

模拟口腔加工对全麦脆饼食团特性和体外淀粉消化的影响

韩冰^{1,2}, 刘艳香², 刘明², 谭斌², 刘翼翔^{1*}, 陈翠莹^{1,2}, 孟宁^{2,3}, 康子悦²

¹集美大学海洋食品与生物工程学院 福建厦门 361021

²国家粮食和物资储备局科学研究院 北京 100037

³广西大学轻工与食品学院 南宁 530004

摘要 为探究不同模拟口腔加工方式和不同 α -淀粉酶添加量对全麦脆饼食团特性和体外淀粉消化的影响,以市售即食全麦脆饼为对象,研究切块与人工唾液混合(CA)、切块+搅拌与人工唾液混合(CBA)、切块+研磨与人工唾液混合(CGA),以及人工唾液中不同 α -淀粉酶含量对全麦脆饼咀嚼后食团特性和淀粉消化的影响。对照体内口腔加工,运用主成分分析筛选适合酥脆性产品的体外模拟淀粉消化的方法。结果表明,CBA和CGA处理的食团硬度(17.44~32.99 N)、胶黏性(122.29~317.30 g·s)低于体内口腔咀嚼(HM)(38.39 N,670.23 g·s)处理,而体外模拟口腔加工后SSF组的食团粒径(105.08~273.89 μm ,290.02~801.69 μm)均高于体内口腔咀嚼(315.19 μm ,764.08 μm),随着 α -淀粉酶添加量的增加,粒径呈下降趋势。CBA、CGA和HM处理的最终淀粉水解率显著高于CA处理,其中CBA处理更贴合于HM处理。机械破坏和唾液 α -淀粉酶的含量均影响食团特性和淀粉消化动力学。此外,主成分分析表明CBA处理的SSFH组可作为模拟酥脆食品淀粉消化过程中的前处理方法。

关键词 口腔加工; 即食全麦脆饼; 食团特性; 体外消化

文章编号 1009-7848(2024)11-0209-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.11.020

全谷物食品中富含膳食纤维、B族维生素、矿物质和生物活性成分,有助于降低心脑血管疾病^[1]、代谢综合征^[2]、II型糖尿病等的发生风险^[3]。随着食品标准化程度的提高和现代生活节奏的加快,人们逐渐重视方便食品、休闲食品的“健康、营养、美味、方便”等属性^[4]。即食全麦脆饼是一种新颖的休闲食品和早餐食品。由全麦籽粒等原料经清洗、蒸煮、压片、压块和烘焙等加工流程制作而成,因具有高膳食纤维、低脂肪、低糖等特点,受到消费者的欢迎。

随着对食物-营养与健康之间关联研究的深入,食物的消化特性成为食品科学家们所重视的问题^[5]。消化是涉及口腔-胃肠道的复杂过程,其中引起不同餐后反应的食物消化过程早在看到、闻到、品尝和咀嚼食物的头部阶段就开始了^[6]。咀嚼是口腔最重要的功能。人体通过牙齿的上、下活动

磨碎食物,与唾液充分混合形成食团,随后进入咽部以便吞咽^[7]。在咀嚼过程中,食物逐渐被唾液酶降解,加速食物结构的破碎,改善食物的润滑性,便于吞咽。因此,唾液在咀嚼和吞咽过程中起至关重要的作用。

由于人类唾液的体外试验往往受到伦理及个体之间差异的限制,因此,模拟唾液逐渐成为科学家们的首选^[8]。目前,体外模型已被应用于克服受试者体内口腔参数的相关限制,例如模拟咀嚼的人工嘴^[9]。然而,这些体外程序复杂,不适合所有的常规分析,而且设备昂贵且耗时。科学家通过简化体外咀嚼的方法进行体外口腔模拟,例如切割、混合、研磨、粉碎等^[9-12]。然而,一些研究表明,体外口腔加工的不同模拟方式会对样品的体外消化率产生较大的影响,与人体真实消化情况相差较大^[12]。此外,体外口腔咀嚼模拟还受到人工唾液中酶的影响。唾液 α -淀粉酶会导致淀粉的瞬时水解,在该酶失活之前,水解反应在胃消化过程中仍持续发生^[13]。因此,体外模拟口腔加工过程中, α -淀粉酶的加入量可能影响淀粉体外消化及血糖生成指数。

本研究以市售即食全麦脆饼为模型食品,研

收稿日期: 2023-11-21

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFD2100201); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(ZX2227)

第一作者: 韩冰,男,硕士生

通信作者: 刘翼翔 E-mail: lyxjmu@jmu.edu.cn

究体外胃肠消化过程中,口腔加工方法对食团特性、淀粉消化特性和消化动力学的影响。通过比较不同体外口腔加工方法在加工方式(切块、切块和搅拌、切块和研磨)以及 α -淀粉酶添加量方面的差异,采用主成分分析筛选更贴合体内口腔加工的模拟方法,为即食全麦脆饼的改良以及类似产品的开发提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

即食全麦脆饼,市售。胃蛋白酶(P700,酶活 ≥ 250 U/mg)、淀粉葡萄糖苷酶溶液(A9913,酶活 $\geq 3\ 300$ U/mL)、转化酶(S10208,酶活 ≥ 100 U/mg)、胰酶(S10031,酶活 ≥ 100 U/mg)、葡萄糖含量检测试剂盒(AKSU001C),北京盒子生工科技有限公司;膳食纤维检测试剂盒(K-TDFR)、总淀粉试剂盒(K-TSTA),Megazyme公司;人工唾液(Simulated saliva fluid, SSF),雷根生物技术有限公司;氢氧化钾、乙酸、无水乙醇等,均为分析纯级,天津富于精细化工有限公司。

1.2 仪器与设备

UV5Bio紫外分光光度计,美国赛默飞世尔科技公司;TA.XT-Plus型质构仪,英国Stable Micro System公司;MASTER SIZER 200型激光粒度仪,英国马尔文仪器有限公司;SHZ-B型水浴恒温振荡器,上海博迅医疗生物仪器股份有限公司;搅拌机,张家港友诚新能源科技股份有限公司;PYRAMID TX型马弗炉,北京皮尔美特科技有限公司;FOSS1023型膳食纤维检测器、FOSS2050型脂肪测定仪,美国FOSS公司;RapidN型杜马斯快速定氮仪,德国Elementar公司。

