DOI:10.13193/j.issn.1673-7717.2026.07.031

基于性状和化学成分关联的栽培白前最佳采收年限研究

刘世红[1],魏洪露[1],冯书敏[1],黄必胜[1],陈诚[2],刘大会[1],雷咪[1]
(1.湖北时珍实验室,湖北中医药大学,湖北 武汉 430065;2.青青苗生态农业科技发展有限责任公司,湖北 武汉 430065)

摘要:目的 基于性状信息和化学成分关联确定栽培白前最佳采收年限,为白前药材的合理采收和质量控制提供参考。方法 将白前外观性状(直径、横切面各部位面积占比、药材粉末颜色)进行量化,对水溶性浸出物、醇溶性浸出物含量、总皂苷及6种指标成分[对羟基苯甲酸、香草酸、丁香酸、4-羟基苯乙酮、2,4-二羟基苯乙酮、Anhydrohirundigenin 3-O-α-L-diginopyranosyl-(1→4)-β-D-cymaropyranosyl-(1→4)-β-D-digitoxopyranosyl-(1→4)-β-D-thevetopyranoside]等内在成分的含量进行测定,运用皮尔逊相关性分析白前外观性状与内在成分含量之间的关系,并通过熵权法计算样品的综合得分。结果 不同栽培年限白前外观性状及内在成分存在显著差异;相关性分析结果表明,不同栽培年限白前样品外观性状与内在成分(醇溶性浸出物、总皂苷、对羟基苯甲酸、香草酸、丁香酸)的含量具有显著相关性;熵权法分析结果表明,二年生、三年生白前的综合得分普遍高于一年生白前。结论 白前外观性状在一定程度上可反映内在成分的含量,通过熵权法分析,推断白前在第二年采收较合理,可为白前质量控制及科学采收提供参考。

关键词:白前;外观性状;内在质量;栽培年限;熵权法分析
中图分类号:R282.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-7717(2026)07-0175-08

Study on Optimal Harvest Time of Cultivated Baiqian(*Cynanchum stauntonii*) Based on Trait Information and Chemical Composition Association

LIU Shihong[1],WEI Honglu[1],FENG Shumin[1],HUANG Bisheng[1],CHEN Cheng[2],LIU Dahui[1],LEI Mi[1]
(1. Hubei Shizhen Laboratory,Hubei University of Chinese Medicine,Wuhan 430065,Hubei,China;
2. Qingqingmiao Ecological Agriculture Technology Development Co.,Ltd.,Wuhan 430065,Hubei,China)

Abstract:*Objective* To determine the optimal harvest time of cultivated Baiqian(*Cynanchum stauntonii*) based on the correlation of trait information and chemical composition so as to provide a reference for the rational harvest and quality control of Baiqian(*Cynanchum stauntonii*). *Methods* The appearance traits such as the diameter,the area ratio of each part of the transverse section,and the powder color of wheat were quantified. The contents of water-soluble extract,alcohol-soluble extract,total saponins and six index components(*p*-hydroxybenzoic,vanillic acid,syringic acid,4-hydroxyacetophenone,2,4-dihydroxyacetophenone,Anhydrohirundigenin 3-O-α-L-diginopyranosyl-(1→4)-β-D-cymaropyranosyl-(1→4)-β-D-digitoxopyranosyl-(1→4)-β-D-thevetopyranoside) were determined. Pearson correlation analysis was used to analyze the relationship between appearance traits and internal component content of Baiqian(*Cynanchum stauntonii*). The comprehensive score of the sample was calculated by the entropy weight method. *Results* There were significant differences in appearance traits and internal components of Baiqian(*Cynanchum stauntonii*) with different cultivation years. The results of correlation analysis showed that the appearance traits were significantly correlated with the contents of internal components(alcohol-soluble extract,total saponins,*p*-hydroxybenzoic,vanillic acid and syringic acid) of Baiqian(*Cynanchum stauntonii*) with different cultivation years. The results of entropy weight method showed that the comprehensive scores of biennial and triennial Baiqian(*Cynanchum stauntonii*) were generally higher than those of annual Baiqian(*Cynanchum stauntonii*). *Conclusion* The appearance traits of Baiqian(*Cynanchum stauntonii*) can reflect the contents of internal components to a certain extent. Through the analysis of entropy weight method,considering the factors such as production cost and land turnover time,it is concluded that the harvest of Baiqian(*Cynanchum stauntonii*) in the second year is more reasonable,which can provide reference for the quality con-

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3503804);湖北省自然科学基金创新发展联合基金项目(2024AFD287);中国中医科学院名贵中药资源可持续利用能力建设项目(2060302);武汉市新乡园农业科技发展有限责任公司项目(3002-10083)
作者简介:刘世红(2000-),女,河南焦作人,硕士在读,研究方向:中药质量控制与评价。
通讯作者:雷咪(1986-),女,湖北松滋人,高级实验师,硕士研究生导师,博士,研究方向:中药质量控制与评价。E-mail:191041507@qq.com。

trol and scientific harvest of Baiqian(*Cynanchum stauntonii*).

Keywords: Baiqian (*Cynanchum stauntonii*); appearance characteristics; internal quality; cultivated years; entropy weight method

白前始载于汉末《名医别录》[1],为萝藦科植物柳叶白前 *Cynanchum stauntonii*(Decne.)Schltr. ex Levi. 或芫花叶白前 *Cynanchum glaucescens*(Decne.)Hand. - Mazz. 的干燥根茎和根[2]。现代药理研究表明,白前具有镇咳祛痰、抗炎镇痛、抗肿瘤、抗血栓、治疗消化系统疾病等作用,主要化学成分包括 C_{21} 甾体皂苷、黄酮类、苯酮及其衍生物、酚酸类等[3]。课题组通过实地走访调研,发现市场上流通的白前主要品种为柳叶白前,湖北新洲、麻城等产区柳叶白前已占到白前药材市场上的 90% 以上。由于受到天气、市场价格等因素的影响,白前在实际生产中存在采收年限不一的情况,1 ~ 3 年不等,以一年生白前居多,且缺乏对应的质量标准,导致其药材质量和产量难以保障。

