

# 一种绿色食用油墨制备工艺的优化

刘世锋<sup>1</sup>, 姚瑞玲<sup>2</sup>, 高巧侠<sup>3</sup>

(1.重庆工贸职业技术学院, 重庆 408000; 2.四川工商职业技术学院, 成都 611830;

3.重庆商务职业学院, 重庆 401331)

**摘要:** **目的** 优化食用油墨制备工艺, 改善其存储稳定性。 **方法** 将主成分分析法和隶属度综合评价法相结合, 确定食用油墨 4 项性能指标的总分计算方法, 以单因素试验结果为基础, 以食用油墨总分为响应值, 采用响应面分析法确定食用油墨的最佳制备工艺, 并研究果绿染料含量、阿拉伯胶含量和乙醇含量对食用油墨性能的影响及彼此之间的交互作用。 **结果** 当果绿染料质量分数为 3.00%、阿拉伯胶质量分数为 6.00%、乙醇质量分数为 25.00%时, 食用油墨的综合得分最高。 **结论** 在优化条件下, 可获得总分为 0.955 的食用油墨; 实现了多因素多指标产品的客观评价, 工艺和评价方法可用于指导生产。

**关键词:** 食用油墨; 果绿染料; 阿拉伯胶; 乙醇; 响应面

**中图分类号:** TS852 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)15-0136-08

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.15.022

## Optimization of Preparation Technology of a Green Edible Ink

LIU Shi-feng<sup>1</sup>, YAO Rui-ling<sup>2</sup>, GAO Qiao-xia<sup>3</sup>

(1.Chongqing Industry & Trade Polytechnic, Chongqing 408000, China; 2.Sichuan Technology & Business College, Chengdu 611830, China; 3.Chongqing Business Vocational College, Chongqing 401331, China)

**ABSTRACT:** The work aims to optimize the preparation technology of edible ink and improve its storage stability. The fuzzy synthetic evaluation method was combined with the principal component analysis to determine the total score calculating method of 4 performance indicators of edible ink. Based on the results of single factor experiment, with total score of edible ink as response value, the response surface analysis was carried out to determine the optimal preparation technology of edible ink, and to research the impacts of mass fractions of light green dye, Arabic gum and ethanol on properties of edible ink and their interactions. When mass fraction of light green dye was 3.00%, mass fraction of Arabic gum was 6.00%, and mass fraction of ethanol was 25.00%, the comprehensive scores of edible ink was the highest. Under optimal conditions, edible ink with a total score of 0.955 can be obtained. Objective evaluation of multi-factor and multi-index products is realized, and the technology and evaluation method can be used to guide production.

**KEY WORDS:** edible ink; light green dye; Arabic gum; ethanol; response surface

食用油墨的应用可以大大减少传统油墨对食用产品的污染,降低儿童包装印刷品中因油墨迁移导致的潜在风险,也可以提高食品的外观形象,为客户提供更加丰富的产品<sup>[1-3]</sup>。食用油墨的众多优势引起了

行业大量的关注<sup>[4-5]</sup>,随着科技的发展,食用油墨的品种虽然逐渐丰富,但并未改变食用油墨颜色种类稀少且价格昂贵的现状,市售食用油墨颜色主要是黑、黄、红、青等 4 种颜色。国内食用油墨生产厂家主要

收稿日期: 2019-01-17

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); 四川工商职业技术学院立项目 (2017NC04)

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。

有上海全金康馨油墨科技有限公司、上海延安药业有限公司、武汉科亿华科技有限公司 3 家，其中上海全金康馨油墨科技有限公司、上海延安药业有限公司生产的食用油墨被称为药用油墨，主要用于胶囊、药片等药品表面内容的印制，尚未在食品产业中应用<sup>[6]</sup>；武汉科亿华科技有限公司生产的食用油墨主要用于咖啡拉花、鸡蛋、苹果表面印字，均需要配备专门设计的印刷机；美国亚马逊官网销售的食用油墨可以使用市售的兄弟、佳能、惠普等品牌喷墨打印机进行打印，主要由 4 家生产厂商，价格分别为 15.99（Inkedibles 公司，规格为 100 mL）、17.5（Tasty Imaginations 公司，规格为 4 盎司（约 118 mL））、11.8（kopycake 公司，规格为 2 盎司（约 59 mL））、18（Icinginks 公司，规格为 4 盎司（约 118 mL））美元。美国亚马逊网站的消费者评价表明，在打印过程中，上述各品牌食用油墨均会出现不同程度的堵塞、打印图像色彩不稳定、保质期状态不稳定等问题。范小平等<sup>[1]</sup>、孙菁梅<sup>[7]</sup>、姚瑞玲<sup>[8]</sup>虽都对食用油墨的制备工艺及油墨性能进行了研究，但对食用油墨的防阻塞性能、存储稳定性和生产成本并未进行深入探讨，该研究的目的是开发一种绿色食用油墨，并对其性能进行研究，以期获得一种防阻塞性能更好、呈色更稳定、保质期更长、性能优良、价格合适的食用油墨。

