

瓜尔豆胶对紫薯凝胶3D打印特性的影响

蔡磊, 冯蕾, 徐亚元, 聂梅梅, 李大婧, 郑铁松, 郁东兴

Effect of Guar Gum on 3D Printing Properties of Purple Sweet Potato Gels

CAI Lei, FENG Lei, XU Yayuan, NIE Meimei, LI Dajing, ZHENG Tiesong, and YU Dongxing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023020220>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山药凝胶体系的3D打印特性

3D Printing Characteristics of Yam Gel

食品工业科技. 2021, 42(23): 1-7 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040024>

瓜尔豆胶对马铃薯淀粉消化性和糊化特性的影响

Effects of Guar Gum on the Digestibility and Pasting Properties of Potato Starch

食品工业科技. 2019, 40(8): 61-65,72 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.08.011>

瓜尔豆胶对马铃薯-小麦混合粉面团质构和流变特性的影响

Effect of Guar Gum on Texture and Rheology Property of Potato-Wheat Dough

食品工业科技. 2020, 41(6): 198-203 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.06.033>

刺槐豆胶/瓜尔豆胶复合体系的流变学性质研究

Studies on the rheological properties of locust bean gum (LBG) and guar gum (GG) mixed system

食品工业科技. 2017(14): 40-45 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.14.009>

芹菜茎对金线鱼鱼糕凝胶特性的影响

Effect of Celery Petiole on the Gel Properties of *Nemipterus virgatus* Fish Cake

食品工业科技. 2020, 41(20): 1-5 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.20.001>

3D食品打印技术及影响因素的研究进展

Research Progress of 3D Food Printing and Its Influencing Factors

食品工业科技. 2019, 40(24): 338-343,348 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.24.056>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蔡磊, 冯蕾, 徐亚元, 等. 瓜尔豆胶对紫薯凝胶 3D 打印特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 10-17. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020220

CAI Lei, FENG Lei, XU Yayuan, et al. Effect of Guar Gum on 3D Printing Properties of Purple Sweet Potato Gels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 10-17. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020220

· 未来食品 ·

瓜尔豆胶对紫薯凝胶 3D 打印特性的影响

蔡磊^{1,2}, 冯蕾^{2,*}, 徐亚元², 聂梅梅², 李大婧^{1,2,*}, 郑铁松¹, 郁东兴³

(1. 南京师范大学食品与制药工程学院, 江苏南京 210023;

2. 江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014;

3. 青岛尚好科技有限公司, 山东青岛 266700)

摘要: 为开发营养丰富的个性化食品, 本文采用流变分析、扫描电子显微镜及傅里叶变换红外光谱等技术, 探究了瓜尔豆胶添加量对紫薯凝胶流变特性、凝胶特性、3D 打印特性、微观结构及官能团的影响。结果显示, 随着瓜尔豆胶添加量的增加, 紫薯凝胶的表观粘度、储能模量、损耗模量、 L^* 、胶着性及咀嚼性增加, 微观孔径减小, 凝胶网络结构致密。当瓜尔豆胶添加量为 1.6% 时, 紫薯凝胶持水性达 80.49%, 凝胶强度为 72.67 g。添加瓜尔豆胶可显著提升紫薯凝胶的 3D 打印效果, 且当瓜尔豆胶添加量为 1.2% 及 1.6% 时, 紫薯凝胶打印样品成型性好, 精确度平均偏差小于 1%, 放置 6 h 后稳定性偏差小于 5%。添加瓜尔豆胶不会使紫薯凝胶打印样品产生新的官能团, 但是会加强紫薯凝胶体系中的 CH_2 键和 O-H 键作用。此研究为开发植物基食材的 3D 打印提供理论依据, 对功能性食品的个性化定制有着重要意义。

关键词: 紫薯, 瓜尔豆胶, 3D 打印, 凝胶特性, 微观结构

中图分类号: TS225

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)21-0010-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023020220

本文网刊:



Effect of Guar Gum on 3D Printing Properties of Purple Sweet Potato Gels

CAI Lei^{1,2}, FENG Lei^{2,*}, XU Yayuan², NIE Meimei², LI Dajing^{1,2,*}, ZHENG Tiesong¹, YU Dongxing³

(1. School of Food Science and Pharmaceutical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Institute of Agro-Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

3. Qingdao SOHAO FD-TECH Co., Ltd., Qingdao 266700, China)

Abstract: In order to develop nutrient rich personalized food, the effects of different guar gum concentrations on rheological, gelation, 3D printing, microstructural properties and functional groups of purple sweet potato gels were explored by rheological analysis, scanning electron microscopy and Fourier transform infrared spectroscopy. The results showed that apparent viscosity, storage modulus, loss modulus, L^* , gumminess and chewiness of purple sweet potato gels increased, the micro pore size decreased, and the gel network structure was denser with the increase of guar gum concentration. The water holding capacity of purple sweet potato gels was 80.49% and the gel strength was 72.67 g when guar gum concentration was 1.6%. The addition of guar gum significantly improved 3D printability of purple sweet potato gels. When guar gum was added at 1.2% and 1.6%, 3D printed purple sweet potato gels had good formability, the average accuracy deviation was less than 1%, and the stability deviation was less than 5% after 6 hours of storage. The addition of guar gum would not produce new functional groups in 3D printed purple sweet potato gels, but mainly strengthened interactions of CH_2 bonds and O-H bonds. This study provided a theoretical basis for the development of 3D printing of plant-based ingredients, which was very important for the personalization of functional foods.