历代本草记载了白前的采收期,如《新编中药志(第 1 卷)》[4]《中华本草(第 17 卷)》[5]中记载白前主要采收期为十月,《500 味常用中药材的经验鉴别》记载,"野生品一般于 10 月间采挖,家种者稍晚,约于 11 月上旬采挖"[6],并未记载其采收年限,而栽培年限的不同是影响药材中初级代谢产物与次级代谢产物含量的重要因素[7],同时也会使药材的外观性状产生变化[8-9]。本草考证发现,目前对于白前品质仅以"色淡黄色""根茎粗"为佳[10],主要依赖外观性状的描述,缺乏对其内在成分的深入研究。且单一的评价方式难以全面、准确地反映白前的真实品质,无法满足现代中医药发展的需求[7]。对于多对象、多指标的综合评价问题,熵权法是一种根据参评对象所含信息量对指标客观赋权进行综合评价的科学决策方法[11],近年来,熵权法在中药综合质量评价方面得到广泛应用,已成为评价中药材品质的重要手段[12-17]。

因此,本课题组前期的研究基础上[18-19],继续以湖北道地药材白前为研究对象,以黄璐琦院士针对道地药材提出的"优形、优质"为指导,针对不同栽培年限的白前开展外观性状数据量化提取,并与内在成分信息相结合,通过相关性分析白前不同栽培年限的差异,并结合化学计量学评价不同栽培年限的白前品质,为白前的科学种植和标准化生产提供数据支撑,为白前的品质控制与资源开发提供科学依据。

1 材料与仪器

1.1 仪器

1290 Infinity Ⅱ型超高效液相色谱仪(美国 Agilent 公司);EX125DZH 型十万分之一分析天平(奥豪斯仪器常州有限公司);AL204 型万分之一电子天平(梅特勒 - 托利多国际贸易有限公司);WGL - 65B 型电热恒温鼓风干燥箱(天津市泰斯特仪器有限公司);KUDOS SK250H 型数控超声波清洗器(上海科导超声仪器有限公司);NH300 型电脑色差仪(深圳三恩驰科技有限公司);Bio - Tek Synergy 2 型酶标仪(美国 Gene 公司);HWS28 型水浴锅(昆山一恒仪器有限公司);SZMCTV(1/2)体视显微镜(南京宇恒仪器仪表有限公司)。

1.2 材料

对羟基苯甲酸(批号:B20328,质量分数:99.99%)、香草酸(批号:B21361,质量分数:97%)购于上海源叶生物科技有限公司,丁香酸(批号:PS010564,质量分数:98%)、4 - 羟基苯乙酮(批号:PS020038,质量分数:98%)、2,4 - 二羟基苯乙酮对照品(批号:PS211008 - 02,质量分数:98%)、Anhydrohirundigenin 3 - O - α - L - diginopyranosyl - (1→4) - β - D - cymaropyranosyl - (1→4) - β - D - digitoxopyranosyl - (1→4) - β - D - thevetopyranoside(A - O - DCDT)(批号:PS013711,质量分数:80%)购于成都普思生物科技有限公司。甲醇、乙腈均为色谱纯,其余试剂均为分析纯,水为超纯水。

26 批样品采于湖北新洲、团风、麻城等集中种植区,采用五点采样法采集药材,平行 3 次。采挖后洗净,晒干。样品信息见表 1。经湖北中医药大学生药教研室刘大会教授鉴定为萝藦科植物柳叶白前 *Cynanchum stauntonii*(Decne.)Schltr. ex Levi. 的根和根茎。

表 1 26 批白前样品信息

编号	产地	经度	纬度	栽培年限	采收时间
S1	湖北省武汉市新洲区	114.823 588 3	30.803 588 3	一年生	2023.11
S2	湖北省武汉市新洲区	114.828 875 0	30.805 844 9	一年生	2023.11
S3	湖北省武汉市新洲区	114.834 341 6	30.799 711 6	一年生	2023.11
S4	湖北省武汉市新洲区	114.950 546 6	30.848 745 0	一年生	2023.11
S5	湖北省黄冈市团风县	115.017 949 9	30.778 168 3	一年生	2023.11
S6	湖北省黄冈市麻城市	115.016 561 7	31.176 995 8	一年生	2023.11
S7	湖北省黄冈市麻城市	115.060 529 2	30.987 877 1	一年生	2024.01
S8	湖北省黄冈市麻城市	115.060 572 7	30.987 735 7	一年生	2024.01
S9	湖北省黄冈市麻城市	115.036 971 6	31.032 397 0	一年生	2024.01
S10	湖北省黄冈市罗田县	115.196 462 6	30.825 275 1	一年生	2023.11
S11	湖北省黄冈市罗田县	115.346 433 2	30.955 400 2	一年生	2023.11
S12	湖北省武汉市新洲区	114.821 321 7	30.803 887 7	二年生	2024.01
S13	湖北省武汉市新洲区	114.828 727 4	30.806 261 6	二年生	2024.01
S14	湖北省武汉市新洲区	114.828 585 3	30.806 084 3	二年生	2024.01
S15	湖北省武汉市新洲区	114.945 702 5	30.848 437 0	二年生	2024.01
S16	湖北省武汉市新洲区	114.820 665 0	30.803 678 3	二年生	2023.11
S17	湖北省武汉市新洲区	114.823 308 3	30.803 486 6	二年生	2023.11
S18	湖北省黄冈市团风县	114.972 983 3	30.791 346 6	二年生	2023.11
S19	湖北省黄冈市团风县	114.973 156 6	30.790 888 3	二年生	2023.11
S20	湖北省黄冈市团风县	114.972 925 0	30.790 896 6	二年生	2023.11
S21	湖北省黄冈市麻城市	115.120 319 3	31.038 154 3	二年生	2024.01
S22	湖北省黄冈市麻城市	115.125 372 9	31.037 782 7	二年生	2024.01
S23	湖北省黄冈市麻城市	115.177 542 9	31.270 415 9	二年生	2024.01
S24	湖北省黄冈市麻城市	115.160 963 0	31.281 117 9	二年生	2024.01
S25	湖北省武汉市新洲区	114.820 529 6	30.803 824 9	三年生	2024.01
S26	湖北省武汉市新洲区	114.828 670 0	30.805 959 0	三年生	2024.01

2 方法

2.1 横切面直径测量

使用体视显微镜观察白前主根茎横切面并连同比例尺进行拍照记录,使用 Fiji 1.54.0.0 对横切面直径进行测量,每个样品重复 3 次。

2.2 横切面各部位面积占比测量

使用体视显微镜观察白前主根茎横切面并连同比例尺进

行拍照记录,使用 Fiji 1.54.0.0 对横切面皮层(H_1)、木质部-韧皮部(H_2)、髓腔(H_3)面积进行测量,如插页XXXI图 1 所示,并计算各部位面积占比(横切面各部位面积与横切面面积比值),每个样品重复 3 次。

