

## 基于 UPLC-Q-TOF-MS 技术结合质量综合评价优选天麻趁鲜切制工艺

周清素<sup>1</sup>, 付艳<sup>1</sup>, 许清清<sup>1</sup>, 徐娇<sup>1,2</sup>, 周涛<sup>1,2</sup>, 康传志<sup>3</sup>, 肖承鸿<sup>1,2\*</sup>

1. 贵州中医药大学, 贵州 贵阳 550025

2. 贵州省道地药材种质创新与资源高效利用全省重点实验室, 贵州 贵阳 550025

3. 中国中医科学院中药研究所, 道地药材品质保障与资源持续利用全国重点实验室, 北京 100700

**摘要:** 目的 利用质量综合评价对天麻 *Gastrodiae Rhizoma* 趁鲜切制工艺饮片进行比较分析, 筛选天麻趁鲜切制的最优工艺。方法 采用切片后蒸制烘干方法, 设置不同蒸制时间 (0、5、10、20 min) 和烘干温度 (30、45、60、75 °C), 共 16 种趁鲜切制工艺参数 (Q1~Q16); 采用 UPLC-Q-TOF-MS 技术分析不同趁鲜切制饮片的差异成分, 以天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷类、多糖、蛋白质、醇溶性浸出物为质量参数, 采用熵权法与逼近理想解排序法 (technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 综合筛选趁鲜切制最优工艺。结果 UPLC-Q-TOF-MS 技术共分析鉴定出 27 种化合物, 以变量重要性投影 (variable importance projection, VIP) > 1.0 为条件, 筛选不同趁鲜切制饮片的差异成分有丁香酸葡萄糖苷、尿嘧啶、岩白菜素-8-*O*- $\alpha$ -L-鼠李糖苷、腺苷、巴利森苷 B、巴利森苷 K、巴利森苷 F, 差异成分聚类显示, 蒸制 0 min 的饮片聚为一类, 与其他蒸制时间差异成分存在显著差异; 不同趁鲜切制工艺对天麻素、对羟基苯甲醇及多糖含量影响显著; 熵权法与 TOPSIS 法综合评价分析发现, Q6 组 (蒸制 5 min、45 °C 烘干) 综合评分位列第 1, 且雷达图面积占比最大。结论 蒸制是影响天麻趁鲜切制饮片质量的关键工艺; 新鲜天麻切制 5 mm 厚、蒸制 5 min、45 °C 烘干时综合质量较高, 可为药用天麻趁鲜切制工艺标准研制提供参考。

**关键词:** 天麻; UPLC-Q-TOF-MS 技术; 含量检测; 熵权法; TOPSIS 法; 趁鲜切制工艺; 丁香酸葡萄糖苷; 尿嘧啶; 岩白菜素-8-*O*- $\alpha$ -L-鼠李糖苷; 腺苷; 巴利森苷 B; 巴利森苷 K; 巴利森苷 F

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)14-5501-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.14.013

## Optimization of fresh-cut processing technology of *Gastrodiae Rhizoma* by UPLC-Q-TOF-MS combined with comprehensive quality evaluation

ZHOU Qingsu<sup>1</sup>, FU Yan<sup>1</sup>, XU Qingqing<sup>1</sup>, XU Jiao<sup>1,2</sup>, ZHOU Tao<sup>1,2</sup>, KANG Chuangzhi<sup>3</sup>, XIAO Chenghong<sup>1,2</sup>

1. Guizhou University of Traditional Chinese Medicine, Guiyang 550025, China

2. Guizhou Key Laboratory for Germplasm Innovation and Resource-Efficient Utilization of Dao-di Herbs, Guiyang 550025, China

3. State Key Laboratory for Quality Assurance and Sustainable Use of Dao-di Herbs, Institute of Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China

**Abstract: Objective** To compare and analyze the fresh-cut processing slices of Tianma (*Gastrodiae Rhizoma*, GR) by comprehensive quality evaluation, and to screen the optimal process of fresh-cut processing of GR. **Methods** Different steaming time (0, 5, 10, 20 min) and drying temperature (30, 45, 60, 75 °C) were set, and a total of 16 kinds of fresh-cut process parameters (Q1—Q16) were set. UPLC-Q-TOF-MS technology was used to analyze the different components of different fresh-cut decoction pieces. Gastrodin, *p*-hydroxybenzyl alcohol, parishins, polysaccharide, protein and alcohol-soluble extract were used as quality parameters. Entropy weight method and technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method were used to comprehensively screen the optimal process of fresh-cut decoction pieces. **Results** A total of 27 compounds were identified by UPLC-Q-TOF-MS technology. Using variable importance projection (VIP) > 1.0 as a condition, the differential components of different fresh-cut decoction pieces were screened as syringic acid glucoside, uracil, bergenin-8-*O*- $\alpha$ -L-rhamnoside, adenosine, parishin B, parishin K, parishin F. The

收稿日期: 2026-01-31

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFC3503803); 中国中医科学院科技创新工程项目 (CI2024E003)

作者简介: 周清素 (2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药及民族药资源分类鉴定与质量控制。E-mail: 2557570840@qq.com

\*通信作者: 肖承鸿 (1985—), 教授, 硕士生导师, 主要从事中药资源学研究。E-mail: xiaochenghong1986@126.com

clustering of differential components showed that the decoction pieces steamed for 0 min were clustered into one group, and there were significant differences in the differential components between steamed for 0 min and other steamed time. Different fresh-cutting processes had significant effects on the contents of gastrodin, *p*-hydroxybenzyl alcohol and polysaccharides. The comprehensive evaluation and analysis of entropy weight method and TOPSIS method showed that the comprehensive score of Q6 group (steaming for 5 min and drying at 45 °C) ranked first, and the radar map area accounted for the largest proportion. **Conclusion** Steaming is the key process affecting the quality of fresh-cut GR. The comprehensive quality of fresh GR is high when it is cut into 5 mm thick, steamed for 5 min and dried at 45 °C, which can provide reference for the development of fresh cutting process standard of GR.

**Key words:** *Gastrodiae Rhizoma*; UPLC-Q-TOF-MS technology; content detection; entropy weight method; TOPSIS method; fresh cutting process; syringic acid glucoside; uracil; bergenin-8-*O*- $\alpha$ -L-rhamnoside; adenosine; parishin B; parishin K; parishin F

天麻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、祛风通络的功效<sup>[1]</sup>。现代药理研究发现, 天麻及其提取物具有镇静、催眠、抗惊厥、抗炎等多种药理作用<sup>[2-3]</sup>。天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷类、多糖等是其发挥药效的物质基础<sup>[4-5]</sup>。天麻于 2023 年 11 月被纳入药食同源物质目录, 已被广泛应用于临床、食品和保健品等领域。天麻传统加工包括“清洗、浸泡、蒸煮、干燥、浸润、蒸煮软化、切片、干燥”步骤, 加工流程繁琐, 需 2 次浸泡和蒸制。部分药材采用传统加工方式再次浸润, 易造成有效成分流失, 趁鲜切制技术可避免再次浸润和干燥, 从而最大程度保留药材药效<sup>[6]</sup>。天麻传统加工存在有效成分在浸润软化过程中损失的风险, 且工序繁杂、操作困难等, 影响了天麻饮片的高效生产。

2021 年国家药品监督管理局发布《关于中药饮片生产企业采购产地加工(趁鲜切制)中药材有关问题的复函》, 支持在全国范围内开展产地趁鲜切制试点工作, 要求各省制定具体品种切制加工标准和规程。趁鲜切制是将产地采收的新鲜中药材清洗干净, 切制或经适当干燥后切制成片、段等, 继而进行干燥的方法。天麻已被收载于云南、贵州、湖北、吉林、安徽等多省的产地趁鲜切制中药材品种目录。关于天麻趁鲜切制工艺的研究, 课题组前期分析了蒸制后切片、切片后蒸制、切片未蒸制 3 种处理顺序, 晒干、烘干、真空冷冻干燥、微波干燥 4 种干燥方法, 得出切片后蒸制、烘干与传统加工性状、品质最为相近<sup>[7]</sup>。

