1 为三种大米的糊化特性(A)和结晶结构(B)的比较。图 1A 显示, 三种大米的糊化温度无明显差异, 籼米的峰值黏度、终值黏度显著高于两种粳米, 崩解值是指峰值黏度和终值黏度的差值, 也存在显著差异。糊化特性主要与大米内总淀粉、直链淀粉含量有关, 虽然三种大米淀粉含量相近, 籼米和粳米的糊化特性仍存在一定的差异。图 1B 为三种大米的 XRD 图谱以及计算得到的结晶度, X 射线衍射结果的出峰位置为 15°、17°、18°和 23°, 说明大米淀粉是典型的 A 型结晶结构。籼米的结晶度大于两种粳米, 两种粳米之间的结晶度差别不大。米粉的糊化特性和结晶结构与米饭质地密切相关, 但本实验结果无法直观地对米饭质地进行区分^[20-21]。

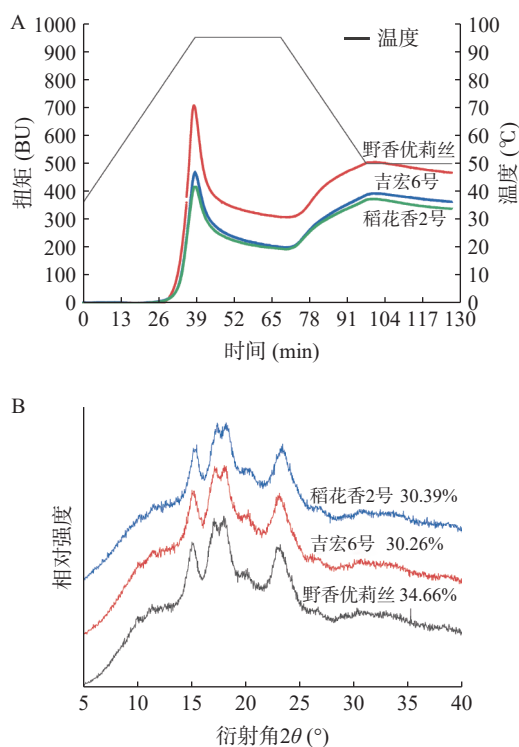


图 1 大米糊化特性曲线(A)和 X-射线衍射曲线(B)

Fig.1 Gelatinization characteristic curves (A) and X-ray diffractograms (B) of rice

2.2 米饭的适口性评分

参考 GB/T 15682-2008《粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》对三种米饭的软硬度、弹性和粘性进行打分, 评分结果见表 3。结果显示, 三种米饭的单一指标得分无显著差异($P>0.05$), 吉宏 6 号米饭和稻花香 2 号米饭的适口性总分值显著大于野香优莉丝米饭($P<0.05$)。感官评价主要是描述

人体真实的咀嚼感受, 是其他仪器分析法的基础, 但存在一定的主观性, 本研究选用的三种米感官评价结果间个体差异较大, 难以精细区分, 存在误差^[22]。

表 3 米饭的适口性评分
Table 3 Palatable scores of cooked rice

样品	软硬度	弹性	粘性	适口性总分
野香优莉丝米饭	7.90±1.37 ^a	6.60±1.42 ^a	6.70±1.70 ^a	20.06±2.24 ^b
吉宏6号米饭	8.30±1.05 ^a	7.45±1.01 ^a	7.70±1.63 ^a	22.88±2.35 ^a
稻花香2号米饭	7.70±0.83 ^a	7.10±1.10 ^a	7.30±1.76 ^a	22.44±2.65 ^a

