中国农学通报 2026,42(19):210-218
Chinese Agricultural Science Bulletin

云南22个不同产地白及品质的综合评价

李 茜[1],李景宇[1],匡美龄[1],杨 琳[1],陶春艳[2],方其仙[1]
([1]云南农业职业技术学院,昆明 650031;[2]宣威市福康生物科技有限公司,云南宣威 655414)

摘 要:为解决不同产地白及质量差异显著的问题,以云南22个不同产地的白及为研究对象,通过测定其浸出物、多糖、militarine、总酚及重金属(Pb、Cd、As、Hg、Cu)含量,结合指纹图谱、模糊物元评价和灰色模式识别等多元分析方法,对白及药材的品质进行综合评估与分析。结果表明,云南22个白及样品的浸出物、多糖、militarine、总酚含量范围分别为36.54%~79.42%、138.75%~327.66%、15.00~70.19 mg/g、2.12~11.26 mg/g。以指纹图谱5个共有峰为基础进行不同产地白及相似度评价,同时结合模糊物元与灰色关联分析,认为滇西高海拔产区白及综合品质最优。考虑白及重金属含量这一关键安全指标后,丽江市古城区七河镇前山村出产的白及品质更优。本研究弥补了传统依赖外观性状或单一成分评价白及的不足,有望推动基于数学模型、重金属含量等多指标的白及质量综合评价模式的建立。

关键词:白及;品质评价;指纹图谱;模糊物元;灰色模式识别;重金属
中图分类号:S567.5+3 **文献标识码:**A **论文编号:**casb2026-0197

Comprehensive Evaluation of *Bletilla striata* Quality from 22 Different Habitats in Yunnan

LI Xi[1], LI Jingyu[1], KUANG Meiling[1], YANG Lin[1], TAO Chunyan[2], FANG Qixian[1]
([1]*Yunnan Vocational and Technical College of Agriculture*, Kunming 650031;
[2]*Xuanwei Fukang Biotechnology Limited Company*, Xuanwei, Yunnan 655414)

Abstract: To address the issue of quality differences in *Bletilla striata* from different producing areas, 22 *B. striata* samples from different habitats in Yunnan were taken as the research objects. By determining the contents of extracts, polysaccharides, militarine, total phenols, and heavy metals (Pb, Cd, As, Hg, Cu), and combining fingerprint analysis, fuzzy matter-element evaluation, and grey pattern recognition methods, a comprehensive assessment and analysis were conducted to provide a scientific basis for the quality control of *B. striata* and the selection of planting areas. The results showed that the contents of extracts, polysaccharides, militarine, and total phenols in the 22 Yunnan *B. striata* samples were 36.54%-79.42%, 138.75%-327.66%, 15.00-70.19 mg/g, and 2.12-11.26 mg/g, respectively. Fingerprint analysis revealed five common peaks among the 22 different habitats in Yunnan, indicating that the quality of *B. striata* could not be distinguished by fingerprints alone. Combined with fuzzy matter-element and grey correlation analysis, it was concluded that the comprehensive quality of *B. striata* from high-altitude producing areas in western Yunnan was the best. When further considering the heavy metal content, *B. striata* produced in Qianshan Village, Qihe Town, Gucheng District, Lijiang City exhibited better quality. This study makes up for the deficiencies of traditional appearance-based or single-component evaluation of *B. striata* and is expected to promote the establishment of a comprehensive quality evaluation model for *B. striata* based on multiple indicators, including mathematical models and heavy metal content.

基金项目:云南农业职业技术学院科学研究基金重点项目“云南不同栽培白及的品质评价研究”(2024YNVC-ZD04)。
第一作者简介:李茜,女,1992年出生,云南文山人,讲师,硕士,研究方向:中药材加工及药物制剂技术。通信地址:650031 云南省昆明市五华区茭菱路128号 云南农业职业技术学院,Tel:0871-68875395,E-mail:234298942@qq.com。
通信作者:方其仙,女,1979年出生,云南陆良人,教授,硕士,主要从事中药材栽培与加工技术的研究。通信地址:650031 云南省昆明市五华区人民西路壹号广场2栋 云南农业职业技术学院,Tel:0871-68875395,E-mail:934021752@qq.com。
收稿日期:2026-03-16,**修回日期:**2026-07-02。

Keywords: *Bletilla striata*; quality evaluation; fingerprint; fuzzy matter-element; gray pattern recognition; heavy metal

0 引言

中药白及为兰科植物白及(*Bletilla striata*)的干燥块茎，味苦、甘、涩，微寒。归肺、肝、胃经[1]。药用历史悠久，始载于《神农本草经》，历版《中国药典》均有收载，其含有的多糖具有止血、抑菌、修复组织损伤等功能[2-3]。现代研究表明，其含有的1,4-二[4-(葡萄糖氧)苄基]-2-异丁基苹果酸酯(militarine)、总酚等成分具有抗炎、抗氧化的药理作用[4-5]，其中多糖与militarine是白及发挥止血抗炎作用的核心物质[6]。

目前对白及的质量评价研究多集中于药材外观性状或单一指标成分的测定。这种评价模式难以充分体现中药多成分、多靶点的整体性作用特点[7-8]，无法全面反映其复杂的药理活性。另外，不同地区或不同品种白及的有效成分差异显著，同时，日益严峻的环境污染会导致植物重金属及有害元素含量超标[9-10]，严重威胁着白及药材的药用价值和使用者的生命安全。重金属及有害元素的含量不仅会影响白及药材的药用价值，还会对使用者的生命安全构成威胁，特别是铅(Pb)、镉(Cd)、砷(As)、汞(Hg)、铜(Cu)等，这些重金属被人体吸收蓄积一定量后，可引发神经、内分泌系统、肝脏、肾脏及免疫系统等功能损害，进一步导致严重的健康问题[11]。

