# 可食胶黏剂制备工艺优化

刘世锋[1]，高巧侠[2]
（1.重庆工贸职业技术学院，重庆 408000；2.重庆商务职业学院，重庆 401331）

**摘要：目的** 为了优化可食胶黏剂的制备工艺。**方法** 将模糊综合评价法和主成分分析法相结合，确定可食胶黏剂 4 项性能指标的总分计算方法，然后在单因素试验的基础上，以可食胶黏剂总分为响应值，通过响应面分析确定可食胶黏剂的最佳制备工艺，并研究糯米粉质量分数、明胶质量分数和鱼鳔胶质量分数对可食胶黏剂性能的影响，以及各参数之间的交互作用。**结果** 在糯米粉有质量分数为 30%，明胶质量分数为 15%，鱼鳔胶质量分数为 20%时，可食胶黏剂的综合得分最高。**结论** 在优化条件下，可获得总分为 0.957 的可食胶黏剂；优化后的工艺可用于指导生产。

**关键词：**可食胶黏剂；糯米粉；明胶；鱼鳔胶；响应面
**中图分类号：**TQ433 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2019)11-0129-08
**DOI：**10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.11.019

## Optimization of Preparation Technology of Edible Adhesive

*LIU Shi-feng*[1], *GAO Qiao-xia*[2]
(1.Chongqing Industry & Trade Polytechnic, Chongqing 408000, China;
2.Chongqing Business Vocational College, Chongqing 401331, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to optimize the preparation technology of edible adhesive. The fuzzy synthetic evaluation method and the principal component analysis method were combined to determine the total score calculation method of the four performance indexes of edible adhesive. Based on the single factor test, the total score of edible adhesive was taken as the response value. The optimum preparation process of edible adhesive was determined by response surface analysis. The effects of glutinous rice powder mass fraction, gelatin mass fraction and mass fraction of icthyocolla on the properties of edible adhesive and their interaction were studied. When the mass fraction of glutinous rice flour was 30.00%, the mass fraction of gelatin was 15.00%, and the mass fraction of icthyocolla was 20.00%, the comprehensive scores of edible adhesive was the highest. Under the optimal conditions, edible adhesive with a total score of 0.927 can be obtained. The optimized process can be used for guiding production.

**KEY WORDS:** edible adhesive; glutinous rice flour; gelatin; icthyocolla; response surface

食用胶是常见的食品添加剂，使用范围涉及绝大部分食品工业，其主要作用是增稠、改善食品物理性质、增强持水性及提高食品出品率等[1—3]。少数食用胶可直接用作胶黏剂，常见的有糯米胶、明胶、鱼鳔胶等[4—6]。目前，国内还没有商品可食胶黏剂上市，与化学胶黏剂相比，单一食用胶作为胶黏剂使用时，粘接效果不甚理想，存在粘度低、拉伸强度差、粘度热稳定性不足、耐水性不好等问题，因此更多时候作为增稠剂进行添加。由于化学胶黏剂具有一定的迁移性[7]，在食品包装产业尤其是儿童食品、儿童用品包装、儿童玩具粘合产业中存在着一定的安全隐患，因此研究性能优良的可食胶黏剂具有广阔的应用前景。

**收稿日期：**2018-09-15
**基金项目：**重庆市教育委员会科学技术研究计划青年项目（KJQN201803601，KJQN201804402）
**作者简介：**刘世锋（1978—），男，硕士，重庆工贸职业技术学院讲师，主要研究方向为印刷包装材料。

糯米粉糊化后虽具有较高的粘度，但粉糊的抗剪切能力差，凝胶强度小[8]；明胶虽具有胶凝作用，凝胶强度大，具有一定的保水性，但年度低[9]；虽然鱼鳔胶的粘度高、凝胶后拉伸强度大，适合直接作为胶黏剂使用，但鱼鳔胶是名贵的中药材，价格高[10]。为了制备性能优良、成本适中的可食胶黏剂，试验拟综合糯米粉糊化后的高粘度特征、明胶的胶凝作用和保水性、鱼鳔胶优良的力学性能，以糯米粉、明胶、鱼鳔胶为试材，以期制备高性能的可食用胶黏剂，为相关研究和产业提供借鉴。

# 1 试验

## 1.1 材料

主要材料有鱼鳔胶、明胶，化学纯，上海国药试剂集团；糯米粉，自制，将市售十月稻田牌粳糯米洗净后，用蒸馏水浸泡 2 h，并在阴凉处晾干表面水分后放入真空冷冻干燥机，干燥至恒质量后进行超微粉粹，随后将所得糯米粉通过 500 目筛进行筛选。

## 1.2 仪器

主要仪器有 LGJ-FD 真空冷冻干燥机，河南兄弟仪器设备有限公司；YF2-2 超微粉碎机，瑞安市永历制药机械有限公司；HH-4 恒温水浴锅，邦西仪器科技有限公司；NDJ-5S/8S 单圆筒旋转粘度计，广州镌恒仪器设备有限公司；电子天平，上海卓精电子科技有限公司；MS-H-ProT 磁力搅拌器，大龙兴创实验仪器有限公司；2425C 拉伸强度试验机，厦门群隆仪器有限公司。

## 1.3 胶黏剂制备

准确称取定量（试验设计中用量）的糯米粉、鱼鳔胶加入 500 mL 沸腾蒸馏水中，于 95 ℃水浴中糊化 20 min。明胶按照设定比例加入到糊化后的乳状液中，通过 80 ℃恒温搅拌，蒸腾多余水分，待混合物可拉出丝时，即得胶黏剂。

