基于单因素方差分析及熵权-灰色关联度模型的黄精属药材多指标质量评价

张文丽[1]，邓　盈[1]，陆　明[1]，苏锁财[1]，李婧媛[1]，李开珺[1]，吉　槟[1]，徐福荣[1, 2*]

1. 云南中医药大学中药学院，云南 昆明　650500
2. 云南中医药大学 云南省傣医药与彝族医药重点实验室，云南 昆明　650500

摘　要：目的　建立基于多指标测定及化学计量方法的黄精属药材质量评价体系，对不同物种黄精属药材（滇黄精 *P. kingianum*、多花黄精 *P. cyrtonema*、点花黄精 *P. punctatum*、互卷黄精 *P. altenicirrhosum* 及玉竹 *P. odoratum*）进行综合质量评价。**方法**　测定 38 批不同物种黄精属药材水分、总灰分、浸出物、黄精多糖、总黄酮及薯蓣皂苷元含量，采用单因素方差分析比较各指标在不同物种间的差异；基于熵权法确定各指标权重，并结合灰色关联度法构建黄精属药材质量评价模型。**结果**　不同物种黄精属药材 5 项指标差异显著，浸出物含量不存在显著差异。38 批样品相对关联度介于 0.435 7～0.601 4，相对关联度＞0.500 的样品有 8 批，总体上多花黄精和滇黄精的质量评价最高。**结论**　基于多指标成分的单因素方差分析及构建的熵权-灰色关联度模型可用于黄精属不同物种药材的质量评价，该方法可较好地反映黄精属药材质量，提高黄精属药材质量评价的科学性。

关键词：黄精属；熵权法；灰色关联度；单因素分析；质量评价；滇黄精；多花黄精；点花黄精；互卷黄精；玉竹

中图分类号：R282.6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2026)21 - 8687 - 09

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.21.024

Multi-index quality evaluation of *Polygonatum* medicinal materials based on one-way analysis of variance and an entropy weight-grey relational analysis model

ZHANG Wenli[1], DENG Ying[1], LU Ming[1], SU Suocai[1], LI Jingyuan[1], LI Kaijun[1], JI Bin[1], XU Furong[1, 2]

1. School of Chinese Materia Medica, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, China
2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Dai and Yi Medicines, Yunnan University of Chinese Medicine, Kunming 650500, China

Abstract: Objective　To establish a quality evaluation system for *Polygonatum* medicinal materials based on multi-index determination and chemometric methods, and to comprehensively evaluate the quality of *Polygonatum* medicinal materials from different species (*P. kingianum*, *P. cyrtonema*, *P. punctatum*, *P. altenicirrhosum*, and *P. odoratum*). **Methods**　The contents of moisture, total ash, extract, *Polygonatum* polysaccharides, total flavonoids, and diosgenin were determined in 38 batches of *Polygonatum* medicinal materials from different species. One-way analysis of variance was used to compare the differences in each index among different species. The entropy weight method was applied to determine the weight of each index, and a quality evaluation model for *Polygonatum* medicinal materials was constructed in combination with grey relational analysis. **Results**　Significant differences were observed in five indexes among different species of *Polygonatum* medicinal materials, while no significant difference was found in extract content. The relative correlation degrees of the 38 batches of samples ranged from 0.435 7 to 0.601 4. Eight batches showed a relative correlation degree greater than 0.500. Overall, *P. cyrtonema* and *P. kingianum* exhibited the highest quality evaluation results. **Conclusion**　One-way analysis of variance based on multi-index components, together with the entropy weight-grey relational analysis model, can be used for quality evaluation of *Polygonatum* medicinal materials from different species. This method can effectively reflect the quality of *Polygonatum* medicinal materials and improve the scientific basis of their quality evaluation.

Key words: *Polygonatum* Mill.; entropy weight method; grey relational analysis; one-way ANOVA; quality evaluation; *Polygonatum kingianum* Coll.et Hemsl.; *Polygonatum cyrtonema* Hua; *Polygonatum punctatum* Royle ex Kunth; *Polygonatum altenicirrhosum* Hand-Mazz; *Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce

收稿日期：2026-03-02

基金项目：云南省科技厅科技计划项目（202304BI090004）；国家自然科学基金资助项目（82360751）

作者简介：张文丽（2001—），女，硕士研究生，主要从事中药资源开发与利用研究。E-mail: hrz0601@126.com

***通信作者：**徐福荣（1971—）男，研究员，博士生导师，从事中药资源开发与利用研究。E-mail: xfrong99@163.com

黄精属 *Polygonatum* Mill. 为天门冬科（Asparagaceae）中多年生草木植物类群[1]，广泛分布于北温带地区，大多数药材均可以作为“药食同源”中药材[2]，具有补气养阴、健脾润肺等功效[3]。黄精属是常用的民族药用资源，具有重要的研究与开发利用价值[4]。目前，对于黄精属植物的研究较少，更多聚焦于药典所规定的物种。云南黄精属资源丰富，滇黄精 *P. kingianum* Coll.et Hemsl.、多花黄精 *P. cyrtonema* Hua、点花黄精 *P. punctatum* Royle ex Kunth、互卷黄精 *P. altenicirrhosum* Hand.-Mazz.及玉竹 *P. odoratum* (Mill.) Druce 等具有一定的资源与利用基础。目前，黄精属植物的质量评价多集中于单一物种[5-6]，或集中单一或少数活性成分和基于指纹图谱等方法[5,7-8]，综合评价报道少。为此，本研究首次收集云南省 5 种黄精属主要药用资源，测定其基础理化指标及相关主要活性成分进行综合质量评价。

