

基于熵权法结合层次分析法和反向传播神经网络优选大皂角油制作工艺

王唱唱¹, 左蓓磊¹, 彭新¹, 朱建光¹, 周宁^{1,2}, 李红伟^{1,2}, 张振凌^{1,2}, 李凯^{1,2*}

1. 河南中医药大学, 河南 郑州 450046

2. 河南省中药特色炮制技术工程研究中心, 河南 郑州 450046

摘要: 目的 优选大皂角酥油制、羊脂油制炮制工艺, 并评价不同油制对大皂角饮片质量的影响。方法 采用正交试验设计, 以刺囊酸、色度值、饮片外观性状、总皂苷、水溶性浸出物、总多糖、得率为指标, 采用熵权法-AHP 计算复合评分, 对辅料用量、烘烤时间、烘烤温度 3 个因素进行考察, 同时采用 BP 神经网络寻求最佳工艺参数, 优选大皂角酥油制、羊脂油制炮制工艺, 并采用多元相关性分析评价不同油制大皂角饮片质量。结果 酥油制大皂角的最佳工艺为每 50 克大皂角, 用酥油 7.5 g, 烘烤时间 20 min, 烘烤温度 160 ℃; 羊脂油制大皂角的最佳工艺为每 50 克大皂角, 用羊脂油 5.0 g, 烘烤时间 20 min, 烘烤温度 140 ℃。相关性分析结果显示, 刺囊酸含量与 L^* 、 a^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 均呈显著负相关, 水溶性浸出物含量与 L^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 均呈显著正相关。结论 油制大皂角饮片质量与色度值存在一定的相关性, 所优选的大皂角酥油制、羊脂油制工艺稳定, 简便易行, 为大皂角相关产品的开发奠定基础。

关键词: 大皂角; 炮制工艺; BP 神经网络; 熵权法; 层次分析; 色度值; 刺囊酸; 水溶性浸出物

中图分类号: R283.1 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2022)15-4687-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2022.15.012

Optimization of *Gleditsiae Sinensis Fructus* oil processing technology based on entropy method combined with analytic hierarchy process and BP neural network

WANG Chang-chang¹, ZUO Bei-lei¹, PENG Xin¹, ZHU Jian-guang¹, ZHOU Ning^{1,2}, LI Hong-wei^{1,2}, ZHANG Zhen-ling^{1,2}, LI Kai^{1,2}

1. Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China

2. Henan Research Center for Special Processing Technology of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China

Abstract: Objective To optimize the best way to process Dazaojiao (*Gleditsiae Sinensis Fructus*, GSF) using two different ingredients named butter and suet oil, and explore the influence of different kinds of oil on the quality of the oil made GSF. **Methods** Based on the orthogonal experiment, the contents of the echinocystic acid, chromatic value, appearance characteristics of the pieces, total saponins, water-soluble leachate, total polysaccharide in GSF and yield were taken as indexes. The entropy-AHP was used to calculate the composite score, the influence of the ratio of ingredients (include butter and suet oil), baking time, baking temperature on the quality of GSF was investigated, at the same time, BP (back propagation) neural networks was used to seek the best processing parameters and optimize the best way to process GSF. Multivariate correlation analysis was used to evaluate the quality of different oil made GSF. **Results** The best processing method of butter made GSF was as follows: 50 g of GSF, 7.5 g of butter, 160 ℃ of butter processing temperature and 20 min of butter processing time. The best processing method of suet oil made GSF was as follows: 50 g of GSF, 5.0 g of suet oil, 140 ℃ of suet oil processing temperature and 20 min of suet oil processing time. Correlation analysis results showed that the content of echinocystic acid was showed a negative correlation with chromatic values L^* , a^* , b^* , E^*_{ab} , the content of water-soluble leachate showed a positive correlation with chromatic values L^* , b^* , E^*_{ab} . **Conclusion** The quality of oil made GSF has certain correlation with chromatic value, the preferred GSF butter, suet oil production process is stable, simple and easy to carry out,

收稿日期: 2022-02-13

基金项目: 河南省高校科技创新人才支持计划 (21HASTIT047); 河南省中医药科学研究专项课题 (20-21ZY1007); 河南省中医药科学研究专项课题 (20-21ZY2155)

作者简介: 王唱唱 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事中药炮制物质基础及炮制机制研究。E-mail: 2461024874@qq.com

*通信作者: 李凯, 男, 教授, 博士生导师, 从事中药炮制研究。Tel: (0371) 65962746 E-mail: cpulikai@163.com

laying the foundation for the development of GSF related products.

Key words: *Gleditsiae Sinensis Fructus*; processing technology; BP neural networks; entropy method; analytic hierarchy process; chromatic value; echinocystic acid; water-soluble leachate

大皂角为豆科皂荚属植物皂荚 *Gleditsia sinensis* Lam.的干燥成熟果实,始载于《神农本草经》,具有祛痰开窍、散结消肿的功效,用于中风口噤、昏迷不醒、癫痫痰盛、关窍不通、喉痹痰阻、顽痰喘咳、咳痰不爽、大便燥结等^[1-2]。大皂角中三萜类皂苷被认为是发挥生物活性的物质基础之一,已有研究表明刺囊酸具有抗炎、抗氧化以及镇痛活性^[3-5]。

油制是传统的炮制方法,炮制辅料常为羊脂油、酥油、麻油等。大皂角的炮制方法始载于《金匱要略》^[6],以酥油为辅料进行炮制,后世《三因及一病症方论》^[7]中也记载羊脂油作为辅料的炮制方法。为更好传承大皂角油制方法,比较2种不同辅料对大皂角炮制后化学成分的变化,本实验在查阅相关文献以及预实验的基础上,以刺囊酸、色度值、饮片外观性状、总皂苷、水溶性浸出物、总多糖、得率等为指标,采用能更加全面评价炮制品质量的熵权法-AHP法,对炮制后的大皂角饮片进行综合评分^[8-10]。本实验在正交试验的基础上,运用具有很强的非线性映射能力和柔性网络结构的BP神经网络^[11],对范围内参数进行寻优,以期筛选大皂角的最佳炮制工艺,同时对油制大皂角饮片主要化学成分含量与色度值进行相关性分析,探讨油制大皂角饮片质量与色度值的关系,为传统以颜色评价质量的经验性方法提供依据。

1 仪器与材料

1.1 仪器

岛津 LC-20ADXR 高效液相色谱仪,日本岛津公司; VA-400 IRIS 视觉分析仪,阿默思上海仪器贸易有限公司; UV-3200S 型紫外可见分光光度计,上海美谱达仪器有限公司; GTR16-2 型高速冷冻离心机,北京时代北利离心机有限公司; Sartorius BT25S 型十万分之一电子分析天平,赛多利斯科学仪器有限公司; SX811 便携式 pH 计,上海三信仪表厂; 优普超纯水机,四川优普超纯科技有限公司; KQ-500DV 型数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司; HWL-125 型电热恒温干燥箱,天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司; HH-S2s 数显恒温水浴锅,金坛市大地自动化仪器厂; FA2104B 型电子天平,上海越平科学仪器苏州制造有限公司; LT3001E 电子