## 1.4 粘度检测

按照《胶黏剂粘度的测定》[11]（GB/T2794-2013）检测粘度。

## 1.5 拉伸强度检测

按照《塑料拉伸性能的测定》[12]（GB/T 1040-2006）检测强度。

## 1.6 粘度热稳定率检测

参照文献[13]略作修改，称取 24 g 可食胶黏剂置于 1000 mL 三口烧瓶中，加入 376 mL 蒸馏水，并在三口烧瓶中安装温度计、搅拌器和冷凝器，之后置于恒温槽中。打开搅拌器和冷凝器，通过恒温槽慢慢加热并不断搅拌，加热至 95 ℃时分别再保温 30 min，3 h，随后吸取胶黏剂加入 95 ℃的粘度计测定其粘度，粘度分别计为 $\eta_0$，$\eta_1$，然后依照式（1）计算粘度热稳定率。

$$\text{粘度热稳定率}=\left(1-\frac{\eta_0-\eta_1}{\eta_1}\right)\times 100\% \tag{1}$$

## 1.7 耐水性检测方法

参照文献[14]略作修改，每次测试称取等质量的胶黏剂置于烧杯中，于 25 ℃烘箱中静置 24 h 使胶膜凝固，冷却后称质量，质量记为 $m_1$；于 25 ℃蒸馏水中浸泡 6 h，沥干表面水分，称质量记为 $m_2$，烧杯质量为 $m_0$，然后依照式（2）计算吸水率。

$$\text{吸水率}=\frac{m_1-m_0}{m_0}\times 100\% \tag{2}$$

## 1.8 统计方法及总分计算

试验数据处理时，通过主成分分析法对原数据进行分析，在保留原来信息的同时降低数据维度，可食胶黏剂各性能指标的权重由 SPSS 降维分析后的方差贡献率确定[15]。

将试验测得的胶黏剂 4 项性能指标进行模糊交换，得各项指标隶属度[16]。可食胶黏剂的粘度、拉伸强度和粘度热稳定率均为正效应，隶属度按式（3）计算，吸水率为负效应，按式（4）计算[14]。

$$p=\frac{A_i-A_{\min}}{A_{\max}-A_{\min}}\ \text{（正效应）} \tag{3}$$

$$p=\frac{A_{\max}-A_i}{A_{\max}-A_{\min}}\ \text{（负效应）} \tag{4}$$

式中：$P$ 为隶属度；$A_i$ 为试验号为 $i$ 的指标值；$A_{\min}$ 为指标最小值；$A_{\max}$ 为指标最大值。

可食胶黏剂评价总得分 $S$ 按式（5）计算：

$$S=aP_1+bP_2+cP_3+dP_4 \tag{5}$$

式中：$P_1$，$P_2$，$P_3$，$P_4$ 分别为粘度、拉伸强度、粘度热稳定率、吸水率的隶属度；$a$，$b$，$c$，$d$ 分别为其权重。

## 1.9 数据统计与分析

应用 Excel2016 绘制单因素试验数据折线图及作数据差异显著性分析，应用 SPSS22 进行主成分分析及各指标权重的确定；应用模糊综合评价法确定各指标隶属度，试验数据为 3 次试验的平均值。

# 2 单因素试验结果与分析

## 2.1 糯米粉质量分数对可食胶黏剂的影响

糯米粉质量分数对可食胶黏剂 4 项性能指标的影响见图 1。由图 1 可知，可食胶黏剂的粘度和拉伸强度随着糯米粉质量分数的增加均整体呈现先升高

后降低的趋势。在试验范围内，当糯米粉质量分数为25%时，可食胶黏剂具有最高的粘度和最好的拉伸强度，粘度达到了 395.26 mPa·s，拉伸强度为 30.42 MPa。当糯米粉质量分数 20%时，可食胶黏剂的粘度热稳定率较好，为 75.44%，与糯米粉质量分数为 15%时差异不显著；糯米粉的添加量对可食胶黏剂吸水率的影响较大，糯米粉质量分数的增加使得可食胶黏剂的吸水率先升高后降低，糯米粉质量分数 15%和 20%时吸水率较高，耐水性较差，综合可食胶黏剂 4 项考察指标，糯米粉的最优质量分数为 25%。

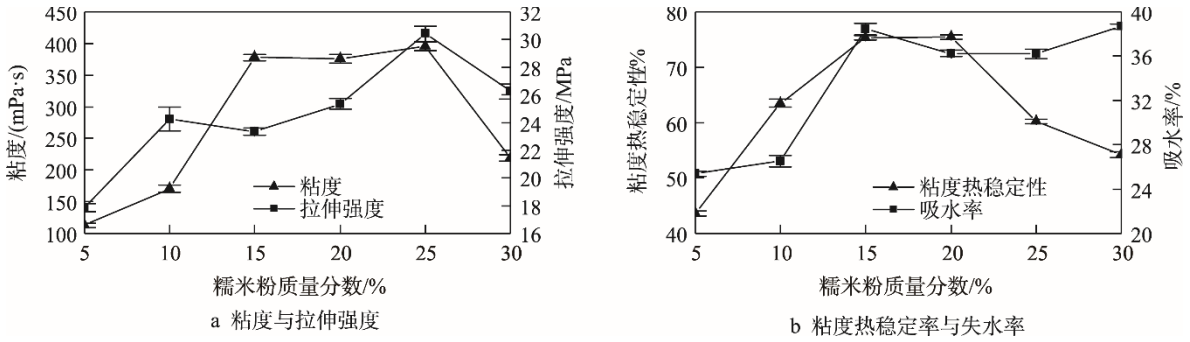



图 1　糯米粉质量分数对可食胶黏剂 4 项性能指标的影响

Fig.1 Effects of glutinous rice flour mass fraction on 4 performance indexes of edible adhesive