单因素方差分析用于比较一个分类因素下多个样本组均值差异是否具有统计学意义的统计方法，根据检验结果推断各样本的均值是否来自同一个总体[9]。该分析结果不仅为不同物种间质量差异提供统计依据，也为综合质量评价提供统计学前提。近年来，灰色关联度法结合熵权法的综合评价模式已广泛应用于枸杞[10]、三七[11]、石斛[12]等中药材的质量研究中，能够更为客观全面的评价中药材质量。

本研究以 38 批黄精属药材为研究对象，测定水分、总灰分、浸出物、黄精多糖、总黄酮及薯蓣皂苷元 6 项指标，采用单因素方差分析比较不同物种间质量差异，并结合熵权法和灰色关联度分析构建综合评价模型，此外，本研究将《中国药典》2025 年版黄精属资源与非药典黄精属资源置于同一质量评价框架下进行比较，有助于认识不同黄精属植物的质量特征和开发定位。综合评价较高的多花黄精和部分滇黄精种源，可作为优良种质筛选、规范化栽培和药食同源产品开发的重点对象；对于点花黄精、互卷黄精及玉竹等资源，可进一步结合其特异性成分、营养价值或地方利用基础，探索差异化开发路径。由此，本研究不仅为云南黄精属药材质量控制提供了实验依据，也为地方黄精属资源保护、优良种质选育及利用提供了参考。

1 仪器与材料

1.1 仪器

Vanquish Core 高效液相色谱仪（美国赛默飞世尔科技公司）；UV2000 型紫外可见分光光度计（上海舜宇恒平科学仪器有限公司）；LYP-5002E 型电子天平（北京兰杰柯科技有限公司）；3K15 型高速冷冻离心机（德国 Sigma Laborzentrifugen GmbH 公司）；SB25-12DTD 超声波清洗机（宁波新艺生物科技股份有限公司）；FL-01 型高速中药粉碎机；DHG-924 型电热鼓风干燥箱（上海一恒科学仪器有限公司）；对照品 *D*-无水葡萄糖（批号 110833-202410，中国食品药品检定研究院）；对照品薯蓣皂苷元（批号 111539-202303，中国食品药品检定研究院）；对照品芦丁（批号 100080-202513，中国食品药品检定研究院）；，所有对照品质量分数均大于 98%；甲醇、乙腈（色谱纯）；其他试剂均为国产分析纯。

1.2 材料

采集不同物种黄精属样品 38 批，样品均于 2025 年 11 月 20 日采自云南煜欣农林生物科技有限公司资源圃，采集部位为根茎，所有黄精属种质均从云南各地州收集，且种植于资源圃中，经云南中医药大学徐福荣研究员鉴定基原植物为点花黄精 *P. punctatum* Royle ex Kunth、多花黄精 *P. cyrtonema* Hua、玉竹 *P. odoratum* (Mill.) Druce、滇黄精 *P. kingianum* Coll. et Hemsl.、互卷黄精 *P. altenicirrhosum* Hand.-Mazz.，具体信息见表 1。

2 方法与结果

2.1 基本指标测定

参照《中国药典》2025 年版黄精项方法测定 38 批黄精属药材的水分、总灰分、浸出物和黄精多糖含量。每批样品重复测定 3 次并记录平均值，结果见表 2。

2.2 总黄酮的提取和含量测定

2.2.1 对照品溶液的制备 称取适量芦丁对照品于 50 mL 量瓶中，精密称量，用 70%乙醇溶液超声溶解并至刻度线，摇匀，得到芦丁对照品溶液 0.2 mg/mL。

2.2.2 标准曲线的建立 分别吸取对照品溶液 0、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mL 置于 10 mL 具塞刻度试管中，用 70%乙醇定容至 5.0 mL，依次加入 0.3 mL 的 5% $NaNO_2$ 溶液，摇匀后静置 6 min，再加入 0.3 mL 10% $Al(NO_3)_3$，静置 6 min，最后加入 4 mL 的 4% NaOH 溶液并用 70%乙醇定容至 10 mL，室温下静置 15 min，在 510 nm 下测定吸光度（A）值。以芦丁对照品溶液质量浓度为横坐标（X），A 值为纵坐标（Y），绘制标准曲线（$Y=0.006\,3X+0.002\,9$，$R^2=0.992\,9$）。

