

## 基于熵权法结合层次分析法和反向传播神经网络优选乌梅肉炮制工艺

靳雅珂<sup>1</sup>, 张颖<sup>1</sup>, 柯鑫<sup>1</sup>, 高蓉<sup>1</sup>, 袁心如<sup>1</sup>, 乔婵婵<sup>1</sup>, 李婷<sup>1</sup>, 炊云钊<sup>1</sup>, 令颖<sup>1</sup>, 宋甜甜<sup>1</sup>, 段玺<sup>2</sup>, 宋道<sup>1,3\*</sup>

1. 陕西中医药大学, 陕西 咸阳 712046
2. 陕西中医药大学附属医院, 陕西 咸阳 712000
3. 中药制药与新药开发教育部工程研究中心, 北京 100029

**摘要:** 目的 优化乌梅 *Mume Fructus* 肉的炮制工艺, 确定最佳炮制工艺参数。方法 采用 HPLC 法测定乌梅肉中指标成分 5-羟甲基呋喃甲醛 (5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF)、新绿原酸、绿原酸、隐绿原酸、咖啡酸的含量; 采用紫外-可见分光光度计测定乌梅肉中多糖的含量; 选择各化学成分的含量、水溶性浸出物含量以及外观性状作为评价指标, 通过层次分析 (analytic hierarchy process, AHP)-熵权法混合加权法确定各评价指标的权重系数; 选择加水量、闷润时间、蒸制时间为因素进行  $L_9(3^4)$  正交试验, 采用反向传播神经网络 (back propagation neural network, BPNN) 预测乌梅肉的最优炮制工艺参数并验证。**结果** BPNN 优化工艺优于正交筛选工艺, 且预测结果稳定可靠, 综合评分最高, 为 83.26, 乌梅肉的最佳蒸制工艺为 100 kg 乌梅加 22.5 kg 水, 闷润 60 min, 蒸制 30 min。**结论** 所确定的乌梅肉炮制工艺切实可行, 能够为饮片的工业化生产提供科学的数据支持, 也可为保障乌梅肉的质量及临床应用提供理论依据。

**关键词:** 熵权法; 层次分析法; 乌梅肉; 反向传播神经网络; 炮制工艺; 正交试验

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)10-3753-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.10.008

## Optimization of processing technology for *Mume Fructus* flesh based on entropy weight method combined with analytic hierarchy process and back propagation neural network

JIN Yake<sup>1</sup>, ZHANG Ying<sup>1</sup>, KE Xin<sup>1</sup>, GAO Rong<sup>1</sup>, YUAN Xinru<sup>1</sup>, QIAO Chanchan<sup>1</sup>, LI Ting<sup>1</sup>, CUAN Yunzhao<sup>1</sup>, LING Ying<sup>1</sup>, SONG Tiantian<sup>1</sup>, DUAN Xi<sup>2</sup>, SONG Xiao<sup>1,3</sup>

1. Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712046, China
2. Affiliated Hospital of Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712000, China
3. Engineering Research Center for Pharmaceutics of Chinese Materia Medica and New Drug Development, Ministry of Education, Beijing 100029, China

**Abstract: Objective** To optimize the best processing technology of Wumei (*Mume Fructus*, MF) flesh and determine the best processing parameters. **Methods** The contents of 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF), neochlorogenic acid, chlorogenic acid, cryptochlorogenic acid and caffeic acid were determined by HPLC. The content of polysaccharide in MF flesh was determined by ultraviolet-visible spectrophotometer. The content of each chemical component, the content of water-soluble extracts and the appearance traits were selected as the evaluation indexes, and the weight coefficient of each evaluation index was determined by analytic hierarchy process (AHP)-entropy weight method hybrid weighting method. The  $L_9(3^4)$  orthogonal test was carried out with water addition, moistening time and steaming time as factors. Back propagation neural network (BPNN) was used to predict and verify the optimal processing parameters of MF flesh. **Results** The BPNN optimization process was superior to the orthogonal screening process, and the prediction results were stable and reliable. The composite score was the highest, which was 83.26. The best steaming

收稿日期: 2025-12-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1711204); 陕西省教育厅项目 (21JC011); 陕西省中医药管理局项目 (2021-04-ZZ-007); 咸阳市科学技术局项目 (L2024-QCY-ZYYJJQ-X50)

作者简介: 靳雅珂, 硕士研究生, 研究方向为中药新制剂与新剂型研究。E-mail: 1944271485@qq.com

\*通信作者: 宋道, 教授, 硕士生导师, 主要从事中药制剂工艺与新产品开发研究。E-mail: song-xiaoyao@163.com

process of MF flesh was 22.5 kg of water per 100 kg of MF flesh, moistening for 60 min, and steaming for 30 min. **Conclusion** The determined processing technology of MF flesh is scientific and feasible, which can provide scientific data support for the industrial production of decoction pieces, and also provide a theoretical basis for ensuring the quality and clinical application of MF flesh.

**Key words:** entropy weight method; analytic hierarchy process; *Mume Fructus* flesh; back propagation neural network; processing technology; orthogonal test

乌梅 *Mume Fructus* 是由蔷薇科植物梅 *Prunus mume* (Sieb.) Sieb. et Zucc. 的干燥近成熟果实加工而成, 主产于四川、福建、云南等地, 具敛肺、涩肠、生津之功效, 现代研究指出, 其活性成分主要包括没食子酸等有机酸类化合物<sup>[1]</sup>, 乌梅的炮制应用历史悠久, 早在汉代《伤寒论》中已有其净制记载, 后世临床尤为重视乌梅肉的使用, 如秦药优势中成药品种固肠止泻丸中, 乌梅肉便作为君药而被大量投用。中药饮片质量直接关系临床疗效与用药安全, 《中国药典》2025 年版收录了乌梅、乌梅肉与乌梅炭 3 种饮片规格, 然而, 乌梅肉项下仅规定了炮制方法, 相关检查、含量测定等关键质量标准尚属空白, 同时, 各地方炮制规范所载限度指标是否科学合理亦缺乏统一评价, 《中国药典》作为国家药品标准, 其收录的指标成分具有法定性和普适性, 当前药典以枸橼酸作为乌梅的指标性成分, 主要基于其含量较高、易于检测, 并能部分反映乌梅的“生津、酸敛”之性<sup>[2]</sup>, 然而, 这一指标在用于评价乌梅肉这一特定炮制品的质量时, 可能存在一定的局限性。基于上述质量标准不完善、控制指标不一致等问题, 严重影响了乌梅肉饮片质量的均一性与可控性, 其炮制过程尚处于传统的经验调控阶段, 缺乏清晰的技术参数, 操作人员难以保证乌梅肉炮制过程的稳定和均匀性, 进而对饮片质量产生一定的影响, 因此, 系统建立乌梅肉科学、规范的质量标准, 已成为保障其临床用药安全有效的迫切任务。

