DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251011003
引用格式: 石萍萍, 马菲菲, 何代琴, 等. 熵权法结合响应面法优化滇黄精浸提工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 161–169.
SHI PP, MA FF, HE DQ, *et al*. Optimization of the extraction process of *Polygonatum kingianum* by entropy weight method and response surface method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 161–169. (in Chinese with English abstract).

熵权法结合响应面法优化滇黄精浸提工艺

石萍萍[1], 马菲菲[1], 何代琴[1], 段文越[2], 李美兰[3], 牟立夫[4], 苏火生[1*]

(1. 云南省农业科学院农产品加工研究所, 昆明 650032; 2. 昆明医科大学药学院, 昆明 650021; 3. 云南师范大学职业技术教育学院, 昆明 650092; 4. 玉溪市生态环境科学研究所, 玉溪 653100)

摘 要: 目的 优化滇黄精浸膏的浸提工艺, 在保障高抗氧化活性的前提下确定最佳工艺参数。**方法** 采用熵权法确定浸膏得率、总多糖含量、抗氧化活性等指标的权重系数, 计算综合评分。通过单因素实验研究乙醇体积分数、料液比、提取时间、提取温度对滇黄精浸膏提取工艺的影响, 在上述基础上, 以综合评分为响应值, 通过响应面法优化滇黄精浸膏提取工艺。**结果** 滇黄精浸膏的最佳提取工艺为乙醇体积分数 60%, 浸提温度 90 ℃, 浸提时间 2 h, 料液比 1:40 (g:mL)。通过所确定的最优工艺参数, 平行制备了 3 批滇黄精膏样品。经计算, 各批次的综合评分分别为 98.92、99.09 和 98.81, 相对标准偏差为 0.14%。**结论** 本研究优化了滇黄精的一种提取工艺, 确定提取工艺可行并为滇黄精的开发利用提供了依据。

关键词: 滇黄精; 熵权法; 响应面法; 浸提工艺

Optimization of the extraction process of *Polygonatum kingianum* by entropy weight method and response surface method

SHI Ping-Ping[1], MA Fei-Fei[1], HE Dai-Qin[1], DUAN Wen-Yue[2], LI Mei-Lan[3], MOU Li-Fu[4], SU Huo-Sheng[1*]

(1. *Agro-products Processing Research Institute*, *Yunnan Academy of Agricultural Sciences*, *Kunming* 650032, *China*; 2. *College of Pharmacy*, *Kunming Medical University*, *Kunming* 650021, *China*; 3. *College of Vocational and Technical Education*, *Yunnan Normal University*, *Kunming* 650092, *China*; 4. *Yuxi Institute of Ecological and Environmental Sciences*, *Yuxi* 653100, *China*)

ABSTRACT: Objective To optimize the extraction process of *Polygonatum kingianum*, and determine the optimal process parameters under the premise of ensuring high antioxidant activity. **Methods** This study utilized the entropy weight method to ascertain the weight coefficients of various metrics, including extract yield, total polysaccharide content and antioxidant activity, facilitating the calculation of a comprehensive score. The effects of ethanol volume fraction, solid-liquid ratio, extraction duration and extraction temperature on the extraction process were examined through single-factor experiments. Based on the above, the extraction process of *Polygonatum kingianum* was optimized using response surface methodology, with the comprehensive score serving as the response value. **Results** The

收稿日期: 2025-10-11
基金项目: 现代农产品加工科技支撑专项
第一作者: 石萍萍(1990—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品加工。E-mail: shipingpingtcm@163.com
***通信作者:** 苏火生(1980—), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品加工。E-mail: shs304@163.com

optimal extraction conditions were an ethanol volume fraction of 60%, an extraction temperature of 90 ℃, an extraction duration of 2 h and a solid-liquid ratio of 1:40 (g:mL). By using the determined optimal process parameters, the 3 parallel batches of samples yielded comprehensive scores of 98.92, 99.09 and 98.81, with a relative standard deviation of 0.14%. **Conclusion** This research optimize an extraction process of *Polygonatum kingianum*, confirming its feasibility and providing a basis for the development and utilization of *Polygonatum kingianum*.

KEY WORDS: *Polygonatum kingianum*; entropy weight method; response surface method; extraction technology

0 引 言

黄精(*Polygonati rhizoma*)作为一种药食同源类中药材, 因其良好的食用和药用价值成为滋补中药而被广泛食用。黄精中含有多种生物活性成分, 如多糖、皂苷、黄酮[1]、多酚[2]、氨基酸、生物碱等[3–4]。其中, 黄精多糖为黄精的主要活性成分, 不仅具有良好的抗氧化、增强免疫、抗肿瘤、降血糖、抗炎等多种药理作用[5–8], 更是《中国药典》用于黄精质量控制的重要标准[9]。滇黄精(*Polygonatum kingianum*)作为黄精的一种重要品类, 为单子叶百合科黄精属的多年生草本植物, 主要分布在中国的云南、四川、贵州等地[10], 并且在越南、缅甸也有分布[11]。作为一种补益类中药, 滇黄精具有补气养阴、健脾、润肺、益肾等作用, 可用于脾胃气虚、体倦乏力、胃阴不足、口干食少、肺虚燥咳、劳嗽咳血、精血不足、腰膝酸软、须发早白、内热消渴等症状, 在临床上有广泛应用。与此同时, 滇黄精作为一种典型的药食同源类中药材, 具有极高的应用价值和广阔的市场前景[11–13]。

目前, 对滇黄精的研究已涉及其提取工艺、药效成分及作用机制等多个方面。研究表明, 黄精多糖的构效关系密切, 其在加工过程中的结构变化会直接影响生物活性[14]。然而, 现有关于滇黄精多糖提取工艺的研究, 多聚焦于优化多糖浸出率, 且提取溶剂集中于水提法[14–16]。除多糖外, 滇黄精还富含皂苷、多酚、黄酮等多种活性成分[11,17–18], 单一的水提法可能难以实现多种有效成分的协同溶出, 无法保证提取物(如浸膏)活性的最优化。例如, 水提法对总抗氧化能力的贡献度是否达到最佳, 尚缺乏系统研究。

