

川味米制品的3D打印工艺及品质变化

李俊麒, 贾金萍, 张莉佳, 曾珍, 刘韞滔*

(四川农业大学食品学院, 四川雅安 625014)

摘要: 为了提升传统米制品的可打印性并丰富其品种, 该研究通过流变学分析验证了粳米、籼米面团及加入三种油 (菜籽油、红花椒油和青花椒油) 的可打印性, 并采用 FT-IR 和 TPA 分析进一步验证了 3D 打印川味米制品的可行性。该试验结果表明, 当含水量从 80% 增至 85% 时, 粳米 / 籼米面团的表观粘度显著降低, 储能模量 G' 明显下降。当剪切速率 $>1\text{ s}^{-1}$ 时, 粳米 / 籼米的表观粘度都趋于稳定。此外, FT-IR 和 TPA 结果显示, 添加 8% 菜籽油、花椒油和青椒油后, 在 $1\,700\text{ cm}^{-1}$ 处出现新的酯基特征峰, 且相比于对照组氢键结合强度提升。添加油脂的米制品较空白组硬度明显降低, 咀嚼性、弹性和胶着性均有所提升, 特别是含 8% 油脂的米制品比其他组效果更显著。试验证实 85% 含水量与 8% 含油量的协同作用可大幅提升打印精度。该研究结论为 85% 含水量, 8% 含油量的米粉面团与 3D 打印技术的结合革新了川味米制品的制作工艺与质感风味, 这不仅有望实现四川风味米制品的定制化生产, 还可为乳糜泻患者提供更优质的饮食选择。

关键词: 3D 打印; 米制品; 菜籽油; 花椒油

文章编号: 1673-9078(2026)5-234-244

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.0270

3D Printing Technology and Quality Characteristics of Sichuan-flavored Rice Products

LI Junqi, JIA Jinping, ZHANG Lijia, ZENG Zhen, LIU Yuntao*

(College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China)

Abstract: To improve the printability of traditional rice products and diversify product varieties, rheological analysis was used to evaluate the printability of japonica and indica rice doughs, as well as doughs supplemented with different oils (rapeseed oil, red pepper oil, and green pepper oil). The feasibility of producing Sichuan-flavored rice products using 3D printing was further assessed using Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) and texture profile analysis (TPA). The results show that increasing the water content from 80% to 85% significantly reduced the apparent viscosity of japonica and indica rice doughs and markedly decreased the storage modulus (G'). When the shear rate exceeded 1 s^{-1} , the apparent viscosity of both doughs tended to stabilize. FT-IR and TPA analyses demonstrated that the addition of 8% rapeseed oil, red pepper oil, or green pepper oil resulted in the appearance of a new ester characteristic peak at $1\,700\text{ cm}^{-1}$, and enhanced hydrogen-bond interactions compared with those in the control group. Rice products containing oil exhibited significantly lower hardness and improved chewiness, elasticity, and adhesiveness relative to those in the blank group, with the most pronounced effects observed at an oil addition level of 8%. The combined application of 85% water content and 8% oil content significantly improved printing accuracy. Overall, rice dough formulated with 85% water content and 8%

引文格式:

李俊麒, 贾金萍, 张莉佳, 等. 川味米制品的3D打印工艺及品质变化[J]. 现代食品科技, 2026, 42(5): 234-244.

LI Junqi, JIA Jinping, ZHANG Lijia, et al. 3D Printing technology and quality characteristics of sichuan-flavored rice products [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 234-244.

收稿日期: 2025-02-27; 修回日期: 2025-05-10; 接受日期: 2025-05-12

基金项目: 四川省自然科学基金项目 (2022NSFSC0088); 川菜发展研究中心科研项目 (CC20Z09)

作者简介: 李俊麒 (2004-), 男, 本科生, 研究方向: 食品营养, E-mail: 3119134606@qq.com

通讯作者: 刘韞滔 (1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养, E-mail: liuyt@sicau.edu.cn

oil content is well suited for 3D printing, enabling innovation in the processing, texture, and flavor of Sichuan-flavored rice products.

This approach offers potential for customized production and provides suitable dietary options for individuals with celiac disease.

Key words: 3D printing; rice products; rapeseed oil; pepper oil

稻米作为全球 50% 以上人口的主食^[1]，其营养价值主要体现在富含碳水化合物（主要为淀粉）、优质植物蛋白、必需脂肪酸以及多种功能性成分。由于大米粉易于消化且致敏性低，被认为是制造无麸质产品的最佳替代原料之一，它对患有乳糜泻（一种与小肠相关的自身免疫性肠病）疾病的消费者具有积极作用^[2,3]。目前，中国居民食品消费正由“食好”阶段向“营养”阶段晋升，米制品消费更趋于细分品类多样化、功能营养精准化和便捷化^[4]。近年来，我国米制食品产业呈现快速发展态势，市场普及率显著提升^[5]。然而，与国际先进水平相比，我国米制品加工业仍存在明显差距，主要表现为：产业集中度低，中小企业占比过高；加工技术装备整体落后；缺乏具备国际竞争力的综合性深加工龙头企业^[6]。这种“小而散”的产业格局严重制约了行业整体技术水平的提升。

3D 打印技术（增材制造技术）作为一项基于数字模型的逐层制造技术^[7]，已在食品领域展现出广阔的应用前景。当前研究主要集中在功能性食品开发（如膳食纤维强化饼干^[8]）和特殊食材加工（包括各类肉制品^[9]）等方面，但针对传统主食尤其是米制品的 3D 打印研究仍存在不足。现有研究表明，材料特性对打印精度具有决定性影响^[10]，而如何将 3D 打印技术与地域性风味结合，开发兼具营养与感官品质的主食产品，尚未得到充分探索。

乳糜泻是携带人类白细胞抗原（Human Leukocyte Antigen, HLA）——HLA-DQ2 或者 HLA-DQ8 基因的人群因摄入麸质蛋白而引发的一种自身免疫性小肠肠病。麸质是诱发乳糜泻的主要膳食抗原，广泛存在于小麦、黑麦和大麦等谷物中^[11]。大米过敏性低、营养丰富、便于吸收，是无麸质食品的良好原材料^[12]。淀粉具有独特的温度响应特性：常温下吸水膨胀但不溶解，高温则引发糊化^[13]。糊化淀粉呈现剪切稀化特性——外力作用下流动性增强，静置后恢复高粘度。这种流变特性与直链/支链淀粉的快速回生协同作用^[14]，使其成为理想的 3D 打印材料，能精准成型并保持结构稳定。花椒油通过花椒与植物油的复合加工，既保留特征风味又提升感官品质^[15]。红花椒和青花椒是四川盛产的的两种具有地方特色的花椒，它们在颜色、外观和风味上存在一定的区别，花椒油又是无麸

质食品，因此加入花椒油不会对乳糜泻患者产生影响。因此，本文通过在米粉面团中加入红花椒油和青花椒油以研制出具有川味特色的米制品，并通过比较不同种类和不同添加量的花椒油和菜籽油以及加水量对粳米和籼米产品的影响来探究最适的 3D 打印工艺。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

