

针对米饭的体外口腔消化方法优化及压力烹饪米饭甜味比较

朱焯东¹, 龚艳玲¹, 鲍涛¹, 李晶^{1*}, 孙为正^{2*}

(1. 佛山市顺德区美的电热电器制造有限公司, 广东佛山 528311)

(2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

摘要: 米饭甜味是品尝米饭的重要感官指标之一, 其甜味感知主要发生在口腔消化过程中。但现有米饭体外口腔消化方法不统一, 导致不同实验结果之间缺乏可比性。为改善体外口腔消化方法之间的可比性并提升米饭甜味, 该研究参考“INFOGEST”消化体系利用 A/MEC 咀嚼装置进行体外口腔消化方法的优化。在该优化方法的基础上, 探究了电饭煲不同烹饪条件(浸泡时间和烹饪压力)对米饭质构特性及甜味感知的影响。结果表明, 体外口腔消化最优参数为米饭加样量 15 g, 双向挤压循环 25 周期。不同条件烹饪米饭的还原糖含量(≤ 0.45 mg/g)均未达到甜味感知的阈值。10 min 中温浸泡和 50 kPa 压力烹饪处理降低了米饭的口腔破碎难度, 导致米饭的体外口腔消化第一次破碎硬度由 7 572.41 g 降低至 6 151.23 g, 挤压限制值由 17.00 降低至 7.00, 并促进了淀粉的酶解过程, 使其体外口腔消化产物的麦芽糖含量由 6.43 mg/g 提升至 10.85 mg/g。综上, 合适的浸泡时间和烹饪压力有利于提高米饭的甜味感知。该研究为甜味米饭的烹饪工艺优化提供了理论依据。

关键词: 米饭; 多重咀嚼测定装置; 体外口腔消化; 质构特性; 麦芽糖

文章编号: 1673-9078(2025)12-191-199

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1183

Optimization of An *in Vitro* Oral Digestion Method for Rice and Comparative Analysis of Sweetness in Pressure-cooked Rice

ZHU Zhaodong¹, GONG Yanling¹, BAO Tao¹, LI Jing^{1*}, SUN Weizheng^{2*}

(1.Foshan Shunde Midea Electrical Heating Appliances Manufacturing Co. Ltd., Foshan 528311, China)

(2.School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Sweetness is a key sensory attribute of rice, primarily perceived during oral digestion. However, the lack of standardized *in vitro* oral digestion methods for rice has limited comparability between experimental results. To address this, an *in vitro* oral digestion method was optimized using the A/MEC chewing device and the “INFOGEST” digestion framework to enhance methodological consistency and assess rice sweetness more reliably. The effects of different cooking conditions (soak time and cooking pressure) on the textural properties and sweetness perception of rice were investigated using this optimized method.

引文格式:

朱焯东, 龚艳玲, 鲍涛, 等. 针对米饭的体外口腔消化方法优化及压力烹饪米饭甜味比较[J]. 现代食品科技, 2025, 41(12): 191-199.

ZHU Zhaodong, GONG Yanling, BAO Tao, et al. Optimization of an *in vitro* oral digestion method for rice and comparative analysis of sweetness in pressure-cooked rice [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 191-199.

收稿日期: 2025-06-18; 修回日期: 2025-08-01; 接受日期: 2025-08-07

基金项目: 企业委托项目 (GL0123051601009)

作者简介: 朱焯东 (1998-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 烹饪电器健康美味研究, E-mail: zhuzd9@midea.com

通讯作者: 李晶 (1987-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 烹饪电器健康美味研究, E-mail: jing1.li@midea.com; 共同通讯作者: 孙为正

(1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品蛋白质化学与营养, E-mail: fewzhsun@scut.edu.cn

The optimal *in vitro* oral digestion parameters consisted of a rice sample weight of 15 g and 25 bidirectional extrusion cycles. The reducing sugar content (≤ 0.45 mg/g) across all cooking conditions did not reach the threshold for sweetness perception. Soaking rice at a medium-temperature for 10 min and a cooking pressure of 50 kPa reduced the difficulty of oral fragmentation. The first extrusion hardness decreased from 7 572.41 to 6 151.23 g, and extrusion restriction decreased from 17.00 to 7.00, thereby facilitating starch enzymatic hydrolysis. Consequently, the maltose content in *in vitro* oral digestion products increased from 6.43 mg/g to 10.85 mg/g. The findings of this study indicate that appropriate soak time and cooking pressure can enhance the perceived sweetness of rice, thereby providing a theoretical basis for optimizing the cooking process.

Key words: rice; multiple mastication measuring device; *in vitro* oral digestion; texture characteristic; maltose

电饭煲作为烹饪米饭的主要工具,其烹饪米饭的品质是消费者购买的重要依据^[1]。目前电饭煲行业主要依据 GB/T 40978-2021《电饭锅》和 T-CHEAA 0002-2018《电饭煲烹饪米饭品质评价方法》两个标准进行米饭品质评价。在上述标准中,米饭甜味的主要表征指标为米饭还原糖。然而米饭品尝过程中的甜味感知强度主要来源于唾液淀粉酶水解淀粉产生的麦芽糖及麦芽寡糖含量。未经口腔消化的米饭还原糖含量难以表征品尝米饭时所感知到的甜味。因此仍需进一步研究米饭经口腔消化后的甜味物质含量变化。

真实口腔消化实验存在一定的伦理性问题,并且个体差异也会导致数据的重现性差。体外消化因其具有便捷性等优点成为了大多数学者研究食物消化的方法^[2,3]。然而各种体外消化体系的不同可能会导致实验结果出现较大的偏差,使得不同研究之间的比较失去意义^[4,5]。在此基础上,Brodkorb 等^[6]针对静态体外模拟消化发布了“INFOGEST”消化体系。该消化体系通过规范消化过程参数提高了消化实验结果的重复性与可比性。但该方法对食物在口腔过程的破碎以及搅拌等方面的参数规定较少。食物的破碎以及搅拌能够显著影响食物基质与消化酶的接触效率,进而影响最终的消化结果^[7-9]。为了能够反映真实口腔消化过程,一些学者通过研究人体口腔生理结构、咀嚼运动系统以及咀嚼功能开发了咀嚼模拟器^[10]。这些咀嚼模拟器能够较好的模拟人体口腔的咀嚼过程。但为实验室内部搭建系统,存在统一标准化难和设备价格贵等问题,进而导致复现研究少。因此不同研究间的可比性差等问题仍难以解决。