2.3 粉末颜色测定

2.3.1 样品粉末制备 将白前样品粉碎,过 60 目筛,密封保存,备用。

2.3.2 颜色测定条件 D65 光源,8 度视角,孔径 8 mm,LED 蓝光激发。

2.3.3 颜色测定方法 用黑白板校正仪器后进行样品测定,然后再取样品进行测定,记录样品颜色各指标值 L^*、a^*、b^*,以 S1 为对照,测得色度值 $L^*_{(对照)}=47.52$,$a^*_{(对照)}=1.682$,$b^*_{(对照)}=7.99$。然后再取样品进行测定,记录样品颜色各指标值。

L^*代表颜色的亮度,L^*值越大表示颜色越亮/浅;a^*代表红绿色度,a^*值越大表示颜色越偏红,b^*代表蓝黄色度,b^*值越大表示颜色越偏黄;ΔE^*代表颜色总色差,按公式(1)计算。

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^*_{(样品)}-L^*_{(对照)})^2+(a^*_{(样品)}-a^*_{(对照)})^2+(b^*_{(样品)}-b^*_{(对照)})^2} \quad (1)$$

2.3.4 精密度考察 取同一份白前样品粉末(S1),重复测量 6 次,其 L^*、a^*、b^*的 RSD 值分别为 0.19%、0.96%、0.78%。表明该仪器精密度良好。

2.3.5 稳定性考察 分别于 0、2、4、8、12、24 h 测定同一份白前样品粉末(S1),其 L^*、a^*、b^*的 RSD 值分别为 0.30%、1.49%、0.74%。表明该方法稳定性良好。

2.3.6 重复性考察 取 6 份白前样品粉末(S1),其 L^*、a^*、b^*的 RSD 值分别为 0.17%、0.66%、0.87%。表明该方法重复性良好。

2.4 浸出物含量测定

参照《中华人民共和国药典》(2020 年版)四部通则 2201 浸出物测定法下水溶性浸出物测定法中冷浸法、醇溶性浸出物测定法中热浸法测定样品中水溶性浸出物及醇溶性浸出物含量。

2.5 总皂苷含量测定

称取白前样品粉末约 0.5 g,加入 5 mL 80% 乙醇,充分匀浆后超声 1 h,常温离心 10 min,取上清液作为供试品溶液。取 0.1 mL 样本待测液,70 ℃挥发至于,加入 0.2 mL 5% 香草醛-冰醋酸溶液和 0.8 mL 高氯酸,混匀后 60 ℃水浴 15 min,冷却后加入 5 mL 冰醋酸,混匀,采用比色法测定总皂苷含量[20]。

2.6 6 种指标成分的含量测定[18]

2.6.1 色谱条件 色谱柱:Infinity LabPoroshell 120 Aq-C_{18}(4.6 mm×100 mm,2.7 μm);流动相:乙腈(B)-0.1% 磷酸水溶液(A),梯度洗脱(0~5 min,10% B;5~12 min,10%→12% B;12~16 min,12% B;16~35 min,12%→30% B;35~49 min,30%→53% B;49~65 min,53%→82% B;65~69 min,82%→10% B;69~70 min,10% B);检测波长:260 nm(0~14 min)、274 nm(14~52 min)、210(52~70 min);流速:0.5 mL·min^{-1},柱温:30 ℃;进样量:7 μL。

2.6.2 混合对照品溶液的制备 精密称取对羟基苯甲酸、香草酸、丁香酸、4-羟基苯乙酮、2,4-二羟基苯乙酮、A-O-DCDT 6 个对照品适量,加甲醇溶解,配制成浓度分别为 20.6、101.6、153.1、20.8、71.2、116.8 μg·mL^{-1}的混合对照品溶液,摇匀备用。

2.6.3 供试品溶液的制备 取白前粉末约 1 g(过 60 目筛),精密称定,置于 50 mL 具塞锥形瓶中,精密加入水饱和乙酸乙酯 20.0 mL,密塞,称定重量,静置 12 h 后超声处理 40 min,放冷,再称定重量,用水饱和乙酸乙酯补足超声过程中损失的重量,摇匀,滤过,滤液蒸干后用 2 mL 甲醇溶解,过 0.22 μm 微孔滤膜,即得。

2.6.4 样品含量测定 取 26 批白前样品粉末,按“2.6.3”项下方法制备供试品溶液,按“2.6.1”项下色谱条件进样分析,计算样品中 6 种指标成分的含量。

2.7 统计学方法

使用 SPSS 26.0 对不同栽培年限进行独立样本 t 检验,使用 Origin 2024 对外观性状及内在成分进行相关性分析,采用 Microsoft Excel 对外观性状及内在成分进行熵权分析。

3 结果与分析

3.1 外观性状指标测定

不同栽培年限白前横切面如插页XXXI图 2,一年生白前 H_2 颜色淡黄色且质地坚实,二年生、三年生白前 H_2 亮黄且质地空泡。26 批白前样品外观性状指标测定结果见表 2,不同栽培年限白前外观性状整体变化趋势如插页XXXI图 3。结果表明,二年生、三年生白前直径、H_2(%)大于一年生白前,H_1(%)、H_3(%)小于一年生白前,相比于一年生白前,二年生、三年生白前粉末颜色变暗、变红、变黄,推测粉末颜色的变化可能与 H_2(%)增大有关。

3.2 内在成分含量测定

26 批白前内在成分含量测定结果见表 3,不同栽培年限白前外观性状整体变化趋势如插页XXXII图 4 所示。一年生、二年生、三年生白前水溶性浸出物平均含量分别为 21.46%、21.77%、18.83%,醇溶性浸出物平均含量分别为 12.23%、14.81%、13.34%,总皂苷平均含量分别为 127.31、174.80、176.02 mg/g,对羟基苯甲酸平均含量分别为 5.15、6.27、4.72 μg·g^{-1},香草酸平均含量分别为 32.87、38.64、31.48 μg·g^{-1},丁香酸平均含量分别为 21.70、30.54、30.60 μg·g^{-1},4-羟基苯乙酮平均含量分别为 2.18、2.70、3.10 μg·g^{-1},2,4-二羟基苯乙酮平均含量分别为 7.55、7.14、7.10 μg·g^{-1},A-O-DCDT 平均含量分别为 53.66、56.29、57.32 μg·g^{-1},其中,二年生白前醇溶性浸出物、总皂苷含量显著高于一年生白前,不同栽培年限白前水溶性浸出物及 6 种指标成分含量无显著差异。