## 2.2　明胶质量分数对可食胶黏剂的影响

明胶质量分数对可食胶黏剂 4 项性能指标的影响见图 2。由图 2 可知，随着明胶质量分数的增加，可食胶黏剂的粘度、拉伸强度及粘度热稳定率都迅速提升。当明胶质量分数为 15%时，3 项指标达到最佳，之后粘度缓慢降低，拉伸强度和粘度热稳定率迅速下降；当明胶质量分数超过 10%时，可食胶黏剂吸水率呈下降的趋势，可能是因为明胶在质量分数很低的情况下形成凝胶溶液，其粘度较小，且凝胶冻点和熔点比较低，所以不适合在常温下凝胶成型；当浓度过高，会发生布朗运动和分子间碰撞，使溶液在流动区域内变得更加无序，且对流动的抵抗减弱，因此表现出较低的粘度、粘度热稳定率和拉伸强度[17]。

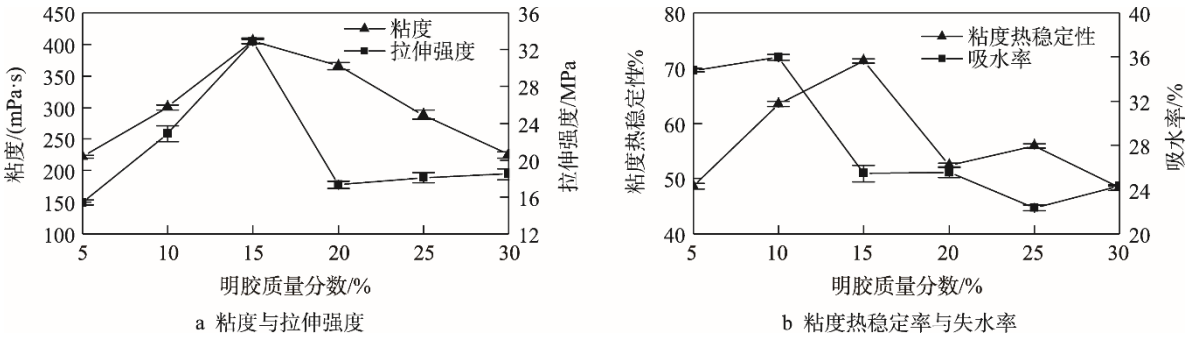



图 2　明胶质量分数对可食胶黏剂 4 项性能指标的影响

Fig.2 Effects of gelatin mass fraction on 4 performance indexes of edible adhesive

## 2.3　鱼鳔胶质量分数对可食胶黏剂 4 项性能指标的影响

作为胶黏剂，鱼鳔胶的物化性能使其在粘接物体后粘接处具有较强的拉伸强度和压剪强度，可以直接作为高性能的可食胶黏剂使用。鱼鳔胶是中医传统的名贵药品，作为胶黏剂主要用于高档家具粘接和建筑文物的修复，直接用作胶黏剂进行大规模的推广应用不仅会造成资源浪费而且导致粘合产品的成本升高[18]，因此，将鱼鳔胶作为可食胶黏剂的原料，研发成本低廉、物化性能优良的可食胶黏剂是较为理想的研发策略。鱼鳔胶质量分数对可食胶黏剂 4 项性能指标的影响见图 3。由图 3 可知，鱼鳔胶质量分数在10%，15%，20%，25%时可食胶黏剂具有较高的粘度以及粘度热稳定率。鱼鳔胶质量分数为 25%时，胶黏剂具有最高的粘度、最强的拉伸强度、最好的热稳定性及耐水性，因此，鱼鳔胶最优质量分数为 25%。