天平,常熟市天量仪器有限责任公司; ZNHW 型智能控温电热套,上海科兴仪器有限公司; SC-150T 型粉碎机,上海尚层工贸有限公司。

1.2 材料

大皂角(编号 S0)购自山东济宁,经河南中医药大学药学院李凯教授鉴定为豆科皂荚属植物皂荚 *G. sinensis* Lam.的干燥成熟果实; 辅料酥油购自拉萨市城关区北京路冲赛康,昌都市军亲农业科技开发有限公司,批号 20211116; 羊脂油购自郑州姚桥农贸批发市场,河北龙翔油脂有限公司,批号 20190216; 对照品刺囊酸(批号 BL10B051)购自成都普思生物科技有限公司; 对照品齐墩果酸(批号 HA0820KA14)、无水葡萄糖(批号 Y19F11J108781)及试剂磷酸二氢钾(批号 M22A11H11606)均购自上海源叶生物科技有限公司,质量分数均 $\geq 98\%$; 甲醇、乙腈,色谱纯,购于安徽天地高纯有限公司; 磷酸,色谱纯,天津市科密欧化学试剂有限公司; 其他试剂为分析纯; 实验用水为双蒸水。

2 方法与结果

2.1 大皂角的炮制

取大皂角(生品 S0),刮去表面黑皮,洗净,润透,切长段,干燥,分别加入酥油、羊脂油拌匀,放入烘箱中烘烤,其中酥油制标记为 S1~S9,羊脂油制标记为 S10~S18。

2.2 总皂苷和总多糖含量测定^[12-14]

2.2.1 对照品溶液的制备 精密称取齐墩果酸对照品适量于 10 mL 量瓶中,用甲醇溶解并稀释至刻度,得质量浓度为 1.20 mg/mL 的对照品溶液,备用。精密称取无水葡萄糖对照品适量于 10 mL 量瓶中,用蒸馏水溶解并稀释至刻度,得质量浓度为 1.00 mg/mL 的对照品溶液,备用。

2.2.2 供试品溶液的制备

(1) 总皂苷供试品溶液:精密称取大皂角样品粉末(过 4 号筛) 0.25 g,加含 1%氨水的甲醇 25 mL,精密称定质量,超声 1 h(功率 500 W),再次精密称定质量,补足损失的质量后滤过,收集续滤液,即得。

(2) 总多糖供试品溶液:精密称取大皂角样品粉末(过 4 号筛) 0.8 g,加 36 mL 80%乙醇超声提取 2 次,每次 1 h(功率 500 W),提取液进行离心

(3000 r/min、15 min、离心半径 10 cm)，弃去上清液，挥干乙醇，加 28 mL 蒸馏水于 50 °C 超声提取 2 次，每次 30 min，离心 (3000 r/min、15 min、离心半径 10 cm)，吸取上清液，即得。

2.2.3 紫外光谱法检测

(1) 总皂苷：精密吸取齐墩果酸对照品溶液及供试品溶液各 100 μ L，置 10 mL 具塞试管中，70 °C 水浴挥干溶剂，加入 0.2 mL 5% 香草醛-冰醋酸溶液，加入 0.8 mL 高氯酸，摇匀，55 °C 水浴 20 min，流水冷却至室温，加入 4 mL 冰醋酸，另以甲醇同法显色处理作为空白溶液，于 556 nm 处测定吸光度 (A) 值。

(2) 总多糖：精密吸取无水葡萄糖对照品溶液及供试品溶液各 200 μ L，置 10 mL 具塞试管中，精密加入 5% 苯酚溶液 (4 °C 保存) 1 mL，摇匀，迅速精密加入硫酸 5 mL，摇匀，室温放置 5 min，置沸水浴中加热 10 min，取出，置冰水中冷却，取出，另取空白对照溶液 200 μ L，于 490 nm 处测定 A 值。

2.2.4 方法学考察

(1) 线性关系考察：精密吸取不同稀释倍数的齐墩果酸、无水葡萄糖对照品溶液，按“2.2.3”项下方法制备不同质量浓度的对照品溶液及空白溶液，分别于 556、490 nm 处测定 A 值。分别以齐墩果酸、无水葡萄糖的质量浓度为横坐标 (X)，以 A 值为纵坐标 (Y) 绘制标准曲线，得齐墩果酸回归方程为 $Y=1.2482X+0.0243$ ， $R^2=0.9993$ ；无水葡萄糖回归方程为 $Y=0.9730X+0.0666$ ， $R^2=0.9988$ 。结果表明，齐墩果酸在 4.00~15.00 μ g/mL 与 A 值呈良好线性关系，无水葡萄糖在 2.00~13.40 μ g/mL 与 A 值呈良好线性关系。

(2) 精密度试验：精密吸取齐墩果酸、无水葡萄糖对照品溶液，按“2.2.3”项下方法制备对应的对照品溶液及空白溶液，齐墩果酸对照品溶液于 556 nm 处测定 A 值，重复 6 次，RSD 值为 0.12%，无水葡萄糖对照品溶液于 490 nm 处测定 A 值，重复 6 次，RSD 值为 0.50%，表明该方法精密度良好。

(3) 重复性试验：精密称取大皂角粉末 6 份，按“2.2.2”项下方法分别制备成供试品溶液，按“2.2.3”项下方法测定总皂苷、总多糖。结果总皂苷平均质量分数为 3.89%，RSD 值为 1.60%，总多糖平均质量分数为 2.01%，RSD 值为 1.78%，表明该方法重复性良好。

(4) 稳定性试验：精密称取大皂角粉末，按

“2.2.2”项下方法分别制备成供试品溶液，按“2.2.3”项下方法每隔 20 min 测定 A 值，计算得到总皂苷、总多糖的 RSD 值分别为 1.28%、1.08%，表明样品溶液在 2 h 内稳定。

(5) 加样回收率试验：精密称取已测定总皂苷和总多糖含量的大皂角粉末，每份约 0.125 g、0.400 g，各平行 6 份，分别精密加入与样品中含量相当的对照品溶液，按“2.2.2”项下方法分别制备成供试品溶液，按“2.2.3”项下方法测定总皂苷及总多糖的 A 值，计算平均加样回收率。结果总皂苷及总多糖平均加样回收率分别为 101.37%、100.17%，RSD 值分别为 1.85%、1.60%，表明所建立含量测定方法准确度良好。

