

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

郭文芳¹, 曲永梅², 李朝阳¹, 肖春萍¹, 翁丽丽^{1*}, 姜雨昕^{1*}

1. 长春中医药大学药学院, 吉林 长春 130117

2. 吉林国安药业有限公司, 吉林 吉林 132013

摘要: **目的** 通过多指标综合评价并优化射干 *Belamcandae Rhizoma* 趁鲜切制工艺参数, 探讨化学成分与色度值的相关性, 为建立射干趁鲜切制饮片的质量控制标准提供科学依据。 **方法** 采用热浸法测定醇溶性浸出物, HPLC 法测定射干有效成分(芒果苷、鸢尾苷、野鸢尾苷、鸢尾黄素、野鸢尾黄素、次野鸢尾黄素、白射干素)的含量, 形态评分法测定外观性状共同作为评价指标。以含水量、烘干温度、切制厚度为影响因素, 运用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)-熵权法建立权重系数, 计算不同影响因素下饮片的综合评分。利用 Design-Expert 12.0 软件, Box-Behnken 设计-响应面法(Box-Behnken design-response surface method, BBD-RSM)优化切制工艺, 并测定响应面法实验设计中不同工艺参数的 17 份样品色度值, 对其成分与色度值进行 Pearson 相关性分析。 **结果** 射干最佳趁鲜切制工艺为鲜射干烘干至含水量 60%, 烘干温度 60 ℃, 切片厚度 2 mm。射干粉末呈橙黄色, 其中次野鸢尾黄素、鸢尾黄素、野鸢尾黄素、白射干素含量与 L^* (代表颜色明、暗)、 b^* (代表颜色黄、蓝色度)值均呈负相关, 与 a^* (代表颜色红、绿色度)值呈正相关。 **结论** 优选得到趁鲜切制工艺稳定可行。趁鲜切制射干化学成分与颜色值具有显著相关性, 可通过外观色泽初步评价射干的品质, 为其多维度质量评价提供理论依据。

关键词: 射干; 趁鲜切制; AHP-熵权法; Box-Behnken 设计-响应面法; 色度; 芒果苷; 鸢尾苷; 野鸢尾苷; 鸢尾黄素; 野鸢尾黄素; 次野鸢尾黄素; 白射干素

中图分类号: R283.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2025)24-8977-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.24.011

Optimization of fresh-cutting process of *Belamcandae Rhizoma* by multi-index-response surface method and correlation analysis of component-chroma

GUO Wenfang¹, QU Yongmei², LI Zhaoyang¹, XIAO Chunping¹, WENG Lili¹, JIANG Yuxin¹

1. School of Pharmaceutical Sciences, Changchun University of Chinese Medicine, Changchun 130117, China

2. Jilin Guoan Pharmaceutical Co., Ltd., Jilin 132013, China

Abstract: Objective To evaluate and optimize the process parameters of fresh-cutting Shegan (*Belamcandae Rhizoma*, BR) by multi-index comprehensive evaluation, and explore the correlation between chemical composition and chroma value, so as to provide scientific basis for establishing the quality control standard of fresh-cutting BR. **Methods** The alcohol-soluble extract was determined by hot dipping method, the content of active ingredients (mangiferin, tectoridin, iridin, tectorigenin, irigenin, irisflorentin, dichotomitin) in BR was determined by HPLC, and the appearance was determined by morphological scoring method as the evaluation index. Taking water content, drying temperature and cutting thickness as influencing factors, the weight coefficient was established by analytic hierarchy process (AHP)-entropy weight method, and the comprehensive score of decoction pieces under different influencing factors was calculated. Using Design-Expert 12.0 software, Box-Behnken design-response surface method (BBD-RSM) was used to optimize the cutting process, and the chroma values of 17 samples with different process parameters under the response surface method were measured. Pearson correlation analysis was performed on the components and chroma values. **Results** The optimum cutting process was as follows: the water content was 60%, the drying temperature was 60 ℃, and the slice thickness was 2 mm. The powder of BR was dark yellow. The contents of irisflorentin, tectorigenin, irigenin and dichotomitin were negatively correlated with L^* (representing

收稿日期: 2025-08-19

基金项目: 吉林省优质道地药材(射干)科技示范基地吉林国安药业(20240401037YY)

作者简介: 郭文芳(2002—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药品质鉴定、质量标准及其开发利用。E-mail: 1169163183@qq.com

*通信作者: 姜雨昕, 实验师, 研究方向为中药资源学。E-mail: 240517674@qq.com

翁丽丽, 博士生导师, 教授, 研究方向为中药资源、品质评价及开发利用研究。E-mail: 735110462@qq.com

bright and dark color) and b^* (representing yellow and blue chroma), and positively correlated with a^* (representing red and green chroma). **Conclusion** The preferred fresh-cutting process is stable and feasible. The chemical compositions and color value of fresh-cutting BR have a significant correlation. The quality of BR can be preliminarily evaluated by appearance color, which provides a theoretical basis for its multi-dimensional quality evaluation.

Key words: *Belamcandae Rhizoma*; fresh cutting; AHP-entropy weight method; Box-Behnken design-response surface method; chroma; mangiferin; tectoridin; iridin; tectorigenin; irigenin; irisflorentin; dichotomitin

射干 (*Belamcandae Rhizoma*, BR) 为鸢尾科射干属植物射干 *Belamcanda chinensis* (L.) DC. 的干燥根茎。味苦, 寒, 归肺经, 具有清热解毒、消痰、利咽之功效^[1], 在临床中, 主要应用于治疗以痰盛咳喘、咽痛等为主的肺热证。射干主要含黄酮类、萜类及挥发油等成分, 其中异黄酮类化合物为主要药效成分。《中国药典》2025 年版以次野鸢尾黄素为指标成分, 而大量研究证实, 鸢尾苷、野鸢尾苷、鸢尾黄素与野鸢尾黄素等亦是其关键活性成分^[2-6]。这些成分均具有显著的抗炎抑菌、抗氧化及止咳等药理作用^[7], 故其含量已成为评价射干质量的关键指标。

传统饮片的加工过程包括除去杂质、洗净、润透、切薄片、干燥等步骤, 由于射干有效成分多具亲水性, 此过程易导致水溶性成分流失, 药效成分含量减少。近年来, 为顺应市场发展需求, 国家出台了鼓励趁鲜切制加工相关指导文件。趁鲜切制是产地加工的方式之一, 是指采挖后, 趁其处于新鲜状态时直接切制, 再干燥的加工工艺方法。目前, 射干已被湖北、山西等省列为趁鲜切制试点品种, 其工艺优化研究具有明确的政策支持与现实需求。有研究表明黄芩^[8]、甘草^[9]等根茎类药材较传统切制更适合趁鲜切制工艺, 该方法在减少能耗、提升质效方面展现出显著优势, 为射干趁鲜切制研究提供思路。目前, 射干趁鲜切制尚缺乏系统的工艺研究与完善的评价标准, 无法保证产品质量的均一稳定。因此, 本研究立足于产业实际需求, 对射干趁鲜切制工艺进行探讨, 以醇溶性浸出物、外观性状、次野鸢尾黄素、鸢尾苷、鸢尾黄素、野鸢尾苷、野鸢尾黄素、芒果苷、白射干素为综合指标, 基于主观赋值 AHP 法 (analytic hierarchy process) 和客观赋值熵权法复合权重法进行综合评分, 在单因素结果基础上, 结合响应曲面优化射干趁鲜切制加工参数, 确定工艺路线并进行验证, 利用色差分析技术, 对样品的色泽指标进行量化, 研究外观色泽与其化学成分的相关性, 从多维度筛选趁鲜切制射干炮制工艺参数。为射干趁鲜切制加工工艺优化及趁鲜切

