

多指标决策分析 TOPSIS 对三七的质量评价研究

李 运^{1,2,3}, 张 霁^{1,2}, 徐福荣³, 刘 飞⁴, 王元忠^{1,2*}, 张金渝^{1,2,3*}

1. 云南省农业科学院药用植物研究所, 云南 昆明 650200

2. 云南省省级中药原料质量监测技术服务中心, 云南 昆明 650200

3. 云南中医学院中药学院, 云南 昆明 650500

4. 玉溪师范学院, 云南 玉溪 653100

摘 要:目的 以多个指标对三七 *Panax notoginseng* 进行优质种源筛选, 提高三七的整体质量评价水平。方法 通过测定云南省 12 个产地三七样品中三七皂苷 R_1 、人参皂苷 R_{g1} 、人参皂苷 R_e 、人参皂苷 R_{b1} 、总黄酮和总多糖的量, 结合逼近理想解排序法 (TOPSIS) 建立整体质量评价模型。结果 文山、红河、玉溪、昆明和曲靖三七样品与最优方案接近程度 C_i 的平均值分别为 0.300 2、0.341 1、0.279 5、0.338 7 与 0.323 0, 表明云南不同产地三七的整体质量较为接近, 道地产地文山与其余产地三七的整体质量差别较小。样品编号为 S_{46} 、 S_{16} 及 S_{33} 的 C_i 值在所有样品中排名前 3, 表明这 3 个样品的整体质量较高, 可作为优质种源进一步开发利用。结论 熵权 TOPSIS 模型排除了人为因素的干扰, 并将多维问题转化为一维问题, 提高了多指标决策分析的科学与准确性, 可对三七进行整体质量评价及优质种源筛选。该方法理论完善、易于操作, 可推广于其他中药的相关研究, 为保证中药安全、稳定及有效提供研究基础。

关键词: 三七; 多指标决策分析; TOPSIS; 质量评价; 三七皂苷 R_1 ; 人参皂苷 R_{g1} ; 人参皂苷 R_e ; 人参皂苷 R_{b1}

中图分类号: R286.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2670(2017)22-4764-08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2017.22.027

Multiple attribute decision making analysis TOPSIS on quality evaluation study of *Panax notoginseng*

LI Yun^{1,2,3}, ZHANG Ji^{1,2}, XU Fu-rong³, LIU Fei⁴, WANG Yuan-zhong^{1,2}, ZHANG Jin-yu^{1,2,3}

1. Institute of Medicinal Plants, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650200, China

2. Yunnan Technical Center for Quality of Chinese Materia Medica, Kunming 650200, China

3. College of Traditional Chinese Medicine, Yunnan University of Traditional Chinese Medicine, Kunming 650500, China

4. Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China

Abstract: Objective The selection of excellent provenances by using multi-index test can improve the overall quality and stability of *Panax notoginseng*. **Methods** In this study, *Panax notoginseng* samples were collected from 12 sites in Yunnan Province. The contents of notoginsenoside R_1 , ginsenoside R_{g1} , ginsenoside R_e , ginsenoside R_{b1} , total flavonoids and total polysaccharides were determined, and the entire quality evaluation model was established by technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS). **Results** The averaged C_i of samples from Wenshan, Honghe, Yuxi, Kunming, and Qujing were 0.300 2, 0.341 1, 0.279 5, 0.338 7, and 0.323 0, respectively. It was indicated that the overall quality of *P. notoginseng* from different origins of Yunnan Province was similar, and there were few differences among the overall qualities of samples from Wenshan which was the traditional genuine region of *P. notoginseng* and the other ones. The C_i values of S_{46} , S_{16} , and S_{33} topped the list of all samples, which showed that these three samples have higher overall qualities, and they can be used as the dominant provenances for the further study. **Conclusion** The model of entropy weight TOPSIS could eliminate the interference of the artificial factors, transform multiple dimension problems into one dimension problem, and increase the scientificity and accuracy of the multi-criteria decision analysis, obviously. It could obtain a better result on the overall quality evaluation and the dominant provenance selection of *P. notoginseng*. On the other hand, this method is easy to perform and the

收稿日期: 2017-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31760360, 81460581); 云南省教育厅科学研究基金资助项目 (2015Y408); 云南省科技入滇专项 (2017IB038)

作者简介: 李 运, 男, 硕士研究生, 研究方向为中药资源开发与利用。E-mail: liyunsci@163.com

*通信作者 王元忠, 副研究员, 研究方向为中药资源开发与利用。E-mail: boletus@126.com

张金渝, 研究员, 研究方向为药用植物资源。E-mail: jy Zhang2008@126.com

theory was perfect. It can be also used in the correlative study of other TCMs and provide the research basis in order to ensure the safety, stability and effectiveness of TCMs.