2.3 刺囊酸含量测定

2.3.1 色谱条件^[5] 色谱柱 Zorbax Eclipse XDB-C₁₈ 柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μ m)；流动相为乙腈-磷酸二氢钾溶液 (64:36)，以磷酸调 pH 3.2；体积流量为 1 mL/min，检测波长为 210 nm，色谱柱温度为 30 °C，进样量为 10 μ L。

2.3.2 供试品溶液的制备^[5] 精密称取大皂角粉末 2.0 g (过 4 号筛)，用滤纸包裹，置索氏提取器中，加三氯甲烷 80 mL，水浴加热索氏提取 1 h (80 °C)，放冷，回收三氯甲烷溶剂。药粉挥干溶剂，再次置索氏提取器中，加入甲醇 80 mL，继续提取 4 h，挥干溶剂，加入 80 mL 新配置的 20% 盐酸，回流 2 h，放冷，抽滤，去除水相，收集沉淀物，挥干，用滤纸包好干燥物，置索氏提取器中用甲醇提取至无色，精密量取甲醇提取物 10 mL，稀释至 25 mL，经 0.22 μ m 有机微孔滤膜滤过后作为供试品溶液。

2.3.3 对照品溶液的制备 精密称取刺囊酸对照品 4.15 mg，置 5 mL 量瓶中，加入甲醇溶解并稀释至刻度，摇匀，即得到质量浓度为 0.83 mg/mL 的刺囊酸对照品储备液。

2.3.4 线性关系考察 将“2.3.3”项下配制的对照品溶液按照分别配置成质量浓度为 221.360、110.680、55.340、27.670、13.835 μ g/mL 的溶液，按“2.3.1”项所述的检测条件进行分析，以对照品的质量浓度为横坐标 (X)，相应峰面积为纵坐标 (Y)，绘制标准曲线，刺囊酸回归方程为 $Y=5.0\times 10^6 X-6713.3$ ， $R^2=0.9997$ ，线性范围为 13.835~221.360 μ g/mL。

2.3.5 专属性考察 精密吸取供试品溶液、对照品溶液以及甲醇溶液按“2.3.1”项色谱条件进样测定，色谱图见图 1。

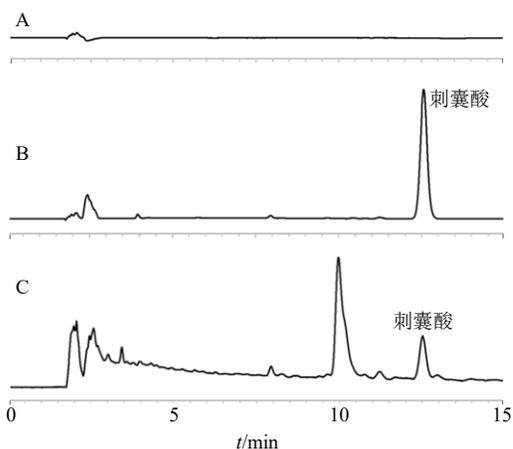


图 1 甲醇 (A)、刺囊酸对照品 (B)、大皂角样品 (C) 的 HPLC 图

Fig. 1 HPLC of methyl alcohol (A), echinocystic acid reference substance (B) and GSF sample (C)

2.3.6 精密度试验 取质量浓度为 0.276 7 mg/mL 的对照品溶液, 按“2.3.1”项下色谱条件连续进样 6 次, 刺囊酸峰面积的 RSD 值为 0.33%, 表明该仪器精密度良好。

2.3.7 重复性试验 取样品 6 份, 按照“2.3.2”项下方法制备供试品溶液, 按“2.3.1”项下色谱条件测定刺囊酸的峰面积, 计算刺囊酸的平均质量分数和 RSD 值, 分别为 0.31%、1.36%, 表明本方法重复性良好。

2.3.8 稳定性试验 精密吸取同一供试品溶液, 分别在不同时间 (0、2、4、6、8、10、12、24 h) 进行分析, 刺囊酸峰面积的 RSD 值为 0.83%, 结果表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.3.9 加样回收率试验 精密称取已知含量的大皂角粉末, 平行 6 份, 分别精密加入与样品中含量相当的刺囊酸对照品溶液, 按照“2.3.2”项下方法制备供试品溶液, 以“2.3.1”项下色谱条件进行分析, 计算平均加样回收率为 98.20%, RSD 值为 2.06%。

2.4 水溶性浸出物含量测定

按照《中国药典》2020 年版四部浸出物测定法 (通则 2201), 采用热浸法, 测定浸出物的含量。

2.5 色度值的测定

2.5.1 测定方法 开机稳定后, 校正镜头曝光度和焦距, 并用 24 色色彩校正板放入托盘中进行校准, 使用 Basler-12 mm 镜头, 光源 D 65, 顶部及底部照明, 重复拍照模式。取大皂角粉末适量于样品盘中, 均匀铺平, 重复 3 次, 消除背景后记录颜色亮度 (L^*)、红绿色度 (a^*)、黄蓝色度 (b^*), 取平均值, 计算总色度值 E^*_{ab} [$E^*_{ab}=(L^{*2}+a^{*2}+b^{*2})^{1/2}$], 结果见表 1。

2.5.2 精密度试验 取生品粉末适量, 重复测量 6 次, 结果 L^* 、 a^* 、 b^* 的 RSD 分别为 0.23%、0.17%、0.22%, 表明仪器精密度良好。

2.5.3 重复性试验 取生品粉末适量, 精密称定 6 份, 每份测量 1 次, 结果 L^* 、 a^* 、 b^* 的 RSD 分别为 0.13%、0.56%、1.15%, 表明该方法重复性良好。

2.5.4 稳定性试验 取生品粉末适量, 分别于 0、2、4、6 h, 进行样品颜色测定, 结果 L^* 、 a^* 、 b^* 的 RSD 分别为 0.20%、0.18%、0.41%, 表明该样品在 6 h 内稳定性良好。

2.6 外观性状评分

油制品外观性状一般应呈焦黄色、质地酥脆、且辅料油被吸尽。外观评分采用总分 100 分制, 评分项目包括表面颜色、酥脆程度、辅料吸收情况; 其中表面焦黄, 计 30~40 分; 表面微黄, 计 20~30; 表面深黄, 计 10~20 分。质地酥脆, 计 30~40; 质地较脆, 计 20~30; 质地不酥脆, 计 10~20 分。油被吸尽, 计 15~20; 油有剩余, 计 10~15; 油量不足, 计 5~10 分。饮片性状评分通过 10 名专家同时评分取平均值, 结果见表 1。饮片外观性状及颜色见图 2。

表 1 大皂角不同炮制品及生品的色度值

Table 1 Chromatic value measurement results of different processed products and raw products of GSF

