

基于 AHP-CRITIC 法结合响应曲面法多指标优选天麻鲜切片加工工艺

陈 凤¹, 张小燕², 张跃进³, 孙建华⁴, 张文珍¹, 白慧媛¹, 马亚团^{1*}

1. 西北农林科技大学化学与药学院, 陕西 杨凌 712100
2. 西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100
3. 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西 杨凌 712100
4. 陕西汉王略阳中药科技有限公司, 陕西 略阳 724300

摘要: 目的 建立天麻 *Gastrodia elata* 鲜切片质量评价方法, 为天麻饮片产地加工提供技术参考。方法 以 7 个指标 (天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 A、巴利森苷 B、巴利森苷 C、巴利森苷 E、醇溶性浸出物) 含量和外观性状得分的综合评分为指标, 采用 AHP-CRITIC 法确定各指标权重系数。在单因素试验结果的基础上, 应用响应曲面法考察干燥温度、切片厚度、干燥时间对天麻鲜切片质量的影响, 筛选天麻饮片最佳趁鲜加工工艺参数, 同时采用化学计量学的方法对不同单因素天麻趁鲜加工工艺进行比较。结果 天麻饮片最佳趁鲜加工工艺为新鲜天麻块茎, 洗净, 待水沸后置于蒸锅上, 一级天麻蒸制 25 min, 二级天麻蒸制 15 min, 三级天麻蒸制 10 min, 取出, 斜切 6 mm, 55 °C 干燥 13 h。结论 AHP-CRITIC 评分法将主客观相结合, 综合评价天麻趁鲜加工饮片质量优劣, 评分结果科学、可靠, 优化后的工艺条件稳定性好、简便可行, 可用于天麻饮片趁鲜加工。

关键词: 天麻; 趁鲜切制; 加工工艺; 质量评价; 天麻素; 对羟基苯甲醇; 巴利森苷 A; 巴利森苷 B; 巴利森苷 C; 巴利森苷 E; 醇溶性浸出物; AHP-CRITIC 法; 响应曲面法

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2024)13-4338-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2024.13.007

Study on fresh-cut processing of *Gastrodiae Rhizoma* based on AHP-CRITIC method combined with response surface method

CHEN Feng¹, ZHANG Xiaoyan², ZHANG Yuejin³, SUN Jianhua⁴, ZHANG Wenzheng¹, BAI Huiyuan¹, MA Yatuan¹

1. College of Chemistry & Pharmacy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China
2. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China
3. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China
4. Shaanxi Hanwang Lueyang Traditional Chinese Medicine Technology Co., Ltd., Lueyang 724300, China

Abstract: Objective To establish a method for evaluating the quality of fresh slices of Tianma (*Gastrodiae Rhizoma*) and provide reference for standardized processing of its initial processing technology. **Methods** The comprehensive score of seven index components (gastrodin, *p*-hydroxybenzyl alcohol, parishin A, parishin B, parishin C, parishin E, alcohol-soluble extract) and appearance score were used as indicators, furthermore, the AHP-CRITIC mixed weighting method was used to determine the weight coefficient of each evaluation index. On the basis of the single factor test results, the response surface method was applied to investigate the effects of dry temperature, slice thickness and dry time on the best processing parameters of fresh-cut pieces for *Gastrodiae Rhizoma*. At the same time, chemometrics was used to compare the fresh cutting process of different single factor test results. **Results** The optimum fresh-cut processing technology of *Gastrodiae Rhizoma* is as follows: fresh *Gastrodiae Rhizoma* was washed and placed on a steamer after boiling, and the first, second, and third grade *Gastrodiae Rhizoma* were steamed for 25, 15, 10 min respectively,

收稿日期: 2023-12-06

基金项目: 国家重点研发计划课题——中医药现代化研究专项 (2019YFC1712604); 陕西省中医药管理局项目-中医药全省性专款专项项目:

《秦药指标体系的建立 (鲜切、炮制标准部分)》(2021-QYZL-01); 2021 年陕西省农业科技创新驱动 [NYKJ-2022-YL (XN) -13]

作者简介: 陈 凤 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药材栽培与质量控制。E-mail: 15215092580@163.com

*通信作者: 马亚团, 博士生导师, 副教授, 研究方向为中药材栽培与质量控制。E-mail: yatuanma@nwsuaf.edu.cn

furthermore, *Gastrodiae Rhizoma* for each grade were cut into 6 mm diagonally, and dried at 55 °C for 13 h subsequently. **Conclusion** The AHP-CRITIC method combines subjective and objective factors to evaluate the quality of fresh cut slices of *Gastrodiae Rhizoma* comprehensively. Therefore the scoring results are scientific, reliable, and the optimized process conditions are stable, simple, and feasible, which can be used for fresh-cut processing of *Gastrodiae Rhizoma*.

Key words: *Gastrodia elata* Bl.; fresh-cut; processing technology; quality evaluation; gastrodin; *p*-hydroxybenzyl alcohol; parishin A; parishin B; parishin C; parishin E; alcohol-soluble extract; AHP-CRITIC method; response surface method

天麻 *Gastrodiae Rhizoma* 为兰科天麻属植物天麻 *Gastrodia elata* Bl.的干燥块茎,具有息风止痉、平抑肝阳、祛风通络的作用^[1]。现代研究表明天麻对缺血性脑损伤、血管性痴呆、缺血性心肌损伤、高血压、动脉粥样硬化、缺血性脑卒中,脑血管性眩晕等心脑血管疾病^[2-4],帕金森、衰老、偏头痛等神经系统疾病具有一定疗效^[5-6]。天麻饮片传统加工过程分为产地初加工和企业加工 2 个阶段,前者的目标产物是天麻药材,后者是企业将原药材进行软化工艺后切片干燥,目标产物是天麻饮片^[7]。中药产地加工与炮制生产一体化,即趁鲜切制,是将产地加工环节和中药炮制有机结合,以减少生产重复环节,避免了二次加工过程中出现的污染和水润浸泡使药材有效成分的流失,同时降低了加工成本,提高中药相关生产环节的工作效率^[8-10]。近年来,趁鲜切制在部分药材中得到应用但存在加工方法混乱,技术参数差异大,饮片生产工艺不稳定、缺乏完善评价标准等问题。针对上述问题,本研究以天麻药材为研究对象,以外观性状、天麻素、对羟基苯甲醇 (*p*-hydroxybenzyl alcohol, HBA)、巴利森苷 A (parishin A, PA)、巴利森苷 B (parishin B, PB)、巴利森苷 C (parishin C, PC)、巴利森苷 E (parishin E, PE),醇溶性浸出物为综合指标,其中外观性状包括外表皮颜色、切片颜色、切片平整度、成型率,在杀青方法、杀青时间、干燥温度、切片方法等单因素结果基础上,基于主观赋值 AHP 法 (analytic hierarchy process)和客观赋值 CRITIC 法,采用 AHP-CRITIC 复合权重法进行权重分配,结合响应曲面优化天麻趁鲜加工参数,确定工艺路线并进行验证,并采用化学计量学的方法对不同单因素天麻趁鲜加工工艺进行比较,为天麻趁鲜切制加工提供科学依据,为评价和建立天麻趁鲜切制饮片的质量标准提供参考。

1 仪器与材料

1.1 仪器

LC-2060C 3D 型高效液相色谱仪日本岛津公司; Agilent HC-C18 (2) 色谱柱 (250 mm×4.6 mm,

5 μm), 美国 Agilent 公司; BCE2241-1CCN 型电子天平, 赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司; KQ-550DE 型数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; DHG9240 (A) 型鼓风干燥器, 上海一恒科技有限公司; EF-04 (摇摆式) 型小型高速粉碎机, 河北本辰科技有限公司。

1.2 材料

对照品天麻素 (批号 AF20100454)、HBA (批号 AF21030253)、PE (批号 AZBL1110)、PB (批号 AFCC0653)、PC (批号 AF22012801)、PA (批号 AZCC0301), 质量分数≥98%, 均购自成都埃法生物科技有限公司。乙腈 (批号 20220406)、甲醇 (批号 20220613) 均为色谱纯, 广东光华科技股份有限公司; 磷酸, 批号 2020092901, 成都市科隆化学品有限公司; 水为纯净水, 杭州娃哈哈集团有限公司; 其余试剂均为分析纯。

天麻采挖清洗干净, 按大小分级, 一级天麻 (≥200 g)、二级天麻 (150~200 g)、三级天麻 (100~150 g)。所用天麻均由陕西汉王略阳中药科技有限公司天麻种植基地提供, 经西北农林科技大学生命科学学院张跃进教授鉴定为兰科天麻属植物天麻 *G. elata* Bl.的新鲜块茎。不同等级天麻加工工艺的主要区别是杀青时间, 因此, 本研究对一级、三级天麻杀青时间进行了考察, 其余试验因素所用材料均为二级天麻。