Key words: *Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen; multiple attribute decision making analysis; TOPSIS; quality evaluation; notoginsenoside R₁; ginsenoside Rg₁; ginsenoside Re; ginsenoside Rb₁

中药的质量直接关系到临床用药的安全性与有效性, 是中药发展与研究的核心问题。科学全面的质量控制有利于中药的安全、稳定及有效使用, 也是中药发展走向现代化与国际化的必要途径。中药化学成分复杂多样^[1-2], 多组分协同是中药发挥多通道、多靶点药理作用的重要途径^[3-4]。因此, 以多个指标对中药进行整体质量控制, 可以弥补以往单一指标的不足。另一方面, 多指标评价有利于优质种源的筛选, 从种质资源的角度对中药进行质量控制, 进一步保证中药质量的稳定及可控。

三七为五加科植物三七 *Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen 的干燥根和根茎^[5], 有 600 年左右的药用历史^[6-7], 是我国特有名贵药材。三七化学成分十分丰富, 有超过 200 种化学成分被发现, 包括皂苷类、黄酮类、糖类等^[8]。现代药理学研究表明, 三七总皂苷具有抗动脉粥样硬化^[9-11]、保护脑神经^[12]、降血压^[13]等药理作用; 三七总黄酮具有抗氧化^[14]、免疫性肝损伤保护^[15]等药理作用; 三七总多糖具有增强免疫^[16]、保护脑缺血再灌注损伤^[17]、改善肝脏脂代谢^[18]等药理作用。《中国药典》2015 年版仅以 3 种皂苷对三七进行质量控制^[5], 评价指标类型较为单一, 难以对三七进行整体质量控制。

我国拥有 400 多年的三七种植历史^[19], 在漫长的栽培历史中, 通过人工选择及留种等措施使三七逐步演化成基本性状相对整齐的栽培群体^[20]。但是通过调查发现, 三七栽培居群根、茎、叶、花等器官的个体间形态差异依然较大^[21]。张金渝等^[22]通过 EST-SSR 对文山 6 个栽培居群三七遗传多样性进行了分析, 发现三七栽培居群具有丰富的遗传多样性。丰富的形态差异及遗传多样性有利于保持三七的生态适应性和三七种源不退化, 但同时也会影响三七药材质量的稳定性^[21]。因此, 对三七进行优质种源的筛选并培育出改良品种, 有利于提高三七药材的质量及其稳定性。

逼近理想解排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 是根据评价对象与理想化目标的接近程度进行顺序

优选的一种多指标决策分析方法。TOPSIS 通过将多指标计算为一个综合指标, 把多维问题转化为一维问题, 大大降低了分析过程中不同类型指标对决策的干扰, 明显提高了多目标决策分析的科学性和准确性。该方法广泛应用于资源规划^[23-24]、性能评估^[25-26]等领域, 在食品^[27-28]、中药^[29-30]以及种质资源^[31]的综合评价中也有研究, 并取得了较好的分析结果。

本实验采用高效液相色谱法测定云南省 12 个栽培居群三七中三七皂苷 R₁、人参皂苷 Rg₁、人参皂苷 Re 及人参皂苷 Rb₁ 量, 紫外可见分光光度法测定三七总黄酮及三七总多糖量。结合 TOPSIS 对三七质量进行综合评价, 同时基于有效成分量对三七进行优质种源筛选, 以期多为指标的三七整体质量控制以及优质种源筛选提供研究基础, 从而保证三七用药安全、有效和稳定。

1 材料与仪器

1.1 材料

栽培三七样品采集于云南省 12 个产地, 均为 3 年生, 见表 1; 所有样品经云南省农业科学院药用植物研究所张金渝研究员鉴定为三七 *P. notoginseng* (Burk.) F. H. Chen 的干燥主根。实验前将样品粉碎后过 80 目筛, 烘箱 50 °C 烘干至恒定质量, 备用。

1.2 试剂

甲醇、乙腈为色谱纯; 乙醇、AlCl₃、硫酸、苯酚为分析纯; 超纯水 (电阻率: 18.25 MΩ·cm); 无水葡萄糖 (Sigma-Aldrich 公司); 对照品三七皂苷 R₁ (批号 110745-201318, 质量分数以 94.0%计)、人参皂苷 Rg₁ (批号 110703-201530, 质量分数以 91.7%计)、人参皂苷 Re (批号 110754-201525, 质量分数以 92.3%计) 和人参皂苷 Rb₁ (批号 110704-201424, 质量分数以 93.7%计) 购自中国食品药品检定研究院; 芦丁 (批号 110704-201426, 质量分数 92.5%) 购自中国食品药品检定研究院。

1.3 仪器

LC-10 ATvp 高效液相色谱仪 (配备二极管阵列检测器、二元泵、手动进样器、CLASS-VP 工作站, 日本岛津); Inertsil ODS-3 色谱柱 (150 mm×4.6 mm, 5 μm); TU-1901 紫外可见分光光度计 (波长

表 1 三七样品信息

Table 1 Information of *P. notoginseng* samples

编号	产地	编号	产地
S ₁ ~S ₅	文山州文山县	S ₂₇ 、S ₂₈	玉溪市峨山县
S ₆ ~S ₉	文山州砚山县	S ₂₉ 、S ₃₀	昆明市石林县
S ₁₀ 、S ₁₁	文山州丘北县	S ₃₁ ~S ₃₅	昆明市寻甸县
S ₁₂ ~S ₁₆	红河州蒙自县	S ₃₆ ~S ₄₀	曲靖市马龙县
S ₁₇ ~S ₂₁	红河州建水县	S ₄₁ ~S ₄₅	曲靖市罗平县
S ₂₂ ~S ₂₆	玉溪市江川县	S ₄₆ ~S ₅₀	曲靖市师宗县