为解决上述问题, 本研究拟建立一种能够同步优化浸膏得率、总多糖溶出率并显著提升提取物总抗氧化能力的滇黄精浸提工艺, 选取浸膏得率、多糖含量及抗氧化活性作为关键评价指标, 采用熵权法结合响应面法进行多目标优化, 以期为食药同源滇黄精产品的深度开发提供可靠的理论依据与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

滇黄精、黄精膏: 购自云南省普洱市。滇黄精于 60 ℃烘干至水分小于等于 10%, 粉碎, 过 60 目筛, 备用。

乙醇(分析纯, 四川西陇科学有限公司); 实验用水为纯水(利用上海矩源自动化科技有限公司二级反渗透水处理设备 JYS-500L 制得); 总多糖含量测试盒、总抗氧化能力[(ferric reducing antioxidant power, FRAP)法]试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司)。

1.2 仪器与设备

Multiskan Go 酶标仪(美国赛默飞世尔科技有限公司); HGZF-9053 型台式电热鼓风干燥箱(上海跃进医疗器械有限公司); AL204-IC 万分之一天平[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; HR/T20MM 冷冻离心机(湖南赫西仪器装备有限公司); SA402B Plus 滋味指纹分析系统(电子舌)(日本 Insent 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 浸膏得率的测定

称定于 60 ℃烘干后浸膏的质量, 计算浸膏得率。

1.3.2 总多糖含量的测定

按照总多糖含量测试盒的操作说明测定各样品总多糖含量, 吸取提取液 0.2 mL, 慢慢加入 0.8 mL 无水乙醇, 混匀后 4 ℃静置过夜, 10000 r/min 离心 10 min, 弃上清, 沉淀中加入 1 mL 水, 充分混匀溶解沉淀后吸取 200 μL, 加入 100 μL 试剂一和 0.5 mL 浓硫酸, 混匀后 90 ℃水浴 20 min, 流水冷却。取 200 μL 加入酶标板, 于酶标仪 490 nm 下测定吸光值 A。结果以样本质量的干重进行计算, 计算见公式(1)。

$$\text{总多糖含量}/(\mu g/g\ DW)=\frac{(A+0.0037)\times V_1\times V_3\times 1000}{7.981\times V_2\times W} \quad (1)$$

式中: V_1 为醇沉后重新溶解后的体积, mL; V_2 为进行醇沉的体积, mL; V_3 为提取溶剂的体积, mL; W 为样本质量, g。

1.3.3 总抗氧化能力的测定

按照 FRAP 试剂盒的操作说明测定各样品总抗氧化能力。样品加入提取液提取后 10000 r/min 离心 10 min, 取上清, 置冰上待测。取 10 μL 样品, 加入 190 μL 混合液(将试剂一、试剂二、试剂三按 10:1:1 (V:V:V)的比例混合, 使用前 37 ℃预温)充分混匀, 反应 20 min, 于 593 nm 测定吸光值, 记为 $A_{测定}$。空白为 10 μL 提取液与 190 μL 混合液充分混匀, 反应 20 min, 于 593 nm 测定的吸光值, 记为 $A_{空白}$。

结果以 Trolox 当量表示, 计算见公式(2)~(3)。

$$\Delta A=A_{测定}-A_{空白} \tag{2}$$

$$总抗氧化能力/(\mu mol\ Trolox/g\ DW)=\frac{(\Delta A-0.0134)\times V_{样}\times V_{样总}}{1.2416\times V_{样}\times W} \tag{3}$$

式中: $V_{样总}$为加入提取液体积, mL; $V_{样}$为反应中样品体积, μL; W 为样品质量, g。

1.3.4　滇黄精最佳提取溶剂的确定

分别以纯水、20%乙醇、40%乙醇、60%乙醇、80%乙醇、无水乙醇按 1:15 (g:mL, 下同)的料液比浸提 1 h 后过滤, 得滇黄精浸提液, 通过测定不同溶剂下的浸膏重量、多糖含量及总抗氧化能力, 综合考虑, 确定最优提取溶剂。

1.3.5　熵权法计算权重

熵权法具体计算方法见式(4)~(7)[19]:

对原数据矩阵进行标准化, 并构建原始评价指数矩阵(X_{ij})。

$$X_{ij}=(X_{ij})_{\min} \tag{4}$$

将原始评价指标矩阵转为概率矩阵(P_{ij})。

$$P_{ij}=X_{ij}/\sum_{j=1}^{n}X_{ij}\quad(0\leqslant P_i\leqslant 1) \tag{5}$$

计算每项指标的熵值, 确定第 i 个评价指标的信息熵 H_i。

$$H_i=-k\sum_{j=1}^{n}P_{ij}\ \ln P_{ij} \tag{6}$$

计算各指标的权重系数 W_i。

$$W_i=1-H_i/\sum_{i=1}^{m}(1-H_i) \tag{7}$$

式中: i 为样品值(i=1, 2, …, n); j 为指标值(j=1, 2,…, m); k=1/ln(m)。

1.3.6　综合评分确定

本研究运用“熵权法”对 3 种指标进行赋权。结果显示浸膏得率(X_1)、总多糖含量(X_2)、总抗氧化能力(X_3)的权重系数分别为 0.1857、0.4393、0.375, 即综合评分 $Y=X_1\times0.1857/X_{1max}+X_2\times0.4393/X_{2max}+X_3\times0.375/X_{3max}$。

1.3.7　单因素实验

取滇黄精粉末 3 g, 加入 60%乙醇溶剂, 浸提, 以浸膏得率、总多糖含量、总抗氧化能力为指标, 初步筛选滇黄精浸提过程中可能影响指标的 3 个因素: 浸提温度(50、60、70、80、90、100 ℃)、浸提时间(1、2、3、4、5 h)、料液比(1:5、1:15、1:25、1:35、1:45)。

