

基于响应面法的板蓝根产地加工炮制一体化工艺研究



路莎莎, 王 凝, 王玉梅, 白仲杰, 赫媛媛, 代文倩

河西学院医学院 (甘肃张掖 734000)

【摘要】目的 采用响应面法对板蓝根产地加工与炮制一体化工艺进行优化。**方法** 以板蓝根中 (R,S)- 告依春、靛蓝、靛玉红及 4 种苷类活性成分含量为评价指标, 选取新鲜药材含水量 (%)、干燥温度 (°C) 和切制规格 (mm) 3 个关键工艺参数, 通过 Box-Behnken 响应面试验设计对板蓝根产地加工与炮制一体化工艺进行系统优化。**结果** 板蓝根产地加工炮制一体化最佳工艺条件为: 含水量 40.38%, 切制规格 2.54 mm, 干燥温度为 58.57°C。**结论** 本研究建立的板蓝根产地加工与炮制一体化工艺方法操作简便、重现性好, 为板蓝根规范化产地加工提供了可靠的技术支持, 具有重要的实际应用价值。

【关键词】 板蓝根; 产地加工炮制一体化; 响应面法; 高效液相色谱法

【中图分类号】 R283

【文献标识码】 A

Study on the integrated processing technology of Isatidis radix based on response surface method

LU Shasha, WANG Ning, WANG Yumei, BAI Zhongjie, HE Yuanyuan, DAI Wenqian

Hexi University Medical College, Zhangye 734000, Gansu Province, China

Corresponding author: LU Shasha, Email: LSSHXYX@163.com

【Abstract】Objective To optimize the integrated processing technology of Isatidis radix production and processing of origin by response surface method. **Methods** Using the content of (R,S)-goitrin, indigo, indirubin, and four glycoside active ingredients in Isatidis radix as evaluation indicators, three key process parameters were selected: fresh medicinal material moisture content(%), drying temperature (°C), and cutting specifications (mm). Box Behnken response surface design was used to systematically optimize the integrated processing and processing technology of Isatidis radix. **Results** The optimal processing conditions for the integrated processing of Isatidis radix of origin were as follows: moisture content of 40.38%, cutting size of 2.54 mm, and drying temperature of 58.57°C. **Conclusion** The integrated process method for processing and processing of Isatidis radix established in this study is easy to operate and has good reproducibility, providing reliable technical support for standardized original processing of Isatidis radix and having important practical application value.

【Keywords】 Isatidis radix; Integrated processing and processing of origin; Response surface method; High performance liquid chromatography

DOI: 10.12173/j.issn.2097-4922.202502074

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目 (23JRRG0036); 河西学院校长基金项目 (QN2023011)

通信作者: 路莎莎, 硕士, 主管药师, Email: LSSHXYX@163.com

板蓝根为菘蓝 (*Isatis indigotica* Fortune.) 的干燥根, 属于十字花科植物。秋季采挖, 除去泥沙后晒干。性味苦、寒, 归属心、胃经, 具有清热解毒、凉血利咽之功效, 主治外感发热, 温病初起, 咽喉肿痛, 温毒发斑, 疮痍, 丹毒, 痈肿疮毒^[1]。从古至今, 在诸多文献中对板蓝根炮制加工方法都有记载: 宋代《小儿卫生总微论方》记载为先用麦麸炒至黄色, 然后洗净晒干的方法; 明代《普济方》记载焙干法; 现行炮制加工方法为《中国药典(2020年版)》, 除去杂质, 洗净, 润透, 切厚片, 干燥^[1]。但对于润透程度, 切片厚度, 干燥温度并没有严格标准, 不利于板蓝根质量控制^[2], 在此基础上, 本试验以 (*R,S*)-告依春、靛蓝、靛玉红及 4 种苷类化学成分含量作为考察指标, 运用星点设计响应面法将板蓝根产地加工和炮制合二为一, 优选板蓝根产地加工一体化工艺, 并探讨产地加工炮制一体化对板蓝根饮片加工的优势, 为饮片的质量控制和临床规范应用提供依据。

1 材料

1.1 主要仪器

LC-20A 型高效液相色谱仪 (日本岛津公司); FA-2004 型十万分之一电子天平 (上海舜宇恒平科学仪器有限公司); SHZ-D (III) 型循环水多用真空泵 (巩义市科瑞仪器有限公司); RE-2000A 型旋转蒸发仪 (上海亚荣生化仪器厂); GZX-9070MBE 干燥箱 (上海博迅实业有限公司医疗设备厂); KQ-50DE 超声仪 (昆山市超声仪器有限公司)。

1.2 主要药品与试剂

板蓝根样品于 2023 年 10 月采自甘肃省民乐县六坝镇洋胡滩种植基地, 经河西学院中药资源与鉴定专家王玉梅副教授鉴定为十字花科 (*Brassicaceae*) 菘蓝属植物菘蓝 (*Isatis indigotica* Fortune.) 的干燥根; 对照品尿苷 (批号: N10M11W109430, 纯度 $\geq 98\%$)、鸟苷 (批号: J09GB154303, 纯度 $\geq 98\%$)、腺苷 (批号: J08HB173656, 纯度 $\geq 99\%$)、胞苷 (批号: T16J7X9000, 纯度 $\geq 98\%$)、(*R,S*)-告依春 (批号: Z27N11X32307, 纯度 $\geq 98\%$) 均购自上海源叶生物科技有限公司; 对照品靛蓝 (批号: 1221A026, 纯度 $\geq 98\%$) 和靛玉红 (批号:

702B022, 纯度 $\geq 98\%$) 购自北京索莱宝科技有限公司; 甲醇为色谱纯, 其余试剂均为分析纯, 水为纯化水。

2 方法与结果

2.1 指标成分的含量测定

2.1.1 色谱条件

①核苷类及 (*R,S*)-告依春的色谱条件。采用 Diamonsil C₁₈ 色谱柱 (250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μ m), 以甲醇 (A)-0.3% 甲酸水溶液 (B) 为流动相进行梯度洗脱 (0~14 min, 5% A; 14~24 min, 5% $\rightarrow$ 10% A; 24~35 min, 10% $\rightarrow$ 20% A; 35~40 min, 20% $\rightarrow$ 55% A); 流速: 1.0 mL/min; 柱温: 30 $^{\circ}$ C; 检测波长: 254 nm; 进样量: 10 μ L。

②靛蓝和靛玉红的色谱条件。采用 Diamonsil C₁₈ 色谱柱 (250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μ m), 以甲醇 (A)-0.8% 磷酸水溶液 (B) 为流动相进行梯度洗脱 (0~10 min, 25% A; 10~20 min, 25% $\rightarrow$ 45% A; 20~22 min, 45% $\rightarrow$ 59% A; 22~40 min, 59% $\rightarrow$ 71% A; 40~42 min, 71% $\rightarrow$ 75% A; 42~60 min, 75% $\rightarrow$ 85% A); 流速: 1.0 mL/min; 柱温: 30 $^{\circ}$ C; 检测波长: 280 nm; 进样量 10 μ L^[3]。

2.1.2 溶液的制备

①混合对照品溶液的制备。精密称定胞苷、尿苷、腺苷、鸟苷、(*R,S*)-告依春对照品各适量, 置于 50 mL 量瓶中, 加入 75% 甲醇超声 (功率: 250 W, 频率: 30 kHz) 溶解, 冷却至室温后定容至刻度, 摇匀, 制得各成分浓度分别为胞苷 0.010 1 mg/mL、尿苷 0.013 8 mg/mL、腺苷 0.016 7 mg/mL、鸟苷 0.017 1 mg/mL、(*R,S*)-告依春 0.012 0 mg/mL 的混合对照品溶液。

精密称定靛蓝、靛玉红对照品各适量, 置于 50 mL 量瓶中, 加入三氯甲烷超声 (功率: 250 W, 频率: 30 kHz) 溶解, 冷却至室温后定容至刻度, 摇匀, 制得靛蓝和靛玉红浓度分别为 0.014 9、0.020 5 mg/mL 的混合对照品溶液。

②供试品溶液的制备。各核苷类化合物及 (*R,S*)-告依春测定用供试品溶液: 精密称取板蓝根粉末 (过 4 号筛) 1.0 g, 置于 50 mL 具塞锥形瓶中, 准确加入 75% 甲醇 25 mL, 精密称定总质。30 $^{\circ}$ C 条件下超声 (功率: 250 W, 频率: 30 kHz)

提取 1.5 h。提取完毕后取出，室温冷却 30 min，再次精密称定总质量，冷却至室温后用 75% 甲醇补足减失的重量。经 0.45 μm 微孔滤膜初滤后，取续滤液过 0.22 μm 有机相微孔滤膜，即得。

靛蓝和靛玉红测定用供试品溶液：精密称取板蓝根粉末（过 60 目筛）5.0 g，置于 100 mL 圆底烧瓶中，加入 70% 乙醇溶液 50 mL，85 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中回流提取 2 次，每次 1 h。0.45 μm 微孔滤膜过滤后，合并滤液，挥去乙醇，用三氯甲烷萃取 2 次，

每次 25 mL。合并三氯甲烷萃取液，转移至 50 mL 量瓶中，用三氯甲烷定容至刻度，经 0.22 μm 有机相微孔滤膜，即得^[4]。

2.1.3 系统适用性试验

精密量取各混合对照品溶液和供试品溶液按“2.1.1”项下色谱条件进行测定，记录色谱图（图1）。结果表明各色谱峰分离度均大于 1.5，理论板数符合规定，基线平稳，该方法分离效果良好，系统适用性符合要求。

