

基于响应面法优化青稞粉 - 刺槐豆胶 - 明胶 3D 打印凝胶工艺研究

丁滋航^{1,2}, 李玉平^{1,2}, 程靖^{1,2}, 盛军¹, 张云鹤³, 朱强强^{1,2}
(食药资源开发与利用教育部重点实验室¹, 昆明 650201)
(食品科学技术学院, 云南农业大学², 昆明 650201)
(水利学院, 云南农业大学³, 昆明 650201)

摘要:本研究旨在构建一种可打印多元凝胶复配体系,为多元复配凝胶在可食用3D打印墨水及凝胶类食品中应用提供参考。采用单因素实验探究青稞粉添加量、刺槐豆胶添加量、明胶添加量对复配凝胶体系黏度、流动性、色差的影响。以感官评分为响应值,根据响应面实验优化复配凝胶体系配方,分析复配凝胶体系特性对打印效果的影响。结果表明,青稞粉-刺槐豆胶-明胶复配凝胶体系最优制备工艺为以26 mL蒸馏水为基质,青稞粉添加量6 g、刺槐豆胶添加量1.25 g、明胶添加量1.75 g,此配方下制成的3D打印凝胶黏度 $17\,296 \pm 277.03$ mPa·s,流动性为 0.608 ± 0.422 mm/min,色差值 $L^* = 42.26 \pm 0.67$, $a^* = 3.09 \pm 0.22$, $b^* = 10.11 \pm 0.72$,感官评分为90.56。此配方条件下获得的3D打印产品支撑性能、挤出性和打印效果兼优。

关键词:青稞粉;刺槐豆胶;明胶;3D打印;响应面法

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001291

中图分类号:TS235.1 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0036-08

网络首发时间:2025-12-24 17:25:08

网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20251224.1110.002>

Optimization of 3D - printing gel process for highland barley powder - locust gum - gelatin composites based on response surface methodology

Ding Zihang^{1,2}, Li Yuping^{1,2}, Cheng Jing^{1,2}, Sheng Jun¹, Zhang Yunhe³, Zhu Qiangqiang^{1,2}

(Key Laboratory of Development and Utilization of Food and Medicinal Resources Ministry of Education¹, Kunming 650201)

(College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University², Kunming 650201)

(College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University³, Kunming 650201)

Abstract: A printable multi - component composite gel system was aimed to be constructed in this study, thereby providing reference for the application of multi - component composite gels as edible 3D - printing inks and gel - based food products. Single - factor experiments were conducted to investigate the effects of highland barley flour powder addition level, locust bean gum addition level, and gelatin addition level on the viscosity, fluidity, and color difference of the composite gel system. With sensory score as the response value, the formulation of the composite gel's properties on printing performance was also analyzed. The results showed that the optimal preparation process for the highland barley flour - locust bean gum - gelatin composite gel system was determined as follows: 26 mL of distilled water was used as the matrix, with 6 g of highland barley powder, 1.25 g of locust bean gum, and 1.75 g of

基金项目:云南省基础研究专项面上项目(202301AT070505),云南省农业联合专项基础研究计划面上项目(202501BD070001-044),云南农业大学科研启动基金项目(2023005ky)

收稿日期:2025-09-26

第一作者:丁滋航,男,2000年出生,硕士,功能食品,3386399145@qq.com

通信作者:朱强强,男,1988年出生,讲师,食品科学,tianjiao125@126.com

gelatin added. Under this formulation, the 3D printing gel exhibited a viscosity of $17,296 \pm 277.03 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, a fluidity of $0.608 \pm 0.422 \text{ mm/min}$, color values of $L^* = 42.26 \pm 0.67$, $a^* = 3.09 \pm 0.22$, $b^* = 10.11 \pm 0.72$, and a sensory score of 90.56. The 3D-printed products obtained under this formulation achieved excellent balanced performance in supportability, extrudability, and printing accuracy.

Key words: highland barley powder; locust bean gum; gelatin; 3D printing

3D打印技术又称增材制造技术,可通过逐层打印、堆积成型的方式打印预先设计的结构^[1]。目前,常见的3D食品打印技术包括挤出式打印、粉末热熔打印、黏结剂喷胶成型技术等^[2]。将3D打印技术应用于食品工业中,能够满足不同人群对食品的个性化需求,精准控制食品的营养成分与口感,并且能有效利用食品原料,提高生产效率、降低成本和减少浪费^[3]。然而,食品3D打印技术的核心在于开发具有适应性强、稳定性高的可打印材料^[4]。凝胶类材料的黏弹性、触变性流变特性,以及相变温度、凝胶强度等热力学行为,直接决定了打印精度和产品稳定性^[5]。然而单一凝胶物料存在热稳定性差,网络结构易断裂,打印后易脱水收缩等问题,其难以满足人群对凝胶类打印产品的需求。因此,亟须探究构建多元复配凝胶体系,丰富可打印凝胶类食品的物料种类。