3.3 相关性分析

以白前栽培年限、外观性状、内在成分含量为自变量和因变量进行 Pearson 相关性分析。见插页XXXII图 5。白前栽培年限与直径、a^*、ΔE、H_2(%)、总皂苷含量呈显著正相关,与 L^*、H_1(%)、H_3(%)呈显著负相关。结果表明随着栽培年限的增加,白前直径增大,粉末颜色变暗、变红,总色差增大,横切面 H_1(%)、H_3(%)变小,H_2(%)变大,总皂苷含量增加。

表2 26批白前外观性状测定结果($n=3, \bar{x} \pm s$)

编号	直径/(mm)	药材粉末颜色				横切面各部位面积占比/(%)		
		L*	a*	b*	△E	H_1	H_2	H_3
S1	2.40±0.18	47.41±0.08	1.35±0.01	7.57±0.01	0.06±0.03	42.62±1.02	27.09±0.59	30.30±0.45
S2	2.40±0.11	45.38±0.02	1.56±0.02	7.87±0.08	2.07±0.02	42.65±0.59	22.28±0.47	35.07±0.86
S3	2.37±0.13	47.74±0.08	1.50±0.00	7.68±0.01	0.38±0.07	43.04±1.09	26.03±0.47	30.94±0.74
S4	2.27±0.16	45.70±0.12	1.45±0.00	7.60±0.01	1.72±0.12	39.23±0.69	25.05±0.54	35.72±1.01
S5	2.36±0.06	46.46±0.07	1.55±0.04	8.01±0.09	1.07±0.10	41.69±0.82	26.04±0.68	32.26±0.24
S6	2.48±0.05	45.46±0.15	1.93±0.05	8.00±0.08	2.08±0.17	40.38±0.37	21.50±1.14	38.12±1.28
S7	2.46±0.10	45.90±0.07	1.89±0.04	8.14±0.14	1.71±0.07	41.67±0.56	25.18±2.20	33.15±2.46
S8	2.56±0.30	44.36±0.32	2.20±0.01	8.59±0.15	3.33±0.26	41.37±0.73	14.56±1.49	44.07±1.45
S9	2.40±0.12	44.36±0.32	2.20±0.01	8.59±0.15	3.26±0.29	38.80±1.06	20.97±0.38	40.23±1.06
S10	2.88±0.13	44.77±0.07	2.16±0.01	8.33±0.05	2.87±0.05	43.82±0.59	25.16±1.16	31.02±1.62
S11	2.56±0.14	45.05±0.07	2.15±0.02	8.52±0.11	2.67±0.05	42.16±0.72	22.99±0.30	34.85±0.62
S12	3.16±0.08	43.12±0.13	2.47±0.03	8.97±0.04	4.65±0.13	41.11±3.62	35.93±3.95	22.96±1.69
S13	3.10±0.18	42.86±0.10	2.06±0.02	7.74±0.08	4.61±0.09	36.91±1.52	34.93±1.18	28.17±2.59
S14	3.24±0.04	43.34±0.23	2.14±0.02	8.02±0.01	4.17±0.22	32.16±0.94	31.60±5.85	36.24±5.48
S15	2.89±0.12	44.77±0.09	2.02±0.02	8.16±0.05	2.79±0.07	41.01±0.23	31.47±0.65	27.52±0.76
S16	2.72±0.11	43.23±0.06	2.12±0.01	9.51±0.03	4.68±0.05	34.69±1.91	30.05±2.46	35.27±0.84
S17	3.20±0.11	44.20±0.08	2.04±0.02	8.31±0.05	3.37±0.08	26.14±0.84	45.21±1.01	28.66±1.66
S18	2.60±0.01	43.67±0.09	2.25±0.00	8.85±0.04	4.06±0.09	33.44±1.24	27.45±1.74	39.11±0.99
S19	3.00±0.17	43.66±0.16	2.38±0.03	8.74±0.03	4.07±0.14	37.86±3.72	32.77±1.23	29.37±3.28
S20	2.52±0.05	45.53±0.18	3.12±0.04	11.23±0.10	4.48±0.16	38.04±1.16	26.90±0.31	35.06±0.93
S21	2.92±0.04	45.97±0.06	2.03±0.04	9.23±0.15	2.31±0.15	43.67±2.35	34.73±2.51	21.60±0.99
S22	2.82±0.03	45.25±0.17	2.02±0.03	8.84±0.07	2.60±0.12	39.15±1.73	32.30±1.58	28.56±3.25
S23	2.75±0.05	41.79±0.36	1.84±0.04	7.92±0.15	5.66±0.35	40.49±0.81	26.88±0.50	32.63±1.19
S24	2.73±0.10	42.79±0.05	2.28±0.01	7.84±0.02	4.72±0.05	38.38±0.81	29.76±2.12	31.86±1.50
S25	2.79±0.03	42.18±0.11	2.39±0.01	9.16±0.06	5.57±0.10	40.64±0.95	36.58±2.47	22.77±1.52
S26	2.76±0.09	43.97±0.33	2.06±0.01	8.15±0.09	3.57±0.31	39.68±0.70	32.35±1.48	27.97±0.79

白前的外观性状与内在成分存在显著相关性，其中，直径、L*、△E、H_2(%)、H_3(%)与总皂苷含量具有显著相关性，L*、a*、b*、△E与醇溶性浸出物具有显著相关性。结果表明，白前性状和其内在化学成分密切相关，可通过外观性状对其品质进行判断。外观性状之间存在显著相关性，如粉末颜色L*与H_1(%)显著正相关，与H_2(%)显著负相关，其中H_1为白色，H_2为黄色，推测样品粉末颜色变暗(L*变小)可能与横切面H_1(%)减小，H_2(%)增大有关。

3.4 熵权法分析[21]