基于此, 本研究在“切片后蒸制、烘干”方法的基础上, 进一步优化该方法的加工参数, 通过 UPLC-Q-TOF-MS 技术分析不同趁鲜切制工艺饮片的差异成分, 明确趁鲜切制工艺影响天麻质量的关键环节, 并测定天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷类、多糖、蛋白质和醇溶性浸出物含量。采用熵权

法和逼近理想解排序(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)法进行综合赋权评分, 筛选出天麻趁鲜切制工艺的最优参数, 旨在为规范天麻趁鲜加工工艺、确保饮片品质等提供参考依据。

## 1 仪器与材料

### 1.1 仪器与试剂

Waters 2695 型高效液相色谱仪、Xevo G2-S QToF 型高分辨质谱仪, 美国 Waters 公司; Agilent 1290 Infinity II 型超高液相色谱仪, 安捷伦科技有限公司; UV-2700 型紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; EL104 型万分之一电子分析天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。

对照品天麻素(批号 AF20100454)、对羟基苯甲醇(批号 AF21030253)购于成都埃法生物科技有限公司; 对照品巴利森苷 A(批号 DSTDB010201)、巴利森苷 B(批号 DSTDB006401)、巴利森苷 C(批号 DSTDB006501)、巴利森苷 E(批号 DSTDB006601)购于四川成都德思特生物有限公司; 对照品 *D*-无水葡萄糖(批号 110833-201908)购于中国食品药品检定研究院; 所用对照品质量分数均 $\geq 98\%$ ; 甲醇、乙腈为色谱级, 购于天津市科密欧化学试剂有限公司; 其余均为分析纯, 购于重庆川东化工有限公司。

### 1.2 药材

天麻样品于 2022 年 1 月采自贵州省毕节市大方县, 经贵州中医药大学肖承鸿教授鉴定为兰科天麻属植物天麻 *G. elata* Bl. 的新鲜块茎。

## 2 方法与结果

### 2.1 样品制备

选择无破损、无腐烂、无黑点病斑、质量 150 g 左右的天麻块茎, 清洗至天麻表面无可见污垢泥土后切 5 mm 厚片(经干燥处理后可变薄至药典规定的 1~2 mm), 随机分 16 组(Q1~Q16), 每组 3 份

重复, 每份 4 kg。通过前期预试验和文献查阅<sup>[7-8]</sup>, 设定不同蒸制时间 (0、5、10、20 min)、不同干燥温度 (30、45、60、75 °C) 处理。烘干处理干燥时均进行回潮处理, 即干燥 12 h, 室温条件下回潮 12 h, 回潮温度 18~20 °C, 相对湿度 65%~70%, 待饮片表面平整再继续干燥。样品趁鲜切制加工工艺见表 1。

表 1 天麻样品加工工艺

Table 1 Processing technology of *Gastrodiae Rhizoma* samples

| 编号 | 加工工艺             | 编号  | 加工工艺              |
|----|------------------|-----|-------------------|
| Q1 | 蒸制0 min, 30 °C烘干 | Q9  | 蒸制10 min, 30 °C烘干 |
| Q2 | 蒸制0 min, 45 °C烘干 | Q10 | 蒸制10 min, 45 °C烘干 |
| Q3 | 蒸制0 min, 60 °C烘干 | Q11 | 蒸制10 min, 60 °C烘干 |
| Q4 | 蒸制0 min, 75 °C烘干 | Q12 | 蒸制10 min, 75 °C烘干 |
| Q5 | 蒸制5 min, 30 °C烘干 | Q13 | 蒸制20 min, 30 °C烘干 |
| Q6 | 蒸制5 min, 45 °C烘干 | Q14 | 蒸制20 min, 45 °C烘干 |
| Q7 | 蒸制5 min, 60 °C烘干 | Q15 | 蒸制20 min, 60 °C烘干 |
| Q8 | 蒸制5 min, 75 °C烘干 | Q16 | 蒸制20 min, 75 °C烘干 |

## 2.2 UPLC-Q-TOF-MS 技术鉴定天麻代谢物

**2.2.1 对照品溶液的制备** 精密称取天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 E、巴利森苷 B、巴利森苷 C、巴利森苷 A 对照品适量, 加 30% 乙腈制成质量浓度分别为 83.0、69.4、84.5、76.0、27.3、207.0 μg/mL 的混合对照品溶液, 过 0.45 μm 微孔滤膜, 即得。

**2.2.2 供试品溶液的制备** 参照文献方法<sup>[9]</sup>, 天麻饮片粉碎后过 60 目筛, 取粉末 0.25 g, 精密称定, 加 50% 乙醇 10 mL, 超声提取 40 min, 1 000 r/min

离心 (离心半径 4.0 cm) 10 min, 重复 1 次, 合并滤液, 过 0.22 μm 滤膜, 即得。

**2.2.3 色谱条件** 采用 Acquity UPLC HSS T3 色谱柱 (100 mm×2.1 mm, 1.8 μm); 以 0.1% 甲酸水溶液-乙腈为流动相, 梯度洗脱: 0~4 min, 100%~99.5% 乙腈; 4~6 min, 99.5%~98% 乙腈; 6~7 min, 98%~92% 乙腈; 7~12 min, 92%~88% 乙腈; 12~18 min, 88%~80% 乙腈; 18~24 min, 80%~60% 乙腈; 24~25 min, 60%~55% 乙腈; 25~31 min, 55%~30% 乙腈; 31~33 min, 30%~2% 乙腈; 33~35 min, 2% 乙腈; 体积流量 0.3 mL/min; 柱温 40 °C; 进样量 2 μL。

**2.2.4 质谱条件** 负离子模式扫描, 质量范围  $m/z$  50~1 500; 毛细管电压 3.5 kV, 样品锥电压 3 V, 离子源温度 150 °C, 锥孔反吹气流量 10 L/h, 脱溶剂气温度 500 °C, 脱溶剂气流量 900 L/h; TOF 扫描速率 0.3 s/scan。

**2.2.5 样品测定与数据处理** 精密吸取“2.2.1”项下对照品溶液及“2.2.2”项下供试品溶液各 2 μL, 按“2.2.3”项下色谱条件和“2.2.4”项下质谱条件进样分析。色谱峰面积以 MassLynx 软件输出的仪器响应值 (signal response) 表示, 用于比较各成分在不同样品间的相对含量。将目标化合物的质荷比导入 Mass Bank of North America (<https://mona.fiehnlab.ucdavis.edu/spectra/search>) 进行数据库匹配, 结合相关文献以及标准品色谱、质谱信息进行物质定性, 设定质量误差阈值  $<1.0 \times 10^{-5}$ 。天麻样品中共检测到 46 个信号峰 (离子流图见图 1), 通

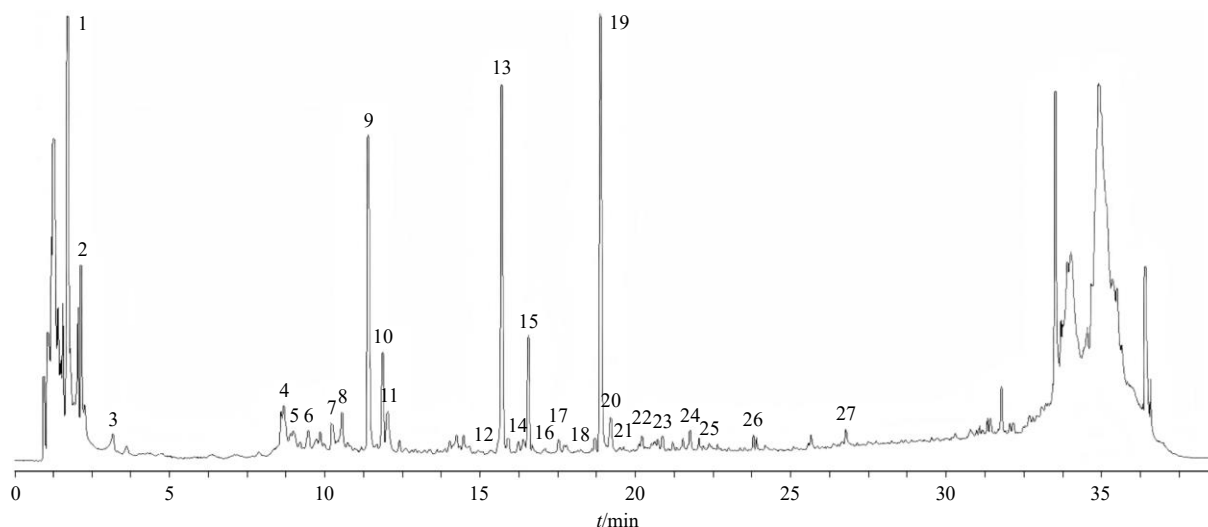


图 1 基于 UPLC-Q-TOF-MS 技术的天麻总离子流图

Fig. 1 Total ion flow diagram of *Gastrodiae Rhizoma* by UPLC-Q-TOF-MS technology