表 1 样品来源

Table 1 Source of samples

样品编号	基原植物	种质来源	样品编号	基原植物	种质来源
D-1	点花黄精	云南省曲靖市	WS-2	滇黄精	云南省文山州
D-2	点花黄精	云南省曲靖市	WS-3	滇黄精	云南省文山州
D-3	点花黄精	云南省曲靖市	WS-4	滇黄精	云南省文山州
D-4	点花黄精	云南省曲靖市	WS-5	滇黄精	云南省文山州
D-5	点花黄精	云南省曲靖市	KM-1	滇黄精	云南省昆明市
DH-1	多花黄精	云南省红河州	KM-2	滇黄精	云南省昆明市
DH-2	多花黄精	云南省红河州	KM-3	滇黄精	云南省昆明市
DH-3	多花黄精	云南省曲靖市	KM-4	滇黄精	云南省昆明市
DH-4	多花黄精	云南省曲靖市	KM-5	滇黄精	云南省昆明市
DH-5	多花黄精	云南省昆明市	YX-1	滇黄精	云南省玉溪市
YZ-1	玉竹	云南省红河州	YX-2	滇黄精	云南省玉溪市
YZ-2	玉竹	云南省红河州	YX-3	滇黄精	云南省玉溪市
YZ-3	玉竹	云南省红河州	YX-4	滇黄精	云南省玉溪市
YZ-4	玉竹	云南省文山州	YX-5	滇黄精	云南省玉溪市
YZ-5	玉竹	云南省文山州	HJ-1	互卷黄精	云南省昆明市
LC-1	滇黄精	云南省临沧市	HJ-2	互卷黄精	云南省昆明市
LC-2	滇黄精	云南省临沧市	HJ-3	互卷黄精	云南省玉溪市
LC-3	滇黄精	云南省临沧市	HJ-4	互卷黄精	云南省玉溪市
WS-1	滇黄精	云南省文山州	HJ-5	互卷黄精	云南省玉溪市

2.2.3 供试品溶液的制备 精密称取 1.0 g 干燥黄精粉末于 50 mL 离心管中，加入 20 mL 70%乙醇溶液，60 ℃超声（40 kHz，300 W）提取 50 min，冷却后，用 3 000 r/min 转速离心 10 min，收集上清液即为样品溶液。

2.2.4 含量测定 精密吸取 5.0 mL 总黄酮溶液于具塞刻度试管中，根据“2.2.2”项下方法在 510 nm 下测定 *A* 值并按照标准曲线计算样品溶液中总黄酮的含量。

2.3 薯蓣皂苷元含量测定

2.3.1 对照品溶液的制备 精密称取薯蓣皂苷元 5 mg 倒入 5 mL 量瓶中，加入甲醇至刻度线，超声 15 min，制成含 1 mg/mL 薯蓣皂苷元对照品溶液。采用 0.22 μm 的滤膜滤过，取滤液作为对照品溶液，低温保存，备用。

2.3.2 供试品溶液的制备 将黄精药材放入烘箱中 45 ℃烘干至恒定质量，粉碎，过 40 目筛，精密称取黄精样品粉末 2 g 置烧瓶中，加入 100 mL 的 80%乙醇，充分摇匀，加热回流 3 h，放冷，抽滤，取滤液 40 mL 旋干，加水 20 mL，加正丁醇萃取 2 次，每次 20 mL，保留正丁醇旋干。浸膏加 10 mL 甲醇定容，然后加 10 g/L 壳聚糖冰醋酸溶液 100 μL 过夜，0.22 μm 滤膜滤过，取滤液作为供试品溶液，低温保存。

2.3.3 色谱条件 以乙腈（A）-水（B）为流动相，梯度洗脱：0～10 min，5%～10% A；10～30 min，10%～45% A，柱温 30 ℃，检测波长 202 nm，体积流量 1 mL/min；进样量 10 μL。

2.3.4 线性回归方程的绘制 精密吸取 1 mg/mL 薯蓣皂苷元对照品 0.5、1.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 mL 置于 10 mL 量瓶中，加入甲醇定容至 10 mL，0.22 μm 滤膜滤过，按色谱条件依次进样，记录色谱图。以质量浓度为横坐标（*X*），峰面积为纵坐标（*Y*）建立标准曲线，计算线性回归方程，得到薯蓣皂苷元线性回归方程：$Y=195\,862X+132\,506$，$r=0.999\,4$。线性范围为 0.05～1.00 mg/mL。

2.3.5 方法学考察 根据文献方法[14]测定稳定性、重复性、精密度及加样回收率。稳定性试验 RSD 为 1.26%，精密度试验 RSD 为 1.68%，重复性试验 RSD 为 0.95%，平均加样回收率为 102.4%，RSD 为 1.34%，均符合要求。

2.3.6 样品含量测定 每个样品进行 3 次平行测定并记录平均值，取供试品溶液进样，按照“2.3.3”项下色谱条件，“2.3.2”项下制备方法，38 批黄精属薯蓣皂苷元测定结果见表 2。

表 2　38 批黄精属药材各指标测定结果

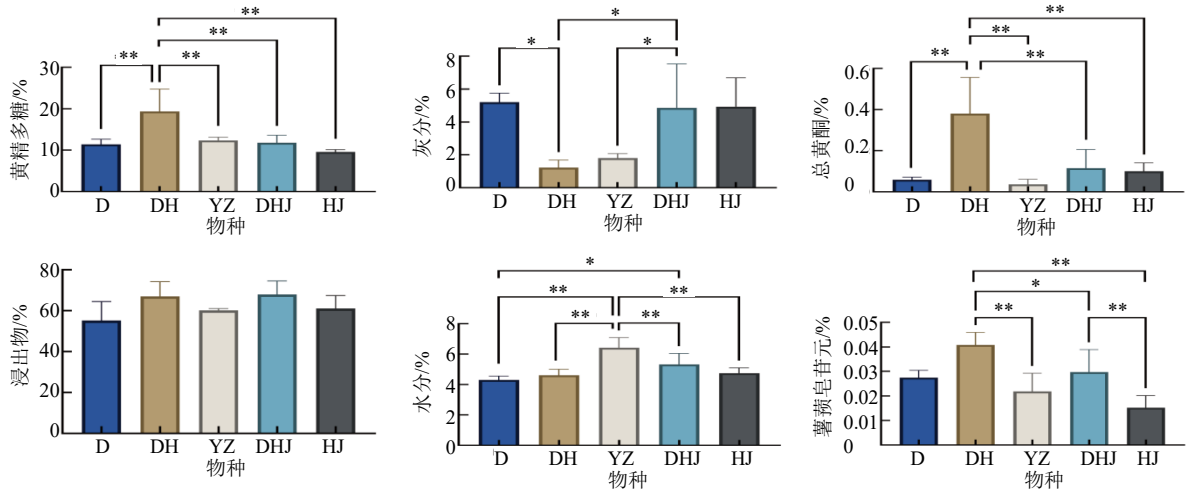
Table 2　Results for various measured indices of 38 batches of *Polygonatum* medicinal materials