2 方法与结果

2.1 6种酚类成分含量测定

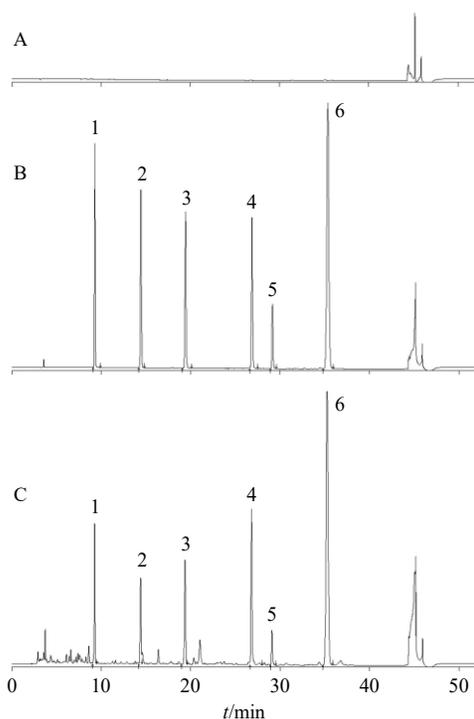
2.1.1 色谱条件^[1] Agilent HC-C18 (2) 色谱柱; 0.1%磷酸水溶液-乙腈为流动相, 梯度洗脱: 0~10 min, 3%~10%乙腈; 10~15 min, 10%~12%乙腈; 15~25 min, 12%~18%乙腈; 25~40 min, 18%乙腈; 40~42 min, 18%~95%乙腈; 42~52 min, 3%~10%乙腈; 体积流量 1.0 mL/min; 柱温 30 °C; 检测波长 220 nm; 进样体积 20 μL。理论塔板数按天麻素峰计算, 不低于 5 000。

2.1.2 对照品溶液的制备 精密称定各对照品适量, 加 3%乙腈制成含天麻素 0.116 mg/mL、HBA

0.052 mg/mL、PE 0.124 mg/mL、PB 0.100 mg/mL、PC 0.044 mg/mL、PA 0.304 mg/mL的混合对照品储备溶液。

2.1.3 供试品溶液的制备^[1] 各工艺样品粉碎后过三号筛，精密称定 2 g 于具塞锥形瓶中，加入稀乙醇 50 mL（取乙醇 529 mL，加水稀释至 1 000 mL），称定质量，超声（功率 400 W、频率 40 kHz）30 min，放冷，再次称定质量，用稀乙醇补足减失的质量，滤过，精密量取续滤液 10 mL，浓缩至无乙醇味，残渣加 3%乙腈溶液，转移至 25 mL 量瓶中，用 3%乙腈稀释至刻度，摇匀，滤过，取续滤液，即得供试品溶液。

2.1.4 专属性考察 按照“2.1.2”“2.1.3”项下方法分别制备对照品溶液和供试品溶液，并制备 3%乙腈溶液作为阴性对照溶液，按照“2.1.1”项下色谱条件分别进样，HPLC 色谱图见图 1。结果显示，供试品溶液各化学成分与对照品溶液各化学成分出峰时间一致，阴性对照溶液在 42 min 前无吸收峰，表明此方法专属性良好。



1-天麻素；2-对羟基苯甲醇；3-巴利森苷 E；4-巴利森苷 B；5-巴利森苷 C；6-巴利森苷 A。
1-gastrodin；2-*p*-hydroxybenzyl alcohol；3-parishin E；4-parishin B；5-parishin C；6-parishin A。

图 1 阴性对照 (A)、混合对照品溶液 (B) 和供试品溶液 (C) 的 HPLC 图

Fig. 1 HPLC chromatogram of negative control (A), mixed reference substances solution (B) and sample solution (C)

2.1.5 线性关系考察 取“2.1.2”项下混合对照品储备液，依次稀释 2、5、10、20 倍，制成一系列对照品溶液，按“2.1.1”项下色谱条件，测定各对照品峰面积。以质量浓度为横坐标 (X)，对应峰面积为纵坐标 (Y) 进行线性回归，得各对照品的线性回归方程分别为天麻素 $Y=30\ 175 X+33\ 170$ ， $R^2=0.9999$ ，线性范围 5.8~116.0 $\mu\text{g/mL}$ ；HBA $Y=70\ 931 X+20\ 901$ ， $R^2=0.9999$ ，线性范围 2.6~52.0 $\mu\text{g/mL}$ ；PE $Y=29\ 283 X+19\ 493$ ， $R^2=1.0000$ ，线性范围 6.2~124.0 $\mu\text{g/mL}$ ；PB $Y=34\ 433 X+38\ 177$ ， $R^2=1.0000$ ，线性范围 5.0~100.0 $\mu\text{g/mL}$ ；PC $Y=30\ 783 X+8\ 176.6$ ， $R^2=1.0000$ ，线性范围 2.2~44.0 $\mu\text{g/mL}$ ；PA $Y=36\ 484 X+117\ 998$ ， $R^2=0.9999$ ，线性范围 15.2~304.0 $\mu\text{g/mL}$ 。

2.1.6 精密度试验 取“2.1.2”项下稀释 5 倍对照品溶液，按照“2.1.1”项下色谱条件连续进样 6 次，记录峰面积，得天麻素、HBA、PE、PB、PC、PA 峰面积的 RSD 分别为 0.16%、0.60%、1.79%、0.97%、1.26%、0.52%，表明仪器精密度良好。

2.1.7 稳定性试验 精密量取“2.1.3”项下供试品溶液，分别于制备后 0、2、4、8、12、24 h，按“2.1.1”项下色谱条件进样，记录峰面积，得天麻素、HBA、PE、PB、PC、PA 峰面积的 RSD 分别为 0.14%、1.50%、0.18%、0.21%、0.15%、0.94%，表明供试品溶液在制备后 24 h 内稳定性良好。

2.1.8 重复性试验 精密称取天麻饮片粉末约 2 g，共 6 份，按“2.1.3”项下方法制备供试品溶液，“2.1.1”项下色谱条件测定含量，得天麻素、HBA、PE、PB、PC、PA 质量分数的 RSD 分别为 1.23%、1.82%、1.43%、1.17%、1.72%、1.96%，表明该方法重复性良好。

2.1.9 加样回收率试验 精密称取 6 份已测定指标成分含量的天麻饮片粉末 1 g，加入适量天麻素、HBA、PE、PB、PC、PA 对照品，按“2.1.3”项下方法制备供试品溶液，“2.1.1”项下色谱条件测定含量，记录峰面积。经计算天麻素、HBA、PE、PB、PC、PA 的平均加样回收率分别为 103.67%、98.02%、99.96%、96.85%、98.52%、93.89%，RSD 分别为 1.07%、1.78%、2.12%、1.80%、1.69%、1.45%，表明该方法回收率良好。

2.2 醇溶性浸出物测定

用稀乙醇作为溶剂，参照《中国药典》2020 年版醇溶性浸出物测定法（通则 2201）项下的热浸法

测定^[1]。

2.3 天麻饮片外观评价

参照《中国药典》2020年版一部天麻饮片的性状^[1]，从切片外表皮颜色、切面颜色、切片平整度、成型率对不同工艺加工饮片进行评分，评分标准见表1。

表1 天麻饮片外观评分标准

Table 1 Appearance scoring criteria of *G. elata* decoction pieces

项目	内容	分值
外表皮颜色	淡黄色至黄棕色 (含黄棕色)	1.0
	黄棕色至棕黑色 (不含黄棕色)	0.8
	黑色	0.6
切面颜色	黄白色至淡棕色 (含淡棕色)	1.0
	淡棕色至棕色 (不含淡棕色)	0.8
	深棕色	0.6
	白色至黄白色 (不含黄白色)	0.4
切片平整度	平整、翘片少 (<15%)	1.0
	翘片较少 [15%, 30%)	0.8
	翘片中等 [30%, 50%)	0.6
	翘片较多 [50%, 70%)	0.4
	翘片多 (≥70%)	0.2
成型率	>80%	1.0
	(50%, 80%]	0.6
	(20%, 50%]	0.3

2.4 天麻鲜切片工艺指标权重确定

2.4.1 AHP 权重确定 《中国药典》2020年版天麻项下含量测定仅包括天麻素和HBA，但特征图谱包括天麻素、HBA、PA、PB、PC、PE共6种成分，所以在天麻质量评价方面纳入巴利森苷类作为指标更能全面反映天麻质量。外观是天麻饮片市售时的主要考虑因素，醇溶性浸出物是天麻饮片质控的另一指标。因此，本实验将8个考察指标按照重要程度分为9个层次，构建两两比较的判断矩阵，结果见表2。由表2判断矩阵计算得出天麻素、HBA、外观评分、醇溶性浸出物、PC、PA、PB、PE的权重系数分别为0.3773、0.2061、0.1450、0.1007、0.0690、0.0470、0.0321、0.0228，一致性比例因子 (consistency ratio, CR) = 0.035 < 0.1，表明各指标成分所得权重一致可靠。