## 1 试验

### 1.1 材料与设备

#### 1.1.1 材料

材料主要有果绿，北京东方凯尔经贸有限公司；阿拉伯胶、乙醇，重庆九龙化学试剂厂；去离子水，自制。

#### 1.1.2 仪器设备

仪器主要有 PRO-E-UP 型卓的超纯水机，卓的仪器设备（上海）有限公司；HH-4 数显恒温循环水浴锅，常州国华电器有限公司；S-L180G 恒速搅拌器，上海申胜生物技术有限公司；EPSON L313 喷墨打印机，精工爱普生株式会社；NDJ-79 油墨旋转粘度计，上海精密仪器仪表有限公司；JYW-200A 全自动表面界面张力仪，承德金和仪器制造有限公司；PHSJ-5 型台式数显酸度计，上海精密科学仪器有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 油墨制备

称取定量的果绿染料置于烧杯，并分散在去离子水和乙醇混合液中（45~50℃水浴）。随后加入一半的阿拉伯胶溶液，通过高速搅拌使其混合均匀。混合完成后加入另一半阿拉伯胶溶液，并高速搅拌使其混合均匀，即得试验用油墨<sup>[7]</sup>。

#### 1.2.2 防堵塞测试

将打印机墨仓清洗并晾干，将制备的油墨加入墨仓，打印“鑫”字（黑体加粗小二号），每页 A4 纸打印 506 字，每天自上午 8:00 开始打印，每小时打印 1 次，每次打印 30 页；下午 20:00 后，每次打印 50 页，间歇 3 h，以此类推，直至打印机警示阻塞或墨仓墨水用尽时停止打印，记录打印纸张数量，打印样张见图 1。

#### 1.2.3 稳定性测试

在油墨刚制备完成时及油墨静止 60 d 后，分别测试油墨的粘度、表面张力系数和 pH 值，计算新鲜油墨和静止存储 60 d 后油墨的粘度、表面张力系数和 pH 值差值，差值越小性能越稳定，计分标准见表 1。

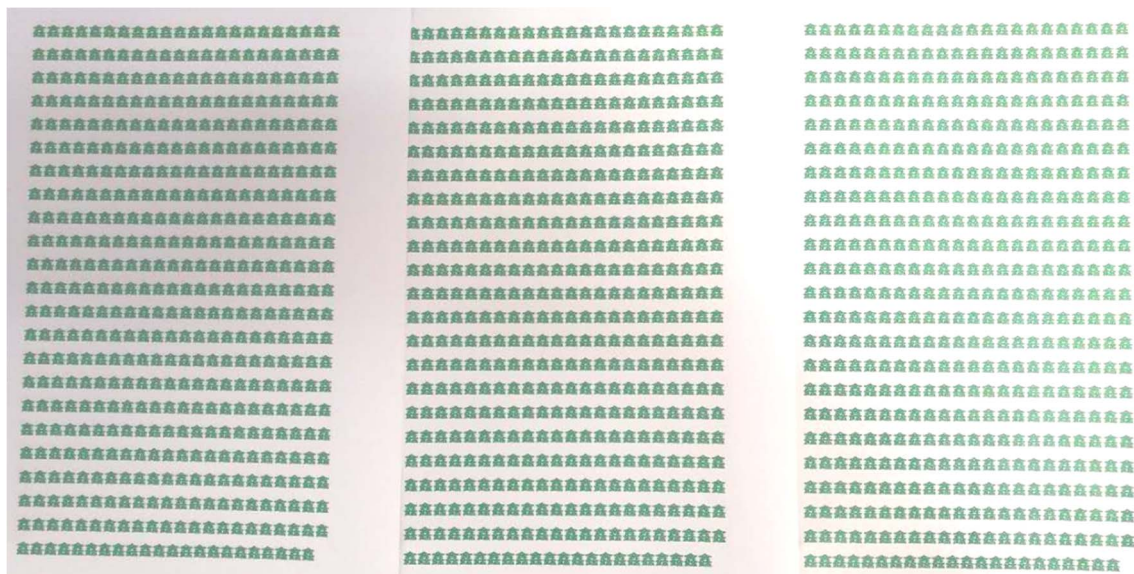


图 1 打印样张  
Fig.1 Print proof

表 1 油墨稳定性计分标准  
Tab.1 Scoring criteria for stability of inks

| 得分                          | 5                        | 3                                  | 1                                  | 0                           |
|-----------------------------|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 粘度变化( $\Delta\eta$ )        | $\Delta\eta < 0.3$       | $0.3 \leq \Delta\eta < 0.5$        | $0.5 \leq \Delta\eta < 0.7$        | $\Delta\eta \geq 0.7$       |
| 表面张力系数变化( $\Delta\alpha$ )  | $\Delta\alpha < 1.0$     | $1.0 \leq \Delta\alpha < 1.5$      | $1.5 \leq \Delta\alpha < 2.0$      | $\Delta\alpha \geq 2.0$     |
| pH 值变化( $\Delta\text{pH}$ ) | $\Delta\text{pH} < 0.25$ | $0.25 \leq \Delta\text{pH} < 0.50$ | $0.50 \leq \Delta\text{pH} < 0.75$ | $\Delta\text{pH} \geq 0.75$ |