Key words: purple sweet potato; guar gum; 3D printing; gel properties; microstructure

收稿日期: 2023-02-22

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2022YFF1102000); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32102001)。

作者简介: 蔡磊 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工及品质调控, E-mail: caileiaomori@163.com。

* 通信作者: 冯蕾 (1987-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬加工与品质调控, E-mail: fljaas@126.com。

李大婧 (1976-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工与营养健康, E-mail: lidajing@163.com。

3D 打印又称增材制造,是一种通过逐层沉积材料来生产物理部件或结构的技术^[1-3]。3D 打印首次出现于 20 世纪 80 年代,在过去四十多年中,它被广泛应用于机械制造、医疗卫生、航空航天、建筑行业、食品工业和服装包装等领域^[4-5]。食品 3D 打印技术因其具备制造复杂结构食品、定制个性化营养、简化传统食品供应链,拓宽食品原料来源等优势而发展迅速^[6]。到目前为止,许多食品材料如糖果、巧克力、肉类和植物源食品均可用于食品 3D 打印。植物源食材因其富含生物活性成分且具有良好的可打印性而被广泛应用于食品 3D 打印中,如粗粮(黑米、薏米籽、绿豆、糙米和荞麦)^[7]、玫瑰和山药^[8-9]、大豆分离蛋白和草莓^[10]、胡萝卜^[11]、南瓜和甜菜根^[12]、马铃薯^[13]和蓝莓^[14]等。

作为旋花科一年生或多年生草本植物,甘薯(*Ipomoea batatas* L. Lam)不仅是重要的粮食和饲料作物,也是化工、轻工业、新能源等行业的重要原材料^[15]。甘薯富含淀粉、膳食纤维、矿物质、类胡萝卜素、多酚、维生素和其他营养物质^[16]。紫薯作为甘薯的一种,因其营养丰富均衡而深受大众喜爱。紫薯花青素具有多种生物活性功能,如抗氧化、抑制肿瘤、保护神经系统和肝脏、降低血脂和血糖^[17]。研究表明,由紫薯制成的紫薯泥不仅可以保留紫薯的原始营养和口感,而且具有典型的剪切稀化行为,可用于食品 3D 打印^[18]。

然而,尽管紫薯泥具备 3D 打印最基本的剪切稀化行为,但打印线条的平滑度和长时间的自支撑能力并不令人满意。食品亲水胶体作为增稠剂、胶凝剂和稳定剂而广泛应用于食品工业^[19]。有研究表明,亲水胶体能够显著改善植物基原料的打印性能。Huang 等^[20]研究表明,添加亲水胶体能够改变糙米的流变特性和质构特性,其中添加黄原胶和瓜尔豆胶的样品具有最好的打印性能。瓜尔豆胶是一种半乳甘露聚糖,由 β -(1,4)-D-甘露糖单元的主链与 α -(1,6)-D-半乳糖单元的侧链聚合而成^[21]。瓜尔豆胶独特的化学结构决定了其具有较强的水溶性、粘度稳定性以及良好的交联性。因此,瓜尔豆胶作为增稠剂在食品中有着广泛的应用。此外,由于瓜尔豆胶富含水溶性膳食纤维,能够促进肠胃蠕动、降低血清胆固醇、降低血糖反应和降低炎症等^[22]。然而,瓜尔豆胶对紫薯凝胶 3D 打印特性方面的研究较少。因此,本研究评估了瓜尔豆胶对紫薯凝胶流变特性、凝胶特性、3D 打印特性、微观结构及官能团的影响,以期生产营养全面的个性化定制食品并提高紫薯产品的附加值,为植物源食材的 3D 打印提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

紫薯粉 食品级,兴化市天农果蔬食品有限公司;瓜尔豆胶 分析纯,上海源叶生物科技有限公司。FOODBOT-D1 型食品 3D 打印机 杭州食印

科技有限公司;HR10 型流变仪 美国 TA 仪器有限公司;CT3 型质构仪 美国博乐飞有限公司;CM-700d 型色差仪 日本柯尼卡美能达公司;EVO-LS10 型扫描电子显微镜 德国卡尔·蔡司股份公司;ZX-27 型傅里叶变换红外光谱仪 德国 Bruker 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 根据冯蕾等^[9]描述的样品制备方法并结合前期预实验,紫薯粉与去离子水以 1:5(w/w)比例混合,加入 0.0%、0.4%、0.8%、1.2%、1.6%(w/w)瓜尔豆胶,超声搅拌 10 min,置于(85±0.5)℃水浴中加热 30 min。水浴期间用保鲜膜密封以防止水分损失。最后,将混合物在 4℃下静置冷却 4 h 以形成凝胶。

1.2.2 流变特性测定 通过流变仪测试紫薯凝胶的流变特性。选择 40 mm 平行板作为测量夹具,间隙 1000 μm 。测量时在平行板的边缘涂抹一定量的硅油,以防止水分蒸发。首先通过振幅扫描确定整个线性粘弹性区域,以确保在测量在线性粘弹区内。静态流变测定:在 1~200 s^{-1} 剪切速率下扫描,测定紫薯凝胶的表观粘度。使用 Power law 模型对数据进行拟合。

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \quad \text{式 (1)}$$

式中: τ 为表观粘度, Pa; k 为稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; n 为流动行为指数。

动态黏弹性:在应变为 0.1%,频率范围为 1~100 rad/s 下测定紫薯凝胶的弹性模量(G')、损耗模量(G'')和损耗因子($\tan\delta = G''/G'$)。

1.2.3 持水性测定 参考 Tang 等^[23]描述的方法并稍作修改。将 1 g 紫薯凝胶用滤纸包裹,置于 50 mL 离心管中,并在 5000 r/min 和 4℃下离心 15 min。离心后刮去紫薯凝胶,记录滤纸和离心管的质量。持水性按下列公式计算:

$$\text{持水性}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: m 为样品的质量, g; m_1 为离心前离心管、滤纸和样品的总质量, g; m_2 为离心后离心管和滤纸的总质量, g。

1.2.4 凝胶强度测定 参考 Liang 等^[24]描述的方法并稍作修改。将紫薯凝胶装入称量瓶中,使用质构分析仪测定凝胶强度。测试参数:TA5 圆柱形探头,压缩形变量 50%,触发力 5 g,测试速度 1 mm/s。整个测试过程中最大的力定义为凝胶强度。