本研究基于正交试验设计, 采用 HPLC 法测定乌梅肉中绿原酸、新绿原酸、隐绿原酸、咖啡酸及新生成分 5-羟甲基呋喃甲醛 (5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF) 的含量, 由于复方成分复杂, 同时增加了多糖含量、水溶性浸出物、外观性状等多种指标的测定。

中药提取或炮制工艺中多指标评价必须重视指标权重方法的选择, 现有研究多采用主客观组合评价方法筛选最佳提取工艺, 本研究选择主观赋值法层次分析 (analytic hierarchy process, AHP) 法和客观赋值法熵权法组合赋权确定指标权重, 通过 AHP-熵权法计算指标权重系数, 进行综合评分, 将

其应用于优选乌梅肉炮制工艺, 确立工艺参数, 最后采用反向传播神经网络 (back propagation neural network, BPNN) 预测最佳蒸制工艺参数, 以期进一步完善蒸制乌梅肉的质量控制, 保证乌梅肉质量的均一稳定, 建立更加全面的药材质量评价方法。

## 1 仪器与材料

### 1.1 仪器

NewClassic MS-S 型十万分之一分析天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; Agilent 1200 型高效液相色谱仪, 美国安捷伦科技公司; HH-S4 型电热恒温水浴锅, 北京科伟永兴仪器有限公司; TQ-400 型高速多功能粉碎机, 永康市天祺盛世工贸有限公司; 98-1-B 型电子调温电热套, 天津市泰斯特仪器有限公司; BSA224S 型万分之一电子天平, 赛多利斯科学仪器有限公司; GZX-DH.500BS 型电热恒温干燥箱, 上海跃进医疗器械有限公司; L5 型紫外-可见分光光度计, 上海仪电分析仪器有限公司。

### 1.2 试药与试剂

乌梅药材, 购自陕西中医药大学附属医院, 批号 20220901, 陕西兴盛德药业有限责任公司, 经陕西中医药大学颜永刚教授鉴定, 为蔷薇科李属植物梅 *P. mume* (Sieb.) Sieb. et Zucc. 的近成熟果实, 均为正品。对照品新绿原酸 (批号 PS000974)、隐绿原酸 (批号 PS001110)、咖啡酸 (批号 PS010522)、5-羟甲基呋喃甲醛 (批号 PS020460) 均购自成都普思生物科技有限公司, 含量测定用, 质量分数 >98.0%; 对照品绿原酸 (批号 Y20A11K111541)、葡萄糖 (批号 S10S9I69833) 购自上海源叶生物科技有限公司, 含量测定用, 质量分数 ≥98.0%; 苯酚, 批号 20201020, 天津市天力化学试剂有限公司; 甲醇为色谱纯, 购自美国 Fisher 公司; 浓硫酸 (2022020701)、乙醚 (批号 2023022701), 成都市科隆化学品有限公司; 甲酸为色谱纯, 购自天津科密欧化学试剂有限公司; 无水乙醇为分析纯, 购自天津市天力化学试剂有限公司。

## 2 方法与结果

### 2.1 指标成分定量测定

#### 2.1.1 色谱条件 色谱柱为 Agilent 5 TC-C<sub>18</sub> (2)

(250 mm×4.6 mm, 5 μm); 流动相为 0.1% 甲酸水溶液-甲醇; 梯度洗脱: 0~1.5 min, 5% 甲醇; 1.5~3 min, 5%~15% 甲醇; 3~6 min, 15%~25% 甲醇; 6~10 min, 25%~35% 甲醇; 10~13 min, 35%~45% 甲醇; 13~15 min, 45%~70% 甲醇; 15~20 min, 70%~95% 甲醇; 20~22 min, 95% 甲醇; 22~24 min, 95%~5% 甲醇; 24~25 min, 5% 甲醇; 体积流量 1 mL/min; 进样量 10 μL; 柱温 35 °C; 检测波长 284 nm; 理论塔板数以各成分计算均不低于 11 000。

**2.1.2 供试品溶液的制备** 取乌梅肉样品 1 g, 精密称定, 加入 30% 甲醇 50 mL, 称定质量, 超声提取 1 h, 提取温度为室温, 提取功率为 300 W, 用 30% 甲醇补足缺失的质量, 提取液用 0.22 μm 微孔滤膜滤过, 作为供试品溶液。

**2.1.3 对照品溶液的制备** 精密称取 5-HMF、绿原酸、新绿原酸、隐绿原酸和咖啡酸对照品适量, 置于 10 mL 量瓶中, 加甲醇配制成质量浓度分别为 0.024、0.109、0.160、0.154、0.032 mg/mL 的混合对照品溶液。

**2.1.4 专属性考察** 取供试品溶液、混合对照品溶液、空白溶液 (甲醇), 按照“2.1.1”项下色谱条件测定并记录色谱图, 结果见图 1, 结果表明, 供试品溶液与混合对照品溶液色谱峰的出峰位置相同, 同时各成分均能达到有效分离且空白溶剂无干扰。

**2.1.5 线性关系考察** 精密吸取混合对照品溶液适量, 用甲醇分别稀释 2、4、5、10、20 倍, 制成不

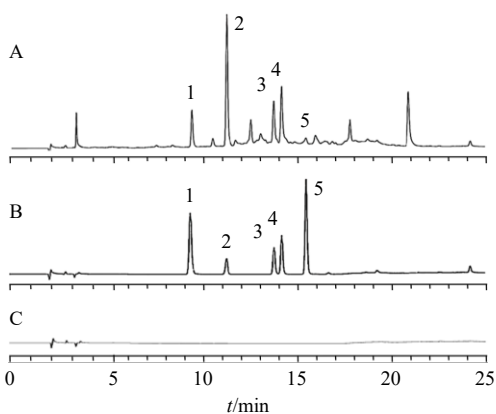
同质量浓度的对照品溶液, 按照“2.1.1”项下色谱条件进行测定, 以质量浓度为横坐标 (X), 峰面积为纵坐标 (Y), 绘制标准曲线, 进行线性回归, 计算得回归方程分别为 5-HMF  $Y=74\ 903 X-116.89$ ,  $r=0.999\ 9$ , 线性范围 0.001~0.024 mg/mL; 绿原酸  $Y=19\ 397 X-71.075$ ,  $r=0.999\ 3$ , 线性范围 0.005~0.109 mg/mL; 新绿原酸  $Y=15\ 522 X-18.847$ ,  $r=0.999\ 8$ , 线性范围 0.008~0.160 mg/mL; 隐绿原酸  $Y=18\ 096 X-182.16$ ,  $r=0.999\ 6$ , 线性范围 0.008~0.154 mg/mL; 咖啡酸  $Y=37\ 156 X-73.483$ ,  $r=0.999\ 6$ , 线性范围 0.002~0.032 mg/mL; 结果表明, 5-HMF、新绿原酸、绿原酸、隐绿原酸和咖啡酸各对照品溶液质量浓度分别在 0.001~0.024、0.005~0.109、0.008~0.160、0.008~0.154、0.002~0.032 mg/mL 与色谱峰面积的线性关系良好, 以信噪比 (S/N)=3 为检测限, S/N=10 为定量限, 5-HMF、绿原酸、新绿原酸、隐绿原酸、咖啡酸的检测限分别为 0.200、0.683、0.937、1.200、0.174 μg/mL, 定量限分别为 0.665、2.275、3.090、4.000、0.580 μg/mL。