190~900 nm, 光度范围-4.0~4.0 Abs, 光度噪声±0.000 4 Abs, 北京普析通用仪器有限责任公司); Milli-Q 超纯水系统 (美国 Millipore 公司); HC-3018R 高速冷冻离心机 (安徽中科中佳科学仪器有限公司); SY3200-T 超声仪 (上海声源超声波仪器设备有限公司); FW-100 高速粉碎机 (上海书培实验设备有限公司)。

2 方法与结果

2.1 HPLC 法测定皂苷成分^[5]

2.1.1 对照品溶液的制备 精密称取三七皂苷 R₁、人参皂苷 Rg₁、人参皂苷 Re 和人参皂苷 Rb₁ 对照品各 2.00、3.00、2.20、2.40 mg 并溶解于 1 mL

甲醇溶液, 按照 60%等梯度稀释 7 次, 共得 8 个质量浓度梯度的对照品溶液。

2.1.2 供试品溶液的制备 准确称取 (100.00±0.30) mg 三七样品粉末, 加入 2 mL 甲醇, 密封试管口超声提取 1 h。超声结束后使用 0.22 μm 有机微孔滤膜滤过得到滤液。

2.1.3 色谱条件 色谱流动相与梯度洗脱程序参照《中国药典》2015 年版 (一部) 对三七中皂苷的测定部分^[5]; 流动相为超纯水 (A)-乙腈 (B), 梯度洗脱程序: 0~12 min, 19% B; 12~60 min, 19%~36% B。体积流量 1 mL/min, 柱温 30 ℃, 进样量 10 μL, 检测波长 203 nm。

2.1.4 方法学考察

(1) 线性关系考察: 分别精密吸取三七皂苷 R₁、人参皂苷 Rg₁、人参皂苷 Re 与 人参皂苷 Rb₁ 不同质量浓度梯度对照品溶液 10 μL, 按“2.1.3”项下的色谱条件进样测定, 以各皂苷成分的质量浓度为横坐标 (X), 峰面积为纵坐标 (Y), 绘制线性回归方程。4 种皂苷对照品的回归方程、回归系数和线性范围见表 2, 由表 2 可知皂苷对照品的线性关系良好。

表 2 6 种对照品线性关系考察结果

Table 2 Linear relation of six standard samples

对照品	回归方程	R ²	线性浓度范围/(μg·mL ⁻¹)
三七皂苷 R ₁	$Y=2\,479\,383.345\,0\,X+16\,098.984\,0$	0.999 8	55.99~2 000.00
人参皂苷 Rg ₁	$Y=1\,769\,279.334\,8\,X+63\,462.778\,7$	0.999 8	83.98~3 000.00
人参皂苷 Re	$Y=2\,071\,563.329\,7\,X+53\,410.423\,4$	0.997 4	61.69~2 200.00
人参皂苷 Rb ₁	$Y=1\,950\,647.382\,5\,X+59\,072.627\,3$	0.999 5	67.19~2 400.00
总黄酮 (芦丁)	$Y=2.407\,6\,X+0.049\,3$	0.999 7	5.60~72.00
总多糖 (葡萄糖)	$Y=0.049\,5\,X+0.042\,3$	0.999 2	2.18~43.54

(2) 精密度试验: 取三七样品 (S₁), 按“2.1.2”项制备供试品溶液, 按“2.1.3”项下的色谱条件重复进样 6 次, 记录三七皂苷 R₁、人参皂苷 Rg₁、人参皂苷 Re 和人参皂苷 Rb₁ 的峰面积, 结果发现这 4 种皂苷峰面积 RSD 分别为 1.64%、1.91%、1.20% 与 0.87%, 表明仪器精密度较好。

(3) 重复性试验: 平行称取同一样品 (S₁) 6 份, 按“2.1.2”项制备供试品溶液, 按“2.1.3”项下的色谱条件进样测定, 记录三七皂苷 R₁、人参皂苷 Rg₁、人参皂苷 Re 和人参皂苷 Rb₁ 的峰面积, 结果发现这 4 种皂苷峰面积 RSD 分别为 0.91%、1.53%、1.42% 与 1.48%, 表明该方法重复性较好。

(4) 稳定性试验: 取三七样品 (S₁), 按“2.1.2”

项制备供试品溶液, 分别于 0、2、4、8、12 与 24 h 按“2.1.3”项下的色谱条件进样测定, 结果发现三七皂苷 R₁、人参皂苷 Rg₁、人参皂苷 Re 和人参皂苷 Rb₁ 的峰面积 RSD 分别为 0.77%、1.06%、0.82%、0.89%, 表明供试品溶液在 24h 内稳定。

(5) 加样回收率试验: 平行称取已测定皂苷量的三七样品 6 份, 分别加入三七皂苷 R₁、人参皂苷 Rg₁、人参皂苷 Re 和人参皂苷 Rb₁ 对照品适量, 按“2.1.2”项制备供试品溶液, 按“2.1.3”项下的色谱条件进样测定。计算三七皂苷 R₁、人参皂苷 Rg₁、人参皂苷 Re 和人参皂苷 Rb₁ 平均加样回收率分别为 99.75%、101.31%、98.47%、99.23%, RSD 分别为 1.31%、1.60%、0.76%、1.50%, 表明该方法具