制饮片质量标准评价和建立提供科学依据。

1 仪器与材料

1.1 仪器

LC-2030 型高效液相色谱仪、AUW120D 型分析天平, 岛津企业管理 (中国) 有限公司; Eclipse Plus C₁₈ 色谱柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μm), 美国安捷伦科技有限公司; FA1004B 型电子天平, 上海佑科仪器仪表有限公司; NH310 型色差仪, 深圳市三恩驰科技有限公司; KML 型系列切药机, 佛山市科美勒电器有限公司; DHG-9053A 型电热恒温鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司。

1.2 药材与试剂

新鲜射干统一购自吉林国安药业有限公司, 批号 20250301, 由长春中医药大学药学院翁丽丽教授鉴定, 均为鸢尾科射干属植物射干 *B. chinensis* (L.) DC. 的新鲜根茎, 低温保存。

对照品芒果苷 (批号 B20837)、鸢尾苷 (批号 B21608)、野鸢尾苷 (批号 B21480)、鸢尾黄素 (批号 B21609)、野鸢尾黄素 (批号 B26972)、次野鸢尾黄素 (批号 B20212)、白射干素 (批号 B24041), 质量分数均≥98%, 均购自于上海源叶生物科技有限公司。磷酸 (批号 20240309)、乙醇 (批号 20240717), 广东光华科技股份有限公司; 甲醇 (批号 F240B4211)、乙腈 (批号 F25P16201) 均为色谱纯, 赛默飞世尔科技 (中国) 有限公司。

2 方法与结果

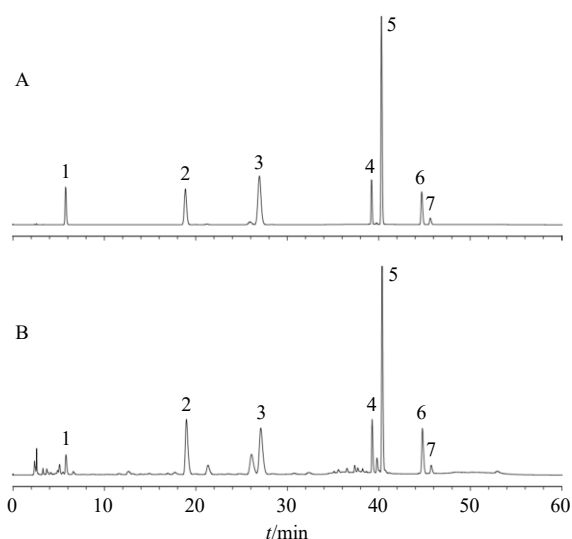
2.1 射干有效成分含量测定

2.1.1 供试品溶液的制备 取趁鲜切制射干粉末 (过三号筛) 0.1 g, 精密称量, 置于 50 mL 锥形瓶中, 精密加入甲醇 25 mL, 称定质量, 超声 30 min, 放凉, 用甲醇补足减失的质量, 过 0.22 μm 微孔滤膜, 取续滤液, 即得供试品溶液。

2.1.2 对照品溶液的制备 分别精密称取对照品芒果苷、鸢尾苷、野鸢尾苷、鸢尾黄素、野鸢尾黄素、次野鸢尾黄素、白射干素适量, 分别加甲醇溶解并定容至 10 mL, 制成分别含芒果苷 23.7 μg/mL、鸢尾苷 23.8 μg/mL、野鸢尾苷 40.7 μg/mL、鸢尾黄

素 14.5 $\mu\text{g/mL}$ 、野鸢尾黄素 96.2 $\mu\text{g/mL}$ 、次野鸢尾黄素 15.1 $\mu\text{g/mL}$ 、白射干素 4.1 $\mu\text{g/mL}$ 的混合对照品溶液, 即得。

2.1.3 色谱条件 流动相为 0.2%磷酸水溶液-乙腈, 梯度洗脱: 0~7 min, 16%乙腈; 7~10 min, 16%~18%乙腈; 10~18 min, 18%~19%乙腈; 18~22 min, 19%乙腈; 22~30 min, 19%~22%乙腈; 30~35 min, 22%~42%乙腈; 35~40 min, 42%~45%乙腈; 40~45 min, 45%~50%乙腈; 45~50 min, 50%~55%乙腈; 50~55 min, 55%~16%乙腈; 55~60 min, 16%乙腈; 柱温 35 $^{\circ}\text{C}$; 体积流量为 1.0 mL/min; 检测波长为 265 nm; 进样量 10 μL 。射干样品及混合对照品的 HPLC 图见图 1。



1-芒果苷; 2-鸢尾苷; 3-野鸢尾苷; 4-鸢尾黄素; 5-野鸢尾黄素; 6-次野鸢尾黄素; 7-白射干素。
1-mangiferin; 2-tectoridin; 3-iridin; 4-tectorigenin; 5-irigenin; 6-irisfloreantin; 7-dichotomitin.

图 1 混合对照品 (A) 和射干样品 (B) 的 HPLC 图
Fig. 1 HPLC of mixed reference substances (A) and BR sample (B)

2.1.4 线性关系考察 分别精密吸取“2.1.2”项下混合对照品溶液 2、4、6、8、10 μL , 注入高效液相色谱仪中进样测定, 以峰面积为纵坐标 (Y), 对照品质量浓度为横坐标 (X), 进行线性回归, 得各成分的回归方程及相关系数分别为芒果苷 $Y=27\,187.0X-2\,272.7$, $r=0.999\,9$, 线性范围 4.74~23.70 $\mu\text{g/mL}$; 鸢尾苷 $Y=47\,224.0X-5\,825.1$, $r=0.999\,9$, 线性范围 4.76~23.80 $\mu\text{g/mL}$; 野鸢尾苷 $Y=51\,173.0X-10\,146.0$, $r=0.999\,9$, 线性范围 8.14~40.70 $\mu\text{g/mL}$; 鸢尾黄素 $Y=43\,463X+924.1$, $r=0.999\,8$, 线性范围 2.90~14.50 $\mu\text{g/mL}$; 野鸢尾黄素 $Y=34\,453X-$

11 275.0, $r=0.999\,9$, 线性范围 19.24~96.20 $\mu\text{g/mL}$; 次野鸢尾黄素 $Y=46\,783X-2\,739.4$, $r=0.999\,9$, 线性范围 3.02~15.10 $\mu\text{g/mL}$; 白射干素 $Y=35\,973X-627.8$, $r=0.999\,9$, 线性范围 0.82~4.10 $\mu\text{g/mL}$ 。

2.1.5 精密度试验 分别精密吸取混合对照品溶液 10 μL , 连续进样测定 6 次, 结果芒果苷、鸢尾苷、野鸢尾苷、鸢尾黄素、野鸢尾黄素、次野鸢尾黄素、白射干素峰面积的 RSD 分别为 0.42%、0.45%、0.48%、0.43%、0.47%、0.52%、0.49%, 结果表明该仪器精密度良好。

2.1.6 稳定性试验 取趁鲜切制射干的供试品溶液分别于 0、2、4、6、8、10、12、24 h 进样分析, 测定芒果苷、鸢尾苷、野鸢尾苷、鸢尾黄素、野鸢尾黄素、次野鸢尾黄素、白射干素的峰面积, 计算其峰面积的 RSD 分别为 1.12%、0.65%、0.63%、0.95%、1.17%、0.50%、1.53%, 结果表明供试样品溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.1.7 重复性试验 按供试品溶液的制备方法, 将上述同一个样品制备 6 份供试品溶液, 进行测定, 计算芒果苷、鸢尾苷、野鸢尾苷、鸢尾黄素、野鸢尾黄素、次野鸢尾黄素、白射干素的质量分数分别为 1.30、4.46、4.79、1.39、10.42、2.66、0.66 mg/g, 其 RSD 分别为 1.13%、0.63%、0.43%、1.11%、1.02%、0.66%、1.43%, 结果表明该方法重复性良好。