**2.1.6 精密度试验** 精密吸取混合对照品溶液适量, 按照“2.1.1”项下色谱条件进行分析 6 次, 记录峰面积并计算 RSD 值, 5-HMF、新绿原酸、绿原酸、隐绿原酸和咖啡酸峰面积的 RSD 值分别为 2.05%、1.01%、1.08%、1.06%、0.90%, 结果表明该仪器精密度良好。

**2.1.7 稳定性试验** 取同一批乌梅肉样品, 按照“2.1.2”项下方法制备供试品溶液, 再按色谱条件分别于 0、2、4、6、8、10、12 h 进样, 记录峰面积并计算 RSD 值, 5-HMF、新绿原酸、绿原酸、隐绿原酸和咖啡酸峰面积的 RSD 值分别为 0.52%、0.10%、0.69%、1.69%、1.19%, 结果表明供试品溶液在 12 h 内稳定性良好。

**2.1.8 重复性试验** 取同一批乌梅肉样品, 按照“2.1.2”项下方法制备供试品溶液 6 份, 再按照“2.1.1”项下色谱条件进行分析, 记录峰面积, 并计算含量和 RSD 值, 5-HMF、新绿原酸、绿原酸、隐绿原酸和咖啡酸含量的 RSD 值分别为 0.51%、0.41%、0.78%、1.06%、0.52%, 结果表明该方法重复性良好。

**2.1.9 加样回收率试验** 取各成分含量已测知的乌梅肉样品 6 份, 每份约 0.5 g, 精密称定, 根据样品中各成分含量的 100% 分别精密加入各对照品, 按照“2.1.2”项下方法制备供试品溶液, 再按照“2.1.1”



1-5-HMF; 2-新绿原酸; 3-绿原酸; 4-隐绿原酸; 5-咖啡酸。  
1-5-HMF; 2-neochlorogenic acid; 3-chlorogenic acid; 4-cryptochlorogenic acid; 5-caffeic acid.

图 1 乌梅肉样品 (A)、混合对照品 (B)、空白溶剂 (C) 的 HPLC 图

Fig. 1 HPLC of *Mume Fructus* flesh sample (A), mixed reference substances (B) and blank solvent (C)

项下色谱条件测定各成分含量,记录峰面积并计算各成分回收率。结果5-HMF、新绿原酸、绿原酸、隐绿原酸和咖啡酸的平均加样回收率分别为100.78%、101.33%、99.28%、98.96%、99.78%,RSD分别为1.74%、1.59%、1.15%、0.62%、2.03%,表明该方法准确度良好。

**2.1.10 含量测定** 精密称取乌梅肉不同炮制品粉末,按照“2.1.2”项下方法制备供试品溶液,按照“2.1.1”项下色谱条件进样测定各样品中5个成分的含量,结果见表1。

表1 3批乌梅炮制品各指标成分含量测定结果

Table 1 Determination results of content of each index component in three batches of processed products of *Mume Fructus*

编号	质量分数/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )				
	5-HMF	新绿原酸	绿原酸	隐绿原酸	咖啡酸
1	2.8	47.6	20.3	33.9	2.8
2	7.5	72.6	37.7	40.9	3.0
3	11.7	39.7	20.0	29.2	2.9

## 2.2 多糖含量测定

**2.2.1 葡萄糖对照品溶液的制备** 取干燥至恒定质量的无水葡萄糖对照品25 mg,溶解并定容至250 mL量瓶中,加蒸馏水溶解并定容,摇匀,即得0.1 mg/mL的对照品溶液。

**2.2.2 5%苯酚溶液的制备** 精密称取苯酚5 g,加少量水定容至100 mL棕色量瓶中,摇匀,即得5%苯酚溶液,冷藏避光储存,备用。

**2.2.3 供试品溶液的制备** 干燥果肉经研钵碾碎,过20目筛,精密称取乌梅粗粉0.5 g,置于500 mL圆底烧瓶中,加入乙醚100 mL,回流提取1 h,脱脂,滤过,弃去乙醚溶液,残渣挥干乙醚,加入80%乙醇100 mL回流提取1 h,抽滤,以除去单糖、低聚糖、生物碱等小分子物质,弃去醇液,药渣挥去醇液后用蒸馏水150 mL回流提取2 h,趁热滤过,滤液定容至250 mL量瓶中,用水稀释至刻度,摇匀,即得<sup>[3]</sup>。

**2.2.4 测定波长的选择** 精密量取溶液1 mL,置于10 mL量瓶中,加水补至2 mL,加入5%苯酚溶液1 mL,摇匀,迅速加入浓硫酸5 mL,摇匀,放置10 min,置40 ℃水浴保温15 min,取出后迅速冷却至室温,在400~600 nm用紫外分光光度计进行全波长扫描,结果供试品溶液与对照品溶液在490 nm处有最大吸收峰,故确定490 nm为测定波长<sup>[4]</sup>。

**2.2.5 线性关系考察** 分别精密吸取葡萄糖对照品溶液0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mL于各量瓶中,分别加水补至2 mL,加入5%苯酚溶液1 mL混匀,迅速加入浓硫酸5 mL,摇匀,室温下放置10 min后,置40 ℃水浴中保温15 min,取出后迅速冷却至室温。精密量取蒸馏水1 mL,同上述操作,作为空白对照<sup>[5]</sup>。按紫外分光光度法在490 nm处测定吸光度(A)值,以A值对质量浓度(C)作线性回归计算,得线性回归方程 $A=50.930C+0.0029$ , $r=0.9993$ ,结果表明,葡萄糖对照品溶液在0.002~0.015 mg/mL线性关系良好。

**2.2.6 精密度试验** 精密吸取“2.2.1”项下的葡萄糖对照品溶液0.6 mL,于490 nm波长处重复测定6次A值,按照“2.2.4”项下方法测定A值,计算其RSD为2.22%,结果表明该仪器精密度良好。

**2.2.7 稳定性试验** 精密量取供试品溶液1 mL,按照“2.2.4”项下方法显色后,于490 nm每隔30 min测定1次,连续4 h考察其稳定性<sup>[4]</sup>,RSD为1.01%,结果表明供试品溶液显色后在4 h内基本稳定。

**2.2.8 重复性试验** 精密称取乌梅肉样品粉末6份,每份约0.5 g,精密称定,按照“2.2.3”项下的制备方法制备供试品溶液,再按照“2.2.4”项下方法测定A值,计算其RSD为1.14%,结果表明该方法重复性良好。

**2.2.9 加样回收率试验** 精密称取已知多糖含量的乌梅肉饮片0.25 g,共6份,精密称定,按照1:1的比例加入葡萄糖对照品,按照“2.2.3”项下方法制备供试品溶液,于490 nm波长<sup>[6]</sup>处测定其A值,计算得葡萄糖的平均加样回收率为98.35%,RSD为2.07%。