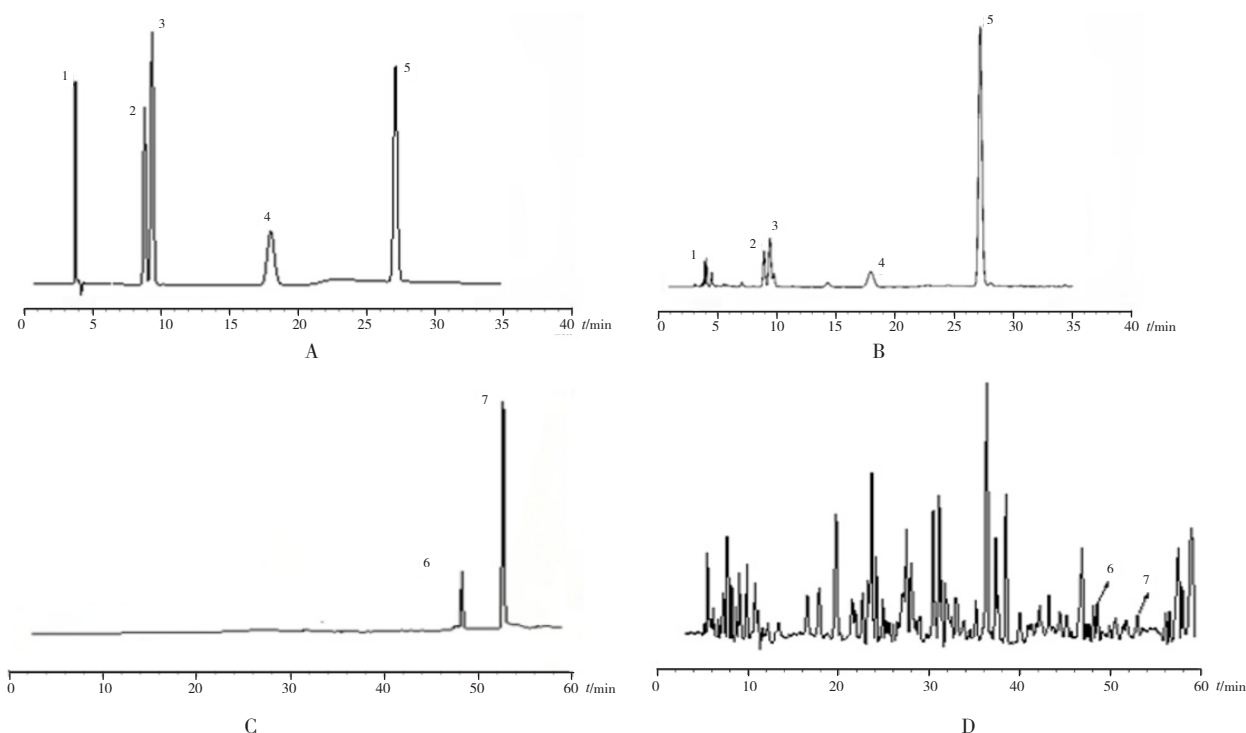


图1 HPLC色谱图

Figure 1. HPLC chromatogram

注：A. 核苷类及(R,S)-告依春对照品；B. 核苷类及(R,S)-告依春供试品；C. 靛蓝和靛玉红对照品；D. 靛蓝和靛玉红供试品；1. 胞苷；2. 尿苷；3. 腺苷；4. 鸟苷；5. (R,S)-告依春；6. 靛蓝；7. 靛玉红。

2.1.4 线性关系考察

将上述混合对照品溶液分别梯度稀释为 5 个不同浓度（浓度范围见表1），按“2.1.1”项下色谱条件进样测定，每次 10 μL ，记录各待测成分色谱峰面积，以峰面积为纵坐标，进样质量浓度为横坐标，绘制标准曲线，计算回归方程，结果见表1。可见，各待测成分在相应进样范围内线性关系良好。

取“2.1.2”项下制备的混合对照品溶液，分别用相应溶剂，核苷类及(R,S)-告依春用 75% 甲醇，靛蓝和靛玉红用三氯甲烷，梯度稀释制备 5 个不同浓度的系列对照品溶液。按照“2.1.1”项下色谱条件进行测定，记录各待测成分色谱峰面

积，以对照品浓度（ X ， $\mu\text{g/mL}$ ）为横坐标、峰面积（ Y ）为纵坐标进行线性回归分析。表1结果表明，各待测成分在测定浓度范围内线性关系良好， r 均大于 0.995 0，满足定量分析要求。

2.1.5 精密度试验

分别精密吸取混合对照品溶液各 10 μL ，按“2.1.1”项下色谱条件连续进样 6 次，记录各待测成分色谱峰面积。结果显示胞苷、鸟苷、尿苷、腺苷、(R,S)-告依春、靛蓝和靛玉红峰面积的 RSD 分别为 0.68%、0.45%、0.71%、0.34%、0.48%、0.71% 和 0.84%（ $n=6$ ），表明仪器精密度良好。

2.1.6 重复性试验

取药材粉末，分别按“2.1.2”项下方法平行

制备 6 份供试品溶液，并按“2.1.1”项下色谱条件进行测定，记录各待测成分色谱峰面积。结果显示，胞苷、鸟苷、尿苷、腺苷、(R,S)-告依春、靛蓝和靛玉红的平均含量为 0.197 3、0.469 6、0.433 5、0.452 9、1.662 0、0.008 2、0.003 10 mg/g，RSD 分别为 1.97%、2.05%、2.21%、1.45%、2.42%、1.22% 和 2.00% ($n=6$)，表明该方法重复性良好。