青稞(*Hordeum vulgare* Linn)主要产于西藏、青海等高原地区,在当地称为裸大麦、米大麦^[6]。青稞的营养成分具有“三高二低”的特点,即高蛋白、高纤维素、高维生素、低脂肪、低糖,其属于低GI食物^[7]。青稞还富含酚酸类化合物、黄酮类化合物、 β -葡聚糖和 γ -氨基丁酸等功能成分^[8],有益于降血脂、降胆固醇、降血糖、抗氧化及调节胃肠道功能等^[9],可作为新型功能食品的理想选择。青稞中的青稞 β -葡聚糖、青稞蛋白与青稞淀粉的相互作用能抑制短期回生行为,改善凝胶结构,从而使其具有凝胶特性、动态黏弹性^[10,11]。Pan等^[12]研究发现瓜尔豆胶的加入可提高发芽青稞淀粉的黏度、凝胶强度,有利于凝胶的形成,从而促进其形成有序、致密的凝胶网络结构。Ma等^[13]发现青稞 β -葡聚糖和大豆分离蛋白能提高亚麻籽油基油的凝胶特性,减缓富含n-3多不饱和脂肪酸亚麻籽油的氧化进程。近年来,全谷物健康的益处日益受到关注,青稞因其丰富的营养价值而备受青睐。然而,其适口性较差,吞咽困难人群难以食用。此外,采用单一青稞粉作为3D打印材料时,打印成品中的网络结构在高温环境下易出现分子链断裂,导致层间黏附力不足;同时,该材料体系的剪切稀化指数较低,流动性较差,难以满足高

精度打印的流变性能要求^[14]。

刺槐豆胶(LBG)是一种中性植物种子半乳糖甘露聚糖,由连接到单个(1-6)- α -d-半乳糖单元的(1-4)- β -d-甘露糖主链组成^[15]。半乳糖甘露聚糖的理化性质受半乳糖含量和半乳糖单元在主链上的分布特征显著影响^[16]。LBG在环境温度下显示出低溶胶的溶胶可用性,因此需热处理获得最大的溶解度以达到最佳的水结合能力^[17]。刘文会等^[18]发现海藻酸钠和刺槐豆胶能提高小麦淀粉凝胶的弹性指数和黏性指数,降低固液平衡指数。Hussain等^[19]发现LBG能提高抗性玉米淀粉的黏弹性和凝胶网络结构。

明胶(GE)是从胶原蛋白中提取的多肽和蛋白质的混合物,是一种没有明显颜色或味道的多功能亲水胶体^[20]。明胶具有良好的成膜性、可降解性、生物安全性和气体阻隔性能,能减少食品与外界环境的气体交换^[21];其在食品工业中广泛用作胶凝剂,以提高食品的弹性、稠度和稳定性,是构建凝胶体系的理想材料之一^[22]。然而,单一明胶组分形成的凝胶黏弹性和硬度通常较低,难以满足3D打印食品的材质要求^[23]。

然而,刺槐豆胶与明胶复配对青稞粉打印性能的影响鲜有报道,本文以青稞粉、刺槐豆胶和明胶为研究对象,探究食品3D打印的青稞粉-刺槐豆胶-明胶复配凝胶体系,为3D打印食品的开发提供物质基础,并丰富食品3D打印材料。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

青稞粉、刺槐豆胶、明胶均为食品级,蒸馏水。

NR200经济型卧式色差仪、NDJ-8S数字式粘度计、Luckybot ONE食品巧克力打印机、FA2104电子天平、EU-K1-20TQ超纯水器、JYC-21CS2电磁炉。

1.2 实验方法

1.2.1 单因素实验

参照蒋蝶等^[24]方法,略做修改。以26 mL去离

子水为定量,基础配方为青稞粉 6 g、刺槐豆胶 1.25 g、明胶 1.75 g。固定基础配方,其余各项成分的添加量分别调整为:青稞粉添加量为 4、5、6、7、8 g,刺槐豆胶添加量为 0.75、1.00、1.25、1.50、1.75 g,明胶添加量为 1.25、1.50、1.75、2.00、2.25 g,以凝胶体系的黏度、流动性、色差以及 3D 打印效果为评价指标,评价不同因素对青稞粉-刺槐豆胶-明胶复配凝胶体系 3D 打印效果的影响。

1.2.2 响应面优化实验

参照翟红旭^[25]的实验方法,略做修改。以青稞粉-刺槐豆胶-明胶复配凝胶为原料进行打印,打印样品由 10 名经培训合格学生组成的感官评价小组进行感官评分,评分标准如表 1 所示。以青稞粉、刺槐豆胶、明胶在凝胶体系中的单因素实验结果作为 3 个因素水平(表 2),感官评分作为响应值使用 Design-Expert 13 软件对试验结果进行二次回归拟合,用于评价复配凝胶体系的打印效果。