### 1.2.4 粘度测试

利用 NDJ-79 旋转粘度计进行测定。

### 1.2.5 综合指标测定

利用隶属度函数<sup>[9]</sup>将粘度变化( $\Delta\eta$ )、表面张力系数变化( $\Delta\alpha$ )、pH 值变化( $\Delta\text{pH}$ )和打印纸张数量等 4 项试验数据进行模糊转换,在 4 项性能指标中,打印纸张数量为正效应,以式(1)计算隶属度, $\Delta\eta$ 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\text{pH}$  为负效应,以式(2)计算隶属度。

$$P = \frac{A_i - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \quad (\text{正效应}) \quad (1)$$

$$P = \frac{A_{\max} - A_i}{A_{\max} - A_{\min}} \quad (\text{负效应}) \quad (2)$$

式中:  $P$ ,  $A_i$ ,  $A_{\min}$ ,  $A_{\max}$  分别为隶属度、指标值、指标所在列最小值、指标所在列最大值。

对 $\Delta\eta$ ,  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\text{pH}$  和打印纸张数量等 4 项食用油墨性能指标进行隶属度计算,并进行模糊转换,然后应用主成分分析法降低性能指标维度,同时确定在食用油墨评分中 4 项指标的权重,实现指标权重的客观计算,避免人为赋权的主观随意性<sup>[8]</sup>。

食用油墨性能综合得分  $S$  按式(3)计算。

$$S = aP_1 + bP_2 + cP_3 + dP_4 \quad (3)$$

式中:  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  分别为打印纸张数量、 $\Delta\eta$ 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\text{pH}$  的隶属度;  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  分别为打印纸张数量、 $\Delta\eta$ 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\text{pH}$  等 4 项指标的权重。

## 1.3 数据分析

应用 Excel 2013 完成单因素试验结果分析;应用 SPSS 22 软件完成主成分分析;应用隶属度函数完成模糊转换;应用软件 Design-Expert V8.06 完成响应面试验设计并进行分析。除打印纸张数量外,数据均为 3 次重复试验平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素试验

#### 2.1.1 染料用量的确定

染料为油墨中的呈色物质,用以表现颜色,为获得良好的印刷效果,油墨中必须含有适量的染料<sup>[10]</sup>。试验中的油墨以果绿为染料,果绿主要由亮蓝、柠檬黄 2 种色素复合而成<sup>[11]</sup>,在测试其可见光吸收光谱时,具有多个吸收峰,最大吸收波长为 257, 428,

630 nm,其中 630 nm 吸收峰最大。记录不同染料质量分数的油墨 3 个最大吸收波长总的吸光度,确定较为适宜的染料用量。染料质量分数对食用油墨吸光度的影响见图 2,由图 2 可知,在试验范围内,当果绿质量分数小于 3.0%时,随着果绿染料质量分数的增加,油墨的吸光度逐渐增大,说明油墨中果绿质量分数较低,颜色的表现能力较弱;当食用油墨中果绿质量分数 $\geq 3.0\%$ 时,吸光度趋于平稳,果绿质量分数的增加并不能显著提升油墨的颜色表现,因此,选用质量分数为 3.0%的果绿进行后续的食用油墨制备试验。

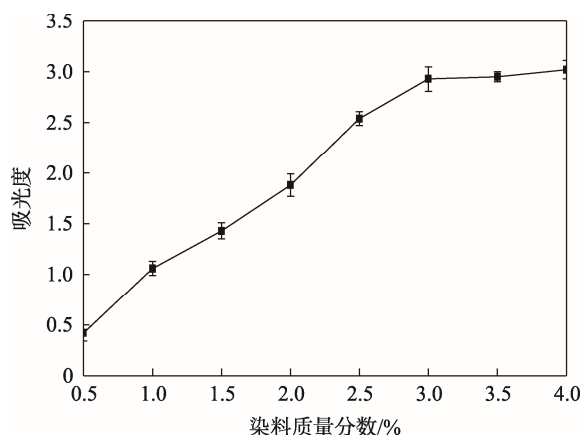


图 2 染料质量分数对食用油墨吸光度的影响  
Fig.2 Influence of mass fraction of dye on the absorbance of the edible ink

#### 2.1.2 阿拉伯胶用量的确定

粘度是食用油墨表现良好印刷特性的要素之一,其大小主要取决于连结料的种类和含量<sup>[12-13]</sup>。小型喷墨打印机的喷孔较小,其要求的油墨粘度很低<sup>[14]</sup>。对进口食用喷墨油墨进行检测发现,其粘度大约为 8.35 mPa·s。试验选用阿拉伯胶作为连结料,研究阿拉伯胶质量分数与油墨粘度之间的关系,结果见图 3。由图 3 可知,阿拉伯胶质量分数与油墨粘度近似于线性关系,当阿拉伯胶质量分数为 6.0%时,制备的食用油墨粘度最接近 8.35 mPa·s,因此,以质量分数为 6.0%的阿拉伯胶进行后续的食用油墨制备试验。

#### 2.1.3 乙醇用量的确定

在油墨的制备过程中,助剂的种类和用量是油墨能否形成稳定体系的关键因素<sup>[15]</sup>,食用油墨同样需要乳化剂、稳定剂、消泡剂等助剂维持其制备后的稳定