有较好的回收率。

2.1.5 皂苷成分的测定 取三七样品, 按“2.1.2”项制备供试品溶液, 按“2.1.3”项下色谱条件进样

测定, 记录上述皂苷的峰面积。根据皂苷对照品标准曲线计算被测样品中三七皂苷 R_1 、人参皂苷 R_{g1} 、人参皂苷 R_e 和人参皂苷 R_{b1} 量, 结果见表 3。

表 3 三七样品 6 种指标成分测定结果

Table 3 Content of six index components of *P. notoginseng* samples

编号	质量分数/(mg·g ⁻¹)						编号	质量分数/(mg·g ⁻¹)					
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆		B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆
S ₁	6.37	43.39	14.79	29.53	7.65	6.10	S ₂₆	6.73	49.36	5.20	51.21	7.88	10.76
S ₂	15.11	50.39	4.97	17.59	6.72	3.12	S ₂₇	3.07	34.69	2.02	35.68	5.49	7.88
S ₃	2.91	52.56	10.16	23.01	7.12	3.71	S ₂₈	4.28	49.12	1.79	28.69	7.78	12.90
S ₄	7.33	63.60	6.05	27.40	7.50	4.83	S ₂₉	4.28	66.50	3.50	15.14	6.35	33.67
S ₅	6.42	67.92	8.33	27.04	10.27	3.61	S ₃₀	5.62	57.12	6.34	27.63	8.98	12.57
S ₆	8.28	56.65	4.19	32.28	6.69	8.70	S ₃₁	5.56	41.63	1.49	33.57	4.79	21.86
S ₇	6.91	48.47	9.93	46.19	6.87	11.78	S ₃₂	8.65	53.51	5.06	14.89	5.94	26.59
S ₈	5.90	49.17	3.68	41.19	6.80	11.17	S ₃₃	8.46	59.73	16.47	28.33	7.17	34.46
S ₉	7.97	50.88	9.93	28.25	6.47	11.01	S ₃₄	5.90	50.79	2.83	21.40	6.55	32.83
S ₁₀	5.17	11.89	1.38	25.66	5.37	25.37	S ₃₅	4.21	42.62	8.25	33.34	5.56	12.72
S ₁₁	3.74	32.92	3.33	18.69	7.49	24.35	S ₃₆	6.18	48.33	2.71	28.04	8.91	16.46
S ₁₂	5.61	60.22	2.17	14.31	5.99	13.08	S ₃₇	12.64	63.31	1.63	27.36	5.99	48.38
S ₁₃	8.62	34.39	4.82	64.85	6.58	11.09	S ₃₈	7.92	32.14	2.95	21.38	5.89	29.09
S ₁₄	8.17	49.07	3.63	26.85	5.53	10.05	S ₃₉	19.09	33.41	1.24	24.59	5.17	36.29
S ₁₅	5.66	49.80	3.66	25.94	7.10	8.57	S ₄₀	11.62	51.09	4.57	24.68	4.68	15.93
S ₁₆	15.64	55.70	8.57	74.07	5.47	23.03	S ₄₁	4.06	41.02	1.76	28.25	7.79	11.91
S ₁₇	13.42	57.24	8.74	24.39	6.32	6.38	S ₄₂	5.27	53.09	1.81	19.72	7.66	15.19
S ₁₈	6.75	67.10	6.23	23.29	6.34	31.00	S ₄₃	8.52	65.44	9.59	22.55	6.98	9.21
S ₁₉	8.39	70.40	5.13	22.59	6.67	17.12	S ₄₄	6.94	48.45	3.56	14.55	6.61	14.22
S ₂₀	6.81	57.55	7.76	21.72	6.11	27.36	S ₄₅	6.37	60.54	5.47	18.08	7.33	10.28
S ₂₁	11.14	62.43	0.99	27.23	5.85	47.72	S ₄₆	7.20	39.66	18.47	56.98	6.79	41.23
S ₂₂	4.98	59.37	3.72	26.02	6.40	8.37	S ₄₇	7.04	56.28	0.32	48.08	6.46	20.36
S ₂₃	9.37	50.86	5.54	39.83	7.15	10.91	S ₄₈	7.54	66.20	2.84	23.93	6.36	14.96
S ₂₄	8.87	47.21	6.88	34.60	5.96	10.30	S ₄₉	6.62	51.13	2.79	21.34	7.07	16.26
S ₂₅	11.08	73.54	6.71	37.97	7.21	9.82	S ₅₀	17.09	71.70	2.81	33.80	7.30	11.57

B₁-三七皂苷 R₁ B₂-人参皂苷 R_{g1} B₃-人参皂苷 R_e B₄-人参皂苷 R_{b1} B₅-总黄酮 B₆-总多糖

B₁-notoginsenoside R₁ B₂-ginsenoside R_{g1} B₃-ginsenoside R_e B₄-ginsenoside R_{b1} B₅-total flavonoids B₆-total polysaccharides