表 1 感官评价标准

项目	评分标准	得分
结构(20)	每层结构紧密	18~20
	每层结构略有塌陷	12~17
	每层结构松散,不成形	0~12
纹理(20)	纹理较清晰	18~20
	纹理较清晰	12~17
	纹路模糊	0~12
色泽(30)	表面光泽清亮,色泽均匀	21~30
	略有光泽,色泽较均匀	11~20
	颜色暗淡无光,色泽不均匀	0~10
弹性(30)	弹性好,按压后不断裂,且可快速恢复原状	21~30
	弹性适中,按压后不断裂,可缓慢恢复原状	11~20
	弹性差,按压后断裂,且不可恢复原状	0~10

表 2 响应面实验因素水平

因素	水平		
	-1	0	1
青稞粉添加量	5	6	7
刺槐豆胶添加量	1	1.25	1.5
明胶添加量	1.5	1.75	2

1.2.3 3D 打印模型设计及流程

采用 Photoshop 软件构建尺寸为 24 mm × 21 mm × 3 mm 的三维模型,Cure 15.04 软件进行切片。将模型底层厚度设为 4 mm、层厚为 0.5 mm、塑料针头为 0.6 mm、喷嘴温度为 28 ℃、热床温度为 28 ℃,打印速度为 88 mm/s,打印温度为 39 ℃。

1.2.4 青稞粉、刺槐豆胶、明胶凝胶体系流动性测定

采用三角形布局固定试管,试管直径为 100 mm、长度为 180 mm,在操作过程中将其固定在一个倾斜角度为 60°的支架上。按式(1)计算流动性(Y)。

$$Y = d/t \quad (1)$$

式中:Y 为流动性/mm/min;d 为流动距离/mm;t 为流动时间/min。

1.2.5 黏度测定

采用黏度计(4 号转子,转速 12 rap/min,样品温度 35 ℃)对青稞粉-刺槐豆胶-明胶混合凝胶进行黏度特性测定。

1.2.6 色差测定

参考符馨予等^[26]方法,略做修改。使用色差仪对混合凝胶及打印产品进行色泽测定,分别记录测试样品的亮度(L*)、红色与绿色的色度差异(a*)、黄色与蓝色的色度差异(b*)。

1.2.7 数据统计分析

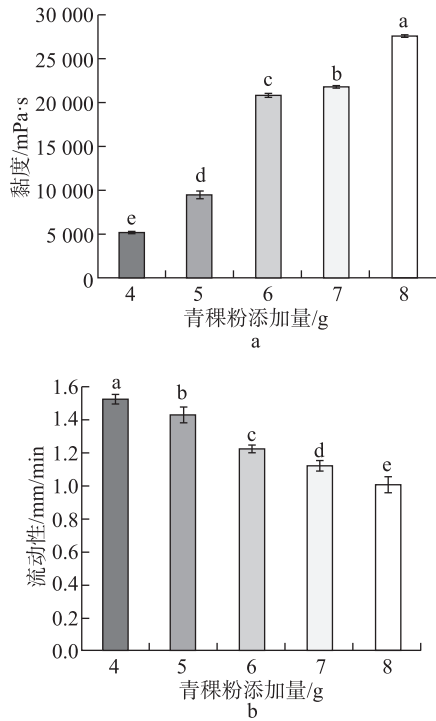
所有实验重复 3 次,实验数据采用平均值 ± 标准偏差表示。使用 SPSS Statistics 27 软件对数据进行单因素方差分析,采用 Design-Expert 13 软件对响应面实验结果进行二次回归拟合,GraphPad Prism 8 软件绘图,图中不同的字母表示数据之间的显著差异(P < 0.05)。

2 结果与分析

2.1 单因素实验分析

2.1.1 青稞粉量添加对复配凝胶体系的黏度、流动性和色差的影响

由图 1 可知,随着青稞粉添加量的递增,复配凝胶的黏度增大但流动性降低。当青稞粉添加量过高时,黏度增大,但打印过程中的支撑性能较差。由图 2 可见,随着青稞粉添加量的增加,产品的成型以及叠层效果增加,在添加量为 6 g 时,凝胶表现出较好的挤出性能,较高的假塑性和良好的支撑性,挤出胶体连续均匀,所得打印成品表面光滑。但青稞粉添加量达到 7 g 时,打印成品表面纹理不清晰,内部出现断层现象,在添加量为 8 g 时,成品表面较干燥,挤出较困难且断层较多。由表 3 可见,青稞粉的添加量对复配凝胶体系的 L*、a*、b* 具有显著性影响(P < 0.05),青稞粉添加量越多,透明度越低。复配凝胶体系的 a* 值、b* 值为正值,且随着青稞粉的添加量增多而变深。因此青稞粉最佳添加量为 6 g。



注:图中不同小写字母表示不同组别间的显著性差异($P < 0.05$)。余同。

图1 青稞粉添加量对复配凝胶体系黏度和流动性的影响

表3 青稞粉添加量对复配凝胶体系色差的影响

青稞粉量添加/g	L*	a*	b*
4	43.76 ± 0.62 ^{ab}	2.49 ± 0.32 ^c	8.74 ± 0.31 ^b
5	39.14 ± 0.29 ^c	3.45 ± 0.17 ^b	11.82 ± 0.26 ^a
6	38.35 ± 0.35 ^d	4.16 ± 0.21 ^a	11.83 ± 0.30 ^a
7	43.14 ± 0.42 ^b	3.96 ± 0.38 ^a	11.71 ± 0.39 ^a
8	44.27 ± 0.42 ^a	4.13 ± 0.26 ^a	11.85 ± 0.19 ^a