1.2.5 色泽测定 使用手持式色差仪测试紫薯凝胶的色泽。紫薯凝胶的颜色特征从三个方面表示,即 L^* (亮度)、 a^* (红色/绿色)和 b^* (黄色/蓝色)。总色差(ΔE)计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad \text{式 (3)}$$

式中: L_0^* , a_0^* 和 b_0^* 是空白样品的色度值, L^* , a^* 和 b^* 是添加瓜尔豆胶样品的色度值。

1.2.6 3D 打印 构建 15 mm×15 mm×10 mm(长×宽×高)的立方体模型,底部三层填充密度为 100%,内层和顶层填充密度均为 50%,喷头直径为 0.84 mm,打印速度为 15 mm/s,打印温度为 25 ℃。

1.2.7 精确度及稳定性测定 精确度:测量打印后样品的边长和高度,并计算打印样品与模型之间的偏差进行精确度评价。计算公式如下:

$$E_l = \frac{S_l - T_l}{T_l} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

$$E_h = \frac{S_h - T_h}{T_h} \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

$$E_a = \frac{E_l + E_h}{2} \quad \text{式 (6)}$$

式中: E_l 和 E_h 分别是边长和高度的相对偏差量,%; S_l 和 S_h 分别为打印后样品的边长和高度,mm; T_l 和 T_h 分别为模型边长和高度的设计值,mm; E_a 是边长和高度相对偏差的平均值即为精确度, %。

稳定性:将打印后的样品放入 4 ℃ 冰箱保存,分别在 1、2、3、4、5、6 h 后测量样品的边长和高度,计算边长和高度的偏差进行打印稳定性评价。

1.2.8 质构测定 使用质构仪对打印后的样品进行质构分析。参考武敬楠等^[25]描述的方法并稍做修改。参数设置:TA4/1000 圆柱形探头,压缩比为 30%,测试速度为 1 mm/s,触发力为 5 g。记录硬度,粘性,内聚性,弹性,胶着性,咀嚼性。

1.2.9 微观结构观察 参考王浩等^[14]描述的方法并稍作修改。将打印样品真空冷冻干燥,采用扫描电子显微镜在 10 kV 下放大 300 倍观察样品横断面的微观结构。

1.2.10 官能团测定 利用傅里叶变换红外光谱对样品进行官能团的测定。根据冯蕾等^[9]描述的方法,将冷冻干燥后的样品磨成细粉过 100 目筛备用,用傅里叶变换红外光谱仪在 4000~500 cm^{-1} 的波数下扫描,扫描次数 32。再利用 OMNIC 9.2 软件对原始数据进行自动基线校准及平滑等处理。

1.3 数据处理

所有实验重复三次,结果以平均值±标准差表示。通过 SPSS 26.0 软件对数据进行单因素方差分析,采用 Duncan 检验进行显著性分析,显著性水平为 $P < 0.05$ 。使用 Origin Pro 9.8 作图。

2 结果与分析

2.1 瓜尔豆胶对紫薯凝胶流变特性的影响

流变特性是评价食品材料 3D 打印适性的重要参数。适合 3D 打印的食品材料应该具备适宜的表观粘度,即表观粘度应该足够低从而使材料顺利挤出,并且足够高以在材料挤出沉积后稳定^[2]。如图 1A 所示,紫薯凝胶的表观粘度随着剪切速率的增加而降低,这表明紫薯凝胶是典型的假塑性流体。与空白样品比,添加瓜尔豆胶的紫薯凝胶具有更高的表观粘

度,且表观粘度随着瓜尔豆胶添加量的增加而增高。研究表明,3D 打印挤出过程即是对材料施加剪切力的过程,因此具备剪切稀化特性的材料更容易挤出^[26]。如表 1 所示, $n < 1$ 说明紫薯凝胶具备良好的剪切稀化行为,这表明紫薯凝胶能够应用于 3D 打印之中。此外,稠度系数 k 随着瓜尔豆胶添加量的增加而增大,进一步说明添加瓜尔豆胶能够提高紫薯凝胶的表观

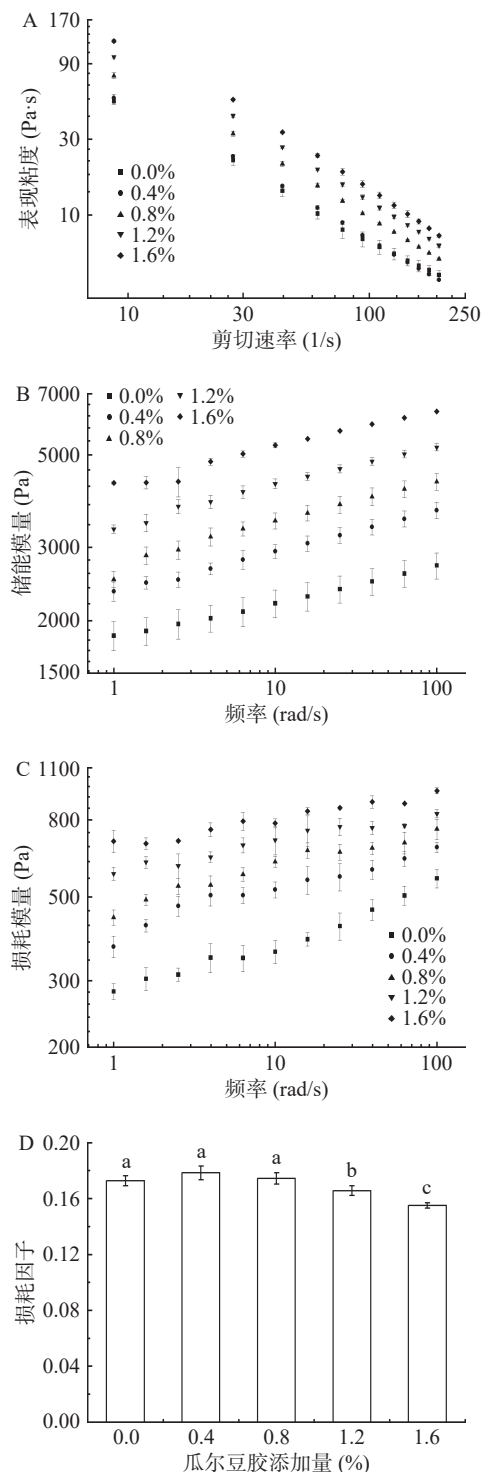


图 1 不同瓜尔豆胶添加量下紫薯凝胶的流变特性

Fig.1 Rheological properties of purple sweet potato gels with different guar gum concentrations