表1 线性关系考察结果

Table 1. Investigation results of linear relationship			
成分	回归方程	r	线性范围 ($\mu\text{g/mL}$)
胞苷	$Y=17\ 117X+1\ 871.2$	0.996 5	0.066 8~0.233 8
鸟苷	$Y=27\ 732X+1\ 642.7$	0.999 5	0.040 4~0.141 4
尿苷	$Y=30\ 126X+589.55$	0.998 0	0.055 2~0.193 2
腺苷	$Y=51\ 122X-6\ 849.2$	0.999 6	0.048 0~0.168 0
(R,S)-告依春	$Y=62\ 182X+10\ 159$	0.997 4	0.068 4~0.239 4
靛蓝	$Y=97\ 799X-1\ 683.7$	0.997 3	0.059 6~0.208 6
靛玉红	$Y=28\ 006X-18\ 847$	0.996 4	0.082 0~0.287 0

2.1.7 稳定性试验

取同一板蓝根供试品溶液，在 4℃ 放置保存，按“2.1.1”项下色谱条件，分别于 0、4、8、12、20、24 h 进样检测并记录峰面积。计算结果显示，胞苷、鸟苷、尿苷、腺苷、(R,S)-告依春、靛蓝和靛玉红峰面积的 RSD 分别为 1.34%、2.25%、1.21%、2.45%、2.52%、1.62% 和 2.10% ($n=6$)，表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.1.8 加样回收率试验

取同一批已经测定的板蓝根样品粉末各 0.5 g，精密称定，置于 250 mL 的具塞锥形瓶中，分别定量加入核苷类和靛蓝靛玉红混合对照品，加入甲醇溶液 25 mL，按“2.1.2”项下方法制备供试品溶液，按“2.1.1”项下色谱条件进样。计算得到各组分的平均加样回收率分别为 98.25%、97.75%、98.82%、99.25%、101.25%、101.74% 和 97.95%，RSD 分别为 2.34%、1.95%、1.67%、2.87%、2.02%、0.92% 和 2.20% ($n=6$)，表明方法的准确性良好。

2.2 单因素试验

2.2.1 新鲜药材含水量筛选

采用烘干法 (105℃ 恒重法) 测定新鲜板蓝根样品的绝对含水量。在固定热风干燥温度 (60℃) 和切片厚度 (5 mm) 的条件下，设置 30%、35%、40%、45%、50% 5 个含水量梯度。每个梯度平行制备 3 份供试品溶液，采用 HPLC 法初步

考察不同含水量对药材活性成分保留率的影响。图 2 结果表明，当含水量从 30% 增加至 40% 时，各目标成分的含量总体呈现上升趋势，并在 40% 含水量时达到峰值；然而，当含水量超过 40% 后，各成分含量均出现下降趋势。基于这一规律，本研究选择 40% 含水量作为中心点，进行后续响应面法优化试验。

2.2.2 切片厚度筛选

选取新鲜板蓝根样品 (含水量 40%)，在固定干燥温度 (60℃) 条件下，分别制备 1、2、3、4、5 mm 5 种不同厚度的切片。每个厚度梯度制备 3 个平行样品，采用 HPLC 法初步考察不同切片厚度对药材活性成分保留率的影响^[5]。图 3 结果表明，切制规格对有效成分提取影响有一定影响，总体在 3 mm 时到达最佳，而后逐渐下降。故选定切制规格为 3 mm 作为最佳饮片。

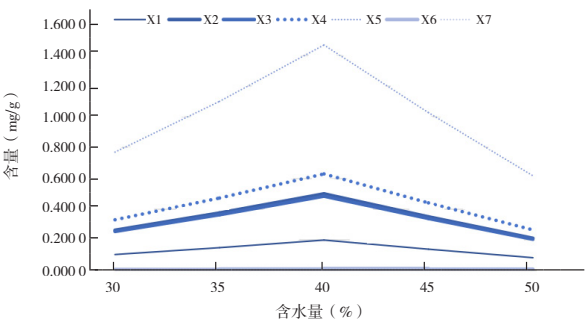


图2 药材含水量对指标性成分影响的折线图 ($n=3$)
Figure 2. Line graph of the influence of water content of medicinal herbs on index components ($n=3$)

注：X₁为胞苷；X₂为尿苷；X₃为腺苷；X₄为鸟苷；X₅为(R,S)-告依春；X₆为靛蓝；X₇为靛玉红。

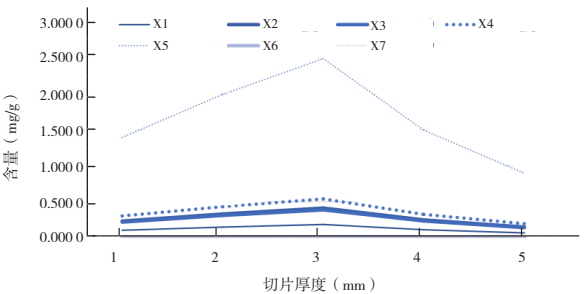


图3 切片厚度对指标性成分影响的折线图 ($n=3$)
Figure 3. Line graph of the influence of slice thickness on index components ($n=3$)