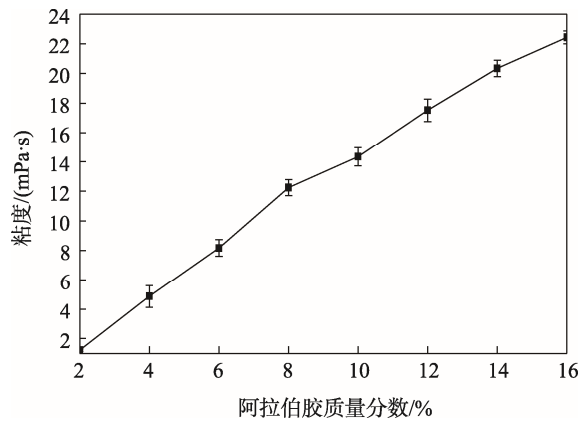


图 3 阿拉伯胶质量分数对食用油墨粘度的影响  
Fig.3 Influence of mass fraction of Arabic gum on the viscosity of the edible ink

性<sup>[16]</sup>。常用的可食用乳化剂和稳定剂有卵磷脂、阿拉伯胶等<sup>[17]</sup>。阿拉伯胶在食用油墨制备中起到促进乳化和水胶体稳定的作用，此试验使用阿拉伯胶作为助剂，同时也作为连结料。除此之外，该食用油墨为水性体系，其表面张力较大，且在预试验制备食用油墨时有大量气泡产生，因此需要降低油墨的表面张力并消除泡沫。乙醇能够促进有机和无机物质的相互融合，也可作为助剂消除食用油墨制备过程中的泡沫，还能降低油墨表面张力，提高墨膜干燥速度<sup>[18]</sup>，因此试验选择乙醇作为助剂。乙醇质量分数对食用油墨表面张力的影响见图 4，由图 4 可知，随着乙醇质量分数的增加，油墨表面张力呈减小趋势，当乙醇质量分数小于 25% 时，油墨表面张力随乙醇质量分数的增加迅速降低；当乙醇质量分数≥25% 时，油墨表面张力随乙醇质量分数的增加仅有轻微下降，但差异并不显著（ $P>0.05$ ）。这表明在一定范围内乙醇能够有效调节油墨表面张力，喷墨油墨的表面张力一般在 30~35 mN/m，因此为达到适合喷墨印刷的性能要求，以质量分数为 25.0% 的乙醇进行后续的食用油墨制备试验。

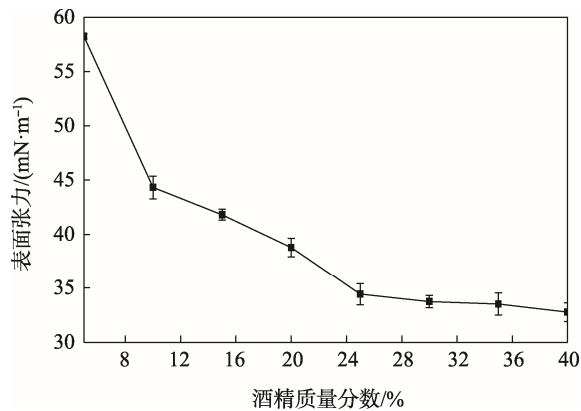


图 4 乙醇质量分数对食用油墨表面张力的影响  
Fig.4 Influence of mass fraction of ethanol on the surface tension of the edible ink

2.2 响应面试验

2.2.1 权重及隶属度确定

通过式(1—2)将实测值转换为模糊值，并将 $\Delta\eta$ 、 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\text{pH}$ 和打印纸张数量等 4 项指标的模糊参数分别记为  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ ，即得模糊矩阵，见表 2。随后对模糊矩阵进行主成分分析，结果见表 3，方差贡献率为其权重，相关系数为  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 。通过式(3)，由食用油墨 4 项性能指标权重及隶属度计算每次试验制备的食用油墨总得分。

表 2 单因素试验测定值和模糊矩阵  
Tab.2 Test data and fuzzy matrix of single factor experiment

| 试验号 | 测定值          |                |                   |     | 模糊矩阵  |       |       |       |
|-----|--------------|----------------|-------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
|     | $\Delta\eta$ | $\Delta\alpha$ | $\Delta\text{pH}$ | 印张数 | $K_1$ | $K_2$ | $K_3$ | $K_4$ |
| 1   | 5            | 3              | 3                 | 380 | 1     | 0.5   | 0.6   | 0.63  |
| 2   | 5            | 5              | 5                 | 398 | 1     | 1     | 1     | 0.78  |
| 3   | 1            | 3              | 3                 | 303 | 0.2   | 0.5   | 0.6   | 0.00  |
| 4   | 5            | 1              | 1                 | 321 | 1     | 0     | 0.2   | 0.15  |
| 5   | 5            | 5              | 5                 | 407 | 1     | 1     | 1     | 0.85  |
| 6   | 3            | 3              | 1                 | 350 | 0.6   | 0.5   | 0.2   | 0.39  |
| 7   | 1            | 1              | 5                 | 364 | 0.2   | 0     | 1     | 0.50  |
| 8   | 5            | 5              | 5                 | 425 | 1     | 1     | 1     | 1.00  |
| 9   | 1            | 5              | 1                 | 332 | 0.2   | 1     | 0.2   | 0.24  |
| 10  | 3            | 1              | 0                 | 306 | 0.6   | 0     | 0     | 0.02  |
| 11  | 3            | 3              | 5                 | 360 | 0.6   | 0.5   | 1     | 0.47  |
| 12  | 3            | 5              | 3                 | 374 | 0.6   | 1     | 0.6   | 0.58  |
| 13  | 3            | 5              | 5                 | 377 | 0.6   | 1     | 1     | 0.61  |
| 14  | 5            | 3              | 0                 | 331 | 1     | 0.5   | 0     | 0.23  |
| 15  | 0            | 3              | 5                 | 329 | 0     | 0.5   | 1     | 0.21  |
| 16  | 5            | 5              | 5                 | 413 | 1     | 1     | 1     | 0.90  |
| 17  | 3            | 5              | 5                 | 395 | 0.6   | 1     | 1     | 0.75  |