(1)浸提温度对综合评分的影响

称取 5 份各 3 g 滇黄精粉末, 每组平行 3 份, 按料液比 1:15 加入 60%乙醇溶剂, 分别在不同浸提温度 50、60、70、80、90、100 ℃下浸提 1 h, 放凉后补重, 抽滤, 滤液按照 1.3.1、1.3.2 和 1.3.3 项下方法测定各指标, 计算综合评分。

(2)浸提时间对综合评分的影响

称取 5 份各 3 g 滇黄精粉末, 每组平行 3 份, 按料液比 1:15 加入 60%乙醇溶剂, 100 ℃下分别浸提 1、2、3、4、5 h 后放凉, 补重, 抽滤, 滤液按照 1.3.1、1.3.2 和 1.3.3 项下方法测定各指标, 计算综合评分。

(3)料液比对综合评分的影响

称取 5 份各 3 g 滇黄精粉末, 每组平行 3 份, 分别按料液比 1:5、1:15、1:25、1:35、1:45 加入 60%乙醇溶剂, 100 ℃浸提 2 h 后放凉补重, 抽滤, 滤液按照 1.3.1、1.3.2 和 1.3.3 项下方法测定各指标, 计算综合评分。

1.3.8　响应面优化实验

基于单因素考察结果, 运用 Design-Expert 12 软件建立 3 因素 3 水平 Box-Benhnken 中心组合, 各因素与水平见表 1。

表 1　响应面优化提取因素及水平

Table 1　Factors and levels of response surface optimization extraction

因素	水平		
	−1	0	1
A: 浸提温度/℃	70	80	90
B: 浸提时间/h	1	2	3
C: 料液比(g:mL)	1:25	1:35	1:45

1.3.9　电子舌分析

精密称取 1.4 g 样品于 250 mL 锥形瓶, 加入 100 mL 纯水, 60 ℃加热溶解, 放置常温后过滤, 取滤液装入电子舌专用烧杯中, 至烧杯刻度线(约 35 mL)。电子舌系统包括 5 个测试传感器(CA0、CT0、AAE、C00、AE1)和 2 个参考传感器。CA0 是酸味传感器, CT0 是咸味传感器, AAE 是鲜味传感器, C00 是苦味传感器, AE1 是涩味传感器。每份样品平行测定 4 次, 取后 3 次数据的平均值。

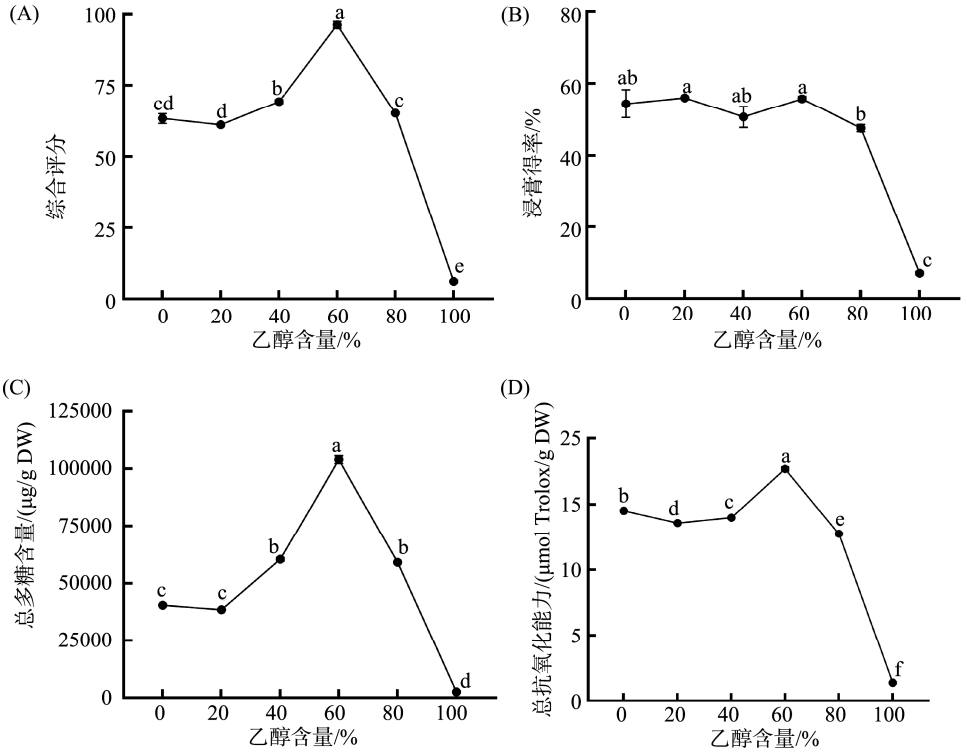
1.4　数据处理

所得数据采用 GraphPad Prism 8 软件进行统计, 运用 Design Expert 10 软件分析响应面数据, 采用 Origin 2021 软件绘制图形, 除特殊说明外, 所有数据均为 3 次重复实验所得的平均值。

2　结果与分析

2.1　滇黄精最佳提取溶剂结果

不同提取溶剂对滇黄精浸提工艺的影响结果如下。由图 1 可知, 随着乙醇含量的提高, 滇黄精的总多糖含量和总抗氧化能力呈先提高后降低的趋势, 致使综合评分整体呈现先提高后降低趋势, 乙醇含量为 60%时, 获得的滇黄精浸膏的总多糖含量和总抗氧化能力最高, 综合评分也最高。这可能跟溶解性有关, 滇黄精中的总多糖及黄酮、多酚等抗氧化活性成分随着乙醇含量升高, 溶解性升高, 在 60%乙醇达到最佳。综合分析, 确定最佳提取溶剂为 60%乙醇, 故下述研究均用 60%乙醇为溶剂进行。



注: 不同小写字母表示有显著性差异, $P<0.05$; 图 2 同。

图 1 不同提取溶剂对滇黄精浸提工艺的影响

Fig.1 Influences of different extraction solvents on the extraction process of *Polygonatum kingianum*