过与对照品保留时间、质谱碎片等信息比对，表征了 27 种化合物，包括酚类、酯类、糖及苷类、有机酸类、醚类以及生物碱类等（鉴定结果见表 2），其余化合物为响应过低、无匹配质谱等暂未鉴定结构。其中，药典规定的指标成分天麻素和对羟基苯甲醇也在表征化合物中。

表 2 天麻差异化合物鉴定结果  
Table 2 Results of chemical composition identification of *Gastrodiae Rhizoma*

| 峰号 | <i>t<sub>R</sub></i> /<br>min | 分子式                                                             | 相对分<br>子质量  | [M-H] <sup>-</sup><br>实测值 | 误差<br>(×10 <sup>-6</sup> ) | 碎片离子 ( <i>m/z</i> )                                                                               | 化合物                                 |
|----|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1  | 1.72                          | C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>                 | 342.116 2   | 341.109 1                 | 2.052                      | 179.061 1, 101.025 9, 89.026 7                                                                    | 肌醇半乳糖苷                              |
| 2  | 2.14                          | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>                    | 192.027 0   | 191.018 1                 | -5.759                     | 173.014 3, 129.021 8, 111.011 7                                                                   | 柠檬酸                                 |
| 3  | 3.18                          | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>                    | 192.027 0   | 191.021 9                 | -6.282                     | 111.011 7, 87.007 9, 85.029 3                                                                     | 柠檬酸异构体                              |
| 4  | 8.69                          | C <sub>13</sub> H <sub>18</sub> O <sub>7</sub>                  | 286.105 3   | 331.103 0                 | 0.302                      | 285.128 1, 161.060 5, 123.057 2                                                                   | 天麻素                                 |
| 5  | 8.98                          | C <sub>9</sub> H <sub>11</sub> NO <sub>2</sub>                  | 165.079 0   | 164.070 8                 | -2.438                     | 101.030 1, 89.022 9, 85.033 1, 71.018 5, 59.014 6                                                 | 苯丙酸                                 |
| 6  | 9.48                          | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>                    | 124.052 4   | 123.043 6                 | -8.127                     | 106.950 7, 88.943 7, 77.049 1                                                                     | 对羟基苯甲醇                              |
| 7  | 10.21                         | C <sub>15</sub> H <sub>20</sub> O <sub>10</sub>                 | 360.105 6   | 359.096 7                 | -3.063                     | 341.121 0, 197.062 5, 123.014 1, 95.016 3                                                         | 丁香酸葡萄糖苷                             |
| 8  | 10.56                         | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>     | 112.027 3   | 111.018 1                 | 7.206                      | 101.023 9, 89.028 7, 82.683 9, 78.958 6, 71.015 0                                                 | 尿嘧啶                                 |
| 9  | 11.42                         | C <sub>19</sub> H <sub>24</sub> O <sub>13</sub>                 | 460.121 7   | 459.115 2                 | 2.832                      | 459.153 1, 129.028 8, 111.018 1                                                                   | 巴利森苷E                               |
| 10 | 11.85                         | C <sub>17</sub> H <sub>23</sub> N <sub>3</sub> O <sub>7</sub> S | 413.125 7   | 412.116 4                 | -3.397                     | 306.081 0, 210.096 1, 160.009 9, 143.051 8, 128.037 6, 99.053 9                                   | 硫-(4-羟苄基)-谷胱甘肽                      |
| 11 | 12.40                         | C <sub>20</sub> H <sub>26</sub> O <sub>14</sub>                 | 490.132 3   | 489.124 5                 | 0.204                      | 266.765 8, 173.004 6, 111.008 2                                                                   | 岩白菜素-8- <i>O</i> - $\alpha$ -L-鼠李糖苷 |
| 12 | 15.09                         | C <sub>10</sub> H <sub>13</sub> N <sub>5</sub> O <sub>4</sub>   | 267.096 8   | 266.089 7                 | 3.007                      | 134.049 1, 107.035 5, 92.026 6                                                                    | 腺苷                                  |
| 13 | 15.70                         | C <sub>32</sub> H <sub>40</sub> O <sub>19</sub>                 | 728.216 4   | 727.206 9                 | -2.338                     | 727.274 9, 423.119 3, 369.139 5, 217.070 8, 161.058 0, 111.016 0                                  | 巴利森苷B                               |
| 14 | 16.25                         | C <sub>33</sub> H <sub>42</sub> O <sub>20</sub>                 | 758.226 9   | 757.213 3                 | -7.660                     | 485.051 1, 459.148 7, 385.106 7, 336.590 7, 256.088 4, 190.965 4, 183.874 0, 175.048 1, 111.016 0 | 巴利森苷H                               |
| 15 | 16.54                         | C <sub>32</sub> H <sub>40</sub> O <sub>19</sub>                 | 728.216 4   | 727.206 9                 | -2.338                     | 727.274 9, 441.147 8, 423.136 1, 397.136 6, 217.067 8, 161.058 0                                  | 巴利森苷C                               |
| 16 | 17.10                         | C <sub>33</sub> H <sub>42</sub> O <sub>20</sub>                 | 758.226 9   | 757.224 2                 | 6.735                      | 626.064 6, 161.055 4, 111.013 8                                                                   | 巴利森苷M                               |
| 17 | 17.52                         | C <sub>33</sub> H <sub>42</sub> O <sub>19</sub>                 | 742.232 0   | 741.226 9                 | 3.643                      | 473.166 1, 169.024 7, 123.055 0, 83.019 3                                                         | 巴利森苷K                               |
| 18 | 17.70                         | C <sub>51</sub> H <sub>66</sub> O <sub>30</sub>                 | 1 158.363 9 | 1 157.341 2               | -12.874                    | 889.360 3, 757.274 9, 585.215 8, 423.136 1, 161.050 1, 112.994 3                                  | 巴利森苷F                               |
| 19 | 18.88                         | C <sub>45</sub> H <sub>56</sub> O <sub>25</sub>                 | 996.311 1   | 995.307 4                 | 4.220                      | 995.404 6, 727.280 4, 441.143 5, 423.136 1, 397.157 0, 217.067 8, 161.058 0, 111.0160             | 巴利森苷A                               |
| 20 | 19.20                         | C <sub>46</sub> H <sub>58</sub> O <sub>26</sub>                 | 1 026.321 6 | 1 025.321 2               | 7.217                      | 727.225 2, 423.106 6, 161.052 8, 111.009 5                                                        | 巴利森苷L                               |
| 21 | 19.71                         | C <sub>26</sub> H <sub>30</sub> O <sub>14</sub>                 | 566.163 6   | 565.151 9                 | -6.724                     | 305.082 4, 111.011 7                                                                              | 巴利森苷W                               |
| 22 | 20.12                         | C <sub>20</sub> H <sub>24</sub> O <sub>8</sub>                  | 392.147 1   | 391.135 0                 | -10.994                    | 222.091 1, 161.042 4, 123.050 4, 121.032 8, 93.037 0                                              | 天麻苷                                 |
| 23 | 21.20                         | C <sub>9</sub> H <sub>16</sub> O <sub>4</sub>                   | 188.104 9   | 187.097 3                 | 1.603                      | 187.100 3, 125.098 4, 116.934 8                                                                   | 壬二酸                                 |
| 24 | 21.52                         | C <sub>52</sub> H <sub>62</sub> O <sub>26</sub>                 | 1 102.352 9 | 1 101.351 3               | 5.629                      | 727.186 9, 346.166 2, 161.040 0                                                                   | 巴利森苷R                               |
| 25 | 23.51                         | C <sub>41</sub> H <sub>46</sub> O <sub>20</sub>                 | 858.258 2   | 857.254 8                 | 5.133                      | 423.103 1, 362.099 2, 111.009 1                                                                   | 醋酸纤维素-对羟基苯甲酸鼠李糖                     |
| 26 | 23.98                         | C <sub>14</sub> H <sub>14</sub> O <sub>3</sub>                  | 230.094 3   | 229.087 3                 | 3.492                      | 121.030 6, 107.052 4, 93.037 0                                                                    | 4,4'-二羟基二苄基醚                        |
| 27 | 26.36                         | C <sub>36</sub> H <sub>36</sub> N <sub>2</sub> O <sub>8</sub>   | 624.247 2   | 623.238 4                 | -1.444                     | 460.202 2, 297.131 2                                                                              | 克罗酰胺                                |