注:表中同列不同小写字母表示不同组别间的显著性差异($P < 0.05$)。余同。



图2 青稞粉添加量对3D打印图

2.1.2 刺槐豆胶添加量对复配凝胶体系黏度、流动性、色差的影响

由图3a可见,随着刺槐豆胶添加量的增加,粘度先上升后下降。当刺槐豆胶添加量为1.25g时,胶体黏度适中,有利于打印过程中物料层与层之间的粘结堆积,从而提高打印精度。由图3b可见,刺槐豆胶添加量为1.25g时,复配凝胶流动性最好,之后随着刺槐豆胶添加量的上升,复配凝胶的流动性下降。根据表4所示,随着刺槐豆胶的添加量增加,

L*值逐渐降低,胶体颜色更偏暗;b*值逐渐降低,反映出颜色偏黄程度减弱。由图4可知,刺槐豆胶添加量为0.75g时,打印效果最差,挤出过程断点多。当刺槐豆胶添加量在1.5g、1.75g时,黏度增大,物料挤出不均匀,纹理较不清晰。综合分析可得刺槐豆胶最优添加量为1.25g。

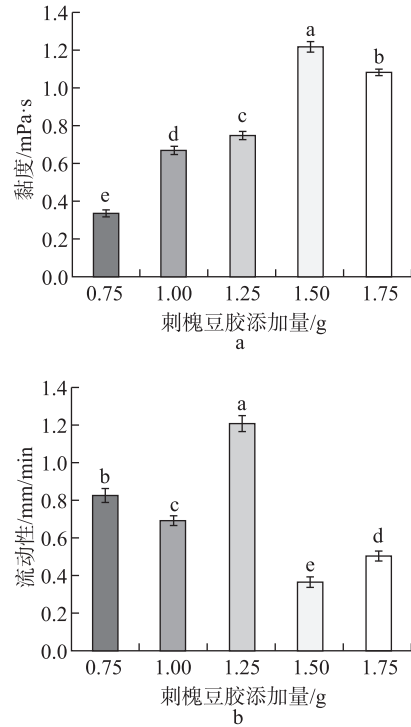


图3 刺槐豆胶添加量对复配凝胶体系黏度和流动性的影响

表4 刺槐豆胶添加量对凝胶色差的影响

刺槐豆胶量添加/g	L*	a*	b*
0.75	41.40 ± 0.51 ^a	3.30 ± 0.22 ^b	10.41 ± 0.17 ^{ab}
1.00	41.24 ± 0.31 ^a	3.88 ± 0.38 ^a	11.17 ± 0.29 ^a
1.25	38.72 ± 0.50 ^b	3.38 ± 0.23 ^b	10.75 ± 0.46 ^{ab}
1.50	38.92 ± 0.64 ^b	3.39 ± 0.20 ^b	9.96 ± 0.29 ^b
1.75	38.95 ± 0.95 ^b	3.52 ± 0.09 ^{ab}	10.84 ± 0.72 ^a



图4 刺槐豆胶添加量对3D打印效果图

2.1.3 明胶添加量对复配凝胶体系黏度、流动性和色差的影响

根据图5可知,明胶为1.75g时打印出的凝胶流动性最好,复配凝胶支撑性好,纹理清晰,并且亮度最高。如图6所示,明胶添加量为1.25g、1.5g

时,图形纹路不清晰,有轻微塌陷和黏接现象;当添加量达到 1.75 g 时,打印成品纹路清晰,主体部分打印效果较好;随着明胶添加量达到 2.00 g、2.25 g 时,胶体挤出较为困难,打印成品表面粗糙,成品逐渐出现断给、不成型现象,印刷性变差。因此明胶添加量为 1.75 g 时,打印效果最佳。由表 5 可见,不同的明胶添加量下 L^* 、 a^* 、 b^* 值具有显著性差异, a^* 、 b^* 值均为正,胶体颜色偏橙色。随着明胶添加量的变化,胶体颜色也不断变化,表明明胶对凝胶的打印效果有影响。因此明胶最优添加量为 1.75 g。