1.3 方法

1.3.1 样品基本组分的测定 水分、灰分、蛋白质含量分别采用国标《食品安全国家标准 食品中水分的测定》(GB/T 5009.3-2016)、《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》(GB/T 5009.4-2016)、《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》(GB/T 5009.5-2016)中的方法进行测定。膳食纤维根据膳食纤维检测试剂盒中的方法进行测定,总淀粉含量根据总淀粉试剂盒中的方法进行测定。

1.3.2 样品体积的测定 样品的体积采用油菜籽

替代技术测量^[14]。

1.3.3 人工唾液和酶液的制备

1.3.3.1 含有不同含量 α -淀粉酶的人工唾液的制备 含低浓度(75 U/mg) α -淀粉酶的人工唾液(SSFL)的制备方法如下:取 α -淀粉酶0.75 mg,放入10 mL塑料管中,然后加入1.0 g的人工唾液,轻轻摇匀。含中等浓度(100 U/mg) α -淀粉酶的人工唾液(SSFM)的制备方法如下:取 α -淀粉酶1.0 mg,放入含有1.0 g人工唾液的10 mL塑料管中,轻轻摇匀。含高浓度(150 U/mg) α -淀粉酶的人工唾液(SSFH)的制备方法如下:取1.5 g α -淀粉酶于1.0 g的人工唾液中,在10 mL的塑料管中轻轻混匀。

1.3.3.2 胰酶上清液的制备^[15] 准确称取3.0 g胰酶,溶解于20.0 mL水中,使用磁力搅拌器分散10 min,1 500 \times g离心10 min,上清液即为胰酶上清液。

1.3.3.3 混合酶液的制备 取0.75 mL 1 200 U/mL的淀粉葡萄糖苷酶溶液和1 mL 3 000 U/mL的转化酶溶液,与15 mL的胰酶上清液混合均匀,得到混合酶溶液,试验前在37 $^{\circ}$ C水浴锅中预热。

1.3.4 体外模拟口腔加工方法

1.3.4.1 切块加工(CA) 用刀将即食全麦脆饼切成3 cm \times 3 cm(长 \times 宽)的颗粒,称取5 g即食全麦脆饼颗粒分别放入装有2.217 g的SSF、SSFL、SSFM、SSFH的烧杯中,并不断翻滚,使其于人工唾液充分混合,翻滚时间为58 s。

1.3.4.2 切块+搅拌(CBA) 取切好的即食全麦脆饼颗粒5 g,分别放入装有2.217 g SSF、SSFL、SSFM、SSFH的烧杯中浸湿,然后使用搅拌机搅拌58 s,搅拌转速为500 r/min。

1.3.4.3 切块+研磨(CGA) 取切好的即食全麦脆饼颗粒5 g,分别放入装有2.217 g SSF、SSFL、SSFM、SSFH的研钵中,用研杵在58 s内手动按压70次。

1.3.4.4 口腔咀嚼(HM) 1名健康受试者(男性,24岁,BMI=22.3)参加了这项研究。参与者具有健康的身体、良好的牙齿状况以及无唾液或咀嚼障碍。要求参与者咀嚼一块即食全麦脆饼颗粒(5 g),直到准备吞咽时吐出食团,立刻进行后续测试^[16]。

1.3.5 样品粒径的测定 取咀嚼后样品 1.5 g 放入 100 mL 烧杯中,然后加入 100 mL 蒸馏水混合,测试时,使用玻璃棒轻轻搅拌悬浮液,使样品颗粒处于相对稳定的状态,然后使用激光粒度仪测定样品的颗粒大小及分布,相对折射率为 1.70,蒸馏水的相对折射率为 1.33^[7]。

1.3.6 样品食团质构的测定 食团的质构分析是通过使用配备有 5 kg 负荷传感器的质地分析仪进行的。P/36R 探头被连接到质地分析仪上,并进行 TPA 双重压缩测试。质构分析的程序为:测试前的速度是 5 mm/s,测试速度是 1 mm/s,测试后的速度是 5 mm/s,50%的应变数据和 500 pps 的采集速率。所有的纹理分析都是每个样品重复 10 次。

1.3.7 体外淀粉消化率的测定 体外淀粉消化速率测定参考任欣等^[2]的方法。准确称取不同模拟方式咀嚼后的样品 0.4 g,将其放入 50 mL 的离心管中,同时加入 5 颗玻璃珠和 10 mL 0.5%的胃蛋白酶溶液,漩涡均匀后,将离心管横向放入 37 °C 水浴恒温振荡器中振荡,30 min 后将其取出并加入 10 mL 0.1 mmol/L 的醋酸盐缓冲溶液(pH=5.5),漩涡混匀后取 0.2 mL 消化液于 5 mL 离心管中,加入 4 mL 无水乙醇灭酶,随后在离心机中 1 500 r/min 离心 5 min,取 100 μL 上清液用于测定 0 min 时的葡萄糖释放量。

向模拟胃部消化的离心管中加入 5 mL 的混合酶溶液来启动肠模拟消化,漩涡均匀后横放在 37 °C 水浴恒温振荡器中振荡,分别用于模拟 20, 40, 60, 90, 120, 180 min 时取 0.2 mL 的消化液于 4 mL 的无水乙醇中终止反应,1 500 r/min 离心 5 min,取 100 μL 上清液用于测定模拟肠消化过程中的葡萄糖释放量。

总葡萄糖释放量(TG)的测定:将模拟肠消化 180 min 后的消化液充分漩涡均匀后,取 5 mL 的消化液于 10 mL 的离心管中,沸水浴 30 min 后,冰水浴 15 min 冷却至 0 °C,加入 2.118 mL 7 mol/L 的氢氧化钾溶液。冰水孵育 30 min 后,分别取 0.2 mL 样液,加入 1 mL 含有淀粉葡萄糖苷酶(1.21 μL 3 300 U/mL)的醋酸溶液(1 mol/L),70 °C 水浴加热 30 min 后,沸水浴孵育 10 min,冷却至室温后加入 20 mL 的去离子水,1 500 r/min 离心 5

min,取 100 μL 上清液用于测定总葡萄糖释放量。

1.3.8 葡萄糖含量的测定 葡萄糖含量的测定严格按照葡萄糖检测试剂盒中的操作说明进行。充分混匀后反应溶液在 37 °C 下显色 15 min,随后使用紫外分光光度计在波长 505 nm 处测量吸光度。分别配置质量浓度为 0.025,0.05,0.1,0.2,0.3,0.4 mg/mL 的葡萄糖标准溶液,绘制标准曲线,标准曲线的回归方程为 $Y=3.4014X-0.013(R^2=0.9994)$ 。