1.1.1 原料

粳米，采购于中国沈阳武昌彩桥米业有限公司；籼米，采购于中国沈阳武昌彩桥米业有限公司；红花椒油，采购于雅安市友嘉股份有限公司；青花椒油，采购于重庆市江津区古蜀味道有限公司；菜籽油，采购于中粮集团有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

3D 打印系统，成都绿芯科技有限公司；TA.XT Plus 物性分析仪，英国 SMS 公司；HR-1 旋转流变仪，美国 TA 仪器公司；NICOLET IS10 傅立叶红外光谱仪，美国赛默飞尼高力仪器有限公司。

1.1.3 技术路线

3D 打印川味米制品的基本实验流程如图 1 所示。将粳米和籼米分别打成粉，再分别加入不同比例的水和菜籽油、花椒油和青椒油，制成米粉面团，一部分用于流变学特性和红外光谱的测定，另一部分用于 3D 打印。首先在计算机上建模，然后将建好的模型导入打印机进行打印，将打印好的米粉面团蒸制成米制品，再进行尺寸精度、色度和质构特性的测定。

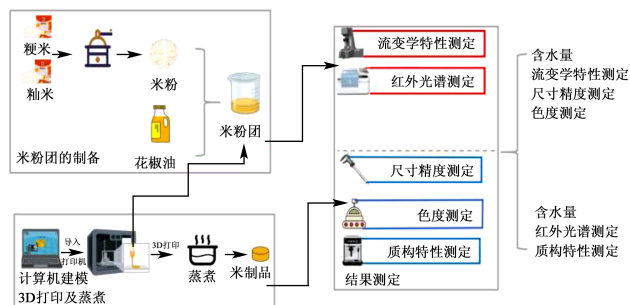


图 1 技术路线图

Fig.1 Technology roadmap

1.2 试验方法

1.2.1 米粉面团的制备

将粳米和籼米打粉,过100目筛子,米粉与花椒油或菜籽油混合,制备如下。首先,将米粉分别与水按100:80、100:85、100:90、100:95、100:100的比例加入和面机中,以 $60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率搅拌5 min形成面团,用手反复揉搓直至表面光滑、不再粘手。然后将米粉与水按100:80的比例混合,放入和面机中 $60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 搅拌1 min,分别加入以粳米粉或籼米粉质量为基础的4%、8%、12%和16%的油(红花椒油、青花椒油、菜籽油),继续以相同的速率搅拌4.5 min形成面团,然后用手反复揉搓直至表面光滑、不再粘手。将制备好的加入油的米粉面团分别命名为JRR-1至JRR-4、JRG-1至JRG-4、JRC-1至JRC-4、IRR-1至IRR-4、IRG-1至IRG-4、IRC-1至IRC-4,不加油的命名为对照组,将面团样本用自封袋密封以防止失水干裂受损。在样品制备后立即实施后续实验^[16]。

1.2.2 米粉面团表观粘度的测定

将制备好的米粉面团切成1 g左右、直径和厚度为2 cm的圆柱形,覆盖保鲜膜,置于旋转流变仪中进行流变学特性测试。黏度测试:剪切速率从 0.1 s^{-1} 至 100 s^{-1} 进行试验,得到不同剪切速率下的表观粘度(η)值^[17]。

1.2.3 打印精度的测定

产品打印后,通过数码相机拍摄3D打印产品的正面及表面的打印情况,打印产品的直径和高度采用数显游标卡尺测量,然后将打印实际尺寸与模型尺寸进行对比,根据尺寸偏差公式(1),计算产品尺寸精度。

$$A = \frac{(D_0 - D_1) \times V}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

A ——为尺寸偏差, %;

D_0 ——为实际测量尺寸, mm;

D_1 ——为理论尺寸, mm。

1.2.4 打印面团色度的测定

将冷冻干燥后的面团样品配制成 $50\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的质量浓度,采用高质量比色仪测定三种进样的颜色参数。记录 L^* (亮度)、 a^* (红绿值)、 b^* (黄蓝值),对每个样本进行六次测量以确保数据的准确性。

1.2.5 傅里叶红外光谱(FT-IR)测定

将不同米制品样品与溴化钾按照1:100(m/m)的比例混合研磨并压成小片,用傅里叶红外光谱进行扫描。扫描范围为 $4\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$,分辨率为 4 cm^{-1} ,累计扫描次数为32 Scans^[18]。

1.2.6 米制品品质构特性的测定

在室温下,使用探针P/0.5的TA-XT纹理设备对打印产品进行两个压缩循环的TPA分析。参数设置如下:触发力5 N,应变30%;2次按压间隔时间为10 s;测前、测试中和测后速度分别为5、2和 $2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从整个软件中记录硬度、胶着性、弹性和咀嚼性,一式三份^[19]。

1.2.7 打印及蒸制方法

具体打印方法:在打印前利用CAD建立模型,将模型导入系统,切片软件读取模型横截面信息,物料填入注射器。打印过程中,在室温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右)、空气相对湿度为40%左右下将物料按横截面形状以线条挤出,层层堆积形成产品^[20]。蒸制方法:将打印好的米粉面团放在蒸屉上,用保鲜膜覆盖防止水蒸气渗入,然后在2 000 W的功率下蒸制20 min。取出蒸制好的米粉面团用自封袋密封以防止失水干裂受损,自然晾干,放至室温后进行后续测定。

1.3 统计分析方法

结果以平均值 $\pm$ 标准偏差(SD)表示。利用SPSS 26.0进行数据处理,当 $P<0.05$ 表示具有显著性差异,并采用Origin 2021软件,Graph Pad软件和<https://hiplot.com.cn>作图。

2 结果与分析

2.1 米粉面团的流变学结果

流变学特性(材料在受力时的变形和流动的性质)是淀粉类食品的一个重要特性,对物料的进一步加工有很大影响。适用于挤压成型3D打印的材料需要具有剪切稀化特性(流体的黏度随着剪切速率的增加而减小的现象),使其易于从喷嘴中挤出,并具有足够的强度以保持沉积后图案的形状^[21]。在图2中,不同面团的表观粘度随剪切速率而变化,所有面团的表观粘度都随剪切速率的增大而减小,呈现剪切稀化特征,表明面团是假塑性流体(即非牛顿流体,黏度会随着剪切速率的增加而减小,也就是剪切稀化现象)^[22]。当剪切速率大于 1 s^{-1} 时,粳米和籼米的表观粘度都趋于稳定,但在剪切速率小于 1 s^{-1} 时,相比于粳米,籼米的黏度值减小的更快,这可能是由于籼米比粳米含有更多的直链淀粉。此外,当含水量为85%时,粳米和籼米面团所表现出的表观粘度和剪切稀化特征最佳。

在流变学中,储能模量(G')(粘弹性材料在交变应力作用下,一个周期内储存能量的能力)和损耗模

量 (G'') (材料在变形过程中, 能量损耗的度量) 分别与 3D 打印油墨的固体和液体行为相关, 而损耗正切 ($\tan\delta=G''/G'$) 小于 1 表明材料的行为更像固体^[23]。如图 2 所示, 粳米和籼米在线性黏弹性区域, 所有样品的储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 值均