试验号	L^*	a^*	b^*	E^*_{ab}	外观评分	试验号	L^*	a^*	b^*	E^*_{ab}	外观评分	试验号	L^*	a^*	b^*	E^*_{ab}	外观评分
S0	64.91	3.85	36.66	74.65	-	S7	52.40	13.41	31.90	62.79	63	S14	52.82	12.68	35.28	64.77	70
S1	59.30	6.57	45.38	74.96	59	S8	55.90	8.19	43.84	71.51	79	S15	52.37	11.29	38.49	65.97	71
S2	57.46	8.40	46.11	74.15	72	S9	52.41	12.23	35.53	64.49	65	S16	53.94	10.5	39.15	67.47	67
S3	51.27	13.54	33.92	62.95	71	S10	59.98	6.33	45.09	75.30	62	S17	55.35	9.87	40.16	69.09	80
S4	57.10	8.18	44.26	72.71	83	S11	57.76	7.53	45.21	73.74	74	S18	51.98	12.65	34.41	63.61	65
S5	52.64	13.72	35.19	64.79	80	S12	50.30	12.85	36.44	63.43	76						
S6	50.23	9.10	40.92	65.42	57	S13	56.71	8.13	44.14	72.32	83						



图2 GSF 饮片外观性状及颜色

Fig. 2 Appearance character and color of GSF decoction pieces

2.7 熵权法-AHP 计算复合评分

2.7.1 熵权法确定权重 熵权法是一种根据多项指标所提供的信息来确定各指标权重的客观赋权法。信息熵作为体系混乱程度的度量，指标熵值越小，它所蕴涵的信息量越大，在综合评价中所起作用也越大，其权重也应越高^[16]。各项指标数据经标准化、归一化 (P_{ij}^*)、信息熵 (Q_j) 计算，最终计算得到指标权重 (W_j)。酥油制大皂角，饮片外观性状、刺囊酸、总皂苷、总多糖、水溶性浸出物、得率的权重分别为 0.175 2、0.208 9、0.109 8、0.161 5、0.219 6、0.125 0；羊脂油制大皂角，饮片外观性状、刺囊酸、总皂苷、总多糖、水溶性浸出物、得率的权重分别为 0.129 8、0.245 6、0.078 1、0.192 8、0.236 9、0.116 7。

指标标准化值=(实测值-最小值)/(最大值-最小值)

$$P_{ij}^* = P_{ij} / \sum_{i=1}^n P_{ij}$$

$$Q_j = -\ln(1/n) \sum_{i=1}^n P_{ij}^* \ln P_{ij}^* \quad (\lim_{P_{ij}^* \rightarrow 0} P_{ij}^* \ln P_{ij}^* = 0)$$

$$W_j = (1 - Q_j) / (k - \sum Q_j) \quad (k \text{ 为指标个数})$$

2.7.2 AHP 确定权重 AHP 法是根据指标成对比较的优先判断矩阵方法。根据 2 种不同辅料对大皂角进行炮制后各指标性成分的增减变化，将各指标性成分的含量、炮制得率作为权重指标予以量化，即 6 项指标分成 6 个层次，确定各指标的优先顺序为外观性状>刺囊酸含量>水溶性浸出物含量>总皂苷含量>总多糖含量>得率，构建成对比较的优先判断矩阵，并赋予各项指标的相对评分^[17]。根据评分结果，6 项指标饮片外观性状、刺囊酸、总皂苷、

总多糖、水溶性浸出物、得率经层次分析后得到的权重系数分别为 0.382 5、0.250 4、0.100 6、0.064 1、0.159 6、0.042 8，用 r_j 表示。一致性比例因子 (CR)=0.019 4<0.10，即指标优先比较判断矩阵合理，权重系数有效。

2.7.3 熵权法-AHP 权重系数确定 熵值表现了指标的离散程度，离散程度大的指标具有较大的权重，因而仅凭借熵权法赋权可能使重要指标因离散程度小而权重较小；AHP 法侧重于决策者的主观爱好，而熵权法侧重于挖掘数据本身所蕴含的客观信息，因此，将主观权重与客观权重综合考虑，采用 AHP 得主观权重系数 (r_j)，运用熵权法得客观权重系数 (W_j)，将主观权重系数和客观权重系数综合考虑，按照下列公式计算综合权重 (Z_j)。

$$Z_j = r_j W_j / \sum_{j=1}^n r_j W_j$$

酥油制大皂角饮片外观性状、刺囊酸、总皂苷、总多糖、水溶性浸出物、得率的复合权重分别为 0.345 9、0.309 5、0.060 9、0.061 1、0.193 1、0.029 5；羊脂油制大皂角饮片外观性状、刺囊酸、总皂苷、总多糖、水溶性浸出物、得率的复合权重分别为 0.285 0、0.353 1、0.045 1、0.071 0、0.217 1、0.028 7。

2.7.4 熵权法-AHP 的可行性验证 将不同辅料(酥油、羊脂油)炮制大皂角的熵权法、AHP 2 种评分方法的指标赋权值分别导入 SPSS 25.0 软件进行 Pearson 相关性分析，不同辅料炮制的熵权法和 AHP 权重的相关系数分别为 0.508 0、0.169 0，表明采取熵权法和 AHP 计算综合评分的方法不具有相似性；

将两种方法所得权重系数计算各自的综合评分，再进行 Pearson 相关性分析。结果显示，不同辅料炮制的熵权法和 AHP 权重的相关系数分别为 0.846 0、0.673 0，P 值分别为 0.004 0、0.047 0，表明 2 种方法可相互借鉴，具有良好的可行性。

2.8 正交试验设计及复合评分结果分析

取同一批大皂角饮片 18 份，每份 50 g，按表 2 实验设计，其中 9 份加入酥油拌匀，9 份加入羊脂油拌匀，分别置烘箱内烘烤，取出放凉，即得。基于文献及预实验，辅料用量为 15%时可基本吸尽，故设置为 10%、15%、20%，烘烤的最佳时间范围为 15~25 min，烘烤时间定为 15、20、25 min，烘烤的温度最佳时间范围为 120~160 °C，烘烤温度定为 120、140、160 °C。2 种不同辅料（酥油、羊脂油）对大皂角进行炮制的各指标数据见表 3，复合

表 2 正交因素水平
Table 2 Orthogonal factor level

水平	因素		
	辅料用量 (A) /%	烘烤时间 (B) /min	烘烤温度 (C) /°C
1	10	15	120
2	15	20	140
3	20	25	160

评分结果见表 4，直观分析见表 5、6，方差分析结果见表 7、8。

方差结果显示，酥油制大皂角炮制工艺仅 AHP 综合评分存在显著差异，熵权法所得各因素对综合评分无显著性差异。各因素对熵权-AHP 复合评分的影响顺序为 A>B>C，最佳工艺为 A₂B₂C₃，即每 50 克大皂角，用酥油 7.5 g，烘烤 20 min，烘烤温度