1.3.9 预估血糖生成指数 测定体外模拟淀粉消化过程中 20,40,60,90,120,180 min 时的葡萄糖含量,计算淀粉体外消化率的动力学和预估血糖生成指数(eGI)^[15]。通过式(1)计算体外淀粉消化动力学参数。以小麦面包为参照物,根据待测样品水解曲线下面积与参照食品水解曲线下面积的比值计算得出水解度(HI),通过式(2)计算 eGI。

$$C_t = C_\infty(1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

$$eGI = 39.71 + 0.549HI \quad (2)$$

式中: C_t 表示 t 时淀粉水解率,%; C_∞ 表示最大水解率,%; k 为动力学常数, min^{-1} ; t 为水解时间,min。

根据体外淀粉消化数据,不同淀粉组分:快速消化淀粉(RDS)、缓慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)的含量计算如下^[15]:

$$RDS(\%) = (G_{20} - FG) \times 0.9 / TS \quad (3)$$

$$SDS(\%) = (G_{180} - G_{20}) \times 0.9 / TS \quad (4)$$

$$TS(\text{mg}) = (TG - FG) \times 0.9 \quad (5)$$

$$RS(\%) = (TS - G_{180}) \times 0.9 / TS \quad (6)$$

式中: G_{20} 为体外水解 20 min 时的葡萄糖释放量,mg; G_{180} 为 180 min 时葡萄糖的释放量,mg;FG 为游离的葡萄糖质量,mg;TS 为总淀粉干质量,mg;0.9 为转化系数。

1.3.10 即食全麦脆饼主成分分析 利用 SPSS 软件对不同处理的食团特征和淀粉体外消化率进行主成分分析,得到即食全麦脆饼体外模拟评价模型,根据模型公式筛选出适合体外模拟的方法。

1.3.11 数据处理 无特别说明,所有试验重复 3 次。数据以平均值±标准差表示。采用 IBM SPSS Statistics 27 进行数据分析,用 Origin 2022 绘图。 $P < 0.05$ 表示显著差异, $P < 0.01$ 表示极显著差异。

2 结果与分析

2.1 即食全麦脆饼的基本组分

即食全麦脆饼的基本指标见表1。根据国标《预包装食品营养标签通则》(GB 28050-2011)中的要求,食品中脂肪含量 $< 3 \text{ g}/100 \text{ g}$ (固体),膳食

纤维含量 $> 6 \text{ g}/100 \text{ g}$ (固体),可以被称为低脂肪高膳食纤维的食品。如表1所示,即食全麦脆饼的脂肪含量和膳食纤维含量分别为2.1%和10.97%,符合低脂肪高膳食纤维食品的要求,同时也符合人们对于健康、营养方便食品的要求。

表1 即食全麦脆饼的基本组分

Table 1 Basic ingredients of ready-to-eat whole wheat biscuits

样品名称	水分/%	蛋白质/%	淀粉/%	脂肪/%	灰分/%	膳食纤维/%	体积/mL
即食全麦脆饼	7.14	12.31	66.31	2.10	1.60	10.97	93.85

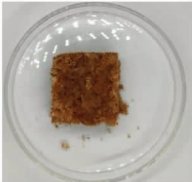
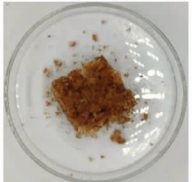
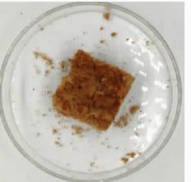
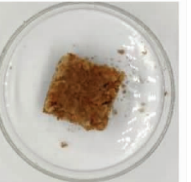
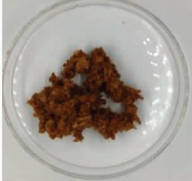
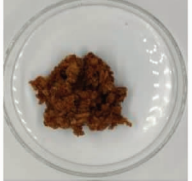
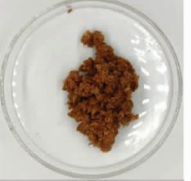
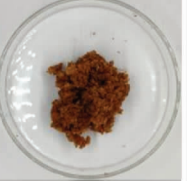

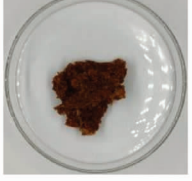

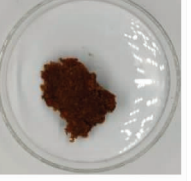

2.2 模拟口腔加工对即食全麦脆饼表观形态的影响

表2为即食全麦脆饼在不同 α -淀粉酶添加量下不同体外模拟口腔加工方式和体内口腔咀嚼得到的样品形态。据报道,简化的体外咀嚼模拟方法(切块、切块+涡旋、切块+研磨、切块+搅拌等)混合人工唾液,能够明显的改变全麦馒头、全麦面包的表观形态,并制造出在一定程度上类似于人体咀嚼食团外观的人造食团^[12,18]。如表2所示,简单

切块混合含有不同 α -淀粉酶的人工唾液处理后,样品表观形态未见明显改变。搅拌过后,样品成团状,相比于切块加工,样品的颜色加深。此外,与未加 α -淀粉酶相比,添加SSFL、SSFM、SSFH处理后,样品团更紧凑,更黏,具有类似于人体口腔咀嚼食团的外观特征。按压之后,与搅拌和切块加工相比,虽然颜色更深、结构更加紧实,但组内并未见明显差别。

表2 不同 α -淀粉酶添加量下不同体外模拟口腔加工后即食全麦脆饼表观形态

Table 2 Apparent morphology of ready-to-eat whole wheat biscuits after different *in vitro* simulated oral processing with different α -amylase addition amount