3.4.1 无量纲处理 对26批白前质量控制指标进行数据标准化处理，其中，直径、水溶性浸出物、醇溶性浸出物、总皂苷及6种指标成分数值越大越好，均为正向指标，按照公式(2)计算，色度及横切面各部位面积为范围值，是适度指标，按公式(3)计算。i表示样品值($i=1,2,\cdots\cdots n$)，j表示指标值($j=1,2,\cdots\cdots m$)，m_j为该组试验值中的最小值，M_j为该组试验值中的最大值，b_{best}为各指标的平均值。

$$X_{ij} = (x_{ij} - m_j)/(M_j - m_j) \quad (2)$$

$$X_{ij} = 1 - |x_{ij} - b_{best}|/\max|x_{ij} - b_{best}| \quad (3)$$

3.4.2 消零处理 为使数据运算处理有意义，将数据正向平移，进行消零处理，按公式(4)计算。为保证数据准确性，取$\alpha=0.000\ 1$。

$$X = X_{ij} + \alpha \quad (4)$$

3.4.3 熵权计算 计算各批次白前的指标值占所有样品指标值之和的特征比重(P_{ij})，按公式(5)计算。

$$P_{ij} = X_{ij}/\sum_{i=1}^{n} X_{ij} \quad (5)$$

计算各项指标的信息熵(e_j)，按公式(6)计算。

$$ej = -\sum_{i=1}^{n} P_{ij}\ln P_{ij}/\ln n \quad (6)$$

计算各项指标的熵权(W_j)，按公式(7)计算。

$$Wj = (1 - e_j)/\sum_{j=1}^{m}(1 - e_j) \quad (7)$$

计算各样本的综合得分，按公式(8)计算，结果见表4。结果显示，二年生(S13～S24)、三年生(S25、S26)白前综合评分普遍高于一年生白前(S1～S12)，表明二年生、三年生白前综合质量优于一年生白前。

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} W_i X_{ij} \quad (8)$$

4 讨论

中医临床安全、有效用药的前提是质量优良的中药材，谢宗万[22]、金世元先生[23]先后提出了“辨状论质”“五象七原”等理论，认为药材在“形、色、气、味、质”等外观上所表达的固定特征与其内在品质具有一定的联系，黄璐琦院士针对道地药材提出的“优形、优质”理念，强调道地药材应具备优良的形态特征和内在品质[24]。拓宽了传统药材辨状的范畴，其核心思想是通过获取高质量、可重复的性状数据，进而量化分析基因

表3 26批白前内在成分含量测定结果($n=3, \bar{x} \pm s$)

编号	水溶性浸出物/(%)	醇溶性浸出物/(%)	总皂苷/(mg·g^{-1})	对羟基苯甲酸/(μg·g^{-1})	香草酸/(μg·g^{-1})	丁香酸/(μg·g^{-1})	4-羟基苯乙酮/(μg·g^{-1})	2,4-二羟基苯乙酮/(μg·g^{-1})	A-O-DCDT/(μg·g^{-1})
S1	20.75±0.60	9.62±0.51	131.31±5.61	2.18±0.03	19.28±0.24	12.43±0.02	1.55±0.03	6.65±0.05	33.28±0.33
S2	19.29±0.53	9.99±0.25	122.47±4.29	2.74±0.05	28.60±0.55	16.11±0.25	1.87±0.03	15.52±0.18	37.58±0.23
S3	22.53±0.18	11.22±0.28	124.78±2.33	2.45±0.03	25.65±0.25	20.47±0.36	1.51±0.01	4.76±0.01	73.15±0.60
S4	23.36±0.84	11.87±0.31	123.83±2.13	4.94±0.06	35.62±0.87	24.15±0.11	2.50±0.01	7.05±0.70	65.44±0.81
S5	22.06±0.42	10.10±0.27	146.71±5.87	3.50±0.03	26.42±0.35	16.22±0.12	2.18±0.01	11.76±0.00	69.70±0.34
S6	20.44±0.11	12.61±0.91	126.34±2.23	5.70±0.09	32.92±0.46	16.85±0.04	2.16±0.02	5.40±0.08	46.58±0.79
S7	21.83±0.35	13.22±0.04	101.65±3.36	7.19±0.05	42.62±0.53	28.83±0.17	2.56±0.02	4.71±0.02	42.49±0.25
S8	20.73±0.23	14.16±0.08	110.53±0.64	5.83±0.05	31.51±0.27	27.46±0.32	2.09±0.01	3.97±0.02	75.26±1.14
S9	23.77±0.09	14.65±0.13	105.46±1.29	7.13±0.01	36.60±0.06	31.39±0.30	2.15±0.02	3.11±0.05	35.98±0.15
S10	20.24±0.05	13.38±0.10	155.70±2.77	7.44±0.08	42.05±0.73	22.65±0.41	2.51±0.02	8.45±0.02	56.22±1.63
S11	21.05±0.48	13.75±0.27	151.63±3.48	7.52±0.03	40.46±0.27	22.29±0.37	2.91±0.10	11.70±0.26	52.41±7.52
S12	18.01±0.14	12.01±0.02	160.76±2.45	2.84±0.01	20.73±0.16	13.99±0.19	1.61±0.01	3.61±0.04	51.42±0.72
S13	17.57±0.06	13.18±0.21	178.03±4.79	3.31±0.02	26.12±0.04	19.25±0.25	3.79±0.04	17.92±0.03	33.04±0.20
S14	15.12±0.16	11.67±0.38	163.98±3.05	3.66±0.02	23.31±0.40	16.98±0.27	1.99±0.01	5.86±0.04	71.73±1.16
S15	19.88±0.16	14.87±0.40	154.89±4.22	8.18±0.16	47.94±0.59	33.12±0.35	2.30±0.00	4.18±0.01	64.35±0.80
S16	24.30±0.34	14.41±0.74	165.98±3.76	3.36±0.02	28.75±0.04	29.45±0.14	1.90±0.05	5.39±0.01	50.83±1.11
S17	25.51±0.52	15.96±0.12	178.08±6.88	7.33±0.34	84.75±2.99	88.41±4.64	3.79±0.11	8.60±0.55	109.27±4.08
S18	28.27±0.67	16.33±0.60	162.62±7.25	6.78±0.01	36.27±0.64	34.63±0.56	1.32±0.02	2.29±0.01	45.64±0.23
S19	26.84±0.24	15.59±0.13	155.39±3.61	7.87±0.03	33.11±0.14	24.58±0.10	1.61±0.02	3.36±0.04	28.67±0.21
S20	29.11±0.68	19.64±0.08	162.17±7.47	6.39±0.09	23.50±0.12	21.04±0.10	1.31±0.02	3.67±0.05	18.98±0.21
S21	23.05±0.15	14.43±0.02	176.77±7.30	8.14±0.16	30.09±0.84	18.50±0.30	1.41±0.03	2.02±0.07	49.45±1.93
S22	17.06±0.36	11.75±0.04	192.68±3.98	7.59±0.13	60.13±0.50	34.37±0.14	4.11±0.04	10.16±0.02	74.69±0.45
S23	21.40±0.04	18.99±0.09	229.39±5.79	8.71±0.03	48.72±0.02	35.24±0.21	3.25±0.07	3.55±0.05	65.28±0.21
S24	16.87±0.18	13.71±0.09	191.68±4.24	6.60±0.05	36.24±0.48	27.34±0.29	6.14±0.01	22.38±0.27	74.41±3.65
S25	20.09±0.34	16.99±0.21	175.87±4.39	4.87±0.08	37.38±0.73	43.54±0.91	2.16±0.04	4.45±0.04	71.30±0.69
S26	17.57±0.17	9.69±0.08	176.17±1.58	4.56±0.10	25.58±0.20	17.66±0.21	4.22±0.05	9.75±0.01	43.73±0.83