**2.2.10 多糖含量测定** 精密称取乌梅药材粉末约0.5 g,共3份,精密称定,按照“2.2.3”项下的制备方法提取。精密吸取上述乌梅多糖提取液、葡萄糖对照品溶液及蒸馏水各1 mL,显色后测定A值,根据公式(1)计算多糖含量。

$$\text{多糖含量} = \text{葡萄糖对照品质量浓度} \times \text{稀释倍数} \times A_{\text{样品}} / A_{\text{对照品}} \quad (1)$$

## 2.3 水溶性浸出物含量测定

参照《中国药典》2025年版乌梅项下浸出物(通则2201)测定方法。取供试品约4 g( $M_1$ ),精密称定,置于250 mL圆底烧瓶中,精密加水50 mL,密塞,称定质量,静置1 h后,连接回流冷凝管,加热至沸腾,并保持微沸1 h。放冷后,取下锥形瓶,

密塞，再称定质量，用水补足减失的质量，摇匀，用干燥滤器滤过，精密量取滤液 25 mL，置于已干燥至恒定质量的蒸发皿中，水浴蒸干后，于 105 °C 烘箱中干燥 3 h，置干燥器中冷却 30 min，迅速精密称定浸出物质量 ( $M_2$ ) [3]。根据公式 (2) 计算水溶性浸出物含量。除另有规定外，以干燥品计算供试品中水溶性浸出物的含量。

$$\text{浸出物含量} = 50 \times M_2 / (25 \times M_1) \quad (2)$$

## 2.4 外观性状

根据前期预实验并结合炮制规范中的相关描述，制定出以下相关评分标准：在闷润过程中的既定时间内，若乌梅均匀的将闷润加水量全部吸净 (2 分)，仍残留液体 (1 分)，较短时间内吸干且吸水不均匀 (0 分)；根据蒸制后乌梅是否透心，分为 3 个级别，同一批次中全部透心 (2 分)，部分透心 (1 分)，全不透心 (0 分)；根据蒸制后得到乌梅肉的质地分别 5 个级别，质干坚：乌梅表面干燥，有明显皱缩纹理，手握时硬实，掰开果肉，断面虽干，但颜色呈均匀的深棕褐色，且带有油润光泽感 (1 分)，质较绵软：乌梅表面微微润湿，但无水汽，用手指甲能轻松掐入，肉质有韧性，将其对折，对折处会出现折痕但不会断裂 (2 分)，质湿软：乌梅颜色乌黑发亮，通体质地均匀，手搓微滞不拉丝，用手指按压，内部软糯，无任何硬心 (3 分)，质湿润：乌梅表面光泽极强，果肉会互相粘连成团且不易抖散，能染湿纸张 (4 分)，质软烂成泥：乌梅呈现坍塌或糊状，用药匙轻压，无需用力即可将其压成泥糊状，泥体细腻无颗粒感 (5 分)。

## 2.5 评价指标综合赋权

AHP 根据指标间的重要程度按一定标度构建条理分明的层次关系，并据此求得指标赋权值；熵权法在综合评价系统中，熵值越小，说明对整个系统的了解程度越具体，其指标权重系数越大，反之亦然，该方法可以消除主观赋权方法中人为主观因素对评估结果的影响，进一步优化指标体系。

**2.5.1 熵权法客观权重系数 ( $W_j^s$ ) 分析** 各项指标数据经标准化、归一化 ( $P_{ij}^*$ )、信息熵 ( $e_j$ ) 计算，最终计算得到各指标  $W_j^s$ ，5-HMF、新绿原酸、绿原酸、隐绿原酸、咖啡酸、多糖含量、水浸出物含量、外观性状各个项指标的  $W_j^s$  分别为 0.353 3、0.115 9、0.084 7、0.092 5、0.084 3、0.072 2、0.070 1、0.127 1。

(1) 无量纲处理：试验中所选特征成分、多糖含量、水溶性浸出含量等均为正向指标，值越大越

好，根据公式 (3) 对各指标无量纲处理。

$$x_{ij} = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (3)$$

$X_{ij}$  为第  $i$  次试验中第  $j$  项指标试验值， $X_{\min}$  为该组试验值中的最小值， $X_{\max}$  该组试验值中的最大值

(2) 消零及去负数处理：无量纲处理后数据出现数值 0，为使数据处理有意义，需要消除 0，根据公式 (4) 将数据平移 0.001 个单位进行消零处理 [7]。

$$x_i' = x_i + \alpha \quad (4)$$

$x_i'$  为消零处理后第 1 项指标结果， $\alpha$  为最接近试验值  $x_i$  的最小值，本实验取  $\alpha = 0.001$

(3) 标准化处理：针对乌梅肉中各种有效物质和其他评价指标之间存在着很大的差异，为了提高评价的准确性，根据公式 (5) 对各个因素进行标准化处理。

$$P_i = x_i' / \sum_{i=1}^n x_i' \quad (5)$$

$P_i$  为标准化处理后第  $i$  次试验中第 1 项指标的概率， $n$  为试验组数， $n = 23$

(4) 熵值计算：被测量的指标熵值较低，表明离散性较大，其权重也较大，对综合评估有较大的影响。根据公式 (6) 计算熵值。

$$e_j = -\sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} / \ln n, 0 \leq e_j \leq 1 \quad (6)$$

$e_j$  为第  $j$  项指标的熵值

(5) 变异系数：对于第 1 个指标而言，各指标值的差异愈大，说明这个指标的加权愈高，对综合评估的影响愈大，根据公式 (7) 计算变异系数。

$$g_j = 1 - e_j \quad (7)$$

$g_j$  为第  $j$  项指标的变异系数

(6) 确定评价指标权重：指标权重为评价的重要依据，根据公式 (8) 计算各指标权重，见表 2。

$$W_j = g_j / \sum_{i=1}^m g_i \quad (8)$$

$W_j$  为第  $j$  项指标的权重值， $m$  为试验指标个数， $m = 8$

### 2.5.2 AHP 主观权重系数 ( $W_j^o$ ) 分析

(1) 构建判断矩阵：根据文献研究及 9 级标度法标准 (表 3)，将各指标进行重要性排序，构建判断矩阵，结果见表 4，采用和积法 [8] 计算得到 5-HMF、新绿原酸、绿原酸、隐绿原酸、咖啡酸、多糖含量、水溶性浸出物含量、外观性状各指标的  $W_j^o$  分别为 0.031 2、0.192 4、0.192 4、0.192 4、0.109 8、0.039 2、0.078 0、0.164 6，结果见表 5。

(2) 计算结果的一致性检验：因 AHP 法作为主观性较强，故为保证所得权重的准确性，需根据式 (9) ~ (11) 对所得数据进行一致性检验 [9]，CI 为一致性指标，CR 为检验系数 [9]，具体结果见表 5，8 个