2.1.8 加样回收率试验 精密称取 6 份上述样品粉末各约 0.05 g, 分别按照芒果苷、鸢尾苷、野鸢尾苷、鸢尾黄素、野鸢尾黄素、次野鸢尾黄素、白射干素在药材中的含量, 精密加入含上述 7 种成分的对照品溶液适量, 并按供试品溶液的制备方法进行操作, 测定后计算加样回收率。7 种成分的平均加样回收率分别为 101.15%、99.04%、98.86%、98.50%、100.63%、99.76%、100.27%, RSD 分别为 2.95%、1.23%、0.93%、1.90%、1.16%、0.87%、1.41%, 结果表明该试验准确性良好, 方法可行。

2.1.9 样品测定 取射干药材, 按照“2.1.1”项下方法制备供试品溶液, 按照“2.1.2”项下方法制备混合对照品溶液, 用孔径为 0.22 μm 的滤膜滤过, 取续滤液, 按照“2.1.3”项下方法设置色谱条件后, 进样分析, 根据“2.1.4”项下线性回归方程计算各指标成分的含量。

2.2 浸出物测定

参照《中国药典》2025 年版^[1]射干项下的热浸法测定。称定供试品约 2 g, 精密称定, 加 50 mL 乙

醇，密塞称定质量。静置 1 h 后，连接回流冷凝管，加热微沸 1 h。冷却后乙醇补足减失的质量，摇匀滤过。精密量取 25 mL 续滤液水浴蒸干，于 105 ℃干燥 3 h。置于干燥器中冷却 30 min，精密称定，以干样品计算供试品中醇溶性浸出物的含量。

2.3 外观性状评分

为分析不同工艺下趁鲜射干的外观性状差异，建立专门的性状评分小组。该小组由 4 名长期从事中药鉴定工作、经验丰富的专家组成。所有评价员在评价前均接受了统一的标准培训，以确保对评分标准理解的一致性。正式评价采用双盲法进行，每位评价员独立对所有样品的外观性状参照外观性状评分标准表^[10-11]（表 1）进行打分，最终以各样品种得分的平均值作为其外观性状综合评分。

表 1 外观性状评分标准

Table 1 Scoring criteria for appearance traits

饮片状态	考察指标	评分标准（满分10分）
药材质地	不易切制	0.5
	较易切制	1.5
	易切制	2.5
切制连刀	连刀较多	0.5
	连刀较少	1.5
	不连刀	2.5
翘片比例	数量比例≥30%	0.5
	数量比例15%~30%	1.5
	数量比例≤15%	2.5
碎片比例	数量比例≥8%	0.5
	数量比例3%~8%	1.5
	数量比例≤3%	2.5

2.4 射干的趁鲜切制研究

2.4.1 鲜射干含水量的控制 以长 3~10 cm，直径 1~2 cm 的鲜射干作为实验样品，分为 3 组，每组 3 份，每份约 1.0 kg，干燥至恒定质量（2 次间隔 1 h 称定质量，差值小于鲜药材质量的 0.03%），采用烘干法对 9 份射干进行水分检测，计算干药材质量得平均折干率为 37.5%。以此折干率计算鲜品平均含水量，并将鲜品含水量认定为 100%，用于产地趁鲜切制不同含水量水平进行研究。射干含水量计算公式如下。

含水量 = $(M_1 - M_2)/M_1 = [m_1(1 - 0.375) - (m_1 - m_2)]/m_1(1 - 0.375)$

M_1 为射干新鲜时的含水质量， M_2 为射干干燥过程中的失水质量， m_1 为射干新鲜时的质量， m_2 为射干干燥后的质量

2.4.2 射干趁鲜切制饮片最佳含水量的确定 结

合生产实际，以药材质地、切片连刀、翘片比例、碎片比例 4 项指标，综合评价饮片成品的外观品质与收率水平。鲜切（含水量 100%）及 60 ℃烘干至含水量分别为 90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%后取出，切薄片，60 ℃干燥，即得，每个样品平行做 3 份。当药材干燥至含水量较高，含水量 90% 切制时，饮片的翘片及碎片率偏高，同时伴随着连刀现象；含水量较低，含水量 30% 时切制时，因药材两端已过度干燥硬化，不仅切制难度增加，更易产生碎末，导致饮片收率降低。

2.5 综合评价指标的确定

2.5.1 层次分析法（AHP）确定主观权重系数（ V_j ） AHP 法作为一种主观赋权方法，其基本原理是依托主观判断经验，通过指标间两两重要性对比构建优先级判断矩阵^[12]。《中国药典》2025 年版规定，射干质量控制的特征指标成分被明确为次野鸢尾黄素。射干化学成分组成具有多样性，若仅以该单一成分为定量评价指标，难以全面反映鲜切射干药材的整体质量特征。醇溶性浸出物能够体现药材中醇类可溶成分的整体含量水平，而外观性状指标则直观呈现饮片的碎片、翘片等形态特征。次野鸢尾黄素已被《中国药典》2025 年版及多省份饮片炮制规范列为关键质量控制指标，因此，其关键程度高于其他化学成分。

综上，依据 AHP 理论最终确定各指标的重要性排序如下：醇溶性浸出物 > 外观性状 > 次野鸢尾黄素 > 鸢尾苷 = 鸢尾黄素 > 野鸢尾苷 = 野鸢尾黄素 > 芒果苷 > 白射干素，结果见表 2。得到的权重系数（ V_j ）分别为 0.300 4、0.211 1、0.150 6、0.099 0、0.099 0、0.048 0、0.048 0、0.025 3、0.018 6。AHP 法经过一致性检验，一致性比例为 0.041，小于 0.1，表明该矩阵具有一致性。

2.5.2 熵权法确定客观权重系数（ W_j ） 熵权法作为一种客观赋权方法，通过系统考量多元参数的观测数据所蕴含的信息含量，进而对各指标的权重值进行科学计算^[13]。按照公式 $d_{ij} = (f_{ij} - \min f_{ij}) / (\max f_{ij} - \min f_{ij})$ 对原始数据进行标准化处理，再计算信息熵（ E_j ）， f_{ij} 为第 i 次实验时第 j 个指标的测定值。第 j 项指标 E_j 计算公式如下。

$E_j = -\sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} / \ln m, j=1, 2, \dots, k$

m 为被评价对象的数目， $m=1, 2, \dots, k$

$P_{ij} = d_{ij} / \sum_{i=1}^m d_{ij}$

计算指标客观权重系数（ W_j ）。最后得到上述指

表 2 AHP 法判断矩阵
 Table 2 AHP judgment matrix

指标	判断矩阵									V_j
	醇溶性浸出物	外观性状	次野鸢尾黄素	鸢尾苷	鸢尾黄素	野鸢尾苷	野鸢尾黄素	芒果苷	白射干素	
醇溶性浸出物	1	2	3	4	4	6	6	8	9	0.300 4
外观性状	1/2	1	2	3	3	5	5	7	8	0.211 1
次野鸢尾黄素	1/3	1/2	1	2	2	4	5	6	7	0.150 6
鸢尾苷	1/4	1/3	1/2	1	1	3	3	5	6	0.099 0
鸢尾黄素	1/4	1/3	1/2	1	1	3	3	5	6	0.099 0
野鸢尾苷	1/6	1/5	1/4	1/3	1/3	1	1	3	4	0.048 0
野鸢尾黄素	1/6	1/5	1/4	1/3	1/3	1	1	3	4	0.048 0
芒果苷	1/8	1/7	1/6	1/6	1/4	1/4	1/2	1	2	0.025 3
白射干素	1/9	1/8	1/7	1/7	1/5	1/5	1/3	1/2	1	0.018 6