注：X₁为胞苷；X₂为尿苷；X₃为腺苷；X₄为鸟苷；X₅为(R,S)-告依春；X₆为靛蓝；X₇为靛玉红。

2.2.3 干燥温度筛选

采用恒温鼓风干燥箱对新鲜板蓝根样品 (含水量 45%，切片厚度 3 mm) 进行干燥处理，设

置 50、55、60、65、70℃ 5 个温度梯度。每个温度点制备 3 个平行样品, 采用 HPLC 法初步考察不同干燥温度对药材活性成分保留率的影响^[6]。图 4 结果表明, 干燥温度对有效成分提取影响效果显著, 在干燥温度 60℃ 时总体成分到达最佳, 而后逐渐下降。故选定干燥温度为 60℃。

2.3 Box-Behnken 试验

2.3.1 试验设计

在单因素试验的基础上, 选取含水量 (A)、切制规格 (B)、干燥温度 (C) 3 个关键工艺参数作为考察因素, 采用 Design Expert 8.0 软件设计了三因素三水平的响应面试验方案^[7-8]。以板蓝根中胞苷 (X_1)、尿苷 (X_2)、腺苷 (X_3)、鸟苷 (X_4)、(R,S)-告依春 (X_5)、靛蓝 (X_6) 和靛玉红 (X_7) 7 种活性成分的综合评分为评价指标, 通过加权评分法对板蓝根产地加工炮制一体化工艺进行系统优化。

鉴于各成分的药效贡献权重尚不明确, 本研究采用等权重原则, 设定各成分权重系数均为 1/7。具体评分方法为: 以各成分含量最大值为 100 分基准, 其余样品中各成分含量按与最大值

的比例折算得分, 综合评分 (Y) 计算公式为: $Y = (X_1/\max_1 + X_2/\max_2 + X_3/\max_3 + X_4/\max_4 + X_5/\max_5 + X_6/\max_6 + X_7/\max_7) \times 100/7$ ^[4-5]。试验因素水平设计见表 2, 完整的试验方案与结果数据见表 3。

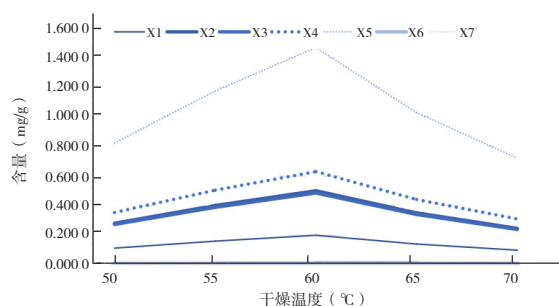


图4 干燥温度对指标性成分影响的折线图 ($n=3$)

Figure 4. Line graph of the influence of drying temperature on index components ($n=3$)

注: X_1 为胞苷; X_2 为尿苷; X_3 为腺苷; X_4 为鸟苷; X_5 为(R,S)-告依春; X_6 为靛蓝; X_7 为靛玉红。

表2 Box-Behnken的试验设计因素与水平表

Table 2. Box-Behnken test design factors and levels table

水平	A含水量 (%)	B切制规格 (mm)	C干燥温度 (°C)
-1	35	2	55
0	40	3	60
1	45	4	65

表3 Box-Behnken试验设计方案与结果

Table 3. Design and results of Box-Behnken test

试验号	A	B	C	指标成分含量 (mg/g)							Y (%)
				X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	
16	0	0	0	0.197 6	0.498 9	0.483 4	0.628 4	1.467 7	0.012 2	0.006 4	89.17
10	0	1	-1	0.196 9	0.475 6	0.462 2	0.526 3	1.039 2	0.009 9	0.001 3	69.77
8	1	0	1	0.187 3	0.479 6	0.433 5	0.422 9	1.762 0	0.006 2	0.003 1	70.99
15	0	0	0	0.197 6	0.498 9	0.483 4	0.628 4	1.467 7	0.012 2	0.006 4	89.17
17	0	0	0	0.197 6	0.498 9	0.483 4	0.628 4	1.467 7	0.012 2	0.006 4	89.17
11	0	-1	1	0.183 4	0.412 1	0.385 6	0.538 9	2.490 5	0.010 6	0.003 9	79.84
3	-1	1	0	0.198 3	0.505 9	0.485 1	0.664 7	1.656 9	0.004 8	0.003 2	77.58
5	-1	0	-1	0.187 6	0.518 4	0.489 8	0.623 5	1.642 7	0.005 9	0.003 1	77.08
4	1	1	0	0.181 1	0.433 5	0.355 3	0.409 9	2.252 1	0.005 0	0.002 9	68.01
7	-1	0	1	0.177 7	0.478 5	0.438 9	0.635 6	2.314 6	0.005 5	0.003 0	77.32
14	0	1	0	0.197 6	0.498 9	0.483 4	0.628 4	1.467 7	0.012 2	0.006 4	89.17
1	-1	0	0	0.162 1	0.485 6	0.358 9	0.571 1	1.491 9	0.012 2	0.003 5	75.05
2	1	0	0	0.185 3	0.464 9	0.490 3	0.410 5	1.898 3	0.015 1	0.003 2	80.78
6	1	-1	-1	0.191 7	0.456 7	0.478 7	0.612 9	2.194 1	0.006 6	0.003 0	78.69
12	0	1	1	0.156 9	0.500 4	0.450 7	0.550 4	1.549 3	0.012 5	0.003 4	77.69
13	0	0	0	0.197 6	0.498 9	0.483 4	0.628 4	1.467 7	0.012 2	0.006 4	89.17
9	0	-1	-1	0.192 0	0.456 5	0.403 2	0.640 9	2.440 3	0.016 0	0.003 2	87.36