品尝米饭时甜味感知与淀粉被唾液淀粉酶的水解程度强相关,并且食物的质构特性会影响其在咀嚼过程中的成团性,进而影响食物与唾液淀粉酶的接触效率^[11,12]。大米淀粉在烹饪过程中的结构崩解程度也会影响后续水解速率。现有压力电饭煲的米饭烹饪工艺主要包括低于淀粉糊化温度的中温浸泡阶段和高于淀粉糊化温度的高温高压糊化阶段。这两个阶段的浸泡时

间和烹饪压力值均会影响米饭淀粉结构崩解程度和米饭的质构特性,进而影响品尝米饭时的甜味感知强弱。

基于此,本研究首先根据米饭真实口腔消化产物的物化特性,利用更易获取且标准化的质构仪 A/MEC 多重咀嚼测定装置完成体外模拟口腔消化的参数优化。在优化后的体外模拟口腔消化方法基础上,进一步研究了不同浸泡时间及烹饪压力对米饭品质及口腔消化特性影响,分析了压力烹饪米饭中压力-质构-甜味之间的联系及甜味的可能影响机制,旨在为烹饪高品质米饭的压力电饭煲产品研发提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

珍珠米(粳米),黑龙江省北大荒米业集团有限公司; α -淀粉酶(来源于猪胰腺,货号 A3176),上海 Sigma-Aldrich 公司;麦芽糖(HPLC $\geq 98\%$,货号 B20834)、麦芽三糖(HPLC $\geq 98\%$,货号 B27221),上海源叶生物科技有限公司;氯化钙、氯化钾、磷酸二氢钾、碳酸氢钠、氯化镁、碳酸铵、无水乙醇,国药集团化学试剂有限公司;所有使用水均为超纯水。

1.2 主要仪器设备

MB-G2 电饭煲,广东省美的生活电器有限公司;TA.XT Plus 物性分析仪,英国 Stable Micro System 公司;SC150-S15 水浴循环器,美国 Thermo Fisher Scientific 公司;ML304T 分析天平,瑞士梅特勒托利多公司;UV-1800 紫外可见分光光度计,日本岛津公司;1260 Infinity II 高效液相色谱仪,美国安捷伦科技有限公司;3K-15 高速冷冻离心机,德国 Sigma Laborzentrifugen 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 米饭样品制备

按米水质量比 480:600 (*m/m*) 称量并使用电饭煲

在实验组程序下进行烹饪，待电饭煲完成烹饪后立即取样进行测试。其中，真实口腔消化及体外模拟口腔消化的参数优化的米饭样品采用精华饭功能烹饪。压力烹饪米饭样品采取了3个不同梯度的浸泡（浸泡温度为60℃）时间（0、10和20 min）和5个不同梯度的烹饪压力（0、25、50、75和100 kPa）的专用功能烹饪。

1.3.2 米饭的真实口腔消化

参照 GB/T 15682-2008《粮油检验稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》^[13]中评价员挑选办法挑选了6名健康且口腔及牙齿无缺陷的测试人员。称量10 g米饭样品供测试人员咀嚼至有吞咽欲望时全部吐出，收集样品并立即冰浴或加入无水乙醇以停止真实口腔消化过程。其中，测试人员在测试前一周内不得进食辛辣刺激性食物，且测试前2 h不得进食，测试前需用饮用纯净水漱口。

1.3.3 米饭的体外模拟口腔消化及参数优化

米饭体外模拟消化体系处理参照 Brodkorb 等^[6]的方法并略有改进。将10 g或15 g米饭与模拟唾液以1:1的质量比（*m/m*）混合，加入适量的 α -淀粉酶（最终体系中 α -淀粉酶酶活为75 U/mL），使用A/MEC多重咀嚼测定装置进行20或25周期的双向挤压循环，期间使用水浴循环器对腔体进行保温，其温度为37℃，控制口腔消化的总时间为2 min，反应结束后立即冰浴或加入无水乙醇以暂停反应。其中，米饭加样量10 g和15 g由A/MEC多重咀嚼测定装置的合适装填量而确定，双向挤压循环周期20和25周期由与真实口腔消化产物的特征对比相近而确定。

1.3.4 压力烹饪米饭的体外模拟口腔消化

取适量1.3.1中的压力烹饪米饭使用1.3.3中最优参数进行体外模拟口腔消化。根据试验力随时间的变化曲线，提取第一个挤压动作发生时的最大应力作为第一次破碎硬度，提取连续两次挤压周期内最大挤压应力平均值小于4 000 g时的挤压周期数作为挤压限制值。4 000 g取值的依据为各实验组均能够较快降低达到的最大挤压应力。

1.3.5 口腔消化产物物理特性的测定

取适量1.3.2及1.3.3中使用冰浴停止反应的口腔消化产物进行物理特性的测定。使用25℃超纯水洗去口腔消化产物表面粘连的淀粉，并去除极细小颗粒，之后使用游标卡尺对较大颗粒进行颗粒尺寸的测量。使用J-TPA装置对半固态口腔消化产物的硬度进行测定。具体操作为，取半固态米饭口腔消化产物至J-TPA

装置样品杯中，控制样品高度为15 mm，调整J-TPA装置探头至样品上方5 mm开始进行TPA测试，测试参数为：15 mm压缩距离，1 mm/s测试前、中和后速度。

1.3.6 口腔消化产物的麦芽糖及麦芽三糖含量的测定

取适量1.3.2、1.3.3和1.3.4中使用无水乙醇停止反应的口腔消化产物离心（10 000 g，4℃，15 min），取上清液参考GB 5009.8-2023《食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定》^[14]中的第一法高效液相色谱法进行麦芽糖及麦芽三糖含量的测定。

1.3.7 还原糖含量的测定

取适量1.3.4中使用无水乙醇停止反应的口腔消化产物离心（10 000 g，4℃，15 min），取上清液采用DNS显色法于420 nm吸光度下测试其还原糖含量。