标的 W_j 分别为 0.123 2、0.172 9、0.149 7、0.060 1、0.155 0、0.060 1、0.137 5、0.052 1、0.089 5。

$$W_j = (1 - E_j) / (n - \sum_{j=1}^n E_j), j = 1, 2, \dots, k$$

2.5.3 综合权重系数 (T_j) 和综合评分的计算 采用层次分析法得到 V_j , 运用熵权法得 W_j , 将 V_j 和 W_j 综合考虑^[14-15], 按照下列公式计算 T_j , 得到各指标的 T_j 分别为 0.262 4、0.267 1、0.186 4、0.049 2、0.127 1、0.023 9、0.054 6、0.010 9、0.018 4。

$$T_{ij} = V_j W_j / \sum_{i=1}^n V_j W_j$$

按照下列公式计算各指标的综合评分值。

综合评分值 = 醇溶性浸出物含量/醇溶性浸出物含量最大量 × 0.262 4 + 外观性状评分/外观性状评分最大值 × 0.267 1 + 次野鸢尾黄素含量/次野鸢尾黄素含量最大量 × 0.186 4 + 鸢尾苷含量/鸢尾苷含量最大量 × 0.049 2 + 鸢尾黄

素含量/鸢尾黄素含量最大量 × 0.127 1 + 野鸢尾苷含量/野鸢尾苷含量最大量 × 0.023 9 + 野鸢尾黄素含量/野鸢尾黄素含量最大量 × 0.054 6 + 芒果苷含量/芒果苷含量最大量 × 0.010 9 + 白射干素含量/白射干素含量最大量 × 0.018 4

2.6 单因素实验

2.6.1 含水量的选择 取样品 5 份, 每份 100 g, 分别烘干至含水量为 40%、50%、60%、70%、80%, 烘干温度均为 60 ℃, 切片厚度均为 2 mm。运用 AHP-熵权法计算综合评分, 结果见表 3, 当含水量为 60% 时, 样品的综合评分最高, 含水量为 70% 和 50% 时, 表现次之。因此, 选择综合评分较高且能形成有效梯度的含水量为 50%、60%、70% 进行后续研究。

2.6.2 烘干温度的选择 取样品 5 份, 每份 100 g,

表 3 含水量选择考察结果 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 3 Investigation results of water content selection ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

含水 量/%	浸出物/ %	外观性状 评分	质量分数/(mg·g ⁻¹)							综合 评分
			次野鸢尾黄素	鸢尾苷	鸢尾黄素	野鸢尾苷	野鸢尾黄素	芒果苷	白射干素	
40	21.05±0.67	7.00±1.00	2.14±0.19	3.91±0.11	1.64±0.13	4.69±0.15	10.04±0.31	1.26±0.13	0.68±0.09	79.73
50	20.95±0.89	6.00±0.58	2.22±0.09	3.34±0.18	1.15±0.19	4.62±0.14	9.24±0.39	1.36±0.11	0.72±0.06	83.44
60	24.97±0.80	9.00±0.58	2.36±0.11	4.25±0.13	1.96±0.14	4.68±0.14	12.46±0.24	1.32±0.07	0.72±0.05	94.34
70	23.60±0.93	7.00±1.00	2.40±0.23	3.25±0.08	2.38±0.20	3.42±0.19	11.24±0.36	1.39±0.12	0.75±0.08	86.69
80	22.53±0.44	9.00±1.53	2.03±0.25	2.65±0.13	3.29±0.16	2.99±0.17	12.70±0.43	1.12±0.09	0.75±0.06	82.76

含水量均为 60%, 切片厚度均为 2 mm, 分别在 40、50、60、70、80 ℃ 下烘干, 取出。运用 AHP-熵权法计算综合评分, 结果见表 4, 60 ℃ 时综合评分最高, 50 ℃ 和 70 ℃ 的综合评分次之。因此, 选择综合评分较高且能形成有效温度梯度的 50、60、70 ℃ 进行后续研究。

2.6.3 切片厚度的选择 取样品 5 份, 每份 100 g, 含水量均为 60%, 烘干温度均为 60 ℃, 切片厚度

为 1、2、3、4、5 mm, 烘干取出。运用 AHP-熵权法计算综合评分, 结果见表 5, 切片厚度为 2 mm 时综合评分最高, 显著优于其他厚度。3 mm 时评分为 92.24 分; 而 1 mm 厚度评分最低, 但根据《中国药典》2025 年版射干饮片项下规定切制为“薄片”(厚度范围为 1~2 mm), 且为系统考察厚度减小可能带来的工艺影响及关键指标的完整变化趋势。因此, 选择切片厚度为 1、2、3 mm 进行后续研究。

表 4 烘干温度选择考察结果 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 4 Investigation results of stir-frying temperature selection ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

烘干温度/℃	浸出物/%	外观性状评分	质量分数/(mg·g ⁻¹)							综合评分	
			次野鸢尾黄素	鸢尾苷	鸢尾黄素	野鸢尾苷	野鸢尾黄素	芒果苷	白射干素		
40	22.00±0.92	9.00±1.00	1.99±0.12	3.77±0.19	1.75±0.14	4.60±0.09	9.44±0.40	0.98±0.10	0.76±0.07	87.75	
50	24.39±1.02	9.00±1.15	2.43±0.16	4.80±0.12	0.99±0.19	5.84±0.10	9.51±0.74	1.36±0.08	0.82±0.08	90.56	
60	24.97±0.80	9.00±0.58	2.36±0.11	4.25±0.13	1.96±0.14	4.68±0.14	12.46±0.24	1.32±0.07	0.72±0.05	96.98	
70	22.52±0.83	8.00±1.53	2.34±0.10	3.68±0.16	1.40±0.16	4.85±0.11	10.72±0.62	1.30±0.13	0.84±0.07	86.57	
80	20.96±0.49	7.00±1.15	2.58±0.12	2.73±0.14	1.63±0.18	3.96±0.16	11.60±0.43	1.52±0.11	0.79±0.05	84.33	

表 5 切片厚度选择考察结果 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 5 Investigation results of slice thickness selection ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

切片厚度/mm	浸出物/%	外观性状评分	质量分数/(mg·g ⁻¹)							综合评分	
			次野鸢尾黄素	鸢尾苷	鸢尾黄素	野鸢尾苷	野鸢尾黄素	芒果苷	白射干素		
1	22.98±0.83	6.00±1.15	1.77±0.12	3.45±0.18	1.42±0.17	3.91±0.12	9.28±0.78	1.11±0.09	0.88±0.07	77.88	
2	24.97±0.80	9.00±0.58	2.36±0.11	4.25±0.13	1.96±0.14	4.68±0.14	12.46±0.24	1.32±0.07	0.72±0.05	99.56	
3	22.81±0.69	9.00±0.58	2.21±0.20	3.51±0.15	1.81±0.18	3.54±0.15	9.81±0.33	1.25±0.10	0.57±0.06	92.24	
4	21.00±0.67	9.00±0.58	1.96±0.21	4.35±0.19	1.63±0.13	4.25±0.11	10.08±0.76	1.11±0.11	0.66±0.08	88.59	
5	21.99±1.04	8.00±1.00	1.91±0.08	2.61±0.13	1.49±0.16	3.56±0.15	10.38±0.34	1.20±0.06	0.54±0.07	82.99	

2.7 Box-Behnken 设计-响应面法 (Box-Behnken design-response surface method, BBD-RSM) 优化射干趁鲜切制工艺

2.7.1 BBD-RSM 实验设计与结果 基于单因素结果,应用 Design-Expert 12.0 软件,构建 BBD-RSM 优化切制工艺方案。以含水量、烘干温度、切片厚度作为考察因素,建立 3 因素 3 水平实验方案。按照“2.1.1”项下方法制备样品,按照“2.1.3”“2.2”项下色谱条件和方法,测定醇溶性浸出物、次野鸢尾黄素等 7 种成分含量,结合外观性状,以综合评分结果作为工艺优化的评价指标。