运用 SIMCA 14.0 软件绘制变量重要性投影 (variable importance projection, VIP) 图, 结果显示, 丁香酸葡萄糖苷、尿嘧啶、岩白菜素-8-*O*- $\alpha$ -L-鼠李糖苷、腺苷、巴利森苷 B、巴利森苷 K、巴利森苷 F 共 7 个成分的 VIP 值大于 1 (图 2-A), 表明这些化合物对区分不同工艺组别具有重要贡献; 而天麻素和对羟基苯甲醇在偏最小二乘-判别分析 (partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA) 中二者的 VIP 值小于 1, 表明它们在不同趁鲜切制工艺间

的含量相对稳定。  
以蒸制 0 min 天麻样品为对照, 用 TBtools-II (<https://github.com/CJ-Chen/TBtools>) 软件对 VIP>1 的 7 个成分进行聚类分析 (图 2-B), 结果显示, 蒸制 0 min 样品 (Q1~Q4) 单独聚为一类; 蒸制 5、10、20 min 样品聚为另一大类, 提示不同蒸制时间处理对天麻成分含量有显著影响; 采用 SPSS 26.0 软件对成分含量进行方差分析, 以  $P<0.05$  为差异具有统计学意义, 进一步通过 PLS-DA, 结果 (表 3)

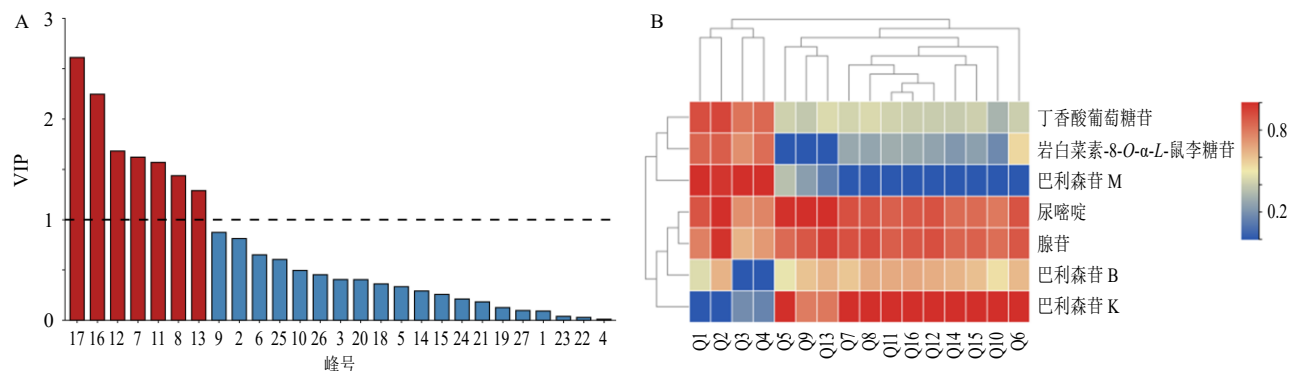


图 2 天麻不同成分分析的 VIP 值分布柱状图 (A) 和差异成分聚类热图 (B)

Fig. 2 VIP value distribution histogram (A) and differential component clustering thermogram (B) analysis of different components of *Gastrodiae Rhizoma*

表 3 不同蒸制时间差异成分峰面积比较

Table 3 Comparison of peak area of different components with different steaming time

| 蒸制时   | 相对峰面积                   |                         |                                     |                         |                         |                        |                          |
|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| 间/min | 丁香酸葡萄糖苷                 | 尿嘧啶                     | 岩白菜素-8- <i>O</i> - $\alpha$ -L-鼠李糖苷 | 腺苷                      | 巴利森苷B                   | 巴利森苷M                  | 巴利森苷K                    |
| 0     | 21.66±2.85 <sup>a</sup> | 14.39±0.89 <sup>c</sup> | 0.85±0.25 <sup>b</sup>              | 16.88±4.01 <sup>b</sup> | 1.56±2.09 <sup>b</sup>  | 3.54±2.50 <sup>a</sup> | 2.18±2.15 <sup>b</sup>   |
| 5     | 5.33±0.41 <sup>b</sup>  | 32.96±0.35 <sup>a</sup> | 2.19±0.92 <sup>a</sup>              | 29.24±8.91 <sup>a</sup> | 12.24±1.86 <sup>a</sup> | 1.39±1.85 <sup>a</sup> | 40.94±26.94 <sup>a</sup> |
| 10    | 4.80±0.97 <sup>b</sup>  | 26.67±4.07 <sup>b</sup> | 1.86±0.54 <sup>ab</sup>             | 28.84±7.94 <sup>a</sup> | 10.19±2.36 <sup>a</sup> | 1.15±1.38 <sup>a</sup> | 42.27±19.81 <sup>a</sup> |
| 20    | 5.94±0.95 <sup>b</sup>  | 32.09±2.13 <sup>a</sup> | 2.13±0.49 <sup>ab</sup>             | 34.24±3.87 <sup>a</sup> | 13.41±0.86 <sup>a</sup> | 1.01±1.11 <sup>a</sup> | 48.37±18.81 <sup>a</sup> |

同列数值后不同字母 a~c 表示同一处理间差异达到 5% 显著水平。

The presence of different letters from a to c after the same column value indicates that the observed differences between treatments are statistically significant at a 5% level.

显示,与蒸制 0 min 天麻样品相比,蒸制 5、10、20 min 天麻样品中尿嘧啶、腺苷、巴利森苷 B、巴利森苷 K 和岩白菜素-8-O-α-L-鼠李糖苷的峰面积显著升高 ( $P<0.05$ ),而丁香酸葡萄糖苷和巴利森苷 M 的峰面积显著降低 ( $P<0.05$ )。上述结果表明,蒸制是影响天麻趁鲜加工中代谢物差异的关键环节。

### 2.3 不同趁鲜切制工艺对天麻中主要成分含量的影响

参考《中国药典》2025 年版<sup>[1]</sup>对天麻饮片的质量要求及付艳等<sup>[7]</sup>采用熵权法评价天麻趁鲜切制质量的研究方法,选取天麻素和对羟基苯甲醇总量、巴利森苷类总量、多糖、蛋白质、醇溶性浸出物共 5 个考察指标进行熵权法分析。

**2.3.1 酚苷类成分含量的测定** 参照《中国药典》2025 年版方法<sup>[1]</sup>测定天麻素和对羟基苯甲醇含量;参照《毕节天麻质量评价》方法<sup>[10]</sup>测定巴利森苷类成分的含量。

(1) 对照品溶液的制备:取天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 E、巴利森苷 B、巴利森苷 C、巴利森苷 A 对照品适量,精密称定,加 30% 乙腈溶解并稀释,制成分别含天麻素 50.00 μg/mL、对羟基苯

甲醇 25.00 μg/mL、巴利森苷 E 83.57 μg/mL、巴利森苷 B 76.61 μg/mL、巴利森苷 C 28.73 μg/mL、巴利森苷 A 208.29 μg/mL 的混合对照品溶液。

(2) 供试品溶液的制备:天麻样品粉碎后过 60 目筛,称取 2.0 g,精密称定,置于 50 mL 锥形瓶中,加 60% 甲醇 25 mL,称定质量,超声(功率 250 W、频率 40 kHz)处理 60 min,冷却,再称定质量,用 60% 甲醇补足减失的质量,摇匀,滤过,取续滤液,0.45 μm 微孔滤膜滤过,即得供试品溶液。