表 3 油制大皂角饮片各指标结果

Table 3 Results of indexes of decoction pieces of oil processed GSF

试验号	刺囊酸/ %	总皂苷/ %	总多糖/ %	水溶性浸 出物/%	外观性 状评分	得率/%	试验号	刺囊酸/ %	总皂苷/ %	总多糖/ %	水溶性浸 出物/%	外观性 状评分	得率/%
S1	0.034 9	0.584 0	0.215 6	42.412 1	66.98	102.97	S10	0.035 8	0.593 5	0.158 4	45.852 3	68.65	104.00
S2	0.032 5	0.520 7	0.196 9	45.720 0	73.08	98.80	S11	0.045 0	0.553 5	0.182 5	48.752 7	73.87	100.60
S3	0.032 3	0.447 5	0.194 0	45.125 5	66.97	95.41	S12	0.032 2	0.526 7	0.230 3	47.232 4	69.71	97.20
S4	0.041 1	0.560 2	0.109 3	42.565 7	77.85	105.40	S13	0.041 2	0.575 7	0.255 6	42.455 8	77.66	108.00
S5	0.048 9	0.555 0	0.201 5	43.375 9	72.39	99.20	S14	0.034 2	0.576 8	0.126 9	42.754 3	67.39	101.00
S6	0.049 0	0.560 4	0.315 1	45.423 2	61.21	104.60	S15	0.031 7	0.593 6	0.383 5	42.403 6	68.48	107.55
S7	0.042 0	0.492 5	0.156 1	42.387 9	62.90	107.17	S16	0.032 8	0.533 5	0.149 6	40.383 9	67.24	111.58
S8	0.040 1	0.540 8	0.138 4	41.583 8	75.26	110.40	S17	0.040 6	0.573 4	0.164 8	40.715 9	74.55	114.00
S9	0.040 0	0.490 2	0.300 8	43.526 5	64.74	106.00	S18	0.031 2	0.477 9	0.225 6	40.660 0	64.30	110.36

表 4 酥油制和羊脂油制大皂角熵权-AHP 复合评分的正交试验结果

Table 4 Orthogonal result of entropy method-AHP and compound score of butter processed and suet oil processed GSF

试验号	A	B	C	D (误差)	酥油制			羊脂油制		
					熵权法综 合评分	AHP 综合 评分	熵权-AHP 复合评分	熵权法综 合评分	AHP 综合 评分	熵权-AHP 复合评分
1	1	1	1	1	40.20	82.28	83.14	42.66	85.34	83.74
2	1	2	2	2	50.23	83.69	84.91	68.97	93.59	94.25
3	1	3	3	3	31.67	78.93	80.71	37.44	84.14	82.59
4	2	1	2	3	51.87	88.31	89.92	60.27	93.16	91.57
5	2	2	3	1	51.44	90.66	93.67	24.30	89.75	79.84
6	2	3	1	2	74.00	91.09	91.57	44.86	85.76	83.20
7	3	1	3	2	36.07	81.07	83.41	21.09	87.93	77.98
8	3	2	1	3	47.84	86.62	88.14	48.37	89.35	87.57
9	3	3	2	1	51.38	84.04	86.17	20.43	78.36	76.78

表 5 酥油制大皂角正交试验直观分析

Table 5 Intuitive analysis of orthogonal test of butter processed GSF

参数	熵权法综合评分				AHP 综合评分				熵权-AHP 复合评分			
	A	B	C	D(误差)	A	B	C	D(误差)	A	B	C	D(误差)
K ₁	122.10	128.14	139.48	143.02	244.90	251.66	259.99	256.98	248.77	256.47	262.85	262.99
K ₂	177.31	149.51	153.49	160.30	270.07	260.98	256.04	255.85	275.15	266.72	261.00	259.89
K ₃	135.29	157.05	119.18	131.39	251.73	254.06	250.66	253.87	257.72	258.45	257.80	258.77
R	55.21	28.91	34.31	28.92	25.16	9.32	9.33	3.11	26.38	10.25	5.05	4.22

表 6 羊脂油制大皂角正交试验直观分析

Table 6 Intuitive analysis of orthogonal test of suet oil processed GSF

参数	熵权法综合评分				AHP 综合评分				熵权-AHP 复合评分			
	A	B	C	D(误差)	A	B	C	D(误差)	A	B	C	D(误差)
K ₁	149.07	124.02	115.33	87.39	263.06	266.43	260.45	253.45	260.58	253.29	254.52	240.36
K ₂	129.43	141.64	149.67	134.92	268.67	272.69	265.11	267.27	254.61	261.66	262.59	255.43
K ₃	89.89	102.73	82.82	146.07	255.64	248.26	261.81	266.65	242.33	242.58	240.41	261.73
R	59.18	38.91	66.85	58.68	5.61	24.43	4.66	13.83	18.25	19.08	22.18	21.37

表 7 酥油制大皂角方差分析

Table 7 Variance analysis of butter processed GSF

方差来源	自由度	熵权法综合评分		AHP 综合评分		熵权-AHP 复合评分	
		离差平方和	F 值	离差平方和	F 值	离差平方和	F 值
A	2	554.200	3.926	112.851	67.84	120.155	37.908
B	2	149.924	1.062	15.576	9.363	19.708	6.218
C	2	342.971	2.430	14.622	8.790	4.370	1.379
D(误差)	2	141.162		1.663		3.170	

表 8 羊脂油制大皂角方差分析

Table 8 Variance analysis of suet oil processed GSF

方差来源	自由度	熵权法综合评分		AHP 综合评分		熵权-AHP 复合评分	
		离差平方和	F 值	离差平方和	F 值	离差平方和	F 值
A	2	605.713	0.935	28.483	0.701	57.722	0.718
B	2	253.080	0.391	107.351	2.640	61.045	0.759
C	2	830.315	1.282	3.824	0.094	84.073	1.046
D(误差)	2	647.574		40.656		80.386	

160 ℃；羊脂油制大皂角优选的最佳工艺为每 50 g 大皂角，用羊脂油 5.0 g，烘烤 15 min，烘烤温度 140 ℃。

2.9 BP 神经网络建模及工艺优化

借助 Matlab R2018a 软件建立反向传播 (BP) 神经网络模型^[18]。输入层为辅料用量、烘烤时间及烘烤温度，输出层为熵权-AHP 复合评分，隐藏层节点为 4，训练函数、学习函数、激活函数均为默认创建网络。