2.2 单因素分析

图 2 分别展示了不同浸提温度、浸提时间、料液比对滇黄精浸提溶液综合评分的影响。从图 2(A)可以看出, 随着浸提温度的升高, 综合评分呈先高后低趋势, 且当浸提温度升高至 80 ℃时, 综合评分达到峰值, 其后随浸提温度升高, 综合评分反而逐渐降低, 这可能与分子运动有关, 在适当升温条件下, 分子热运动加剧, 溶剂渗透与成分扩散速率提高, 有利于活性成分的溶出; 但温度过高(如超过 80 ℃)可能导致热敏性成分降解或发生不良化学反应, 从而降低提取物质量, 反映为综合评分下降。提示浸提温度的优化范围可设定在 70~90 ℃之间。由图 2(B)知, 随着浸提时间的延长, 综合评分逐渐增大, 但在 2 h 时达到拐点, 说明在 2 h 活性成分的溶出接近平衡。浸提时间过短, 成分未能充分释放; 时间过长则可能导致已溶出成分因长时间受热而发生氧化或水解, 同时可能溶出更多杂质, 反而降低综合评分。因此, 确定浸提时间的优化范围为 1~3 h。由图 2(C)可知, 料液比在 1:35 之内时, 随着料液比的增大, 综合评分逐渐增大; 但在料液比增加到 1:35 之后, 可能因溶剂过量稀释目标成分, 促使综合评分降低, 提示料液比的优化范围可设定在 1:25~1:45 之间。

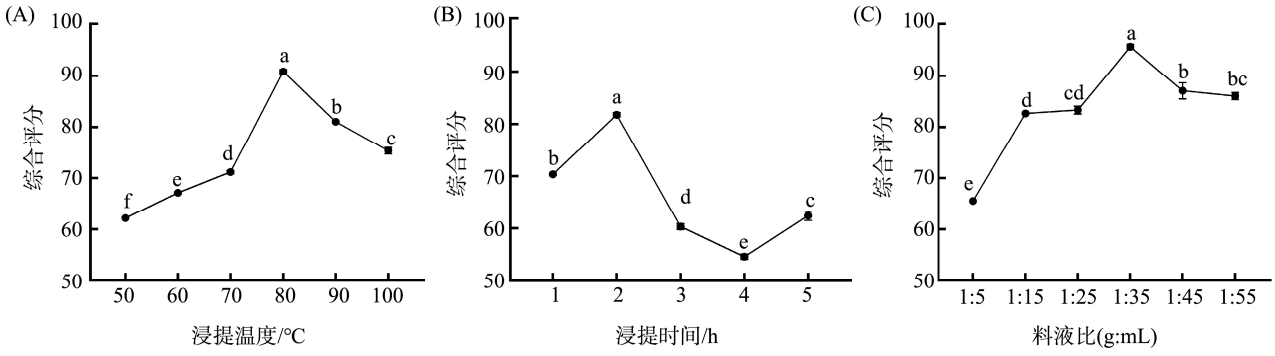


图 2 浸提温度(A)、浸提时间(B)、料液比(C)对综合评分的影响

Fig.2 Influences of extraction temperature (A), extraction time (B) and solid-liquid ratio (C) on the comprehensive score

2.3　响应面法优化提取条件

2.3.1　响应面优化实验设计与结果

在单因素考察结果的基础上，进一步应用 Design-Expert 12 软件 Box-Behnken 设计原理，选择 *A*(浸提温度)、*B*(浸提时间)、*C*(料液比)，设计 3 因素 3 水平共 17 组实验，针对浸膏得率、总多糖含量及总抗氧化能力的综合评分进行方差分析，具体响应面设计方案及相应结果见表 2，具体方差分析结果见表 3。

运用 Design-Expert 12 软件，以表 2 中综合评分为响应值，对浸提温度、浸提时间和料液比进行多元回归分析，得到滇黄精浸提工艺的回归方程为：Y=93.26+3.29A–2.08B+2.15C+0.66AB+4.03AC+3.11BC+1.94A^2–4.56B^2–7.66C^2。方差分析结果见表 3，由表 3 可知，模型 F 为 36.28，P<0.0001，表明该模型有极显著差异，可信度较高。失拟项 P=0.9917>0.05，差异不显著，表明实验模型预测值与实际值拟合度较好，R^2=0.9790，R^2_{adj}=0.9520 表明模型有意义，

表 2　响应面设计方案及相应样品测定结果

Table 2　Response surface design scheme and determination results of corresponding samples

序号	*A*	*B*	*C*	浸膏得率/%	总多糖含量/(μg/g DW)	总抗氧化能力/(μmol Trolox/g DW)	综合评分
1	0	0	0	71.33	146615.40	15.57	94.51
2	–1	0	–1	67.00	129051.29	14.52	85.95
3	0	0	0	70.33	135092.72	16.89	93.54
4	0	0	0	71.00	138425.64	14.90	90.58
5	–1	–1	0	69.00	141166.52	14.58	90.22
6	0	1	–1	64.00	103360.06	12.66	73.63
7	–1	1	0	69.67	124830.85	14.27	84.85
8	0	0	0	70.33	139763.19	15.72	92.51
9	0	–1	–1	69.67	122890.82	14.20	84.13
10	1	–1	0	72.67	141341.94	16.46	95.12
11	1	1	0	71.67	128185.69	17.17	92.39
12	0	–1	1	68.00	129128.56	12.60	82.24
13	0	0	0	70.33	138666.83	17.16	95.17
14	1	0	–1	66.33	130330.37	13.88	84.84
15	1	0	1	72.67	137266.63	18.05	97.20
16	–1	0	1	70.67	116733.49	14.03	82.18
17	0	1	1	70.67	124796.39	13.82	84.16

表 3　滇黄精浸提工艺回归方程方差分析表

Table 3　Analysis of variance table for the regression equation of the extraction process of *Polygonatum kingianum*