1.3.8 米饭质构特性的测定

取1.3.4中的压力烹饪米饭参考龚艳玲等^[15]的方法对米饭的硬度和粘性进行测定。具体操作为，取87 g米饭置于高20 mm、直径90 mm规格的测试皿中，使用另一测试皿压平米饭后采用P-36R型探头进行TPA测试。测试参数为：75%压缩比，0.5 mm/s测试前、中和后速度。

1.3.9 数据分析

采用SPSS 20.0软件分析平均数和标准差（SD），所有实验至少重复测定三次以上。利用Duncan复极差检验法检验数据之间的显著性差异，以 $P<0.05$ 表示存在统计学上的显著差异。

2 结果与讨论

2.1 口腔消化产物表观形态

米饭样品进行体外模拟口腔消化及真实口腔消化后产物的表观形态如图1所示。体外模拟口腔消化产物（B-E）相比真实口腔消化产物（A）更稀薄，这可能是因为体外模拟口腔消化中为了提高米饭和酶液的接触效率与均匀性，米饭加样量与模拟唾液的比例为1:1（*m/m*）。在真实口腔消化中，唾液的释放速度较为缓慢且释放量较少。真实唾液与模拟唾液量的差值导致消化产物在浓稠度结果上具有差别。

真实口腔消化产物整体较为均匀，大小颗粒差别不大。对比体外模拟口腔消化产物，尤其是当双向挤压循环周期为20次时（B和C），其大小颗粒差别较大，均匀性较差，当双向挤压循环周期增至25次时，整体

均匀性得到改善。这可能是因为挤压周期为 20 次时，多次挤压装置反馈的临近两次挤压应力变化值虽已较小，可认为已到达体外模拟口腔消化终点，但一些残留在挤压装置末端的米饭颗粒可能未能被较好的破碎，从而导致了体外模拟口腔消化产物的不均匀。当挤压周期增至 25 次时，挤压装置末端的米饭颗粒得以进一步的破碎，进而改善了口腔消化产物的均匀性。

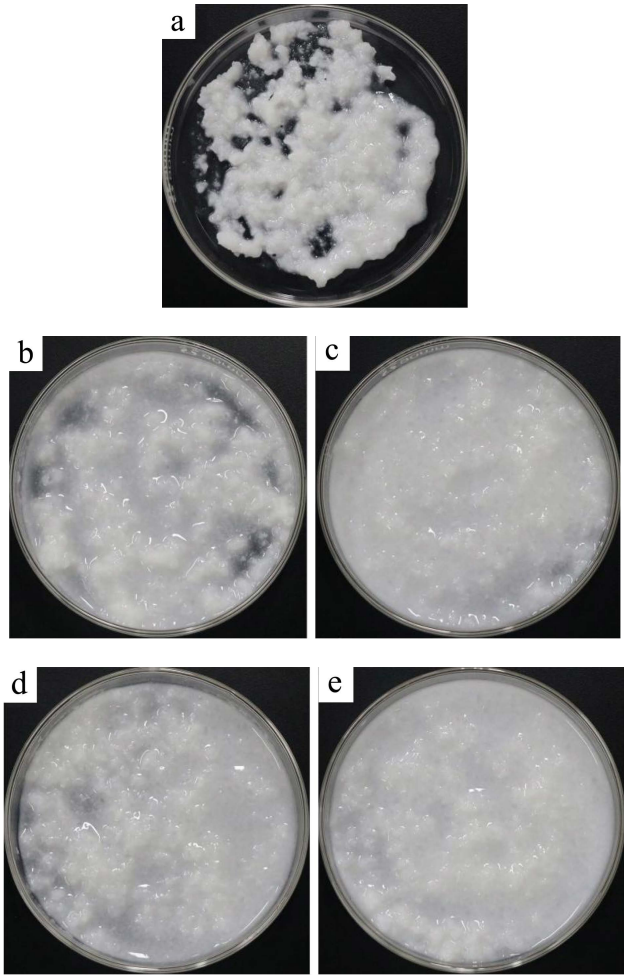


图 1 不同口腔消化产物的表现形态

Fig.1 The apparent morphology of different oral digestive products
注：a~e 分别代表 C、10 g-20 f、15 g-20 f、10 g-25 f 和 15 g-25 f 实验组。

2.2 口腔消化产物的物理特性

口腔消化产物的颗粒尺寸能够反映米饭在口腔消化过程中的破碎程度，并影响后续的消化过程，因此控制体外模拟口腔消化产物的颗粒尺寸与真实口腔消化相似有利于反映真实的消化结果^[16]。各口腔消化产物的颗粒尺寸结果如表 1 所示。所有体外模拟口腔消化产物均与真实口腔消化的颗粒尺寸无显著性差异

($P>0.05$)，说明该体外模拟口腔消化方法能一定程度上表征真实口腔消化产物的颗粒尺寸特性。但不同的米饭的加样量和双向挤压循环周期均会影响体外模拟口腔消化产物的颗粒尺寸。10 g-20 f 实验组 (3.25 mm) 和 10 g-25 f 实验组 (3.04 mm) 均小于 15 g-20 f 实验组 (3.91 mm) 和 15 g-25 f 实验组 (3.63 mm) 的颗粒尺寸，这是因为米饭加样量增加导致米饭被破碎至相同程度时的难度增大，进而导致了其颗粒尺寸变大。15 g-25 f 实验组与真实口腔消化产物的颗粒尺寸差值 (-0.05 mm) 最小，最接近真实口腔消化产物的颗粒尺寸。Lv 等^[17]自制了口腔咀嚼模拟器用于模拟米饭的体外消化过程，该模拟器模仿了人体的口腔及牙齿结构状态，并使用注射泵用于模拟口腔咀嚼过程中的唾液释放过程。相比该方法，本研究中的体外口腔消化方法装置更易获取，方法更易被复现，进而能够提升不同研究之间结果的可比性。并且使用 Lv 等^[17]方法经过 12、14 和 20 次循环挤压后，其食团粒度分布（排除 1 mm 以下小颗粒）也均主要分布于 3~5 mm，也证明本方法的体外模拟口腔消化能够一定程度上反映真实口腔消化产物的颗粒尺寸。