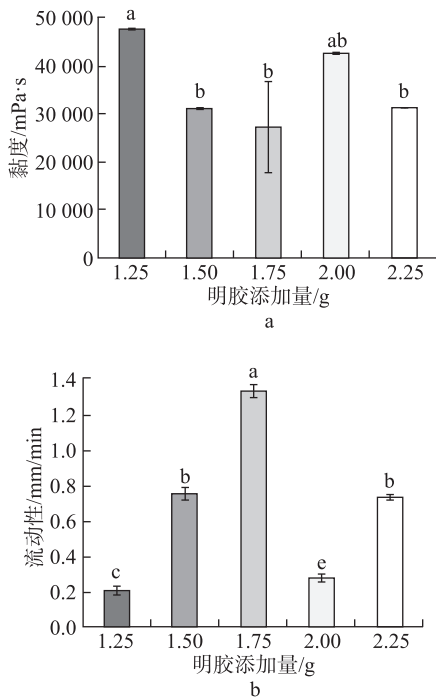


图 5 明胶添加量对复配凝胶体系黏度和流动性的影响

表 5 明胶添加量对复配凝胶体系色差的影响

明胶量 添加量/g	L^*	a^*	b^*
1.25	38.86 ± 0.64 ^b	3.53 ± 0.12 ^b	10.77 ± 0.52 ^b
1.50	38.74 ± 0.74 ^b	3.44 ± 0.19 ^b	9.96 ± 0.40 ^b
1.75	42.79 ± 0.79 ^a	4.37 ± 0.25 ^a	12.79 ± 0.71 ^a
2.00	42.91 ± 0.71 ^a	2.50 ± 0.15 ^c	7.49 ± 0.47 ^c
2.25	38.82 ± 0.69 ^b	4.43 ± 0.22 ^a	4.36 ± 0.40 ^d



a 6:1.25:1.25 b 6:1.25:1.5 c 6:1.25:1.75 d 6:1.25:2 e 6:1.25:2.25

图 6 明胶添加量对 3D 打印效果图

2.2 响应面实验优化复配凝胶体系结果分析

根据单因素实验结果,选择青稞粉(A)、刺槐豆胶(B)、明胶(C)这 3 个因素进行响应面实验,响应面实验设计及结果如表 6 所示。

表 6 响应面实验设计及结果

编号	A/g	B/g	C/g	感官评分/分
1	5	1	1.75	63.7 ± 4.24 ^g
2	7	1	1.75	75.4 ± 4.52 ^e
3	5	1.5	1.75	74.6 ± 4.48 ^e
4	7	1.5	1.75	76.7 ± 3.52 ^{de}
5	5	1.25	1.5	79.9 ± 3.18 ^{cd}
6	7	1.25	1.5	75.7 ± 4.96 ^e
7	5	1.25	2	66.4 ± 5.37 ^f
8	7	1.25	2	75.5 ± 3.90 ^e
9	6	1	1.5	78.3 ± 4.17 ^d
10	6	1.5	1.5	81.9 ± 2.70 ^c
11	6	1	2	74.1 ± 3.65 ^e
12	6	1.5	2	83.8 ± 3.82 ^{bc}
13	6	1.25	1.75	87.5 ± 4.63 ^b
14	6	1.25	1.75	91.4 ± 3.58 ^{ab}
15	6	1.25	1.75	87.6 ± 3.67 ^b
16	6	1.25	1.75	90.8 ± 3.52 ^{ab}
17	6	1.25	1.75	92.5 ± 3.07 ^a

使用 Design - Expert 8 软件对实验结果进行二次回归拟合,多元二次回归方程为:

$$Y = +89.96 + 2.34A + 3.19B - 2.00C - 2.40AB + 3.33AC + 1.52BC - 11.26A^2 - 6.11B^2 - 4.33C^2$$

表 7 可知,模型差异极显著($P < 0.001$),失拟项不显著($P = 0.3071 > 0.05$),说明该模型适合本研究。 A (青稞粉添加量)、 B (刺槐豆胶添加量)影响显著($P < 0.05$), C (明胶添加量)影响不显著,同时结合 F 值进行比较,其影响程度顺序为: $B > A > C$ 。当青稞粉添加量 6.05 g,刺槐豆胶添加量 1.31 g,明胶添加量 1.71 g 时,预测感官评分达到 90.56 分。综上所述,此模型可充分反映青稞粉、刺槐豆胶和明胶对 3D 打印凝胶感官评分的影响情况。

表 7 二次回归方程的方差分析和显著性检验

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	1 075.03	9	119.45	17.73	$P < 0.001$	**
A	43.71	1	43.71	6.49	0.038 2	*
B	81.28	1	81.28	12.07	0.010 4	*
C	32.00	1	32.00	4.75	0.065 7	
AB	23.04	1	23.04	3.42	0.106 8	
AC	44.22	1	44.22	6.57	0.037 4	*
BC	9.30	1	9.30	1.38	0.278 3	
A^2	533.37	1	533.37	79.19	$< 0.000 1$	**
B^2	156.93	1	156.93	23.30	0.001 9	*
C^2	78.94	1	78.94	11.72	0.011 1	*
残差	47.15	7	6.74			
失拟项	26.30	3	8.77	1.68	0.307 1	
净误差	20.85	4	5.21			
总和	1 122.18	16				
R^2	0.958 0					
R^2_{adj}	0.904 0					
标准偏差	2.60					
信噪比	12.703					

注: * 为 $P < 0.05$ 显著; ** 为 $P < 0.01$ 极显著。

从实际操作考量,修正最佳配方为:青稞粉添加量 6 g,刺槐豆胶与明胶的添加量分别为 1.25 g、1.75 g,得到的感官评分值为 90.30,这与响应面实验的理论值接近,表明该模型的预测精度较高。