随着频率的增加而增加, 且 G' 高于 G'' , 表明样品以弹性为主, 反映出材料的机械强度和自支撑性能。此外, 所有样品的 $\tan\delta$ 均小于 1, 说明面团的弹性大于粘性, 更固体, 显示出粳米和籼米面团在 3D 打印中的潜力。

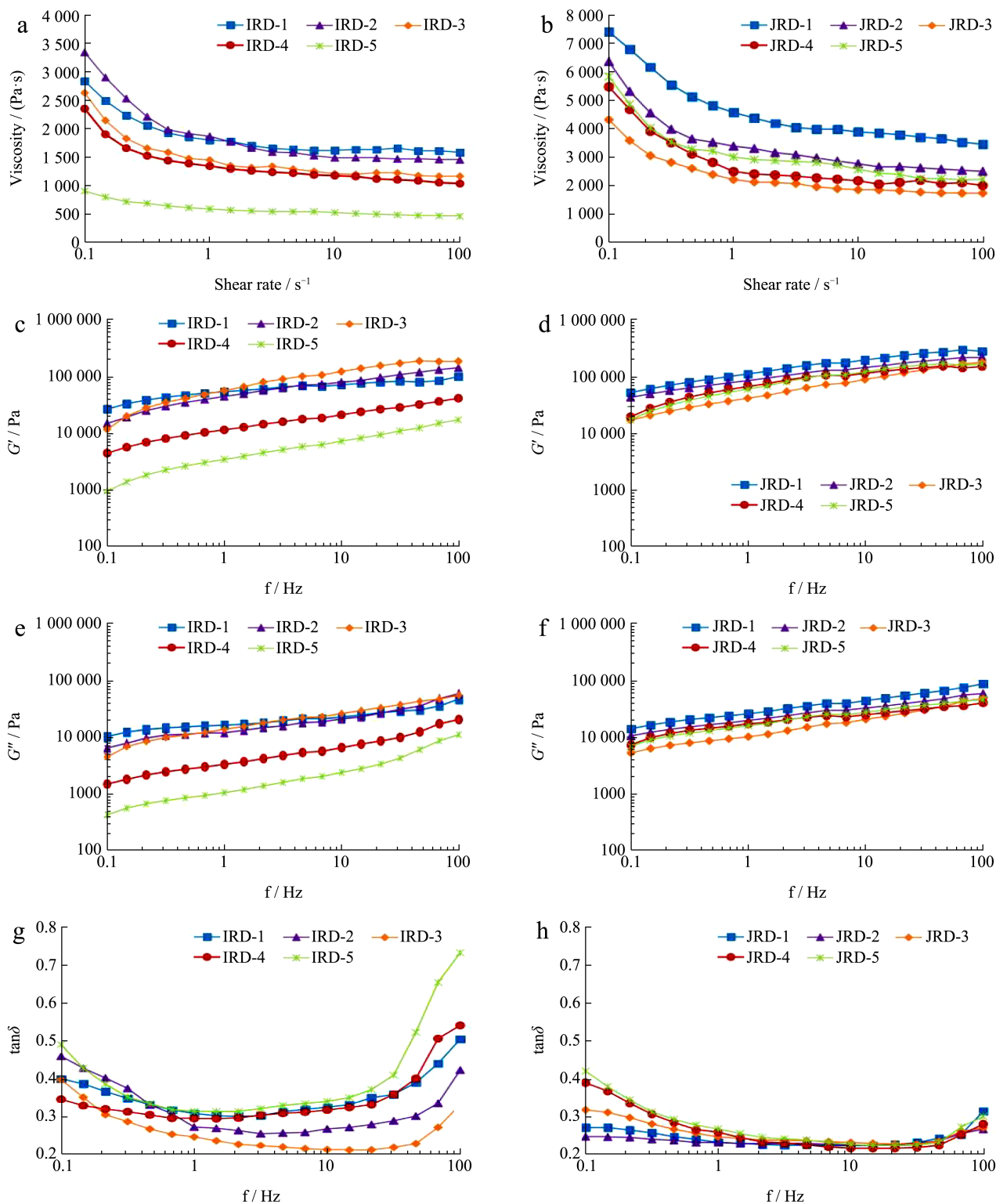


图 2 籼米 (左) 和粳米 (右) 米粉面团的流变学结果

Fig.2 Rheological results of indica rice dough (left) and glutinous rice dough (right)