本研究选取云南22个不同产地采集的白及样品，测定浸出物、多糖、militarine、总酚及重金属含量等关键指标成分的含量，引入指纹图谱、模糊物元评价等多元统计学方法，对不同产地白及样品的品质进行综合评价，旨在构建一种更为全面、科学的白及质量评价模式，为白及的质量控制及种植区域选择提供参考[12]。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

实验仪器包括Agilent 1100高效液相色谱仪、Compass C_{18}反相色谱柱(250 mm×4.6 mm，5 μm)、超声波清洗器、湘仪高速冷冻离心机、旋涡混合器、UV-2700型紫外分光光度计、电感耦合等离子体质谱仪、MK-3型酶标仪、鼓风电热恒温干燥箱、1/10000电子天平、分析天平、台式离心机、可调式移液器、96孔板、水浴锅、粉碎仪、离心机等。

实验试剂包括1,4-二[4-(葡萄糖氧)苄基]-2-异丁基苹果酸酯标准品（源叶，纯度≥98%）、HPLC级乙腈（OCEANPAK，纯度≥99.9%）、无水乙醇（国药集团化学试剂有限公司，分析纯，纯度≥99.5%）、磷酸（国药集团化学试剂有限公司，优级纯，纯度≥85.0%）、超纯水、浓硝酸(GR)、1%硝酸等。

1.2 实验材料

于2024年9—11月在云南22个不同产地采集经组培育苗、大田种植3年的白及样品，具体信息见表1。将块茎用清水洗净，于60℃烘箱中恒温干燥，粉碎过50目筛，备用[13-14]。

1.3 实验方法

1.3.1 浸出物含量测定 称取白及粉末约1.0 g，放入锥形瓶中，加入400 mL煮沸冷却后的超纯水，立即移入沸水浴锅中浸提1 h（每隔10 min摇动1次）浸提完毕后立即抽滤，用150 mL煮沸冷却后的超纯水洗涤数次，抽滤完成后将样品连同已知重量的滤纸放入(120±2)℃的恒温干燥箱内1 h，烘干后冷却至室温，精密称量，根据称量结果计算浸出物质量，并以浸出物质量与供试品取样量的比值计算浸出物含量。

1.3.2 多糖含量测定 利用水提醇沉法提取多糖，苯酚-硫酸法测定多糖含量。称取白及粉末约0.05 g置10 mL EP管中，加入2 mL水，充分摇匀，100℃水浴提取2 h（必须盖紧盖子防止水分流失），冷却后8000 r/min离心10 min，取上清液0.2 mL，慢慢加入0.8 mL无水乙醇，混匀后4℃静置过夜，8000 r/min离心10 min，弃上清液，沉淀中加入1 mL水，充分混匀溶解沉淀。混匀后90℃水浴20 min，流水冷却。取200 μL加入96孔板中，酶标仪预热30 min以上，以葡萄糖作为对照品，于490 nm下测定各管吸光值，计算多糖含量。

1.3.3 militarine含量测定

（1）液相色谱分析条件。采用Agilent 1100高效液相色谱仪，波长为223 nm，色谱柱为Compass C18(2)反相色谱柱(250 mm×4.6 mm，5 μm)，柱温为30℃，流速为1.0 mL/min，进样体积为10 μL流动相为乙腈-0.1%磷酸水(*V*/*V*=30/70)。

（2）对照品溶液的制备。精密称取militarine对照品10 mg，置10 mL量瓶中，加甲醇超声使溶解并定容至刻度，摇匀，精密吸取1 mL，至20 mL量瓶中，加60%乙醇稀释至刻度，摇匀，即可。

（3）供试品溶液的制备。称取白及粉末0.1 g，置50 mL容量瓶中，加入10 mL 60%乙醇水溶液研磨成浆，超声提取45 min，离心取上清液，60%乙醇水溶液稀释5倍，混匀，针头式过滤器过滤后待测。

表1 云南22个不同产地白及样品来源信息

样品编号	采集地	东经	北纬	海拔/m	花色
1	昆明市团结乡百草村	102°35′21″	25°04′07″	1888	紫花
2	红河州泸西县向阳乡旧寨村	103°50′52″	24°26′11″	2056	紫花
3	红河州泸西县中枢镇白泥坡村	103°45′06″	24°29′38″	1800	黄花
4	文山州马关县大栗树乡乐作大寨	104°24′05″	23°00′09″	1600	紫花
5	文山州马关县八寨镇芦差塘村	104°23′36″	23°00′48″	1700	紫花
6	文山州广南县坝美镇坝美村	104°55′18″	24°09′28″	700	紫花
7	文山州马关县马白镇沙尾冲村	104°23′40″	23°00′44″	1200	紫花
8	文山州马关县坡脚镇山车村	104°24′05″	23°00′09″	1300	紫花
9	文山州砚山县稼依镇小尼尼村	103°57′09″	23°43′55″	1448	紫花
10	保山市龙陵县河头乡河头村	98°35′00″	24°29′00″	1900	白花
11	楚雄州双柏县鄂嘉镇义隆村	101°14′46″	24°27′12″	1600	紫花
12	临沧市耿马傣族佤族自治县贺派乡班卖村	99°22′00″	13°29′00″	1550	紫花
13	大理州剑川县马登镇甸所村	99°35′46″	26°24′34″	2600	紫花
14	丽江市古城区七河镇前山村	100°16′24″	26°44′48″	2650	紫花
15	普洱市墨江哈尼族自治县通关镇卡房村	101°21′43″	23°05′23″	1430	紫花
16	普洱市澜沧拉祜族自治县惠民镇付腊村	100°28′49″	22°10′26″	1150	紫花
17	普洱市澜沧拉祜族自治县勐朗镇南甸村	99°51′50″	22°41′08″	1400	紫花
18	普洱市景谷民乐镇大村村秧塔村	100°30′07″	22°49′00″	1750	紫花
19	宣威市落水镇灰洞村	103°59′38″	26°09′26″	1980	紫花
20	宣威市落水镇牌坊村	104°02′45″	26°09′09″	2360	紫花
21	宣威市田坝镇陈家村	104°27′11″	26°10′07″	2070	紫花
22	宣威市热水镇白泥凹村	103°46′27″	26°04′01″	1958	紫花