表4 不同栽培年限白前熵权法综合得分

样品编号	综合评分	排名	样品编号	综合评分	排名
S1	0.166	26	S14	0.348	20
S2	0.304	22	S15	0.501	6
S3	0.223	25	S16	0.365	15
S4	0.336	16	S17	0.762	1
S5	0.323	21	S18	0.445	11
S6	0.341	23	S19	0.435	13
S7	0.396	12	S20	0.401	17
S8	0.344	18	S21	0.373	19
S9	0.383	14	S22	0.562	3
S10	0.490	8	S23	0.526	4
S11	0.484	7	S24	0.592	2
S12	0.283	24	S25	0.375	10
S13	0.456	5	S26	0.428	9

型和环境互作效应及其对中药质量的影响,为中药材现代化质量控制体系建立奠定基础[25]。

色泽是中药外观性状的主要内容之一,包括药材表面的色泽特征、内部颜色。根茎类中药材的颜色变化主要受次生代谢产物累积、细胞壁结构变化及酶促与非酶促反应的影响。长周期栽培可以促进酚类、黄酮类及生物碱等活性成分的合成与转化,使药材颜色加深[26];同时木质素与纤维素含量增加也会促进其组织色泽的加深[27]。因此根茎类药材的"色"辨不仅是外观特征的变化,也反映其化学成分及药效的动态变化,可一定程度上用于鉴别药材的栽培年限[28-29]。考虑到部分根茎类药材的表皮与内部组织色泽不同[30],对其粉末进行颜色测定能更准确反映整体颜色特征,本实验用白前药材粉末进行颜色测定保证其数据的代表性和稳定性。研究结果表明,随着栽培年限的增加,白前药材粉末颜色变暗、变红,总色差增大,总皂苷和醇溶性浸出物含量增加,推测随着年限增加,药材中的酚类、黄酮类等成分可能发生氧化,生成醌类等有色物质,导致颜色变暗、变红,醇溶性浸出物主要包括皂苷、酚类、黄酮类等次生代谢产物,随着栽培年限增加,这些成分的积累导致浸出物含量上升,导致粉末颜色发生变化。

中药材的显微特征作为"形"的重要内容之一,不仅是药材品质的重要鉴别指标,同时也与栽培年限密切相关。研究表明随着栽培年限的增加,根茎的结构发生动态变化,影响药材的有效成分积累、组织结构发育及药效物质分布[31]。如林怀斌等[32]研究表明挥发油在野生苍术根茎中主要富集于中部节段的皮层分泌腔,在移栽苍术根茎中随着年限增加呈现由外往里"皮层-韧皮部-木质部-髓部"逐渐积累趋势。高四云等[33]研究发现黄芪栽培至四年以上时,木质部比例显著增大,与黄酮类及皂苷类化合物含量呈正相关,表明维管系统在长周期栽培过程中趋于完善,维管束数量增加、导管直径扩大,有助于水分与营养的传输,并促进有效成分的合成与积累。故本研究对白前根茎横切面进行显微观察并对各器官直径及面积占比进行测定。结果表明,随着栽培年限的增加,白前H_2(%)增大,总皂苷含量增加,推测其可能为随着栽培年限的延长,白前的木质部逐渐发育,细胞壁增厚,导致木质部体积增大,能更高

效地运输水分和无机营养物质,为皂苷合成提供了更多原料。表明其显微结构中各器官的动态变化可用于评估药材的生长周期对质量的影响,推测适宜的栽培年限能够促进维管系统的发育并改善药材的质地与稳定性,促进次生代谢产物的积累,从而确保其药效与质量。

本研究基于外观性状与内在化学成分的系统分析,综合评估了不同栽培年限白前的质量。采用熵权法对多个质量指标进行综合评分,结果表明,二年生和三年生白前的综合品质显著优于一年生白前。结合生产成本、土地利用效率及药材品质稳定性等因素分析,在确保药材质量的前提下,推断白前于第二年采收较为合理。该结论可为白前的科学栽培及标准化生产提供理论依据,同时为优化白前的采收周期、提高道地药材品质提供数据支持。

后续可进一步结合多维色谱技术与高分辨质谱对成分进行深入解析,进一步明确其结构特征与形成机制,同时有必要考察不同生长环境、土壤条件及生长年限对白前性状、成分的影响,筛选最佳种植模式,为白前的品质控制与资源开发提供科学依据。