2.3 验证实验

2.3.1 响应面实验 3D 打印特性评价

根据图 7a 可知,复配胶体的黏度变化与其总体添加量的变化呈正相关。通过对比不同添加量组合,发现总体添加量相差较小的组合,其黏度差异性小。由图 7b 可得复配胶体流动性跟胶体总添加量的关系。总添加量较低的组合呈现较高流动性;而总添加量较高的组合则相对呈现较低的流动性。由表 8 可见,不同添加量的复配凝胶体系对色差存在一定影响。当青稞粉添加量为 6 g,刺槐豆胶添加量为 1.25 g,明胶添加量为 1.75 g 时,3D 打印效果最佳。

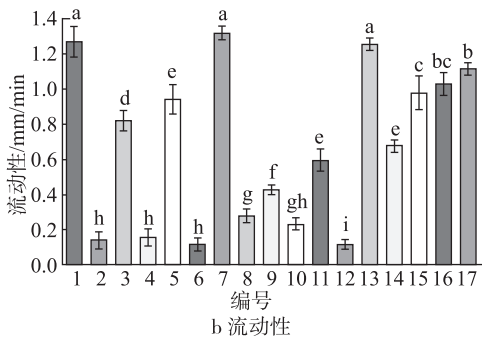
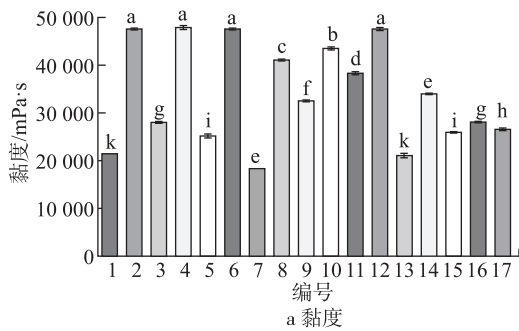


图 7 响应面实验复配凝胶体系黏度及流动性图

表 8 响应面实验复配凝胶体系打印后色差值分析

实验编号	L*	a*	b*
1	42.76 ± 0.41 ^h	2.52 ± 0.32 ^g	6.45 ± 0.18 ⁱ
2	40.62 ± 1.24 ^{gh}	4.13 ± 0.71 ^{ef}	10.71 ± 0.51 ^h
3	38.71 ± 0.73 ^{fgh}	3.05 ± 0.42 ^{efg}	8.71 ± 0.24 ^g
4	39.53 ± 1.01 ^{efg}	3.54 ± 0.30 ^{defg}	10.59 ± 0.41 ^{fg}
5	38.72 ± 0.94 ^{efg}	3.32 ± 0.60 ^{defg}	10.37 ± 0.60 ^{ef}
6	38.30 ± 0.65 ^{efg}	5.69 ± 0.47 ^{def}	15.39 ± 0.44 ^{def}
7	41.83 ± 0.79 ^{efg}	2.63 ± 0.40 ^{def}	7.67 ± 0.50 ^{ede}

续表 8

实验编号	L*	a*	b*
8	40.85 ± 0.23 ^{defg}	3.57 ± 0.40 ^{def}	9.58 ± 0.21 ^{ede}
9	42.92 ± 0.38 ^{def}	3.69 ± 0.19 ^{ede}	11.00 ± 0.47 ^{ede}
10	39.64 ± 0.54 ^{ede}	3.43 ± 0.38 ^{ede}	10.48 ± 0.11 ^{bde}
11	38.77 ± 1.01 ^{de}	3.51 ± 0.20 ^{ede}	10.91 ± 0.28 ^{bcd}
12	38.21 ± 0.58 ^{cd}	3.28 ± 0.19 ^{ede}	9.96 ± 0.28 ^{bc}
13	38.74 ± 0.25 ^{cd}	6.05 ± 0.35 ^{ed}	15.71 ± 0.32 ^{bc}
14	37.12 ± 0.41 ^{bc}	6.34 ± 0.40 ^{bc}	9.91 ± 0.26 ^b
15	38.42 ± 0.22 ^{ab}	3.20 ± 0.20 ^b	9.97 ± 0.12 ^b
16	39.44 ± 0.29 ^a	2.87 ± 0.18 ^a	9.06 ± 0.46 ^a
17	40.54 ± 0.64 ^a	3.28 ± 0.07 ^a	9.96 ± 0.10 ^a

2.3.2 保水性实验

结合响应面优化后的最优配方,在 3D 打印出成品后,进行了 3 d 的保水性实验。将打印好的成品 A 覆膜处理,成品 B 则直接与外界空气接触,进行对照实验。水分含量变化由表 9 可见,成品 A 经覆膜处理后,质量分数降低 50.30%;成品 B 质量分数降低 59.01%,A 下降速度相比于 B,较为缓慢。