2.2 紫外可见分光光度法测定总黄酮及总多糖量

2.2.1 线性关系考察 精密称取芦丁对照品 1.20 mg 并溶解于 8 mL 70%乙醇溶液中, 加入 0.1 mol/L AlCl₃ 乙醇溶液定容至 10 mL。将芦丁对照品母液按照 60%等梯度稀释 6 次, 共得 7 个质量浓度梯度的芦丁对照品溶液, 于 268 nm 处测量吸光度值。精密称取无水葡萄糖对照品 30.50 mg, 超纯水定容于 100 mL 量瓶。精密移取葡萄糖母液 0.05、0.10、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mL 于试管中, 加水至 2 mL, 再加入 5%苯酚溶液 1 mL, 摇匀后沿试管壁缓慢加入 4 mL 浓硫酸, 迅速振摇均匀后沸水浴加热 30 min, 冷却至室温后于 490 nm 处测量吸光度值。以芦丁与葡萄糖对照品质量浓度为横坐标 (X), 268 nm 与 490 nm 处吸光度

值为纵坐标 (Y), 得线性回归方程。芦丁与葡萄糖对照品的回归方程、回归系数和线性范围见表 2, 由表 2 可知芦丁与葡萄糖对照品的线性关系良好。

2.2.2 三七总黄酮的测定 准确称取 (50.00±0.20) mg 三七样品粉末, 加入 8 mL 70%乙醇溶液, 密封试管口超声提取 1 h, 超声结束后使用定量滤纸快速滤过得到滤液。移取滤液 6 mL, 加入显色剂 (0.1 mol/L AlCl₃ 乙醇溶液) 定容至 8 mL, 显色时间 20 min, 扫描范围 190~600 nm, 定量波长 268 nm。样品光谱采集前, 使用空白溶液扫描基线。记录样品定量波长下的吸光度值 (Y), 结合回归方程计算出样品中总黄酮量 (以芦丁计), 结果见表 3。

2.2.3 三七总多糖的测定 准确称取 (500.00±1.00) mg 三七样品粉末, 加入 50 mL 超纯水, 60 °C

水浴超声提取 2 h, 结束后补充损失溶液, 定量滤纸快速滤过得到滤液。冷却至室温后吸取 20 mL 滤液并加热挥发至 10 mL, 补充 100%乙醇至 50 mL, 混匀后静置沉淀 12 h。将溶液以 9 000 r/min 离心 10 min, 离心结束抽取上清液, 使用 30 mL 80%乙醇溶液洗涤沉淀 2 次。洗涤完成后将沉淀干燥, 加入超纯水定容至 40 mL, 振荡均匀后沸水浴加热 30 min。冷却至室温后移取样品溶液 1 mL 并加水定容至 2 mL, 加入 5%苯酚溶液 1 mL, 摇匀后沿试管壁缓慢加入 4 mL 浓硫酸, 迅速振摇均匀后沸水浴加热 30 min。显色溶液冷却至室温后采集紫外图谱, 扫描范围 350~600 nm, 定量波长 490 nm。样品光谱采集前, 使用空白溶液扫描基线。记录样品定量波长下的吸光度值 (Y), 结合回归方程计算出样品中总多糖量 (以葡萄糖计), 结果见表 3。

2.3 TOPSIS 分析步骤

2.3.1 建立初始决策矩阵 假设有 m 个样本 ($A_1, A_2, \dots, A_m$), 每个目标有 n 个决策属性 ($B_1, B_2, \dots, B_n$)。样本 A_i ($i=1, 2, \dots, m$) 在指标 B_j ($j=1, 2, \dots, n$) 下的测量值为 X_{ij} , 初始判断矩阵 V 的计算见公式如下。

$$V = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & X_{i2} & \cdots & X_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.3.2 建立标准化决策矩阵 由于多指标决策分析中各指标存在量纲不一致的问题, 因此需要对原始决策矩阵的数据进行同向化处理^[32], 并建立标准化决策矩阵 R 。其中 $\max/\min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj})$ 为所有样本在指标 B_j ($j=1, 2, \dots, n$) 下的最大或最小值, 公式如下^[33]。

高优指标同向化处理:

$$R_{ij} = \left[\frac{X_{ij} - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj})}{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj})} \right] \quad (2)$$

低优指标同向化处理:

$$R_{ij} = \left[\frac{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj}) - X_{ij}}{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj})} \right] \quad (3)$$

2.3.3 熵值法确定各指标评价权重 多指标决策分析中评价指标的权重会影响最终结果的科学性与合理性, 因此需要对各种评价指标进行合理赋权。在信息理论中, 信息熵是系统无序程度的度

量, 指标数据离散程度越高熵值就越小, 说明该指标提供的有效信息量越大, 对综合评价的影响也就越大^[34]。熵值法计算指标权重可以有效地排除主观因素的影响, 使得到的结果更加客观, 计算步骤及公式如下^[35]。

(1) 计算第 j 项指标的熵值 (E_j):

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m R_{ij} \ln R_{ij} \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{\ln m}, \text{ 当 } R_{ij} = 0 \text{ 时, 令 } R_{ij} \ln R_{ij} = 0$$

(2) 定义第 j 项指标的权重 (w_j):

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad \left(\sum_{j=1}^n w_j = 1 \right) \quad (5)$$