加工方式	SSF	SSFL	SSFM	SSFH
切块				
切块+搅拌				
切块+按压				
人体口腔咀嚼				

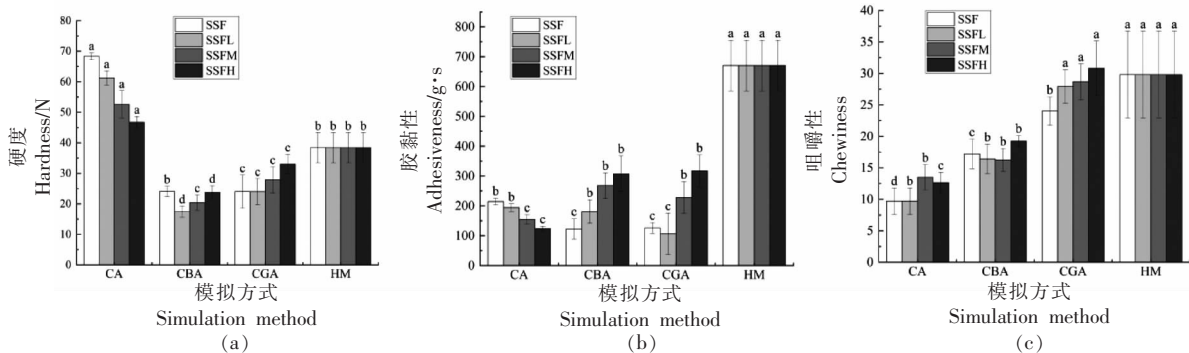
2.3 模拟口腔加工对样品食团质构特性的影响

图1表明了不同体外模拟口腔加工方式对食团硬度、胶黏性和咀嚼性的影响。表3表明了在不同 α -淀粉酶添加量下同一模拟口腔加工方式对食团硬度、胶黏性和咀嚼性的影响。

如图1a和1b所示,CBA、CGA、HM处理组的食团颗粒硬度显著低于CA处理组($P < 0.05$);其中,CA处理的食团颗粒硬度随着人工唾液中 α -淀粉酶添加量的增加而降低[由 $(68.31 \pm 1.14) \mu\text{m}$ 降至 $(46.7 \pm 1.93) \mu\text{m}$]。然而,CBA和CGA处理组中食团颗粒的硬度随着人工唾液中 α -淀粉酶的增加呈现先降低后增加的趋势。与SSF组相比,CBA和CGA处理的SSF组分别降低了27.42%,0.08%,这可能是因为搅拌和按压破坏了样品的形态和结构,减少了食团的尺寸,降低了食团的硬度^[19]。然而,SSF和SSFH的硬度逐渐增加,可能是因为 α -淀粉酶含量增大,使得淀粉快速分解导致食团黏性增加,同时由于搅拌和按压过程中力的作用,使得食团结构更加致密,硬度增大,图1b验证了这一点。由表3所知,在所有的模拟口腔的加工方法中,不同 α -淀粉酶添加量对食团咀嚼性的影响较小。其中,CA处理对食团样品的咀嚼性无显著影响。CBA处理的样品,SSFH组

相比于其它组,咀嚼性显著增加($P < 0.05$)。CGA处理的样品咀嚼性随着 α -淀粉酶添加量的增加而增加。如图1所示,CBA、CGA和HM处理组的咀嚼性高于CA处理组。其中HM组咀嚼性明显高于CBA组,与CGA组中添加 α -淀粉酶的组无显著差别。

人工唾液是导致样品食团胶黏性差异的主要原因^[20],本研究探究了不同 α -淀粉酶的添加量对食团胶黏性的影响。由表3可知,CBA和CGA食团的胶黏性随着人工唾液中 α -淀粉酶添加量的增加而增加。特别是CBA和CGA处理的SSFH组,相比于SSF组食团的胶黏性分别增加了1.51,1.52倍。然而,CA处理的样品食团的胶黏性逐渐降低,这可能是因为人工唾液与样品没有完全混合,使得大部分人工唾液与较小部分的样品混合,增大了颗粒表面的湿滑性,使得胶黏性逐渐降低^[18]。此外,HM处理的样品食团的胶黏性显著高于CA、CBA和CGA处理的样品($P < 0.05$),这可能是因为本研究使用的人工唾液缺乏黏蛋白导致的^[21]。不同体外模拟口腔加工方式及不同 α -淀粉酶添加量对食团质构特性有显著影响,其中CBA和CGA处理的食团与HM实际情况较为接近。



注:不同小写字母代表同一 α -淀粉酶含量下不同模拟口腔加工方式食团的质构特性差异显著($P < 0.05$)。

图1 不同模拟口腔加工方式对食团的硬度、胶黏性和咀嚼性的影响

Fig.1 Effects of different simulated oral processing methods on the hardness, adhesiveness and chewiness of food bolus

表3 不同 α -淀粉酶添加量对样品食团硬度、胶黏性和咀嚼性的影响

Table 3 Effects of different α -amylase addition amount on hardness, adhesiveness and chewiness of sample food bolus

模拟方式	α -淀粉酶添加情况	硬度/N	胶黏性/g·s	咀嚼性
CA	SSF	68.31 ± 1.14^a	214.53 ± 11.46^a	9.71 ± 2.09^a
	SSFL	61.24 ± 2.34^b	194.14 ± 12.45^b	9.71 ± 2.09^a
	SSFM	52.58 ± 4.51^c	154.23 ± 16.09^c	13.51 ± 2.00^a
	SSFH	46.70 ± 1.93^d	123.66 ± 7.75^d	12.65 ± 1.64^a

(续表 3)

模拟方式	α -淀粉酶添加情况	硬度/N	胶黏性/g·s	咀嚼性
CBA	SSF	24.07 ± 1.70 ^a	122.29 ± 34.36 ^c	17.20 ± 2.35 ^{ab}
	SSFL	17.44 ± 1.82 ^c	180.75 ± 39.47 ^b	16.42 ± 3.12 ^b
	SSFM	20.42 ± 2.52 ^b	267.98 ± 42.74 ^a	16.25 ± 1.83 ^b
	SSFH	23.79 ± 2.17 ^a	307.49 ± 60.03 ^a	19.25 ± 0.89 ^a
CGA	SSF	24.02 ± 5.43 ^{bc}	125.97 ± 17.78 ^c	24.01 ± 2.25 ^b
	SSFL	24.00 ± 4.28 ^{bc}	106.30 ± 79.32 ^c	27.93 ± 2.66 ^a
	SSFM	27.87 ± 4.88 ^{ab}	227.87 ± 53.45 ^b	28.69 ± 2.84 ^a
	SSFH	32.99 ± 3.25 ^a	317.30 ± 69.13 ^a	30.83 ± 4.32 ^a

注:不同小写字母代表同一模拟口腔加工方式下不同 α -淀粉酶含量食团的质构特性差异显著($P < 0.05$)。

2.4 模拟口腔加工对食团颗粒大小的影响

表 4 是不同模拟口腔加工方式下不同 α -淀粉酶添加量对食团粒径的影响。在模拟体外口腔加工时,由于搅拌、按压处理,样品与人工唾液充分混合,使得即食全麦脆饼转变为一种具有黏性的固体,并且具有类似于人体口腔咀嚼后食团的外观形态(如表 2),且黏性随着 α -淀粉酶添加量的增加而增加。由表 4 可知,随着 α -淀粉酶添加量的增加,不同模拟口腔加工下食团粒径逐渐降低。CA、CBA、CGA 处理的 $D_{[4,3]}$ 分别降低了 30.06%, 47.30%, 70.42%, D_{90} 分别降低了 12.30%, 38.36%, 64.82%。其中 CGA 处理组下降最为显著,这可能是因为 α -淀粉酶添加量的增加,促进了大