（4）标准曲线测定。精确称取1,4-二[4-(葡萄糖氧)苄基]-2-异丁基苹果酸酯标准品，用60%乙醇水溶解，配制成5~6个不同质量浓度的标准溶液，按上述色谱条件依次检测各标准溶液的峰面积，以峰面积为纵坐标、浓度为横坐标，计算得到1,4-二[4-(葡萄糖氧)苄基]-2-异丁基苹果酸酯的标准曲线，如式(1)。

y=13.1937x-0.8549　R^2=0.9999……(1)

1.3.4 *总酚含量测定* 精密称取白及粉末约0.05 g，加入1 mL提取液，60℃振荡提取2 h。1000 r/min 25℃离心10 min，取上清液，采用植物总酚试剂盒，酶标仪预热30 min，于765 nm波长下测定吸光度，计算总酚含量[15]。

1.3.5 *指纹图谱的建立* 将色谱图以AIA.格式导入“中药色谱指纹图谱相似度评价系统（2004 A版）”，采用中位数法，时间窗宽度为0.1 min，进行多点校正，自动匹配，建立不同产地白及HPLC指纹图谱。

1.3.6 *模糊物元评价与灰色模式识别评价* 以militarine、浸出物、总酚、多糖的含量为评价指标，先构建评价对象的模糊物元矩阵，通过从优隶属度函数实现指标无量纲化，结合指标权重计算各评价对象与理想标准物元间的加权欧氏距离，再由距离换算得到欧式贴近度，依据贴近度完成云南22个不同产地白及质量优劣排序与评价。以militarine、浸出物、总酚、多糖的含量为评价指标，采用灰色模式识别法进行质量评价。

1.3.7 *重金属含量测定* 采用ICP-MS测定铜、砷、镉、铅和汞等多元素含量。称取白及粉末0.2 g（精确至0.0001 g）于聚四氟乙烯消解内罐，加硝酸5 mL浸泡过夜。盖好内盖，旋紧不锈钢外套，放入恒温干燥箱，80℃保持1~2 h，120℃保持1~2 h，再升至160℃保持4 h，在箱内自然冷却至室温，打开后加热赶酸至近干，将消化液洗入25 mL容量瓶中，用少量硝酸溶液(1%)洗涤内罐和内盖3次，洗液合并至容量瓶中并用1%硝酸定容至刻度，混匀备用。同时做试剂空白实验。试液上机测定各元素含量[16]。