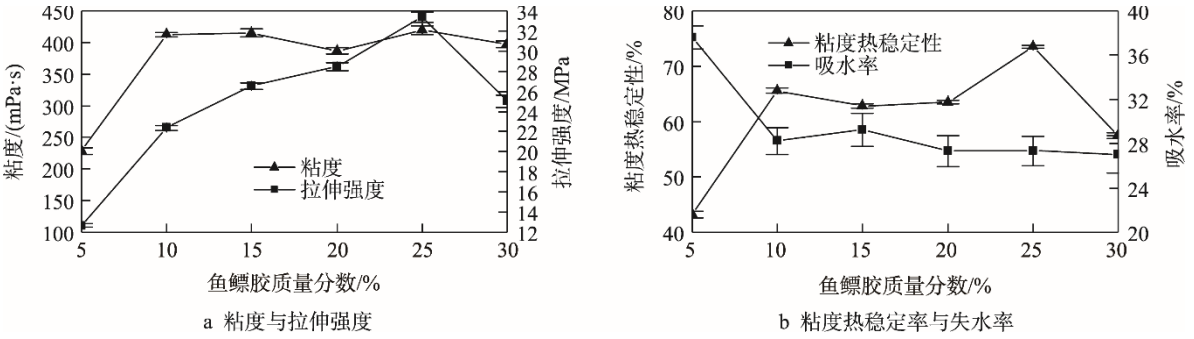
# 3　响应面试验结果与分析

## 3.1　隶属度及权重确定

通过式（3—4）将实测值转换为模糊数值，即得粘度、拉伸强度、粘度热稳定率和吸水率等 4 项可食胶黏剂性能指标的模糊矩阵（见表 1）。

应用 SPSS22 对表 1 中的模糊矩阵进行主成分分析，主成分权重为其方差贡献率，粘度、拉伸强度、粘度热稳定率和吸水率的相关系数分别为 $K_1$，$K_2$，$K_3$，$K_4$，结果见表 2。可食胶黏剂总分通过式（5）计算。

$$S=0.591\ 06a+0.253\ 09b+0.099\ 26c+0.0566d=0.591\ 06(0.859K_1+0.882K_2+0.92K_3+0.056K_4)+0.253\ 09(-0.069K_1-0.086K_2+0.086K_3+0.996K_4)+0.099\ 26(0.488K_1-0.389K_2-0.084K_3+0.008K_4)+0.0566\ (0.136K_1+0.253K_2-0.374K_3+0.064K_4)\approx 1.605K_1+0.235K_2+0.002K_3+0.004K_4$$




a 粘度与拉伸强度　　b 粘度热稳定率与失水率

图 3　鱼鳔胶质量分数对可食胶黏剂 4 项性能指标的影响

Fig.3 Effects of icthyocolla mass fraction on 4 performance indexes of edible adhesive

表 1　单因素试验实测值和模糊矩阵

**Tab.1 Test data and fuzzy matrix of single factor experiment**

| 试验号 | 实测值 | | | | 模糊矩阵 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 粘度/(mPa·s) | 拉伸强度/MPa | 粘度热稳定率/% | 吸水率/% | $K_1$ | $K_2$ | $K_3$ | $K_4$ |
| 1 | 105.4411 | 7.1448 | 77.2800 | 34.8684 | 0.0000 | 0.0109 | 0.9188 | 0.2142 |
| 2 | 175.0073 | 19.1880 | 54.0500 | 35.8092 | 0.2276 | 0.6420 | 0.5027 | 0.1425 |
| 3 | 398.1362 | 24.0864 | 34.7300 | 37.6810 | 0.9574 | 0.8986 | 0.1566 | 0.0000 |
| 4 | 398.2701 | 23.2336 | 35.4200 | 34.5450 | 0.9579 | 0.8539 | 0.1689 | 0.2388 |
| 5 | 401.9575 | 22.3600 | 32.6600 | 35.4662 | 0.9699 | 0.8082 | 0.1195 | 0.1687 |
| 6 | 215.0846 | 17.0872 | 32.6600 | 36.9166 | 0.3587 | 0.5319 | 0.1195 | 0.0582 |
| 7 | 235.2005 | 14.8512 | 81.8110 | 34.1040 | 0.4245 | 0.4147 | 1.0000 | 0.2724 |
| 8 | 405.8818 | 24.7832 | 77.0500 | 35.2212 | 0.9828 | 0.9352 | 0.9147 | 0.1873 |
| 9 | 377.2375 | 24.8144 | 25.9900 | 34.7410 | 0.8891 | 0.9368 | 0.0000 | 0.2239 |
| 10 | 357.0701 | 15.9120 | 28.5200 | 34.8390 | 0.8231 | 0.4703 | 0.0453 | 0.2164 |
| 11 | 299.3901 | 12.5944 | 36.5700 | 35.3192 | 0.6344 | 0.2965 | 0.1895 | 0.1799 |
| 12 | 225.0035 | 8.7880 | 42.0900 | 33.6336 | 0.3911 | 0.0970 | 0.2884 | 0.3082 |
| 13 | 276.2975 | 6.9368 | 76.3600 | 34.8684 | 0.5589 | 0.0000 | 0.9023 | 0.2142 |
| 14 | 285.7014 | 12.8752 | 58.8800 | 35.2800 | 0.5897 | 0.3112 | 0.5892 | 0.1828 |
| 15 | 314.3766 | 17.1808 | 29.4400 | 34.4960 | 0.6835 | 0.5368 | 0.0618 | 0.2425 |
| 16 | 377.6701 | 19.1880 | 31.0500 | 26.1366 | 0.8905 | 0.6420 | 0.0906 | 0.8791 |
| 17 | 411.1451 | 25.3032 | 31.0500 | 24.8332 | 1.0000 | 0.9624 | 0.0906 | 0.9784 |
| 18 | 409.3735 | 26.0208 | 40.2500 | 24.5490 | 0.9942 | 1.0000 | 0.2555 | 1.0000 |

表 2　主成分分析结果

**Tab.2 Result of principal component analysis**

| 主成分 | 特征值 | 方差贡献率/% | 累加方差贡献率/% | 相关系数 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ |
| $M_1$ | 2.364 | 59.106 | 59.106 | 0.859 | 0.882 | 0.920 | 0.056 |
| $M_2$ | 1.012 | 25.309 | 84.415 | −0.069 | −0.086 | 0.086 | 0.996 |
| $M_3$ | 0.397 | 9.926 | 94.340 | 0.488 | −0.389 | −0.084 | 0.008 |
| $M_4$ | 0.226 | 5.660 | 100.000 | 0.136 | 0.253 | −0.374 | 0.064 |