表2 熵权法下8项评价指标的权重值

Table 2 Weight values of eight evaluation indexes by entropy weight method

考察指标	熵值	变异系数	熵权系数	考察指标	熵值	变异系数	熵权系数	考察指标	熵值	变异系数	熵权系数
5-HMF	0.797 7	0.202 3	0.353 3	隐绿原酸	0.947 1	0.052 9	0.092 5	水浸出物含量	0.959 9	0.040 1	0.070 1
新绿原酸	0.933 6	0.066 4	0.115 9	咖啡酸	0.951 7	0.048 3	0.084 3	外观性状	0.927 2	0.072 8	0.127 1
绿原酸	0.951 5	0.048 5	0.084 7	多糖含量	0.958 6	0.041 4	0.072 2				

表3 AHP法常用比例标度

Table 3 Common scale criteria of AHP

标度	含义	标度	含义	标度	含义
1	指标2个相比, a比b同等重要	5	指标2个相比, a比b明显重要	9	指标2个相比, a比b极端重要
3	指标2个相比, a比b稍微重要	7	指标2个相比, a比b强烈重要	2、4、6、8	上述判断之间的中间状态所对应标度值

表4 8项评价指标成对比较优先判断矩阵

Table 4 Pairwise comparison priority judgment matrix of eight evaluation indexes

评价指标	优先判断矩阵							
	5-HMF	新绿原酸	绿原酸	隐绿原酸	咖啡酸	多糖含量	水浸出物含量	外观性状
5-HMF	1	1/7	1/7	1/7	1/5	2	1/3	1/6
新绿原酸	7	1	1	1	2	3	3	2
绿原酸	7	1	1	1	2	3	3	2
隐绿原酸	7	1	1	1	2	3	3	2
咖啡酸	5	1/2	1/2	1/2	1	5	2	1/4
多糖含量	1/2	1/3	1/3	1/3	1/5	1	1/5	1/5
水浸出物含量	3	1/3	1/3	1/3	1/2	5	1	1/3
外观性状	6	1/2	1/2	1/2	4	5	3	1

表5 AHP法下8项评价指标权重值

Table 5 Weight values of eight evaluation indexes by AHP method

考察指标	特征向量	$W_j^0$	考察指标	特征向量	$W_j^0$	考察指标	特征向量	$W_j^0$
5-HMF	0.249 8	0.031 2	隐绿原酸	1.539 4	0.192 4	水浸出物含量	0.623 6	0.078 0
新绿原酸	1.539 4	0.192 4	咖啡酸	0.878 3	0.109 8	外观性状	1.316 5	0.164 6
绿原酸	1.539 4	0.192 4	多糖含量	0.313 5	0.039 2			

评价指标的最大特征值为 8.688 4, CI 为 0.098 3, CR 为 0.069 8, 一致性检验通过。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^m A_{ij}/m\omega \quad (9)$$

$$CI = (\lambda_{\max} - m)/(m - 1) \quad (10)$$

$$CR = CI/RI \quad (11)$$

$\lambda_{\max}$  为矩阵的最大特征值,  $\omega$  为各指标按列归一化后的算术平均值,  $A_{ij}$  为第  $j$  项指标权重值

### 2.5.3 AHP-熵权法计算综合评分

(1) AHP-熵权法权重系数确定: 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 法能够体现专家对不同指标重要性的经验, 熵权法可以反映指标的信息特征, 二者结合不仅可以减少 AHP 法赋权的主观性, 也可减少数据变化导致的权重波动<sup>[10-11]</sup>, 因此, 加

权系数的科学性和合理性也更高。

$$Q_j = W_j A_{ij} / \sum_{i=1}^m W_j A_{ij} \quad (12)$$

$Q_j$  为熵权法和层次分析法所得的第  $j$  项指标综合权重值

同理, 由公式 (12)<sup>[12]</sup> 计算得到 5-HMF、新绿原酸、绿原酸、隐绿原酸、咖啡酸、多糖含量、水浸出物含量、外观性状各指标的  $Q_j$  分别为 0.104 2、0.210 6、0.153 9、0.168 1、0.087 4、0.026 7、0.051 6、0.197 5。

(2) 综合评分计算: 按公式 (13) 计算熵权法-AHP 综合评分 ( $Z$ )<sup>[13]</sup>。

$$Z = \sum_{i=1}^m Q_j \times X_{ij} \times X_{ij\max} \times 100 \quad (13)$$

$Z$  为综合得分,  $X_{ij}$  为第  $j$  项指标的含量,  $X_{ij\max}$  为第  $j$  项指标中的含量最大值

2.5.4 熵权法-AHP 的可行性验证 将熵权法、AHP 2 种评分方法的指标赋权值导入 SPSS 26.0 软件进

行 Pearson 相关性分析<sup>[14]</sup>,以熵权法和 AHP 所得权重系数计算各自的综合评分,进行 Pearson 相关性分析,结果显示熵权法和 AHP 呈显著正相关,相关系数为 0.622, *P* 值 0.01,表明尽管 2 种方法的赋权机理不同,但它们对样本总体质量的评价趋势一致,一方面验证了所选评价指标的合理性,另一方面也表明 AHP、熵权法可以相互印证,因此,熵权法-AHP 运用于乌梅肉综合质量评价具有良好的可行性。

**2.6 正交试验设计及综合评分结果分析**

取同一批次乌梅饮片 9 份,每份 20 g,按表 6 试验设计,置容器内,加入水拌匀,保鲜膜密闭闷润,于蒸锅内蒸制,取出稍晾剥取果肉,于 60 °C 干燥,干燥时注意多翻动,取出,放凉,即得。依据《中国药典》2025 年版蒸法的辅料用量要求,蒸、煮、炖时,除另有规定外,一般每 100 千克待炮炙品,用水或规定的辅料 20~30 kg,为确保炮制工艺参数的稳定性和可重复性,在正式正交试验前进行了预实验,以闷润过程中“乌梅肉表面无明水、内部润湿一致且无干心”作为“基本吸净”的判断标准;以蒸制后“能用手指轻易捏扁、无硬心”作为“基本蒸透”的判断依据,基于上述标准,初步筛选

出加水量在 25%时,乌梅基本吸净,故将加水量(A)定为 15%、25%、35%;基于文献和预实验<sup>[15]</sup>,闷润 50 min、蒸制 20 min 乌梅肉基本蒸透,故设置闷润时间(B) 40、50、60 min,蒸制时间(C)定为 10、20、30 min,用于后续的正交试验设计,乌梅肉的各项指标含量见表 6,综合评分直观分析结果见表 7,方差分析结果见表 8。