2.3.4 建立加权决策矩阵 将标准化决策矩阵与各指标的权重相乘即得加权决策矩阵 Z , 公式如下^[36]。

$$Z = (R_{ij} \times w_j)_{m \times n} \quad (6)$$

2.3.5 确定最优向量 Z^+ 与最劣向量 Z^- , 公式如下^[36]。

$$Z^+ = (Z_1^+, Z_2^+, \dots, Z_n^+) \quad (7)$$

$$\text{其中 } Z_j^+ = \max(Z_{1j}, Z_{2j}, \dots, Z_{mj});$$

$$Z^- = (Z_1^-, Z_2^-, \dots, Z_n^-) \quad (8)$$

$$\text{其中 } Z_j^- = \min(Z_{1j}, Z_{2j}, \dots, Z_{mj})$$

2.3.6 计算每个评价对象与最优向量 Z^+ 和最劣向量 Z^- 的距离 D , 公式如下^[36]。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^+)^2}, \quad D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^-)^2} \quad (9)$$

2.3.7 计算每个评价对象与最优方案的接近程度 C_i , 并根据 C_i 对评价对象进行排序。 C_i 在 $[0, 1]$ 区间, 越接近 1 表示该评价对象越接近最优水平, 越接近 0 表示该评价对象越接近最劣水平, 公式如下^[36]。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (10)$$

2.4 熵权 TOPSIS 分析结果

本次数据属于高优指标, 采用式 (2) 建立标准化决策矩阵 R 。按式 (4) 和 (5) 计算各评价指标的熵权, 得到 $w_j = (0.182 0, 0.042 4, 0.210 5, 0.223 9, 0.109 6, 0.231 6)$ 。按式 (6) 建立加权决策矩阵 Z , 分别按式 (7)、(8) 计算最优向量 Z^+ 与最劣向量 Z^- , $Z^+ = (0.182 0, 0.042 4, 0.210 5, 0.223 9, 0.109 6, 0.231 6)$, 最劣向量 $Z^- = (0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 。分别按式 (9)、(10) 计算每个样本与最优向量 Z^+ 和最劣向量 Z^- 的距离 D 以及与最优方案的接近程度 C_i , 结果见表 4。

表 4 50 个三七样品的 D_i^+ 、 D_i^- 及与最优方案接近度 C_i Table 4 D_i^+ , D_i^- , and C_i (relative closeness to ideal solution) of 50 *P. notoginseng* samples

编号	D_i^+	D_i^-	C_i	排名	编号	D_i^+	D_i^-	C_i	排名
S ₁	0.316 3	0.192 3	0.378 2	10	S ₂₆	0.299 8	0.174 0	0.367 2	12
S ₂	0.360 6	0.155 6	0.301 4	26	S ₂₇	0.376 8	0.088 9	0.190 8	48
S ₃	0.367 9	0.131 0	0.262 6	36	S ₂₈	0.360 2	0.101 4	0.219 7	42
S ₄	0.348 6	0.116 9	0.251 2	38	S ₂₉	0.343 9	0.168 9	0.329 4	19
S ₅	0.343 1	0.161 1	0.319 5	22	S ₃₀	0.327 7	0.136 8	0.294 5	27
S ₆	0.336 2	0.116 3	0.257 0	37	S ₃₁	0.339 7	0.126 1	0.270 7	33
S ₇	0.281 6	0.182 1	0.392 7	8	S ₃₂	0.327 1	0.151 8	0.317 1	23
S ₈	0.328 3	0.129 9	0.283 5	30	S ₃₃	0.230 4	0.266 3	0.536 1	3
S ₉	0.311 9	0.148 3	0.322 2	20	S ₃₄	0.325 2	0.166 9	0.339 2	16
S ₁₀	0.348 7	0.125 5	0.264 7	35	S ₃₅	0.328 1	0.130 0	0.283 9	29
S ₁₁	0.350 1	0.128 9	0.269 1	34	S ₃₆	0.334 6	0.130 1	0.280 0	32
S ₁₂	0.385 5	0.075 8	0.164 3	50	S ₃₇	0.284 7	0.264 9	0.482 0	4
S ₁₃	0.287 2	0.214 5	0.427 6	7	S ₃₈	0.324 1	0.152 4	0.319 8	21
S ₁₄	0.351 3	0.096 9	0.216 1	43	S ₃₉	0.298 1	0.252 7	0.458 8	6
S ₁₅	0.361 2	0.089 8	0.199 1	47	S ₄₀	0.327 3	0.136 2	0.293 9	28
S ₁₆	0.201 3	0.302 2	0.600 2	2	S ₄₁	0.365 1	0.096 5	0.209 1	45
S ₁₇	0.322 2	0.165 0	0.338 7	17	S ₄₂	0.366 9	0.097 2	0.209 4	44
S ₁₈	0.299 1	0.174 8	0.368 8	11	S ₄₃	0.326 2	0.144 4	0.306 8	24
S ₁₉	0.325 9	0.127 1	0.280 5	31	S ₄₄	0.366 5	0.093 6	0.203 4	46
S ₂₀	0.302 2	0.165 2	0.353 4	14	S ₄₅	0.358 7	0.102 2	0.221 8	41
S ₂₁	0.295 7	0.254 6	0.462 6	5	S ₄₆	0.168 9	0.335 1	0.664 9	1
S ₂₂	0.366 9	0.083 4	0.185 1	49	S ₄₇	0.313 8	0.167 6	0.348 2	15
S ₂₃	0.302 8	0.150 8	0.332 4	18	S ₄₈	0.346 7	0.105 0	0.232 4	39
S ₂₄	0.314 0	0.136 6	0.303 1	25	S ₄₉	0.350 7	0.103 4	0.227 8	40
S ₂₅	0.295 9	0.165 0	0.358 0	13	S ₅₀	0.308 4	0.194 5	0.386 7	9