样品编号	水分/%	灰分/%	浸出物/%	黄精多糖/%	总黄酮/%	薯蓣皂苷元/%
D-1	4.30	4.61	62.34	10.11	0.077	0.027
D-2	4.42	5.89	41.95	12.90	0.059	0.024
D-3	4.65	4.86	55.32	12.54	0.062	0.031
D-4	3.99	5.02	51.23	10.85	0.061	0.030
D-5	4.11	5.66	65.23	10.44	0.094	0.025
DH-1	4.53	1.62	58.73	15.50	0.091	0.041
DH-2	4.06	0.49	74.76	12.15	0.338	0.043
DH-3	5.16	1.18	60.09	23.85	0.518	0.037
DH-4	4.76	1.61	71.41	24.98	0.485	0.035
DH-5	4.48	1.25	70.99	20.56	0.463	0.048
YZ-1	7.15	1.52	59.24	11.54	0.027	0.013
YZ-2	6.55	2.12	60.21	13.65	0.018	0.018
YZ-3	6.12	1.83	59.67	11.98	0.081	0.028
YZ-4	5.45	1.55	61.09	12.45	0.077	0.031
YZ-5	6.85	2.01	60.99	11.96	0.059	0.019
LC-1	4.57	4.76	76.34	9.19	0.411	0.035
LC-2	6.49	3.15	74.17	9.64	0.144	0.029
LC-3	6.32	3.34	71.99	8.97	0.052	0.044
WS-1	5.34	8.40	65.37	12.28	0.107	0.015
WS-2	5.02	4.03	57.47	12.64	0.095	0.040
WS-3	4.93	8.90	54.23	11.89	0.050	0.021
WS-4	6.07	8.92	68.04	15.64	0.172	0.031
WS-5	4.49	3.60	60.54	10.44	0.089	0.019
KM-1	4.63	2.46	73.39	12.24	0.217	0.024
KM-2	4.73	3.23	67.78	13.76	0.079	0.042
KM-3	4.47	3.86	73.35	10.15	0.050	0.030
KM-4	5.88	2.79	64.61	11.99	0.024	0.021
KM-5	4.86	4.27	78.30	13.21	0.074	0.025
YX-1	6.55	3.23	65.30	11.67	0.118	0.031
YX-2	6.08	3.80	69.79	9.76	0.194	0.017
YX-3	5.52	3.85	61.40	11.54	0.069	0.031
YX-4	4.73	3.46	73.06	13.68	0.057	0.044
YX-5	5.05	4.48	66.40	13.54	0.069	0.036
HJ-1	4.94	3.48	56.92	8.77	0.085	0.018
HJ-2	4.90	2.91	53.82	9.23	0.100	0.013
HJ-3	4.27	6.20	65.73	10.08	0.146	0.008
HJ-4	5.12	7.08	69.06	9.55	0.122	0.016
HJ-5	7.15	4.97	60.16	10.12	0.043	0.021

2.4　不同物种间差异性显著分析

对点花黄精、多花黄精、玉竹、互卷黄精、滇黄精 5 个不同黄精属物种组共 38 个样品的水分、总灰分、浸出物、黄精多糖、总黄酮、薯蓣皂苷元含量这 6 个指标成分进行统计，使用 SPSS 26.0 软件中的单因素方差分析方法分析 6 个指标在不同物种之间的差异情况，并进行了差异性显著分析，结果表明，不同黄精属物种间仅浸出物含量差异不显著，其他 5 成分含量均存在显著差异，见图 1。

从浸出物含量来看，滇黄精含量最高，点花黄



D-点花黄精；DH-多花黄精；YZ-玉竹；HJ-互卷黄精；DHJ-滇黄精；组间比较，$P<0.05$ $P<0.01$。

D-*P. punctatum*; DH-*P. cyrtonema*; YZ-*P. odoratum*; DHJ-*P. kingianum*; YZ-*P. altenicirrhosum*; Between-group comparisons: $P < 0.05$ $P < 0.01$.