2.3 咀嚼过程中米饭食团的性质分析

2.3.1 咀嚼过程中米饭食团的质地感知 口腔咀嚼呈现动态的变化过程, 传统的物性分析仪通过两次下压模式获得全质构的测量手段与真实口腔咀嚼方式差异较大, 添加人工唾液并且控制温度的多重压缩模式能够更加真实地模拟米饭与唾液混合以及牙齿的破碎过程, 更加全面、科学表征米饭质地指标^[23]。为了确定仿生咀嚼的唾液添加量、压缩次数以及唾液酶活等条件, 课题组前期考察了人体口腔咀嚼时间、次数、唾液分泌量等, 设置适宜于米饭的多重咀嚼模式^[24]。根据 1.2.7 所述获得的三种米饭仿生多重咀嚼模式下的力学感知结果如图 2 所示。随着咀嚼次数的增加, 三种米的受力均逐步减小, 由 44~66 N 减小为 20~21 N, 这与真实口腔咀嚼过程中米粒在牙齿的咀嚼破碎下颗粒度逐渐减小, 进而与唾液混合形成柔软食团的变化趋势一致。但三种米的减小程度不同, 野香优莉丝米饭、吉宏 6 号米饭和稻花香 2 号米饭分别减小了 54.54%、55.91% 和 67.28%。可能是因为稻花香 2 号米饭的初始硬度大, 为了达到可吞咽的程度, 力值减小程度最大, 而野香优莉丝大米在蒸煮过程中吸水更充分, 因此米饭更加柔软, 初始硬度小, 力值减小最低^[25]。

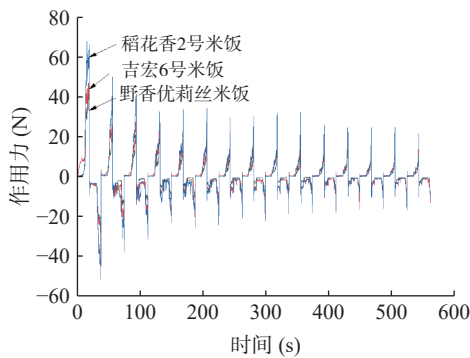


图 2 仿生咀嚼过程中米饭的多重挤压曲线

Fig.2 Multiple extrusion curve of cooked rice in simulated oral mastication

进一步参照真实口腔咀嚼特征并与传统物性分析方法相结合, 以力学曲线中的正峰值、负峰面积、斜率等相关数据定义米饭质地参数。表 4 为三种米饭仿生多重咀嚼的力学数据经解析和转换后得到初始功、残余功、硬度、粘牙性和咀嚼性等质地评价指标。初始功可以表征第一口咀嚼所获得的抵抗牙齿的作用力, 残余功反映了咀嚼后食团剩余的能量, 这与食团到达可吞咽时的作用力是密切相关的^[15,18]。同时, 前期课题组组成了 10 人的感官评价小组, 对米饭质地品质进行打分。将仿生咀嚼数据进行质地特征归类分析, 与感官描述评价结果对比, 进行数据转换, 验证各参数具有较高的可行性及准确性(专利申请号 CN202311196263.X)。研究得出, 硬度可设定为初始正峰值, 对应于感官感受的软硬度, 粘牙性为仿生咀嚼后粘度之差与初始粘度的比值, 对应于感官感受的粘弹性, 咀嚼性为仿生咀嚼前后正峰值之差, 与感官感受的软硬度呈现一定的正相关性, 而咀嚼效率定义为仿生咀嚼前后斜率的变化。对比发现, 稻花香 2 号米饭表现出较大的初始功, 反映为较高的硬度和咀嚼性, 从而推测其口腔加工时不易嚼碎且达到吞咽点需要的时间较长。粘牙性反映了米饭质地的松散程度, 在口腔中会呈现弹性差且不易成团的感觉, 野香优莉丝米饭粘牙性最低, 对应于感官评价粘弹性得分值低, 较低的残余功说明咀嚼后食团质地更为柔软。综上所述, 仿生多重咀嚼能够更全面、科学的实现米饭质地感知的数据化表征。