(3) 色谱条件:色谱柱为 Symmetry® C<sub>18</sub> 柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm);流动相为乙腈-0.1% 磷酸水溶液;梯度洗脱条件:0~20 min, 3% 乙腈;20~30 min, 3%~4% 乙腈;30~35 min, 4%~5% 乙腈;35~45 min, 5%~10.1% 乙腈;45~60 min, 10.1%~10.2% 乙腈;检测波长 220 nm;体积流量 1 mL/min;柱温 35 °C。

(4) 专属性考察:分别精密吸取混合对照品溶液、供试品溶液各 10 μL,按上述色谱条件进样测定。结果表明,供试品色谱图中各待测成分峰与相邻峰分离度均大于 1.5,理论塔板数按各成分峰计算均不低于 5 000,方法专属性良好,HPLC 色谱图

见图3、4。

(5) 样品测定：精密吸取各供试品溶液 10  $\mu$ L，按照“2.3.1 (3)”项下色谱条件进样测定，记录峰面积，以外标法计算各成分含量。

**2.3.2 多糖、蛋白质和醇溶性浸出物的测定** 参照文献方法<sup>[11]</sup>测定天麻多糖含量。精密称定 9 份已测

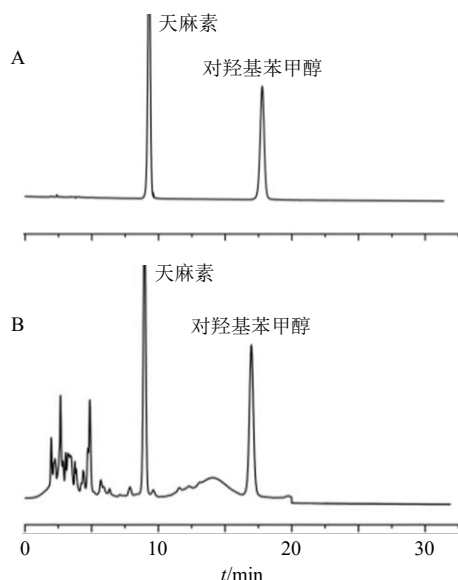
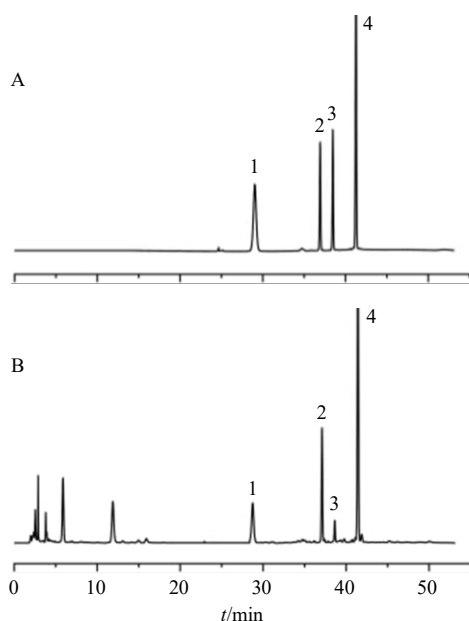


图3 酚苷类混合对照品 (A) 及 Q6 样品 (B) 的 HPLC 图

Fig. 3 HPLC of phenols glycoside mixed reference substances (A) and Q6 sample (B)



1-巴利森苷 E; 2-巴利森苷 B; 3-巴利森苷 C; 4-巴利森苷 A.  
1-balisenoside E; 2-balisenoside B; 3-balisenoside C; 4-balisenoside A.

图4 巴利森苷类混合对照品 (A) 及 Q6 样品 (B) 的 HPLC 图

Fig. 4 HPLC of balisenosides mixed reference substances (A) and Q6 sample (B)

知天麻多糖含量的天麻粉末 0.5 g，精密称定，分别按样品中天麻多糖质量分数的 50%、100%、150% 水平加入 D-无水葡萄糖对照品，按照供试品溶液制备方法进行操作，测定吸光度，计算得天麻多糖的平均加样回收率为 97.23%，RSD 为 1.35%，表明该方法加样回收率良好。

蛋白质的测定参照《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》GB5009.5-2016 方法<sup>[12]</sup>。醇溶性浸出物的测定参照《中国药典》2025 年版通则 2201 方法<sup>[1]</sup>。

**2.3.3 主要成分含量比较** 对不同趁鲜切制工艺的天麻进行成分含量检测，结果 (表 4) 显示，天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷类总量及多糖含量差异较大，其中天麻素质量分数的 RSD 为 58.84%，其后为对羟基苯甲醇、巴利森苷类、天麻素和对羟基苯甲醇总量及天麻多糖，RSD 分别为 56.40%、40.78%、37.42%、30.09%，蛋白质和浸出物含量差异较小，表明蒸制时间与烘干温度对天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷类及多糖含量具有显著影响。

## 2.4 综合评价法分析

**2.4.1 熵权法客观权重系数 ( $W_j$ )** 熵权法依据公式(1)(2)(3)(4)计算各项指标数据经归一化( $P_{ij}^*$ )、信息熵 ( $Q_j$ ) 值，最终计算熵值、差异系数得出各指标权重 ( $W_j$ )，计算综合评分值。将标准化后的数据与对应的权重系数相乘并进行累加，由此得到每个评价对象的综合评分。其中，指标归一化值=(实测值-最小值)/(最大值-最小值)。

$$X_{ij}' = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$P_{ij}^* = P_{ij} / \sum_{i=1}^n P_{ij} \quad (2)$$

$$Q_j = -\ln(1/n) / \sum_{i=1}^n P_{ij}^* \ln P_{ij}^* \quad (3)$$

$$W_j = (1 - Q_j) / \sum_{j=1}^m (1 - Q_j) \quad (4)$$

以天麻素和对羟基苯甲醇总量、巴利森苷类总量、多糖、蛋白质、醇溶性浸出物作为评价指标，分别计算其权重系数<sup>[7]</sup>。结果显示，天麻素和对羟基苯甲醇总量、巴利森苷类总量、多糖、蛋白质、醇溶性浸出物的权重系数结果如表 5 所示。

上述结果较为直观地反映了各指标在综合评价体系中的相对重要性，其中巴利森苷类总量所占权重最高，表明其在天麻饮片品质评价中具有较强的代表性。基于熵权法计算得到的各指标权重系数，对 16 批天麻饮片进行综合评分。结果 (表 6) 显示，Q6 组样品综合评分为 85.41 分，排名第 1；其后依次为 Q2、Q12、Q11、Q16、Q4、Q3、Q7、

表 4 天麻饮片不同加工工艺主要成分含量差异性分析 ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

Table 4 Analysis of difference of internal component contents in *Gastrodiae Rhizoma* Decoction slices by different processing methods ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