1.4 *数据分析*

采用DPS 7.05软件对数据进行统计分析，单因素

方差分析One-way ANOVA结合Duncan's多重比较法分析白及重金属含量；用Excel计算检测指标的变异系数；用Excel 2019进行图形绘制。

2 结果与分析

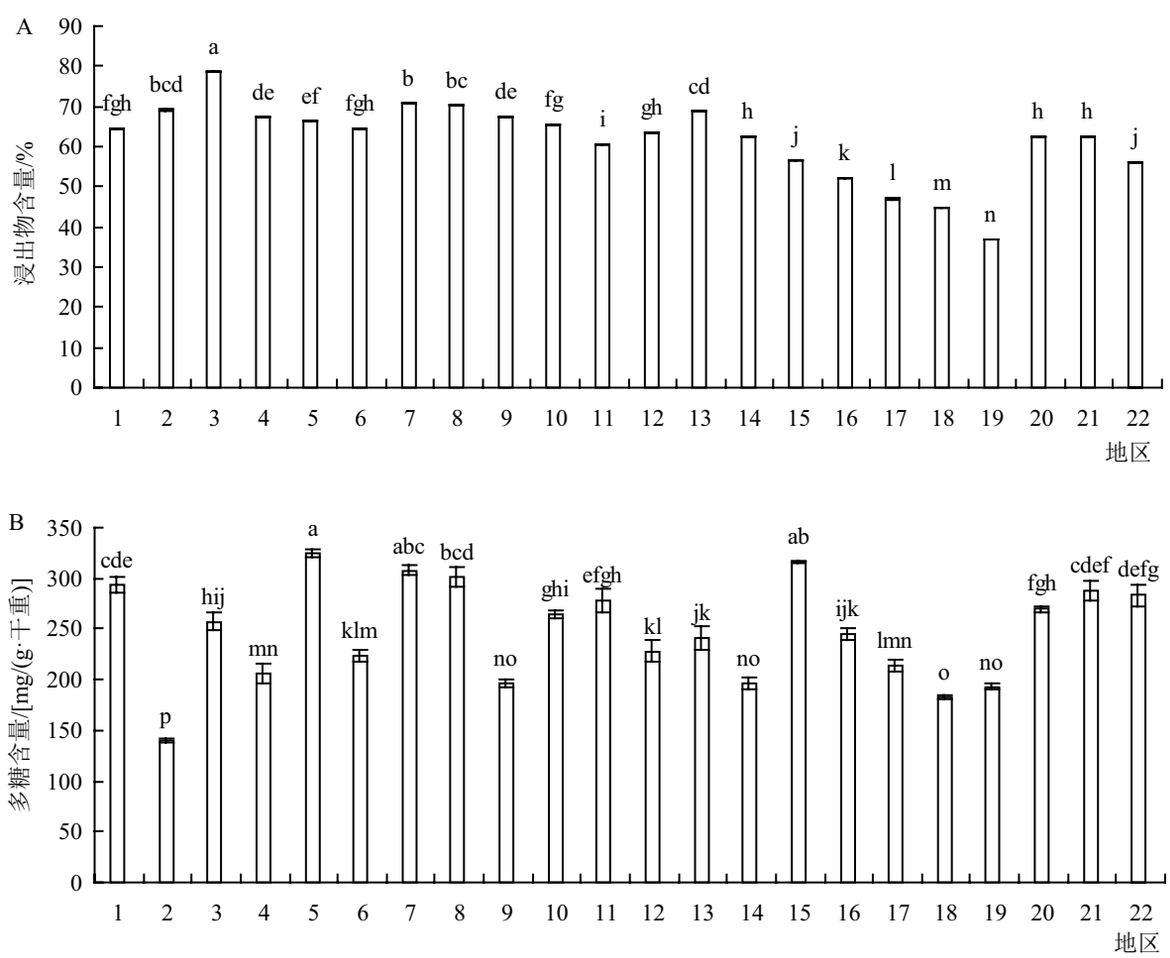
2.1 不同产地白及指标成分的含量差异

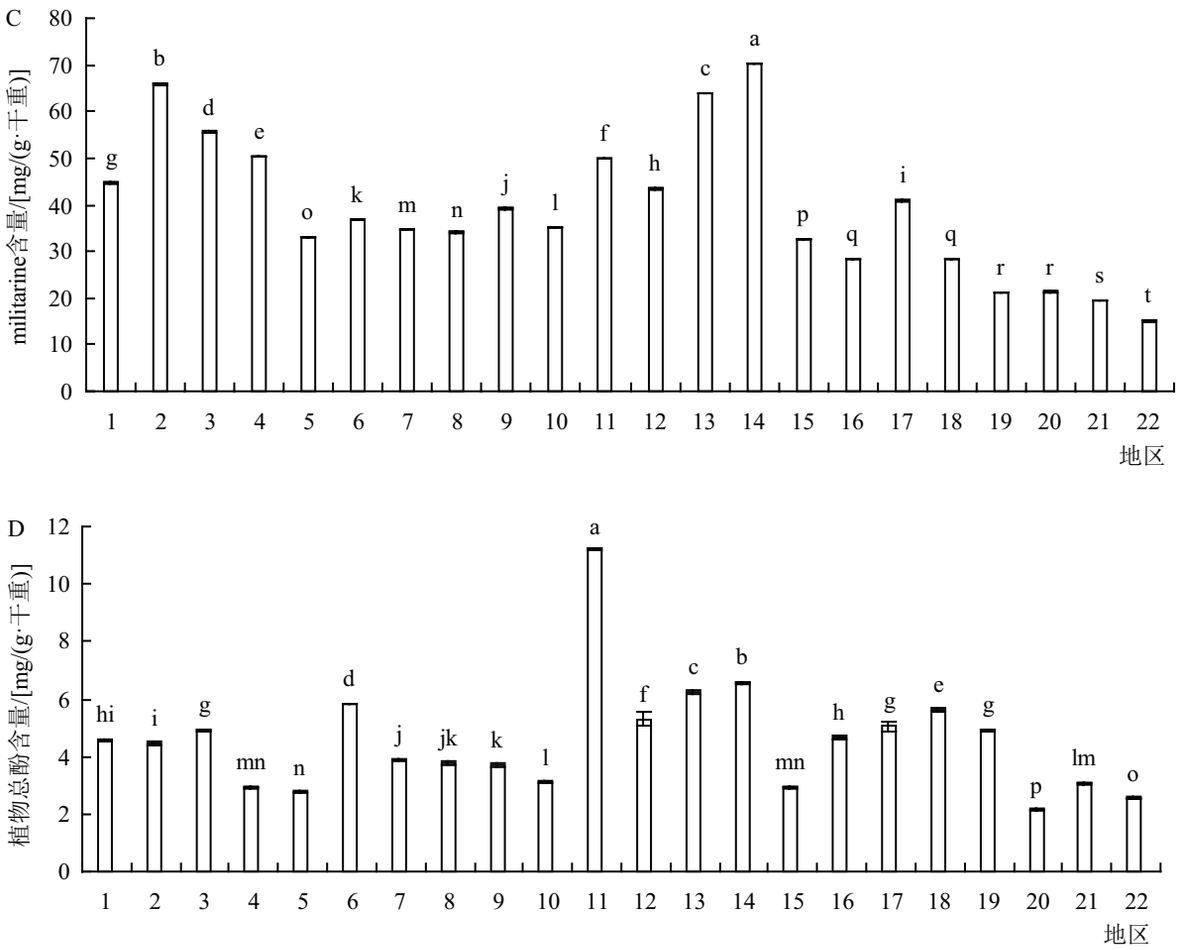
本研究云南22个不同产地白及样品浸出物、多糖、militarine、总酚的含量范围分别为36.54%~79.42%、138.75~327.66 mg/g、15.00~70.19 mg/g、2.12~11.26 mg/g，平均值分别为61.73%、247.67 mg/g、39.31 mg/g、4.55 mg/g，（表2）变异系数为15.22%~41.72%，其中militarine和总酚的变异系数较大。表明环境因子（如海拔、土壤）对白及有效物质积累影响显著。