图 1 不同物种黄精属 6 个指标含量差异分析

Fig. 1 Analysis of differences in the contents of six constituents among different *Polygonatum* species

精含量最低，各个物种之间不存在显著差异。由水分含量分析而言，玉竹的含量最高，点花黄精的含量最低；玉竹显著高于点花黄精、多花黄精、滇黄精、互卷黄精；点花黄精显著低于滇黄精、玉竹，与多花黄精、互卷黄精不存在显著差异；滇黄精显著高于点花黄精，显著低于玉竹。由灰分含量分析可知，点花黄精的含量最高，多花黄精的含量最低；点花黄精显著高于多花黄精，与其余物种不存在显著差异；多花黄精显著低于点花黄精、滇黄精，与玉竹、互卷黄精不存在显著差异；玉竹含量显著低于滇黄精。

分析黄精多糖含量指标得知，多花黄精含量最高，互卷黄精含量最低；多花黄精含量显著高于点花黄精、玉竹、滇黄精、互卷黄精。从总黄酮含量分析而言，多花黄精含量最高，玉竹含量最低，多花黄精含量显著高于点花黄精玉竹、滇黄精、互卷黄精，玉竹含量显著低于多花黄精，与其余物种无显著差异。从薯蓣皂苷元含量指标分析，多花黄精含量最高，互卷黄精含量最低，多花黄精含量显著高于玉竹、互卷黄精和滇黄精，与点花黄精不存在显著差异；互卷黄精含量显著低于滇黄精。

2.5 熵权法

2.5.1 数据标准化处理 假设给定 k 个指标，n 个样本（n=38，k=6），对各指标进行极差标准化，其中公式（1）用于对正指数进行归一化处理：数值越大，模型的效能越高；相反，公式（2）适用于负指标，数值越小越好。具体步骤如下：

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

$$Y_{ij}=|\max\{X_{ij}\}-X_{ij}|/|\max\{X_{ij}\}-\min\{X_{ij}\}| \quad (2)$$

X_{ij} 为第 i 个样品第 j 个指标的原始值，Y_{ij} 表示归一化后的数值，X_{ij} 为原始值，$\max\{X_{ij}\}$ 和 $\min\{X_{ij}\}$ 分别代表数据集中的最大值的最大值和最小值

2.5.2 计算比重（P_{ij}）矩阵 为了衡量每个样品在各指标上的相对贡献，构建 P_{ij} 矩阵，P_{ij} 矩阵反映了每个样品在某指标上的占比，按照公式计算 P_{ij}。

$$P_{ij}=\frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} z_{ij}} \quad (3)$$

z_{ij} 为第 i 个样品第 j 个指标的标准化值，n 为样品总数，P_{ij} 为第 i 个样品在第 j 个指标上的比重

2.5.3 计算信息熵 根据信息论中信息熵（E_j）定义，根据公式（4）计算 E_j。

$$E_j=-k\sum_{i=1}^{n} p_{ij}\ln\left(p_{ij}\right),\ k=\frac{1}{\ln n} \quad (4)$$

E_j 为第 j 个指标的信息熵，$0\leqslant E_j\leqslant 1$。

确定各指标的 E_j 后，根据公式（5）计算各指标的权重（W_i），计算结果见表 3。

$$W_i=(1-E_i)/(k-E_i) \quad (5)$$

E_i 为样品第 i 个指标的信息熵

2.6 灰色关联度分析

2.6.1 原始数据标准化处理 为了便于不同指标之间进行比较，对各指标原始数据进行规格化处理。根据公式（6）规格化处理。

表 3 E_j 及 W_i

Table 3 Information of entropy and weights

指标	E_j	W_i
水分	0.968 5	0.086 5
总灰分	0.981 8	0.050 0
浸出物	0.979 8	0.055 6
黄精多糖	0.900 2	0.274 5
总黄酮	0.844 8	0.426 8
薯蓣皂苷元	0.961 2	0.106 6

$$Y_{ij}=X_{ij}/X_j \quad (6)$$

X_{ij} 为原始数据，X_j 为样品第 j 个指标的平均值

2.6.2 构建参考序列 以各指标的最优值（Y^+）构建最优参考序列，以各指标的最差值（Y^-）构成最差参考序列，根据公式（7）（8）计算 Y^+和 Y^-。

$$Y^+=\{y_1^+, y_2^+,\cdots y_m^+\} \quad (7)$$

$$Y^-=\{y_1^-, y_2^-,\cdots y_m^-\} \quad (8)$$

2.6.3 计算灰色关联系数（ξ_{ij}） 根据公式（9）计算各样品与最优参考序列、最差参考序列之间的 ξ_{ij}，见表 4。

表 4 各评价单元相对于最优参考序列的关联系数

Table 4 Correlation coefficients of each evaluation unit with respect to optimal reference sequences