分子淀粉的降解,同时由于按压力的作用,使得食团细胞壁破裂,导致粒径明显减小^[22]。此外,CBA 和 CGA 处理的样品食团粒径明显低于 CA 处理($P < 0.05$),其中 CGA 处理的 SSFH 组样品食团粒径最小 [(105.08 ± 7.07) μm 和 (290.02 ± 18.01) μm]。CBA 处理的 SSF 组,其食团粒径的 $D_{[4,3]}$ 和 D_{90} 结果与 HM 组无显著差别,这表明 CBA 处理的食团在消化的过程中,其分解的食团颗粒的大小更接近于口腔咀嚼的真实情况。此外,HM 处理的样品粒径显著高于 CBA 和 CGA 处理的 SSFL、SSFM 和 SSFH 组,这可能是因为 HM 处理的样品食团胶黏性较大,使得食团小颗粒凝聚在一起,导致颗粒粒径变大^[16]。

表 4 不同模拟口腔加工方式下不同 α -淀粉酶添加量对食团粒径的影响

Table 4 Effects of different simulated oral processing methods and different α -amylase addition amount on the particle size of food bolus

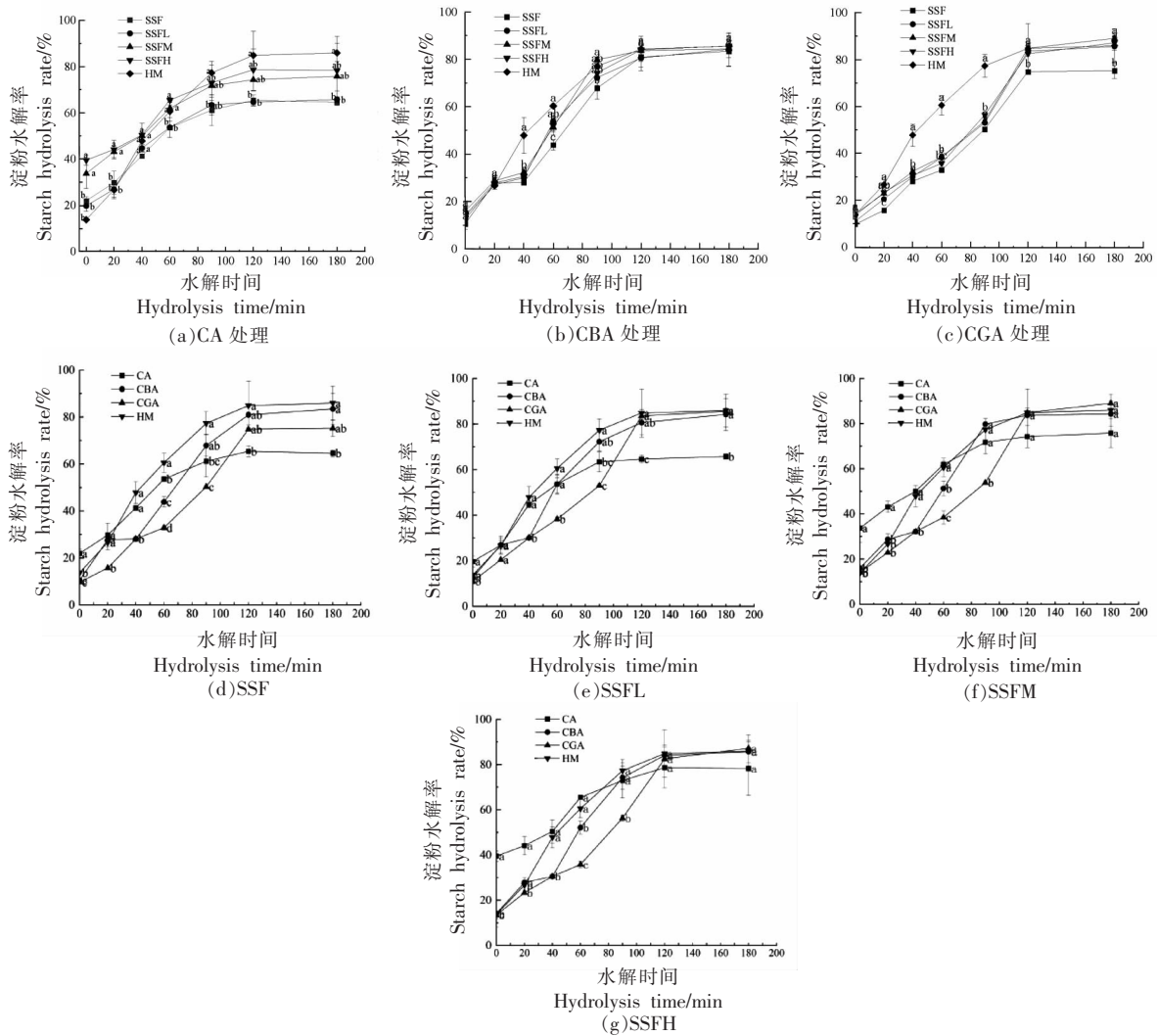
模拟方式	α -淀粉酶添加情况	$D_{[4,3]}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
CA	SSF	391.60 ± 30.01 ^a	914.15 ± 53.19 ^a
	SSFL	330.54 ± 20.25 ^{bc}	851.53 ± 11.28 ^b
	SSFM	290.97 ± 12.05 ^{cd}	810.79 ± 12.60 ^{bcd}
	SSFH	273.89 ± 21.82 ^{de}	801.69 ± 20.82 ^{bcd}
CBA	SSF	317.96 ± 34.87 ^{bcd}	767.51 ± 48.77 ^{cd}
	SSFL	230.62 ± 18.22 ^c	562.66 ± 37.12 ^e
	SSFM	175.50 ± 22.62 ^f	506.18 ± 27.82 ^{cd}
	SSFH	167.56 ± 10.35 ^f	473.10 ± 40.23 ^g
CGA	SSF	355.20 ± 55.50 ^{ab}	824.29 ± 13.58 ^{bc}
	SSFL	322.29 ± 32.11 ^{bc}	759.65 ± 58.81 ^d
	SSFM	173.43 ± 20.01 ^f	423.74 ± 29.66 ^e
	SSFH	105.08 ± 7.07 ^g	290.02 ± 18.01 ^h
HM		315.19 ± 6.73 ^{bcd}	764.08 ± 14.79 ^{cd}