注: A 为表观粘度; B 为储能模量; C 为损耗模量; D 为损耗因子。

粘度。该结果与郑明静^[27]的研究结果一致,添加瓜尔豆胶能提高莲子淀粉凝胶体系的表观粘度,这可能是瓜尔豆胶结构链上存在的大量自由羟基与水分子之间氢键结合形成高粘度溶胶,极易与淀粉形成氢键作用,使得复合体系粘度增加。

表 1 不同瓜尔豆胶添加量下紫薯凝胶的稠度系数(k)和流动指数(n)

Table 1 Consistency index (k) and flow index (n) of purple sweet potato gels with different guar gum concentrations

瓜尔豆胶添加量 (%)	k (Pa·s ⁿ)	n	R ²
0.0	314.80±12.80	-0.83±0.01	0.996
0.4	439.31±20.84	-0.90±0.01	0.997
0.8	572.02±31.55	-0.89±0.01	0.996
1.2	700.70±38.70	-0.88±0.01	0.993
1.6	1045.87±87.38	-0.93±0.02	0.988

如图 1B 和 1C 所示,紫薯凝胶的储能模量(G')和损耗模量(G'')随着角频率的增加而增大,表现出频率依赖性。此外,所有样品的 G'均高于 G'',即损耗因子(tanδ)小于 1(图 1D),这表明紫薯凝胶表现出更多的弹性,具有稳定的凝胶弹性结构。该结构有利于 3D 打印后样品自支撑阶段的结构稳定性^[28]。添加瓜尔豆胶紫薯凝胶的 G'和 G''高于空白,该结果与表观粘度一致。原因可能是具有大量羟基的瓜尔豆胶能够更好地与水分子及淀粉分子结合,从而形成稳定凝胶网络结构^[29]。随着瓜尔豆胶添加量的增加,紫薯凝胶的 G'和 G''逐渐增大,且当瓜尔豆胶添加量为 1.2% 及 1.6% 时,紫薯凝胶的 tanδ 显著减小(P<0.05)。Huang 等^[20]有着类似的研究结果,即添加瓜尔豆胶能够显著提高糙米凝胶的 G'和 G''。Chaisawang 和 Suphantharika^[30]研究了亲水胶体对木薯淀粉流变特性的影响,结果表明瓜尔豆胶能够降低木薯淀粉的 tanδ,从而使得混合体系表现出更高的弹性。

2.2 瓜尔豆胶对紫薯凝胶持水性的影响

持水性是评价食品凝胶体系最重要的指标之一。如图 2 所示,紫薯凝胶的持水性随着瓜尔豆胶添加量的增加而显著增大(P<0.05),且当瓜尔豆胶添加量达 1.6% 时,紫薯凝胶持水性超过 80%。Gularte 和 Rosell^[31]研究了不同亲水胶体对淀粉理化性质的影响,结果表明添加瓜尔豆胶显著提高了玉米淀粉和马铃薯淀粉的持水性。根据 Belorio 等^[32]的研究,添加亲水胶体能够显著增加离心阶段施加在淀粉颗粒上的剪切力,这将增强凝胶结合水的能力。此外,含有大量游离羟基的瓜尔豆胶与带正电的水分子能够很好地结合,从而使得添加了瓜尔豆胶的样品具有更高的持水性,并且这种结合能力随着瓜尔豆胶添加量的增加而增加^[29]。

2.3 瓜尔豆胶对紫薯凝胶凝胶强度的影响

如图 3 所示,瓜尔豆胶添加量对紫薯凝胶强度有显著影响(P<0.05),随着瓜尔豆胶添加量的增加,凝胶强度由 29.00 g 增至 72.67 g。研究表明,瓜尔

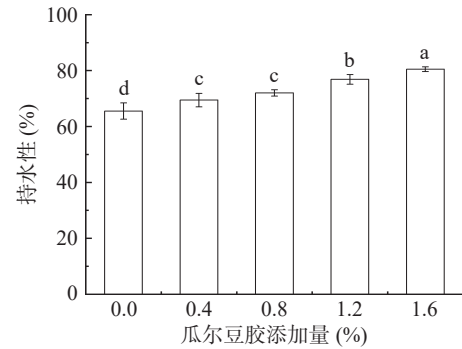


图 2 不同瓜尔豆胶添加量下紫薯凝胶的持水性

Fig.2 Water holding capacity of purple sweet potato gels with different guar gum concentrations

豆胶的添加会加强锥栗淀粉凝胶体系中的氢键作用力,增多锥栗淀粉与瓜尔豆胶分子间的缠绕点,从而强化了锥栗淀粉凝胶的网络结构,促使凝胶强度增强^[33]。值得注意的是,凝胶强度变化趋势与持水性一致,因此可以推测凝胶持水性受凝胶强度的影响,即凝胶网络结构越紧密且完整,凝胶束缚水的能力就越强。

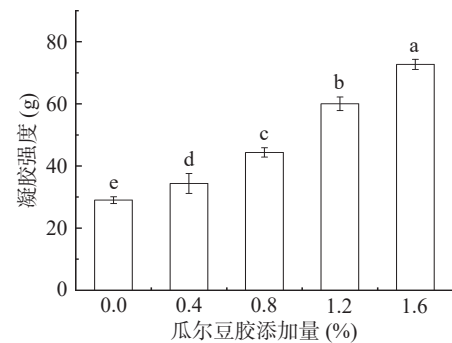


图 3 不同瓜尔豆胶添加量下紫薯凝胶的凝胶强度

Fig.3 Gel strength of purple sweet potato gels with different guar gum concentrations