表 9 不同处理方式对 3D 打印成品 3 天内水分质量的变化

时间/d	A/g	B/g
1	6.72	7.05
2	4.05	2.95
3	3.34	2.89

3 讨论

本研究通过响应面法对青稞粉 - 刺槐豆胶 - 明胶复配凝胶体系进行优化,得到了最优打印配方。魏燕霞等^[27]的研究表明,m(刺槐豆胶):m(黄原胶)以 4:6 的体积比复配时,可发挥协同作用,使得复配体系的黏度达到最大,同时通过不同温度处理后发现,该复配体系在 80 °C 下表现最佳的黏度特性。Kou 等^[28]将不同糊化程度的青稞粉用作 3D 打印食品油墨,发现所有印刷油墨均表现出类似固体的行为,在 200 °C [(97.12 ± 0.99)%]加热的油墨由于最佳的附着力、抗变形性和可挤出性而表现出最佳的印刷精度,该油墨也具有最高的半固体水(T22)和适当的游离水(T23)。王欣等^[29]研究结果表明,随着κ-卡拉胶与明胶复配胶质量浓度的增加,凝胶体系强度、硬度、咀嚼性、内聚性和回复性均显著提升,而黏性和弹性变化不显著;微观结构结果表明,κ-卡拉胶/明胶复配胶质量浓度的增加有助于牛奶布丁凝胶体系趋于均一、致密。此外,当 pH = 3 时,经过 LBG 改性后,鱼明胶的凝胶强度和熔融温度分别提高 62.65% 和 29.44%,LBG 通过静电和氢键相互作用

用改变了鱼明胶的构象,从而形成更致密的聚合物网络^[30]。因此,当青稞粉、刺槐豆胶与明胶选择合适的配方进行打印,成品可层层堆叠,纹理清晰,黏弹性好。青稞粉的添加量明显影响挤出效果,若添加量少,成品不易成型;明胶添加量越少,成品凝固性差,不易保持形状。

本研究将青稞粉、刺槐豆胶、明胶3种食品胶体进行多元复配,弥补了单一胶体性能上的不足。通过调控3种材料的添加量,凝胶体系的假塑性显著提升,黏度得到增强,流动性相应降低。这些变化不仅拓宽了凝胶体系的应用范围,还使其性质更加稳定可靠。

4 结论

本研究确定了青稞粉-刺槐豆胶-明胶三元复配凝胶的最优配比为:青稞粉添加量6g、刺槐豆胶添加量1.25g、明胶添加量1.75g。此配方下制成的3D打印凝胶,感官评分为90.56,黏度为 $(17\ 296 \pm 277.03)\text{mPa}\cdot\text{s}$,流动性为 $(0.608 \pm 0.422)\text{mm}/\text{min}$,色差 L^* 、 a^* 、 b^* 分别为 42.26 ± 0.67 、 3.09 ± 0.22 、 10.11 ± 0.72 。按最优配比打印的成品形态优美,内部结构稳定性得到增强。

参考文献

- [1]刘雨莉,段京瑶,郭悦,等.明胶和马铃薯淀粉对大豆分离蛋白凝胶3D打印性能的影响[J].食品与发酵工业,2025,51(13):253-260
Liu L, Duan J, Guo Y, et al. Effects of gelatin and potato starch on the 3D printing performance of soy protein isolate gels[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(13): 253-260
- [2]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
Ding K, Jin J, Ren Y, et al. Research progress of 3D printing technology in food[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2025, 48(1):70-84
- [3]童强,佟垚,吴豪,等.3D打印技术在食品领域中的研究进展.食品与发酵工业,2025,51(7):396-404
Tong Q, Tong Y, Wu H, et al. Research progress of 3D printing technology in food field. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(7):396-404
- [4]Wang S, Li D N, Zang Z H, et al. 3D food printing: applications of plant-based materials in extrusion-based food printing[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(26):7184-7198
- [5]Nikolaou E N, Apostolidis E, Nikolidaki E K, et al. The development and optimization of extrusion-based 3D food printing inks using composite starch gels enriched with various proteins and hydrocolloids[J]. Gels, 2025, 11(8):574
- [6]Obadi M, Qi Y, Xu B. Highland barley starch (Qingke): Structures, properties, modifications, and applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 185: 725-738
- [7]安妮,师敏,肖明.枸杞青稞含片的制备及品质研究[J].食品安全质量检测学报,2025,16(3):214-219
An N, Shi M, Xiao M. Preparation and quality study of *Lycium barbarum* and *Hordeum vulgare* lozenges[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(3):214-219
- [8]扎西穷达,巴桑琼达,次仁卓嘎,等.青稞活性成分与功能作用研究进展[J].食品安全质量检测学报,2024,15(23):256-262
Zha X, Ba S, Ci R, et al. Research progress on the active ingredients and functional effects of *Hordeum vulgare* Linn [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(23):256-262
- [9]冯朵,王靖,季晓娇,等.青稞功效成分和保健功能研究进展[J].食品科技,2020,45(9):57-61
Feng D, Wang J, Ji X, et al. Recent progress in research on nutritional qualities and health benefits of highland barley [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(9): 57-61
- [10]Guo T, Horvath C, Chen L, et al. Understanding the nutrient composition and nutritional functions of highland barley (Qingke): a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 103:109-117
- [11]Lin R, Nie M, Li J, et al. Effects of four highland barley proteins on the pasting properties and short-term retrogradation of highland barley starch[J]. Molecules, 2024, 29(6):1211
- [12]Pan W, Liu W, Li J, et al. The role of guar gum in improving the gel and structural characteristics of germinated highland barley starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 238:124052
- [13]Ma Y, Ye F, Chen J, et al. The microstructure and gel properties of linseed oil and soy protein isolate based-oleogel constructed with highland barley β -glucan and its application in luncheon meat[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 140:108666
- [14]Bao Q, Li M, Yang K, et al. Effect of highland barley treated with heat-moisture on interactions between gluten and starch granules in dough[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 275:133254
- [15]O'connell A, Goycoolea F M, Gulotta A, et al. The struc-