样品编号	关联系数					
	水分	总灰分	浸出物	黄精多糖	总黄酮	薯蓣皂苷元
D-1	0.97	0.65	0.89	0.62	0.36	0.72
D-2	0.96	0.59	0.77	0.67	0.35	0.69
D-3	0.94	0.64	0.84	0.66	0.35	0.76
D-4	1.00	0.63	0.82	0.63	0.35	0.75
D-5	0.99	0.60	0.90	0.62	0.35	0.70
DH-1	0.95	0.87	0.86	0.72	0.37	0.88
DH-2	0.99	1.00	0.97	0.65	0.58	0.92
DH-3	0.89	0.92	0.95	0.94	1.00	0.83
DH-4	0.93	0.87	0.87	1.00	0.89	0.81
DH-5	0.95	0.91	0.94	0.85	0.81	1.00
YZ-1	0.76	0.88	0.87	0.64	0.33	0.61
YZ-2	0.80	0.83	0.87	0.68	0.34	0.64
YZ-3	0.82	0.85	0.87	0.65	0.34	0.73
YZ-4	0.87	0.88	0.88	0.66	0.33	0.76
YZ-5	0.78	0.84	0.88	0.65	0.36	0.65
LC-1	0.94	0.41	0.98	0.60	0.69	0.81
LC-2	0.80	0.75	0.97	0.61	0.40	0.74
LC-3	0.81	0.73	0.95	0.60	0.35	0.93
WS-1	0.88	0.50	0.91	0.65	0.38	0.62
WS-2	0.91	0.69	0.86	0.66	0.37	0.87
WS-3	0.91	0.48	0.84	0.65	0.35	0.67
WS-4	0.83	0.48	0.92	0.72	0.42	0.76
WS-5	0.95	0.71	0.87	0.62	0.37	0.65
KM-1	0.94	0.80	0.96	0.65	0.45	0.69
KM-2	0.93	0.74	0.92	0.68	0.36	0.90
KM-3	0.95	0.70	0.96	0.62	0.35	0.75
KM-4	0.84	0.77	0.90	0.65	0.33	0.67
KM-5	0.92	0.67	1.00	0.67	0.36	0.70
YX-1	0.80	0.74	0.90	0.64	0.38	0.76
YX-2	0.83	0.70	0.94	0.61	0.43	0.63
YX-3	0.87	0.70	0.88	0.64	0.36	0.76
YX-4	0.93	0.72	0.96	0.68	0.35	0.93
YX-5	0.90	0.66	0.91	0.68	0.36	0.82
HJ-1	0.91	0.72	0.85	0.60	0.37	0.64
HJ-2	0.92	0.76	0.83	0.60	0.37	0.61
HJ-3	0.97	0.58	0.91	0.62	0.40	0.57
HJ-4	0.96	0.54	0.93	0.61	0.38	0.63
HJ-5	0.90	0.63	0.87	0.62	0.34	0.67

$$\xi_{ij}=(\Delta\min+\rho_j\Delta\max)/\Delta_{ij}+\rho_j\Delta\max) \quad (9)$$

$\Delta_{ij}=|y_{ij}-y_i^{ref}|$ 为第 i 个样品在第 j 个指标上与参考序列的绝对差；Δ_{min} 和 Δ_{max} 分别为全部差值中的最小值和最大值；ρ_j 为分辨系数

本实验以熵权法计算得到的各指标权重作为灰色关联分析中的分辨系数，以体现不同指标对综合评价结果的贡献程度差异。

2.6.4 计算最优关联度（r_i^+）和最差关联度（r_i^-）根据公式（10）（11）计算各样品与最优参考序列和最差参考序列的关联度，计算公式分别为：

$$r_i^+=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\xi_{ij}^+ \quad (10)$$

$$r_i^-=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}\xi_{ij}^- \quad (11)$$

m 为评价指标个数

2.6.5 计算相对关联度　为更全面地反映样品与最优、最差参考序列之间的接近程度，根据公式（12）进一步计算相对关联度（r_i）：

$$r_i=r_i^+/(r_i^++r_i^-) \quad (12)$$

r_i 越大，说明样品越接近最优参考序列，其综合质量越好。根据相对关联度大小对各评价单元序列进行排序，结果见表 5。

3 讨论

从单因素方差分析结果看，不同物种在水分、总灰分、黄精多糖、总黄酮及薯蓣皂苷元含量上差异显著（$P<0.05$），而浸出物差异不显著，表明不同黄精属物种在基础理化特征及主要活性成分积累方面存在一定分化，此结论与陶鹏等[15]的研究一致。多花黄精在黄精多糖、总黄酮及薯蓣皂苷元 3 项指标上均占优，综合排序位居前列。何俊婷等[16]对不同产地黄精的浸出物和多糖进行测定，结果表明多花黄精的多糖含量高于滇黄精，本研究与上述结果一致。滇黄精虽为《中国药典》2025 年版收载品种，但不同种源间质量波动明显，部分样品（如 KM-1、YX-4）表现优良，部分则排序偏后，反映其品质受种质调控显著[17]。张磊等[18]通过测定 13 种滇黄精种质多糖含量，发现其差异显著，本研究结果进一步证明不同种质滇黄精质量差异显著。玉竹水分含量偏高而活性成分偏低，互卷黄精与点花黄精多项指标欠佳，说明该物种药用开发需关注特异性成分或特定药用价值。