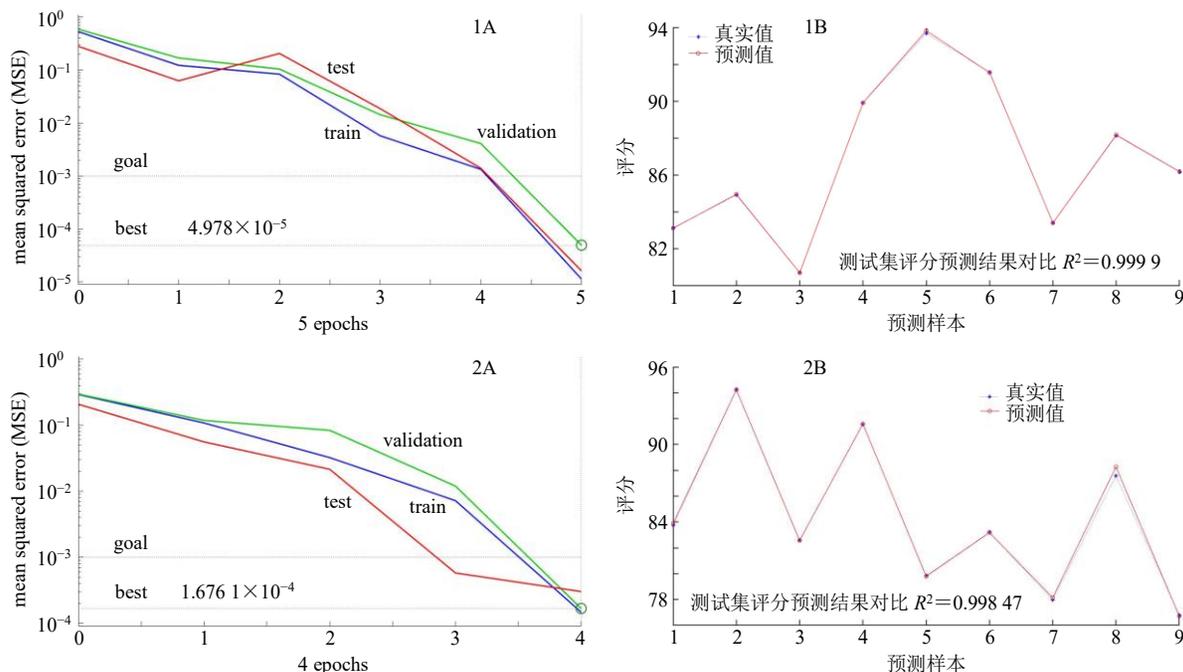
分别将酥油制及羊脂油制的 9 组正交试验数据以留一交叉法进行训练，再分别将 9 组数据作为训练集和验证集，通过误差值对模型进行评估，9 组数据预测的绝对误差，其中酥油制均≤0.004 5，羊脂油制均≤0.011 7，表明模型具有较好的精度。

由图 3-1A 可知，样本迭代到第 5 步达到最好的网络验证性能；由图 3-2A 可知，样本迭代到第 4 步达到最好的网络验证性能。均方误差值分别为 0.007 055、0.012 946。

将9组数据实测值与预测值进行比较(图3-1B、3-2B),表明所建立的模型稳定可靠,其中图3-1A、B为酥油制;图3-2A、B为羊脂油制。再分别以9组数据作为训练集,在上述建模条件对复合评分进行预测。在正交试验参数基础上,设置各辅料用量为10%~20%(步长2.5%),烘烤时间15~25 min(步长2.5 min),烘烤温度120~160 °C(步长5 °C),通过所建立的模型计算复合评分,预测评分结果见表9、10。

由表9可知,酥油制时,随着酥油用量的增加,复合评分总体呈先升高后降低的趋势,酥油用量为15%时复合评分最高;当酥油用量适宜时,复合评分随烘烤时间增加而升高,随着烘烤时间的延长,复合评分呈降低的趋势(22.5~25 min),所以烘烤时间不易太长,随着烘烤温度增加,复合评分呈升高的趋势,酥油制大皂角的最佳工艺为15%,烘烤20 min,温度155 °C。

由表10可知,羊脂油制时,随着羊脂油用量的



1-酥油制 2-羊脂油制 A-网络验证 B-预测值与实测值比较

1-butter processed 2-suet oil processed A-network verification B-comparison between predicted value and measured value

图3 BP神经网络可靠性验证

Fig. 3 Reliability verification of BP neural network

表9 酥油制大皂角 BP神经网络预测评分

Table 9 Prediction score of BP neural network of butter processed GSF

试验号	辅料用量/%	烘烤时间/min	烘烤温度/°C	预测评分	试验号	辅料用量/%	烘烤时间/min	烘烤温度/°C	预测评分	试验号	辅料用量/%	烘烤时间/min	烘烤温度/°C	预测评分
1	0.1	15	120	82.824 5	37	0.1	25	120	84.734 5	217	0.2	25	120	86.1914
2	0.1	15	125	82.686 3	38	0.1	25	125	83.805 2	218	0.2	25	125	86.3400
3	0.1	15	130	82.468 5	39	0.1	25	130	83.017 3	219	0.2	25	130	86.478 0
4	0.1	15	135	82.146 1	40	0.1	25	135	82.372 9	220	0.2	25	135	86.589 3
5	0.1	15	140	81.707 8	41	0.1	25	140	81.861 1	221	0.2	25	140	86.674 3
6	0.1	15	145	81.179 3	42	0.1	25	145	81.463 6	222	0.2	25	145	86.765 6
7	0.1	15	150	80.624 7	43	0.1	25	150	81.159 2	223	0.2	25	150	86.915 4
8	0.1	15	155	80.103 0	44	0.1	25	155	80.927 0	224	0.2	25	155	87.154 9
9	0.1	15	160	79.640 7	45	0.1	25	160	80.747 5	225	0.2	25	160	87.476 0
...								

表 10 羊脂油制大皂角 BP 神经网络预测评分

Table 10 Prediction score of BP neural network of suet oil processed GSF

试验号	辅料用 量/%	烘烤时 间/min	烘烤温 度/℃	预测评分	试验号	辅料用 量/%	烘烤时 间/min	烘烤温 度/℃	预测评分	试验号	辅料用 量/%	烘烤时 间/min	烘烤温 度/℃	预测评分
1	0.1	15	120	83.656 9	37	0.1	25	120	84.775 0	217	0.2	25	120	76.543 8
2	0.1	15	125	87.057 1	38	0.1	25	125	86.202 6	218	0.2	25	125	79.793 6
3	0.1	15	130	90.719 4	39	0.1	25	130	86.910 3	219	0.2	25	130	81.087 0
4	0.1	15	135	93.258 8	40	0.1	25	135	86.795 7	220	0.2	25	135	80.883 0
5	0.1	15	140	94.452 6	41	0.1	25	140	85.792 3	221	0.2	25	140	80.537 5
6	0.1	15	145	94.812 9	42	0.1	25	145	84.531 2	222	0.2	25	145	80.550 6
7	0.1	15	150	94.614 2	43	0.1	25	150	83.540 2	223	0.2	25	150	80.916 8
8	0.1	15	155	93.773 1	44	0.1	25	155	82.780 4	224	0.2	25	155	81.632 0
9	0.1	15	160	92.249 4	45	0.1	25	160	82.129 2	225	0.2	25	160	82.715 1
...					...									