方差分析结果显示,在本实验所设参数范围内,仅层次分析法的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,这表明在 [15%, 35%] 的加水量、[40, 60] min 的闷润时间及 [10, 30] min 的蒸制时间范围内,参数的波动对综合评分的影响有限。然而,观察各实验组的综合评分(表 6),工艺组合 A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>(加水量 15%,闷润时间 60 min,蒸制时间 30 min)取得了最高的综合评分,因此,从实际操作与描述性数据趋势出发,本研究建议将 A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub> 作为较优的工艺参数组合,此结论主要基于均值比较与可行性,未来研究可通过扩大工艺参数范围或增加实验重复次数,进一步验证其稳健性。

**2.7 BPNN 建模及工艺优化**

借助 Matlab R2021a 软件建立 BPNN 模型。输

表 6 乌梅肉饮片正交试验设计因素水平及各指标熵权法-AHP 综合评分考察结果 (n = 3)

Table 6 Orthogonal test design factor levels and investigation results of entropy weight method-AHP composite score indexes of *Mume Fructus* flesh decoction pieces (n = 3)

试验号	A/%	B/min	C/min	D (空白)	质量分数/(mg·g <sup>-1</sup> )					水浸出物 含量/%	外观 性状	熵权法 评分	AHP 评分	综合 评分	
					5-HMF	绿原酸	新绿原酸	隐绿原酸	咖啡酸						多糖含量
1	15 (1)	40 (1)	10 (1)	(1)	0.575 4	2.606 1	1.146 8	1.758 4	0.157 1	41.167 0	62.943 5	4	69.54	73.65	71.29
2	15 (1)	50 (2)	20 (2)	(2)	0.185 8	3.348 2	1.308 1	1.925 3	0.166 3	56.000 0	62.762 8	5	63.16	83.48	78.02
3	15 (1)	60 (3)	30 (3)	(3)	0.147 2	3.632 5	1.864 6	2.032 3	0.181 4	51.919 6	57.926 2	5	65.30	91.65	84.87
4	25 (2)	40 (1)	20 (2)	(3)	0.165 7	1.943 6	0.978 9	1.315 4	0.124 9	44.526 2	61.608 1	6	51.95	65.70	62.08
5	25 (2)	50 (2)	30 (3)	(1)	0.241 5	2.765 9	1.242 0	1.735 0	0.148 8	51.202 4	63.817 0	7	64.51	81.53	77.79
6	25 (2)	60 (3)	10 (1)	(2)	0.386 2	2.709 3	1.323 8	1.859 9	0.149 3	44.181 8	60.159 6	7	69.32	82.82	80.14
7	35 (3)	40 (1)	30 (3)	(2)	0.957 2	1.906 2	0.995 2	1.303 7	0.125 6	43.527 8	62.724 0	6	81.09	68.25	70.60
8	35 (3)	50 (2)	10 (1)	(3)	0.164 1	2.578 7	1.412 3	1.688 0	0.138 2	44.107 6	57.780 7	6	57.73	77.37	72.72
9	35 (3)	60 (3)	20 (2)	(1)	0.351 5	2.538 5	1.100 8	1.568 2	0.145 4	54.893 2	55.579 6	7	65.85	76.69	74.47

表 7 熵权法-AHP 综合评分的直观分析结果

Table 7 Intuitive analysis results of composite scores by entropy weight method-AHP

水平	熵权法评分				AHP评分				综合评分			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
K <sub>1</sub>	198.00	202.58	196.59	199.90	248.78	207.60	233.84	231.87	234.18	203.97	224.15	223.55
K <sub>2</sub>	185.78	185.40	180.96	213.57	230.05	242.38	225.87	234.55	220.01	228.53	214.57	228.76
K <sub>3</sub>	204.67	200.47	210.90	174.98	222.31	251.16	241.43	234.72	217.79	239.48	233.26	219.67
R	18.89	17.18	29.94	38.59	26.47	43.56	15.56	2.85	16.39	35.51	18.69	9.09

表 8 熵权法-AHP 综合评分的方差分析

Table 8 Analysis of variance of entropy weight method-AHP composite score

方差来源	自由度	熵权法评分				AHP评分				熵权法-AHP综合评分			
		离差平方和	均方	F值	P值	离差平方和	均方	F值	P值	离差平方和	均方	F值	P值
A	2	61.124	30.562	0.239	0.807	123.490	61.745	72.415	0.014	52.741	26.370	3.808	0.208
B	2	58.622	29.311	0.230	0.813	353.775	176.887	207.453	0.005	220.418	110.209	15.916	0.059
C	2	149.475	74.737	0.586	0.631	40.374	20.187	23.675	0.041	58.187	29.094	4.202	0.192
D(误差)	2	255.284	127.641			1.705	0.853			13.849	6.924		

$F_{0.05}(2, 2)=19.00$   $F_{0.01}(2, 2)=99.00$

入层为加水量、闷润时间及蒸制时间，输出层为熵权法-AHP 综合评分，根据预实验结果及相关文献查阅确定隐藏层节点为4，网络训练采用 Levenberg-Marquardt 反向传播算法 (trainlm) [16-17]。将 9 组正交试验数据进行训练，再将 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[18]，9 组数据预测的绝对误差均 $\leq 0.6820$ ，表明模型具有较好的精度。由图 2-A 可知，样本迭代到第 2 步，达到最好的网络验证性能，均方误差值为 0.005 220 4。将 9 组数据实测值与预测值进行比较 (图 2-B)，表明所建立的模型稳定可靠。

再以 9 组数据作为训练集，在上述建模条件对综合评分进行预测。在正交试验参数基础上，以步长 2.5%设置水用量范围为 15%~35%，以步长 2.5 min 设置闷润时间范围为 40~60 min，以步长 2.5 min 设置蒸制时间范围为 10~30 min，通过所建立的模型计算综合评分[19]，预测评分结果见表 9。随加水量增加，综合评分总体降低，22.5%评分最高；

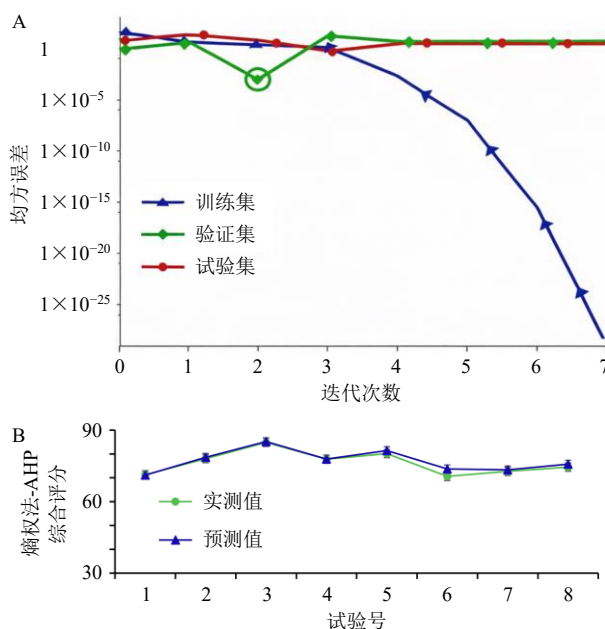


图 2 BPNN 可靠性验证的均方误差 (A) 和综合评分 (B)  
Fig. 2 Mean square error (A) and comprehensive score (B) of BPNN reliability verification