2.3.2 模型的建立与分析

采用 Design Expert 8.0 软件对各组试验数据进行多元回归分析和二项式拟合, 建立了三因素二次回归模型: $Y=89.17-1.07A-3.75B-0.88C-$

$3.83AB-1.98AC+3.86BC-8.23A^2-5.58B^2-4.92C^2$ 。

表 4 的方差分析结果显示, 模型 F 值为 34.07 ($P<0.001$), 表明该回归模型具有高度显著性, 能够较好地拟合试验数据, 适用于板蓝根产地

加工炮制一体化工艺的优化。进一步分析表明，切制规格（B）、含水量与切制规格的交互作用（AB）、切制规格与干燥温度的交互作用（BC）以及各因素的二次项（ A^2 、 B^2 、 C^2 ）对综合评分的影响极显著（ $P<0.01$ ），而含水量与干燥温度的交互作用（AC）也达到显著水平（ $P<0.05$ ），说明各因素对响应值的影响呈现复杂的非线性关系。

通过 Design Expert 8.0 软件绘制的响应面图直

观地展示了各因素间的交互作用。图5A和图5B显示，含水量与切制规格（AB）、含水量与干燥温度（AC）的交互作用响应面坡度陡峭，表明这两个交互项对综合评分影响较大；而图5C中切制规格与干燥温度（BC）的交互作用响应面相对平缓，说明该交互作用对综合评分的影响较弱，这一结果与方差分析中BC项虽具有极显著性但影响程度相对较小的结论相吻合。这些发现为板蓝根加工工艺的优化提供了重要的理论依据。

表4 回归模型方差分析结果

Table 4. Analysis of variance results of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	836.74	9	92.97	34.07	<0.001
A	9.16	1	9.16	3.36	0.109 6
B	112.35	1	112.35	41.17	0.000 4
C	6.23	1	6.23	2.28	0.174 5
AB	58.52	1	58.52	21.45	0.002 4
AC	15.76	1	15.76	5.78	0.047 5
BC	59.60	1	59.60	21.84	0.002 3
A^2	258.19	1	285.19	104.52	<0.001
B^2	131.34	1	131.34	48.12	0.000 2
C^2	101.92	1	101.92	37.35	0.000 5
残差	19.01	7	2.73		
失拟项	19.01	3	6.37		
误差	0.00	4	0.00		
总离差	855.84	16			