## 3.2　回归方差的建立及方差分析

将糯米粉、明胶、鱼鳔胶的质量分数分别标记为 $A$，$B$，$C$，自变量的因素水平用−1，0，1 进行编码（见表 3）。

表 3　因素水平及编码

**Tab.3 Factor level and coding**

| 水平 | $A$/% | $B$/% | $C$/% |
|---|---|---|---|
| −1 | 20 | 10 | 20 |
| 0 | 25 | 15 | 25 |
| 1 | 30 | 20 | 30 |

后续试验中，可食胶黏剂总分根据式（5）计算，Box-Behnken 试验设计的响应值为可食胶黏剂总分。以单因素试验的最优条件为基础，选择 $A$，$B$，$C$ 进行 3 因素 3 水平试验设计（见表 4）。

以可食胶黏剂的总分为响应值，对表 4 中的 17 个试验数据用 Design-ExpertV8.0.6.1 程序进行分析，并对试验数据进行多元回归拟合，得到可食胶黏剂总分对编码自变量 $A$，$B$ 和 $C$ 的回归模型方程。

$$Y=0.943+0.007A-0.027B-0.034C+0.003AB-0.096AC-0.058BC-0.070A^2+0.037B^2-0.110C^2$$

式中：$Y$ 为可食胶黏剂的总分；$A$，$B$，$C$ 分别为糯米粉、明胶及鱼鳔胶的质量分数。对可食胶黏剂总分的回归方程进行方差分析和显著性检验，结果见表 5，得到的回归模型方差分析极显著（$P<0.01$），失拟项 $P$=0.2231，不显著。综合分实测值与预测值相关性见图 4，由图 4 可知，响应面模型预测值和实际值的拟合曲线近似直线，模型为线性分布，残差近似正态分布，因此，在试验范围内，所得模型可用于预测可食胶黏剂的 4 项指标总分[19]。由表 5 可知模型的

表 4　Box-Behnken 试验设计与结果

**Tab.4 Box-Behnken test design and results**

| 试验号 | $A$/% | $B$/% | $C$/% | 总分 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | −1 | 0 | 1 | 0.8470 |
| 2 | 0 | −1 | 1 | 0.9482 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0.9958 |
| 4 | 1 | −1 | 0 | 0.9574 |
| 5 | −1 | −1 | 0 | 0.8760 |
| 6 | −1 | 0 | −1 | 0.7470 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0.9724 |
| 8 | 1 | 0 | −1 | 0.9020 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0.9760 |
| 10 | 0 | 1 | 1 | 0.8888 |
| 11 | 0 | −1 | −1 | 0.9152 |
| 12 | −1 | 1 | 0 | 0.8646 |
| 13 | 1 | 1 | 0 | 0.9682 |
| 14 | 0 | 1 | −1 | 0.9328 |
| 15 | 1 | 0 | 1 | 0.8152 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0.9702 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0.9880 |

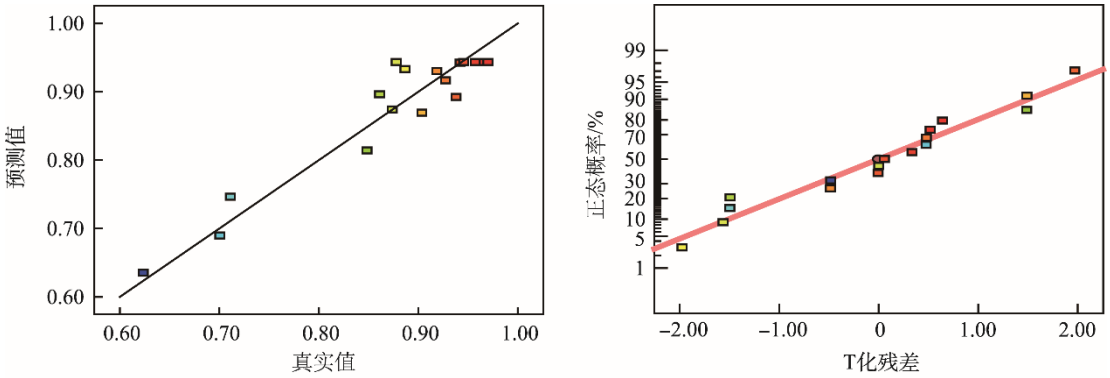
相关系数 $R^2$=0.9535，说明所获得的模型具有较好拟合性，能够较好地反应响应值与自变量之间的关系[20]；模型校正决定系数 $R^2_{adj}$=0.9324，超过 90%，说明所得模型能够很好地解释响应值的变化[21]；3.76%的变异系数表明试验重复性较好，模型可信度较高[22]。由表 5 可知，对可食胶黏剂总分有极显著影响的因素是 $A$，$AC$，$C^2$，具有显著影响的因素是 $BC$，$A^2$，其余因素对响应值的影响均不显著。响应值对 3 个考察因素的敏感程度依次为：糯米粉质量分数（$A$）> 明胶质量分数（$B$）> 鱼鳔胶质量分数（$C$）。