2.3.2 咀嚼过程中米饭食团颗粒度的差异 米粒在咀嚼破碎下颗粒度不断减小, 咀嚼后食团颗粒度的大小变化如图 3 所示。随着咀嚼次数的增加, 三种米饭咀嚼后食团的颗粒总数均呈现上升的趋势, 与真实口腔咀嚼效果一致^[26-27]。对比三者咀嚼后颗粒度的减小程度, 发现相同的咀嚼次数下, 野香优莉丝食团颗粒度最小, 可能是其初始硬度较低, 容易被咀嚼, 最小的颗粒度也与其最低的残余功对应(表 4 所示)。而稻花香 2 号米饭初始硬度大, 不易被咀嚼破碎, 对其施加的作用力显著高于野香优莉丝米饭($P<0.05$), 咀嚼后样品的颗粒度更大, 对应最高的残余功。综上可知, 米饭质地影响着口腔加工过程, 初始硬度与咀嚼所需要的作用力呈现正相关, 与最终食团的颗粒数呈现负相关, 当食团颗粒度越小, 咀嚼感受到的米饭质地也越柔软。

2.3.3 咀嚼过程中米饭食团水分含量的差异 水分含量与咀嚼过程中感知到的食团润滑度以及柔软度

表 4 仿生咀嚼过程中食团质地感知

Table 4 Textural perception of rice bolus in simulated oral mastication

样品	初始功(J)	残余功(J)	硬度(N)	粘牙性	咀嚼性(N)	咀嚼效率(%)
野香优莉丝米饭	1.23±0.06 ^c	0.21±0.02 ^b	44.49±0.80 ^b	0.70±0.03 ^b	23.48±0.26 ^c	83.37±0.96 ^a
吉宏6号米饭	1.40±0.05 ^b	0.25±0.01 ^a	47.47±2.63 ^b	0.71±0.01 ^b	26.54±2.24 ^b	82.14±0.95 ^a
稻花香2号米饭	1.48±0.08 ^a	0.27±0.03 ^a	66.51±1.26 ^a	0.77±0.01 ^a	44.75±1.18 ^a	81.76±1.11 ^b

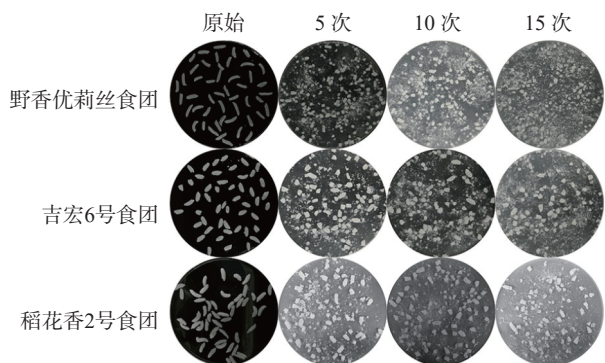


图3 食团在不同仿生咀嚼阶段颗粒度变化

Fig.3 Particle size changes of rice bolus at different simulated chewing stages

注: 5、10、15 次为压缩探头设置的循环下压次数。

密切相关, 三种食团咀嚼后的水分含量变化结果见表 5。随着咀嚼次数的增加, 模拟人工唾液与米饭食团混合更充分, 食团水分含量均呈现上升的趋势。三种米饭在相同的咀嚼次数下进行比较, 发现野香优莉丝咀嚼后食团的水分含量显著高于两种粳米($P<0.05$), 而两种粳米之间无显著差异($P>0.05$)。咀嚼 15 次后, 野香优莉丝、吉宏 6 号和稻花香 2 号米饭食团的水分含量分别上升了 1.84%、1.19% 和 1.03%。可能是野香优莉丝米饭的初始硬度小, 在咀嚼过程中破坏程度更大, 从而增加了破碎颗粒的比表面积, 促进了野香优莉丝米饭在咀嚼过程中与模拟唾液的混合, 形成的食团质地也更为柔软^[28-29]。