表 9 BP 神经网络预测评分

Table 9 Scores predicted by BPNN

试验号	加水 量/%	闷润时 间/min	蒸制时 间/min	预测 评分	试验号	加水 量/%	闷润时 间/min	蒸制时 间/min	预测 评分	试验号	加水 量/%	闷润时 间/min	蒸制时 间/min	预测 评分
1	15.0	40.0	10.0	71.13	73	15.0	60.0	10.0	74.34	721	35.0	60.0	10.0	76.71
2	15.0	40.0	12.5	71.32	74	15.0	60.0	12.5	76.06	722	35.0	60.0	12.5	75.81
3	15.0	40.0	15.0	71.56	75	15.0	60.0	15.0	77.94	723	35.0	60.0	15.0	74.68
4	15.0	40.0	17.5	71.72	76	15.0	60.0	17.5	79.54	724	35.0	60.0	17.5	73.40
5	15.0	40.0	20.0	71.53	77	15.0	60.0	20.0	80.49	725	35.0	60.0	20.0	72.72
6	15.0	40.0	22.5	70.68	78	15.0	60.0	22.5	80.79	726	35.0	60.0	22.5	74.30
7	15.0	40.0	25.0	69.30	79	15.0	60.0	25.0	81.10	727	35.0	60.0	25.0	78.30
8	15.0	40.0	27.5	68.56	80	15.0	60.0	27.5	83.05	728	35.0	60.0	27.5	81.16
9	15.0	40.0	30.0	70.59	81	15.0	60.0	30.0	88.20	729	35.0	60.0	30.0	81.62
...					...									

当 20%~25%的加水量时，综合评分随闷润时间延长而升高，综合评分有升高趋势；提示加水量不宜过多、闷润时间可适当延长。随着蒸制时间延长，

加水量少于 22.5%有利于综合评分的提高，而在 32.5%~35%加水量范围内则对综合评分不利。

得到蒸制乌梅肉的最佳工艺为加 22.5%的水，

闷润 60 min, 蒸制 30 min。

### 2.8 工艺验证

分别以 BPNN 筛选的最佳工艺、正交试验筛选的最佳工艺 (A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>), 炮制 3 批次饮片, 各项指标

结果见表 10。BPNN 所得到的工艺综合评分得分更高, 实际值和预测值误差 BPNN>正交 A<sub>1</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>, BPNN 的实际与预测得分都较好, 说明 BPNN 的预测效果良好, 制得的乌梅肉样品图见图 3。

表 10 工艺验证结果 (n = 3)

Table 10 Results of process verification (n = 3)

分组	质量分数(mg·g <sup>-1</sup> )						水浸出物 含量/%	综合评分 均值	RSD/ %
	5-HMF	绿原酸	新绿原酸	隐绿原酸	咖啡酸	多糖含量			
最佳正交工艺	0.759 7	2.401 2	0.775 1	1.814 9	0.148 3	53.167 0	62.943 5	79.58	1.56
	0.454 8	1.758 2	0.850 1	1.401 5	0.146 5	56.000 0	63.762 8		
	0.534 0	3.446 4	1.143 5	2.241 2	0.187 2	56.919 6	64.926 2		
BP最高评分	0.472 7	3.074 8	1.527 0	2.029 3	0.165 1	54.526 2	66.608 1	83.26	1.89
	0.282 6	3.004 1	1.400 7	2.214 0	0.167 7	53.202 4	64.817 0		
	0.578 0	1.772 3	0.969 6	1.532 0	0.152 3	55.181 8	64.159 6		



图 3 乌梅肉成品

Fig. 3 Mume Fructus flesh

### 3 讨论

《中国药典》作为国家药品标准, 以枸橼酸作为乌梅的指标性成分, 具有法定性与普适性, 主要反映其“生津、酸敛”之性, 然而, 在针对“乌梅肉”这一特定炮制饮片的工艺优化与质量研究中, 单一指标可能难以全面、特异地反映炮制过程中复杂的化学转化及其与“涩肠止泻”核心功效的关联, 因此, 本研究选择新绿原酸、绿原酸、隐绿原酸及咖啡酸等酚酸类成分作为多指标评价体系的核心, 首先, 这些成分具有明确的抗炎、抗氧化及调节肠道菌群活性<sup>[20-21]</sup>, 与乌梅炮制后的关键药效关联更为直接; 其次, 其含量与比例对蒸制工艺中的热、水、时间等参数极为敏感, 能更精准地反映工艺差异与饮片内在质量的变化, 这并非对药典标准的否定, 而是针对炮制品质量控制目标, 在专属性与功效关联性上进行的重要补充与深化。

本研究及相关文献证实, 蒸制工艺能诱导乌梅肉中 2 类关键化学物质的转化: 5-HMF 的生成与绿原酸类成分的异构化, 这些转化过程直接受炮制参数的调控<sup>[22-23]</sup>。5-HMF 的生成主要遵循还原糖在热作用下的脱水反应机制, 适宜的蒸制时间与温度提供了反应动力<sup>[24-26]</sup>, 而过长的处理时间则可能导致

5-HMF 自身聚合或分解, 同时, 加水量影响反应体系的热传导与物质扩散, 间接调控炮制反应进程, 本研究所优化的较优工艺组合正是平衡了生成与分解、创造最佳产率的平衡点。绿原酸类成分的异构化是热驱动下的酰基迁移结果, 蒸制时间和温度是导致分子内重排、决定不同异构体转化速率与最终平衡的关键, 较优工艺在于通过关键参数的协同设置, 实现了对“糖脱水”与“酰基迁移”2 类核心化学反应的调控<sup>[27]</sup>。

结合正交试验及 BPNN 预测结果来看, 本研究所优选出的工艺每 100 kg 的乌梅加 22.5 kg 的水, 闷润 60 min, 蒸制 30 min, 处于 5-HMF 生成量趋于稳定且绿原酸异构化尚未引起主要活性成分过度损失的区间, 加水量和闷润时间的优化组合为 2 类反应提供了适宜的水热环境, 确保了化学成分转化的协调进行。

中药炮制是一个多参数、多指标交织的复杂非线性过程。BPNN 的优势在于无需预设数学模型, 便能自主学习并映射工艺参数与综合评分间的高度非线性关系, 尤其适合处理此类存在显著交互效应的工艺优化问题。本研究通过结合 AHP 与熵权法, 形成了主客观结合的综合评价方法, 解决了多指标权重分配与矛盾平衡的问题, 为 BPNN 提供了可靠的训练目标。模型验证结果的差异, 其输出为期望值, 而实际工艺会发生随机波动, 尽管存在预测差异, 但验证结果显著高于大部分对照工艺, 且重复性良好, 证明模型成功并得到了一个稳定高效的工艺区域。同时, 该方法存在一定的局限性: 首先, BPNN 的性能依赖于训练数据的规模与质量,