2.7.2 模型拟合及方差分析 采用 Design-Expert 12.0 软件对表 6 中的 BBD-RSM 实验数据进行多元 2 次回归拟合分析,以含水量 (X_1)、烘干温度 (X_2) 和切片厚度 (X_3) 为自变量,以综合评分作为响应变量,最终建立的回归方程为综合评分 = $96.01 - 1.14 X_1 - 1.34 X_2 + 1.09 X_3 + 1.92 X_1 X_2 + 1.34 X_1 X_3 + 1.30 X_2 X_3 - 13.01 X_1^2 - 9.47 X_2^2 - 10.12 X_3^2$ 。通过方差分析验证模型可靠性,结果如表 7 所示,模型整体拟合效果达到极显著水平 ($P < 0.0001$),表明该数学模型具有统计学意义;失拟项 P 值为 0.3281,表明该模型拟合度较好;相关系数 $R^2 = 0.9937$,表明模型对实验数据拟合精度高,误差水平低,预测 $R_{pre}^2 = 0.9410$ 与调整 $R_{adj}^2 = 0.9856$ 数值接近,表明模型具备可靠的预测能力,适用于该切制工艺的优化研究;差异系数 (CV) = 1.56%,说明本研究具

有较高的可信度与准确性。方差分析结果显示,含水量 (X_1)、烘干温度 (X_2) 和切片厚度 (X_3) 对综合评分均有显著性影响 ($P < 0.05$),各考察因素的影响强度由高到低依次为 $X_2 > X_1 > X_3$,且因素交互作用 $X_1 X_2$ 项有显著影响 ($P < 0.05$),2 次项 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 的影响均达到极显著水平 ($P < 0.001$)。

借助 Design-Expert 12.0 软件生成 2 次回归模型的响应面图及等高线图,分析各因素交互效应强度,筛选最优工艺参数组合。各因素的交互作用对响应值的影响可用等高线图和响应面图表示,图形能够直接呈现交互作用对响应值的影响情况,等高线越密集,影响越显著;等高线越接近椭圆,代表 2 个因素的交互作用越强^[16-17]。烘干温度与含水量之间存在协同效应,其响应面图的等高线呈明显的椭圆形(图 2),进一步印证了二者交互作用的强度。由图可知,趁鲜切制射干的最佳切制工艺为每 100 克鲜射干烘干至含水量 60%,烘干温度 60℃,切片厚度 2 mm。

2.7.3 验证实验 按照“2.1.1”项制备 3 份最佳工艺参数供试品溶液,按照“2.1.3”项条件测定,进行验证试验,结果见表 8。3 次验证平均综合评分为 96.6441, RSD = 0.14% ($n = 3$),与模型预测值高度吻合,所建模型具备良好的预测可靠性。

2.8 趁鲜切制射干色度测定结果

2.8.1 色度测定条件 设定测定参数为 D65、LED 蓝光激发光源,8°视角视场,8 mm 孔径,仪器误差

表 6 BBD-RSM 试验设计与结果
 Table 6 Experimental scheme and results of BBD-RSM

试验号	X ₁ / %	X ₂ / ℃	X ₃ / mm	浸出 物/%	外观性状 评分	质量分数/(mg·g ⁻¹)							综合 评分
						次野鸢尾黄素	鸢尾苷	鸢尾黄素	野鸢尾苷	野鸢尾黄素	芒果苷	白射干素	
S1	50	50	2	24.19	7	1.98	4.56	0.63	5.05	7.48	1.25	0.54	77.682 0
S2	70	50	2	21.33	6	1.94	4.26	0.64	4.44	7.23	1.18	0.44	70.661 0
S3	50	70	2	24.63	6	1.81	3.90	0.60	4.82	6.92	1.31	0.38	72.557 5
S4	70	70	2	23.89	7	1.76	3.36	0.59	4.19	6.39	1.27	0.34	73.206 6
S5	50	60	1	24.74	6	1.90	4.58	0.58	4.67	6.93	1.16	0.42	73.572 0
S6	70	60	1	21.05	7	1.76	3.88	0.39	5.28	6.36	1.23	0.48	69.520 7
S7	50	60	3	20.46	8	1.87	4.38	0.47	5.28	6.33	1.15	0.44	73.571 7
S8	70	60	3	20.73	9	1.73	3.82	0.46	4.46	6.03	1.12	0.46	74.869 3
S9	60	50	1	24.40	7	1.96	6.24	0.59	5.79	7.21	1.32	0.49	78.917 6
S10	60	70	1	21.51	7	2.00	3.97	0.41	5.25	7.03	1.29	0.47	72.233 2
S11	60	50	3	22.89	8	1.93	4.59	0.54	5.31	6.79	1.31	0.55	78.004 6
S12	60	70	3	21.03	8	2.03	4.03	0.60	4.77	6.93	1.37	0.44	76.519 7
S13	60	60	2	24.65	9	2.68	4.32	1.37	4.74	10.42	1.28	0.75	97.529 7
S14	60	60	2	23.24	9	2.70	4.31	1.37	4.73	10.52	1.28	0.80	96.365 5
S15	60	60	2	23.89	9	2.63	4.32	1.36	4.75	10.25	1.28	0.69	96.102 8
S16	60	60	2	22.52	9	2.64	4.29	1.33	4.70	10.06	1.27	0.74	94.420 3
S17	60	60	2	23.28	9	2.66	4.26	1.35	4.67	10.29	1.26	0.76	95.629 4

表 7 回归模型的方差分析结果
 Table 7 Results of variance analysis of regression model

误差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	1 758.40	9	195.38	122.69	<0.000 1
X ₁	10.41	1	10.41	6.54	0.037 7
X ₂	14.44	1	14.44	9.07	0.019 6
X ₃	9.51	1	9.51	5.97	0.044 5
X ₁ X ₂	14.71	1	14.71	9.24	0.018 9
X ₁ X ₃	7.15	1	7.15	4.49	0.071 8
X ₂ X ₃	6.76	1	6.76	4.24	0.078 3
X ₁ ²	712.57	1	712.57	447.48	<0.000 1
X ₂ ²	377.90	1	377.90	237.31	<0.000 1
X ₃ ²	430.97	1	430.97	270.64	<0.000 1
总残差	11.15	7	1.59		
失拟误差	6.03	3	2.01	1.57	0.328 1
纯误差	5.12	4	1.28		
总和	1 769.55	16			

$\Delta E^*_{ab} \leq 0.40$, 校正后进行测定, 饮片图与粉末图见图 3。

2.8.2 供试品制备 取趁鲜切制射干粉末(过 3 号筛)约 2 g, 平铺于测试盒内, 待测。

2.8.3 精密度考察 按“2.8.1”和“2.8.2”项制备 1 份供试品, 测定色度, 连续测定 6 次, L^* 、 a^* 、 b^* 值 RSD 均<2%, 表明仪器精密度良好。

2.8.4 重复性考察 按“2.8.1”和“2.8.2”项制备

6 份供试品, 测定色度, L^* 、 a^* 、 b^* 值 RSD 均<2%, 表明方法重复性良好。

2.8.5 稳定性考察 按“2.8.1”和“2.8.2”项制备 1 份供试品, 分别于 0、1、2、3、4、5、6 h 后测定色度 L^* 、 a^* 、 b^* 值 RSD 均<2%, 表明射干样品在 6 h 内稳定性良好。