表5 食团在不同仿生咀嚼阶段水分含量

Table 5 Water content of rice bolus at different simulated chewing stages

水分含量(%)	5次	10次	15次
野香优莉丝食团	72.57±0.43 ^a	74.13±0.10 ^a	74.41±0.42 ^a
吉宏6号食团	72.39±0.52 ^a	73.43±0.62 ^b	73.58±0.42 ^b
稻花香2号食团	72.06±1.49 ^a	72.39±0.29 ^c	73.09±1.05 ^b

注: 5、10、15 次为压缩探头设置的循环下压次数, 表 6、表 7 同。

2.3.4 咀嚼过程中米饭食团渗漏固形物含量的差异

渗漏固形物含量可一定程度上反映米饭在咀嚼过程中的破碎程度, 呈现的结果如表 6 所示。随着咀嚼次数的增加, 野香优莉丝、吉宏 6 号和稻花香 2 号米饭咀嚼后食团的渗漏固形物含量均呈现上升趋势, 分别增加了 66.85%、28.97% 和 54.26%。吉宏 6 号、稻花香 2 号食团渗漏固形物含量的变化主要发生在 5~10 次咀嚼后; 10~15 次咀嚼后, 野香优莉丝食团渗漏固形物含量显著高于两种粳米($P<0.05$), 与其食团

表6 食团在不同仿生咀嚼阶段渗漏固形物含量

Table 6 Leakage solid content of rice bolus at different simulated chewing stages

渗漏固形物含量(%)	5次	10次	15次
野香优莉丝食团	6.91±0.29 ^b	9.28±0.14 ^b	11.53±0.28 ^a
吉宏6号食团	7.73±0.56 ^a	9.90±0.00 ^a	9.97±1.25 ^b
稻花香2号食团	6.21±0.64 ^b	8.51±1.99 ^c	9.58±0.28 ^b

颗粒度最小相对应(图 3)。咀嚼破碎过程食团颗粒度不断减小, 米饭内部物质渗出, 渗漏物含量能够一定程度上反映米饭的破碎程度, 渗漏物越多, 米饭食团破碎越明显, 咀嚼过程中质地感知越柔软。

2.3.5 咀嚼过程中米饭食团还原糖含量的差异 米饭质地感知过程中淀粉酶的存在不可忽略, 为了考察咀嚼过程中淀粉酶的影响, 测定了咀嚼不同阶段米饭食团中还原糖含量的变化^[30]。如表 7 所示, 随着咀嚼次数的增加, 三种米饭咀嚼后还原糖含量均呈现上升的趋势, 5~10 次咀嚼后增加较慢, 10~15 次咀嚼后增加较快。相同的咀嚼次数下进行比较, 发现稻花香 2 号食团的还原糖含量(43.50~64.55 mg/g)显著高于野香优莉丝和吉宏 6 号食团($P<0.05$)。还原糖含量可一定程度上反映米饭咀嚼过程中滋味的感知, 可知稻花香 2 号米饭滋味感知最优。在真实口腔加工过程中三种米反馈给大脑的味道不同, 也是差异感知的原因之一^[31]。

表7 食团在不同仿生咀嚼阶段还原糖含量

Table 7 Reducing sugar content of rice bolus at different simulated chewing stages

还原糖含量(mg/g)	5次	10次	15次
野香优莉丝食团	26.38±1.74 ^c	32.41±3.94 ^c	54.50±1.45 ^b
吉宏6号食团	38.37±4.43 ^b	41.92±0.68 ^b	56.43±2.37 ^b
稻花香2号食团	43.50±0.57 ^a	51.90±4.34 ^a	64.55±1.84 ^a