变异系数 (Coefficient of Variation, C.V) 作为反映数据离散程度的数据，颗粒尺寸变异系数能够反映米饭口腔消化产物的颗粒尺寸均匀性。10 g-25 f 实验组 (4.86%) 和 15 g-25 f 实验组 (4.81%) 颗粒尺寸的变异系数均小于 10 g-20 f 实验组 (10.96%) 和 15 g-20 f 实验组 (13.77%)，且与真实口腔消化的变异系数 (3.91%) 相近。

Hutchings 等^[18]提出了食物的口腔加工模型，并指出了食物在口腔咀嚼过程中不断变化的质构特性决定了食物的被吞咽时机。此外，质构特性还会影响消化酶与食物的接触效率，进而影响食物的消化率与生物利用度^[19]。因此，体外口腔消化产物的质构特性也是消化参数优化的重要因素。由表 1 可知，所有体外模拟口腔消化产物与真实口腔消化的硬度均无显著性差异 ($P>0.05$)，这表明了本研究的体外模拟口腔消化对米饭的破碎程度接近真实口腔消化。特别的，15 g-25 f 实验组的硬度 (142.03 g) 最接近真实口腔消化产物。此外，10 g-25 f (4.18%) 和 15 g-25 f 实验组 (1.62%) 硬度的变异系数均小于 10 g-20 f 实验组 (8.59%) 和 15 g-20 f 实验组 (8.74%)。不同消化产物的质构特性与颗粒尺寸的变化规律相似，Ma 等^[20]的研究也发现，较大颗粒具有更强的抗破碎能力，进而表现为硬度的升高。

表 1 不同口腔消化产物的颗粒尺寸
Table 1 Particle size of different oral digestive products

消化条件			颗粒尺寸 /mm	Δ 颗粒尺寸 /mm	$C.V.$ 颗粒尺寸 /%	硬度/g	Δ 硬度/g	$C.V.$ 硬度/%
处理组	样品量/g	挤压次数						
真实口腔消化	10	口腔咀嚼	3.68 ± 0.14 ^{ab}	—	3.91	139.13 ± 4.71 ^{ab}	—	3.39
	10	20 f	3.25 ± 0.36 ^{ab}	-0.43	10.96	130.30 ± 11.18 ^{ab}	-8.83	8.59
体外口腔消化	15	20 f	3.91 ± 0.54 ^a	0.23	13.77	148.26 ± 12.95 ^a	9.23	8.74
	10	25 f	3.04 ± 0.15 ^b	-0.64	4.86	122.30 ± 5.11 ^b	-16.83	4.18
	15	25 f	3.63 ± 0.17 ^{ab}	-0.05	4.81	142.03 ± 2.30 ^{ab}	2.90	1.62

注：表中同一列不同的小写字母表示样品间差异显著（ $P<0.05$ ）。表 2、3 同。

表 2 不同口腔消化产物的甜味物质含量
Table 2 Sweetness content of different oral digestive products

消化条件			麦芽糖含量 /(mg/g)	Δ 麦芽糖含量 /(mg/g)	$C.V.$ 麦芽糖含量 /%	麦芽三糖含量 /(mg/g)	Δ 麦芽三糖含量 /(mg/g)	$C.V.$ 麦芽三糖含量 /%
处理组	样品量 /g	挤压次数						
真实口腔消化	10	口腔咀嚼	10.22 ± 1.02 ^a	—	9.94	7.67 ± 0.67 ^c	—	8.72
	10	20 f	11.61 ± 1.16 ^a	1.39	10.00	11.10 ± 0.91 ^a	3.43	8.20
体外口腔消化	15	20 f	9.81 ± 1.50 ^a	-0.41	15.32	9.21 ± 0.51 ^b	1.54	5.54
	10	25 f	12.47 ± 1.03 ^a	2.25	8.28	11.47 ± 0.64 ^a	3.80	5.61
	15	25 f	10.46 ± 0.79 ^a	0.23	7.51	10.01 ± 0.45 ^{ab}	2.34	4.48

2.3 口腔消化产物的甜味物质含量

大米淀粉在口腔中消化产生的主要甜味物质是麦芽糖和麦芽三糖，对米饭品尝过程中的甜味感知起到了决定性的作用^[21]。因此甜味物质含量也是体外模拟口腔消化优化的重要参数。表 2 为不同口腔消化产物的麦芽糖和麦芽三糖含量。15 g-25 f 实验组的麦芽糖含量（10.46 mg/g）仍最接近真实口腔消化（10.22 mg/g）。这可能是因为口腔消化产物的颗粒尺寸与质构特性影响了其消化过程，并表现为麦芽糖与麦芽三糖含量的变化。Asimi 等^[22] 参照“INFOGEST”消化体系研究了粳米饭在体外口腔消化过程中的甜味物质含量变化，其口腔消化终点的麦芽糖含量为 18.05 mg/g，略高于本研究中的麦芽糖含量。这可能是因为该研究使用搅拌器模拟口腔的咀嚼过程，然而搅拌器的破碎相比口腔咀嚼是更加剧烈的，其破碎程度可能超过了口腔咀嚼所能达到的程度，进而促进了淀粉的酶解过程并得到了更高的还原糖含量。所有体外模拟口腔消化产物的麦芽三糖含量（11.10、9.21、11.47 和 10.01 mg/g）均显著高于真实口腔消化产物（7.67 mg/g），这可能是因为实验所用 α -淀粉酶及消化体系仍与真实消化体系存在差异。但体外模拟口腔消化甜味物质含量与真实口腔消化处于相似的数量级，同时考虑体外消化体系的便捷性和可重复性，本研究后续采用 15 g-25 f 实验组的实验条件进行不