注: $D_{[4,3]}$ 表示体积平均粒径; D_{90} 表示粒径低于该值的淀粉颗粒占总颗粒 90%;同列不同的字母表示同一 α -淀粉酶添加量下不同模拟口腔加工方式间的粒径具有显著性差异($P < 0.05$)。

2.5 模拟口腔加工对即食全麦脆饼体外淀粉消化率的影响

如图 2a~2c 所示, 即食全麦脆饼体外淀粉消化率在早期迅速增加, 随后缓慢增加, 在 120 min 时趋于平稳, 逐渐到达水解平衡, 这与之前的相关报道类似^[23]。同一体外口腔加工方式下, 在到达最终的水解平衡时, 淀粉消化率都高于 SSF 组, 这可能是因为人工唾液中所含有 α -淀粉酶浓度不同导致的^[13]。以往研究发现, 在口腔加工过程中, 人工唾液与食物颗粒混合时, α -淀粉酶通过断裂糖苷键将淀粉分解为一系列的低聚糖、糊精、麦芽糖和葡萄糖等^[24]。并且, 由于口腔加工时间较短, 人

们通常忽略 α -淀粉酶在食物消化阶段的作用^[25]。然而, 有学者研究发现, α -淀粉酶在短暂的口腔咀嚼之后, 仍能保持活性进行下一阶段的消化, 继续水解食物中的淀粉^[13], 甚至可以到达肠道, 这表明口腔中 α -淀粉酶的含量及活性对体外淀粉消化起重要作用^[9, 24], 本文研究结果中也证实了这一点 (图 2a~2g)。如图 2d~2g 所示, 表明了同一 α -淀粉酶添加量下不同模拟口腔加工方式对即食全麦脆饼体外淀粉消化率的影响。经过 180 min 水解后, CBA、CGA 和 HM 处理的即食全麦脆饼体外淀粉消化率显著高于 CA 处理。这可能是因为 CBA、CGA 和 HM 处理形成的食团颗粒小于 CA 处理,



注: 不同的字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。

图 2 不同口腔模拟加工方式及不同 α -淀粉酶添加量对样品体外淀粉消化的影响

Fig.2 Effect of different oral simulation processing methods and different α -amylase additions on starch digestion of samples *in vitro*

更有利于人工唾液的混合,增大了酶与食团的接触面积,促进了淀粉水解,因此食团颗粒的大小可能是影响体外淀粉水解率的另一因素^[18],这与先前的研究结果类似。例如,大米在口腔和肠道消化过程中,粒径较小的食团颗粒淀粉更容易水解^[26]。在本研究中,CBA处理的样品与人工唾液混合更加均匀,有利于 α -淀粉酶与淀粉的接触,其体外淀粉消化率趋势接近于HM处理。

如表5所示, HM处理方法中RDS质量分数(13.02%)显著高于CA和CGA处理($P < 0.05$),其中CBA处理SSF组RDS质量分数(12.67%)更接近HM处理。类似的, HM处理方法中SDS和RDS的质量分数更接近与CBA处理。这表明,相比于CA和CGA处理,CBA处理是更接近于HM处理的体外口腔模拟方法。

2.6 模拟口腔加工对即食全麦脆饼体外淀粉消化动力学的影响

不同体外模拟口腔加工方法和不同 α -淀粉酶添加量对即食全麦脆饼体外淀粉消化动力学的影响见表5。CA、CBA处理的最终水解率(C_{∞})随着 α -淀粉酶添加量的增加而增加。CA、CBA和

CGA处理SSFL、SSF和SSFH的 C_{∞} 值显著高于SSF组($P < 0.05$),这表明 α -淀粉酶显著影响淀粉的最终水解率。此外,不同体外口腔加工方法的 C_{∞} 相差较大^[27],尤其是CBA和CGA处理,显著高于CA处理,这可能是因为CBA和CGA处理使得人工唾液充分与样品混合,增大了 C_{∞} 值。经过180 min水解后,CBA和CGA处理的SSFH和SSFL组中有(85.7±3.5)%、(85.61±1.1)%的淀粉被水解,与HM处理组(85.60±1.37)%的淀粉水解率最为接近,然而由于CGA组的 R^2 小于CBA组,说明拟合效果较差,故CBA组更接近HM处理。先前的研究发现,动力学常数 k 值与样品中RS质量分数成反比,本研究中,RS的质量分数随着 k 值的降低而升高^[12,28]。此外, k 值随着 α -淀粉酶含量的增加而增加,这表明 α -淀粉酶含量的增加加快了淀粉体外消化速率^[18]。如表5所示,人体口腔咀嚼的样品,具有最高的HI(94.29)和eGI(91.48)值,其中CBA处理的SSF组HI(75.96)和eGI(81.41)值最为接近。综上,不同口腔加工方式和 α -淀粉酶含量都会影响食团的形成,影响样品的消化动力学。

表5 即食全麦脆饼体外模拟水解动力学方程的特征参数和不同淀粉组分的质量分数

Table 5 Characteristic parameters of the kinetic equation and mass fractions of different starch fractions for *in vitro* simulated hydrolysis of ready-to-eat whole wheat crispbreads

模拟方式	α -淀粉酶 添加情况	$C_{\infty}/\%$	k	R^2	HI	eGI	RDS/ $\%$	SDS/ $\%$	RS/ $\%$
CA	SSF	64.59 ± 1.03	0.029 ± 0.001	0.9798	62.44	73.99	7.83	34.83	35.41
	SSFL	65.76 ± 0.82	0.029 ± 0.001	0.9901	67.42	76.73	7.12	38.98	34.26
	SSFH	75.82 ± 4.48	0.032 ± 0.003	0.9115	54.24	69.49	9.49	32.64	24.34
	SSFH	78.27 ± 8.40	0.032 ± 0.003	0.9119	45.75	64.83	4.55	33.85	22.19
CBA	SSF	83.45 ± 4.57	0.016 ± 0.002	0.9059	66.90	76.44	17.53	55.43	16.73
	SSFL	84.22 ± 4.97	0.018 ± 0.002	0.9471	72.45	79.48	15.06	56.59	16.03
	SSFH	84.35 ± 0.71	0.019 ± 0.002	0.9238	75.96	81.41	12.67	55.80	15.65
	SSFH	85.70 ± 3.50	0.019 ± 0.002	0.9233	72.15	79.32	14.23	57.37	14.44
CGA	SSF	75.27 ± 2.39	0.012 ± 0.002	0.8864	41.90	62.71	6.03	57.05	27.12
	SSFL	85.61 ± 1.10	0.013 ± 0.002	0.8825	42.57	63.08	9.49	64.39	15.49
	SSFH	89.04 ± 0.60	0.013 ± 0.002	0.8814	33.60	58.16	8.80	65.73	11.56
	SSFH	87.20 ± 0.16	0.013 ± 0.002	0.8832	34.96	58.90	9.89	63.84	12.96
HM		85.60 ± 1.37	0.022 ± 0.001	0.9776	94.29	91.48	13.02	58.86	14.41