中药材质量评价属典型多指标灰色系统[19]。熵权法赋权结果显示，总黄酮（0.426 8）与黄精多糖（0.274 5）权重最高，表明二者在样品间变异度大、

表 5　不同样品相对关联度及质量排序

Table 5　Relative correlation and quality ranking of different samples

编号	r_i^+	r_i^-	r_i	排序	编号	r_i^+	r_i^-	r_i	排序
DH-3	0.922 2	0.611 3	0.601 4	1	YX-3	0.700 6	0.775 0	0.474 8	20
DH-5	0.908 9	0.605 9	0.600 0	2	YX-2	0.690 3	0.771 0	0.472 4	21
DH-4	0.895 4	0.620 5	0.590 7	3	D-3	0.698 0	0.781 6	0.471 8	22
DH-2	0.852 3	0.647 2	0.568 4	4	WS-5	0.697 0	0.782 2	0.471 2	23
DH-1	0.775 9	0.714 8	0.520 5	5	YZ-3	0.709 9	0.799 3	0.470 4	24
KM-1	0.750 4	0.708 2	0.514 5	6	D-4	0.696 5	0.791 3	0.468 2	25
YX-4	0.762 9	0.729 8	0.511 1	7	D-5	0.694 1	0.792 6	0.466 9	26
KM-2	0.756 0	0.726 0	0.510 1	8	YZ-5	0.691 9	0.800 1	0.463 7	27
WS-2	0.724 8	0.747 3	0.492 4	9	KM-4	0.693 5	0.814 0	0.460 1	28
LC-1	0.740 3	0.769 3	0.490 4	10	HJ-1	0.682 5	0.803 2	0.459 4	29
YX-5	0.721 6	0.750 5	0.490 2	11	YZ-2	0.692 4	0.816 2	0.459 0	30
KM-5	0.720 3	0.755 4	0.488 1	12	HJ-4	0.674 8	0.797 4	0.458 4	31
KM-3	0.721 4	0.771 6	0.483 2	13	HJ-2	0.682 9	0.808 2	0.458 0	32
LC-2	0.709 8	0.761 0	0.482 6	14	HJ-3	0.675 3	0.800 6	0.457 5	33
LC-3	0.728 7	0.781 9	0.482 4	15	D-2	0.671 9	0.806 8	0.454 4	34
YZ-4	0.730 2	0.786 7	0.481 4	16	HJ-5	0.671 9	0.819 0	0.450 7	35
YX-1	0.704 7	0.761 4	0.480 7	17	WS-1	0.655 8	0.813 0	0.446 5	36
D-1	0.701 5	0.774 9	0.475 1	18	YZ-1	0.681 6	0.853 5	0.444 0	37
WS-4	0.687 9	0.760 7	0.474 9	19	WS-3	0.648 7	0.840 3	0.435 7	38

区分能力强，是质量分级的核心指标，为黄精属主要药效物质[4, 20]；薯蓣皂苷元权重为 0.106 6，也对综合排序具有一定贡献。三者合计权重较高，说明模型排序更容易受到活性成分积累水平的影响，而水分、总灰分和浸出物等基础理化指标主要为质控的必要因素。因此，多花黄精综合评价值高，主要与其黄精多糖、总黄酮及薯蓣皂苷元含量整体较高有关。其中 DH-3、DH-4 在黄精多糖和总黄酮指标上接近或达到最优参考序列，DH-5 虽多糖和黄酮虽略低于 DH-3、DH-4，但薯蓣皂苷元指标表现优异，使其仍保持较高的综合排序。由此可见，多花黄精排名靠前并不是模型计算的偶然结果，而是其主要功能成分积累优势在综合评价模型中的集中体现。相较于传统单一指标或主观赋权评价，该体系可更客观、全面地反映药材综合品质[10-11, 21]。

滇黄精作为《中国药典》2025 年版收载基原之一，在本研究中具有明显的种源间差异。由于样品来源于云南不同地州的种质，并在资源圃中保存和栽培，资源圃条件在一定程度上降低了栽培环境差异的影响，因此不同种源间质量差异可能更多与遗传背景、原产地生态适应性及长期生长选择有关。不同来源种质在多糖、黄酮及甾体皂苷类成分合成和积累能力上也存在差异，从而导致综合质量评价结果不同。同时，滇黄精种源间差异也可能受到采收期、植株年龄、根茎发育程度及栽培适应性的共同影响。此外，不同地州来源种质移栽至统一资源圃后，对土壤、水分、光照和温度的适应能力不同，也可能影响其生物量形成和次生代谢产物积累。后续研究可结合分子标记、生态因子、采收年限及代谢组学数据，进一步阐明滇黄精优良种质形成的内在机制[22-23]。

本研究化学指标覆盖面有限，后续应纳入更多特征成分，或结合指纹图谱技术完善评价维度[24]。多糖虽作为重要评价指标，但其药效活性不仅取决于总量，还与相对分子质量、单糖组成、糖苷键连接方式及支链结构等密切相关[25-26]。此外，应将化学评价与药效数据关联。筛选质量标志物（Q-Marker）[27]，建立基于效应基准的评价标准[28]，全面提升黄精属质量发展水平。中药 Q-Marker 强调质量控制应体现“有效性、特有性、可测性、传递性和溯源性”等原则[29-30]。从药食同源开发角度看，黄精属药材还具有较高的功能食品与营养资源开发潜力。研究表明，黄精多糖与肠道菌群调节、糖脂代谢改善、抗疲劳和免疫调节等作用相关，黄精根茎中氨基酸、矿物元素和多糖等营养成分亦是其药食两用价值的重要基础[31-32]，因此，后续黄精属药材质量评价应从单纯的成分含量比较进一步转向药食同源开发导向，综合考虑活性成分、营养成分及功能效应之间的关联。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] 陈锦豪, 程文萍, 高静, 等. 基于叶绿体基因组种间高变区序列的黄精属药用植物分子鉴定 [J]. 药学学报, 2025, 60(5): 1543-1554.

[2] 陶爱恩, 张晓灿, 杜泽飞, 等. 黄精属植物中黄酮类化合物及其药理活性研究进展 [J]. 中草药, 2018, 49(9): 2163-2171.

[3] 姜丽颖, 吴澎. 黄精功能成分及深加工开发研究进展 [J]. 中国果菜, 2022, 42(2): 14-20.

[4] 陶爱恩, 尹成龙, 张玥, 等. 黄精属药用植物资源、物质基础及质量评价研究进展 [J]. 中华中医药学刊, 2026, 44(3): 194-201.

[5] 周扬华, 李晖, 李东宾, 等. 基于指纹图谱和多成分定量分析的多花黄精质量评价研究 [J]. 中国中药杂志, 2021, 46(21): 5614-5619.