注: IRD-1~IRD-5 分别对应 80%、85%、90%、95% 和 100% 含水量。

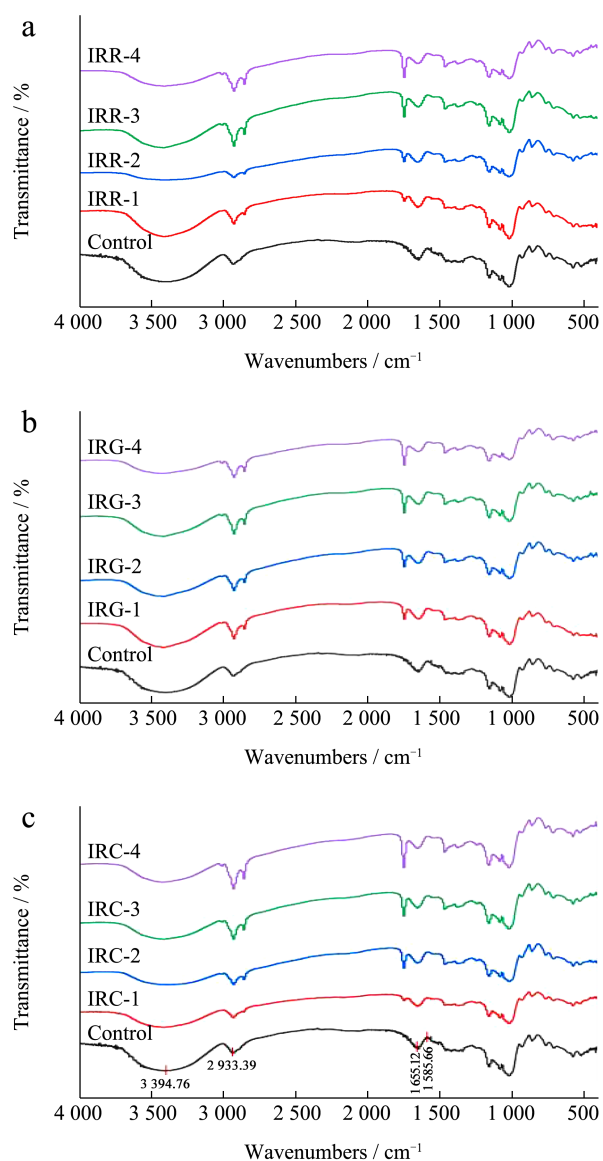


图3 不同籼米粉面团的FT-IR光谱图

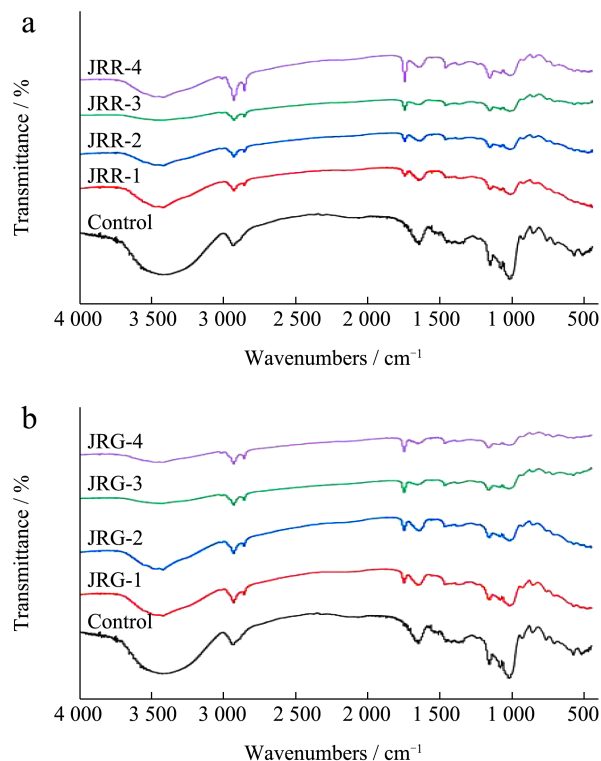
Fig.3 FT-IR spectra of different indica rice flour doughs

注: (a) 红花椒油米制品; (b) 青花椒油米制品; (c) 菜籽油米制品。

2.2 米粉面团的FT-IR结果

如图3所示, 籼米粉面团的FT-IR光谱形状相似, 但强度不一致, 说明油对面团有一定的影响。从图中可以看出, 相比于对照组, 添加了红花椒油、青花椒油和菜籽油的籼米粉面团的光谱在 $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ 附近的强度更小频带更宽一点, 并且在 $3\ 000$ 、 $2\ 900\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰强度较对照组增强, 在 $1\ 640\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰强度较对照组减弱。这可能是由于O-H拉伸所致。另外,

据报道, 淀粉和酚类化合物之间分子间氢键的形成可能导致O-H共价键的电子倾向于氧原子, 这是由于氧原子的高电负性。同时, 这种感应相互作用也可能降低氢原子周围的电子云密度, 导致O-H拉伸带的展宽和能带波数的红移^[24]。在 $2\ 900\text{ cm}^{-1}$ 附近的条带代表了碳氢键($-\text{CH}_2$)的对称伸缩振动, 因此, 观察到最多的是油的作用, 而不是淀粉-油的相互作用。 $1\ 640\text{ cm}^{-1}$ 处的条带归因于醛的C=O拉伸, 这可能与脂类与其他组分(即蛋白质或碳水化合物)相互作用时的羰基振动有关^[25-27]。值得注意的是, $1\ 640\sim 1\ 660\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰代表了体系中氢键的强度。加入花椒油、青椒油和菜籽油后, 峰值位置向短波长偏移, 表明这三种油可以增强米粉体系的氢键强度。同时, 注意到在 $1\ 700\text{ cm}^{-1}$ 附近逐渐出现了一个新的峰, 这可能是油中的芳香物质, 其条带与醛类的C=O拉伸有关, 可能反映了脂类与蛋白质或碳水化合物相互作用的酯类碳基振动。Lei等^[28]在橄榄油和多孔淀粉微胶囊的生产中也报道了类似的发现, 其中甘油三酯酯碳基在 $1\ 743\text{ cm}^{-1}$ 左右产生了一个强峰值。菜籽油和花椒油以及青椒油的红外光谱无明显差异。粳米粉面团的红外光谱形状与籼米粉的类似(图4)。总的来说, 这三种油都可以强化米粉面团中的一些基团, 为3D打印的顺利进行提供了保障。



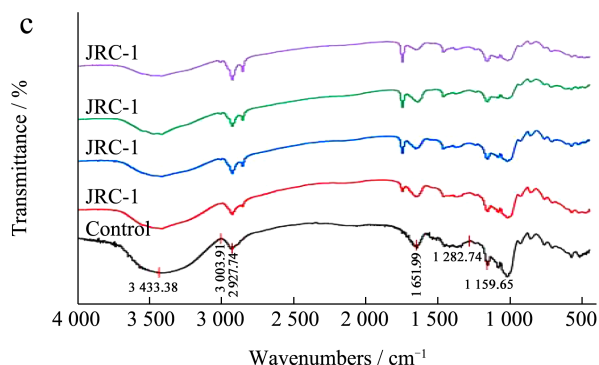


图4 不同粳米粉面团的 FT-IR 光谱图

Fig.4 FT-IR spectra of different glutinous rice flour doughs

注: (b) 红花椒油米制品; (b) 青花椒油米制品; (c) 菜籽油米制品。IRR-1~IRR-4、IRG-1~IRG-4 和 IRC-1~IRC-4 分别对应 4%、8%、12% 和 16% 的含油量。后文同。

2.3 米粉面团的3D打印性能

2.3.1 米粉面团及蒸后的高度测定结果

面团蒸后会呈现不同程度的坍塌, 为了进一步说明打印产品的精确程度, 测量了打印样品的高度, 粳米和籼米及其蒸后的高度测定结果如图5所示。从图中可以看出, 不同含水量的粳米和籼米面团蒸后在高度存在显著性的差异 ($P < 0.05$)。含水量为 85% 的粳米和籼米面团具有适宜的粘度和弹性模量, 具有较好的机械强度 and 自我支撑的能力, 不易坍塌, 成型能力强, 形状精度高, 高度偏差显著小于其他样品。因此, 物料具有适宜的粘弹性、粘度对于打印的样品是至关重要的。

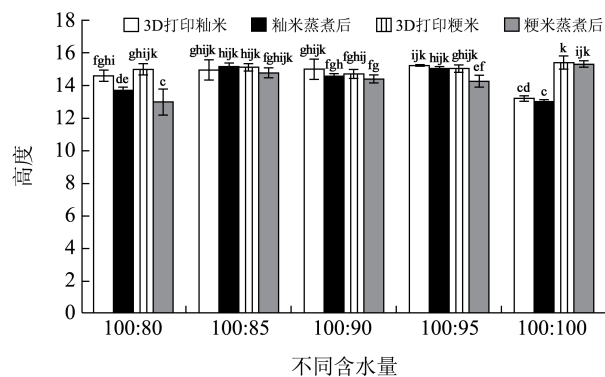


图5 打印面团及蒸后的高度测定结果

Fig.5 Measurement results of dough and height after steaming

注: 图中不同小写字母代表各组间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.3.2 米粉面团打印精度的结果

为了与传统的米制品紧密结合, 选择了一个圆柱形作为 3D 打印的目标, 试验所用的 3D 模型为直径 30 mm, 高度 30 mm, 内部填充 80% 的实心圆柱体。