2.4.2 CRITIC 法权重确定 将各指标成分结果进行标准化处理，指标成分标准化值 = [(实测值 - 最小值) / (最大值 - 最小值)] × 100，消除单位量纲后

计算权重^[11]。SPSS 软件计算各指标的标准差 (σ_j)、冲突性 (R_j) = $\sum(1-r_{ij})$ (r_{ij} 表示评价指标*i*和*j*之间的相关系数)、综合权重系数 (C_j) = $\sigma_j \times R_j$ 和客观权重系数 (W_j) = $C_j / \sum C_j$ ，得出天麻素、HBA、外观评分、醇溶性浸出物、PC、PA、PB、PE的 W_j 分别为0.0947、0.1518、0.1652、0.1882、0.1027、0.0845、0.0997、0.1132，具体结果见表3。

表2 AHP 法判断矩阵

Table 2 AHP method judgment matrix

考察指标	判断矩阵								
	天麻素	HBA	外观评分	醇溶性浸出物	PC	PA	PB	PE	
天麻素	1	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	
HBA	3	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	
外观评分	4	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	
醇溶性浸出物	5	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	
PC	6	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	
PA	7	5	4	3	2	1	1/2	1/3	
PB	8	6	5	4	3	2	1	1/2	
PE	9	7	6	5	4	3	2	1	

表3 CRITIC 法相关数据

Table 3 CRITIC method related data

考察指标	σ_j	R_j	C_j	W_j
天麻素	23.056 4	4.167 5	96.088 4	0.094 7
HBA	19.362 8	7.956 5	154.060 5	0.151 8
外观评分	23.935 3	7.002 5	167.606 9	0.165 2
醇溶性浸出物	28.885 3	6.612 6	191.007 7	0.188 2
PC	23.174 1	4.497 7	104.230 1	0.102 7
PA	20.751 6	4.130 8	85.720 6	0.084 5
PB	25.877 9	3.908 1	101.133 5	0.099 7
PE	23.138 7	4.963 1	114.840 9	0.113 2

2.4.3 AHP-CRITIC 法复合权重 分别用AHP法、CRITIC法、AHP-CRITIC复合权重法对不同工艺加工饮片的指标进行综合评分(S)比较，其中AHP-CRITIC复合权重 ($W_{复合i}$) = $W_{AHPi} W_{CRITICi} / \sum W_{AHPi} W_{CRITICi}$ 。计算得出天麻素、HBA、外观评分、醇溶性浸出物、PC、PA、PB、PE的复合权重系数分别为0.2819、0.2468、0.1890、0.1495、0.0559、0.0313、0.0252、0.0204。

$$S = 100 \times \Sigma(Y_i - Y_{\min}) / (Y_{\max} - Y_{\min}) \times W_{复合i}$$

Y_{\min} 为指标中最小值， Y_{\max} 为指标中最大值

2.5 熟透度测定^[12-13]

熟透度用于判断天麻是否彻底杀青，指天麻杀

青处理后已熟透区域占天麻所有区域的百分比。天麻杀青一段时间后，取出，立即于中部横切，用游标卡尺测量天麻长边直径 A ，短边直径 B 和中心未熟区域长边直径 a 、短边直径 b ，计算熟透度 (α)。

$$\alpha = 1 - ab/AB$$

2.6 单因素考察

2.6.1 杀青方法及时间 未杀青：新鲜二级天麻块茎，洗净，横切 6 mm，60 °C 干燥至含水量 12% 以下。蒸制杀青：新鲜二级天麻块茎，洗净，待水沸后置于蒸锅上，开始计时，分别蒸制 0、5、10、15、20、25 min，取下，测定熟透率，横切 6 mm，60 °C 干燥至含水量 12% 以下。煮制杀青：新鲜二级天麻块茎，洗净，待水沸后置于煮锅中，开始计时，分别煮制 0、10、15、20、25、30 min 取出，测定熟

透率，横切 6 mm，60 °C 干燥至含水量 12% 以下。将不同杀青方法干燥后的饮片各自进行外观评分，测定醇溶性浸出物和 6 种化学成分，计算 S ，结果见表 4。

蒸制杀青时，蒸制 10 min 天麻 S 最高，随着蒸制时间延长， S 下降，熟透度在 15 min 时达到 100%。煮制杀青时，煮制 30 min 天麻 S 最高，熟透度在 20 min 达到 100%。蒸制、煮制杀青 10、15、20 min 时，蒸制 S 均比煮制杀青高，杀青 25 min 时，蒸制杀青评分比煮制低，可能是因为蒸制时间太长，导致有效成分流失。因此，二级天麻蒸制杀青 15 min，外观评分、浸出物含量、有效成分、熟透度均较满意，故在后续试验中二级天麻杀青方法和时间固定为蒸制 15 min。

表 4 蒸制和煮制杀青试验结果 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 4 Results of steaming and boiling fixation ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

杀青方法	时间/min	熟透度/%	外观评分	醇溶性浸出物/%	质量分数/(mg·g ⁻¹)					S	
					天麻素	HBA	PE	PB	PC		PA
蒸制	0	0.00c	2.83±0.17e	20.65±0.08a	0.680±0.112b	3.530±0.189a	2.916±0.154b	1.418±0.117b	0.280±0.052c	1.247±0.082c	29.03
	5	62.80±3.76b	2.90±0.20e	21.07±0.03a	1.758±0.102ab	1.397±0.048b	5.621±0.137a	4.066±0.083a	0.821±0.039abc	12.552±0.089a	42.94
	10	92.86±1.91a	3.40±0.15d	25.72±0.03a	1.994±0.274a	0.510±0.046b	3.558±0.104b	2.315±0.155ab	1.258±0.116a	6.255±0.105b	58.61
	15	100.00a	3.62±0.18abc	24.57±0.04a	1.633±0.024ab	0.667±0.070b	3.731±0.005b	2.843±0.035ab	0.634±0.026abc	7.343±0.108ab	53.22
	20	100.00a	3.52±0.10bcd	23.34±0.02a	1.775±0.326ab	0.455±0.094b	2.374±0.116b	2.315±0.173ab	0.546±0.099bc	4.697±0.127bc	46.62
煮制	0	0.00c	2.83±0.17e	20.65±0.08a	0.680±0.112b	3.530±0.189a	2.916±0.154b	1.418±0.117b	0.280±0.052c	1.247±0.082c	29.03
	10	49.52±1.91b	3.52±0.23bcd	21.75±0.03a	1.668±0.165ab	0.794±0.027b	3.279±0.025b	3.221±0.071ab	0.665±0.038abc	7.418±0.113ab	46.84
	15	60.15±29.09b	3.40±0.21d	23.87±0.02a	1.496±0.115ab	0.429±0.071b	1.992±0.033b	2.236±0.099ab	0.480±0.053bc	6.196±0.209b	40.06
	20	100.00a	3.63±0.14ab	18.90±0.09a	1.673±0.011ab	0.642±0.030b	3.123±0.051b	2.856±0.050ab	0.722±0.012abc	8.045±0.110ab	41.88
	25	100.00a	3.72±0.13a	20.76±0.05a	1.720±0.057b	0.790±0.013b	2.675±0.039b	3.526±0.021a	0.921±0.031abc	9.743±0.127ab	51.81
30	100.00a	3.47±0.31cd	20.75±0.02a	2.349±0.128a	0.888±0.143b	2.555±0.006b	3.737±0.048a	1.106±0.039ab	8.305±0.082ab	58.67	

同列字母不同代表具有显著差异 ($P < 0.05$)；表 5~7 同。

Different letters in the same column mean significant differences ($P < 0.05$); same as tables 5—7.