方差来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*	显著性
模型	621.99	9	69.11	36.28	<0.0001	**
A	86.79	1	86.79	45.57	0.0003	**
B	34.78	1	34.78	18.26	0.0037	**
C	37.11	1	37.11	19.48	0.0031	**
AB	1.74	1	1.74	0.91	0.3707	-
AC	65.04	1	65.04	34.15	0.0006	**
BC	38.56	1	38.56	20.25	0.0028	**
A^2	15.89	1	15.89	8.34	0.0234	*
B^2	87.54	1	87.54	45.96	0.0003	**
C^2	247.20	1	247.20	129.78	<0.0001	**
残差	13.33	7	1.90			
失拟误差	0.2992	3	0.0997	0.0306	0.9917	
纯误差	13.03	4	3.26			
总和	635.33	16				

注: *表示差异显著, P<0.05 ; **表示差异极显著, P<0.01; -表示不显著, P>0.05。

可信度较高，该模型可应用于指导建立滇黄精浸提工艺，并能准确预估提取样品综合评分的变化。同时从表 3 分析结果可知，因素 A、B、C、AC、BC、B^2、C^2 均对滇黄精浸提工艺的综合评分有极显著影响($P<0.01$)，因素 A^2 对滇黄精浸提工艺的综合评分有显著影响($P<0.05$)。而且从 F 可知，各因素对滇黄精浸提工艺综合评分的影响大小排序依次为：浸提温度>料液比>浸提时间。

2.3.2 交互作用分析

根据回归方程建立各因素响应曲面图(图 3)，分析浸提温度、浸提时间、料液比对响应值的影响。响应曲面越陡峭，说明该因素对提取工艺的影响越大，交互作用越显著；响应面越平缓，则影响越小，交互作用越不明显。椭圆等高线表示因素间的交互作用显著，圆形等高线表示交互作用不显著[20]。根据图 3，预测获得滇黄精的最佳浸提条件为：浸提温度 89.554 ℃，浸提时间 2.19 h，料液比 1:37.56 (g:mL)。此条件下获得的滇黄精浸提液预测的综合评分为 98.935。为进一步确保提取实验的可行性，对预测条件进行了修正：浸提温度 90 ℃，浸提时间 2 h，料液比 1:40 (g:mL)。通过实验检验最优预测条件下的提取效果，综合评分为 98.94±0.14，与预测值相接近。说明该模型切实可行。

2.3.3 工艺验证

根据最优浸提工艺，平行称取 3 份滇黄精粉末，分别测定浸膏得率、总多糖含量、总抗氧化能力等指标，计算综合评分，结果见表 4。结果各批次的综合评分分别为 98.92、99.09 和 98.81，相对标准偏差为 0.14%，表明最优工艺可行。

2.4 最优工艺制得的滇黄精膏与市售黄精膏的比较研究

为了全面评估最优工艺制得的滇黄精膏的品质，本研究将其与市售黄精膏在总多糖含量、总抗氧化能力及电子舌味道特征等方面进行了系统比较。结果见表 5、图 4~5。

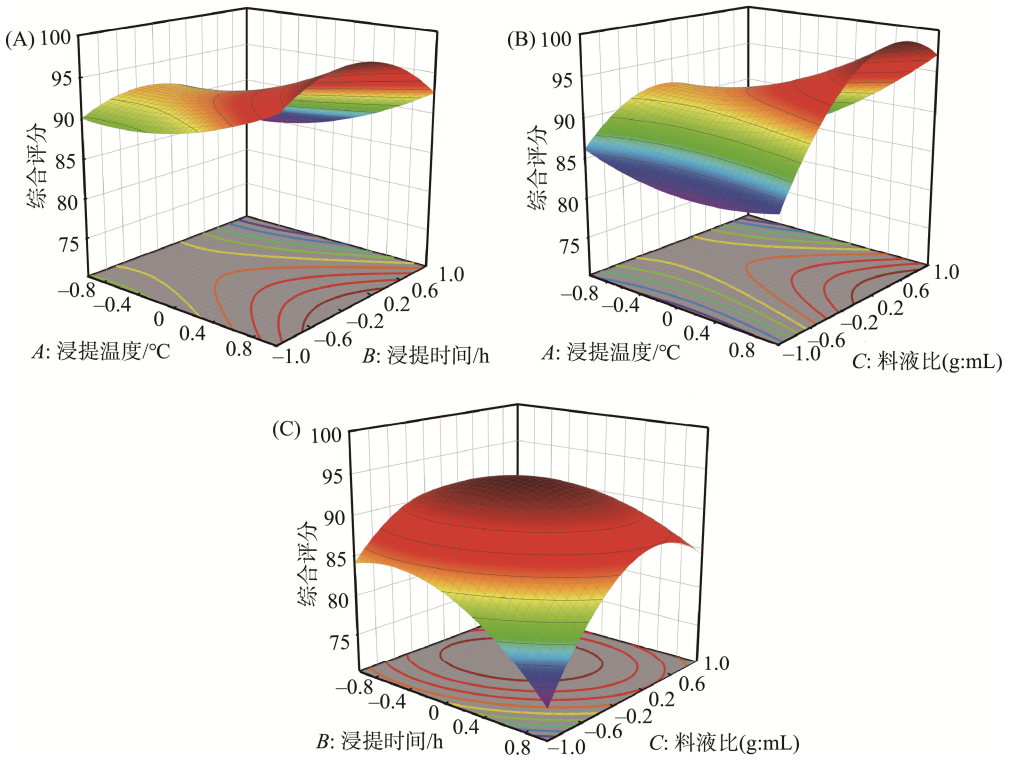


图 3 各因素交互作用对滇黄精浸提工艺综合评分影响的响应面图

Fig.3 Response surface plots of the influence of interaction among various factors on the comprehensive score of the extraction process of *Polygonatum kingianum*