结果显示米粉面团表现出优异的打印性能, 在特定条件下均匀地挤出线条, 形成预先设定的打印形状。打印产品与模型组的尺寸偏差以及代表性打印产品的图片如图6所示。

由图6可知, 当油的添加为 4% 时, 打印时挤出的线条容易断裂, 并表现出填充不满意的现象, 这可归因于样品具有较高的表观粘度, 导致线条无法连续挤出。当油的添加量为 8% 时, 面团能够很好的挤出, 并且打印成型, 样品表面光滑, 线条挤出流畅, 内部的支撑性良好, 层与层之间堆叠紧密。当油的添加量为 12% 和 16% 时, 产品呈现膨胀状态, 结构坍塌, 打印精度都有所降低, 产品边缘打印线条不整齐, 并且可以明显看到油的渗出, 这不利于打印产品的感官评价, 这可能是由于油的添加可以降低籼米粉面团的表观粘度, 过量的油会使面团的粘度过低导致打印产品体系崩溃。粳米粉面团和籼米粉面团表现出相似的现象, 但粳米粉面团比籼米粉面团表现出更高的表观粘度, 这可以归因于粳米粉比籼米粉具有更高含量的支链淀粉, 因此具有更高表观粘度的特性。由于打印时墨线较细, 同一模型下 3D 打印产品内部间隙较大。综上, 含油量为 8% 是籼米粉和粳米粉面团作为 3D 打印的理想物料选择。

2.3.3 米粉面团的蒸后保真度结果

目前大多数 3D 食品打印技术并不能仅通过单一的加工步骤就将原材料直接转化为最终的食品。因此, 3D 打印必须易于与传统的食品生产流程兼容, 如烘焙、烹饪、蒸等, 这对 3D 打印技术的广泛应用至关重要, 但也是一个挑战^[29]。米粉面团的蒸后保真度结果如图7所示, 从表中可以看出, 由于支链淀粉含量高且缺乏谷蛋白, 米粉面团本质上缺乏形成致密、挡风结构的能力。在蒸过程中, 面团都经历淀粉糊化, 导致最终产品收缩, 顶部小, 底部大。所有的打印样品均表现出不同程度的塌陷, 主要表现为直径的增加和高度的降低, 但含油量为 16% 的打印样品塌陷的程度最大, 这可能是由于过量的油降低了面团的黏度和内聚力, 使之缺乏足够的储能模量 G' , 而米制品吸水后获得较大的质量, 需要更强的储能模量来支撑结构的稳定性^[30]。含量油为 4% 的样品具有足够的储能模量, 蒸后基本未发生坍塌。造成这一现象的原因可能是由于油的加入改变了米粉面团的微观结构, 降低了面团中的支链淀粉和直链淀粉的分子量, 使得其结构更为松散, 因此不同添加量的油的打印米粉面团蒸后表现出了不同程度的坍塌^[31]。粳米粉和籼米粉表现出相似的蒸后保真结果。

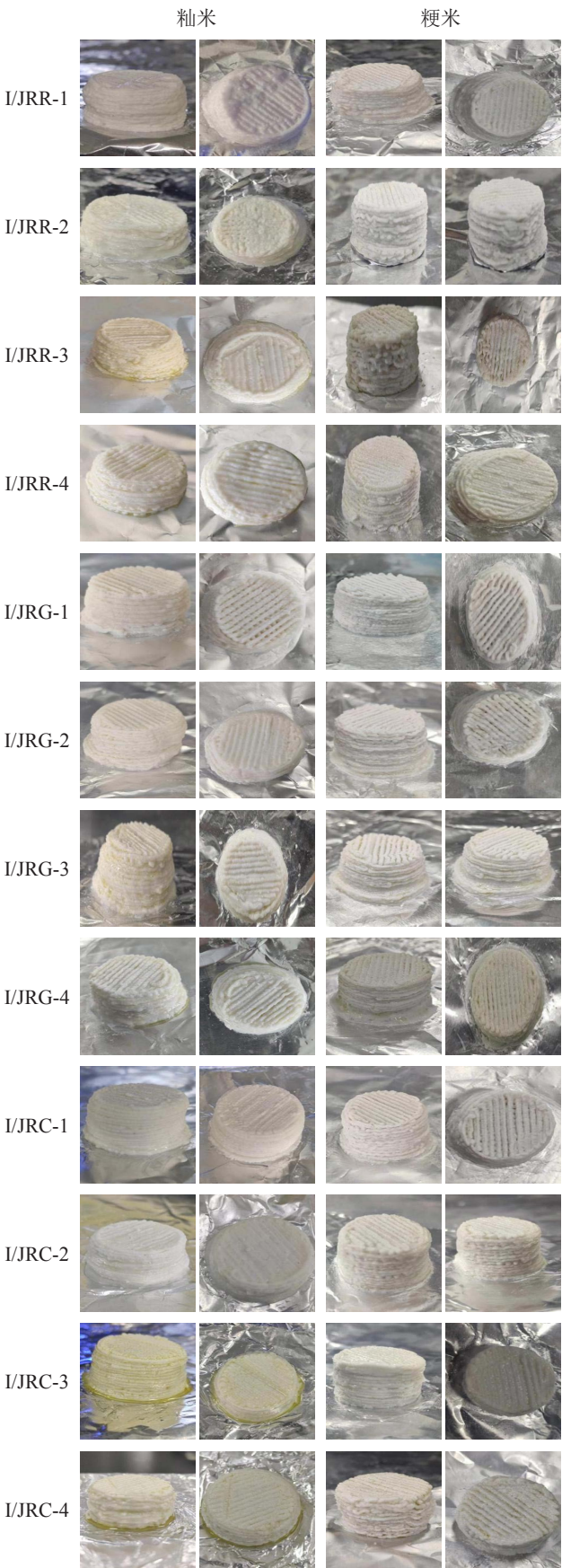


图 6 籼米和粳米粉的 3D 打印结果
Fig.6 3D printing results of indica rice and
glutinous rice powder