2.6.2 不同等级天麻杀青时间 新鲜天麻，洗净，待水沸后置于蒸锅上，开始计时，一级天麻分别蒸制 0、5、10、15、20、25、30 min；三级天麻分别蒸制 0、5、10、15、20、25 min，取下，测定熟透率，横切 6 mm，60 °C 烘干进行外观评分，测定醇溶性浸出物和 6 种化学成分，计算 S ，结果见表 5。一级天麻蒸制 25 min， S 最高，熟透度达 100%，三级天麻蒸制 10 min， S 最高，熟透度达 100%。

2.6.3 切片方式与厚度 新鲜二级天麻块茎，洗净、蒸制 15 min，分别横切、纵切、斜切 4、6、8 mm，60 °C 烘干，进行外观评分，测定醇溶性浸出物和 6 种化学成分，计算 S ，结果见表 6。切片厚度相同

时， S 均为斜切 > 横切 > 纵切；切片方式相同时，均为 6 mm > 4 mm > 8 mm，故选择斜切 4、6、8 mm 进行响应面试验。

2.6.4 干燥温度及时间 新鲜二级天麻块茎，洗净、蒸制 15 min，斜切 6 mm，恒温干燥：50、60、70、80 °C 干燥至含水量 12% 以下；变温干燥：50~60 °C、60~50 °C、60~70 °C、70~60 °C 于前一温度干燥 5 h 后调至后一温度干燥至含水量 12% 以下，进行外观评分，测定醇溶性浸出物和 6 种化学成分，计算 S ，结果见表 7。恒温干燥时，60 °C 评分最高，80 °C 评分最低，故选择 50、60、70 °C 进行响应面试验；变温干燥时，均为温度较高干燥后

表5 一级和三级天麻不同杀青时间试验结果 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 5 Results of fixation times of the first grade and the third grade of *G. elata* ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

等级	时间/ min	熟透度/%	外观评分	醇溶性 浸出物/%	质量分数/(mg·g ⁻¹)						S
					天麻素	HBA	PE	PB	PC	PA	
一级	0	0.00e	3.32±0.17c	25.12±0.04a	1.204±0.016d	1.420±0.018a	1.649±0.032a	2.813±0.063c	0.538±0.010c	8.247±0.233a	30.91
	5	59.39±1.27d	3.22±0.15c	24.11±0.07a	2.274±0.038bc	1.124±0.050ab	1.632±0.005a	3.158±0.079c	0.675±0.021c	9.243±0.271a	24.72
	10	69.41±3.71cd	3.53±0.10a	27.92±0.02a	2.154±0.084c	0.667±0.042b	1.724±0.020a	3.546±0.104c	0.725±0.027bc	9.772±0.352a	66.88
	15	78.92±1.82bc	3.43±0.06ab	26.59±0.01a	3.485±0.076a	0.550±0.011b	2.266±0.093a	4.591±0.071ab	1.103±0.019a	13.042±0.273a	44.63
	20	86.36±1.80b	3.28±0.15bc	25.11±0.04a	3.126±0.043ab	1.027±0.051ab	2.401±0.062a	4.873±0.023a	1.154±0.005a	11.315±0.112a	51.78
	25	100.00a	3.45±0.05ab	25.59±0.05a	2.745±0.034abc	0.403±0.014b	2.159±0.062a	3.912±0.052abc	1.024±0.017ab	9.167±0.231a	70.76
	30	100.00a	3.42±0.16ab	26.41±0.01a	1.204±0.016d	1.420±0.018a	1.649±0.032a	2.813±0.063c	0.538±0.010c	8.247±0.233a	47.75
三级	0	0.00c	3.22±0.13b	24.17±0.03b	1.131±0.028a	0.953±0.035a	2.343±0.086a	2.989±0.047a	0.516±0.008a	9.713±0.224a	29.71
	5	82.17±0.09b	3.45±0.10b	28.66±0.04ab	1.641±0.049a	0.422±0.025b	2.353±0.060a	2.801±0.115a	0.520±0.019a	8.583±0.352a	50.68
	10	100.00a	3.53±0.08b	32.14±0.06a	1.496±0.069a	0.383±0.016b	1.175±0.039b	2.661±0.085a	0.569±0.020a	8.270±0.273a	62.44
	15	100.00a	3.73±0.18a	25.82±0.01ab	1.505±0.031a	0.530±0.006b	1.396±0.026a	2.941±0.060a	0.655±0.014a	6.544±0.124a	46.39
	20	100.00a	3.38±0.19b	23.36±0.02b	1.542±0.072a	0.390±0.017b	1.659±0.072a	3.143±0.116a	0.725±0.031a	6.586±0.317a	40.32
	25	100.00a	3.13±0.14c	28.25±0.02ab	1.131±0.028a	0.953±0.035a	2.343±0.086a	2.989±0.047a	0.516±0.008a	9.713±0.224a	40.34

表6 不同切片方式和厚度试验结果 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 6 Results of different slicing and thicknesses processing ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

厚度/ mm	方式	外观评分	醇溶性 浸出物/%	质量分数/(mg·g ⁻¹)						S
				天麻素	HBA	PE	PB	PC	PA	
4	横切	3.53±0.09bc	24.35±0.01a	1.272±0.029ab	0.717±0.019ab	2.469±0.048bcd	2.254±0.020bc	0.484±0.008a	5.463±0.052c	50.98
	纵切	3.80±0.13a	24.77±0.09a	1.240±0.043bc	0.363±0.020b	2.242±0.059bcd	1.882±0.042c	0.450±0.013a	5.775±0.189bc	42.08
	斜切	3.70±0.05ab	23.78±0.03a	1.923±0.017ab	0.543±0.018ab	4.303±0.075a	3.226±0.034ab	0.511±0.040a	10.141±0.125ab	70.45
6	横切	3.62±0.08abc	24.57±0.04a	1.633±0.010abc	0.667±0.028ab	3.731±0.007abc	2.843±0.035abc	0.634±0.010a	7.343±0.162abc	67.22
	纵切	3.65±0.09ab	23.00±0.02a	1.151±0.014c	0.757±0.025ab	2.871±0.113abcd	2.393±0.049bc	0.597±0.022a	6.505±0.105bc	54.51
	斜切	3.67±0.10ab	24.32±0.02a	2.012±0.048a	0.792±0.022a	3.793±0.054ab	3.725±0.056a	0.887±0.016a	10.564±0.000a	92.52
8	横切	3.53±0.19bc	19.09±0.01a	0.946±0.012c	0.756±0.015ab	1.992±0.004cd	2.384±0.037bc	0.533±0.008a	7.009±0.091abc	32.05
	纵切	3.38±0.14c	23.36±0.01a	1.178±0.017c	0.542±0.018ab	1.954±0.073d	2.177±0.049bc	0.547±0.012a	6.035±0.133abc	29.64
	斜切	3.48±0.34bc	20.63±0.06a	1.481±0.095abc	0.416±0.020ab	3.504±0.212abcd	2.744±0.131abc	0.612±0.035a	8.384±0.526abc	32.16

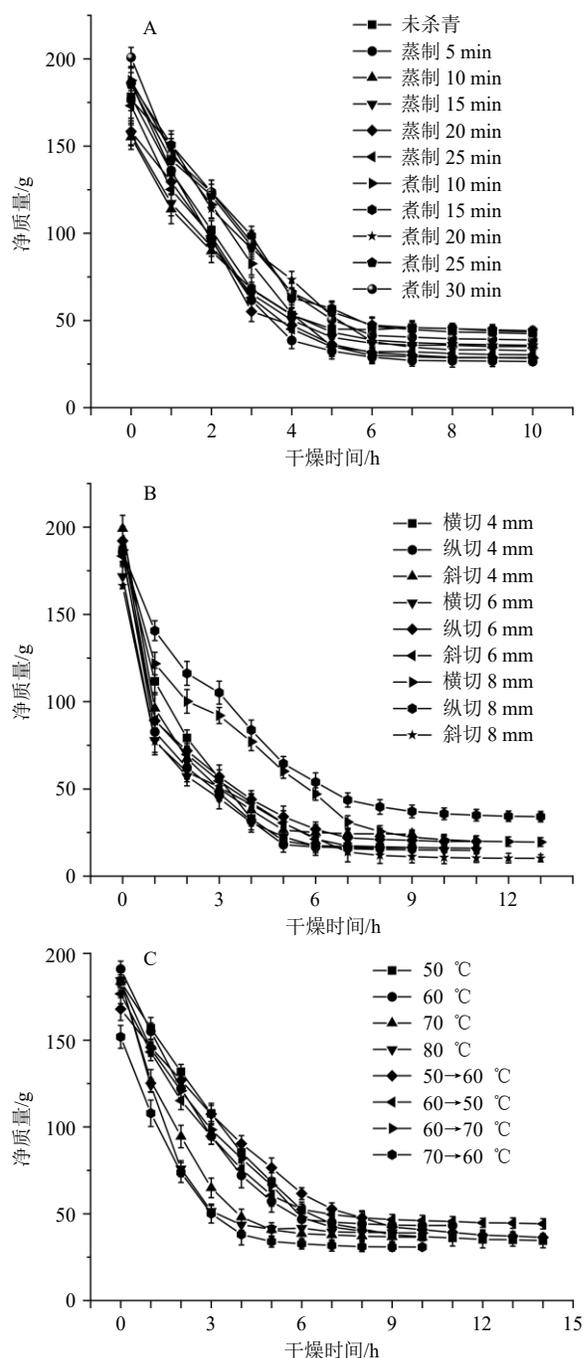
表7 恒温干燥和变温干燥试验结果 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 7 Results of constant temperature drying and variable temperature drying ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