表 4 滇黄精浸提工艺验证性实验结果

Table 4 Results of confirmatory tests for the extraction process of *Polygonatum kingianum*

序号	浸膏得率/%	总多糖含量/(μg/g DW)	总抗氧化能力/(μmol Trolox/g DW)	综合评分	平均分	RSD/%
1	77.00	134544.54	18.74	98.92		
2	78.33	134644.78	18.64	99.09	98.94	0.14
3	77.67	134920.44	18.55	98.81		

注：相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)。

表 5　市售黄精膏与自制黄精膏总多糖含量及总抗氧化能力

Table 5　Total polysaccharide content and total antioxidant capacity of commercially available *Polygonatum* paste and homemade *Polygonatum* paste

序号	分组	名称	总多糖含量/(μg/g DW)	平均值	RSDs/%	总抗氧化能力/(μmol Trolox/g DW)	平均值	RSDs/%
1	A	市售黄精膏	126769.83	127218.81	0.74	36.67	37.17	1.68
2			126581.88			37.87		
3			128304.72			36.97		
4	B	自制黄精膏	142244.08	141617.59	1.53	40.89	41.24	1.37
5			139205.61			40.94		
6			143403.08			41.89		

2.4.1　总多糖含量和总抗氧化能力比较分析

据表 5 可知，最优工艺制得的滇黄精膏的总多糖含量和总抗氧化能力均显著高于市售黄精膏。具体而言，自制滇黄精膏的总多糖含量较市售品高出约 9.42%~12.72%，总抗氧化能力也提升了 10.01%~12.70%。这一结果充分证明了最优工艺在保留活性成分和增强生物活性方面的优势。

推测最优工艺基于响应面法优化了浸提参数，如温度、时间、料液比，有效提高了多糖的提取效率和稳定性。而市售黄精膏可能因制作过程中的工艺波动或储存条件不当，导致多糖降解或氧化损失。此外，自制膏体在浓缩和干燥过程中严格控制了温度和时间，避免了过度加热引起的多糖聚合或降解，从而更好地保持了其功能特性。这一发现不仅验证了最优工艺的可靠性，还为其在功能性食品和药品中的应用提供了实验依据。

2.4.2　电子舌味道特征分析

由图 4~5 可知，自制滇黄精膏与市售黄精膏在味道轮廓上存在明显差异。具体而言，自制滇黄精膏的酸味、涩味和咸味均低于市售。这种味道优势可能源于工艺优化：最优工艺通过精确控制提取和浓缩条件，减少了有机酸和鞣质等呈味物质的溶出。电子舌将味道具象化为数值，客观反映了产品的感官品质。自制膏体的味道更接近“甘平”的传统黄精特性，这可能提升消费者接受度。相比之下，市售品的较高酸味和涩味可能与其加工过程中使用的辅料或灭菌方法有关。本结果强调了工艺优化对产品感官属性的影响，建议未来研究结合感官评价法，进一步验证上述数据的实际意义。

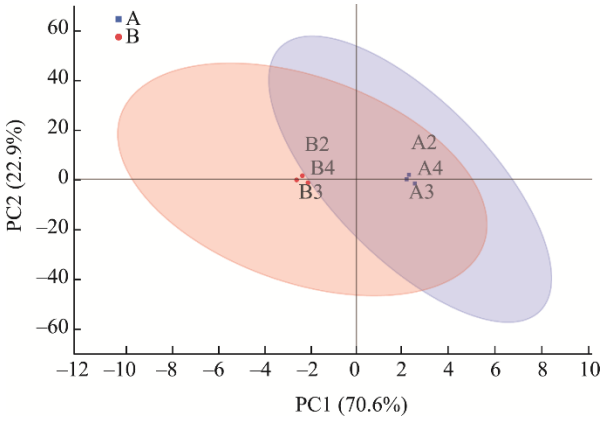


图 4　市售黄精膏与自制黄精膏主成分分析图

Fig.4　Principal component analysis of commercially-available *Polygonatum* paste and homemade *Polygonatum* paste

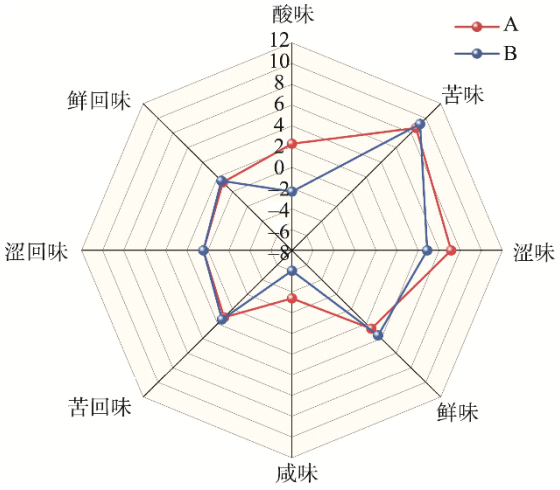


图 5　市售黄精膏与自制黄精膏滋味轮廓雷达图

Fig.5　Radar chart of taste profiles of commercially available *Polygonatum* paste and homemade *Polygonatum* paste

2.4.3　工艺方法验证与优势分析

本研究采用熵权法与响应面法相结合的方法优化工艺，其综合优势在比较研究中得到充分体现[21–24]。熵权法通过客观加权多个评价指标(如多糖得率、抗氧化活性)，避免了人为偏见，而响应面法则通过建立非线性模型，高效地确定了最佳工艺参数。这种结合不仅提高了工艺的稳健性和可重复性，还降低了实验成本和周期。

在验证实验中，最优工艺制得的滇黄精膏表现出更优的理化指标和感官特性，证实了该方法在黄精加工中的适用性。与文献报道相比[8,14–16]，本研究首次将熵权法应用于黄精膏工艺优化，突出了其在复杂体系中的客观评价能力。响应面法则确保了工艺参数(如浸提温度和时间)的交互作用被充分考虑，从而实现了产品品质的整体提升。这一方法可为其他药食同源类产品的工艺开发提供参考。