云南22个不同产地白及样品中浸出物（图1A）、多糖（图1B）、militarine（图1C）、总酚含量（图1D）的含量具有显著差异。22个不同产地白及样品中浸出物含量前3位的地区分别是红河州泸西县中枢镇白泥坡村（3号）、文山州马关县马白镇沙尾冲村（7号）和文山州马关县坡脚镇山车村（8号）；22个不同产地白及样品中多糖含量前3位的地区分别是文山州马关县八寨镇芦差塘村（5号）、文山州马关县马白镇沙尾冲

表2 云南22个不同产地白及指标成分的含量及变异系数（*n*=66）

检测指标	浸出物/%	多糖/(mg/g)	militarine/(mg/g)	植物总酚含量/(mg/g)
平均值	61.73	247.67	39.31	4.55
最大值	79.42	327.66	70.19	11.26
最小值	36.54	138.75	15.00	2.12
极差	42.88	188.91	55.19	9.14
变异系数/%	15.22	19.76	37.75	41.72





不同小写字母表示不同地区指标间差异显著(P<0.05)

图1 云南22个不同产地白及的浸出物、多糖、militarine、总酚含量指标成分含量

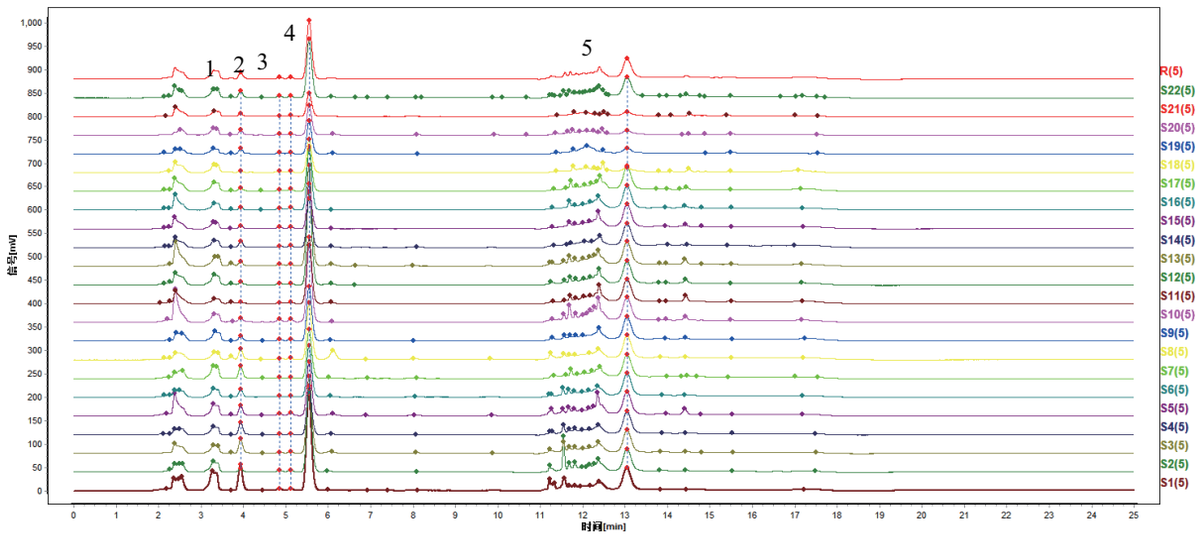
村（7号）和普洱市墨江哈尼族自治县通关镇卡房村（15号）；不同地区白及样品中militarine含量存在较大差异，含量前3位的地区分别是丽江市古城区七河镇前山村（14号）、红河州泸西县向阳乡旧寨村（2号）和大理州剑川县马登镇甸所村（13号）；22个不同产地白及样品中总酚含量前3位的地区分别是楚雄州双柏县鄂嘉镇义隆村（11号）、丽江市古城区七河镇前山村（14号）和大理州剑川县马登镇甸所村（13号）。

2.2 不同产地白及样品溶液的HPLC指纹图谱分析

本研究云南22个不同产地白及样品溶液的HPLC指纹图谱共有峰有5个（图2）。以4号militarine色谱峰为参照峰(S)，计算得到各共有峰的相对保留时间*RSD*均小于0.57%，实验处理中各实验数据可靠。本研究发现，各产地白及化学成分组成较为相似，某个或某几个成分含量上差异对相似度的影响较大，使得个别产地内样品间仍存在差异，因此单用指纹图谱评价方法难以较好评价各产地白及药材的质量。在与对照图谱的对比中，22个产地样品平均相似度大于0.9000的有18个（表3），红河州泸西县中枢镇白泥坡村产地（3号）样品图谱与对照图谱的平均相似度最低，为0.792，*RSD*为0.04%。