同烹饪压力米饭质构特性与甜味物质含量的研究。

2.4 不同条件烹饪米饭的还原糖含量、质构特性、含水率及口腔破碎硬度

未经口腔消化的米饭还原糖含量能够影响米饭的入口滋味。浸泡时间和压力可能会通过影响米饭淀粉崩解的程度进而影响米饭的还原糖含量^[23]。如表 3 所示，压力的升高有利于米饭的还原糖含量的提高，但其提升幅度并不显著，这可能是因为压力促淀粉崩解程度有限，只有少量的淀粉转化为还原糖。特别的，100 kPa 压力烹饪的米饭还原糖含量总是低于 75 kPa 压力烹饪的米饭，这可能是因为过高的温度与压力促进了还原糖参与美拉德等反应过程，进而导致还原糖含量的降低^[24]。Wunthunyarat 等^[25]研究了稻米中内源性淀粉酶活性，发现其在 60~70 °C 的温度下具有最高的酶解活性。本研究中浸泡温度为 60 °C，处于内源性淀粉酶最优活性区间，因此浸泡时间的增加促进了大米淀粉的酶解过程，进而显著提升了米饭还原糖含量。所有米饭样品的还原糖含量（ ≤ 0.45 mg/g）均未达到甜味阈值^[22]，这解释了米饭入口时难以感知到甜味的现象。因此，米饭还原糖含量虽一定能程度上能够反映米饭的入口滋味，但无法反映品尝米饭过程中真实甜味感知。

大米在电饭煲烹饪过程中，淀粉吸水崩解溶出，

随着温度的进一步升高，淀粉开始糊化变粘，米饭颗粒之间粘连成型，从而赋予了米饭特殊的质构特性并影响米饭的口感和口腔消化过程^[26]。如表 3 所示，随着烹饪压力的增大，米饭的含水率有所降低。这可能是因为电饭煲的烹饪压力来源于烹饪腔体内的水分蒸发，烹饪压力较大的实验组米饭中更多的水分蒸发为水蒸气，造成了米饭含水率的下降。食物的硬度和弹性总是与含水率呈反比关系，然而在本研究中同一浸泡时间下，米饭的硬度和粘性并未总是随着烹饪压力的增加而增加，而是 50 kPa 或 75 kPa 烹饪压力条件下的米饭具有最高硬度和粘性。这可能是因为电饭煲烹饪环境处于饱和蒸汽状态，其烹饪压力与烹饪温度存在对应关系，0、25、50、75 和 100 kPa 的烹饪压力所对应的饱和蒸汽温度分别约为 100、106、111、116 和 120 ℃。因此当烹饪压力较低时，压力可能促进了淀粉结构的崩解，利于其与蛋白质和脂质等物质交联结合形成稳定的三维网络结构，同时含水率的降低也进一步米饭的硬度与粘性的提升。然而当烹饪压力继续升高时，其温度过高可能导致淀粉-蛋白质或淀粉脂质等复合物解离，进而导致米饭硬度和粘性开始下降。Goderis 等^[27]和 Wang 等^[28]的研究也表明 107~110 ℃可能会导致淀粉脂质复合物的熔融与解离。特别的，相比于未经过浸泡的实验组米饭，10 和 20 min 的浸泡也显著提升了米饭的硬度和粘性，这可能是因为中温浸

泡过程促进了米饭中淀粉结构的崩解以及蛋白质等物质的游离，有利于淀粉-蛋白质或淀粉脂质等复合物的生成，使得米饭的三维网络结构更加稳定，进而提升了米饭的硬度与粘性。

米饭在口腔中破碎所需的硬度会影响其被破碎为微小颗粒的难度，进而影响整个口腔消化过程。一般的，初次破碎所需力度与其破碎难度呈正比。因此，本研究截取了米饭经体外口腔消化过程中的第一次破碎硬度（第一个挤压动作发生时的最大应力）和挤压限制值（连续两次挤压周期内最大挤压应力平均值小于 4 000 g 时的挤压周期数）用于分析米饭再口腔消化过程中的质构特性（如表 3 所示）。第一次破碎硬度与挤压限制值均随浸泡时间增加而减小，这与硬度和粘性的呈现相反的变化规律，这可能是因为米饭的硬度和粘性影响米饭的成团性，进而影响米饭在口腔消化过程中的成团属性，最终赋予了米饭在口腔消化过程中不同的质构特性。在相同浸泡时间条件下，提升烹饪压力有利于挤压限制值的降低。特别的，第一次破碎硬度总是在 50 kPa 烹饪压力下处于最低值，这可能与淀粉-蛋白质或淀粉脂质等复合物结合与解离有关。10 min 50 kPa 样品组的第一次破碎硬度最低，也表明适度的处理条件可能有利于米饭结构强度的降低，并可能进一步影响米饭的口腔消化过程的酶解程度。