干燥 方式	温度/ ℃	外观评分	醇溶性 浸出物/%	质量分数/(mg·g ⁻¹)						S
				天麻素	HBA	PE	PB	PC	PA	
恒温	50	3.53±0.12a	23.00±0.02a	1.148±0.118c	0.723±0.282bc	2.971±0.040bc	2.293±0.325c	0.590±0.099ab	6.535±0.284d	37.49
	60	3.67±0.12a	23.72±0.02a	2.504±0.677a	0.851±0.357bc	4.738±0.777a	4.446±0.053a	1.003±0.068a	10.911±0.638a	79.76
	70	3.67±0.12a	25.33±0.02a	1.463±0.069bc	0.882±0.137b	2.853±0.631bc	2.962±0.583bc	0.633±0.166ab	7.422±0.310cd	50.90
	80	3.00±0.20b	25.83±0.04a	1.795±0.388b	0.346±0.142c	3.338±0.273b	2.622±0.473bc	0.706±0.515ab	8.345±0.261c	32.34
变温	50→60	3.60±0.20a	22.54±0.01a	1.155±0.264c	0.735±0.025bc	2.810±0.601bc	2.952±0.569bc	0.616±0.178ab	7.865±0.591c	37.00
	60→50	3.60±0.20a	23.78±0.01a	2.523±0.198a	1.586±0.510a	2.974±0.400bc	3.470±0.753b	0.799±0.245ab	9.894±0.634b	81.97
	60→70	3.47±0.12a	21.59±0.03a	1.515±0.152bc	0.479±0.192bc	2.182±0.444c	2.175±0.574c	0.458±0.140b	5.474±0.486e	23.29
	70→60	3.67±0.12a	25.54±0.03a	1.958±0.054b	1.547±0.091a	3.079±0.610bc	4.351±0.271a	1.005±0.101a	11.281±0.859a	86.16

调至低温, S 较高。不同处理干燥失水曲线见图 2, 结合水分测定结果, 不同单因素处理天麻饮片在干

燥 9、11、13 h 含水量小于 12%, 故选择该 3 个水平进行响应面试验。



A-不同杀青加工干燥失水曲线; B-不同切片方式和厚度加工干燥失水曲线; C-不同干燥温度加工干燥失水曲线。

A-drying dehydration curves for different fixation processes; B-drying dehydration curves for different slicing methods and thicknesses during processing; C-drying dehydration curves for processing at different drying temperatures.

图2 不同单因素加工天麻鲜切片干燥失水曲线 ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

Fig. 2 Drying dehydration curves of different single factor processing of *G. elata* fresh slices ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

2.7 响应曲面优化趁鲜切制工艺

2.7.1 试验设计与结果^[14-15] 基于单因素试验结果,

取二级天麻, 对干燥温度 (X_1)、切片厚度 (X_2) 和干燥时间 (X_3) 进行 3 因素 3 水平响应曲面分析, 以 S 为响应值, 试验设计及结果见表 8。将各组 S 数据采用 Design-Expert 11 软件进行多元回归, 得到多元 2 次回归方程 $S = 53.63 + 2.91 X_1 - 8.34 X_2 + 8.44 X_3 - 2.27 X_1 X_2 - 10.29 X_1 X_3 + 8.37 X_2 X_3 + 5.40 X_1^2 - 14.60 X_2^2 - 3.76 X_3^2$ 。对回归模型进行方差分析, 结果见表 9, 由表 9 可知模型 $F = 23.010$, P 值为 $0.0002 < 0.01$, 极显著, 而失拟项 P 值为 $0.5659 > 0.05$, 不显著, 表明该模型具有统计学意义, 拟合度良好, 且 $R^2_{adj} = 0.9253$, 表明响应曲面优化天麻趁鲜切制工艺 S 的 92.53% 来源干燥温度、切片厚度和干燥时间。

从表 9 可以看出, 各因素对趁鲜切制工艺 8 项指标的影响顺序为 $X_3 > X_2 > X_1$, 其中 X_2 、 X_3 项、二次项 X_2^2 和交互项 $X_1 X_3$ 、 $X_2 X_3$ 对趁鲜切制工艺影响极显著 ($P < 0.01$), 二次项 X_1^2 对趁鲜切制工艺影响显著, 其余项影响不显著。同时, 根据回归方程所绘制出的各因素交互作用影响曲面图, 直观体现出 $X_1 X_2$ 、 $X_1 X_3$ 、 $X_2 X_3$ 交互作用对趁鲜切制的工艺影响, 见图 3, 其中干燥温度与干燥时间、切片厚度与干燥时间的交互作用等高线曲率大, 响应曲面坡度较陡, 说明切片厚度与干燥时间的交互作用较强, 对天麻趁鲜切制 8 个指标的 S 影响显著。干燥温度与切片厚度等高线曲率小, 响应曲面坡度较平缓, 说明切片厚度与干燥时间的交互作用较弱, 对天麻趁鲜切制 8 个指标的 S 影响较小。

2.7.2 最佳加工工艺的优化与验证 应用响应曲面分析结果, 预测得到天麻趁鲜切制加工的最佳工艺为切片厚度 6.069 mm, 干燥温度 53.768 °C, 干燥时间 12.958 h, S 60.68。为了便于实际操作将最佳工艺调整为切片厚度 6 mm, 干燥温度 55 °C, 干燥时间 13 h, 并进行 3 次验证试验, S 分别为 59.65、61.32、58.30, 与预测值 60.68 的相对误差为 1.521%, 结果见表 10, 说明该模型预测能力强, 趁鲜切制工艺具有可操作性, 重现性好。

2.7.3 与传统工艺比较 根据《中国药典》2020 年版中对天麻进行传统加工, 按照“2.1”项测定 6 种酚类成分, “2.2”项测定醇溶性浸出物, “2.3”项进行饮片外观评分, 比较天麻传统工艺与趁鲜切制的 S , 结果见表 10, 结果表明, 趁鲜切制 S 高于传统工艺加工, 可见与传统工艺相比, 趁鲜切制可以减少天麻素在二次浸润过程中的流失。

表 8 天麻趁鲜切制响应曲面设计结果

Table 8 Response surface experimental design and results of fresh-cut processing of *G. elata*

试验号	$X_1/$ °C	$X_2/$ mm	$X_3/$ h	外观 评分	醇溶性 浸出物/%	质量分数/(mg·g ⁻¹)						<i>S</i>
						天麻素	HBA	PE	PB	PC	PA	
1	50	4	11	3.00	26.47	0.377 1	0.083 9	0.385 3	0.503 3	0.149 1	1.396 7	39.21
2	70	4	11	3.47	26.49	0.367 7	0.058 4	0.398 5	0.434 1	0.130 8	1.141 9	48.83
3	50	8	11	3.13	23.07	0.245 8	0.066 2	0.348 1	0.333 3	0.097 6	0.847 0	22.98
4	70	8	11	3.60	21.68	0.164 6	0.042 6	0.187 9	0.222 6	0.072 3	0.593 1	23.52
5	50	6	9	3.33	18.00	0.263 6	0.050 1	0.305 8	0.282 9	0.078 8	0.652 6	21.79
6	70	6	9	3.20	22.58	0.481 4	0.052 9	0.488 1	0.558 7	0.185 4	1.630 4	48.94
7	50	6	13	3.58	29.39	0.414 7	0.091 4	0.299 4	0.390 7	0.125 8	0.993 1	60.58
8	70	6	13	3.38	23.88	0.392 2	0.095 6	0.327 3	0.386 7	0.127 7	1.014 2	46.58
9	60	4	9	3.52	26.88	0.298 8	0.060 7	0.232 1	0.319 0	0.095 6	0.766 3	42.17
10	60	8	9	3.35	17.34	0.183 8	0.045 1	0.253 1	0.203 3	0.057 3	0.482 3	12.84
11	60	4	13	3.30	25.68	0.327 9	0.091 9	0.339 6	0.399 6	0.117 2	1.133 7	40.96
12	60	8	13	3.45	27.82	0.315 3	0.069 8	0.353 7	0.405 5	0.128 7	0.940 2	45.12
13	60	6	11	3.58	21.84	0.471 7	0.126 1	0.390 5	0.530 1	0.151 6	1.256 2	60.45
14	60	6	11	3.68	22.58	0.366 2	0.071 3	0.338 3	0.260 1	0.820 2	0.603 6	52.90
15	60	6	11	3.67	25.21	0.342 5	0.102 7	0.327 8	0.381 8	0.118 0	1.072 2	52.31
16	60	6	11	3.32	21.08	0.266 8	0.455 4	0.124 5	0.196 2	0.365 9	0.167 4	49.57
17	60	6	11	3.60	23.29	0.372 1	0.095 5	0.623 0	0.539 9	0.149 3	1.165 0	52.92