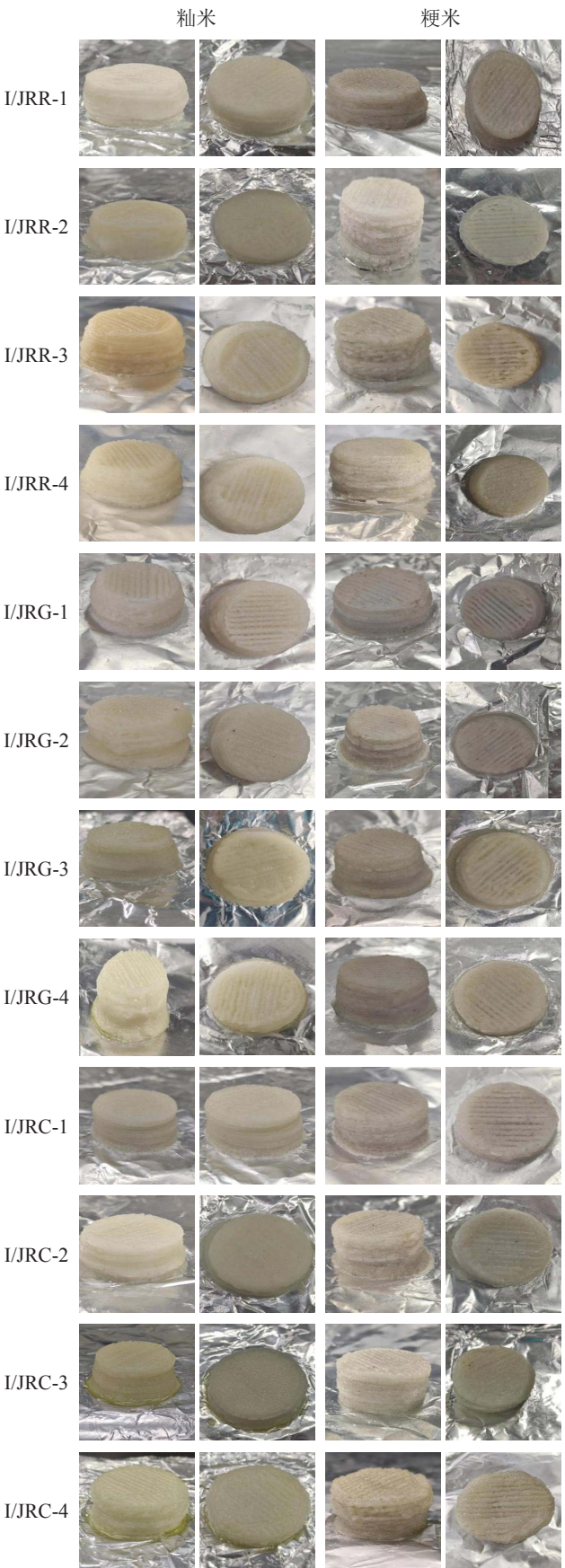


图 7 籼米和粳米粉的蒸后保真度结果
Fig.7 Results of fidelity of indica rice and
glutinous rice flour after steaming

2.4 打印米制品色度的测定结果

在食品工业中,颜色直接影响着消费者对食品的可接受程度。粳米和籼米在添加了不同比例的含水量打印蒸后的颜色变化如图8所示。 L^* 代表亮度, L^* 越大越亮, a^* 代表红绿值, b^* 代表黄蓝值。从图中可以看出,添加不同含水量的粳米和籼米打印后颜色有着明显的不同,其中90%和95%含水量的粳米和籼米的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值都是最低的,而80%含水量的粳米和籼米的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值相对来说都是最高的,这可能是由于水分子的扩散速度会影响物质的转移,并影响颜色,高含量的水分子扩散速度会加快。米粉面团的颜色也受到蒸煮温度的影响,亮度随着蒸煮温度的升高而降低。

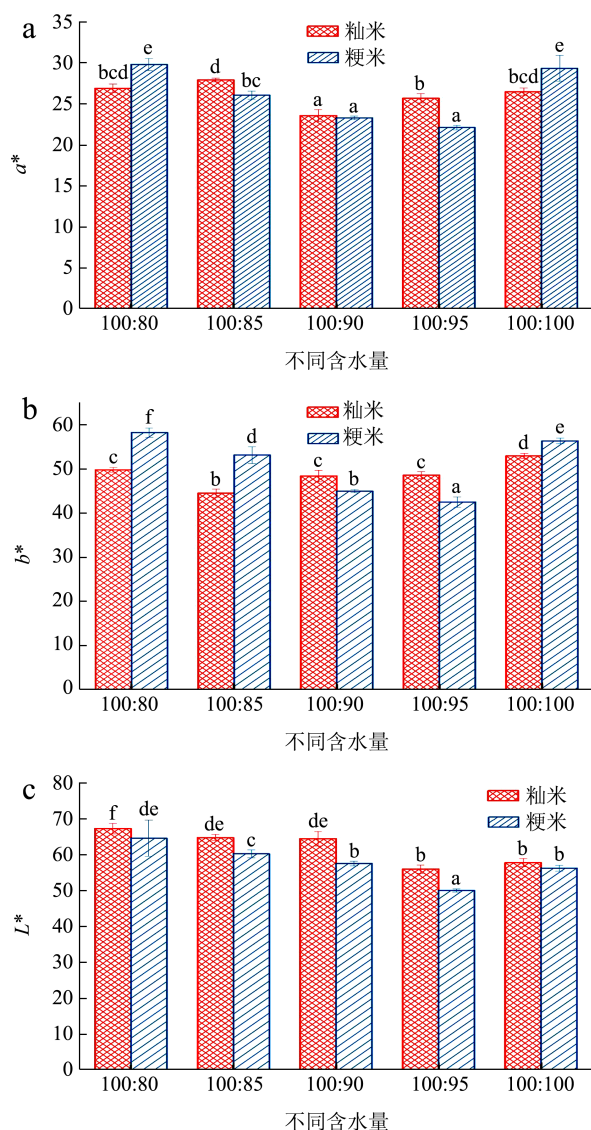


图8 不同含水量和种类打印米制品的色度变化

Fig.8 Color change of printed rice products with different water content and species

注:图中不同小写字母代表各组间具有显著性差异($P<0.05$)。

2.5 打印米制品的TPA质构结果

油脂是提高米制品嫩度、口感、外观的重要组成部分。对于优质的川味米制品,实现硬度、弹性、柔软性和咀嚼性几者的平衡是至关重要的。该研究将三种不同的油脂添加到米制品中,对其咀嚼性、黏性、硬度、弹性等品质进行TPA测定,以探究川味米制品的最佳油量。由表1和表2可知,添加不同种类不同含量的油对蒸煮后打印产品的质构特性有不同程度的影响,而添加相同的油浓度之后各组间的打印纹理性能没有显著差异。蒸煮后籼米打印面团的质构特性如表1所示,从图中可以看出与对照组相比,添加了油的米制品在硬度、咀嚼性、黏性和弹性方面都更小。随着含油量的增加,籼米的黏性逐渐减小,但各组之间的弹性差异很小。当油浓度达到12%的时候,咀嚼性显著下降,这表明油含量在8%左右打印面团具有理想的咀嚼性。蒸煮后粳米打印面团的质构特性如表2所示,从表中可以看出不同种类油的添加量对粳米面团的硬度、黏性、弹性和咀嚼性没有限制性的影响,其中JRG粳米面团的质构特性影响最小。从表1和表2都可以看出,在硬度方面,I/JRG组(青花椒油)一般比其他组有更高的值,8%的油与I/JRR(红花椒油)组有显著性差异($P<0.05$)。考虑到过高的硬度会对产品的口感和整体吸引力产生负面影响,I/JRG组虽然其硬度较高,但并没有被选为最佳配方。此外,两组之间的弹性差异很小,这表明弹性并不是决定最佳配方的关键因素。综上所述,含油量为8%的红花椒油的籼米打印面团在硬度、咀嚼性等质构特性上表现最优,且该组黏性与弹性的平衡性较好。

2.6 讨论

该研究通过将菜籽油、花椒油和青椒油引入籼米/粳米面团体系,成功研制出兼具风味与形态的新型3D打印米制品。研究结果表明,85%含水量和8%含油量的配方在打印精度和产品品质方面表现最优,为米制品的创新发展提供了新思路。

所有测试面团均表现出典型的剪切稀化行为,这一流变特性是保证3D打印顺利进行的关键。值得注意的是,当含水量从80%增至85%时,面团的表现粘度和储能模量 G' 显著降低($P<0.05$),超过85%后趋于稳定。这种变化规律与淀粉-水相互作用机制密切相关:适量水分可促进淀粉颗粒充分溶胀,形成均匀连续相;而过高含水量会导致体系粘弹性下降,影响打印成型。FT-IR分析显示,添加8%油脂后在 1700 cm^{-1} 处出现明显的酯羰基特征峰,表明油脂与米粉组分发生了相互作用。结合TPA结果,这种