表 3 不同条件烹饪米饭的还原糖含量、含水率和质构特性

Table 3 Reducing sugar, moisture content, and texture characters of rice cooked under different conditions							
烹饪条件	还原糖含量/(mg/g)	水分含量/%	硬度/g	粘性/(g·sec)	第一次破碎硬度/g	挤压限制值	
0	0	0.27 ± 0.01 ^c	61.09 ± 0.33 ^a	1 657.35 ± 176.58 ^g	147.19 ± 41.24 ^d	7 572.41 ± 29.70 ^{ab}	17.00
	25 kPa	0.28 ± 0.01 ^c	60.60 ± 0.49 ^{abc}	1 820.09 ± 180.16 ^{fg}	211.53 ± 80.31 ^{cd}	7 715.34 ± 457.35 ^a	13.00
	50 kPa	0.30 ± 0.01 ^{bc}	60.21 ± 0.28 ^{bcd}	1 959.54 ± 142.98 ^{cdef}	289.57 ± 62.23 ^{bcd}	7 125.84 ± 30.45 ^{abcd}	10.00
	75 kPa	0.32 ± 0.02 ^b	59.51 ± 0.50 ^{ef}	1 898.84 ± 189.52 ^{ef}	310.31 ± 91.05 ^{bcd}	7 789.59 ± 286.20 ^a	8.00
	100 kPa	0.30 ± 0.03 ^{bc}	59.40 ± 0.22 ^{ef}	1 937.56 ± 62.86 ^{def}	232.78 ± 55.74 ^{cd}	7 272.42 ± 324.05 ^{abc}	8.00
10 min	0	0.31 ± 0.00 ^{bc}	61.22 ± 0.23 ^a	1 901.35 ± 184.64 ^{ef}	188.43 ± 37.45 ^d	6 263.13 ± 333.45 ^{cd}	9.00
	25 kPa	0.33 ± 0.02 ^b	60.79 ± 0.29 ^{ab}	2 018.45 ± 103.74 ^{bcd}	203.31 ± 26.56 ^{cd}	6 597.11 ± 35.90 ^{bcd}	8.00
	50 kPa	0.33 ± 0.01 ^b	60.29 ± 0.08 ^{bcd}	2 180.62 ± 179.80 ^{abcd}	361.42 ± 115.73 ^{abc}	6 151.23 ± 227.10 ^d	7.00
	75 kPa	0.34 ± 0.04 ^b	59.71 ± 0.13 ^{def}	2 227.76 ± 59.81 ^{ab}	437.05 ± 116.36 ^{ab}	6 362.54 ± 502.40 ^{cd}	6.00
	100 kPa	0.33 ± 0.03 ^b	59.32 ± 0.28 ^f	2 087.01 ± 138.62 ^{bcd}	448.08 ± 111.90 ^{ab}	6 298.49 ± 382.95 ^{cd}	5.00
20 min	0	0.41 ± 0.00 ^a	61.10 ± 0.21 ^a	1 917.69 ± 102.17 ^{ef}	224.28 ± 48.66 ^{cd}	7 165.64 ± 203.20 ^{abcd}	7.00
	25 kPa	0.42 ± 0.01 ^a	60.80 ± 0.29 ^{ab}	1 993.49 ± 110.51 ^{bcd}	189.30 ± 49.53 ^d	6 517.41 ± 131.05 ^{cd}	5.00
	50 kPa	0.42 ± 0.01 ^a	60.23 ± 0.19 ^{bcd}	2 195.23 ± 110.46 ^{abc}	310.33 ± 50.62 ^{bcd}	6 247.92 ± 315.45 ^{cd}	5.00
	75 kPa	0.45 ± 0.02 ^a	59.99 ± 0.15 ^{cde}	2 378.17 ± 71.75 ^a	512.49 ± 73.96 ^a	6 397.41 ± 398.90 ^{cd}	6.00
	100 kPa	0.41 ± 0.02 ^a	59.42 ± 0.36 ^{ef}	2 216.63 ± 80.66 ^{ab}	504.16 ± 202.65 ^a	6 409.53 ± 341.00 ^{cd}	4.00

2.5 不同条件烹饪米饭的口腔消化产物的麦芽糖和麦芽三糖含量

在品尝米饭过程中，唾液淀粉酶主要将淀粉水解为麦芽糖及麦芽三糖等具有甜味的物质，当其含量达到甜味感知阈值时，便能感知到甜味。因此米饭经口腔消化后的麦芽糖及麦芽三糖含量是米饭甜味感知的关键影响因素^[21]。如图 2 所示，所有实验组经体外模拟口腔消化后，其产物的麦芽糖和麦芽三糖含量均超过了甜味阈值^[22]，印证了米饭经咀嚼后产生甜味的现象。对比未经浸泡处理的米饭，经过 10 min 及 20 min 浸泡处理的实验组体外消化产物的麦芽糖和麦芽三糖含量均有一定提升。这可能是因为浸泡促进了淀粉结构的崩解，进而提高了淀粉在口腔消化过程中与淀粉酶的接触效率。值得一提的是，相比其他烹饪压力实验组，50 kPa 烹饪压力实验组的米饭体外模拟消化产

物具有最高的麦芽糖（浸泡时间 0 min：8.61 mg/g；浸泡时间 10 min：10.85 mg/g；浸泡时间 20 min：9.40 mg/g）和麦芽三糖含量（浸泡时间 0 min：10.27 mg/g；浸泡时间 10 min：12.43 mg/g；浸泡时间 20 min：11.01 mg/g）（ $P<0.05$ ），并且 10 min 的浸泡时间具有最高的麦芽糖和麦芽三糖含量。这与米饭的第一次破碎硬度（表 3）结果呈现相反的变化趋势，这可能是因为米饭的第一次破碎硬度影响米饭在口腔消化过程中的破碎难度，较低的破碎难度可能有利于米饭在口腔消化过程中的酶解过程，进而影响了米饭体外口腔消化产物的甜味物质含量。此外，50 kPa 烹饪压力的米饭硬度区间为 1 959.54~2 195.23 g，米饭粘度区间为 289.57~361.42 g·sec，基本处于 T-CHEAA 0002-2018《电饭煲烹饪米饭品质评价方法》中所定义的 A 级米饭指标区间内。这也进一步揭示 50 kPa 的烹饪压力可能有利于米饭品质提升。

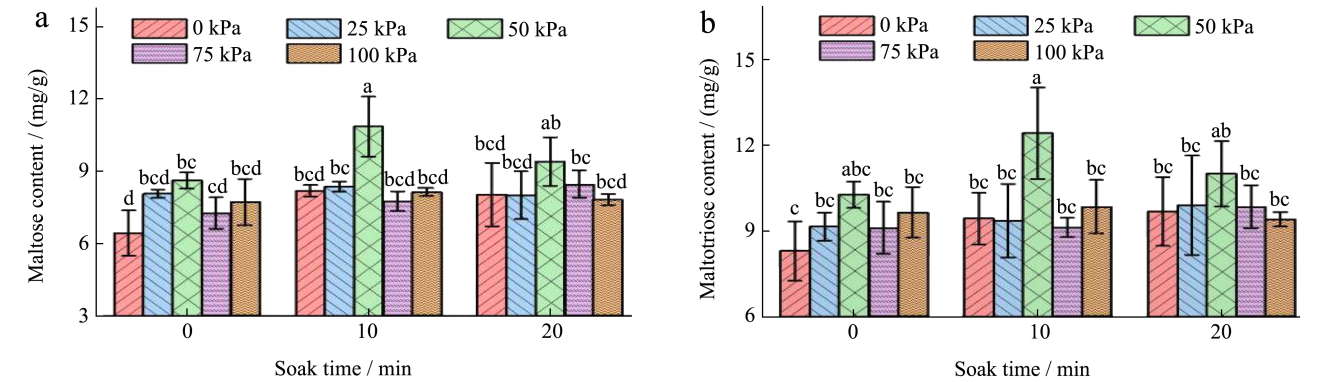


图 2 不同条件烹饪米饭的麦芽糖 (a) 及麦芽三糖 (b) 含量

Fig.2 Maltose (a) and maltotriose (b) content of rice cooked under different conditions