2.4 瓜尔豆胶对紫薯凝胶色泽的影响

紫薯凝胶的颜色变化如表 2 所示,结果可知,随着瓜尔豆胶添加量的增加,紫薯凝胶的亮度由 29.48 增至 30.86,并且添加瓜尔豆胶的紫薯凝胶比空白表现出更强烈的红色。Hagen^[34]的研究表明,具有美学特征的食物对消费者更具吸引力,因为食物的颜色是消费者决定可接受性和偏好的第一要素。因此,高亮度以及鲜艳的红色在一定程度上能够更好地吸引消

表 2 不同瓜尔豆胶添加量下紫薯凝胶的色泽特性

Table 2 Color properties of purple sweet potato gels with different guar gum concentrations

瓜尔豆胶添加量 (%)	L*	a*	b*	ΔE
0.0	29.48±0.21 ^b	8.25±0.18 ^d	-5.88±0.09 ^c	-
0.4	29.48±1.01 ^b	9.68±0.18 ^a	-6.18±0.17 ^d	1.68±0.57 ^a
0.8	30.56±0.53 ^a	9.28±0.16 ^b	-5.56±0.18 ^b	1.59±0.35 ^a
1.2	30.57±0.43 ^a	9.19±0.20 ^{bc}	-5.51±0.13 ^{ab}	1.54±0.29 ^a
1.6	30.86±0.42 ^a	9.05±0.29 ^c	-5.38±0.12 ^a	1.71±0.36 ^a

注: 同列不同字母表示差异显著(P<0.05); 表3同。

费者。然而,不同添加量的瓜尔豆胶紫薯凝胶的 ΔE 之间无显著差异($P>0.05$),表明瓜尔豆胶添加量对紫薯凝胶的色差无显著影响。

2.5 瓜尔豆胶对紫薯凝胶打印特性的影响

为了评价紫薯凝胶的打印特性,选择了立方体结构进行3D打印试验。如图4所示,未添加瓜尔豆胶的紫薯凝胶,挤出线条肿大且拖丝严重,打印结构凹陷坍塌,打印效果差。相较于空白组,添加瓜尔豆胶的紫薯凝胶具有更好的打印效果,且随着瓜尔豆胶添加量的逐渐增加,紫薯凝胶的打印效果明显提升,当瓜尔豆胶添加量为1.6%时,紫薯凝胶打印样品的线条光滑,结构完整,分辨率更高,无坍塌变形,打印效果最优。结合流变特性及凝胶强度结果可知,空白组和添加瓜尔豆胶的紫薯凝胶均具有剪切稀化行为,易于挤出,适合3D打印。添加瓜尔豆胶的紫薯凝胶表观粘度、储能模量和凝胶强度较高,损耗因子较低,尤其是瓜尔豆胶添加量达到1.2%及1.6%时,这将有利于紫薯凝胶打印过程中线条的连续挤出及层层堆叠,使其具有较好的自我支撑能力,从而促使打印结构更加稳定。

打印样品的精确度和稳定性如表3所示,平均偏差越大说明打印样品的精确度和稳定性越差。由结果可知,添加瓜尔豆胶能够显著提高打印样品的精确度($P<0.05$),且随着瓜尔豆胶添加量的逐渐增加,打印样品的精确度逐渐提高,但不同瓜尔豆胶添加量,紫薯凝胶的打印精确度无显著性差异($P>0.05$)。此外,空白组打印样品的稳定性最差,且随着瓜尔豆

胶添加量的逐渐增加,打印样品的稳定性逐渐提高,当瓜尔豆胶添加量为1.2%和1.6%时,紫薯凝胶打印样品的稳定性无显著性差异($P>0.05$)。原因是空白样品具有较低的表观粘度、储能模量和凝胶强度,并且随着时间的推移,在层层堆积的重力作用下,样品自身没有足够的机械强度支撑结构的完整性,之前土豆泥打印特性研究中也显示了类似的结果^[35]。相反,添加瓜尔豆胶能够显著提高储能模量和凝胶强度,从而改善打印样品稳定性。

2.6 瓜尔豆胶对打印紫薯凝胶质构特性的影响

质构特性决定了食品的可接受性,因此本研究通过两次压缩紫薯凝胶打印样品来模拟人咀嚼动作从而获得样品的质构特性。质构特性中内聚性反映了材料内部颗粒之间的粘附力;胶着性与半固体样品进入稳定状态所需的力有关;而咀嚼性反映了咀嚼固体样品直到其被吞咽所需的能量^[10,36]。由表4可知,添加瓜尔豆胶能显著增加紫薯凝胶打印样品的质构特性($P<0.05$),且随着瓜尔豆胶添加量的逐渐增加,紫薯凝胶打印样品的硬度、弹性、黏性、内聚性、胶着性和咀嚼性逐渐增加。这可能是因为添加瓜尔豆胶后紫薯凝胶形成了更均匀且致密的网状结构^[37]。有研究表明,较高的内聚性和胶着性能够一定程度上提高消费者的咀嚼体验^[38]。在本研究中,添加瓜尔豆胶的紫薯凝胶打印样品的内聚性及胶着性显著高于空白样品($P<0.05$)。值得注意的是,质构特性的结果表明黏性和胶着性与打印精确度具有一定的相关性。此外,先前的研究报告表明,凝胶体系在可以打