2.3 不同产地白及模糊物元评价

前文研究显示，云南22个不同产地白及指纹图谱并不能很好鉴别白及品质，只能进行简单白及样品产地分析和白及真伪品的区分，本研究进一步对云南22个不同产地白及样品进行模糊物元评价，结果见表4。欧式贴近度越大，表示该样品与理想标准越接近，综合品质越优。本研究中云南22产地白及样品平均欧式贴近度为0.2945~0.6163，平均欧式贴近度大于0.4的产地有4个，分别是楚雄州双柏县鄂嘉镇义隆村（11号，0.6163）、大理州剑川县马登镇甸所村（13号，0.4610）、丽江市古城区七河镇前山村（14号，0.4602）和红河州泸西县中枢镇白泥坡村产地（3号，0.4071）。前3个产区均属于滇西地区，说明高海拔有利于白及



Sx为x样地的图谱，小括号里中的5代表选择这个图谱中的5个峰做指纹图谱比较

图2 云南22个不同产地白及样品溶液的HPLC叠加图谱(1~22)和对照图谱(R)

表3 云南22个不同产地白及指纹图谱相似度评价结果

样品编号	相似度	样品编号	相似度
1	0.836	12	0.963
2	0.830	13	0.949
3	0.792	14	0.975
4	0.836	15	0.947
5	0.962	16	0.932
6	0.983	17	0.924
7	0.982	18	0.954
8	0.970	19	0.982
9	0.966	20	0.944
10	0.965	21	0.918
11	0.988	22	0.942

品质的提升。

2.4 不同产地白及灰色模式识别评价

对云南22个不同产地白及样品进行灰色模式识别评价，并根据相对关联度大小对白及品质优劣进行排名，结果见表5。各产地样品平均相对关联度为0.5680~0.8958，平均相对关联度大于0.80的产地有7个，分别是楚雄州双柏县鄂嘉镇义隆村（11号，0.8958）、大理州剑川县马登镇甸所村（13号，0.8692）、丽江市古城区七河镇前山村（14号，0.8350）、临沧市耿马傣族佤族自治县贺派乡班卖村（12号，0.8217）、普洱市澜沧拉祜族自治县勐朗镇南甸村（17号，0.8163）和红河州泸西县中枢镇白泥坡村（3号，0.8071）。此结果前3名与模糊物元评价的结果一致。

表4 云南22个不同产地白及模糊物元评价结果及排名(*n*=3)

样品编号	欧式贴近度	排名	样品编号	欧式贴近度	排名
1	0.3818±0.0023	7	12	0.3949±0.0010	5
2	0.3751±0.0006	8	13	0.4610±0.0062	2
3	0.4071±0.0032	4	14	0.4602±0.0016	3
4	0.3379±0.0007	15	15	0.3242±0.0020	18
5	0.3238±0.0019	16	16	0.3489±0.0023	12
6	0.3947±0.0029	6	17	0.3723±0.0014	9
7	0.3507±0.0025	11	18	0.3567±0.0027	10
8	0.3473±0.0040	13	19	0.3282±0.0018	19
9	0.3438±0.0027	14	20	0.2968±0.0016	21
10	0.3317±0.0021	17	21	0.3097±0.0014	20
11	0.6163±0.0039	1	22	0.2945±0.0014	22

表5 云南22个不同产地白及相对关联度及排名(*n*=3)

样品编号	相对关联度	排名	样品编号	相对关联度	排名
1	0.7995±0.0091	7	12	0.8217±0.0173	4
2	0.7986±0.0353	8	13	0.8692±0.0129	2
3	0.8071±0.0455	6	14	0.8350±0.0195	3
4	0.7285±0.0509	16	15	0.7044±0.0421	18
5	0.7291±0.0450	15	16	0.7761±0.0091	11
6	0.6847±0.0494	19	17	0.8163±0.0296	5
7	0.7786±0.0441	10	18	0.7614±0.0347	13
8	0.7812±0.0265	9	19	0.7695±0.0194	12
9	0.7110±0.0660	17	20	0.6780±0.0441	20
10	0.7343±0.0467	14	21	0.6258±0.0468	21
11	0.8958±0.0164	1	22	0.5680±0.0387	22

2.5 不同产地白及重金属含量分析

2025年版《中国药典》未提及白及重金属含量，规定三七中铜、砷、镉、铅和汞含量不得超过20、2、0.3、5、0.2 mg/kg。参考三七的标准，本研究中云南22个不同产地白及的重金属污染主要为镉和汞的污染（表6）。其中镉污染最严重的2个地区为文山州马关县大栗树乡乐作大寨（4号）和文山州马关县八寨镇芦差塘村（5号），分别超标70.80、47.32倍；汞污染最严重的昆明市团结乡百草村（1号）、红河州泸西县向阳乡旧寨村（2号）、红河州泸西县中枢镇白泥坡村（3号）分别超标220.30、185.23和96.24倍。本研究中白及各项重金属含量未超标的产地为保山市龙陵县河头乡河头村（10号）、丽江市古城区七河镇前山村（14号）和普洱市墨江哈尼族自治县通关镇卡房村（15号）。