注：图中不同的小写字母表示样品间差异显著（ $P<0.05$ ）。

表 4 不同条件烹饪米饭的还原糖含量、质构特性和口腔破碎硬度

Table 4 Reducing sugar, texture characters, and the first extrusion hardness of rice cooked under different conditions							
	还原糖含量	硬度	粘性	第一次破碎硬度	挤压限制值	麦芽糖含量	麦芽三糖含量
还原糖含量	1.00	—	—	—	—	—	—
硬度	0.74**	1.00	—	—	—	—	—
粘性	0.51	0.79**	1.00	—	—	—	—
第一次破碎硬度	-0.50	-0.69**	-0.41	1.00	—	—	—
挤压限制值	-0.86**	-0.78**	-0.65**	0.56*	1.00	—	—
麦芽糖含量	0.26	0.42	0.22	-0.63*	-0.12	1.00	—
麦芽三糖含量	0.42	0.46	0.34	-0.58*	-0.41**	0.77	1.00

注：显著性标记为：* $P<0.05$ ，** $P<0.01$ 。

2.6 相关性及主成分分析

对不同烹饪条件及其米饭的质构特性和甜味物质含量进行相关性分析，其结果如表 4 所示。米饭口腔消化前（软硬度和米饭粘性）中后（第一次破碎硬度和咀嚼限制值）的质构特性之间呈显著相关性 ($P<0.01$)，这也进一步印证了前文中口腔消化前米饭质构特性影响了米饭口腔消化后的质构特性的结果。米饭的感知甜味（麦芽糖和麦芽三糖含量）则与米饭口腔消化过程中的质构特性呈显著负相关性 ($P<0.05$)，表现为更低的口腔破碎难度有利于米饭感知甜味的提升。

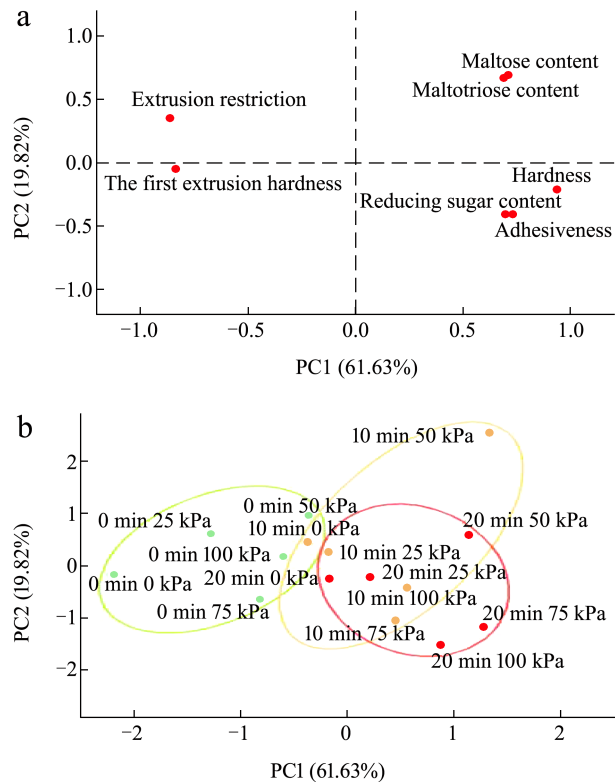


图 3 关于主成分 1 和主成分 2 的主成分分析载荷图 (a) 和各样品组得分图 (b)

Fig.3 Principal component analysis loading plots (a) and score plots for samples (b) in the plane of principal components 2 vs. principal component 1

为了直观地表现指标之间的相关性和规律，本研究采用主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 对指标进行降维分析。根据 PCA 的结果，其抽样适合性 (Kaiser-Meyer-Olkin, KMO) 检验系数为 0.649，因此，可认为该 PCA 是合理的，本次所取得样本量是合适的，各变量的偏相关系数符合要求。Bartlett 球度检验中显示模型显著 ($P<0.001$) 可知，变量相关矩阵所建立的模型是比较合适的^[29]。此外，由前两个主成分解释了 81.5% 的总方差可知，前两个

主成分能反映出原始数据所提供的主要特征信息。因此本研究中主要用前两个主成分来解释 PCA 的结果。

图 3a 和图 3b 分别为各指标的载荷图和各样品组的得分图。根据载荷图可知，第一主成分 (Principal Components 1, PC1) 解释了总方差的 61.63%，PC1 在入口甜味 (还原糖含量) 与米饭口腔消化前 (软硬度和米饭粘性) 中后 (第一次破碎硬度和咀嚼限制值) 的质构特性中具有较高的载荷。而 PC1 和第二主成分 (Principal Components 2, PC2) 在感知甜味 (麦芽糖和麦芽三糖含量) 均具有较高的载荷，并解释了总方差的 19.82%。如得分图所示，随着浸泡时间的增加，其样品组在 PC1 的得分逐渐增加，有利于其入口甜味的增加和米饭口腔消化前质构特性的改善以及米饭在口腔消化过程中的破碎难度降低。特别的，50 kPa 样品组在同一浸泡时间条件下总是具有最高的 PC2 得分，10 min 50 kPa 样品组在所有样品组中具有最高的 PC2 得分，有利于其感知甜味的提升。这也与前文中各指标的变化趋势一致。