表 3 主成分分析结果  
Tab.3 Result of principal component analysis

| 主成分 | 特征值   | 方差贡献率/% | 累积方差/%  | 相关系数  |       |       |       |
|-----|-------|---------|---------|-------|-------|-------|-------|
|     |       |         |         | $r_1$ | $r_2$ | $r_3$ | $r_4$ |
| 1   | 2.364 | 59.089  | 59.089  | 0.63  | -0.49 | 0.57  | 0.21  |
| 2   | 1.042 | 26.053  | 85.142  | 0.41  | 0.87  | 0.22  | 0.19  |
| 3   | 0.511 | 12.778  | 97.920  | 0.60  | -0.10 | -0.79 | 0.09  |
| 4   | 0.083 | 2.080   | 100.000 | 0.28  | 0.06  | 0.09  | -0.96 |

2.2.2 回归方程及方差分析

将果绿质量分数、阿拉伯胶质量分数、乙醇质量分数分别标记为  $A$ 、 $B$ 、 $C$ ，对自变量的因素水平进行编码，结果见表 4。

表 4 因素水平及编码  
Tab.4 Factor level and code

| 水平 | A/% | B/% | C/% |
|----|-----|-----|-----|
| -1 | 2   | 4   | 20  |
| 0  | 3   | 6   | 25  |
| 1  | 4   | 8   | 30  |

优化试验中, 根据式 (3) 计算食用油墨总分, 并以计算结果为 Box-Behnken 试验设计的响应值。根据单因素试验的结果, 选择最优条件进行 Box-Behnken 试验设计 (见表 5)。

应用 Design-ExpertV8.0.6 对表 5 中的试验结果进行分析, 以食用油墨总分为响应值, 对试验数据进行多元回归拟合, 即得食用油墨总分对自变量的回归方程。

$$S=0.935+0.012A-0.043B-0.030C+0.011AB-0.102AC-0.066BC-0.085A^2+0.058B^2-0.122C^2 \quad (4)$$

式中:  $S$  为食用油墨总分;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  分别为果绿质量分数、阿拉伯胶质量分数和乙醇质量分数。对食用油墨总分的回归方程进行显著性检验和方差分析, 结果见表 6。由表 6 可知, 回归模型  $P$  值为 0.0134, 表现为显著 ( $P < 0.05$ ); 失拟项  $P=0.2767$ , 表现为不显著; 相关系数  $R^2=0.9861$ , 说明模型的拟合性较好, 自变量和响应值之间的关系得到了理想的模拟<sup>[19]</sup>; 模型  $R^2_{adj}=0.9398$ , 校正决定系数大于 90%, 表明响应值的变化在模型中得到了很好的解释<sup>[20]</sup>;  $C_V=2.18\%$ , 表明变异系数较小, 模型可信度较高, 试验具有较好的结果重现性<sup>[21]</sup>。此外, 因素  $A^2$  对食用油墨总分有极显著影响, 因素  $B$ ,  $AC$ ,  $B^2$  有显著影响, 其余因素均不显著。综合分实测值与预测值的相关性见图 5。由图 5 可知, 模型真实值与预测值的拟合点较均匀地

表 5 Box-Behnken 试验设计与结果  
Tab.5 Box-Behnken experiment design and results

| 试验号 | A  | B  | C  | 总分        |
|-----|----|----|----|-----------|
| 1   | -1 | 0  | -1 | 0.803 526 |
| 2   | 0  | 0  | 0  | 0.907 804 |
| 3   | -1 | 1  | 0  | 0.251 187 |
| 4   | 1  | -1 | 0  | 0.644 306 |
| 5   | 0  | 0  | 0  | 0.919 865 |
| 6   | 0  | 1  | 1  | 0.421 262 |
| 7   | 1  | 0  | 1  | 0.487 747 |
| 8   | 0  | 0  | 0  | 0.943 986 |
| 9   | 1  | 1  | 0  | 0.135 235 |
| 10  | 1  | 0  | -1 | 0.340 885 |
| 11  | -1 | -1 | 0  | 0.669 634 |
| 12  | 0  | -1 | 1  | 0.533 58  |
| 13  | 0  | -1 | -1 | 0.655 086 |
| 14  | 0  | 1  | -1 | 0.561 634 |
| 15  | -1 | 0  | 1  | 0.291 226 |
| 16  | 0  | 0  | 0  | 0.927 905 |
| 17  | 0  | 0  | 0  | 0.679 207 |