参考文献

[1] 陶弘景. 名医别录:辑校本[M]. 尚志钧,辑校. 北京:中国中医药出版社,2013:125.
[2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部[S]. 北京:中国医药科技出版社,2020:113 - 114.
[3] 柳佚雯,李睿,罗寅珠,等. 白前化学成分和药理活性研究进展[J]. 中华中医药学刊,2022,40(8):17 - 28.
[4] 肖培根. 新编中药志 - 第二卷[M]. 北京:化学工业出版社,2002:353 - 356.
[5] 国家中医药管理局《中华本草》编委会. 中华本草 - 9[M]. 上海:上海科学技术出版社,1999:350 - 353.
[6] 卢赣鹏. 500 味常用中药材的经验鉴别[M]. 北京:中国中医药出版社,1999:7 - 10.
[7] 樊霞霞,孙涛,何蓓蓓,等. 中药材内在品质和外在性状结合的研究现状及对策[J]. 世界科学技术 - 中医药现代化,2023,25(9):2914 - 2923.
[8] 张瑞,曹庆伟,李科,等. 黄芪药材性状和化学特征与绝对生长年限的相关性分析研究[J]. 中草药,2020,51(2):451 - 460.
[9] 薛雪,王浩,贾天颖,等. 不同生长方式及年限防风饮片质量的比较研究及对《中华人民共和国药典》防风饮片标准的思考[J]. 中国中药杂志,2019,44(18):4034 - 4042.
[10] 雷咪,柳佚雯,陈科力,等. 白前的本草考证[J]. 中国药房,2021,32(8):1014 - 1019.
[11] 徐齐利. 熵权法综合评价系统设计与实现[J]. 软件,2020,41(1):79 - 84.
[12] 井亚江,黄建萍,王七龙,等. 基于熵权 TOPSIS 法和灰色关联度分析筛选桔梗最佳采收期[J]. 中国现代应用药学,2024,41(9):1229 - 1237.
[13] 申柯,姚晓煜,李建国,等. 多组分定量结合 AHP - 熵权法对不同产地梅花鹿茸饮片质量综合评价[J]. 中草药,2024,55(21):7474 - 7482.
[14] 杨静容,陈亚楠,肖春萍,等. 响应面法优化盐关黄柏炮制工艺及其成分与色度相关性分析[J]. 中草药,2024,55(15):5093 - 5103.
[15] 刘小琪,刘莎,刘付松,等. 基于品质综合评价的积雪草最佳采收期研究[J]. 中华中医药学刊,2023,41(12):73 - 78,284 - 285.
[16] ZHOU L B,JIANG C Y,LIN Q X. Entropy analysis and grey cluster analysis of multiple indexes of 5 kinds of genuine medicinal materials[J]. Sci Rep,2022,12:6618.
[17] WU D,YU D M,ZHANG Y J,et al. Metabolite profiles,bioactivity,and HPLC fingerprint of different varieties of eucommia ulmoides oliv.: towards the utilization of medicinal and commercial Chinese endemic tree[J]. Molecules,2018,23(8):1898.
[18] 刘世红,张红杨,冯书敏,等. 基于 UPLC 指纹图谱及多指标成分定量和化学计量学的白前质量评价[J]. 中草药,2024,55(22):7837 - 7846.
[19] 柳佚雯,左金菊,刘世红,等. 基于"辨状论质"的白前商品规格等级研究[J]. 中医药学报,2024,52(12):38 - 46.
[20] 陈艳清. 中药材柳叶白前生产关键技术及质量标准研究[D]. 武汉:华中农业大学,2023.
[21] 万理,祝婧,杨明,等. 基于熵权 - TOPSIS 模型结合特征图谱的蜜麸枳壳原料产地优选及质量标准提升研究[J]. 中草药,2024,55(1):68 - 76.
[22] 谢宗万. 中药品种传统经验鉴别"辨状论质"论[J]. 时珍国药研究,1994,5(3):19 - 21.
[23] 金世元. 金世元中药材传统鉴别经验[M]. 北京:中国中医药出版社,2010.
[24] 袁媛,黄璐琦. 道地药材分子生药学研究进展和发展趋势[J]. 科学通报,2020,65(12):1093 - 1102.
[25] 袁媛,郑汉,黄璐琦. 再论道地药材"优形、优质、优效"特征成因及研究模式[J]. 中国中药杂志,2024,49(15):3977 - 3985.
[26] 朱新甜,欧阳少琴,王语诗,等. 基于粉末颜色数字化的黄芩生长方式判别分析及主要药效成分含量的准确预测[J]. 中草药,2025,56(3):1008 - 1015.
[27] ZHANG Y,ZHAO M J,ZHU W,et al. Nonglandular prickle formation is associated with development and secondary metabolism - related genes in Rosa multiflora[J]. Physiol Plant,2021,173(3):1147 - 1162.
[28] 肖扬鑫,董妍,涂济源,等. 基于性状与化学成分变化规律分析枯芩最佳采收年限[J]. 时珍国医国药,2023,34(5):1219 - 1223.
[29] 杨冬野,蔡少青,王璇,等. 不同生长年限野生与栽培黄芩的药材鉴定研究[J]. 中国中药杂志,2005,30(22):1728 - 1735.
[30] 李燕,付康宁,王帅,等. 基于外观性状与内在指标结合的板蓝根饮片质量等级标准研究[J]. 中国中药杂志,2024,49(24):6699 - 6712.
[31] 王桂芹,努尔巴衣·阿布都沙勒克. 珠子参根茎结构特征与皂苷积累的动态变化关系[J]. 植物研究,2011,31(3):284 - 288.
[32] 林怀斌,蒋待泉,王月枫,等. 苍术根茎不同节段和移栽年限分泌腔中挥发油的组织分布规律研究[J]. 中国中药杂志,2024,49(20):5422 - 5432.
[33] 高四云,李科,熊一峰,等. 恒山仿野生黄芪绝对生长年限鉴别及黄酮和皂苷积累规律研究[J]. 药学学报,2018,53(1):147 - 154.