- ture and dynamics of locust bean gum in aqueous solution [J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 138:108446
- [16] Lu Z, Wu Z, Wu K, et al. Impact of κ -carrageenan and locust bean gum on physicochemical properties and emulsion gel formation in casein-based systems [J]. *Food Hydrocolloids*, 2025, 169:111634
- [17] Barak S, Mudgil D. Locust bean gum: processing, properties and food applications: a review [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 66:74-80
- [18] 刘文会, 陈海华, 王雨生. 海藻酸钠和刺槐豆胶对小麦淀粉流变学及质构性质的影响 [J]. *粮油食品科技*, 2022, 30(5):149-157
- Liu W, Chen H, Wang Y. Effects of sodium alginate and locust bean gum on rheological and texture properties of wheat starch [J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2022, 30(5):149-157
- [19] Hussain R, Singh A, Vatankhah H, et al. Effects of locust bean gum on the structural and rheological properties of resistant corn starch [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(3):650-658
- [20] Yang Z, Chaieb S, Hemar Y. Gelatin-based nanocomposites: a review [J]. *Polymer Reviews*, 2021, 61(4):765-813
- [21] 朱嘉晖, 王顺民. 壳聚糖-明胶活性膜处理大蒜片的工艺研究 [J]. *中国果菜*, 2024, 44(6):32-37
- Zhu J, Wang S. Study on the processing technology of garlic slices with chitosan-gelatin active film [J]. *China Fruit & Vegetable*, 2024, 44(6):32-37
- [22] Bian X, Luo S, Liu C, et al. Effect of formation of the maltodextrin/gelatin emulsion on gel properties of gelatin [J]. *Food Bioscience*, 2023, 56:103254
- [23] 管红梅, 罗敬, 李怡佳, 等. 明胶添加量对脱乙酰魔芋凝胶冻融稳定性的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2025, 51(9):221-229
- Guan H, Luo J, Li Y, et al. Effect of gelatin addition on freeze-thaw stability of deacetylation konjac glucomannan gels [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(9):221-229
- [24] 蒋蝶, 王苑竹, 陶兴琳, 等. 响应面法优化高酰基结冷胶-魔芋胶-羧甲基纤维素复配3D打印凝胶的配方 [J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2024, 39(5):106-116
- Jiang D, Wang Y, Tao X, et al. Response surface methodology for optimization of 3D printing gel formulations with high acylated gellan gum-konjac gum-carboxymethyl cellulose complexes [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2024, 39(5):106-116
- [25] 翟红旭. 草莓3D打印特性及涂膜处理对其保鲜效果的研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023: 15
- Zhai H. Study on 3D printing characteristics of strawberry and preservation effect of coating treatment [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023: 15
- [26] 符馨予, 王丽敬, 刘思园, 等. 豌豆纤维添加量对3D打印预乳化猪肉糜制品冻融稳定性的影响 [J]. *农业工程学报*, 2025, 41(5):288-296
- Fu X, Wang L, Liu S, et al. Effects of pea fiber additive amount on the freeze-thaw stability of 3D printed pre-emulsified minced pork products [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(5):288-296
- [27] 魏燕霞, 谢瑞, 郭肖, 等. 刺槐豆胶与黄原胶复配体系的流变性 [J]. *食品科学*, 2017, 38(1):149-153
- Wei Y, Xie R, Guo X, et al. Rheological properties of locust bean gum and xanthan gum mixed system [J]. *Food Science*, 2017, 38(1):149-153
- [28] Kou D, Zhao P, Qiu R, et al. Development of whole highland barley ready-to-eat 3D printed dysphagia diet; effect of heat treatment [J]. *Food Hydrocolloids*, 2026, 170:111661
- [29] 王欣, 熊俊婷, 冯龙斐, 等. κ -卡拉胶/明胶复配胶对牛奶布丁凝胶性质的影响 [J]. *食品与发酵科技*, 2023, 59(6):22-27
- Wang X, Xiong J, Feng L, et al. Effect of κ -carrageenan and gelatin compound colloid on gel properties of milk pudding [J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2023, 59(6):22-27
- [30] Wu F, Tu Z, Cheng J, et al. Locust bean gum improved the gelling properties of fish gelatin in acidic environments and its application in acid gel gummies [J]. *NPJ Science of Food*, 2025, 9:179.