表 5　回归模型方差分析

**Tab.5 Analysis of variance for regression model**

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | $F$ 值 | $P$ 值 | 显著性 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 模型 | 0.1500 | 9 | 0.0170 | 7.59 | 0.0070 | ＊＊ |
| $A$ | 0.0004 | 1 | 0.0004 | 0.17 | 0.6892 | ＊＊ |
| $B$ | 0.0060 | 1 | 0.0060 | 2.73 | 0.1423 | |
| $C$ | 0.0093 | 1 | 0.0093 | 4.27 | 0.0776 | |
| $AB$ | 0.0001 | 1 | 0.0001 | 0.01 | 0.9282 | |
| $AC$ | 0.0370 | 1 | 0.0370 | 17.03 | 0.0044 | ＊＊ |
| $BC$ | 0.0130 | 1 | 0.0130 | 6.13 | 0.0424 | ＊ |
| $A^2$ | 0.0210 | 1 | 0.0210 | 9.41 | 0.0181 | ＊ |
| $B^2$ | 0.0057 | 1 | 0.0057 | 2.63 | 0.1488 | |
| $C^2$ | 0.0550 | 1 | 0.0550 | 25.41 | 0.0015 | ＊＊ |
| 残差 | 0.0150 | 7 | 0.0022 | | | |
| 失拟项 | 0.0096 | 3 | 0.0032 | 2.26 | 0.2231 | 不显著 |
| 纯误差 | 0.0057 | 4 | 0.0014 | | | |
| 总和 | 0.1600 | 16 | $R^2$=0.9535；校正决定系数 $R_{adj}^2$=0.9324；变异系数 CV=3.76% | | | |

注：＊＊表示差异极显著（$P<0.01$）；＊表示差异显著（$P<0.05$）




a 真实值与预测值关系　　b T化残差

图 4　综合分实测值与预测值相关性

Fig.4 Correlation of actual and predicted values of comprehensive score

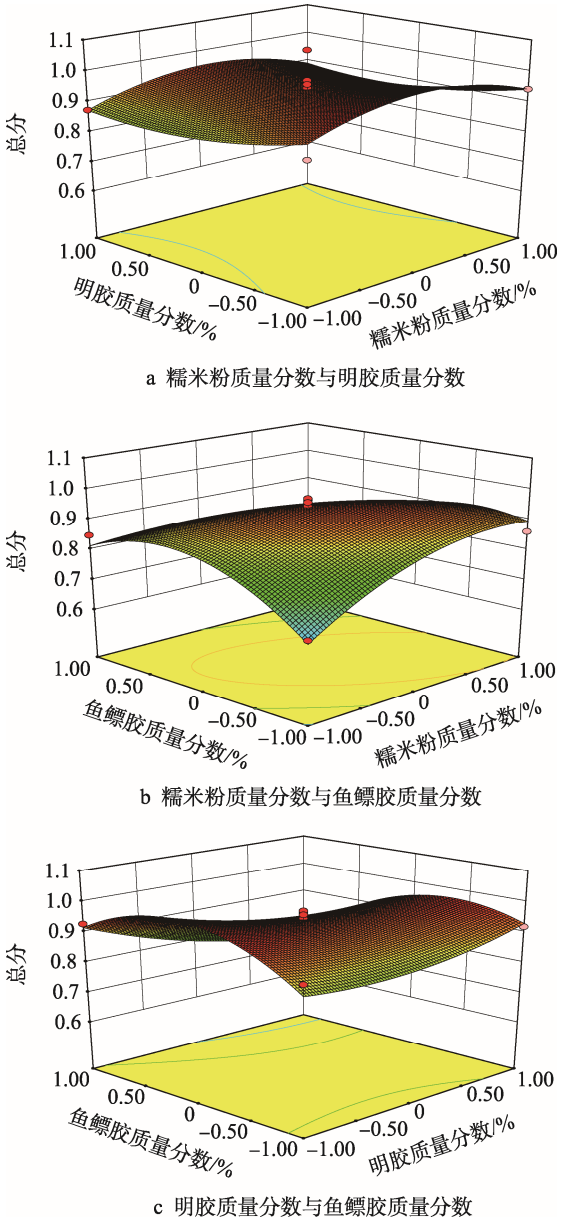
两因素交互作用对可食胶黏剂总分影响的响应面见图 5。由图 5a 可知，根据响应面的陡峭程度，糯米粉质量分数对可食胶黏剂总分的影响程度大于明胶，糯米粉质量分数固定时，改变明胶质量分数对可食胶黏剂总分的影响并不明显；当明胶质量分数固定后，随着糯米粉质量分数的增加，可食胶黏剂的总分呈现先升高后降低的趋势，糯米粉质量分数和明胶质量分数并无显著的交互作用。

由图 5b 可知，糯米粉质量分数和鱼鳔胶质量分数的等高线呈明显的椭圆形，说明两者之间具有极显著的交互作用，响应面具有顶点。等高线的椭圆中心在响应面的下方，说明在试验范围内，糯米粉质量分数和鱼鳔胶质量分数具有协同作用，能够相互促进[23—24]。

由图 5c 可知，明胶质量分数对可食胶黏剂总分的影响要大于鱼鳔胶。鱼鳔胶本身具有较高的粘度和拉伸强度[25]，随着鱼鳔胶质量分数的增加，单位体积成膜溶液中溶质增加，从而加强了溶质分子间的作用力[26]，故可食胶黏剂的粘度和拉伸强度增加，形成的胶膜更加致密，进而可食胶黏剂的吸水率降低，耐水性增强。然而，当鱼鳔胶质量分数增加到一定程度时，胶黏剂溶液不能均匀分散且部分不溶，导致胶膜不均匀，进而使其局部断裂的几率增大，可食胶黏剂总分降低[27—29]。