表 9 响应曲面试验方差分析

Table 9 Variance analysis of response surface

方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性	方差来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性
模型	3 076.273	9	341.808	23.010	0.000 2	极显著	X_1^2	122.665	1	122.665	8.258	0.023 9	显著
X_1	67.920	1	67.920	4.572	0.069 8	不显著	X_2^2	897.208	1	897.208	60.400	0.000 1	极显著
X_2	556.278	1	556.278	37.449	0.000 5	极显著	X_3^2	59.527	1	59.527	4.007	0.085 4	不显著
X_3	569.531	1	569.531	38.341	0.000 4	极显著	残差	103.981	7	14.854			
X_1X_2	20.612	1	20.612	1.388	0.277 3	不显著	失拟项	38.206	3	12.735	0.774	0.565 9	不显著
X_1X_3	423.331	1	423.331	28.499	0.001 1	极显著	误差	65.775	4	16.444			
X_2X_3	280.395	1	280.395	18.876	0.003 4	极显著	总离差	3 180.254	16				

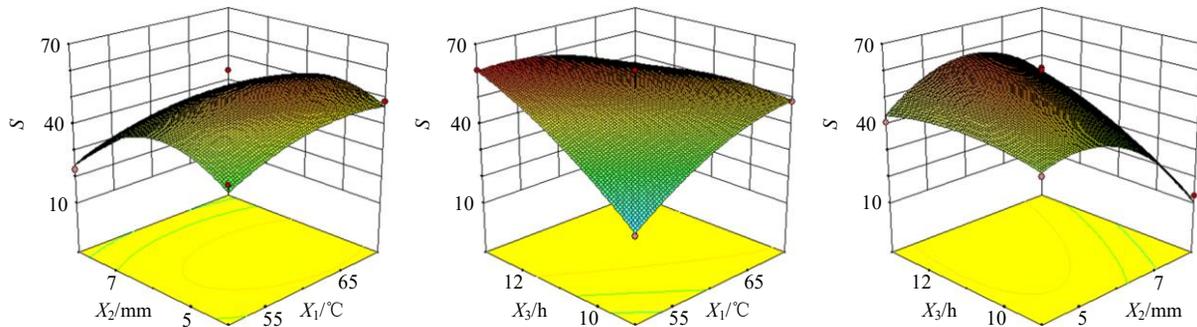


图 3 天麻趁鲜切制 *S* 的响应面图

Fig. 3 Response surface diagram of comprehensive score of fresh-cut processing of *G. elata*

2.8 不同趁鲜切制工艺 HPLC 指纹图谱研究

将不同杀青方法、不同杀青时间、不同干燥温度、不同切片方式和厚度共 28 批天麻加工饮片色

谱图导入《中药色谱指纹图谱相似度评价软件(2012 版)》, 剪切 42 min 后的尾峰(因其为溶剂干扰峰), 以 S12 为参照图谱(蒸制 15 min, 纵切 6 mm, 50 °C

表 10 趁鲜切制工艺验证与传统工艺比较 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

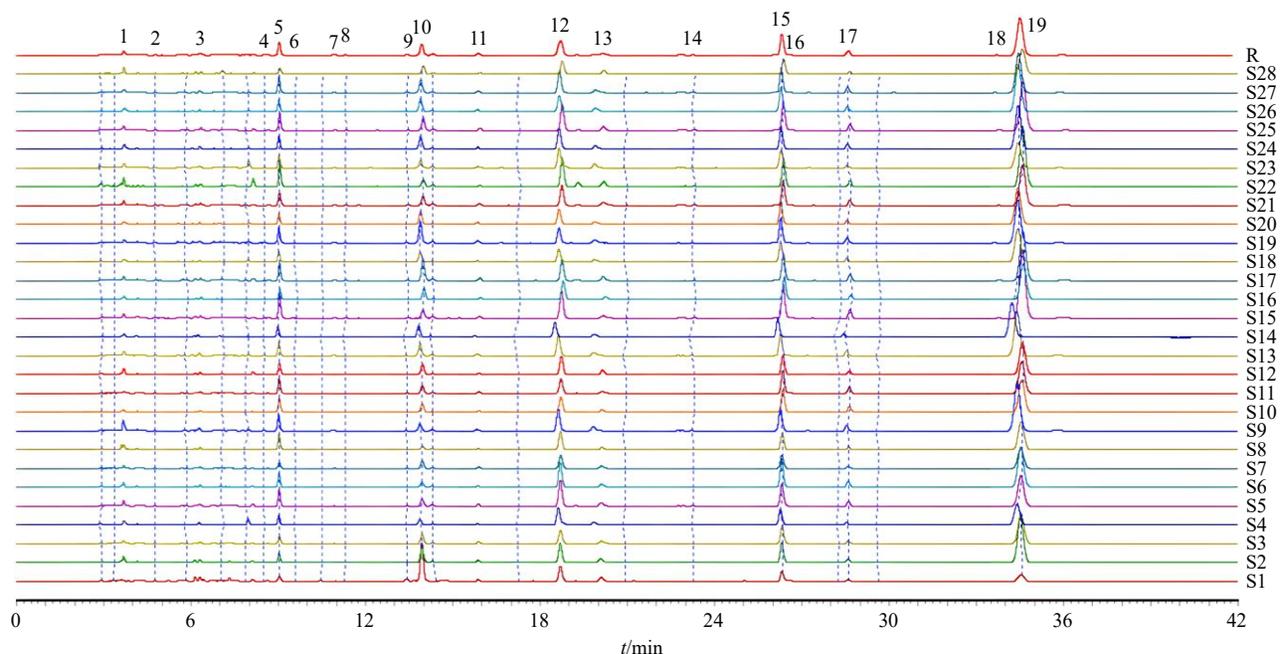
Table 10 Technology validation of fresh-cut processing of *G. elata* and compare with traditional technology ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

工艺	外观评分	醇溶性 浸出物/%	质量分数/(mg·g ⁻¹)						S
			天麻素	HBA	PE	PB	PC	PA	
趁鲜切制	3.70±0.10	28.01±0.27	3.783±0.012	0.664±0.002	4.245±0.014	4.676±0.015	1.559±0.005	14.209±0.046	59.64
	3.75±0.09	28.90±2.16	3.773±0.017	0.584±0.002	3.787±0.014	4.571±0.017	1.459±0.004	14.587±0.055	61.32
	3.60±0.20	29.02±0.99	3.809±0.012	0.710±0.002	3.835±0.012	4.539±0.014	1.454±0.005	14.267±0.045	58.30
传统加工	3.50±0.23	26.34±0.15	3.189±0.011	1.155±0.006	4.168±0.018	4.853±0.012	1.574±0.017	13.635±0.028	49.65

干燥), 时间窗宽度设置为 0.3 min, 采用中位数法, 经多点校正和全峰匹配后生成对照指纹图谱, 结果见图 4, 共标定 19 个共有峰, 其中峰 5、10、12、15、17、19 分别为天麻素、HBA、PE、PB、PC、PA。

计算相似度, 结果 S1~S28 的相似度分别为 0.521、0.991、0.992、0.914、0.963、0.982、0.981、

0.979、0.966、0.990、0.990、0.988、0.967、0.970、0.989、0.991、0.992、0.973、0.972、0.972、0.991、0.985、0.922、0.967、0.990、0.976、0.962、0.986。可见, S1 (未杀青) 相似度为 0.521, S2~S28 相似度在 0.914~0.992, 说明天麻杀青与未杀青差异明显, 可以用指纹图谱有效区分, 各趁鲜切制加工之间组分差异小, 指纹图谱相对稳定。



5-天麻素; 10-对羟基苯甲醇; 12-巴利森昔 E; 15-巴利森昔 B; 17-巴利森昔 C; 19-巴利森昔 A。
5-gastrodin; 10-p-hydroxybenzyl alcohol; 12-parishin E; 15-parishin B; 17-parishin C; 19-parishin A。

图 4 28 批天麻趁鲜切制样品指纹图谱 (S1~S28) 及对照指纹图谱 (R)

Fig. 4 Fingerprints for 28 batches of fresh-cut processing of *G. elata* (S1—S28) and their reference fingerprints (R)

2.9 化学计量学分析

2.9.1 聚类分析 (cluster analysis, CA) 以 28 批天麻加工饮片 6 种有效成分含量为变量, 导入 SPSS 26.0, 采用组间联接聚类法, 以平方欧式距离作为样品相似度的测度, 进行聚类分析, 结果见图 5。当分类距离为 10 时, 28 批天麻加工饮片可分为 2 类: S1 未杀青加工饮片单独为 I 类, 其余趁鲜切制饮片 (S2~S28) 共 27 批为 II 类。