2.8.6 射干色度值测定结果 依照“2.8.2”项制备 17 份供试品, 每份 3 次重复测定并记录均值, 通过 $E^*_{ab} = (L^{*2} + a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ 计算总色度值, 样品 L^* 、 a^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 范围分别为 67.90~76.45、4.91~8.56、25.50~27.31、70.85~81.17 (表 9)。与其它样品相比, 样品 S13~S17 在 L^* 值上颜色较浅, 而在 a^* 与 b^* 值上颜色较深(图 4), 表明其整体色泽趋向明亮的红、黄, 与成分变化趋势一致。

2.8.7 相关性分析 将趁鲜切制射干中各项指标值分别与颜色指标值 L^* 、 a^* 、 b^* 导入 SPSS 26.0 软件, 分析两者相关性分析, 结果见表 10。用 Origin 软件做热图, Pearson 相关性分析热图见图 5。结果表明, 次野鸢尾黄素、鸢尾黄素、野鸢尾黄素、白射干素含量与 L^* 、 a^* 、 b^* 值双检验的概率值均≤0.01; 且与 L^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 值均呈负相关, 与 a^* 值呈正相关, 在一定程度上, L^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 越小, a^* 越大, 样品中上述 4 种成分含量就越高。浸出物、鸢尾苷、野鸢尾苷、芒果苷与色度值的变化未显示显著相关性,

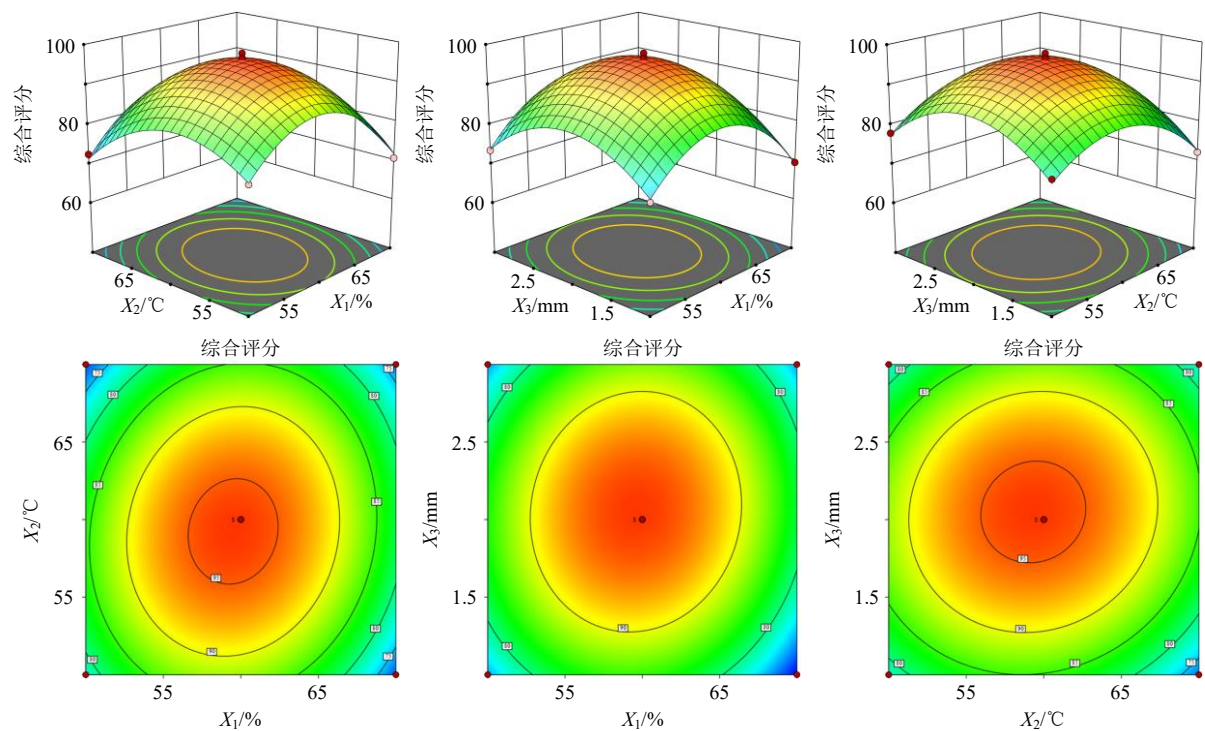


图 2 各因素对综合评分的影响
Fig. 2 Effect of each factor on comprehensive score

表 8 BBD-RSM 验证实验结果
Table 8 Experimental results of BBD-RSM verification

试验号	X ₁ / %	X ₂ / °C	X ₃ / mm	浸出 物/%	外观性 状评分	质量分数/(mg·g ⁻¹)							综合 评分
						次野鸢尾黄素	鸢尾苷	鸢尾黄素	野鸢尾苷	野鸢尾黄素	芒果苷	白射干素	
1	60	60	2	23.95	9	2.67	4.42	1.39	4.76	10.57	1.28	0.64	96.678 0
2	60	60	2	24.00	9	2.68	4.50	1.38	4.82	10.37	1.31	0.66	96.763 2
3	60	60	2	23.73	9	2.66	4.48	1.39	4.80	10.43	1.32	0.68	96.491 2
RSD/%				0.60	0.00	0.37	0.93	0.42	0.64	0.98	1.60	3.03	0.14



图 3 17 份趁鲜切制射干饮片图 (A) 及粉末图 (B)
Fig. 3 Decoction pieces diagram (A) and powder diagram (B) of 17 fresh-cutting BR

表 9 趁鲜切制射干中各色度值测量结果
 Table 9 Determination results of chroma values in fresh-cutting BR

样品	L^*	a^*	b^*	E^*_{ab}	样品	L^*	a^*	b^*	E^*_{ab}
S1	71.24	6.13	26.68	76.32	S10	68.93	6.82	27.11	74.38
S2	71.43	4.91	26.45	76.33	S11	75.84	5.86	27.10	80.75
S3	74.38	6.23	27.19	79.44	S12	73.23	6.85	27.08	78.38
S4	72.71	5.68	27.27	77.86	S13	68.38	8.23	26.10	70.88
S5	76.45	5.54	26.72	81.17	S14	68.03	8.31	25.50	71.27
S6	75.21	6.37	26.92	80.14	S15	68.77	8.28	26.32	71.33
S7	73.53	6.24	27.31	78.69	S16	68.25	8.21	26.37	70.85
S8	74.30	5.85	27.15	79.32	S17	67.90	8.56	26.20	72.35
S9	75.63	5.98	26.87	80.48					

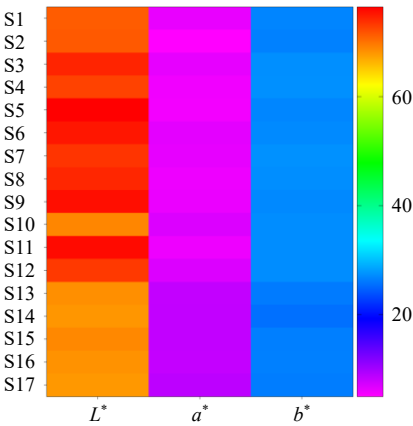
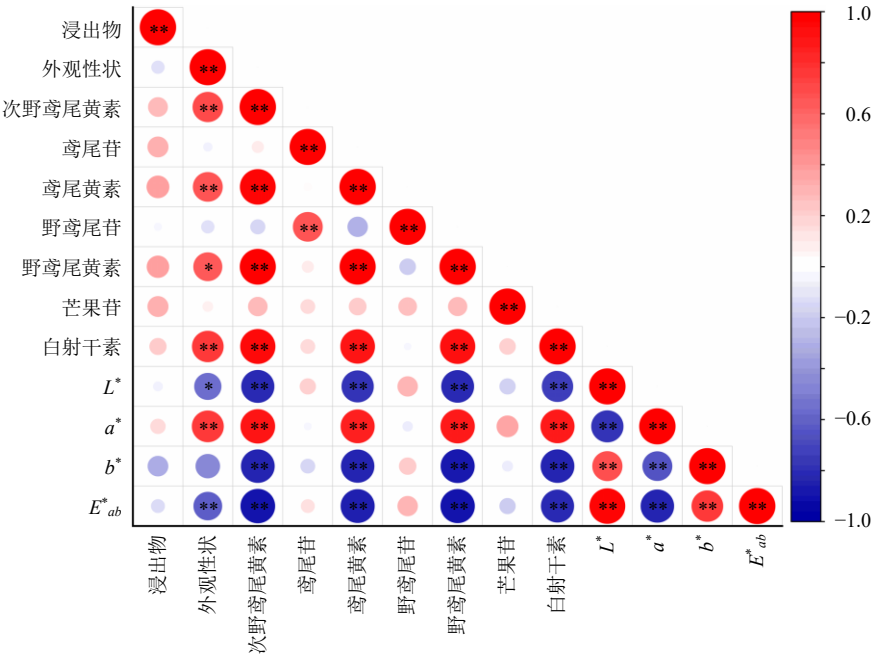