表 4 可知,文山、红河、玉溪、昆明和曲靖三七样品平均 C_i 分别为 0.300 2、0.341 1、0.279 5、0.338 7 与 0.323 0。表明云南不同产地三七的综合质量较为接近,道地产地文山与其余产地三七的综合质量并无太大差别。与以往三七中单一指标含量研究相比^[37-39],利用皂苷类、总多糖和总黄酮等 6 个指标进行综合评价,能够反映三七整体质量,做出更加科学全面的评价。样品 S₄₆、S₁₆ 以及 S₃₃ 与最优方案的接近程度 C_i 在所有样品中排名前 3,表明这 3 个样品的整体质量较高,可作为优良种质资源进一步研究与开发^[40]。

3 讨论

质量评价研究一直是中药发展过程中的核心部分,但如今的评价方式存在以下问题:(1)基于气味和颜色等外观性状的传统评价方式对评价人的专业要求较高,而且结果受主观影响较大。(2)指纹图谱的评价方式符合中药整体性概念,但与具体化学成分的相关性不够明确,具有模糊性。(3)基于单一类型化学成分量的评价方式不符合中药整体性

概念,难以整体概括中药质量。(4)基于多指标化学成分量评价方式既符合中药整体性概念,而且具体化学成分明确,具有精确性。但是,多指标评价也存在若干问题:(1)如何将多个指标转化为 1 个综合指标,降低进一步分析的复杂性;(2)如何确定各个指标的权重分配,得到科学的分析结果。

本研究建立了三七药材整体质量评价模型,以多个类型指标对三七进行质量评价,符合中药多组分协同的整体性概念;而且指标化学信息明确,具有精准性。熵值法确定各指标权重克服了人为因素对评价结果的影响,TOPSIS 将多维问题转化为一维,降低了分析过程中多指标对决策的干扰,提高了分析的科学与准确性;实现了对三七整体质量控制以及优质种源筛选。该方法理论完善、易于操作,能够做出科学全面的判断,可推广于其他中药的整体质量评价及良种筛选。

参考文献

- [1] Kong D X, Li X J, Tang G Y, *et al.* How many traditional Chinese medicine components have been recognized by