| 编号  | 质量分数/%                  |                         |                        |                          |                         |                          |                           |
|-----|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|
|     | 天麻素                     | 对羟基苯甲醇                  | 天麻素和对羟基苯甲醇总量           | 巴利森苷类                    | 多糖                      | 蛋白质                      | 醇溶性浸出物                    |
| Q1  | 0.01±0.01 <sup>l</sup>  | 0.27±0.01 <sup>c</sup>  | 0.28±0.01 <sup>c</sup> | 0.39±0.01 <sup>i</sup>   | 22.03±0.88 <sup>n</sup> | 7.32±0.08 <sup>de</sup>  | 30.29±0.06 <sup>a</sup>   |
| Q2  | 0.17±0.01 <sup>g</sup>  | 0.08±0.01 <sup>j</sup>  | 0.25±0.01 <sup>f</sup> | 1.26±0.01 <sup>d</sup>   | 75.68±0.22 <sup>c</sup> | 8.03±0.07 <sup>a</sup>   | 26.57±1.20 <sup>bc</sup>  |
| Q3  | 0.14±0.00 <sup>h</sup>  | 0.03±0.01 <sup>k</sup>  | 0.17±0.00 <sup>g</sup> | 1.75±0.02 <sup>a</sup>   | 65.07±0.51 <sup>f</sup> | 7.50±0.13 <sup>cd</sup>  | 27.48±0.83 <sup>b</sup>   |
| Q4  | 0.21±0.00 <sup>e</sup>  | 0.10±0.01 <sup>i</sup>  | 0.31±0.00 <sup>e</sup> | 1.46±0.02 <sup>bc</sup>  | 51.78±0.44 <sup>i</sup> | 7.54±0.06 <sup>cd</sup>  | 25.83±0.06 <sup>cde</sup> |
| Q5  | 0.03±0.00 <sup>k</sup>  | 0.13±0.01 <sup>fg</sup> | 0.16±0.00 <sup>g</sup> | 0.38±0.00 <sup>j</sup>   | 42.58±1.37 <sup>l</sup> | 7.14±0.12 <sup>ef</sup>  | 30.05±0.50 <sup>a</sup>   |
| Q6  | 0.22±0.01 <sup>e</sup>  | 0.13±0.01 <sup>ef</sup> | 0.35±0.01 <sup>d</sup> | 1.52±0.05 <sup>b</sup>   | 82.58±0.14 <sup>a</sup> | 7.69±0.30 <sup>bc</sup>  | 23.53±0.00 <sup>fg</sup>  |
| Q7  | 0.18±0.00 <sup>f</sup>  | 0.12±0.01 <sup>gh</sup> | 0.30±0.00 <sup>e</sup> | 1.04±0.01 <sup>efg</sup> | 75.83±0.22 <sup>c</sup> | 7.97±0.37 <sup>ab</sup>  | 22.83±0.00 <sup>g</sup>   |
| Q8  | 0.16±0.00 <sup>g</sup>  | 0.10±0.01 <sup>i</sup>  | 0.26±0.00 <sup>f</sup> | 1.02±0.01 <sup>fg</sup>  | 73.82±0.08 <sup>d</sup> | 7.00±0.06 <sup>f</sup>   | 20.65±0.50 <sup>h</sup>   |
| Q9  | 0.05±0.01 <sup>j</sup>  | 0.19±0.01 <sup>b</sup>  | 0.24±0.02 <sup>d</sup> | 0.39±0.00 <sup>j</sup>   | 37.21±0.64 <sup>m</sup> | 7.49±0.02 <sup>cd</sup>  | 25.93±0.88 <sup>bcd</sup> |
| Q10 | 0.29±0.02 <sup>ab</sup> | 0.24±0.01 <sup>de</sup> | 0.53±0.02 <sup>b</sup> | 1.09±0.07 <sup>ef</sup>  | 57.10±0.64 <sup>g</sup> | 5.50±0.03 <sup>h</sup>   | 22.98±1.13 <sup>g</sup>   |
| Q11 | 0.28±0.01 <sup>b</sup>  | 0.15±0.01 <sup>gh</sup> | 0.43±0.02 <sup>c</sup> | 1.11±0.06 <sup>e</sup>   | 71.73±0.26 <sup>c</sup> | 6.21±0.08 <sup>g</sup>   | 25.45±0.03 <sup>cde</sup> |
| Q12 | 0.26±0.01 <sup>c</sup>  | 0.10±0.01 <sup>ij</sup> | 0.36±0.01 <sup>d</sup> | 1.41±0.06 <sup>c</sup>   | 77.50±0.20 <sup>b</sup> | 6.17±0.02 <sup>g</sup>   | 22.80±2.03 <sup>g</sup>   |
| Q13 | 0.11±0.01 <sup>i</sup>  | 0.09±0.01 <sup>a</sup>  | 0.20±0.01 <sup>a</sup> | 0.58±0.02 <sup>h</sup>   | 47.23±1.05 <sup>k</sup> | 7.77±0.09 <sup>abc</sup> | 24.32±0.51 <sup>efg</sup> |
| Q14 | 0.22±0.01 <sup>e</sup>  | 0.37±0.01 <sup>d</sup>  | 0.59±0.01 <sup>d</sup> | 1.03±0.10 <sup>efg</sup> | 55.16±0.11 <sup>h</sup> | 5.68±0.04 <sup>h</sup>   | 24.66±0.52 <sup>def</sup> |
| Q15 | 0.25±0.00 <sup>d</sup>  | 0.16±0.01 <sup>gh</sup> | 0.41±0.01 <sup>d</sup> | 0.99±0.04 <sup>g</sup>   | 42.21±0.16 <sup>l</sup> | 6.29±0.17 <sup>g</sup>   | 24.81±0.02 <sup>def</sup> |
| Q16 | 0.29±0.01 <sup>a</sup>  | 0.12±0.01 <sup>i</sup>  | 0.41±0.01 <sup>c</sup> | 1.47±0.04 <sup>bc</sup>  | 49.22±0.20 <sup>j</sup> | 6.05±0.02 <sup>g</sup>   | 24.93±0.01 <sup>def</sup> |
| RSD | 58.84                   | 56.40                   | 37.42                  | 40.78                    | 30.09                   | 12.11                    | 10.18                     |

同列数值后不同字母 a~n 表示同一处理间差异达到 0.05 显著水平。

The presence of different letters from a to n after the same column value indicates that the observed differences between treatments are statistically significant at a 5% level.

表 5 各指标  $W_j$  计算结果

Table 5 Calculation results of each index  $W_j$

| 考察指标         | 熵值      | 差异系数    | $W_j/\%$ |
|--------------|---------|---------|----------|
| 天麻素和对羟基苯甲醇总量 | 0.933 9 | 0.066 1 | 19.09    |
| 巴利森苷类        | 0.903 4 | 0.096 6 | 27.90    |
| 多糖           | 0.949 5 | 0.050 5 | 14.59    |
| 蛋白质          | 0.927 1 | 0.072 9 | 21.04    |
| 醇溶性浸出物       | 0.939 8 | 0.060 2 | 17.39    |

Q13 等。综上,新鲜块茎斜切成 5 mm, 蒸制 5 min, 45 °C 烘干(烘 12 h, 室温回汗 12 h)的趁鲜切制工艺 Q6 综合评分较高。

**2.4.2 TOPSIS 法评价结果** 采用 SPSS PRO 在线数据分析平台(<https://www.spsspro.com>)进行 TOPSIS 分析。通过该平台构建加权决策矩阵,计算各评价对象与正、负理想解的距离( $D^+$ 、 $D^-$ ),以衡量方案的优劣,正、负理想解(非距离)分别代表评价指标的最大值或最小值(即最优解或最劣解),重点在于比较各方案与最优和最劣方案的接近程度,最终得出基于欧氏贴近度( $C_i$  值)的综合评价排序结果,从而实现对方案的排序和评价<sup>[13]</sup>。综合

得分排名前 5 的样品依次为 Q6、Q2、Q4、Q3、Q7(表 7)。其中,蒸制 0 min 的 3 组样品(Q2、Q3、Q4)均进入前 5,提示蒸制 0 min 处理在多指标协同评价中也具备突出优势。Q2、Q3、Q4 样品中虽天麻素与对羟基苯甲醇总量存在未达标(Q3)或仅临界达标(Q2、Q4)的情况,但醇溶性浸出物、天麻多糖、可溶性蛋白等营养与功能活性成分得分更加显著。天麻多糖具有免疫调节、神经保护、抗氧化与抗衰老作用,醇溶性浸出物富含萜类、甾醇及多酚类协同活性物质,可溶性蛋白为天麻药食同源应用提供营养支撑。综上,Q6 为天麻药用饮片最优工艺,Q2、Q4、Q3 可作为天麻滋补类产品、功能食品原料加工方式。

## 2.5 基于雷达图的综合评价

选取天麻素和对羟基苯甲醇总量、巴利森苷类总量、醇溶性浸出物、多糖、蛋白质 5 个关键内在指标作为评价依据,运用 Origin 2024 软件将各样品的相关数据绘制成雷达图(图 5),并借助 Image J 软件计算 16 种样品的雷达图面积,综合评价结果从大到小排列依次为 Q6>Q2>Q4>Q3>Q7>Q11>