表6 云南22个不同产地白及铜、砷、镉、铅和汞的含量　　mg/kg

样品编号	铜	砷	镉	铅	汞
1	28.6307±0.0447d	8.7413±0.1083a	0.7848±0.0052i	7.8646±0.0033a	44.0592±0.0068a
2	58.1003±0.0302a	0.2660±0.0073h	2.5757±0.0135c	3.0375±0.0038e	37.0451±0.0231b
3	18.1287±0.0458e	0.1405±0.0068ijk	1.5551±0.0021f	5.4968±0.0023b	19.2477±0.0121c
4	34.8034±0.0385c	1.0834±0.0008f	21.2407±0.0496a	4.4117±0.0061d	10.8003±0.0102d
5	42.6762±0.0786b	0.0604±0.0013kl	14.1971±0.0235b	5.0455±0.0089c	7.3473±0.0144e
6	4.1010±0.0786o	0.0534±0.0005l	1.3638±0.0048g	1.4631±0.0053h	0.2676±0.0025n
7	5.8226±0.0879ij	0.0868±0.0009jkl	2.1116±0.0213e	0.9621±0.0041o	1.6971±0.0035f
8	6.7132±0.1413g	1.7196±0.0365e	2.1587±0.0204d	0.9251±0.0098p	0.4173±0.0018l
9	5.1898±0.0197l	2.8072±0.0414c	0.2324±0.0027n	0.9702±0.001o	0.6755±0.0038h
10	1.8667±0.0621q	0.0520±0.0018l	0.1154±0.0021p	0.6131±0.0054r	0.0275±0.0003r
11	4.4338±0.0663mn	0.1472±0.0007ij	0.4538±0.0028l	1.3703±0.0038i	0.2050±0.0003o
12	6.5707±0.0341g	0.2132±0.002hi	0.0649±0.0006q	1.2450±0.0092k	0.1793±0.0004p
13	4.2298±0.0534no	0.0513±0.0016l	0.6068±0.0023j	1.4676±0.0055h	0.6544±0.0002h
14	6.0220±0.0130hi	0.0471±0.0013l	0.0636±0.0034q	1.1772±0.0058l	0.1800±0.0008p
15	6.5385±0.1962g	0.0570±0.0032kl	0.1587±0.0024op	2.0075±0.0079f	0.0333±0.0002r
16	5.5640±0.0940jk	0.1106±0.0038jkl	0.3468±0.0052m	1.1490±0.0047m	0.5641±0.0028i
17	5.3218±0.1006kl	2.0406±0.0202d	0.184±0.0031o	0.7883±0.0040q	0.5383±0.0017j
18	6.1769±0.0915h	3.2784±0.0193b	0.4424±0.0041l	1.2919±0.0093j	0.1043±0.0005q

续表6

样品编号	铜	砷	镉	铅	汞
19	7.0483±0.0347f	0.6822±0.0057g	1.2937±0.0055h	1.6479±0.0028g	0.0268±0.0004r
20	4.5150±0.0987m	0.1074±0.0037jkl	0.7884±0.0040i	0.6301±0.0022r	0.4584±0.0014k
21	3.6746±0.0598p	0.0424±0.0043l	0.5128±0.0068k	0.2059±0.0091s	0.2925±0.003m
22	4.2943±0.1619mno	0.0568±0.0046l	0.4987±0.0056k	1.0459±0.0127n	0.9422±0.0044g

注：同列不同字母表示不同产地白及重金属含量差异显著(P<0.05)。

3 结论

本研究对云南22个不同产地白及样品进行多维度品质评价，结果表明，模糊物元评价和灰色模式识别2种数学模型方法均能有效识别白及药材的品质差异，且评价结果高度一致。在综合考量浸出物、多糖、militarine、总酚含量等药效指标的基础上，模糊物元评价的欧式贴近度排名前3位的产地分别为楚雄州双柏县鄂嘉镇义隆村(0.6163)、大理州剑川县马登镇甸所村(0.4610)、丽江市古城区七河镇前山村(0.4602)。灰色模式识别评价的相对关联度排名前3位的产地同样为楚雄州双柏县鄂嘉镇义隆村(0.8958)、大理州剑川县马登镇甸所村(0.8692)、丽江市古城区七河镇前山村(0.8350)。2种方法在排名前3位的产地上保持高度一致，有力地证明了这2种综合评价模型的可靠性与互补性。

进一步结合重金属含量分析，本研究发现，尽管部分产地（如红河州泸西县、文山州马关县）在药效成分含量上表现突出，但其重金属（尤其是镉和汞）含量严重超标，按照《中国药典》三七标准（作为参考）或潜在药用安全标准，这些产地的白及样品已被视为不具备药用安全价值，因此被排除在最终品质推荐范围之外。经过此“药效成分优良+重金属安全”的前置筛选和综合评价，丽江市古城区七河镇前山村（14号）出产的白及，在兼顾药效成分含量和极低的重金属污染水平方面表现最优，其综合品质为当前研究样本中的最佳。

4 讨论

4.1 地理环境对白及品质的影响

模糊物元评价（欧式贴近度>0.4）与灰色模式识别（相对关联度>0.80）共同显示，综合品质最优的产地集中于滇西（如双柏县、剑川县、丽江古城区），可能与该地区海拔较高、紫外线强、昼夜温差大有关。滇西产区的白及品质高可能源于高海拔和低温，这导致白及生长期延长，更多的光合产物向块茎转运，或高寒地区有利于白及抗逆通路中活性成分的合成。这与云南三七、咖啡等作物的品质分布规律一致，即高海拔环境有利于药效成分富集[17-18]。因此，优先选择滇西海拔1500 m以上区域推广种植，今后可进一步研究光照、土壤微生物组与成分合成的关联机制[5]。