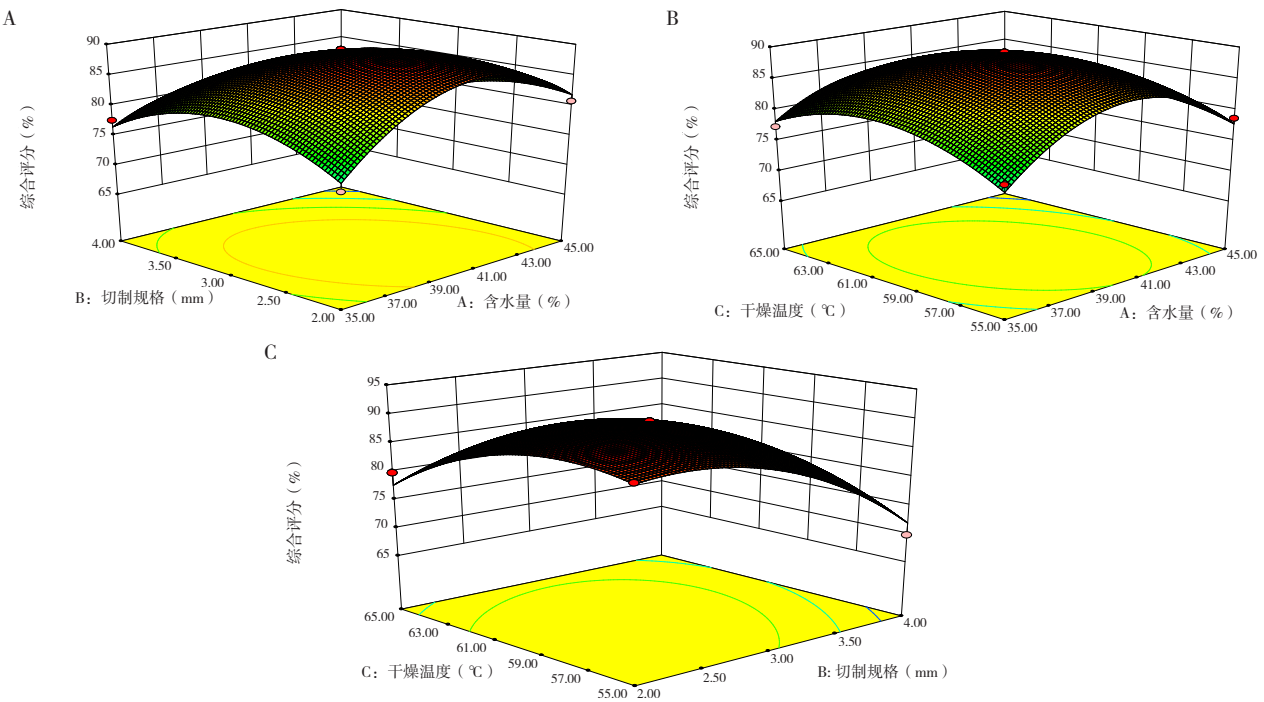


图5 交互作用响应面图

Figure 5. Interaction response surface diagram

注：A. 含水量和切制规格；B. 含水量和干燥温度；C. 干燥温度和切制规格。

2.3.3 最佳工艺预测及验证

通过 Design-Expert 8.0.6 软件优化分析, 确定板蓝根产地加工的最佳工艺参数为: 含水量 40.38%、切制规格 2.54 mm、干燥温度 58.57℃, 此时综合评分的理论预测值可达 90.117 9 分。为便于实际操作, 将工艺参数调整为: 含水量 40%、切制规格 2.5 mm、干燥温度 58℃。

3 讨论

近年来, 中药材产地加工炮制一体化工艺研究日益受到学界重视。已有川芎、黄芪、虎杖、秦皮等药材的一体化工艺研究^[9-11], 证实了该模式的可行性, 表明一体化工艺将成为中药现代化发展的重要趋势。板蓝根作为甘肃道地药材, 开展其产地加工与饮片炮制一体化研究, 对从源头保障饮片质量具有重要的实践指导价值^[12-13]。

本研究基于响应面法, 在单因素试验基础上对板蓝根产地加工炮制工艺进行了系统优化^[14]。所建立的二次多项式数学模型具有显著统计学意义, 经软件分析确定最佳工艺参数为: 含水量 40%、切制规格 2.5 mm、干燥温度 58℃。该工艺可有效解决传统加工方式存在的运输过程有效成分流失问题, 通过减少中间贮藏和加工环节, 显著降低生产成本和能源消耗, 符合中药材绿色经济生产要求^[15-16]。与传统加工方法相比, 新工艺可节约能耗约 15%, 人力成本降低 20%, 具有明显的经济和生态效益。由于板蓝根药材的采挖季节为秋季, 当前无法进行验证试验, 计划于今年秋季采挖期开展后续验证工作。根据方法学要求, 验证试验应进行 3 次平行试验, 且实测综合评分与理论预测值的相对偏差应小于 2%, 方可认为模型预测值与实际结果具有良好吻合度^[17]。届时将根据验证结果进一步评估和优化该工艺参数。

然而, 本研究仍存在一定局限: 首先, 所建模型基于实验室规模数据, 尚未进行中试放大验证; 其次, 工艺控制采用静态参数, 缺乏实时动态监测与智能调控系统; 再者, 环境效益评估主要关注加工环节缩减, 未建立全生命周期碳排放等量化指标体系。未来研究应重点开展以下工作: ①进行中试规模验证, 评估工艺稳定性; ②结合物联网技术开发智能监控系统; ③拓展至其他根茎类药材的工艺优化; ④建立标准化绿色加工评价体系。

综上所述, 本研究优化的板蓝根一体化炮制工艺具有操作简便、稳定性好的特点, 为其工业化生产提供了科学依据。后续研究将进一步完善工艺参数, 推动中药加工技术向智能化、绿色化方向发展。