基于性状和化学成分关联的栽培白前最佳采收年限研究

（正文见 175－180 页）

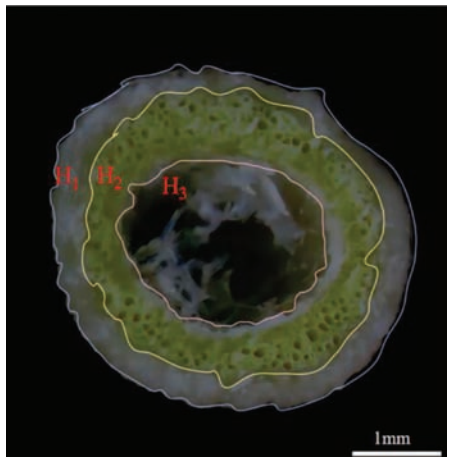


图 1　白前横切面示意图



注：图片左上角为样品编号，从左至右依次为一年生、二年生、三年生白前。

图 2　不同栽培年限白前横切面

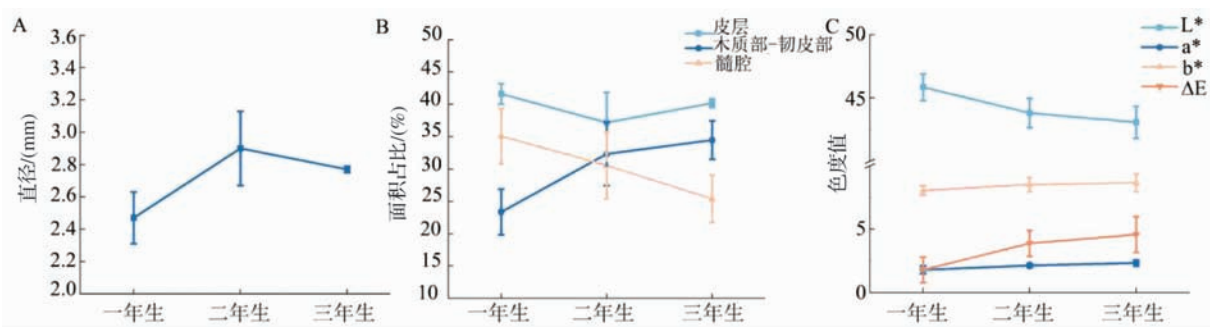


图 3　不同栽培年限白前外观性状比较

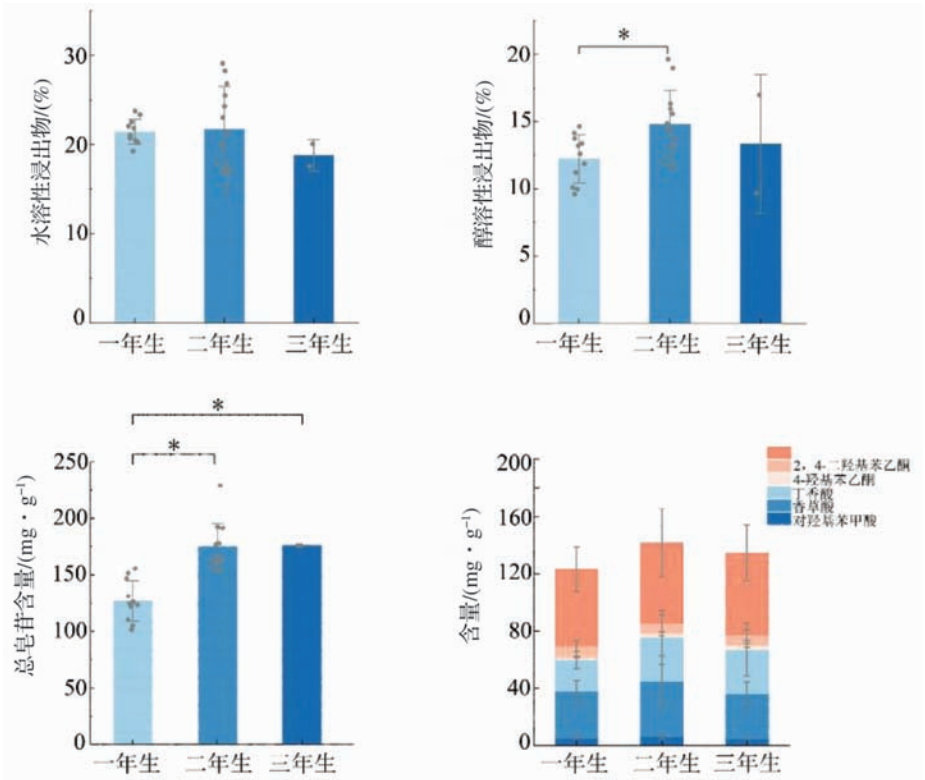
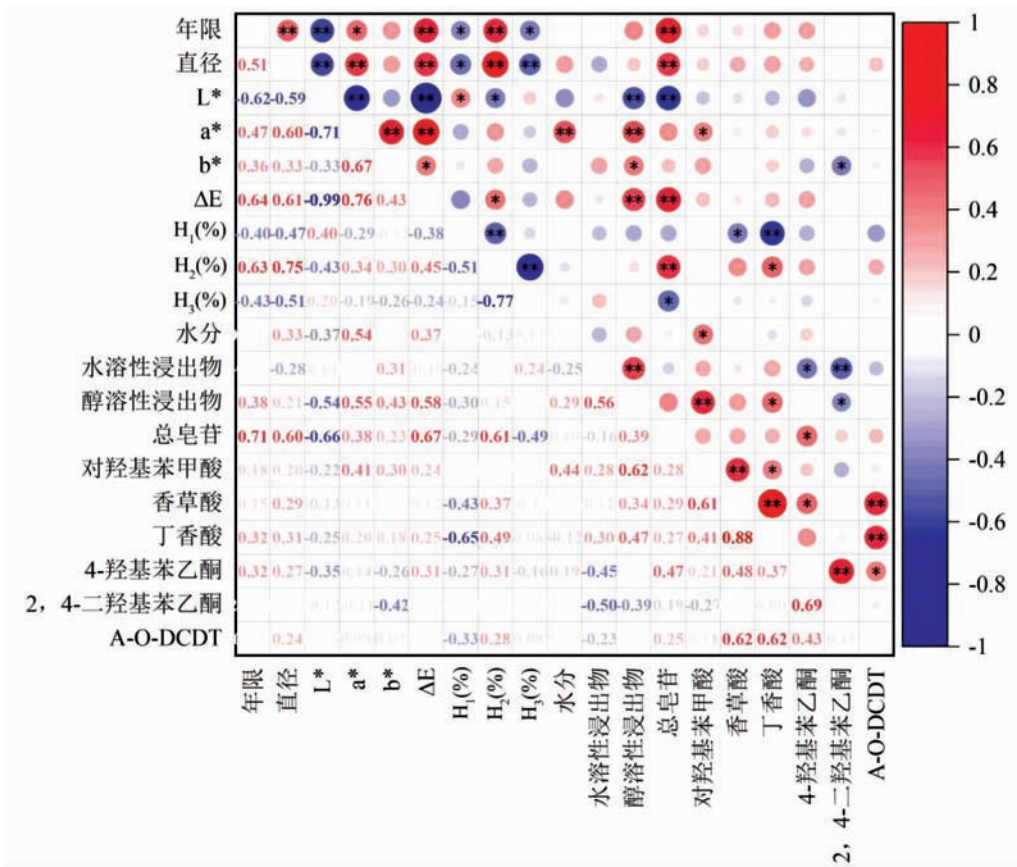


图 4　不同栽培年限白前内在成分含量比较



注：＊$P \leqslant 0.05$；＊＊$P \leqslant 0.01$。

图 5　不同栽培年限白前外观性状与内在成分相关性分析热图