2.7 即食全麦脆饼主成分分析

根据张启等^[29]的方法,为了获得综合评价函

数,对体外模拟咀嚼过程(CBA)中不同 α -淀粉酶添加量情况下的硬度(X_1)、胶黏性(X_2)、咀嚼性

(X_3)、 $D_{[4,3]}(X_4)$ 、 $D_{90}(X_5)$ 和 $C_\infty(X_6)$ 等参数进行了主成分分析。如表 6 所示,提取出 2 个主成分,累计方差贡献率达到 81.84%,解释了绝大部分原始信息。由表 6 和 7 可知,第 1 个主成分方差贡献率为 47.674%,其中 C_∞ 和质构参数具有较大的载荷值;同理,第 2 主成分中粒径和硬度具有较大的载荷值,由此说明,食团颗粒的结构特征能够较大程度的反应样品的体外模拟效果。

根据各指标与因子载荷矩阵计算各主成分得分(如表 7),公式如下:

$$F_1 = 0.232X_1 + 0.219X_2 + 0.205X_3 - 0.250X_4 - 0.256X_5 + 0.279X_6$$

$$F_2 = 0.350X_1 + 0.250X_2 + 0.290X_3 + 0.325X_4 + 0.314X_5 - 0.122X_6$$

随后,以 2 个主成分及其所对应的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重,计算主成分综合模型:

$$F = 0.48F_1 + 0.34F_2$$

将原始数据进行标准化后,计算各试验组的综合评分。主成分分析预测评价结果如表 8 所示,CBA 处理组中,SSFH 组适合模拟即食全麦脆饼体外咀嚼。

表 6 即食全麦脆饼评价因子的特征值和累积方差贡献率

Table 6 Eigenvalues and cumulative variance contribution of evaluation factors of ready-to-eat whole wheat biscuits

主成分	特征值	方差贡献率/ %	累积方差贡献率/ %
1	2.860	47.674	47.674
2	2.051	34.167	81.841

表 7 主成分在各评价指标上的因子载荷图

Table 7 Factor loading diagram of principal components on each evaluation index

评价指标	主成分	
	1	2
$C_\infty(X_6)$	0.797985385	-0.249180885
$D_{90}(X_5)$	-0.731788431	0.643391484
$D_{[4,3]}(X_4)$	-0.714754754	0.666285065
胶黏性(X_2)	0.625475879	0.512765728
硬度(X_1)	0.664582562	0.717161171
咀嚼性(X_3)	0.586864104	0.593943575

表 8 主成分分析预测评价结果

Table 8 Principal component analysis prediction evaluation results

CBA	F_1	F_2	F	排名
SSF	-0.96927111	0.012648	-0.458016703	4
SSFL	-0.58358111	-0.98708538	-0.615951389	5
SSFM	-0.13086806	-1.00511704	-0.406174092	3
SSFH	0.30729733	-0.74797022	-0.109224989	2
HM	0.83165772	2.09722706	1.113952387	1

3 结论

本研究探究了 α -淀粉酶添加量、不同体外模拟加工方式对即食全麦脆饼食团特性和体外淀粉消化特性的影响。结果表明,CBA 处理后样品食团的硬度、胶黏性和咀嚼性虽然随着 α -淀粉酶增加呈现先降低后增加的趋势,但总体低于未添加 α -淀粉酶的组。CGA 处理与 CBA 类似,而其咀嚼性与 α -淀粉酶含量呈正相关关系。CA、CGA 和 CBA 处理的食团粒径随着 α -淀粉酶含量的增加而降低。其中 CGA(SSF 组)和 CBA(SSFL 组)处理与

HM 处理无显著影响。这表明不同体外模拟方式、 α -淀粉酶添加量会影响样品的食团特性。相比于 CA、CGA 处理,CBA 处理能有效地促进人工唾液与样品的混合,促进淀粉消化,最终淀粉水解率更贴适于 HM。样品淀粉的消化动力学受到口腔加工方式和 α -淀粉酶添加量的影响,并且其消化速率随着 α -淀粉酶的增加而增加。根据主成分分析发现,CBA 处理中的 SSFH 组更适合即食全麦脆饼的体外模拟口腔加工。本研究建立的体外模拟方法简单易行。该方法将被广泛应用于具有酥脆