## 3.3　验证试验

通过 Design-Expert 8.06 软件对试验结果进行响应面分析，得到可食胶黏剂总分的二次回归方程，再经方程分析获得最佳工艺条件：糯米粉质量分数为 30%，明胶质量分数为 15%，鱼鳔胶质量分数为 20%，可食胶黏剂总分预测值为 0.996。采取可食胶黏剂的最佳工艺条件验证模型的实用性和可靠性，进行 5 次平行试验，所得胶黏剂总分实测为 0.957，与预测值非常接近，这充分说明文中方法可用少量试验预测各因素之间的交互作用以及交互作用对产品性能的影响。所建模型用于优化可食胶黏剂的制备可靠可信，有一定的实用价值。




a 糯米粉质量分数与明胶质量分数

b 糯米粉质量分数与鱼鳔胶质量分数

c 明胶质量分数与鱼鳔胶质量分数

图 5　两因素交互作用对可食胶黏剂总分影响的响应面

Fig.5 Response surface showing the interactive effects of two factors on the comprehensive score of edible adhesive

## 4 结语

为制备性能优良、成本低廉的可食胶黏剂，文中通过试验考察糯米粉、明胶、鱼鳔胶单因素对可食胶黏剂 4 项性能指标的影响并通过 Design-Expert 8.06 软件的中心组合设计，建立 3 因素对可食胶黏剂总分影响的数学模型。经试验验证，该模型能够用于优化可食胶黏剂的制备工艺。在预测条件下，可制得性能总分为 0.957 的可食胶黏剂，经检测糯米胶、明胶、鱼鳔胶性能总分分别为 0.806，0.612，0.882，与单一食用胶相比，该方法制得的可食胶黏剂具有一定的性能优势。

通过模糊综合评价将区间内模糊的性能指标进行量化，获得模糊转化后的隶属度，再利用主成分分析法客观地确定各指标的权重，不仅将不便于比较的多项性能进行了统一，而且有效避免了人为赋权的主观随意性，将 2 种方法进行有机结合，为多因素多指标的产品生产、制备工艺的优化提供了高效客观的解决途径。

**参考文献：**


[1] 牛丽亚, 涂瑾, 朱慧敏, 等. 食用胶对碎米基鱼粉品质改良的研究[J]. 食品科技, 2016, 41(12): 235—238.
NIU Li-ya, TU Jin, ZHU Hui-min, et al. Improved Effect of Hydrocolloids on Broken Rice Noodles Equipped by Fish Surimi[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(12): 235—238.

[2] LIU R, CONG X, SONG Y, et al. Edible Gum-phenolic-lipid Incorporated Gluten Films for Food Packaging[J]. Journal of Food Science, 2018, 83: 1622—1630.

[3] GUO J, LIU Y C, YANG X Q, et al. Fabrication of Edible Gellan Gum/soy Protein Ionic-covalent Entanglement Gels with Diverse Mechanical and Oral Processing Properties[J]. Food Research International, 2014, 62(8): 917—925.

[4] 王绍文. 复合食品改良剂对不同糯米粉糊化特性及汤圆品质的影响[J]. 粮食与食品工业, 2016, 23(2): 66—69.
WANG Shao-wen. The Effect of Compound Food Ingredients in Feature on Different Glutinous Rice and Quality of Quick-frozen Glue Pudding[J]. Cereal and Food Industry, 2016, 23(2): 66—69.

[5] GÓMEZ-GUILLÉN M C, GIMÉNEZ B, LÓPEZ-CABALLERO M E, et al. Functional and Bioactive Properties of Collagen and Gelatin from Alternative Sources: A review[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(8): 1813—1827.

[6] KARIM A A, BHAT R. Fish Gelatin: Properties, Challenges, and Prospects as an Alternative to Mammalian Gelatins[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 563—576.

[7] 杜娟. 涂布纸涂层固化过程中胶粘剂迁移机理的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2010.
TU Juan. Study on Binder Migration Mechanism During the Consolidation of the Structure of Coatings[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2010.

[8] 杜双奎, 杨红丹, 于修烛, 等. 商品粳米、籼米、糯米品质特性和糊化特性比较研究[J]. 食品科学, 2010, 31(5): 78—81.
DU Shuang-kui, YANG Hong-dan, YU Xiu-zhuo, et al. Quality Properties of Commercial Rice[J]. Food Science, 2010, 31(5): 78—81.

[9] 杨晖, 马良, 于玮, 等. 兔皮明胶功能特性及其影响因素[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 7—12.
YANG Hui, MA Liang, YU Wei, et al. Functional Characteristics and Influencing Factors of Rabbit Skin Gelatin[J]. Food Science, 2016, 37(23): 7—12.

[10] 杨璐, 王丽琴, 黄建华, 等. 文物胶料鱼鳔胶的红外光谱、拉曼光谱及氨基酸分析[J].西北大学学报(自然科学版), 2011, 41(1): 63—66.
YANG Lu, WANG Li-qin, HUANG Jian-hua, etal. The Investigation of Fish Bladder Glue, a Kind of Binder Commonly Used in Painted Relics, by Using FTIR, Micro-Raman Spectroscopy and Amino Acid Analysis[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2011, 41(1): 63—66.