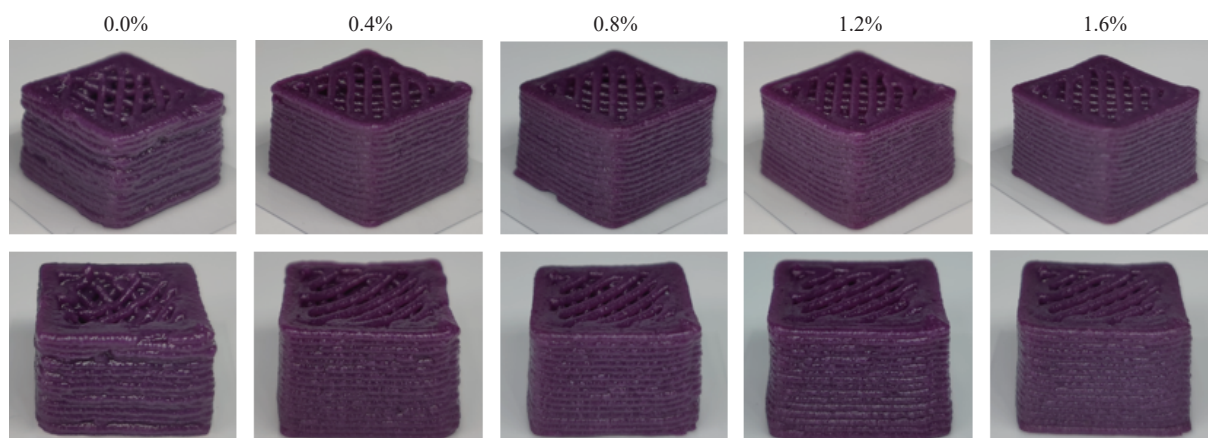


图4 不同瓜尔豆胶添加量下紫薯凝胶3D打印样品的效果图

Fig.4 Images of 3D printed purple sweet potato gels with different guar gum concentrations

表3 不同瓜尔豆胶添加量下紫薯凝胶3D打印样品的精确度及稳定性

Table 3 Accuracy and stability of 3D printed purple sweet potato gels with different guar gum concentrations

瓜尔豆胶添加量(%)	精确度(%)	稳定性(%)					
		1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h
0.0	2.56±0.38 ^a	5.67±0.41 ^a	7.24±0.33 ^a	8.45±0.20 ^a	9.63±0.70 ^a	10.61±0.80 ^a	11.20±0.88 ^a
0.4	1.63±0.58 ^b	3.17±0.40 ^b	4.57±0.19 ^b	5.89±0.53 ^b	7.31±0.53 ^b	8.66±0.44 ^b	9.15±0.39 ^b
0.8	1.04±0.34 ^b	2.75±0.33 ^b	4.19±0.15 ^b	5.50±0.13 ^b	6.05±0.06 ^c	6.53±0.13 ^c	7.05±0.33 ^c
1.2	0.81±0.49 ^b	1.97±0.23 ^c	2.61±0.35 ^c	3.46±0.49 ^c	3.91±0.51 ^d	4.13±0.46 ^d	4.66±0.27 ^d
1.6	0.82±0.35 ^b	1.42±0.21 ^c	2.10±0.34 ^c	2.64±0.26 ^d	3.15±0.26 ^d	3.55±0.34 ^d	3.80±0.19 ^d

表 4 不同瓜尔豆胶添加量下紫薯凝胶 3D 打印样品的质构特性

Table 4 Texture properties of 3D printed purple sweet potato gels with different guar gum concentrations

瓜尔豆胶添加量 (%)	0.0	0.4	0.8	1.2	1.6
硬度 (g)	14.00±2.00 ^d	15.33±2.31 ^d	25.33±1.15 ^e	38.00±0.00 ^b	48.00±3.46 ^e
弹性 (mm)	2.20±0.28 ^e	4.74±0.12 ^b	5.58±0.35 ^a	6.01±0.55 ^a	6.03±0.11 ^a
黏性 (mJ)	0.30±0.10 ^e	0.70±0.00 ^e	1.27±0.21 ^b	1.40±0.30 ^b	1.83±0.12 ^a
内聚性	0.72±0.18 ^b	1.12±0.11 ^a	1.26±0.16 ^a	1.33±0.09 ^a	1.33±0.04 ^a
胶着性 (g)	11.33±2.08 ^d	18.67±1.15 ^d	36.33±5.69 ^e	57.67±4.73 ^b	68.67±5.51 ^a
咀嚼性 (mJ)	0.27±0.06 ^e	0.87±0.06 ^e	2.10±0.46 ^b	3.63±0.78 ^a	4.33±0.21 ^a

注: 同行不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

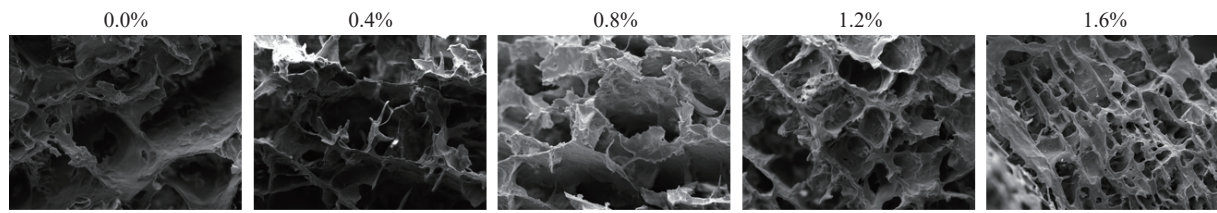


图 5 不同瓜尔豆胶添加量下紫薯凝胶 3D 打印样品的微观结构 (300×)

Fig.5 Microstructure of 3D printed purple sweet potato gels with different guar gum concentrations (300×)

印的同时, 线条挤出后必须能立即粘到前一层上^[14]。空白样品的精确度和稳定性较差的另一个原因可能是低粘性导致层与层之间粘附的不牢固以及低内聚力导致内部结构松散无法有效抗形变。