2.9.2 主成分分析 (principle component analysis,

PCA) 以 28 批天麻加工饮片中 6 种有效成分含量为变量, 导入 SPSS 26.0, 计算主成分特征值, 方差贡献率及因子载荷矩阵, 结果见表 11、12。以特征值 > 1 为提取标准, 提取 2 个主成分因子, 累积方差贡献率达到 78.704%, 表明这个 2 个主成分因子能代表天麻趁鲜切制工艺 78.704% 的信息。主成分因子 1 主要反映了天麻素、PE、PB、PC、PA 的信息, 主成分因子 2 主要反映了 HBA、PE 的信息。将 28 批天麻加工饮片 6 种有效成分含量导入 SIMCA 14.1

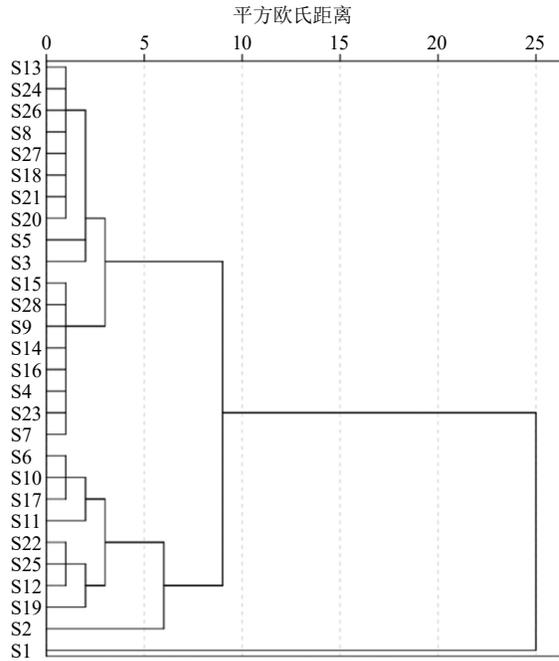


图5 28批天麻趁鲜切制样品聚类分析

Fig. 5 Cluster analysis for 28 batches of fresh-cut processing of *G. elata*

表11 PCA特征值及方差贡献率

Table 11 PCA eigenvalue and variance contribution rate

主成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	3.628	60.474	60.474	3.628	60.474	60.474
2	1.094	18.230	78.704	1.094	18.230	78.704
3	0.628	10.461	89.165			
4	0.333	5.546	94.710			
5	0.261	4.353	99.063			
6	0.056	0.937	100.000			

表12 PCA因子载荷矩阵

Table 12 PCA factor loading matrix

成分	主成分1	主成分2	成分	主成分1	主成分2
天麻素	0.857	-0.145	PB	0.943	0.096
HBA	-0.110	0.948	PC	0.813	-0.118
PE	0.703	0.386	PA	0.915	-0.041

软件建立PCA模型,得到PCA得分图,结果见图6, S1未杀青加工饮片与其余趁鲜切制饮片(S2~S28)相差较大,该分类结果与聚类分析结果一致。

3 讨论

传统中药饮片的质量控制以“辨状论质”的经验鉴别为基础,依据中药的“形、色、气、味、质”,判断其真伪优劣,这种方式主要是依据老药工的经

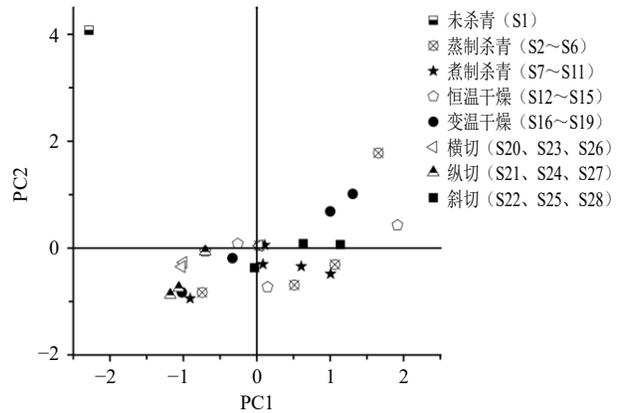


图6 PCA得分图

Fig. 6 PCA score plot

验判断优劣真假,对评价人员的理论和实践经验要求较高,主观性强^[16-17],而饮片的优劣由切面色泽、成型率等外在质量,所含化学成分种类、含量和浸出物等内在质量综合决定。AHP法是通过构建决策层次结构,比较每个影响因素在同一水平与综合结果的相互关系及相对突出程度,并创建一个比较矩阵,以确定每个指标对质量评估影响权重的主观评价方法^[18-20]。CRITIC法是使用波动性(标准差)和冲突性(相关系数)来确定指标的客观评价方法,数据的标准差越大,波动越大,权重越高,指标之间的相关性越大,冲突性越小,权重越低^[21-22]。因此,本研究以外表皮颜色,切片颜色等传统外观评价为基础,同时结合天麻素、HBA、PA、PB、PC、PE共6种主要化学成分和醇溶性浸出物含量,采用AHP-CRITIC评分法综合评价天麻趁鲜切制饮片质量优劣,使主客观相结合,既可以避免AHP法的主观赋权缺乏科学性,保留实际样本的数据信息,又能减少CRITIC法对指标间的重要性的忽视,结果科学稳定^[23-24]。

杀青是天麻加工过程中的重要环节。根据杀青方法及时间,不同等级天麻杀青时间的单因素试验结果表明,杀青后的天麻饮片比不杀青饮片的S高,煮制和蒸制过程使鲜天麻中葡萄糖苷酶等水解酶失活,酶解反应受到抑制,阻止了酶对苷类成分的降解,天麻素和巴利森苷类含量增加,起到“杀酶保苷”作用^[25-28]。且通过后期指纹图谱、聚类分析及主成分分析均表明杀青和未杀青处理差异明显。杀青10、15、20 min时,蒸制杀青的S和杀青效率高于煮制,煮制杀青与水直接接触,煮制过程中天麻素、HBA、糖类等水溶性营养物质会相应的溶于水煮沸溶液使含量降低,且投料后会造成水温的急剧下降,进

一步加剧酶解的过程,天麻中有效成分的保留度较低^[27,29-30],研究表明煮制加工所得的天麻药材天麻素、HBA,腺苷、对羟基苯甲醛、巴利森苷类的含量均低于蒸制加工^[31]。在一定杀青时间内,蒸制时间延长,天麻素、PB、柠檬酸含量逐渐增加,PA、PE含量逐渐降低;蒸制时间短,天麻未熟透,杀酶不彻底,巴利森苷类不完全转化为天麻素,天麻素在糖苷酶的作用下降解为HBA,且酶促褐变反应使天麻表皮变黑,而蒸制时间过程过长造成有效成分流失,天麻表皮会受损,且淀粉糊化,可溶性固形物降低^[32-36],这种变化趋势与本研究一致,即二级天麻蒸制0~10 min, S 增加,随后天麻 S 下降。并且,不同等级天麻蒸制时间不同,等级越大,蒸制熟透需要时间越长,蒸制中心的温度越高,天麻素增加和HBA的减少越明显^[30,36],这与本研究一致,即一级天麻蒸制25 min, S 最高,熟透度达100%,二级天麻蒸制10 min S 最高,15 min 熟透度达100%,三级天麻蒸制10 min S 最高,熟透度达100%。

切片对天麻最终饮片的质量具有较大影响。切薄片掉渣和碎片较多,干燥时发生卷边,影响饮片成型率,但干燥速率快,干燥时间短;切片厚度大,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^[37-40]。本研究结果表明,切片厚度相同时,斜切为天麻鲜切片的最佳切制方式;切片方式相同时,6 mm 为天麻最佳切制厚度。

干燥是天麻饮片质量优劣的关键。本研究结果表明,在50、60、70、80 °C 恒温干燥时,天麻鲜切片 S 先增加后减少,60 °C 时,外观、醇溶性浸出物、有效成分含量均较为满意, S 最高,80 °C 时, S 最低。变温干燥时,天麻鲜切片在60 °C 干燥5 h 后50 °C 干燥、70 °C 干燥5 h 后60 °C 干燥 S 较高,可能原因是天麻切片刚开始干燥时含水量大,前期温度比后期温度高时有利于其快速脱水,后期温度较低干燥主要是低温有利于定形。Li 等^[28]研究表明温度超过50 °C,天麻饮片水分就会迅速下降,这与本研究净重-干燥时间变化曲线一致,即50 °C 时干燥时间最长,速率最慢。温度过高时,饮片颜色会受到影响,65 °C 时饮片颜色变为黄色;70 °C 干燥时,天麻发生严重褐变;当温度超过80 °C 时,天麻品相变差,表皮出现褶皱,颜色变黑^[32,37,39,41]。同时,随着干燥温度的升高,天麻中药效成分可能减少,武旭等^[41]研究表明,75 °C 时天麻中天麻素、HBA、PA、PB、PC、PE、醇溶性浸出物、天麻多糖含量变