相互作用可能是导致产品硬度降低（较空白组降低约30%）、咀嚼性和弹性提升的关键因素。不同油脂的作用效果差异可能源于其脂肪酸组成：菜籽油富含单不饱和脂肪酸（油酸约60%），可增强体系塑性；花椒油和青椒油中的特征风味物质（如花椒麻素、辣椒素）可能通过疏水作用影响蛋白质构象。这些发现与盖争艳等^[32]关于棕榈油改良面制品的研究结果相呼应，但

本研究在此基础上，揭示了米制品体系中风味油脂的特殊作用机制。通过系统研究打印参数发现：剪切速率 $>1\text{ s}^{-1}$ 时体系粘度趋于稳定，这为打印头设计提供了重要参数；8%油添加量在保证打印精度的同时，使产品与设计模型的相似度达到 $92\%\pm 3\%$ ；油脂的润滑作用显著改善了面团的挤出特性，同时通过调控气泡结构影响最终产品的质构。

表 1 籼米面团的TPA质构结果
Table 1 TPA texture results of indica rice dough

样品名称	硬度	弹性	咀嚼性	胶着性
Control	6 706.66 ± 719.29 ^a	0.92 ± 0.02 ^b	4 545.98 ± 290.14 ^a	4 936.63 ± 381.51 ^a
IRC-1	3 863.36 ± 233.63 ^c	0.94 ± 0.02 ^a ^b	2 570.20 ± 286.25 ^d	2 731.82 ± 267.66 ^d
IRC-2	4 744.84 ± 607.21 ^b	0.96 ± 0.04 ^a ^b	3 578.19 ± 579.54 ^b	3 744.71 ± 658.73 ^b
IRC-3	4 640.84 ± 361.79 ^{bc}	0.98 ± 0.01 ^a	3 473.85 ± 205.91 ^{bc}	3 547.18 ± 196.43 ^{bc}
IRC-4	3 921.80 ± 270.08 ^{bc}	0.97 ± 0.03 ^{ab}	2 907.96 ± 211.85 ^{cd}	3 000.27 ± 157.95 ^{cd}
IRR-1	5 163.34 ± 234.71 ^b	0.92 ± 0.00 ^a	3 676.18 ± 145.91 ^c	4 030.12 ± 163.65 ^b
IRR-2	5 391.81 ± 127.21 ^b	0.97 ± 0.01 ^a	4 041.19 ± 127.10 ^b	4 146.91 ± 151.16 ^b
IRR-3	3 688.74 ± 245.92 ^c	0.93 ± 0.03 ^a	2 800.62 ± 257.84 ^d	3 015.35 ± 232.75 ^c
IRR-4	4 195.52 ± 314.01 ^c	1.14 ± 0.34 ^a	2 996.12 ± 159.66 ^d	3 223.50 ± 166.00 ^c
IRG-1	5 219.49 ± 310.27 ^b	0.96 ± 0.03 ^a	3 769.67 ± 230.23 ^b	3 914.54 ± 228.71 ^b
IRG-2	4 775.87 ± 521.38 ^{bc}	0.98 ± 0.01 ^a	3 508.77 ± 282.10 ^b	3 588.47 ± 303.25 ^b
IRG-3	3 679.90 ± 339.00 ^d	0.97 ± 0.01 ^a	2 734.98 ± 163.70 ^c	2 829.72 ± 170.00 ^c
IRG-4	3 901.62 ± 658.13 ^{cd}	0.96 ± 0.02 ^a	2 861.90 ± 383.19 ^c	2 967.72 ± 351.75 ^c

注：表中各列右肩不同小写字母表示样品间差异。下表同。

表 2 粳米面团的TPA质构结果
Table 2 TPA texture results of glutinous rice dough

样品名称	硬度	弹性	咀嚼性	胶着性
Control	5 793.10 ± 117.39 ^a	0.98 ± 0.05 ^a	4 234.44 ± 141.04 ^a	4 487.33 ± 160.33 ^a
JRC-1	3 936.72 ± 118.41 ^c	1.13 ± 0.33 ^a	2 715.98 ± 651.14 ^b	3 198.19 ± 684.83 ^b
JRC-2	4 448.47 ± 466.59 ^{bc}	0.97 ± 0.02 ^a	3 379.84 ± 317.93 ^{ab}	3 495.39 ± 333.12 ^b
JRC-3	5 151.37 ± 399.95 ^{ab}	1.11 ± 0.21 ^a	3 229.20 ± 808.20 ^{ab}	3 804.71 ± 154.44 ^a
JRC-4	4 814.97 ± 164.13 ^a ^{bc}	1.01 ± 0.21 ^a	3 783.35 ± 747.03 ^{ab}	3 741.74 ± 195.37 ^b
JRR-1	4 655.09 ± 590.35 ^b	0.99 ± 0.05 ^a	3 626.84 ± 387.56 ^b	3 773.05 ± 304.04 ^b
JRR-2	3 675.22 ± 219.28 ^{cd}	0.98 ± 0.04 ^a	2 938.97 ± 227.92 ^c	3 012.64 ± 127.02 ^c
JRR-3	3 009.36 ± 572.46 ^d	0.93 ± 0.03 ^a	2 394.60 ± 437.44 ^d	2 564.10 ± 434.71 ^d
JRR-4	3 908.23 ± 131.24 ^c	0.96 ± 0.00 ^a	2 898.88 ± 119.32 ^{cd}	3 017.06 ± 118.86 ^c
JRG-1	5 183.90 ± 479.22 ^{ab}	0.98 ± 0.01 ^a	4 020.34 ± 423.85 ^{ab}	4 051.50 ± 403.06 ^{ab}
JRG-2	5 217.92 ± 547.12 ^{ab}	0.99 ± 0.07 ^{ab}	3 671.97 ± 140.77 ^{bc}	3 855.89 ± 152.75 ^b
JRG-3	4 839.43 ± 268.49 ^b	0.95 ± 0.04 ^{ab}	3 466.53 ± 67.21 ^c	3 628.33 ± 97.64 ^{bc}
JRG-4	4 470.86 ± 450.23 ^b	0.96 ± 0.02 ^b	2 961.57 ± 261.56 ^d	3 277.57 ± 337.96 ^c

本研究通过多尺度表征揭示了油脂-米粉相互作用机制,建立的“组成-流变-打印-品质”关联模型不仅为川味米制品创新提供了理论依据,也为特殊膳食(如乳糜泻患者食品)开发开辟了新途径。后续研究仍需关注以下问题:(1)营养平衡性:3D打印过程中的高温剪切可能导致热敏性营养素损失,未来需开发低温打印工艺;(2)风味稳定性:花椒油中挥发性成分在打印和蒸制过程中的迁移规律有待深入研究;(3)原料适配性:针对不同品种大米(如糯米、黑米)的打印参数体系需要建立;(4)工业化转化:当前打印效率(约 $20\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$)距工业化要求仍有差距。推动3D打印米制品从实验室走向产业化。