2.7 瓜尔豆胶对微观结构的影响

微观结构能够直观地判断 3D 打印样品的结构与特性^[9]。图 5 为不同瓜尔豆胶添加量下紫薯凝胶 3D 打印样品的扫描电镜图。由图 5 可知, 空白样品和添加瓜尔豆胶的紫薯凝胶打印样品均呈现网状多孔结构, 表明所有样品均形成了凝胶网络结构。但是不同瓜尔豆胶添加量下, 紫薯凝胶打印样品的微观结构存在差异。具体而言, 空白样品和瓜尔豆胶添加量为 0.4% 的紫薯凝胶打印样品网状结构较为松散且孔径大、分布不均匀。随着瓜尔豆胶添加量的增加, 紫薯凝胶打印样品网络孔径逐渐减小, 且孔状结构分布逐渐均匀, 孔隙致密度逐渐提高。结果表明, 不同添加量的瓜尔豆胶对紫薯凝胶微观结构有显著影响, 这可能是由于瓜尔豆胶分子对糊化淀粉分子起到了桥接作用, 使淀粉分子之间的连结更加紧密从而强化了凝胶网络结构^[21]。

2.8 瓜尔豆胶对打印紫薯凝胶官能团的影响

图 6 为不同瓜尔豆胶添加量紫薯凝胶打印样品的傅里叶变换红外光谱图, 其可以评价瓜尔豆胶对紫薯凝胶打印样品特征官能团的影响。由图 6 可知, 所有样品在 993、1361、1622、2917 和 3268 cm^{-1} 附近有吸收峰。在 993 cm^{-1} 附近的吸收峰归因于 C-O-H 键的弯曲振动、在 1361 cm^{-1} 左右的吸收峰归因于 CH_2 键的弯曲振动、在 1623 cm^{-1} 左右的吸收峰归因于 C=O 键的伸缩振动、在 2915 cm^{-1} 左右的吸收峰归因于 CH_2 键的反对称伸缩振动, 在 3256 cm^{-1} 左右的吸收峰归因于 O-H 键的伸缩振

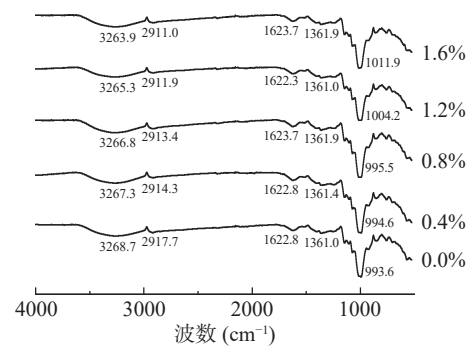


图 6 不同瓜尔豆胶添加量下紫薯凝胶 3D 打印样品的红外光谱图

Fig.6 FTIR spectra of 3D printed purple sweet potato gels with different guar gum concentrations

动^[9,26]。结果显示, 瓜尔豆胶的添加量不会改变紫薯凝胶打印样品的特征官能团。但是, 随着瓜尔豆胶添加量的增加, 红外光谱在波数 993 cm^{-1} 处发生红移。这可能是由于瓜尔豆胶的加入, 导致 C-O-H 键水合水平的改变^[39]。此外, 与空白样品比, 添加瓜尔豆胶的紫薯凝胶打印样品在波数 2917 cm^{-1} 及 3268 cm^{-1} 处发生蓝移, 说明瓜尔豆胶的添加增强了紫薯凝胶体系内的 CH_2 键和 O-H 键。

3 结论

瓜尔豆胶添加量对紫薯凝胶流变特性、凝胶特性、3D 打印特性、质构特性、微观结构及官能团均有影响。紫薯凝胶具有剪切稀化行为, 属于弱凝胶流变学体系, 适合应用于 3D 打印。添加瓜尔豆胶能够显著提高紫薯凝胶的储能模量、损耗模量、持水性、凝胶强度、 L^* 和 a^* , 但不同瓜尔豆胶添加量的紫薯凝胶之间 ΔE 无显著性差异。添加瓜尔豆胶能够显著改善紫薯凝胶的打印成型效果, 且当瓜尔豆胶添加量为 1.2% 和 1.6% 时, 紫薯凝胶打印样品精确度与稳

定性较高。此外,随着瓜尔豆胶添加量的增加,紫薯凝胶打印样品的微观孔径逐渐减小,孔状结构分布逐渐均匀,孔隙致密度逐渐提高。傅里叶变换红外光谱结果显示,添加瓜尔豆胶不会使得紫薯凝胶打印样品产生新的官能团,但是加强了紫薯凝胶体系中的 CH_2 键和O-H键作用。通过3D打印技术不仅能够扩展紫薯产品的生产方式提高其附加值,也为植物基材料的3D打印个性化定制提供理论依据。今后可进一步探讨3D打印紫薯凝胶的营养吸收特性,为个性化营养定制食品开发提供参考。