增加,复合评分呈降低的趋势,说明辅料不宜太多,羊脂油用量为 10%时复合评分最高,随着烘烤时间的增加,综合评分呈升高的趋势,随着温度的升高,复合评分先升高后降低,温度为 145 ℃时复合评分最高。羊脂油制大皂角的最佳工艺为 10%,烘烤时间 15 min,烘烤温度 145 ℃。

2.10 工艺验证

分别以 BP 神经网络筛选的最佳工艺、正交试

验筛选的最佳工艺 (A₂B₂C₁) 及最高复合评分工艺 (A₂B₂C₃),以酥油为辅料炮制 9 批次饮片,编号 1~9;分别以 BP 神经网络筛选的最佳工艺、正交试验筛选的最佳工艺 (A₁B₂C₂) 及最高复合评分工艺 (A₁B₂C₂),以羊脂油为辅料炮制 9 批次饮片,编号 10~18,各项指标结果见表 11。结果显示,正交试验筛选的最佳工艺与 BP 神经网络预测最佳工艺评分相近,说明 BP 神经网络预测结果良好。

表 11 油制大皂角工艺验证结果

Table 11 Verification results of processing of oil processed GSF

组别	试验号	刺囊酸/%	总皂苷/%	总多糖/%	水溶性浸出物/%	外观性状评分	得率/%	复合评分均值
正交最佳工艺	1	0.048 0	0.545 6	0.190 0	43.802 3	73.64	98.97	99.108 9
	2	0.048 2	0.550 0	0.186 8	43.602 6	72.64	99.53	
	3	0.048 5	0.549 8	0.190 1	44.021 8	73.16	99.31	
正交最高评分	4	0.047 4	0.535 3	0.186 3	43.901 2	69.70	102.12	96.539 3
	5	0.047 1	0.538 5	0.190 1	43.832 7	69.82	101.68	
	6	0.047 8	0.536 7	0.190 0	44.021 3	70.12	101.97	
BP 神经网络最佳工艺	7	0.048 4	0.546 4	0.187 1	44.032 5	73.49	100.46	99.158 7
	8	0.048 4	0.550 3	0.185 4	43.754 8	72.85	100.13	
	9	0.048 6	0.558 7	0.190 1	43.290 5	72.70	100.89	
正交最佳工艺	10	0.045 2	0.550 0	0.176 1	48.885 3	72.00	100.27	98.212 7
	11	0.045 1	0.545 4	0.188 1	49.300 2	72.04	100.36	
	12	0.045 5	0.546 4	0.180 5	48.657 3	72.20	100.53	
正交最高评分	13	0.045 2	0.547 6	0.189 5	48.403 1	73.83	100.74	99.007 6
	14	0.045 3	0.551 4	0.184 9	48.932 7	73.07	100.43	
	15	0.045 1	0.543 8	0.190 1	49.014 2	73.16	100.95	
BP 神经网络最佳工艺	16	0.045 2	0.551 5	0.182 0	48.917 4	73.09	99.96	98.978 4
	17	0.045 8	0.551 0	0.188 0	49.002 3	72.85	99.68	
	19	0.045 4	0.557 4	0.180 0	48.890 5	73.02	100.13	

2.11 油制大皂角有效成分含量与色度值相关性分析^[19]

按照所优选油制工艺炮制 6 批大皂角饮片，采用 SPSS 25.0 统计软件将总皂苷、总多糖、刺囊酸、

水溶性浸出物含量与色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 进行相关性分析，见表 12。结果显示，刺囊酸含量与 L^* 、 a^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 均呈显著负相关，水溶性浸出物含量与 L^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 均呈显著正相关。

表 12 6 批油制大皂角饮片有效成分含量与色度值相关性分析

Table 12 Analysis results of correlation between content of active components and apparent color value of six batches of oil processed GSF

指标成分	Pearson 相关性分析				P 值			
	L^*	a^*	b^*	E^*_{ab}	L^*	a^*	b^*	E^*_{ab}
刺囊酸	-0.948**	-0.997**	-0.923**	-0.939**	0.004	0.000	0.009	0.005
总皂苷	0.217	0.021	0.018	0.105	0.679	0.969	0.973	0.843
总多糖	-0.720	0.699	-0.730	-0.737	0.107	0.122	0.100	0.095
水溶性浸出物	0.951**	-0.997**	0.998**	0.987**	0.004	0.000	0.000	0.000

3 讨论

3.1 大皂角指标成分的选择及炮制工艺筛选方法的确立

大皂角中主要含有皂苷和多糖类成分，其中皂苷类成分有抗癌、抗病毒、调节免疫功能、防治心血管疾病等功效；大皂角主要用来祛痰，其发挥祛痰作用的机理为刺激性祛痰，但水溶性多糖类成分含量较高时可能导致刺激性较大，所以本研究将总多糖该指标设定的权重较低。刺囊酸为五环三萜类皂苷元，已有研究表明刺囊酸具有抗炎、抗氧化以及镇痛活性。其次外观性状也是评价饮片质量至关重要的因素，所以本研究通过测定不同炮制品的色度值、并结合外观评分对外观性状进行比较。同时通过主客观因素（AHP-熵权法）进行复合评分，主观评分采用层次分析法（AHP），客观评分采用熵权法。除此之外，主观评分法还包括 G1 法，客观评分法还包括主成分分析法^[20]。

3.2 炮制前后各指标变化情况

以 2 种不同辅料（酥油、羊脂油）对大皂角进行炮制后，各指标成分含量较生品均发生变化。其中刺囊酸、总皂苷的含量明显升高，可能在炮制过程中温度适中（文火），没有造成皂苷类成分的降解，同时总皂苷在炮制过程中有一部分会转变成皂苷元，从而使刺囊酸含量增加^[21]；水溶性浸出物的含量有升有降，可能是因为大皂角中含有较大一部分的皂苷和水溶性多糖，在炮制前需要对大皂角浸润、切段，导致水溶性浸出物的含量降低，而炮制过程中的烘烤温度以及时间适宜时会促使大皂角组织结构变得疏松，从而利于成分的溶出，水溶性浸出物