3 结论

该研究通过将3D打印技术与花椒油风味改良相结合,革新了川味米制品的制作工艺。研究采用流变学分析法验证了粳米和籼米面团适合3D打印过程,并通过FT-IR等方法证实了3D打印川味米制品的可行性,同时结合TPA分析研制出一款兼具优良外形与品质的川味米制品。结果表明:不同含水量的米粉面团均表现出表观粘度下降和剪切稀化特性,其中85%含水量的面团具有最佳的剪切稀化能力,且能适度降低油墨的储能模量 G' ;当油添加量为8%时,打印成品的外形与设计相似度最高。蒸制后的粳米和籼米面团在高度上存在显著差异($P<0.05$),其中85%含水量的面团展现出最适宜的粘度和弹性模量。此外,不同含水量的面团打印后在颜色特征上呈现明显差异,85%含水量的粳米和籼米具有最高的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值。FT-IR分析显示,添加的三种油(菜籽油、花椒油和青椒油)不仅能增强体系中的氢键强度,其芳香类物质还使油墨出现新的特征峰。TPA测试进一步表明,采用含水量85%、含油量8%的配方制作的米制品在咀嚼性、胶着性、硬度和弹性等品质指标上表现最优。本文研究成果不仅为四川风味米制品的定制化生产和乳糜泻患者膳食优化提供了新思路,未来还将通过动态流变学分析油相迁移行为以提升油墨稳定性,并结合感官评价建立质构-接受度关联模型,进一步推动产品工业化应用。

参考文献

- [1] MENG F H, WEI Y Z, YANG X E. Iron content and bioavailability in rice [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2005, 18(4): 333-338.
- [2] ILOWEFAH M, CHINMA C, BAKAR J, et al. Fermented brown rice flour as functional food ingredient [J]. *Foods*, 2014, 3(1): 149-159.
- [3] SINGH P, ARORA A, STRAND T A, et al. Global prevalence of celiac disease: systematic review and meta-analysis [J]. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, 2018, 16(6): 823-836. e2.
- [4] 丁俭,李玉鹏,钱明继,等.营养米制品加工新技术研究进展及产业现状[J].*食品与机械*,2024,40(12):225-231.
- [5] 傅亚平.我国米制食品发展现状及思路[J].*农业与技术*,2023, 43(20):33-36.
- [6] 袁美兰,赵利,苏伟,等.国外米制品的发展及我国的差距[J].*粮油加工*,2010,11:49-52.
- [7] 丁可盈,金晶,任玉,等.3D打印技术在食品中的研究进展[J].*南京农业大学学报*,2025,48(1):70-84.
- [8] 易生奎.超声-高速剪切改性大豆渣不溶性膳食纤维用于3D打印曲奇饼干的研究[D].雅安:四川农业大学,2022.
- [9] 肖帅磊,姜宇,童强.肉制品3D打印技术及应用进展[J].*食品工业科技*,2025,46(7):435-443.
- [10] 林健嫦,陈君丽,付开霞,等.3D打印食品材料的研究进展[J].*粮食与油脂*,2024,37(6):11-14,33.
- [11] 时浚元,田海芝,任正楠,等.肠道菌群对膳食麸质所致乳糜泻的影响[J].*中国食品学报*,2024,24(11):377-387.
- [12] 王兰静,王菲,钱淑君,等.无麸质大米面包品质评价方法的建立及原料品种适用性研究[J].*美食研究*,2022,39(2):72-78.
- [13] LI C. Recent progress in understanding starch gelatinization-An important property determining food quality [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 293: 119735.
- [14] PARK H, RYU A, KIM H R, et al. Effects of citrus peel hydrolysates on retrogradation of wheat starch [J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2422.
- [15] 李雅兰,段萍,冯西娅,等.不同加工方式对青花椒油风味品质的影响[J].*农业工程学报*,2024,40(23):350-360.
- [16] 孙乐,刘玫,马豪,等.油的种类和添加量对冻藏后速冻非发酵饼品质的影响[J].*食品研究与开发*,2023,44(3):38-46,144.
- [17] 赵保堂,吴晓庆,林娟,等.马铃薯淀粉添加量对藜麦-小麦面团复配体系流变学特性及质构特性的影响[J].*食品与发酵科技*,2019,55(6):1-8,29.
- [18] 吴小红,宋洋波,冯晓宁,等.谷朊粉对青稞-小麦粉混合面团网络结构的影响[J/OL].*现代食品科技*,1-9[2025-04-10].
- [19] 沈东强,王兴奔,赵雯静,等.冷冻面团对面团特性及冷冻生坯馒头品质的影响[J].*美食研究*,2025,42(1):38-43.
- [20] FENG W J, MA S, WANG F C, et al. Effect of black rice flour with different particle sizes on frozen dough and steamed bread quality [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2022, 57(3): 1748-1762.
- [21] LIU Z B, ZHANG M, BHANDARI B, et al. 3D printing: Printing precision and application in food sector [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 69: 83-94.
- [22] LIU Y T, TANG T T, DUAN S Q, et al. Applicability of rice doughs as promising food materials in extrusion-based 3D printing [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(3): 548-563.
- [23] CARVAJAL-MENA N, TABILO-MUNIZAGA G, PÉREZ-WON M, et al. Valorization of salmon industry by-products: Evaluation of salmon skin gelatin as a biomaterial suitable for 3D food printing [J]. *LWT*, 2022, 155: 112931.

- [24] CUETO M, FARRONI A, Rodríguez S D, et al. Assessing changes in enriched maize flour formulations after extrusion by means of FTIR, XRD, and chemometric analysis [J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11: 1586-1595.
- [25] DANKAR I, HADDARAH A, OMAR F E L, et al. Characterization of food additive-potato starch complexes by FT-IR and X-ray diffraction [J]. Food Chemistry, 2018, 260: 7-12.
- [26] LIU Y T, YI S K, YE T T, et al. Effects of ultrasonic treatment and homogenization on physicochemical properties of okara dietary fibers for 3D printing cookies [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 77: 105693.
- [27] 李敏.豌豆淀粉3D打印研究及其在植物甾醇酯曲奇饼干中的应用[D].南昌:南昌大学,2024.
- [28] LEI M, JIANG F C, CAI J, et al. Facile microencapsulation of olive oil in porous starch granules: Fabrication, characterization, and oxidative stability [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111: 755-761.
- [29] THANGALAKSHMI S, ARORA V K, PRITHVIRAJ V. A comprehensive assessment of 3D food printing: technological and processing aspects [J]. Journal of Biosystems Engineering, 2021, 46(3): 1-19.
- [30] 马启昱,刘忠义,付满,等.油脂对面团特性及面制品品质影响研究进展[J].食品与机械,2021,37(10):235-240.
- [31] YU J, WANG X Y, LI D, et al. Development of soy protein isolate emulsion gels as extrusion-based 3D food printing inks: Effect of polysaccharides incorporation [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107824.
- [32] 盖争艳.专用油脂对蒸煮食品品质的影响[D].郑州:河南工业大学,2011.