3 讨论与结论

针对黄精膏数据结果，自制与市售品在多糖含量和味道上的差异可能由多种因素引起。首先，多糖含量的差异可能与溶解性和加工稳定性有关。如文献所述，黄精多糖在复溶过程中可能因分子量变化或聚集现象而溶解不全[14,25–27]。最优工艺通过控制浓缩条件，减少了高分子聚集体的形成，从而提高了多糖的溶出率。相反，市售品可能因“九蒸九制”等传统工艺导致多糖降解为寡糖或单糖[28–31]，降低了测定值。其次，味道差异可能源于加工方法。最优工艺可能减少了热处理时间，从而降低了酸涩味。此外，电子舌检测的咸味差异可能与水质或添加剂有关，自制过程使用了纯水，避免了外来离子的干扰。这些发现提示，未来研究需深入探讨加工条件与产品品质的关联。

本研究获得的滇黄精浸膏的最佳提取工艺为乙醇体积分数 60%，浸提温度 90 ℃，浸提时间 2 h，料液比 1:40 (g:mL)。与此同时，研究表明了基于熵权法和响应面法优化得到的最优工艺，能提升滇黄精膏的总多糖含量、总抗氧化能力和感官品质，使其在多项指标上优于市售产品。这不仅验证了该工艺的实用性和先进性，还为黄精深加工提供了技术支撑。

参考文献

[1] 王佳琪, 李敏敏, 范蓓, 等. 大孔树脂纯化滇黄精黄酮工艺优化及纯化前后抗氧化活性比较[J]. 饲料研究, 2024, 47(7): 74–81.
WANG JQ, LI MM, FANG B, *et al*. Optimization of purification process of flavonoids from *P. kingianum* Coll. by macroporous resin and comparison of antioxidant activity before and after purification [J]. Feed Research, 2024, 47(7): 74–81.

[2] 巫永华, 刘恩岐, 张建萍, 等. 黄精多酚的闪式提取及抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2017, 42(8): 231–236.
WU YH, LIU ENQ, ZHANG JP, *et al*. Extraction and antioxidant activities of polyphenols from *Polygonatum* [J]. Food Science and Technology, 2017, 42(8): 231–236.

[3] 王丹, 张鸿, 刘嘉丽, 等. 不同产地多花黄精生物活性成分含量比较[J]. 湖南农业科学, 2020, 7: 89–92, 96.
WANG D, ZHANG H, LIU JL, *et al*. Comparative analysis of bioactive components of *Polygonatum cyrtonema* hua from different habitats [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2020, 7: 89–92, 96.

[4] 胡云棵, 李川, 张巧娜, 等. 黄精的化学成分与繁殖栽培技术研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(8): 1316–1326.
HU YK, LI C, ZHANG QN, *et al*. Research progress on chemical composition, function and propagation cultivation technology of medicinal herb *Polygonatum rhizoma* [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(8): 1316–1326.

[5] YANG MH, CHEN RH, ZHOU X, *et al*. Research progress on pharmacological effects and mechanism of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides [J]. Starch, 2024, 76: 9–10.

[6] 杜青, 陈林, 贺炜, 等. 黄精多糖对 RAW 264.7 细胞活性及炎症因子 TNF-α、IL-6、iNOS 表达的影响[J]. 中成药, 2022, 44(8): 2676–2679.
DU Q, CHEN L, HE W, *et al*. Impact of *Polygonatum* polysaccharide on the activity of RAW 264.7 macrophages and the expression levels of inflammatory mediators TNF-*α*, IL-6 and iNOS [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2022, 44(8): 2676–2679.

[7] 周玉, 汪萍, 杨建课. 黄精多糖抗肿瘤作用的研究进展[J]. 湖北中医杂志, 2022, 44(7): 63–66.
ZHOU Y, WANG P, YANG JK. Advancements in the investigation of the antitumor properties of *Polygonatum* polysaccharide [J]. Hubei Journal of Traditional Chinese Medicine, 2022, 44(7): 63–66.

[8] 谢冰宗, 李密, 董彩文, 等. 黄精皂苷与多糖超声辅助提取工艺优化及降血糖活性研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(1): 158–166, 196.
XIE BZ, LI M, DONG CW, *et al*. Study on the technology of ultrasonic assisted combined extraction of saponins and polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* and its hypoglycemic activity [J]. Food & Machinery, 2024, 40(1): 158–166, 196.

[9] 袁帅, 韩如刚, 李佳, 等. 黄精研究进展[J]. 中南农业科技, 2024, 45(11): 234–240.
YUAN S, HAN RG, LI J, *et al*. Research progress of *Polygonatum* [J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2024, 45(11): 234–240.

[10] 陈凯燕, 方语文, 张猛, 等. 不同极性段滇黄精抗氧化及细胞保护作用评价[J]. 中国食品学报, 2024, 24(8): 133–142.
CHEN KY, FANG YW, ZHANG M, *et al*. The antioxidant activities and cell protective effects of different polar samples of *Polygonatum kingianum* [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(8): 133–142.

[11] 杨建宇, 刘冠军, 刘白云, 等. 中华中医药道地药材系列汇讲(7)道地药材滇黄精的研究近况[J]. 现代医学与健康研究电子杂志, 2020, 4(7): 100–103.
YANG JY, LIU GJ, LIU BY, *et al*. The series of traditional chinese medicine (7) the current state of research on the traditional Chinese medicinal herb *Polygonatum kingianum* [J]. Modern Medicine and Health Research Electronic Journal, 2020, 4(7): 100–103.

[12] 王胤骁, 何鹏飞, 张娅, 等. 滇黄精提取工艺与制剂的研究进展[J]. 云南中医中药杂志, 2024, 45(4): 100–102.
WANG YX, HE PF, ZHANG Y, *et al*. Advancements in extraction methodologies and the formulation of *Polygonatum kingianum* [J]. Yunnan Journal of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica, 45(4): 100–102.