表 6 天麻饮片质量熵权法评价排序 (n = 3)  
Table 6 Evaluation ranking of *Gastrodiae Rhizoma* quality by entropy weight method (n = 3)

| 编号  | 评分         |           |       |       |            | 综合<br>评分 | 排序 |
|-----|------------|-----------|-------|-------|------------|----------|----|
|     | 对羟基<br>苯甲醇 | 巴利森<br>苷类 | 多糖    | 蛋白质   | 醇溶性<br>浸出物 |          |    |
| Q1  | 15.46      | 4.20      | 4.17  | 16.08 | 19.18      | 59.09    | 15 |
| Q2  | 13.25      | 13.59     | 17.25 | 17.64 | 16.82      | 78.55    | 2  |
| Q3  | 8.82       | 18.91     | 12.31 | 16.47 | 17.40      | 73.92    | 7  |
| Q4  | 16.54      | 15.72     | 9.79  | 16.57 | 16.36      | 74.98    | 6  |
| Q5  | 8.52       | 4.10      | 8.05  | 15.69 | 19.03      | 55.39    | 16 |
| Q6  | 19.26      | 16.38     | 17.98 | 16.89 | 14.90      | 85.41    | 1  |
| Q7  | 15.99      | 11.25     | 14.34 | 17.51 | 14.46      | 73.91    | 8  |
| Q8  | 13.91      | 10.96     | 13.96 | 15.37 | 13.07      | 67.66    | 12 |
| Q9  | 18.99      | 4.19      | 7.04  | 16.46 | 16.42      | 63.10    | 14 |
| Q10 | 23.87      | 11.75     | 10.80 | 12.07 | 14.55      | 73.04    | 10 |
| Q11 | 21.41      | 11.99     | 13.57 | 13.63 | 16.12      | 76.72    | 4  |
| Q12 | 19.05      | 15.21     | 14.66 | 13.54 | 14.44      | 76.90    | 3  |
| Q13 | 26.29      | 6.23      | 8.93  | 17.07 | 15.40      | 73.55    | 9  |
| Q14 | 20.15      | 11.12     | 10.43 | 12.47 | 15.62      | 69.79    | 11 |
| Q15 | 19.53      | 10.62     | 7.98  | 13.82 | 15.71      | 67.27    | 13 |
| Q16 | 21.59      | 15.85     | 9.31  | 13.28 | 15.79      | 75.82    | 5  |

表 7 天麻饮片质量 TOPSIS 法评价排序  
Table 7 Quality evaluation ranking of *Gastrodiae Rhizoma*

| 编号  | $D^+$   | $D^-$   | 综合得分指数  | 排序 |
|-----|---------|---------|---------|----|
| Q1  | 0.712 8 | 0.558 4 | 0.439 2 | 12 |
| Q2  | 0.408 0 | 0.720 0 | 0.638 3 | 2  |
| Q3  | 0.469 6 | 0.755 8 | 0.616 7 | 4  |
| Q4  | 0.391 2 | 0.658 1 | 0.627 2 | 3  |
| Q5  | 0.747 8 | 0.520 4 | 0.410 3 | 16 |
| Q6  | 0.356 8 | 0.761 5 | 0.680 9 | 1  |
| Q7  | 0.494 4 | 0.650 9 | 0.568 3 | 5  |
| Q8  | 0.620 3 | 0.507 8 | 0.450 1 | 11 |
| Q9  | 0.659 1 | 0.508 1 | 0.435 3 | 13 |
| Q10 | 0.636 1 | 0.525 1 | 0.452 2 | 10 |
| Q11 | 0.482 3 | 0.580 9 | 0.546 4 | 6  |
| Q12 | 0.518 5 | 0.607 9 | 0.539 7 | 8  |
| Q13 | 0.568 2 | 0.645 2 | 0.531 7 | 9  |
| Q14 | 0.608 7 | 0.468 3 | 0.434 8 | 14 |
| Q15 | 0.578 9 | 0.443 3 | 0.433 7 | 15 |
| Q16 | 0.502 1 | 0.593 5 | 0.541 7 | 7  |

Q16>Q12>Q13>Q10>Q8>Q1>Q9>Q14>Q15>Q5, 这与 TOPSIS 法的评价结果完全一致。

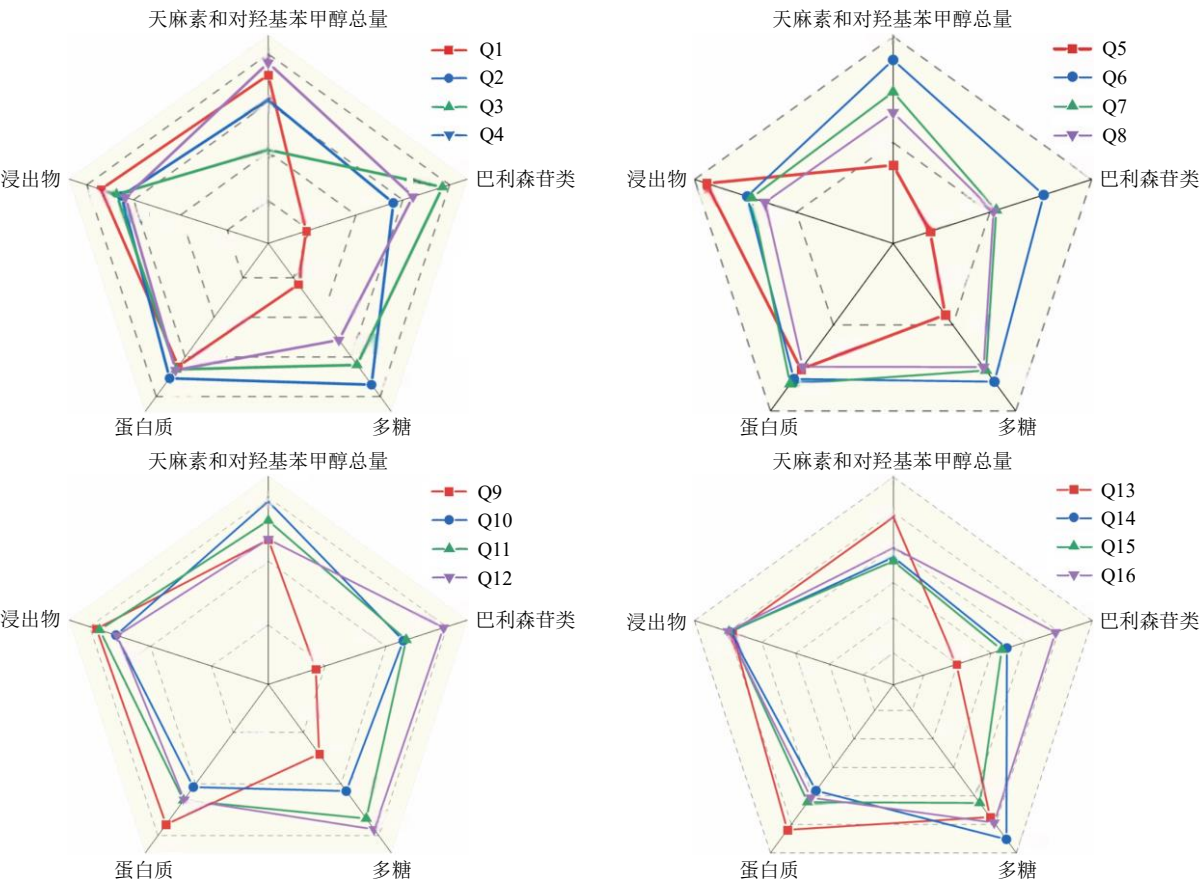


图 5 天麻样品雷达图  
Fig. 5 Radar map of *Gastrodiae Rhizoma* samples



该结果进一步表明, Q6 为天麻药用饮片最优工艺, 即: 新鲜块茎斜切成 5 mm, 蒸制 5 min, 45 °C 烘干 (烘 12 h, 室温回汗 12 h); Q2、Q4、Q3 可作为天麻滋补类产品、功能食品原料加工方式。