[6] 韩曦英, 於文博, 关树光. 基于熵权法和灰色关联度分析综合评价吉林省不同产地玉竹质量 [J]. 中医药信息, 2025, 42(3): 6-10.

[7] 陈蕾, 万婉, 刘艳, 等. 黄精有效成分提取测定的研究 [J]. 赤峰学院学报（自然科学版）, 2019, 35(9): 37-39.

[8] Gong H, Gan X N, Li Y Z, *et al*. Review on the genus *Polygonatum* polysaccharides: Extraction, purification, structural characteristics and bioactivities [J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 229: 909-930.

[9] Bewick V, Cheek L, Ball J. Statistics review 9: One-way analysis of variance [J]. *Crit Care*, 2004, 8(2): 130.

[10] 余钟莲, 王瑞, 杨莉, 等. 基于熵权法和灰色关联度法评价枸杞子质量 [J]. 中成药, 2024, 46(3): 919-926.

[11] 杨小玉, 刘格, 唐祥友, 等. 基于熵权法和灰色关联度法综合评价不同产地三七药材质量 [J]. 中华中医药杂志, 2024, 39(6): 2849-2854.

[12] 王柳璎, 郭焕佳, 姬生国. 基于熵权法和灰色关联度法的铁皮石斛质量评价 [J]. 中成药, 2023, 45(2): 483-487.

[13] 中国药典 [S]. 四部. 2025: 307.

[14] 邱明鸣, 缪进进. 基于 HPLC 指纹图谱及多指标成分含量测定的前胡质量评价研究 [J]. 广东化工, 2026, 53(2): 93-96.

[15] 陶鹏, 刘应, 唐子惟, 等. 13 种黄精化学成分比较分析 [J]. 亚太传统医药, 2023, 19(7): 58-62.

[16] 何俊婷, 曹爱兰, 赵新礼, 等. 不同基原与产地的黄精

对比研究 [J]. 中国药业, 2017, 26(19): 23-26.

[17] 刘嘉灏. 不同产地滇黄精品质与生态因子和根际微生物相关性研究 [D]. 大理: 大理大学, 2023.

[18] 张磊, 李彦莹, 朱新焰, 等. 三种滇黄精资源多糖及代谢相关酶活性的关系 [J]. 西南农业学报, 2022, 35(5): 1095-1100.

[19] 魏航, 林励, 张元, 等. 灰色系统理论在中药色谱指纹图谱模式识别中的应用研究 [J]. 色谱, 2013, 31(2): 127-132.

[20] 李彦力, 苏艺, 袁晚晴, 等. 黄精主要活性成分、功能及其作用机制研究进展 [J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 354-363.

[21] 冯治国, 赵祺, 朱强, 等. 基于熵权法和灰色关联分析法评价安徽省不同产地黄精药材质量 [J]. 中草药, 2021, 52(12): 3689-3695.

[22] 章小雨, 秦倩, 田磊, 等. 不同产地多花黄精生态因子与品质形成的相关性分析 [J]. 中国现代中药, 2022, 24(7): 1323-1330.

[23] 王庆, 李颜冰, 杜忠友, 等. 生态因子对黄精生长及品质的影响研究进展 [J]. 南方农业, 2023, 17(23): 136-140.

[24] 张洁, 马百平, 杨云, 等. 黄精属植物甾体皂苷类成分及药理活性研究进展 [J]. 中国药学杂志, 2006, 41(5): 330-332.

[25] Liu J H, Qian Y, Yang W Q, *et al*. Elucidating the interaction of rhizosphere microorganisms and environmental factors influencing the quality of *Polygonatum kingianum* Coll. et Hemsl [J]. *Sci Rep*, 2024, 14: 19092.

[26] Pan M, Wu Y J, Sun C Y, *et al*. *Polygonati Rhizoma*: A review on the extraction, purification, structural characterization, biosynthesis of the main secondary metabolites and anti-aging effects [J]. *J Ethnopharmacol*, 2024, 327: 118002.

[27] 刘昌孝, 陈士林, 肖小河, 等. 中药质量标志物 (Q-Marker): 中药产品质量控制的新概念 [J]. 中草药, 2016, 47(9): 1443-1457.

[28] 李小锦, 黄莹莹, 杨珍, 等. 基于效应基准的中药质量生物标志物研究策略 [J]. 药学学报, 2019, 54(2): 204-210.

[29] 中华中医药学会《中药质量标志物研究技术指南》编写组. 中药质量标志物研究技术指南 [J]. 中草药, 2025, 56(7): 2249-2252.

[30] 赵鸿鹏, 许浚, 张洪兵, 等. 基于质量传递与溯源的中药质量标志物 (Q-Marker) 的发现策略及应用 [J]. 中草药, 2021, 52(9): 2557-2565.

[31] Nurtay L, Sun Q L, Mu C L, *et al*. *Rhizoma Polygonati* from Mount Tai: Nutritional value and usefulness as a traditional Chinese medicine, source of herbzyme, and potential remediating agent for COVID-19 and chronic and hidden hunger [J]. *Acupunct Herb Med*, 2021, 1(1): 31-38.

[32] 中国药典 [S]. 四部. 2025: 通则 9101.

[33] Chen X J, Duan J F, Liu K Q, *et al*. Botany, traditional uses, and pharmacology of *Polygonati Rhizoma* [J]. *Chin Med Cult*, 2021, 4(4): 251-259.

[责任编辑 时圣明]