分布在直线两侧, 模型近似线性分布, 残差与正态概率之间也近似直线分布, 说明模型在试验范围内能够用于预测食用油墨的 4 项指标总分<sup>[22]</sup>。

各两因素交互作用对食用油墨总分影响的响应面见图 6。图 6a 的等高线形状及响应面陡峭程度表明染料质量分数的改变对食用油墨总分的影响程度大于阿拉伯胶质量分数。当染料质量分数固定时, 改变阿拉伯胶质量分数对食用油墨总分的影响并不明

表 6 回归模型方差分析  
Tab.6 Analysis of variance for the regression model

| 方差来源           | 平方和    | 自由度    | 均方      | F 值     | P 值    | 显著性                                              |
|----------------|--------|--------|---------|---------|--------|--------------------------------------------------|
| 模型             | 0.9100 | 9.0000 | 0.1000  | 6.0500  | 0.0134 | *                                                |
| A              | 0.0210 | 1.0000 | 0.0210  | 1.2400  | 0.3027 |                                                  |
| B              | 0.1600 | 1.0000 | 0.1600  | 9.5700  | 0.0175 | *                                                |
| C              | 0.0490 | 1.0000 | 0.0490  | 2.9300  | 0.1305 |                                                  |
| AB             | 0.0021 | 1.0000 | 0.0021  | 0.1200  | 0.7367 |                                                  |
| AC             | 0.1100 | 1.0000 | 0.1100  | 6.4800  | 0.0384 | *                                                |
| BC             | 0.0001 | 1.0000 | 0.0001  | 0.0053  | 0.9440 |                                                  |
| A <sup>2</sup> | 0.2800 | 1.0000 | 0.2800  | 16.5000 | 0.0048 | **                                               |
| B <sup>2</sup> | 0.1600 | 1.0000 | 0.1600  | 9.4800  | 0.0178 | *                                                |
| C <sup>2</sup> | 0.0810 | 1.0000 | 0.0810  | 4.8200  | 0.0642 |                                                  |
| 残差             | 0.1200 | 7.0000 | 0.0170  |         |        |                                                  |
| 失拟             | 0.0680 | 3.0000 | 0.0230  | 1.8600  | 0.2767 |                                                  |
| 纯误差            | 0.0490 | 4.0000 | 0.0120  |         |        |                                                  |
| 总离差            | 1.0300 |        | 16.0000 |         |        | $R^2=0.9861$ , $R_{adj}^2=0.9398$ , $C_V=2.18\%$ |

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

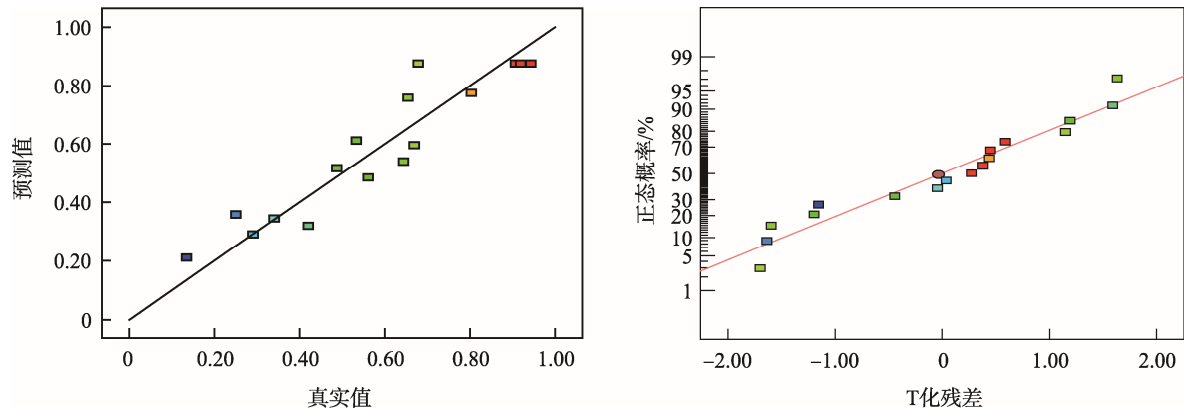


图 5 综合分实测值与预测值相关性  
Fig.5 Correlation between the actual and predicted values of the comprehensive score