有限样本可能制约其泛化能力；其次，模型的“黑箱”特性难以解释药性变化的机理，与传统炮制理论的融合还需要深入研究；最后，本研究在单因素实验基础上设置的参数范围可能较窄，未来可通过扩大参数空间、增加样本量或引入集成学习模型来进一步提升预测精度与普适性。

需要指出的是，本研究的工艺优化对象，本质上是乌梅的蒸制过程，虽然以“固肠止泻丸”原料制备为范例构建质量评价体系，但所揭示的“参数-机制-质量”关系及建立的优化方法，对于所有以蒸制乌梅肉入药的制剂或临床汤剂，在原料炮制环节均具有重要的指导与借鉴意义。

本研究构建的 AHP-熵权法-BPNN 评价方法，将主客观评价、非线性建模与全局寻优相结合，为中药炮制这类复杂工艺的数字化、智能化解析提供了可行路径，未来研究可将此框架拓展至其他药材或炮制方法，并在更大样本和更广参数空间下验证与优化，以推动中药炮制从“经验控制”向“精准智控”的范式转变。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] Jin Y K, Lei X, Zhang Y, *et al.* Guchang Zhixie Pill: A comprehensive review of the clinical applications, toxicological profile, and quality markers [J]. *Curr Top Med Chem*, 2025, 25(20): 2399-2416.
- [2] Liu H X, Liu Q, Chen D N, *et al.* Traceability of *Mume Fructus* pulp origin, processing method, authenticity based on flash GC E-nose and FT-NIRS technology combined with machine learning and data fusion strategy [J]. *Microchem J*, 2025, 217: 114817.
- [3] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 83.
- [4] 张璐, 翁立冬, 刘莉, 等. 苯酚-硫酸法测定乌梅多糖的含量 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2011, 17(6): 107-109.
- [5] 栗嘉淇, 尹磊, 郑威, 等. 六神曲多糖提取工艺优化及其抗溃疡性结肠炎作用研究 [J]. *中成药*, 2024, 46(1): 232-237.
- [6] 王芬, 郑玲玲, 李慧, 等. 桑椹中多糖和酚酸类化学成分的含量测定及相关性研究 [J]. *现代中药研究与实践*, 2023, 37(2): 63-67.
- [7] 贾德强, 贺成柱, 丁立利. AHP-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化当归微波真空干燥工艺研究 [J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(2): 60-68.
- [8] 代珊, 李帅, 张爱军, 等. 基于基准关联度和 AHP-熵权法综合评价经典名方小续命汤古今提取工艺 [J]. *中草药*, 2022, 53(3): 726-734.
- [9] 石畅, 高畅, 郭晓瑞, 等. 层次分析-熵权法结合响应面法优化五味子藤茎木脂素超声提取工艺 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(12): 293-302.
- [10] 杨婷, 黄莹莹, 方杨冰, 等. 基于 AHP-熵权法结合正交试验设计优选岭南特色饮片制枳壳的发酵工艺及发酵前后成分对比研究 [J]. *中草药*, 2022, 53(20): 6443-6450.
- [11] Wang S Y, Yu S X, Yang X, *et al.* Evaluation of quality attributes of different parts of *Poria cocos* during stress sweating process based on AHP-EWM and RSM [J]. *Ind Crops Prod*, 2024, 210: 118047.
- [12] 韩云凤, 唐茜, 石懿, 等. 基于熵权法-层次分析法结合响应面法优化养阴润目颗粒的提取工艺 [J]. *中国现代应用药学*, 2022, 39(7): 896-903.
- [13] 陈晶, 王炳然, 张淼, 等. 基于 Box-Behnken 响应面法结合层次分析法-熵权法优化米炒人参炮制工艺 [J]. *时珍国医国药*, 2023, 34(6): 1384-1388.
- [14] 郭文芳, 曲永梅, 李朝阳, 等. 多指标-响应面法优化射干趁鲜切制工艺及其成分-色度关联分析 [J]. *中草药*, 2025, 56(24): 8977-8987.
- [15] 杨琳琳, 辛洁萍, 张姝妍, 等. 净制对乌梅质量的影响及乌梅肉质量标准的研究 [J]. *世界中医药*, 2024, 19(1): 1-6.
- [16] 谢洽桐, 李海洋, 赵小军, 等. 基于 QbD 理念的小儿消食颗粒成型工艺优化及质量一致性评价方法研究 [J]. *中草药*, 2026, 57(1): 53-63.
- [17] Yu Y, Chai Y H, Yan Y J, *et al.* Quantitative analysis of adulterated crop flours in Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn) using near infrared spectrometry combined with back-propagation neural network algorithm [J]. *J Future Foods*, 2026, 6(5): 818-830.
- [18] 王晓杰, 张晓清, 李希, 等. 基于多指标的 AHP-EWM 复合权重法结合 BBD 响应面法优选活膝祛风酒提取工艺 [J]. *中药材*, 2024, 47(11): 2829-2834.
- [19] 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.
- [20] Liu Y P, Yang Z, Huang L, *et al.* Anti-interference detection of mixed NOX via In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based sensor array combining with neural network model at room temperature [J]. *J Hazard Mater*, 2024, 463: 132857.
- [21] Zou C, Xie J L, Luo Q, *et al.* *Saposhnikovia divaricata*-*Fructus Mume* herb pair alleviates airway inflammation in asthma by inhibiting IL-17 secretion from  $\gamma\delta$ T17 cells via the Notch1 signaling pathway [J]. *J Ethnopharmacol*, 2026, 360: 121107.
- [22] Zhang Z X, Ouyang L S, Sun A, *et al.* Effects of *Mume*

- Fructus* extract on smoking-induced cough and TNBS-induced colitis in rats and its underlying mechanisms based on gut-lung body fluid metabolism [J]. *J Ethnopharmacol*, 2026, 355(Pt A): 120539.
- [23] 孙嘉辰, 李霞, 王莹, 等. 中药加工炮制过程中质量标志物的研究进展 [J]. 中草药, 2020, 51(10): 2593-2602.
- [24] 白浩东, 张子东, 孙延平, 等. 炙法对中药化学成分影响的研究进展 [J]. 中华中医药学刊, 2024, 42(12): 84-90.
- [25] Guan Y H, Liang Z W, Li R Y, *et al*. Chemical composition and antioxidant activity of *Polygonatum kingianum* processed by the traditional method of “nine cycles of steaming and sun-drying” [J]. *Food Chem X*, 2024, 22: 101292.
- [26] Liu X, Cai H, Niu M J, *et al*. An integrated strategy of secondary metabolomics and glycomics to investigate multi-component variations in wine-processing of medicinal herbs and functional foods: A case study on *Fructus Corni* [J]. *Arab J Chem*, 2023, 16(3): 104525.
- [27] 王藤, 陈秋月, 沙艮, 等. 普洱熟茶后发酵酚类物质变化研究进展 [J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(6): 35-45.

[责任编辑 郑礼胜]