3 结论

本文优选粳米和籼米为研究对象, 以真实口腔咀嚼参数为依据, 构建米饭仿生咀嚼模式, 实现对米饭咀嚼过程中质地差异形成的解析。通过测定咀嚼后食团的颗粒度、水分含量、渗漏固形物含量等理化指标, 发现野香优莉丝米饭咀嚼后形成的食团水分含量及渗漏固形物含量最高, 颗粒度最小, 感知到质地更柔软; 稻花香 2 号米饭咀嚼后食团水分含量、渗漏物含量低, 颗粒度最大, 感知其更耐咀嚼; 稻花香 2 号米饭咀嚼后食团还原糖含量最高, 滋味感知最优。综上, 米饭咀嚼后食团水分含量、渗漏固形物含量更高、颗粒度更小, 会形成更柔软的质地感知结果, 还原糖含量更高则滋味感知更优。唾液的添加以及咀嚼破碎使得食团具有不同的理化特性, 这一差异主要在咀嚼过程中体现, 对米饭咀嚼过程的探究能够更好地区分米饭质地。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] STOKES J R, BOEHM M W, BAIER S K. Oral processing, texture and mouthfeel: From rheology to tribology and beyond[J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2013, 18(4): 349-359.

- [2] PU D D, DUAN W, HUANG Y, et al. Characterization of the dynamic texture perception and the impact factors on the bolus texture changes during oral processing[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 128078.
- [3] HORI K, SUZUKI K, IJIMA K, et al. Variation in cooking and eating quality traits in Japanese rice germplasm accessions[J]. *Breeding Science*, 2016, 66(2): 309–318.
- [4] PARK J K, KIM S S, KIM K O. Effect of milling ratio on sensory properties of cooked rice and on physicochemical properties of milled and cooked rice[J]. *Cereal Chemistry*, 2001, 78(2): 151–156.
- [5] 王靖, 严伟, 丁华, 等. 国内外大米蒸煮食味品质标准分析[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(23): 6238–6243. [WANG J, YAN W, DING H, et al. Brief analysis of national and international standards of rice cooking and eating quality[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2016, 55(23): 6238–6243.]
- [6] 王乐惠, 张继宁, 张鲜鲜, 等. 我国稻米食味品质的研究进展及其影响因素[J]. *上海农业学报*, 2023, 39(3): 148–154. [WANG L H, ZHANG J N, ZHANG X X, et al. Research progress of rice taste quality and its influencing factors in China[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2023, 39(3): 148–154.]
- [7] 刘秋员, 陶钰, 程爽, 等. 不同直链淀粉与蛋白质含量类型粳稻稻米品质特征[J]. *食品科技*, 2022, 47(11): 150–158. [LIU Q Y, TAO Y, CHENG S, et al. Rice quality characteristics of japonica rice varieties with different amylose and protein content[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(11): 150–158.]
- [8] 周显青. 稻谷精深加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 67–98. [ZHOU X Q. Deep processing technology of rice [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 67–98.]
- [9] GAO J, WANG Y, DONG Z Z, et al. Structural and mechanical characteristics of bread and their impact on oral processing: A review[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53(4): 858–872.
- [10] KIM Y, OH I K, KIM H, et al. Artificial saliva-induced structural breakdown of rice flour gels under simulated chewing conditions[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2019, 28(2): 387–393.
- [11] CHEN L D, LÜ B Y, ZHANG X A, et al. The swallowing threshold and starch hydrolysis of cooked rice with different moisture contents for human mastication[J]. *Food Research International*, 2022, 160: 111677.
- [12] 薛薇, 张聪男, 王莉, 等. 不同品种大米理化性质及其淀粉结构对米饭食用品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(9): 37–45. [XUE W, ZHANG C N, WANG L, et al. Effects of physicochemical properties and starch structure of different rice varieties on rice eating quality[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2022, 41(9): 37–45.]
- [13] CHEN X Y, ZHU L, ZHANG H, et al. Effects of composition, starch structural orders, and kernel structure on starch *in vitro* digestion of highland barley[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 301: 120274.
- [14] 全国粮油标准化技术委员会. GB/T 15682-2008 粮油检验 稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. [National Technical Committee for Grain and Oil Standardization. GB/T 15682-2008 Method for sensory evaluation of edible quality of grain and oil inspection, rice and rice cooking[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.]