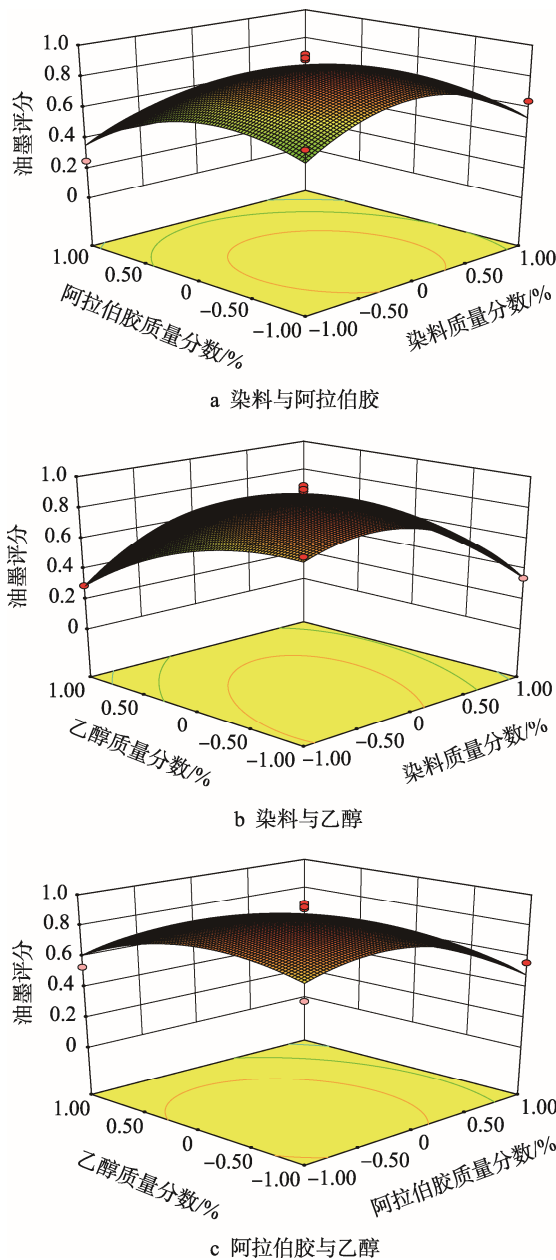


图 6 各两因素交互作用对食用油墨总分影响的响应面  
Fig.6 Response surface showing the effects of interaction among factors on the comprehensive score of the edible ink

显；当阿拉伯胶质量分数固定后，随着染料质量分数的增加，食用油墨的总分呈现先升高后降低的趋势，染料含量和阿拉伯胶含量并无显著交互作用（ $P > 0.05$ ）。

由图 6b 可知，染料质量分数和乙醇质量分数交互作用的等高线呈明显的椭圆形，表明两者之间的交互作用显著（ $P < 0.05$ ）。顶点在响应面上，椭圆中心在等高线内，说明在试验范围内，染料质量分数和乙醇质量分数能够相互促进，具有协同作用<sup>[23—24]</sup>。

由图 6c 可知，阿拉伯胶的含量对食用油墨总分的影响大于乙醇含量。阿拉伯胶具有较高的粘度，阿拉伯胶含量的改变能够显著影响食用油墨的粘度和喷墨打印机的打印效果，对油墨的防阻塞性能也有非常大的影响<sup>[25]</sup>，故适宜的阿拉伯胶含量能够有效改善食用油墨的防阻塞性能，改善打印产品质量。虽然响应值对乙醇含量的敏感程度低于阿拉伯胶，但乙醇的添加，可以有效消除食用油墨生产过程中产生的泡沫、降低油墨的表面张力、促进油墨中各组分在水中的溶解、维持油墨体系的长期稳定、提高油墨印刷后的干燥速度，是食用油墨制备过程中不可或缺的原料<sup>[26]</sup>。

2.3 验证试验

通过 Design-Expert8.06 软件获得食用油墨的总分回归方程，分析模型获得最优参数条件：染料质量分数为 3.00%，阿拉伯胶质量分数为 6.00%，乙醇质量分数为 25.00%，食用油墨总分预测值为 0.984。为验证模型的实用性及可靠性，以最优参数条件制备食用油墨并进行检测，所得食用油墨总分实测为 0.955，与预测值仅相差 0.029，预测值与实际值具有较高的吻合度，表明所建模型可靠可信，能够用于优化食用油墨的制备工艺，有一定的应用价值。

3 结语

为制备稳定性好、成本低廉的食用油墨，文中研究了果绿染料、阿拉伯胶、乙醇 3 个单因素对食用油

墨吸光度、粘度、表面张力系数等性能指标的影响,并通过 Design-Expert8.06 软件的中心组合设计,建立了 3 因素对食用油墨总分影响的数学模型。试验结果表明,该模型能够用于优化食用油墨的制备工艺。在预测条件下,可制得性能总分为 0.955 的食用油墨,该方法制得的食用油墨具有一定的性能优势;同时,试验制得的油墨成本约为 32 元/500 mL (耗水以 0.8 m<sup>3</sup>计,包括冲洗器皿设备、制备无离子水等,共计 2 元;耗电以 3 kW·h 计,约 3 元;食用级果绿以 100 元/500 g 计,约 3 元;化学纯乙醇以 16 元/500 mL 计,约 4 元;化学纯阿拉伯胶以 50 元/500 g 计,约 3 元;仪器设备损耗以 10 元计;人工费以 7 元计),具有巨大的价格优势。

通过隶属度函数完成不同性能指标的模糊转化,结合主成分分析法实现各指标权重的客观确定,从而统一了多项性能的比较方法。将隶属度函数模糊评价方法和主成分分析法有机结合,实现了多因素多指标产品的客观评价,为此类产品生产、制备工艺的优化提供了高效客观的评价方法。