的含量升高；总多糖的含量较生品升降不一，总体呈降低趋势，可能与炮制过程中具有刺激咽喉的水溶性多糖的降低有关，这与炮制消除刺激性认识是相符的^[22]。

3.3 不同辅料对大皂角炮制的差异性分析

不同辅料对大皂角进行炮制，各成分含量也不相同。显著性分析结果显示，酥油炮制大皂角，其刺囊酸、总皂苷、总多糖含量较羊脂油炮制时高，而水溶性浸出物含量则呈现相反的结果，这可能与酥油和羊脂油中主要化学成分不同有关。酥油中不饱和脂肪酸高于 40%，功能性脂肪酸包括共轭亚油酸、二十碳五烯酸、二十二碳六烯酸、 α -亚麻酸、花生四烯酸等含量较高^[23-24]，羊脂油中含有大量脂肪酸类成分，如油酸、硬脂酸、棕榈酸、甘油酯等。不同油制大皂角饮片有效成分含量与色度值进行相关性分析，结果表明，刺囊酸含量与 L^* 、 a^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 均呈显著负相关，水溶性浸出物含量与 L^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 均呈显著正相关，表明通过对颜色的量化可以客观地初步判断油制大皂角中刺囊酸含量、水溶性浸出物的变化趋势。从 2 种不同辅料炮制大皂角得率来看，羊脂油制的大皂角得率更高，可能与羊脂油较酥油更易被吸收，导致不同辅料炮制后各成分含量存在差异，但其具体原因还需要进一步研究。现在已有研究表明羊脂油中脂肪酸类成分具有脂肪长链以及表面活性，可以促进形成胶束、囊泡等多种药物载体的超分子自组装体结构^[25-26]，然而酥油是否具有这些作用还有待考证。

本研究通过使用不同油为辅料对大皂角进行炮制，采用正交试验设计，优选最佳炮制工艺，同时

采用 BP 神经网络对最佳炮制工艺进行预测。分别运用最佳油制工艺对大皂角进行炮制, 并采用多元相关分析研究不同油制大皂角饮片颜色与饮片质量的相关性, 探讨了辅料油对油制大皂角饮片质量的影响, 同时为油制大皂角特色炮制品的传承以及临床合理应用奠定一定的基础。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 22.
- [2] 神农本草经 [M]. 陈德兴注. 福州: 福州科学技术出版社, 2012: 95.
- [3] Chen J P, Li Z G, Zheng K Y Z, et al. Chemical fingerprinting and quantitative analysis of two common *Gleditsia sinensis* fruits using HPLC-DAD [J]. *Acta Pharm*, 2013, 63(4): 505-515.
- [4] Lian X Y, Zhang Z Z. Quantitative analysis of *Gleditsia saponins* in the fruits of *Gleditsia sinensis* Lam. by high performance liquid chromatography [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2013, 75: 41-46.
- [5] Chen B L, Zhao Y Y, Li W, et al. Echinocystic acid provides a neuroprotective effect via the PI3K/AKT pathway in intracerebral haemorrhage mice [J]. *Ann Transl Med*, 2020, 8(1): 6.
- [6] 汉·张仲景. 阎昊天撰. 金匱要略 [M]. 2019: 66.
- [7] 宋·陈言. 三因极一病证方论: 十八卷 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1957.
- [8] 李慧, 刘其南, 张丽, 等. 基于层次分析法及多指标正交试验优选酒炖女贞子炮制工艺 [J]. *中草药*, 2016, 47(16): 2832-2837.
- [9] 刘梦云, 秦祎苒, 刘秋怡, 等. 基于正交试验设计-熵权逼近理想解排序法(TOPSIS)优选巴戟天酒炙工艺及炮制前后药效对比研究 [J]. *中草药*, 2021, 52(20): 6208-6215.
- [10] 姜春慧, 万芳新, 谢永清, 等. 基于 AHP-熵权法的甜叶菊叶片远红外干燥工艺优化[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022(06):1-9.
- [11] 李永华, 陈鹏, 田宗睿, 等. 基于改进 BP 神经网络的结构可靠度计算方法 [J]. *机械强度*, 2021, 43(6): 1359-1365.
- [12] 沈钱能, 陈丽红, 黄紫炎, 等. 不同软化方法对甘草质
- 量的影响 [J]. *中草药*, 2020, 51(1): 76-83.
- [13] 张留记, 王建霞, 屠万倩, 等. 生地黄与熟地黄中 5 个苷类成分和总多糖的含量比较 [J]. *天然产物研究与开发*, 2019, 31(4): 566-571.
- [14] 高洁, 董文宾, 王勇, 等. 皂荚多糖超声波提取工艺优化及体外抗氧化活性研究 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(21): 124-129.
- [15] 邓显仪, 陈晓兰, 唐红艳, 等. 猪牙皂中刺囊酸和齐墩果酸的含量测定 [J]. *贵州科学*, 2017, 35(6): 25-29.
- [16] 吴红伟, 李东辉, 边甜甜, 等. 基于响应面法结合熵权法多指标优选黄芪药材产地加工炮制一体化工艺 [J]. *中草药*, 2021, 52(19): 5854-5861.
- [17] 李潮, 于欢, 温柔, 等. 基于 AHP-CRITIC 混合加权法和响应面法的盐车前子炮制工艺优选及其利尿作用考察 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2020, 26(20): 124-131.
- [18] 钱怡洁, 皮文霞, 朱广飞, 等. 基于熵权法结合层次分析法和反向传播神经网络优选酒炙肉桂制工艺 [J]. *中草药*, 2021, 52(22): 6816-6824.
- [19] 张桂梅, 岳珠珠, 王慧楠, 等. 基于 AHP-熵权法结合色差原理评价不同辅料大米对米炒党参饮片的影响 [J]. *中草药*, 2021, 52(24): 7447-7454.
- [20] 邱丽媛, 梁泽华, 吴鑫雨, 等. 基于模式识别和遗传神经网络算法的醋香附近红外光谱等级评价和含量预测模型研究 [J]. *中草药*, 2021, 52(13): 3818-3830.
- [21] 李喆, 刘博男, 张超, 等. 多指标综合评价结合层次分析法优化酸枣仁炒制工艺 [J]. *中成药*, 2020, 42(8): 2089-2094.
- [22] 田先娇, 罗雪维, 杨新周, 等. 不同炮制方式对黄精有效成分含量的影响 [J]. *化学试剂*, 2021, 43(6): 790-794.
- [23] 谢司伟, 刘春爱, 孙术国, 等. 西藏不同海拔牦牛酥油的营养、风味及功能特性比较 [J]. *食品与机械*, 2021, 37(2): 19-23.
- [24] 张琦, 薛璐, 胡志和. 传统酥油研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2013, 34(8): 361-364.
- [25] 徐凤娟, 孙娥, 张振海, 等. 中药炮制辅料羊脂油的研究思路探析 [J]. *中华中医药杂志*, 2014, 29(8): 2543-2547.
- [26] 侯健, 李杰, 孙娥, 等. 基于体内自组装胶束形成机制探究羊脂油炙淫羊藿对大鼠温肾助阳的增效作用 [J]. *中国中药杂志*, 2016, 41(14): 2633-2637.

[责任编辑 郑礼胜]