3 结论

本研究首先使用质构仪 A/MEC 多重咀嚼测定装置对米饭体外口腔消化方法进行了优化。在此基础上，进一步研究了不同中温浸泡时间与烹饪压力对米饭甜味物质含量的影响，并从米饭的质构特性和含水率等角度解释了影响米饭甜味感知的可能机制。当米饭加样量 15 g，双向挤压循环 25 周期时，体外口腔消化产物的颗粒尺寸 (3.63 mm)、质构特性 (142.03 g) 和麦芽糖含量 (10.46 mg/g) 与真实口腔消化的结果差值最小，分别为 -0.05 mm、2.90 g 和 0.23 mg/g，因此选取了该参数作为体外口腔消化方法的最优参数。在该参数下，不同烹饪条件的米饭体外口腔消化产物的甜味物质含量均达到了甜味感知阈值，证实了咀嚼米饭过程中的甜味产生。增加 60 °C 中温浸泡时间提高了米饭的还原糖含量、硬度、粘性及体外口腔消化产物的麦芽糖和麦芽三糖含量。50 kPa 烹饪压力实验组米饭的体外口腔消化产物具有最低的口腔破碎难度，进而促进了其口腔消化过程，使其具有最高的麦芽糖和麦芽三糖含量，有利于提升米饭的甜味感知。并且在该烹饪条件下，米饭硬度区间约为 1 959.54~2 195.23 g，米饭粘度区间为 289.57~361.42 g.sec，基本处于 T-CHEAA 0002-2018《电饭煲烹饪米饭品质评价方法》中所定义的 A 级米饭指标区间内，表明其具有较优的适口性。因此，50 kPa 压力条件下烹饪米饭有利于提高米饭的甜味感知及口感，可为压力电饭煲甜味米饭烹饪工艺开发提供参考。

参考文献

- [1] 杨国芳,关阳,陆伟,等.基于全质构和统计学分析的电饭煲烹饪米饭口感评价研究[J].家电科技,2022,S1:699-701.
- [2] 王怀槟,柳嘉,王萌,等.不同原料组成的配方食品体外消化特性研究及其eGI值测定[J].现代食品科技,2024,40(10):60-67.
- [3] 李颖颖,李霞,杨杰.稻米淀粉消化率的研究进展及其内外影响因素[J].现代食品科技,2024,40(10):1-13.
- [4] HUR S J, LIM B O, DECKER E A, et al. *In vitro* human digestion models for food applications [J]. Food Chemistry, 2011, 125(1): 1-12.
- [5] LI C, YU W W, WU P, et al. Current *in vitro* digestion systems for understanding food digestion in human upper gastrointestinal tract [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 114-126.
- [6] BRODKORB A, EGGER L, ALMINGER M, et al. INFOGEST static *in vitro* simulation of gastrointestinal food digestion [J]. Nature Protocols, 2019, 14(4): 991-1014.
- [7] 任欣,王林萱,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.
- [8] ORLIEN V, AALAEI K, POOJARY M M, et al. Effect of processing on *in vitro* digestibility (IVPD) of food proteins [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 30: 2790-2839.
- [9] ZHOU F B, ZHAO M M, CUI C, et al. Influence of linoleic acid-induced oxidative modifications on physicochemical changes and *in vitro* digestibility of porcine myofibrillar proteins [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(2): 414-421.
- [10] 张啸峰,陈勇,陈建设.基于口腔咀嚼原理的咀嚼模拟器研究进展[J].食品工业科技,2022,43(5):1-12.
- [11] KHRAMOVA D S, VITYAZEVA F V, ZUEVA N V, et al. Impact of pectin or xanthan addition to mashed potatoes gelled with κ -carrageenan on texture and rheology, oral processing behavior, bolus properties and in mouth starch digestibility [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 308: 142349.
- [12] GUO Q, BELLISIMO N, ROUSSEAU D. Role of gel structure in controlling *in vitro* intestinal lipid digestion in whey protein emulsion gels [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 264-272.
- [13] 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].
- [14] GB 5009.8-2023,食品安全国家标准 食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定[S].
- [15] 龚艳玲,李晶,苏莹,等.2种电饭煲烹饪米饭饭质测试方法比较研究[J].实验室检测,2023,1(1):23-29.
- [16] DRESSMAN J B. Comparison of canine and human gastrointestinal physiology [J]. Pharmaceutical Research, 1986, 3(3): 123-131.
- [17] LV B Y, XU Y H, WU P. Insights into the digestive processes of normal and high-amylose rice using realistic boluses formed in the bio-inspired oral mastication simulator (iBOMS-III) [J]. Food Chemistry, 2025, 471: 142799.
- [18] HUTCHINGS J B, LILLFORD P J. The perception of food texture-the philosophy of the breakdown path [J]. Journal of Texture Studies, 1988, 19(2): 103-115.
- [19] ZHAO J, WU J H, CHEN Y N, et al. Gel properties of soy protein isolate modified by lipoxygenase-catalyzed linoleic acid oxidation and their influence on pepsin diffusion and *in vitro* gastric digestion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(20): 5691-5698.
- [20] MA M J, LI L J, GU Z B, et al. Development of *in vitro* oral processing model for different rice: effects of saliva volume and chewing time on physicochemical properties of rice boluses [J]. Food Chemistry, 2025, 470: 142690.
- [21] CHEN Y, CHEN J S, WANG X M, et al. The multi-modal sensory effect on sour taste perception during oral processing of starch-thickened fluids [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 157: 110451.
- [22] ASIMI S, MIN Z. Study on taste release and perception mechanism of japonica rice during oral processing [J]. Food Chemistry: X, 2025, 27: 102427.
- [23] ZHANG X Y, WANG C, LIU Z Y, et al. Four stages of multi-scale structural changes in rice starch during the entire high hydrostatic pressure treatment [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108012.
- [24] CAI Y P, PAN X, ZHANG D H, et al. The kinetic study of 2-acetyl-1-pyrroline accumulation in the model system: an insight into enhancing rice flavor through the Maillard reaction [J]. Food Research International, 2024, 191: 114591.
- [25] WUNTHUNYARAT W, WONG E, JINN J R, et al. Effect of germination conditions and mashing temperature on the amylolytic enzyme activity and degree of starch saccharification of brown rice cultivars during syrup production [J]. Journal of Food Science, 2019, 84(10): 2785-2794.
- [26] 徐晶冰.蛋白质含量对早籼米粉流变学性质的影响及其机理初探[D].无锡:江南大学,2016.
- [27] GODERIS B, PUTSEYS J A, GOMMERS C J, et al. The structure and thermal stability of amylose-lipid complexes: a case study on amylose-glycerol monostearate [J]. Crystal Growth & Design, 2014, 14(7): 3221-3233.
- [28] WANG S J, CHAO C, CAI J J, et al. Starch-lipid and starch-lipid-protein complexes: a comprehensive review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(3): 1056-1079.
- [29] 白婷,胥博文,汪正熙,等.回锅肉不同加工阶段的风味特征分析[J].现代食品科技,2021,37(8):244-257.