化剧烈,总评归一值下降程度大。杨颜君等^[42]研究表明,温度低时,霉菌残留量多,不利于抑制残留酶的活性。上述研究与本研究结果一致,即加工过程中干燥温度与饮片颜色、有效成分含量密切相关,干燥温度低时,干燥时间长,有效成分含量降低;干燥温度高时,饮片色泽焦黄,影响外观。

基于单因素实验结果,结合响应曲面优化天麻趁鲜切制工艺参数,确定最终加工工艺为新鲜天麻块茎,洗净,待水沸后置于蒸锅上,一级天麻蒸制25 min,二级天麻蒸制15 min,三级天麻蒸制10 min,取出,斜切6 mm,55 °C 干燥13 h,该加工工艺稳定,可操作性强。

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: 59-60.
- [2] 全毅恒,上官晨虹,陈琛. 天麻中酚类成分对心脑血管疾病的药理作用研究进展 [J]. 中草药, 2022, 53(14): 4582-4592.
- [3] 黄学风,郑雪蓉,黄春元. 基于网络药理学探讨天麻治疗脑血管性眩晕作用机制 [J]. 山西中医, 2022, 38(2): 64-67.
- [4] 张志伟,李银括,杨志勇,等. 基于网络药理学的天麻抗缺血性脑中风作用机制研究 [J]. 广东化工, 2022, 49(6): 63-66.
- [5] Lin Y E, Lin C H, Ho E P, et al. Glial Nrf2 signaling mediates the neuroprotection exerted by *Gastrodia elata* Blume in Lrrk2-G2019S Parkinson's disease [J]. *Elife*, 2021, 10: e73753.
- [6] Huang Y J, Choong L C, Panyod S, et al. *Gastrodia elata* Blume water extract modulates neurotransmitters and alters the gut microbiota in a mild social defeat stress-induced depression mouse model [J]. *Phytother Res*, 2021, 35(9): 5133-5142.
- [7] 杨俊杰,李平,郝敏,等. 中药材产地加工与炮制一体化的现代研究进展 [J]. 中草药, 2018, 49(20): 4726-4730.
- [8] 陈芳,倪丽,缪兴龙,等. 趁鲜切制和传统切制金荞麦饮片糖类组分比较研究 [J]. 中草药, 2023, 54(9): 2776-2784.
- [9] 洪智慧,杜伟锋,李小宁,等. 中药材产地趁鲜加工的可行性及相关建议 [J]. 中华中医药杂志, 2021, 36(1): 80-85.
- [10] 轩菲洋,姜丹,张佳雯,等. 中药材趁鲜加工现状及发展趋势 [J]. 中国现代中药, 2022, 24(10): 1840-1849.
- [11] 胡兆流,陈秋谷,王佛长,等. 多指标权重分析法结合正交试验优选补脾养肾颗粒的水提工艺 [J]. 中国药房, 2019, 30(19): 2656-2662.
- [12] 周碧乾. 天麻产地加工与品质特征的研究 [D]. 成都:

- 成都中医药大学, 2018.
- [13] 周娜. 安徽金寨天麻栽培资源调查、加工工艺与质量标准研究 [D]. 合肥: 安徽中医药大学, 2021.
- [14] 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.
- [15] 肖小林, 颜干明, 龚千锋, 等. 基于多指标-响应曲面法优选樟帮醋闷乳香炮制工艺及其体外抗凝活性研究 [J]. 中国中药杂志, 2023, 48(16): 4402-4412.
- [16] 薛蓉, 戴衍朋, 王彬, 等. 中药饮片质量控制标准研究与展望 [J]. 中国食品药品监管, 2022(11): 32-41.
- [17] 周勤梅, 朱欢, 耿昭, 等. 中药材及饮片质量控制和评价的关键技术评析 [J]. 环球中医药, 2023, 16(3): 379-386.
- [18] Wang Y Z, Yang Z Y, Wang X J, *et al.* An analytic hierarchy process multi-criteria quantitative evaluation model of cinnamon decoction pieces [J]. *Phcog Mag*, 2021, 17(74): 348.
- [19] Liang S M, Jiang W, Yang Y, *et al.* An evaluation based on the analytic hierarchy process and GGEbiplot on French fry potato genotypes in Yunnan, China [J]. *Front Plant Sci*, 2023, 14: 1159848.
- [20] Xiang W, Li K L, Dong F, *et al.* Development of a multicriteria decision-making model for evaluating hybrid offspring in the sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) breeding process [J]. *Breed Sci*, 2023, 73(3): 246-260.
- [21] Chen Y L, Shen S L, Zhou A N. Assessment of red tide risk by integrating CRITIC weight method, TOPSIS-ASSETS method, and Monte Carlo simulation [J]. *Environ Pollut*, 2022, 314: 120254.
- [22] Mishra A R, Rani P, Pandey K. Fermatean fuzzy CRITIC-EDAS approach for the selection of sustainable third-party reverse logistics providers using improved generalized score function [J]. *J Ambient Intell Humaniz Comput*, 2022, 13(1): 295-311.
- [23] 丁涵, 徐忠坤, 王振中, 等. 基于 AHP-CRITIC 混合加权法和 Box-Behnken 设计-响应面法优化羌参颗粒成型工艺及其物理指纹图谱研究 [J]. 中草药, 2024, 55(3): 787-797.
- [24] 郭丽, 赵变, 吴作敏, 等. AHP-CRITIC 法结合正交设计优选丹参心脑血管胶囊提取工艺 [J]. 辽宁中医杂志, 2023, 50(1): 130-134.
- [25] Wu Z, Gao R P, Li H, *et al.* How steaming and drying processes affect the active compounds and antioxidant types of *Gastrodia elata* Bl. f. *glauca* S. Chow [J]. *Food Res Int*, 2022, 157: 111277.
- [26] 李佳阳, 吴国真, 王新茗, 等. 鲜天麻中酶对巴利森苷 A 的降解作用研究 [J]. 中国现代中药, 2022, 24(3): 459-465.
- [27] 周碧乾, 齐路明, 马云桐, 等. 天麻初加工方法对主要成分含量的影响及加工方法的化学模式识别 [J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(5): 736-743.
- [28] Li Y, Liu X Q, Liu S S, *et al.* Transformation mechanisms of chemical ingredients in steaming process of *Gastrodia elata* Blume [J]. *Molecules*, 2019, 24(17): 3159.
- [29] 秦梦圆. 陕西汉中天麻质量评价与加工工艺研究 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2021.
- [30] Xie Y K, Li X Y, Zhang Y, *et al.* Effects of high-humidity hot air impingement steaming on *Gastrodia elata*: Steaming degree, weight loss, texture, drying kinetics, microstructure and active components [J]. *Food Bioprod Process*, 2021, 127: 255-265.
- [31] 季德, 宁子琬, 张雪荣, 等. 不同干燥加工方法对天麻药材质量的影响 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(14): 2587-2590.
- [32] 郜玉钢, 吕涛, 臧埔, 等. 产地加工工艺对天麻 6 种药效成分含量的影响 [J]. 中华中医药学刊, 2022, 40(2): 6-10.
- [33] 王信, 王徽, 曹广尚, 等. 天麻清蒸过程中 7 种化学成分变化规律研究及分析 [J]. 中国医院药学杂志, 2018, 38(6): 595-598.
- [34] 陈衍男, 卢恒, 郑秀花, 等. 不同干燥方式对天麻多指标成分含量的影响 [J]. 山东科学, 2019, 32(1): 14-20.
- [35] Ma J, Deng Y, Wang Y Q, *et al.* A comparative study on ingredient and efficiency difference between fresh and steamed *Gastrodia elata* Blume: An herbal material to a novel functional food [J]. *J Funct Foods*, 2021, 82: 104512.
- [36] 唐文文, 孟艳林, 陈垣. 基于多指标成分优化天麻产地“发汗”加工工艺 [J]. 中草药, 2021, 52(23): 7185-7191.
- [37] 卢琪, 薛淑静, 杨德, 等. 乌红天麻干燥工艺研究 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(5): 166-169.
- [38] 辛二旦. 大黄趁鲜切制饮片工艺优选及质量标准研究 [D]. 兰州: 甘肃中医药大学, 2020.
- [39] Li K, Zhang Y, Wang Y F, *et al.* Effects of drying variables on the characteristic of the hot air drying for *Gastrodia elata*: Experiments and multi-variable model [J]. *Energy*, 2021, 222: 119982.
- [40] Bao B H, Qian Y, Cheng F F, *et al.* A novel integrative processing technology for the preparation of *Rehmanniae Radix* slices [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2018, 2018: 4524797.
- [41] 武旭, 吴亚楠, 闫海英, 等. 响应面法优化柞水天麻产地加工工艺 [J]. 中医药导报, 2021, 27(12): 34-38.
- [42] 杨颜君, 田玉桥, 朱欢, 等. 不同干燥过程与切片厚度对天麻品质的影响 [J]. 农产品加工, 2022(12): 30-33.

[责任编辑 郑礼胜]