参考文献

- [1] DANKAR I, HADDARAH A, OMAR F E L, et al. 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 75: 231-242.
- [2] GODOI F C, PRAKASH S, BHANDARI B R. 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 179: 44-54.
- [3] SEVERINI C, DEROSSI A, AZZOLLINI D. Variables affecting the printability of foods: Preliminary tests on cereal-based products[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 38: 281-291.
- [4] VANDERPLOEG A, LEE S E, MAMP M. The application of 3D printing technology in the fashion industry[J]. *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, 2016, 10(2): 170-179.
- [5] 杜姗姗,周爱军,陈洪,等. 3D打印技术在食品中的应用进展[J]. *中国农业科技导报*, 2018, 20(3): 87-93. [DU S S, ZHOU A J, CHEN H, et al. Application progress of 3D printing technology in food fabrication[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(3): 87-93.]
- [6] 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.
- [7] GUO C F, ZHANG M, DEVAHASTIN S. 3D extrusion-based printability evaluation of selected cereal grains by computational fluid dynamic simulation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 286: 110113.
- [8] FENG C Y, ZHANG M, LIU Z B, et al. Effect of drying method on post-processing stability and quality of 3D printed rose-yam paste[J]. *Drying Technology*, 2021, 39(9): 1196-1204.
- [9] 冯蕾,武敬楠,李鸣,等. 山药凝胶体系的3D打印特性[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(23): 1-7. [FENG L, WU J N, LI M, et al. 3D printing characteristics of yam gel[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(23): 1-7.]
- [10] FAN H Z, ZHANG M, LIU Z B, et al. Effect of microwave-salt synergetic pre-treatment on the 3D printing performance of SPI-strawberry ink system[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 122: 109004.
- [11] FENG L, WU J N, SONG J F, et al. Effect of particle size distribution on the carotenoids release, physicochemical properties and 3D printing characteristics of carrot pulp[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 139: 110576.
- [12] PHUHONGSUNG P, ZHANG M, DEVAHASTIN S. Influence of surface pH on color, texture and flavor of 3D printed composite mixture of soy protein isolate, pumpkin, and beetroot[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(9): 1600-1610.
- [13] LIU Z B, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 76-82.
- [14] 王浩,谭畅,陈静,等. 魔芋胶对蓝莓凝胶体系3D打印特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 104-110. [WANG H, TAN C, CHEN J, et al. Effect of konjac gum on 3D printing properties of blueberry gel system[J]. *Food Science*, 2019, 40(23): 104-110.]
- [15] KIM H J, KOO K A, PARK W S, et al. Anti-obesity activity of anthocyanin and carotenoid extracts from color-fleshed sweet potatoes[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, 44(10): 13438.
- [16] 乔汉楨,宋爽,邵会敏,等. 甘薯多糖的提取工艺、生理功能及应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(8): 321-325,332. [QIAO H Z, SONG S, SHAO H M, et al. Advances in extraction technology, biological activity and application of sweet potato polysaccharide[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(8): 321-325,332.]
- [17] BUENO J M, SAEZ-PLAZA P, RAMOS-ESCUADERO F, et al. Analysis and antioxidant capacity of anthocyanin pigments. Part II: Chemical structure, color, and intake of anthocyanins[J]. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 2012, 42(2): 126-151.
- [18] CHEN J L, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Novel alternative use of near-infrared spectroscopy to indirectly forecast 3D printability of purple sweet potato pastes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 296: 110464.
- [19] LI J M, NIE S P. The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 53: 46-61.
- [20] HUANG M S, ZHANG M, GUO C F. 3D printability of brown rice gel modified by some food hydrocolloids[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(7): 14502.
- [21] BORRIES-MEDRANO E V, JAIME-FONSECA M R, AGUILAR-MENDEZ M A. Starch-guar gum extrudates: Microstructure, physicochemical properties and *in-vitro* digestion[J]. *Food Chemistry*, 2016, 194: 891-899.
- [22] LV R H, KONG Q, MOU H J, et al. Effect of guar gum on stability and physical properties of orange juice[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 98: 565-574.
- [23] TANG C H, YANG M, LIU F, et al. Stirring greatly improves transglutaminase-induced gelation of soy protein-stabilized emulsions[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 51(1): 120-128.
- [24] LIANG X P, MA C C, YAN X J, et al. Structure, rheology and functionality of whey protein emulsion gels: Effects of double cross-linking with transglutaminase and calcium ions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 102: 105569.
- [25] 武敬楠,冯蕾,宋江峰,等. 山药淀粉凝胶的3D打印特性[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(6): 211-216, 256. [WU J N, FENG L, SONG J F, et al. 3D printing characteristics of chinese yam starch gel[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(6): 211-216, 256.]
- [26] 刘振彬. 马铃薯泥及其淀粉混合凝胶体系的挤出型3D打印及后加工适应性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 53-54. [LIU Z B. Study on extrusion 3D printing and post-processing adaptability of mashed potato and its starch mixed gel system[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020: 53-54.]
- [27] 郑明静. 莲子淀粉与亲水性胶体协同性及其作用机理的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019: 7-8. [ZHENG M J. Synergistic effect of lotus seed starch blended with different hydrocolloids and its mechanism[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019: 7-8.]
- [28] CHEN C, ZHANG M, GUO C F, et al. 4D printing of lotus

- root powder gel: Color change induced by microwave[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 68: 102605.
- [29] BORRIES-MEDRANO E V, JAIME-FONSECA M R, AGUILAR-MENDEZ M A. Tapioca starch-galactomannan systems: Comparative studies of rheological and textural properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 122: 1173–1183.
- [30] CHAISAWANG M, SUPHANTHARIKA M. Pasting and rheological properties of native and anionic tapioca starches as modified by guar gum and xanthan gum[J]. *Food Hydrocolloids*, 2006, 20(5): 641–649.
- [31] GULARTE M A, ROSELL C M. Physicochemical properties and enzymatic hydrolysis of different starches in the presence of hydrocolloids[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 85(1): 237–244.
- [32] BELORIO M, MARCONDES G, GOMEZ M. Influence of psyllium versus xanthan gum in starch properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105843.
- [33] 周玉杰, 李安平, 杨玉蓉, 等. 瓜尔豆胶对锥粟淀粉糊化和流变学特性的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(23): 65–69. [ZHOU Y J, LI A P, YANG Y R, et al. Effect of guar gum on gelatinization and rheological properties of *Castanea henryi* starch[J]. *Food Science*, 2017, 38(23): 65–69.]
- [34] HAGEN L. Pretty healthy food: How and when aesthetics enhance perceived healthiness[J]. *Journal of Marketing*, 2020, 85(2): 129–145.
- [35] LIU Z B, ZHANG M, BHANDARI B. Effect of gums on the rheological, microstructural and extrusion printing characteristics of mashed potatoes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 117: 1179–1187.
- [36] ZHOU Q C, WANG M, LI H, et al. Application of Maillard reaction product of xylose-pea protein enzymatic hydrolysate in 3D printing[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(7): 2982–2990.
- [37] FENG L P, JIA X, ZHU Q M, et al. Investigation of the mechanical, rheological and microstructural properties of sugar beet pectin/soy protein isolate-based emulsion-filled gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 813–820.
- [38] AZAM R S M, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Effect of different gums on features of 3D printed object based on vitamin-D enriched orange concentrate[J]. *Food Biophysics*, 2018, 13(3): 250–262.
- [39] KACURAKOVA M, MATHLOUTHI M. FTIR and laser-Raman spectra of oligosaccharides in water: Characterization of the glycosidic bond[J]. *Carbohydrate Research*, 1996, 284(2): 145–157.