图 4 趁鲜切制射干样品 (S1~S17) 的色度热图
 Fig. 4 Chromaticity heat map of fresh BR (S1—S17)

表 10 色泽指标 L^* 、 a^* 、 b^* 与趁鲜切制射干有效成分含量相关性分析
 Table 10 Correlation analysis between color index L^* , a^* , b^* and active ingredient content of fresh-cutting BR

成分	L^*		a^*		b^*		E^*_{ab}	
	Pearson相关性	P值	Pearson相关性	P值	Pearson相关性	P值	Pearson相关性	P值
浸出物	-0.071	0.788	0.179	0.492	-0.321	0.209	-0.148	0.570
外观性状	-0.566*	0.018	0.772**	0.000	-0.461	0.063	-0.629**	0.007
次野鸢尾黄素	-0.832**	0.000	0.918**	0.000	-0.858**	0.000	-0.904**	0.000
鸢尾苷	0.203	0.434	-0.043	0.869	-0.163	0.531	0.143	0.584
鸢尾黄素	-0.786**	0.000	0.873**	0.000	-0.856**	0.000	-0.874**	0.000
野鸢尾苷	0.315	0.218	-0.082	0.756	0.230	0.374	0.314	0.219
野鸢尾黄素	-0.823**	0.000	0.894**	0.000	-0.884**	0.000	-0.900**	0.000
芒果苷	-0.196	0.450	0.366	0.148	-0.090	0.731	-0.200	0.441
白射干素	-0.751**	0.001	0.881**	0.000	-0.859**	0.000	-0.827**	0.000

* $P \leq 0.05$ ** $P \leq 0.01$ 。



* $P \leq 0.05$ ** $P \leq 0.01$ 。

图 5 Pearson 相关性分析热图
 Fig. 5 Pearson correlation analys heat map

表明随着工艺的改变,样品中成分也发生了变化。综上,样品亮、黄蓝色度越低,红绿越高,药材越接近橙黄色,则上述 4 种成分含量就越高。而次野鸢尾黄素也是射干的关键药效成分和《中国药典》2025 年版质量评价的指标成分,因此通过建立趁鲜切制射干化学成分含量与外观颜色的相关性,可为其的质量初步评价提供科学依据。

3 讨论

趁鲜切制作为一种创新性的工艺优化,在植物类中药的产地初加工环节已广泛应用,尤其是质地紧密,干燥后坚硬不易切割的根及根茎类药材,该工艺显著缩短了加工时间,并有效规避了传统方法中鲜药材整体干燥后再软化切制等复杂工艺使药材质量波动的问题。AHP-熵权法结合模型是一种综合主客观信息的权重确定方法。将 AHP 的主观判断与熵权法的客观度量相结合,可兼顾决策导向与数据驱动,使权重分配更为科学与可靠。响应面法基于多元回归原理,通过三维曲面直观呈现因素间的交互效应。因此,本研究采用响应面法进行实验,并引入 AHP-熵权法组合赋权法以综合主客观信息,科学确定各评价指标的权重。

在射干趁鲜切制工艺中,含水量、烘干温度与切片厚度是影响饮片质量的核心参数。响应面分析表明,3 因素不仅独立作用于饮片质量,更通过交互效应协同调控综合评分,其影响强度由强到弱依次为烘干温度、含水量、切片厚度。烘干温度作为关键因素,烘干过程会影响相关酶系,通过双向调控多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)等的活性决定成分保留率^[18-21]。60℃可使黄酮类成分最大程度保留,同时有效抑制酶促氧化,该优选出烘干温度的结果与文献报道一致^[22-24]。含水量作为基础性因素,与温度存在显著交互作用,这表明最佳烘干温度的确定依赖于特定含水量。60%含水量时,切制阻力最小,既保持外观完整,又最大程度保留黄酮类药效物质,同时抑制高水分下的酶解与低水分下的美拉德反应^[25]。切片厚度作为重要参数,切片过薄时饮片边缘卷曲,影响饮片成型率;切片过厚时,有效成分能够得到有效的保留,成型较好,但不易干燥和失水。2 mm 时为最佳切制厚度,符合《中国药典》2025 年版要求的同时饮片外观与成分含量均达标。

本研究在射干趁鲜切制工艺基础上,创新性融合传统“辨状论质”理论与现代色差量化技术,探

究饮片色泽与活性成分的关联机制及应用价值。利用色差仪对物质进行色泽分析,能减少人为因素导致的误差,得到精准的色彩量化值^[26-27]。有研究显示,中药材经炮制后,在化学成分改变的同时往往伴随着色泽变化^[28-30]。药材加工过程中颜色改变能预测质量参数的变化,已有研究用饮片的色差值预测成分含量的变化^[31-33]。为明确趁鲜切制射干切制工艺的最佳参数范围,本研究建立样品有效成分含量与色度指标的关联性,深入探究其内在化学成分与外观色泽的内在联系。结果表明,传统鉴别中射干“粉末橙黄色”的经验可通过色差仪精准表征,且该色泽特征与次野鸢尾黄素等四种成分含量呈显著负相关。4 种成分在结构上均属于游离异黄酮苷元,其共同特征为具有邻位酚羟基或特定取代模式(如甲氧基、羟基)的苯环结构,而邻二酚羟基是 PPO、POD 的特异性底物,可被酶催化氧化为醌类化合物,这类醌类物质本身具有绿色调,且易进一步发生分子间聚合,形成深色的聚醌类复合物^[34],导致 a^* 值减小。Pearson 相关性分析结果发现,成分含量与 L^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 存在负相关,与 a^* 存在正相关, L^* 、 b^* 、 E^*_{ab} 值越小, a^* 值越大,颜色越接近橙黄色,次野鸢尾黄素、鸢尾黄素、野鸢尾黄素、白射干素含量越高,表明上述成分的含量变化与色度指标间存在明显相关性。射干具有抗炎镇痛、止咳等作用,异黄酮类化合物是其主要活性成分,由此可推测射干颜色越接近橙黄色,其药效可能越好,但射干趁鲜切制前后的临床疗效等同性尚需进一步探究。

本实验采用 AHP-熵权法结合响应面法优选得到含水量 60%,烘干温度 60℃,切片厚度 2 mm 的趁鲜切制工艺。趁鲜切制相较于传统切制方法操作简单、节能环保,契合中药产业现代化发展的趋势。趁鲜切制射干化学成分与颜色值具有显著相关性,基于“辨状论质”理论,通过量化色泽特征与内在成分含量的关联关系初步评价射干的品质,为其多维度质量评价提供理论依据。本研究将传统的经验鉴别与现代科学技术相结合,增强趁鲜切制射干饮片色泽鉴别过程的客观性,系统优化其切制工艺参数,为其质量控制提供科学支撑。