4.2 白及重金属污染的区域性风险分析

白及和三七同为云南重要的根及根茎类药材，参考2025版《中国药典》三七标准，文山州马关县（4号、5号）镉超标47~70倍，红河州泸西县（2号、3号）汞超标96~220倍，这可能与当地矿业活动或工业排放导致的土壤污染相关。而保山、丽江等产区（10号、14号、15号）未检出重金属超标，表明这些产区拥有相对清洁的环境，对药材安全性至关重要。重金属污染影响白及有效成分合成，更多有效成分积累会直接损害人体健康，例如汞损害神经系统、镉引发肾毒性[19]。本研究中红河州泸西县中枢镇白泥坡村综合评分较高（3号），但重金属超标限制了其药用潜力，因此，在质量评价体系中，重金属含量应作为前置判定指标，任一重金属元素超标即终止后续综合评价。

4.3 白及多指标综合评价体系的必要性

传统白及质量评价主要依赖外观或单一成分，中药指纹图谱以整体性和模糊性为表现特征[20]。指纹图谱相似度（RSD仅0.04%）可快速鉴别产地真伪，而模糊物元与灰色关联互补解决了多维指标权重分配问题，为找到白及最优适配种植区提供模型[21]。本研究中丽江市样品（14号）有效成分含量并非最高，但低重金属与成分均衡性使其跻身优质产区，凸显整体评价的价值。该方法可推广至其他道地药材（如三七、天麻）的品质分级。建议将浸出物、多糖、militarine及重金属纳入白及核心质量指标，结合产地溯源技术构建优质优价市场体系，促进种植规范化。同时建议对于原始种植产区，应加强对白及样品的重金属检测，并开展土壤修复工作，以恢复白及适宜的种植环境，重塑中药材的质量安全与健康属性。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家药典委员会.中华人民共和国药典[S].北京:中国医药科技出版社,2025:110.

[2] 上官艳妮,李林,潘胤池,等.白及组织培养及其药理作用的研究进展[J].时珍国医国药,2019,30(7):1706-1709.

[3] 汪荣斌,王乐,秦亚东,等.中药白及本草考证[J].甘肃中医药大学学报,2025,42(3):26-35.

[4] 赵菲菲.白及BS-80EE组分的止血作用及其药效物质基础与作用机制研究[D].贵安:贵州医科大学,2017.

[5] 翁夏蒙,鲁光耀,王鸯妮,等.白及愈伤组织总酚含量测定及抗氧化作用研究[J].中药材,2013,36(1):32-35.

[6] 黎晓星,杨莹,李群,等.白及主要有效成分特征及其影响因素研究进展[J].中草药,2024,55(8):2820-2827.

[7] 秦亚东,汪荣斌,周宙.不同产地白及多糖含量测定[J].安徽科技学院学报,2014,28(3):41-44.

[8] 陈黎,朱海涛,杜士明,等.鄂西北地区白及的多糖含量研究[J].中国药师,2014,17(1):62-64.

[9] 陈黎,楚亚琴,王启斌,等.鄂西北地区白及中总酚含量的测定[J].中国药师,2013,16(11):1679-1682.

[10] 周云凯,李伟平,田莎莎,等.白及须根和块茎总酚含量的测定[J].中国实验方剂学杂志,2012,18(10):161-164.

[11] 秦樊鑫,胡继伟,张明时,等.贵州省GAP基地26种中药材重金属含量调查与评价[J].中成药,2007,29(10):1483-1487.

[12] 宋志姣,张应斌,杨进伟,等.不同种源小白及年增产量和品质的比较与综合评价[J].中国野生植物资源,2024,43(5):41-45.

[13] 曾弘杨,张建强,曹艳,等.白及趁鲜切制及传统切制加工工艺的比较[J].中国民族民间医药,2025,34(18):45-50.

[14] 徐雨生,滕晓梅,辛文锋,等.基于12个产地的白及冻干片质量标准[J].湖北农业科学,2023,62(4):156-162.

[15] 陈芳芳,章军,邸继鹏,等.白及饮片等级评价[J].中成药,2024,46(12):3917-3925.

[16] 王永,熊鹏飞,郑听,等.白及不同部位金属元素动态分布特征及其对块茎有效成分的影响[J].北方园艺,2024(22):81-88.

[17] 陈云兰,李积华,陈文进,等.云南4个产区咖啡豆的主要风味成分及感官品质分析[J].热带作物学报,2024,45(7):1445-1454.

[18] 张巨强,孟珍贵,洪杰,等.云南不同产区三七品质分析及其综合评价[J].中草药,2025,56(14):5213-5224.

[19] 朱迪,谢玉敏,谭丹,等.不同来源白及药材中重金属及有害元素含量测定及其评价[J].中国卫生检验杂志,2015,25(4):471-476.

[20] 张新秦,周涛,肖承鸿,等.贵州不同产地白及品质综合评价[J].中药材,2020,43(2):368-373.

[21] 张涵瑞,方敬贤,孙志滢,等.基于指纹图谱和成分定量评价不同采收时间鄂产白及质量[J].中药材,2023,46(9):2254-2259.

声明

当前有个别网站及个人非法盗用《中国农学通报》《农学学报》杂志名义,以接收投稿为名收取审稿费、版面费,严重损害了作者的利益和本刊的声誉,造成不良的社会影响。本刊在此郑重声明:《中国农学通报》《农学学报》杂志不接收邮箱投稿,也从未授权任何机构和个人代理接收本刊稿件。两刊的投稿网址为http://www.casb.org.cn/,http://nxxb.caass.org.cn/,敬请广大作者注意甄别。

特此声明。

《中国农学通报》《农学学报》编辑部