### 3 讨论

蒸制是天麻加工中常见且重要的工序, 其通过高温瞬时灭活酶类, 显著影响化学成分的转化与积累。现有研究表明, 蒸煮能使较高相对分子质量的巴利森苷 A、天麻醚苷及 4,4'-二羟基二苄基醚降解为天麻素、对羟基苯甲醇及其他低相对分子质量巴利森苷<sup>[14]</sup>; 蒸制结合热泵干燥, 可更好地保留天麻的功能活性成分, 并减轻苦味、“马尿臭”等不良风味<sup>[15]</sup>; 在蒸制烘干过程中, 对羟基苯甲醇存在双向变化机制, 一方面由巴利森苷类转化生成, 另一方面随水蒸气蒸馏损失<sup>[16]</sup>; 此外, 蒸制还能改善天麻的外观品质, 使细胞内形成黏性碎片, 中层果胶降解导致细胞壁破坏, 组织软化<sup>[17-18]</sup>。

上述文献表明蒸制通过酶灭活、热降解及挥发损失等多种途径, 影响天麻中化学成分的种类、含量及物理形态。本研究筛选出 7 个成分在蒸制前后差异显著, 巴利森苷是由天麻素及其衍生物和柠檬酸组成的酯类化合物, 在蒸、煮等加热条件下酯键容易断裂发生降解, 与文献报道的蒸制能促进巴利森苷类降解及糖苷类成分变化相一致<sup>[5]</sup>。天麻素和对羟基苯甲醇作为药典规定的指标成分, 在不同产地或特定工艺条件下并非主要的差异来源, 而是相对稳定的质量评价指标<sup>[19]</sup>。熊汝琴等<sup>[16]</sup>提出的双向变化机制, 认为这种稳定性源于生成与降解在蒸制过程中达到动态平衡。综上, 本研究和文献报道共同证实蒸制对天麻有效成分的形成及药效保障至关重要。

天麻多糖和蛋白质是重要的营养及功效物质基础。已有研究发现, 蒸制或加热会诱导多糖降解为寡糖或单糖, 例如传统加工中二次蒸制促进金荞麦多糖转化<sup>[20]</sup>，“九蒸九制”过程中黄精多糖含量先降后升再趋于稳定<sup>[21]</sup>, 随蒸制时间延长黄精多糖呈下降趋势<sup>[22]</sup>。这些研究表明多糖对热处理敏感, 降解后的小分子糖类更利于煎出和吸收。本研究中蒸制 20 min 样品多糖含量明显下降, 与上述文献规律一致, 推测蒸制导致天麻多糖水解为低聚糖或单糖, 虽使多糖总量降低, 但可能提高其生物利用度。相比之下, 蛋白质总量受蒸制影响较小, 尽管可能发生变性, 但总量保持稳定<sup>[23]</sup>, 本研究结果与报道

一致。

熵权-TOPSIS 法是一种将熵权法的客观赋权能力与 TOPSIS 法的理想解排序功能相结合的综合评价方法。该方法利用熵权法基于各评价指标观测数据的离散程度计算信息熵, 根据熵值大小确定各指标权重, 有效避免人为赋权的主观性; 又通过 TOPSIS 法计算各评价对象与正负理想解的欧氏贴近度, 直观、准确地反映不同样品间的综合质量差异并实现优劣排序, 该方法已成功应用于灵芝、大株红景天等多种中药材及饮片的质量综合评价与工艺优选<sup>[24-25]</sup>。本研究采用熵权-TOPSIS 法, 既能体现以天麻素和对羟基苯甲醇总量为核心药效指标, 又能兼顾具有抗氧化、免疫调节、滋补保健及食品功能的巴利森苷类总量、多糖、蛋白质、醇溶性浸出物等多类成分, 实现了对天麻趁鲜切制饮片质量的全面综合评价。

本研究借助 UPLC-Q-TOF-MS 技术, 成功从趁鲜加工天麻中鉴定出 46 种潜在化学成分, 并表征了 27 种化合物。运用熵权法和 TOPSIS 法相结合, 天麻药用饮片趁鲜加工的最优工艺为新鲜天麻块茎斜切成 5 mm 时, 蒸制 5 min, 45 °C 烘干, 未蒸制可作为天麻滋补类产品、功能食品原料加工方式。加工工艺在实际应用中具备良好的可行性与推广价值, 为天麻饮片标准化生产、质量控制及产业化开发提供科学指导。

**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: 61-62.
- [2] 范殊琮, 刘东雪, 陈琛. 基于文献计量的天麻研究发展态势和热点分析 [J]. 中国现代应用药学, 2021, 38(21): 2754-2762.
- [3] Han Y J, Je J H, Kim S H, et al. *Gastrodia elata* shows neuroprotective effects via activation of PI3K signaling against oxidative glutamate toxicity in HT22 cells [J]. *Am J Chin Med*, 2014, 42(4): 1007-1019.
- [4] 杜伟锋, 陈琳, 丛晓东, 等. 天麻化学成分及质量控制研究进展 [J]. 中成药, 2011, 33(10): 1785-1787.
- [5] 陈岗, 李红, 王勇德, 等. 炮制加工对天麻化学成分影响的研究进展 [J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(3): 539-549.
- [6] 肖佳佳. “天麻饮片”的质量评价及加工工艺研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2017.
- [7] 付艳, 周涛, 许清清, 等. 基于熵权法和层次分析法优选天麻趁鲜切制方法 [J]. 中草药, 2024, 55(5): 1493-

- 1501.
- [8] 杨成翠, 包刘媛, 李春燕, 等. 不同加工工艺对昭通天麻主要成分含量的影响 [J]. 湖南农业科学, 2023(12): 51-56.
- [9] Fu Y, Xu Q Q, Zhang J Q, *et al.* Identifying the quality markers and optimizing the processing of *Gastrodia Rhizoma* to treat brain diseases [J]. *Front Pharmacol*, 2024, 15: 1396825.
- [10] 张玥, 周雪, 王彩云, 等. 毕节天麻质量评价 [J]. 中成药, 2022, 44(4): 1079-1085.
- [11] Ji N, Liu P, Zhang N, *et al.* Comparison on bioactivities and characteristics of polysaccharides from four varieties of *Gastrodia elata* Blume [J]. *Front Chem*, 2022, 10: 956724.
- [12] 王金灿. GB5009.5-2016《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》之 5.1 凯氏定氮法具体操作疑难解析 [J]. 食品安全导刊, 2018(30): 54-55.
- [13] 戴力新, 肖莺, 戚湧. 长三角地区技术转移与成果转化能力评价及影响因素研究: 基于熵权-TOPSIS 和分位数回归分析 [J]. 中国科技资源导刊, 2024, 56(1): 82-91.
- [14] 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.
- [15] Li S, He X H, Zhang X C, *et al.* Integration of volatile and non-volatile metabolite profile, and *in vitro* digestion reveals the differences between different preparation methods on physico-chemical and biological properties of *Gastrodia elata* [J]. *Food Chem*, 2025, 463: 141177.
- [16] 熊汝琴, 王锐, 陈顺芳, 等. 不同产地红天麻挥发性成分分析 [J]. 湖北农业科学, 2014, 53(17): 4167-4169.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 杨肖衣, 唐成林, 符凌玮, 等. 贵州不同区域乌、红天麻质量差异分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 241-251.
- [20] 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.
- [21] 董宁, 陈西, 李旭博, 等. 基于颜色-多糖-抗氧化活性关联分析探究黄精九蒸九制质量变化 [J]. 中草药, 2025, 56(2): 476-486.
- [22] 岳珠珠, 王志成, 姜明瑞, 等. 多花黄精酒蒸过程中色泽与化学成分含量的相关性研究 [J]. 时珍国医国药, 2023, 34(2): 356-359.
- [23] 戴振庭, 周惠敏, 殷泽生, 等. 蒸制过程中鲢鱼背肉的品质及风味变化 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 301-309.
- [24] 杨志城, 孙彩虹, 叶冠. 基于多糖及熵权-TOPSIS 的灵芝孢子粉药材质量评价 [J]. 中医药导报, 2024, 30(10): 65-70.
- [25] 亓国锋, 侯迎迎, 李刚刚, 等. HPLC 多成分定量及化学计量学、熵权 TOPSIS 模型在大株红景天质量综合评价中的应用 [J]. 南开大学学报: 自然科学版, 2024, 57(3): 51-57.

[责任编辑 郑礼胜]