特性的全麦食品的体外口腔咀嚼中。

参 考 文 献

- [1] BARRETT E M, BATTERHAM M J, RAY S, et al. Whole grain, bran and cereal fibre consumption and CVD: A systematic review[J]. *British Journal of Nutrition*, 2019, 121(8): 914–937.
- [2] YAO Z D, CAO Y N, PENG L X, et al. Coarse cereals and legume grains exert beneficial effects through their interaction with gut microbiota: A review[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(3): 861–877.
- [3] HU Y, DING M, SAMPSON L, et al. Intake of whole grain foods and risk of type 2 diabetes: Results from three prospective cohort studies[J]. *BMJ*, 2020, 370(8253): m2206.
- [4] 邱弋桐, 张建成. 我国方便食品行业的发展现状分析与未来对策[J]. *商场现代化*, 2021(20): 1–5.
QIU G T, ZHANG J C. Analysis of the development status quo and future countermeasures of China's convenience food industry[J]. *Shang Chang Xian Dai Hua*, 2021(20): 1–5.
- [5] LOVEGROVE A, EDWARDS C H, DE NONI I, et al. Role of polysaccharides in food, digestion, and health[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 57(2): 237–253.
- [6] SMEETS P A M, ERKNER A, DE GRAAF C. Cephalic phase responses and appetite[J]. *Nutrition Reviews*, 2010, 68(11): 643–655.
- [7] GH P A C G. Salivary functions in mastication, taste and textural perception, swallowing and initial digestion[J]. *Oral Diseases*, 2018, 24(8): 1399–1416.
- [8] SCHIPPER R G, SILLETTI E, VINGERHOEDS M H. Saliva as research material: Biochemical, physicochemical and practical aspects[J]. *Archives of Oral Biology*, 2007, 52(12): 1114–1135.
- [9] GAO J, LIN S Y, JIN X X, et al. *In vitro* digestion of bread: How is it influenced by the bolus characteristics?[J]. *Journal of Texture Studies*, 2019, 50(3): 257–268.
- [10] GOH R, GAO J, ANANINGSIH V K, et al. Green tea catechins reduced the glycaemic potential of bread: An *in vitro* digestibility study[J]. *Food Chemistry*, 2015, 180(15): 203–210.
- [11] TAMURA M, SINGH J, KAUR L, et al. Impact of structural characteristics on starch digestibility of cooked rice[J]. *Food Chemistry*, 2016, 191(2): 91–97.
- [12] 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.
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.
- [13] FREITAS D, LE FEUNTEUN S. Oro-gastro-intestinal digestion of starch in white bread, wheat-based and gluten-free pasta: Unveiling the contribution of human salivary α -amylase[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274(5): 566–573.
- [14] MAMAT H, ABU HARDAN M O, HILL S E. Physicochemical properties of commercial semi-sweet biscuit[J]. *Food Chemistry*, 2010, 121(4): 1029–1038.
- [15] REN X, CHEN J, MOLLA M M, et al. *In vitro* starch digestibility and *in vivo* glycemic response of foxtail millet and its products[J]. *Food & Function*, 2016, 7(1): 372–379.
- [16] ASIMI S, REN X, ZHANG M, et al. Effect of oral processing on texture, rheology properties, and microstructure of three rice varieties[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2022, 45(2): e13942.
- [17] 林顺顺, 赵杰, 马兵团, 等. 不同淀粉对饼干口感润滑质地的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(19): 6205–6211.
LIN S S, ZHAO J, MA B T, et al. Effects of different starches on the lubricating texture of biscuits [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(19): 6205–6211.
- [18] GAO J, TAN E Y N, LOW S H L, et al. From bolus to digesta: How structural disintegration affects starch hydrolysis during oral-gastro-intestinal digestion of bread[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 289(2): 110161.
- [19] JOURDREN S, PANOUILLE M, SAINT-EVE A, et al. Breakdown pathways during oral processing of different breads: Impact of crumb and crust structures[J]. *Food & Function*, 2016, 7(3): 1446–1457.
- [20] SARKAR A, XU F, LEE S. Human saliva and

- model saliva at bulk to adsorbed phases—similarities and differences[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, 273(11): 102034.
- [21] ÇELEBIOĞLU H Y, LEE S, CHRONAKIS I S. Interactions of salivary mucins and saliva with food proteins: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(1): 64–83.
- [22] MOSCA A C, CHEN J S. Food–saliva interactions: Mechanisms and implications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 66(8): 125–134.
- [23] 梁雅琪, 徐文静, 李晨. 苦荞面包中生物活性物质体外淀粉消化特性及感官评价[J]. *农产品加工*, 2021, 538(20): 16–19.
- LIANG Y Q, XU W J, LI C. Bioactive substances, *in vitro* starch digestibility and sensory evaluation of tartary buckwheat bread[J]. *Farm Products Processing*, 2021, 538(20): 16–19.
- [24] ZHANG Y F, CHEN Y, CHEN J S. The starch hydrolysis and aroma retention caused by salivary α -amylase during oral processing of food[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 43(1): 237–245.
- [25] BERTI C, RISO P, MONTI L D, et al. *In vitro* starch digestibility and *in vivo* glucose response of gluten-free foods and their gluten counterparts [J]. *European Journal of Nutrition*, 2004, 43(4): 198–204.
- [26] RANAWANA V, HENRY C J K, PRATT M. Degree of habitual mastication seems to contribute to interindividual variations in the glycemic response to rice but not to spaghetti [J]. *Nutrition Research*, 2010, 30(6): 382–391.
- [27] ALAM S A, PENTIKÄINEN S, NÄRVÄINEN J, et al. Effects of structural and textural properties of brittle cereal foams on mechanisms of oral breakdown and *in vitro* starch digestibility[J]. *Food Research International*, 2017, 96(6): 1–11.
- [28] 唐晓婷, 刘骞, 孔保华, 等. 压热–冷却循环工艺对淀粉理化特性及消化动力学的影响[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(4): 113–121.
- TANG X T, LIU Q, KONG B H, et al. The effect of autoclaving–cooling treatment on physicochemical properties and digestion kinetics of starch[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2016, 16(4): 113–121.
- [29] 张启, 王嵘, 梁森苗, 等. 不同杨梅种质叶片特性和果实品质综合评价[J]. *浙江农业科学*, 2023, 64(1): 174–178.
- ZHANG Q, WANG R, LIANG S M, et al. Comprehensive evaluation of leaf characteristics and fruit quality of different bayberry germplasms[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2023, 64(1): 174–178.

Effect of Simulation Oral Processing on the Bolus and Starch Digestibility of Whole Wheat Crispbread

Han Bing^{1,2}, Liu Yanxiang², Liu Ming², Tan Bin², Liu Yixiang^{1*}, Chen Cuiying^{1,2}, Meng Ning^{2,3}, Kang Ziyue²

¹College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian

²Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037

³College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004)

Abstract In order to explore the effects of different simulated oral processing methods and different α -amylase additions on the bolus characteristics and *in vitro* starch digestion, ready-to-eat whole wheat crispbreads were used as an experiment. The effects of cutting and mixed artificial saliva (CA), cutting with blending and mixed artificial saliva (CBA), cutting with grinding and mixed artificial saliva (CGA) and different α -amylase contents in artificial saliva on the bolus characteristics and *in vitro* starch digestibility of whole wheat crispbreads after chewing were studied. Using human oral chewing method (HM) as a control, principal component analysis was applied to screen for *in vitro* simulated starch digestion suitable for crisp products. The results showed that the hardness (17.44~32.99 N), adhesiveness (122.29~317.30 g·s) of the bolus of CBA and CGA treatments were lower than HM treatment. While the particle size of the bolus was higher in SSF group (105.08~273.89 μm , 290.02~801.69 μm) than human chewing (315.19 μm , 764.08 μm), but the particle size tended to decrease with the increase of α -amylase addition. The final starch hydrolysis rates of CBA, CGA

and HM treatments were significantly higher than CA treatment, with CBA treatment fitting more closely to HM treatment. Both mechanical damage and salivary α -amylase content affected bolus characteristics and the starch digestion kinetics. In addition, the SSFH group of CBA treatment was shown to be used as a pretreatment in simulating starch digestion in crisp foods based on principal component analysis.

Keywords oral processing; ready-to-eat whole wheat crispbread; bolus characteristics; *in vitro* digestion