- modern Western medicine A chemoinformatic analysis and implications for finding multicomponent drugs [J]. *Chem Med Chem*, 2008, 3(2): 233-236.
- [2] Zhao J, Jiang P, Zhang W. Molecular networks for the study of TCM pharmacology [J]. *Brief Bioinform*, 2010, 11(4): 417-430.
- [3] Sun G, Wu Y, Liu Z, *et al.* Multiple methods were combined to monitor and evaluate the quality of TCM, and make the results more reliable [J]. *Anal Methods*, 2014, 6(3): 838-849.
- [4] Jiang Y, David B, Tu P, *et al.* Recent analytical Approaches in quality control of traditional Chinese medicines-a review [J]. *Anal Chim Acta*, 2010, 657(1): 9-18.
- [5] 中国药典 [S]. 一部. 2015.
- [6] Uzayisenga R, Ayeka P A, Wang Y. Anti-Diabetic potential of *Panax notoginseng* saponins (PNS): A review [J]. *Phytother Res*, 2014, 28(4): 510-516.
- [7] Wang Z, Chen Y, Pan H, *et al.* Saponin accumulation in flower buds of *Panax notoginseng* [J]. *Chin Herb Med*, 2015, 7(2): 179-184.
- [8] Wang T, Guo R, Zhou G, *et al.* Traditional uses, botany, phytochemistry, pharmacology and toxicology of *Panax notoginseng* (Burk.) FH Chen: A review [J]. *J Ethnopharmacol*, 2016, 188: 234-258.
- [9] Xu L, Liu J, Liu N, *et al.* Effects of *Panax notoginseng* saponins on proliferation and apoptosis of vascular smooth muscle cells [J]. *J Ethnopharmacol*, 2011, 137(1): 226-230.
- [10] Fan J S, Liu D N, Huang G, *et al.* *Panax notoginseng* saponins attenuate atherosclerosis via reciprocal regulation of lipid metabolism and inflammation by inducing liver X receptor alpha expression [J]. *J Ethnopharmacol*, 2012, 142(3): 732-738.
- [11] 董婧婧, 刘艳菊, 涂济源, 等. 三七粉调血脂作用及机制研究 [J]. *中草药*, 2017, 48(8): 1597-1603.
- [12] Zhou N, Tang Y, Keep R F, *et al.* Antioxidative effects of *Panax notoginseng* saponins in brain cells [J]. *Phytomedicine*, 2014, 21(10): 1189-1195.
- [13] Ng T B. Pharmacological activity of sanchi ginseng (*Panax notoginseng*) [J]. *J Pharm Pharmacol*, 2006, 58(8): 1007-1019.
- [14] 林 晓, 于恩江, 刘珊珊, 等. 三七渣总黄酮提取及其抗氧化活性的研究 [J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(11): 43-46.
- [15] 韦 维, 黄永秩, 梁柳丹, 等. 三七有效成分对免疫性肝损伤的保护作用 [J]. *天津医药*, 2014, 42(9): 893-895.
- [16] Gao H, Wang F, Lien E J, *et al.* Immunostimulating polysaccharides from *Panax notoginseng* [J]. *Pharm Res*, 1996, 13(8): 1196-1200.
- [17] 李世英, 谢云亮, 于忠慧, 等. 三七多糖对大鼠脑缺血再灌注损伤的保护作用 [J]. *中风与神经疾病杂志*, 2015, 32(11): 996-998.
- [18] 胡凤霞, 朱 双. 三七多糖通过 SREBF-1 及 ACCa 改善 2 型糖尿病大鼠肝脏脂肪代谢的研究 [J]. *辽宁中医药大学学报*, 2015, 17(10): 32-35.
- [19] Zhang Y, Han L F, Sakah K J, *et al.* Bioactive protopanaxatriol type saponins isolated from the roots of *Panax notoginseng* (Burk.) FH Chen [J]. *Molecules*, 2013, 18(9): 10352-10366.
- [20] 萧凤回, 段承俐, 文国松, 等. 三七栽培群体遗传改良研究及策略 [J]. *现代中药研究与实践*, 2003, 17(z1): 10-13.
- [21] Guo H B, Cui X M, An N, *et al.* Sanchi ginseng (*Panax notoginseng* (Burkill) FH Chen) in China: distribution, cultivation and variations [J]. *Genet Resour Crop Evol*, 2010, 57(3): 453-460.
- [22] 张金渝, 杨维泽, 崔秀明, 等. 三七栽培居群遗传多样性的 EST-SSR 分析 [J]. *植物遗传资源学报*, 2011, 12(2): 249-254.
- [23] Choudhary D, Shankar R. An STEEP-fuzzy AHP-TOPSIS framework for evaluation and selection of thermal power plant location: A case study from India [J]. *Energy*, 2012, 42(1): 510-521.
- [24] Kaya T, Kahraman C. Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology [J]. *Expert Syst Appl*, 2011, 38(6): 6577-6585.
- [25] Sadi-Nezhad S, Damghani K K. Application of a fuzzy TOPSIS method base on modified preference ratio and fuzzy distance measurement in assessment of traffic police centers performance [J]. *Appl Soft Comput*, 2010, 10(4): 1028-1039.
- [26] Aydogan E K. Performance measurement model for Turkish aviation firms using the rough-AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment [J]. *Expert Syst Appl*, 2011, 38(4): 3992-3998.
- [27] Kou X, Chen Q, Li X, *et al.* Quantitative assessment of bioactive compounds and the antioxidant activity of 15 jujube cultivars [J]. *Food Chem*, 2015, 173: 1037-1044.
- [28] Li P, Qian H, Wu J, *et al.* Sensitivity analysis of TOPSIS method in water quality assessment: I. Sensitivity to the parameter weights [J]. *Environ Monit Assess*, 2013, 185(3): 2453-2461.
- [29] 苏泽春, 杨丽云, 徐中志, 等. TOPSIS 法对金铁锁居群药材质量的综合评价 [J]. *江西农业学报*, 2014, 26(7):

- 42-44.
- [30] 顾志荣, 王亚丽, 孙宇靖, 等. 熵权 TOPSIS 模型在甘肃产当归药材综合质量评价中的应用 [J]. 中药材, 2014, 37(9): 1549-1553.
- [31] 张红瑞, 张 燕, 高致明, 等. 基于有效成分含量的黄芩种质资源评价 [J]. 河南农业科学, 2013, 42(7): 106-108.
- [32] Zhang H, Gu C, Gu L, *et al.* The evaluation of tourism destination competitiveness by TOPSIS & information entropy-A case in the Yangtze River Delta of China [J]. *Tourism Manage*, 2011, 32(2): 443-451.
- [33] Biswas P, Pramanik S, Giri B C. TOPSIS method for multi-attribute group decision-making under single-valued neutrosophic environment [J]. *Neural Comput Appl*, 2016, 27(3): 727-737.
- [34] Zou Z H, Yi Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. *J Environ Sci*, 2006, 18(5): 1020-1023.
- [35] Liu P, Zhang X. Research on the supplier selection of a supply chain based on entropy weight and improved ELECTRE-III method [J]. *Int J Prod Res*, 2011, 49(3): 637-646.
- [36] Li X, Wang K, Liu L, *et al.* Application of the entropy weight and TOPSIS method in safety evaluation of coal mines [J]. *Proced Eng*, 2011, 26: 2085-2091.
- [37] 孙玉琴, 向飞军, 曾 江, 等. 云南省不同产地三七皂苷含量的比较 [J]. 文山学院学报, 2013, 26(6): 8-10.
- [38] 刘 英, 曲 媛, 王承潇, 等. 不同产地不同部位三七中总黄酮的含量测定 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(15): 54-55.
- [39] 熊艺花, 李 婧, 黄 松, 等. DNS 法对三七总多糖含量测定 [J]. 亚太传统医药, 2011, 7(7): 7-9.
- [40] 张红瑞, 张 燕, 高致明, 等. 基于有效成分含量的黄芩种质资源评价 [J]. 河南农业科学, 2013, 42(7): 106-108.