参考文献

- 1 中国药典 2020 年版. 一部[S]. 2020, 22, 214-215.
- 2 余书琦, 李志强, 赵宇菁. 不同切制工艺对黄芪有效成分含量的影响[J]. 时珍国医国药, 2017, 28(8): 1886-1888. [Yu SQ, Li ZQ, Zhao YJ. Effects of different cutting processes on the content of active ingredients in Astragalus[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2017, 28(8): 1886-1888.] DOI: 10.3969/j.issn.1008-0805.2017.08.031.
- 3 钱秀玉, 聂黎行, 原文鹏, 等. 基于对照制剂的板蓝根颗粒指纹图谱和多成分含量测定研究及质量等级初评价[J]. 药物分析杂志, 2024, 44(10): 1795-1806. [Qian XY, Nie LX, Yuan WP, et al. Research on chromatographic fingerprint, determination of multiple constituents, and primary evaluation of the quality grade of Banlangen granules based on the reference drug[J]. Journal of Pharmaceutical Analysis, 2024, 44(10): 1795-1806.] DOI: 10.16155/j.0254-1793.2024-0064.
- 4 夏巧红, 刘柏龙, 刘生彩, 等. 基于指纹图谱和化学计量法的板蓝根质量评价研究[J]. 广西中医药, 2024, 47(5): 60-69. [Xia QH, Liu BL, Liu SC, et al. Quality evaluation of isatis root based on fingerprint chromatography and chemometrics[J]. Guangxi Journal of Traditional Chinese Medicine, 2024, 47(5): 60-69.] DOI: 10.3969/j.issn.1003-0719.2024.05.017.
- 5 罗寅珠, 刘勇, 黄必胜, 等. 不同干燥方法对半夏药材干燥特性、外观性状与内在成分的影响[J]. 中草药, 2021, 52(19): 5845-5853. [Luo YZ, Liu Y, Huang BS, et al. Effects of different drying methods on drying characteristics and appearance and components of Pinelliae rhizoma[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(19): 5845-5853.] DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2021.19.007.
- 6 丁立威. 10 种中药材的采收与加工[J]. 农村新技术, 2011, (14): 44-45. [Ding LW. Harvesting and processing of 10 Chinese medicinal materials[J]. New Rural Technology, 2011, (14): 44-45.] DOI: 10.3969/j.issn.1002-3542.2011.14.033.
- 7 袁崇均, 陈帅, 罗森, 等. 川产道地药材川射干系统开发研究[J]. 四川中医, 2016, 34(10): 220-222. [Yuan CJ, Chen S, Luo S, et al. Chuanshegan system development research from genuine medicinal materials in sichuan (Reviews)[J]. Journal of Sichuan Traditional Chinese Medicine, 2016, 34(10): 220-222.] DOI: CNKI:SUN:SCZY.0.2016-10-099.
- 8 吴岚, 马秀梅, 杨桂林, 等. 星点设计-响应面法优化黄芪多糖提取工艺实验研究[J]. 广州化工, 2022, 50(5): 48-51. [Wu L, Ma XM, Yang GL, et al. Centralized design-response surface methodology to optimize extraction process of astragalus polysaccharides[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50(5): 48-51.] DOI: 10.3969/j.issn.1001-9677.2022.05.014.

- 9 崔春利, 王蓓, 邓翀, 等. 响应面法优化熟大黄炮制工艺[J]. 中国中医药信息杂志, 2014, (9): 98–102. [Cui CL, Wang B, Deng C, et al. Optimization of processing technology of prepared rhubarb by response surface method[J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2014, (9): 98–102.] DOI: 10.3969/j.issn.1005-5304.2014.09.028.
- 10 吴情梅, 刘晓芬, 连艳, 等. 川芎产地加工与饮片炮制一体化工艺研究[J]. 中草药, 2019, 50(16): 3808–3814. [Wu QM, Liu XF, Lian Y, et al. Optimization of integration of field processing and crude drugs processing of Ligusticum chuanxiong[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, 50(16): 3808–3814.] DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2019.16.011.
- 11 映睿. 虎杖产地加工与炮制生产一体化关键技术研究[D]. 武汉: 湖北中医药大学, 2021. DOI: 10.27134/d.cnki.ghbzc.2021.000331.
- 12 李瑞. 黄精产地加工—炮制一体化研究[D]. 长沙: 湖南中医药大学, 2020. DOI: 10.27138/d.cnki.ghuzc.2020.000348.
- 13 辛二旦, 司昕蕾, 边甜甜, 等. 基于响应面法的大黄产地加工炮制一体化工艺研究[J]. 中国中医药信息杂志, 2020, 27(5): 53–57. [Xin ED, Si XL, Bian TT, et al. Study on integrative technology of primary processing for Rhei radix et rhizoma based on response surface methodology[J]. Chinese Journal of Information on Traditional Chinese Medicine, 2020, 27(5): 53–57.] DOI: 10.3969/j.issn.1005-5304.201907123.
- 14 王亚琦, 葛秀允. 板蓝根饮片产地加工炮制技术研究[J]. 中国药房, 2018, 29(5): 656–658. [Wang YQ and Ge XY. Study on habitat processing technology of *Isatis tinctoria* Slices[J]. China Pharmacy, 2018, 29(5): 656–658.] DOI: 10.6039/j.issn.1001-0408.2018.05.20.
- 15 陈琪瑶. 温莪术产地加工与炮制生产一体化关键技术研究[D]. 武汉: 湖北中医药大学, 2017. <https://cdmd.cnki.com.cn/Article/CDMD-10507-1017093715.htm>.
- 16 王洋, 魏永孝, 谷雨薇, 等. 基于指纹图谱和多指标成分定量结合化学计量法延胡索不同产地质量评价[J]. 中草药, 2024, 55(19): 6730–6737. [Wang Y, Wei YX, Gu YW, et al. Quality evaluation of *Corydalis rhizoma* from different areas based on fingerprint and multi-index component quantification combined with chemometric analysis[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2024, 55(19): 6730–6737.] DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2024.19.025.
- 17 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. [Wu HW, Li DH, Bian TT, et al. Study on integrative technology of primary processing for *Astragali radix* based on response surface method combined with entropy weight method[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(19): 5854–5861.] DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2021.19.008.

收稿日期: 2025 年 02 月 24 日 修回日期: 2025 年 07 月 17 日
本文编辑: 钟巧妮 李 阳