[13] LI M, XIE BZ, LI LW, *et al*. A comprehensive review on the potential applications of medicine *Polygonatum* species in the food sector [J]. Food Bioscience, 2024, 60: 104116.

[14] 吴伟菁, 陈家凤, 赵海军, 等. 加工方式对黄精多糖的结构和活性影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(17): 482–493.
WU WJ, CHEN JF, ZHAO HJ, *et al*. Effects of processing on structural properties and biological activities of *Polysaccharides* from *Polygonatum* spp.: A review [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(17): 482–493.

[15] 李智敏, 石瑶, 赵纯希, 等. 滇黄精多糖的提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2020, 29(6): 535–540.
LI ZM, SHI Y, ZHAO CX, *et al*. A study of the extraction and antioxidation activity of polysaccharide from *Polygonatum kingianum* [J]. Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition), 2020,

29(6): 535–540.

[16] 杜泽飞, 陶爱恩, 夏从龙, 等. 正交实验优选滇黄精中多糖超声提取工艺研究[J]. 海峡药学, 2019, 31(9): 52–54.
DU ZF, TAO AIEN, XIA CL, *et al*. Optimization of utrasonic extraction of polysaccharide from *Polygonatum kingianum* by orthogonal array design [J]. Strait Pharmaceutical Journal, 2019, 31(9): 52–54.

[17] XU CF, XIA BH, ZHANG ZM, *et al*. Research progress in steroidal saponins from the genus *Polygonatum*: Chemical components, biosynthetic pathways and pharmacological effects [J]. Phytochemistry, 2023, 213: 113731.

[18] WAN J, MEI GY, MA JX, *et al*. C-methylated homoisoflavanones from the rhizomes of *Polygonatum cyrtonema* and their chemotaxonomic significance [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2023, 112: 104773.

[19] 王露飞, 安比芳, 冯作山. 基于熵权法与响应面法优化新疆窝窝馕烤制工艺[J]. 中国调味品, 2024, 49(11): 84–92.
WANG LF, AN BF, FENG ZS. Optimization of baking process of Xinjiang wowo naan based on entropy weight method and response surface method [J]. China Condiment, 2024, 49(11): 84–92.

[20] 孙江艳, 刘义凤, 刘磊, 等. 食品感官评价的技术手段与应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 359–366.
SUN JY, LIU YF, LIU L, *et al*. Analysis on the technical means and application status of food sensory evaluation [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 359–366.

[21] 雷卉艳, 牛晓静, 吴延娆, 等. 熵权法在中药制剂研究中的应用概况[J]. 中成药, 2024, 46(10): 3348–3351.
LEI HY, NIU XJ, WU YR, *et al*. The utilization of the entropy weight method in the analysis of traditional Chinese medicine formulations [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2024, 46(10): 3348–3351.

[22] 程倩颖, 练勇, 罗明权, 等. 基于熵权法结合响应面法优化海南砂仁盐炙工艺[J]. 海南医学院学报, 2025, 31(18): 1370–1378.
CHENG QY, LIAN Y, LUO MQ, *et al*. The method of entropy weight combined with response surface method to optimize the salt process of *Amomum longiligulare* T.L.Wu [J]. Journal of Hainan Medical University, 2025, 31(18): 1370–1378.

[23] 闫茂颖, 隋欣彤, 冀国鑫, 等. 甘草汁制灵芝炮制工艺优化及体外抗氧化、抗炎活性评价[J]. 药学研究, 2024, 43(7): 631–638, 647.
YAN MY, SUI XT, JI GX, *et al*. Optimization of processing technology of *Ganoderma lucidum* cooked in licorice juice and evaluation of its antioxidant and anti-inflammatory activities *in vitro* [J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2024, 43(7): 631–638, 647.

[24] DU Y, HUANG PC, JIN WF, *et al*. Optimization of extraction or purification process of multiple components from natural products: Entropy weight method combined with plackett–burman design and central composite design [J]. Molecules, 2021, 26(18): 5572.

[25] 刘明研, 冯亚娟, 黄秋正, 等. 蒸制时间对滇黄精色泽、可溶性成分及糖含量的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 37–41, 47.
LIU MY, FENG YJ, HUANG QZ, *et al*. Influence of steaming time on color, the content of soluble substance and sugar in *Polygonatum kingianum* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(5): 37–41, 47.

[26] WU WJ, HUANG NW, HUANG JP, *et al*. Effects of the steaming process on the structural properties and immunological activities of polysaccharides from *Polygonatum cyrtonema* [J]. Journal of Functional Foods, 2021, 88: 104866.

[27] CHEN ZR, ZHU BJ, CHEN ZX, *et al*. Effects of steam on polysaccharides from *Polygonatum cyrtonema* based on saccharide mapping analysis and pharmacological activity assays [J]. Chinese Medicine, 2022, 17(1): 97.

[28] SUN TT, ZHANG H, LI Y, *et al*. Physicochemical properties and immunological activities of polysaccharides from both crude and wine-processed *Polygonatum sibiricum* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 143: 255–264.

[29] 万晓莹, 刘振丽, 宋志前, 等. 黄精炮制前后多糖的相对分子质量分布和免疫活性比较[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(15): 83–90.
WANG XY, LIU ZL, SONG ZQ, *et al*. Comparison of relative molecular weight distribution and immune activity of polysaccharides in *Polygonati rhizoma* before and after processing [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2021, 27(15): 83–90.

[30] FAN BL, WEI GL, GAN XF, *et al*. Study on the varied content of *Polygonatum cyrtonema* polysaccharides in the processing of steaming and shining for nine times based on HPLC-MS/MS and chemometrics [J]. Microchemical Journal, 2020, 159: 105352.

[31] 尹素娟, 骆航, 孙兴力. 九蒸九制对黄精品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 302–307.
YIN SJ, LUO H, SUN XL. Influence of nine steaming and nine processing methods on the quality of *Polygonatum sibiricum* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(1): 302–307.

(责任编辑: 蔡世佳　韩晓红)