- [15] BORNHORST G M, SINGH R P. Kinetics of *in vitro* bread bolus digestion with varying oral and gastric digestion parameters[J]. *Food Biophysics*, 2013, 8(1): 50–59.
- [16] LIU G D, ZHANG C, ZHANG S H, et al. Simulated oral processing of cooked rice using texture analyzer equipped with multiple extrusion cell probe (TA/MEC)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 138: 110731.
- [17] 侯莹莹. 不同直链淀粉含量的米饭体外动态消化特性及其对肠道菌群的影响研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2022. [HOU Y Y. Study on the *in vitro* dynamic digestion properties of rice with different amylose contents and their effects on gut microbiota[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2022.]
- [18] ZHU L, BI S L, WU G C, et al. Study of the migration and molecular structure of starch and protein in rice kernel during heating[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 147: 1116–1124.
- [19] BALINDONG J L, WARD R M, LIU L, et al. Rice grain protein composition influences instrumental measures of rice cooking and eating quality[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 79: 35–42.
- [20] 张超, 吴焱, 魏海燕, 等. 半糯性粳稻的淀粉精细结构及其米粉/饭功能特性研究[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(6): 1–7. [ZHANG C, WU Y, WEI H Y, et al. Starch fine structure and functionality of semi-waxy japonica rice flour/cooked rice[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(6): 1–7.]
- [21] 杜双奎, 杨红丹, 于修焯, 等. 商品粳米、籼米、糯米品质特性和糊化特性比较研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(5): 78–81. [DU S K, YANG H D, YU X Z, et al. Quality properties of commercial rice[J]. *Food Science*, 2010, 31(5): 78–81.]
- [22] LI H Y, PRAKASH S, NICHOLSON T M, et al. Instrumental measurement of cooked rice texture by dynamic rheological testing and its relation to the fine structure of rice starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 146: 253–263.
- [23] JANSSEN A M, VAN DE PIJPEKAMP A M, LABIAUSSE D. Differential saliva-induced breakdown of starch filled protein gels in relation to sensory perception[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(3): 795–805.
- [24] YIN X T, CHEN X Y, HU J L, et al. In-mouth mechanisms leading to physicochemical changes and textural perception of cooked rice prepared with different heating rates[J]. *Food Bioscience*, 2023, 56: 103282.
- [25] 黄天柱, 吴卫国, 李高阳, 等. 大米理化特性与米饭口感品质的相关性研究[J]. *中国食物与营养*, 2012, 18(3): 24–28. [HUANG T Z, WU W G, LI G Y, et al. Research on relativity between rice's physical-chemical properties and mouth-feel quality[J]. *Food and Nutrition in China*, 2012, 18(3): 24–28.]
- [26] JALABERT-MALBOS M L, MISHELLANY-DUTOIR A, WODA A, et al. Particle size distribution in the food bolus after mastication of natural foods[J]. *Food Quality and Preference*, 2007, 18(5): 803–812.
- [27] LEE H J, PARK Y S, CHOI K J, et al. Impact of varying food hardness on mastication/swallowing[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2023, 32: 959–967.
- [28] 任欣, 王林莹, 张敏, 等. 模拟口腔加工对馒头体外淀粉消化特性的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(5): 129–138. [REN X, WANG L X, ZHANG M, et al. Effect of simulated oral processing on starch digestion characteristics *in vitro* of steamed bread[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(5): 129–138.]
- [29] CHEN J S, KHANDELWAL N, LIU Z Y, et al. Influences of food hardness on the particle size distribution of food boluses[J]. *Archives of Oral Biology*, 2013, 58(3): 293–298.
- [30] AJI G K, WARREN F J, ROURA J E. Salivary alpha-amylase activity and starch-related sweet taste perception in humans[J]. *Chemical Senses*, 2019, 44(4): 249–256.
- [31] VAN ECK A, STIEGER M. Oral processing behavior, sensory perception and intake of composite foods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 106: 219–231.