#### 参考文献:

- [1] 范小平, 张钦发, 向红, 等. 网印用可食性油墨的研制及其性能研究[J]. 包装工程, 2010, 31(23): 43—46.  
FAN Xiao-ping, ZHANG Qin-fa, XIANG Hong, et al. Development and Performance Research of Edible Ink for Screen Printing[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(23): 43—46.
- [2] 高松, 王志伟, 胡长鹰, 等. 食品包装油墨迁移研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(11): 317—322.  
GAO Song, WANG Zhi-wei, HU Chang-ying, et al. Research Progress in Ink Migration from Packaging Materials to Foods and Food Stimulants[J]. Food Science, 2012, 33(11): 317—322.
- [3] BRANDOW S L, SCHULL T L, MARTIN B D, et al. Use of Low-temperature Thermal Alkylation to Eliminate Ink Migration in Microcontact Printed Patterns[J]. Chemistry, 2015, 8(23): 5363—5367.
- [4] SUN J M, WEI X F, HUANG B Q. Research on the Influencing Factors to Printing Quality of Edible Ink-jet Printing Ink[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 262: 282—286.
- [5] CHUNYAN F, MIN Z, BHESH B. Materials Properties of Printable Edible Inks and Printing Parameters Optimization During 3D Printing[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(6): 1—8.
- [6] 张红鸣. 药用油墨(一)[J]. 染料与染色, 2017, 54(6): 18—27.  
ZHANG Hong-ming. Medicinal Inks[J]. Dyestuffs and Coloration, 2017, 54(6): 18—27.
- [7] 孙菁梅. 可食性喷墨油墨的制备及性能研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2013.
- [8] 姚瑞玲, 毛宏萍, 余勇, 等. 可食油墨制备工艺优化[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 234—240.  
YAO Rui-ling, MAO Hong-ping, YU Yong, et al. Optimization of Preparation Technology of Edible Ink[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 234—240.
- [9] 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 Research and Data Analysis[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2015.
- [10] VJERAN P, MARIN M, VALDEC D. Comparison of Characteristics of Ink-jet Prints Obtained Using Water Based, Solvent and UV Inks[J]. Tehnički Glasnik, 2013, 7(2): 191—197.
- [11] 陈林, 符秋娟. 四种食用色素对金鱼体色的影响[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(1): 79—82.  
CHEN Lin, FU Qiu-juan. The Effect of Four Food Pigments on Body Colour of Goldfish[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2007, 16(1): 79—82.
- [12] COLOSI C, COSTANTINI M, BARBETTA A, et al. Microfluidic Bioprinting of Heterogeneous 3D Tissue Constructs Using Low-viscosity Bioink[J]. Advanced Materials, 2016, 28(4): 369—380.
- [13] KIM C, NOGI M, SUGANUMA K, et al. Absorption Layers of Ink Vehicles for Inkjet-printed Lines with Low Electrical Resistance[J]. RSC Advances, 2012, 2(22): 8447—8451.
- [14] 孙菁梅, 魏先福, 黄蓓青, 等. 可食性喷墨油墨黏度对墨滴状态的影响[J]. 北京印刷学院学报, 2012, 20(4): 6—8.  
SUN Jing-mei, WEI Xian-fu, HUANG Bei-qing, et al. Influence of the Viscosity of Edible Inks for Ink-jet Printing on Drop State[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2012, 20(4): 6—8.
- [15] MELCHELS F P W, DHERT W J A, HUTMACHER D W, et al. Development and Characterisation of a New Bioink for Additive Tissue Manufacturing[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2014, 2: 2282—2289.
- [16] 范小平, 张钦发, 岳淑丽. 可食性油墨及应用现状研究[J]. 包装工程, 2007, 28(5): 172—174.  
FAN Xiao-ping, ZHANG QIN-fa, YUE Shu-li. Study on Edible Ink and Its Application Status[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(5): 172—174.
- [17] 胡剑青, 李辉, 涂伟萍, 等. 明胶/阿拉伯胶复合凝聚法制备 DCOIT 微胶囊[J]. 中国胶粘剂, 2012(6): 31—34.  
HU Jian-qing, LI Hui, TU Wei-ping, et al. DCOIT Microcapsules Prepared by Gelatin/Gum Arabic Composite Coacervation[J]. China Adhesive, 2012(6): 31—34.
- [18] RESTOLHO J, SERRO A P, MATA J L, et al. Viscosity and Surface Tension of 1-ethanol-3-methylimidazolium Tetrafluoroborate and 1-methyl-3-octylimidazolium

- Tetrafluoroborate over a Wide Temperature Range[J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2013, 54(3): 950—955.
- [19] Å UMIÄ Z, VAKULA A, TEPIÄ A, et al. Modeling and Optimization of Red Currants Vacuum Drying Process by Response Surface Methodology (RSM)[J]. *Food Chemistry*, 2016, 203: 465—475.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] OLIVEIRA T Í, 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.
- [23] BEJAOU 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.
- [24] 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.
- [25] 廖瑾, 张雅媛, 洪雁, 等. 阿拉伯胶对马铃薯淀粉糊化及流变性质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2010, 29(4): 567—571.
- LIAO Jin, ZHANG Ya-yuan, HONG Yan, et al. Effect of Arabic Gum on Pasting and Rheological Properties of Potato Starch[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2008, 29(1): 4—6.
- [26] 钟树良, 蔡炳照. 复合软包装用水性聚氨酯油墨的制备与性能[J]. *聚氨酯工业*, 2011, 26(5): 34—36.
- ZHONG Shu-liang, CAI Bing-zhao. Synthesis and Properties of Aqueous Polyurethane Printing Ink for Flexible Packaging[J]. *Polyurethane Industry*, 2011, 26(5): 34—36.