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. 2025: 305.
- [2] Liu E Y, Zheng Z X, Zheng B Z, et al. Tectorigenin, an isoflavone aglycone from the rhizome of *Belamcanda chinensis*, induces neuronal expression of erythropoietin

- via accumulation of hypoxia-inducible factor-1 α [J]. *Phytother Res*, 2020, 34(6): 1329-1337.
- [3] Tian M, Zhang X, Zhu Y, *et al.* Global transcriptome analyses reveal differentially expressed genes of six organs and putative genes involved in (iso)flavonoid biosynthesis in *Belamcanda chinensis* [J]. *Front Plant Sci*, 2018, 9: 1160.
- [4] Li S L, Li S N, Tang Y, *et al.* Ultrafiltration-LC-MS combined with semi-preparative HPLC for the simultaneous screening and isolation of lactate dehydrogenase inhibitors from *Belamcanda chinensis* [J]. *J Sep Sci*, 2016, 39(23): 4533-4543.
- [5] Lee Y S, Kim S H, Kim J K, *et al.* Preparative isolation and purification of seven isoflavones from *Belamcanda chinensis* [J]. *Phytochem Anal*, 2011, 22(5): 468-473.
- [6] Szandruk M, Merwid-Ląd A, Szeląg A. The impact of mangiferin from *Belamcanda chinensis* on experimental colitis in rats [J]. *Inflammopharmacology*, 2018, 26(2): 571-581.
- [7] Wang Z J, Jiang Y X, Li Z Y, *et al.* Herbal textual research of *Belamcanda chinensis* (L.) redouté and screening of quality-markers based on 'pharmacodynamics-substance' [J]. *J Ethnopharmacol*, 2024, 332: 118324.
- [8] 李莎莎, 陈曦, 王晓婷, 等. 基于趁鲜切制和传统工艺的黄芩饮片质量评价研究 [J]. *药物分析杂志*, 2025, 45(4): 578-589.
- [9] 姚旭, 徐梦丹, 张雪晶, 等. 甘草饮片趁鲜切制与传统切制方法对其质量的影响 [J]. *中药材*, 2024, 47(2): 342-347.
- [10] 姚旭. 甘草趁鲜切制饮片炮制工艺及质量标准研究 [D]. 长春: 长春中医药大学, 2024.
- [11] 鲁梦琪. 北苍术趁鲜切制饮片工艺及质量标准 [D]. 长春: 长春中医药大学, 2024.
- [12] 董珂旭, 张媛, 高如汐, 等. AHP-熵权法结合 Box-Behnken 设计-响应面法优选枸杞汁制巴戟天炮制工艺 [J]. *中草药*, 2025, 56(7): 2301-2311.
- [13] 杨静容, 陈亚楠, 肖春萍, 等. 响应面法优化盐关黄柏炮制工艺及其成分与色度相关性分析 [J]. *中草药*, 2024, 55(15): 5093-5103.
- [14] 褚平铵, 郝江峰, 彭腾腾, 等. 层次分析法-熵权法结合正交试验优化龙葵素膏成型工艺 [J]. *中医药学报*, 2025, 53(7): 25-30.
- [15] 朱月, 陈燕, 钟芙蓉, 等. 基于层次分析-熵权法的经典名方黄连解毒汤提取工艺优化及其抗炎活性研究 [J]. *中草药*, 2025, 56(7): 2291-2300.
- [16] 赵影, 冯瑞, 张宇, 等. 响应面法优化鲜炖海参加工工艺 [J]. *食品工业*, 2024, 45(2): 77-82.
- [17] 刘燎原, 纪玉华, 王文丽, 等. 熟地黄蒸制过程特征图谱和颜色变化研究及炮制工艺优选 [J]. *南京中医药大学学报*, 2023, 39(8): 764-774.
- [18] Vuleta A, Tucic B. Thermal dependence of the antioxidant enzymes superoxide dismutase, catalase, and peroxidase in foliage of *Iris pumila* L. [J]. *Arch Biol Sci (Beogr)*, 2009, 61(3): 441-446.
- [19] 伍梦瑶, 黄莹捷, 姚燕妮, 等. 勐库大叶种茶树多酚氧化酶粗酶的酶学性质 [J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2017, 43(5): 579-588.
- [20] Gul Guven R, Aslan N, Guven K, *et al.* Purification and characterization of polyphenol oxidase from corn tassel [J]. *Cell Mol Biol*, 2016, 62(13): 6-11.
- [21] de los Santos M B, Jacobi S S, de la Cruz Arcas Miñarro M, *et al.* Kinetic characterization, thermal and pH inactivation study of peroxidase and pectin methylesterase from tomato (*Solanum betaceum*) [J]. *Food Sci Technol*, 2020, 40(suppl 1): 273-279.
- [22] 解小霞, 刘合刚, 刘常丽, 等. 对射干最佳干燥温度的研究 [J]. *当代医药论丛*, 2014, 12(14): 161.
- [23] 杨雅雯, 刘勇, 刘雨, 等. 不同干燥方法对射干药材干燥特性、外观性状和有效成分的影响 [J]. *中国中药杂志*, 2021, 46(2): 366-373.
- [24] 李霞, 崔月曦. 射干药材最佳干燥温度的研究 [J]. *海峡药学*, 2014, 26(2): 32-35.
- [25] 宫瑞泽, 霍晓慧, 张磊, 等. 美拉德反应对中药品质的影响及调控研究进展 [J]. *中草药*, 2019, 50(1): 243-251.
- [26] Xia M, Guo Y, Li J, *et al.* Correlation analysis of physicochemical properties with anti-inflammatory activity of *Andrographis paniculata* (Burm. f.) Nees based on HPLC-DAD, colorimeter and multivariate statistics: A comprehensive quality evaluation strategy [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2022, 210: 114565.
- [27] Lan Z W, Zhang Y, Sun Y, *et al.* A mid-level data fusion approach for evaluating the internal and external changes determined by FT-NIR, electronic nose and colorimeter in *Curcuma Rhizoma* processing [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2020, 188: 113387.
- [28] 邓延文, 钟凌云, 刘洪, 等. 炆黄精炮制工艺优化及其成分与色泽相关性分析 [J]. *中成药*, 2023, 45(10): 3334-3341.
- [29] 杜伟锋, 汤璐璐, 朱伟豪, 等. 基于色度原理的薏苡仁炮制过程颜色与化学成分相关性分析 [J]. *药物分析杂志*, 2022, 42(8): 1391-1399.
- [30] 位玉蝶, 李沁, 宋晨鸽, 等. 基于多指标响应曲面法优选醋炙香附炮制工艺及炮制终点量化研究 [J]. *中草药*, 2021, 52(4): 982-992.
- [31] 宋成程, 王燕, 詹鑫, 等. 色差值结合化学计量学对谷芽炮制品的分类鉴别及水分预测研究 [J]. *时珍国医国药*, 2022, 33(3): 611-613.
- [32] 郑晓倩, 徐超, 金传山, 等. 基于颜色变化的“九蒸九晒”黄精炮制火候及内外在质量的相关性研究 [J]. *中草药*, 2022, 53(6): 1719-1729.
- [33] 郭静英, 易海燕, 郑郁清, 等. 基于“辨色论质”的百合制桔梗质量控制研究 [J]. *中草药*, 2023, 54(1): 72-80.
- [34] Sultan M Z, Farouk K A, Elbagoury M M, *et al.* Trends in biochemical, anatomical mechanisms and molecular aspects in enzymatic browning of apples: A review [J]. *Eur Food Res Technol*, 2025, 251(10): 3305-3326.