[11] GB/T 2794—2013, 胶粘剂黏度的测定[S].
GB/T 2794—2013, Determination of Adhesive Viscosity [S].

[12] GB/T 1040—2006, 塑料拉伸性能的测定[S].
GB/T 1040—2006, Determination of Tensile Properties of Plastics[S].

[13] 闫怀义, 李建伟, 刘成琪, 等. 氨基甲酸酯支链淀粉的制备[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(10): 57—60.
YAN Huai-yi, LI Jian-wei, LIU Cheng-qi, et al. Preparation of Amylopectin Carbaminate[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(10): 57—60.

[14] 张彦粉, 姚瑞玲. 纳米 $TiO_2$ 对水性聚氨酯胶粘剂品质的影响研究[J]. 中国胶粘剂, 2017, 26(6): 13—18.
ZHANG Yan-fen, YAO Rui-ling. Study on the Effect of Nanometer $TiO_2$ on the Quality of Waterborne Polyurethane Adhesive[J]. China Adhesives, 2017, 26(6): 13—18.

[15] 何超, 李萌, 李婷婷, 等. 多目标综合评价中四种确定权重方法的比较与分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, 38(2): 172—178.
HE Chao, LI Meng, LI Ting-ting, et al. Comparison and Analysis of the Four Methods of Determining Weights in Multi-objective Comprehensive Evaluation[J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2016, 38(2): 172—178.

[16] 刘魁英. 食品研究与数据分析[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2015.

LIU Kui-ying. Food Study and Data Analysis[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2015.

[17] SHIN S, PARK S, PARK M, et al. Cellulose Nanofibers for the Enhancement of Printability of Low Viscosity Gelatin Derivatives[J]. Bioresources, 2017, 12(2): 2941—2954.

[18] 林好, 吴先辉, 汪秀妹,等. 魔芋葡甘聚糖/明胶流变特性及其成膜研究[J].中国粮油学报, 2014, 29(10): 28—34.
LIN Hao, WU Xian-hui, WANG Xiu-mei, et al. The Rheological Characteristics of the Konjac Glucomannan and Gelatin Mixed Solution and Its Effect on the Membrane [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(10): 28—34.

[19] 屈峰. 一件紫檀嵌粉彩瓷片椅的修复研究[J]. 故宫博物院院刊, 2015, (3): 126—135.
Qu Feng. The Repair of a Red Sandalwood Armchair with Famille Rose Decorative Porcelain Inlay[J]. Palace Museum Journal, 2015, (3): 126—135.

[20] OLIVEIRA T I, ROSA M F, CAVALCANTE F L, Et al. Optimization of Pectin Extraction from Banana Peels with Citric Acid by Using Response Surface Methodology[J]. Food Chemistry, 2016, 198: 113—118.

[21] SUMIC Z, VAKULA A, TEPIC A, et al. Modeling and Optimization of Red Currants Vacuum Drying Process by Response Surface Methodology (RSM)[J]. Food Chemistry, 2016, 203: 465—475.

[22] MOHAMMADI R, MOHAMMADIFAR M A, MORTAZAVIAN A M, et al. Extraction Optimization of Pepsin-Soluble Collagen from Eggshell Membrane by Response Surface Methodology (RSM)[J]. Food Chemistry, 2016, 190: 186—193.

[23] 肖乃玉, 郑万里, 陈少君, 等. 响应面优化罗非鱼胶原蛋白膜的研制[J]. 包装工程, 2013, 34(23): 27—32.
XIAO Nai-yu, ZHENG Wan-li, CHEN Shao-jun, et al. Preparation of Tilapia Collagen Food Packaging Film by Response Surface Methodology Optimization[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 27—32.

[24] BEJAOUI M A, BELTRAN G, AGUILERA M P, et al. Continuous Conditioning of Olive Paste by High Power Ultrasounds: Response Surface Methodology to Predict Temperature and Its Effect on Oil Yield and Virgin Olive Oil Characteristics[J]. LWT—Food Science and Technology, 2016, 69: 175—184.

[25] 钟乐, 肖乃玉, 翟万京. 响应面优化明胶—壳聚糖可食性复合膜的制备[J]. 包装工程, 2017, 38(19): 98—103.
ZHONG Le, XIAO Nai-yu, ZHAI Wan-jing. Gelatin—chitosan Edible Composite Film Preparation through Response Surface Optimization[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(19): 98—103.

[26] 郭兴凤, 胡二坤. 制备条件对胶原蛋白膜拉伸特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2008, 29(1): 4—6.
GUO Xing-feng, HU Er-kun. Effect of Perpetrating Conditions on the Tensile Properties of Collagen Protein Film[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2008, 29(1): 4—6.

[27] OBEROI D P S, SOGI D S. Utilization of Watermelon Pulp for Lycopene Extraction by Response Surface Methodology[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 316—321.

[28] 蔡路昀, 宋艳艳, 部建雯,等. 鱼源明胶改性的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(14): 359—362.
CAI Lu-yun, SONG Yan-yan, BU Jian-wen, et al. Research Progress of Modification on Fish Gelatin Properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(14): 359—362.

[29] 庞现红. 蛋白质模型分子水溶液中溶质—溶质相互作用的热力学研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
PANG Xian-hong. Studies on the Thermodynamic Properties between the Solute-Solute Interactions in the Aqueous Solutions of Protein Model Molecules[D]. Jinan: Shandong University, 2008.