不同栽培方式对淫羊藿生长及药效成分的影响

张雅娴[1]，朱田田[1,2,3*]，晋　玲[1,2,3,4]，张　帅[1]，董亚琴[1]，李明露[1]，李蕊燕[1]，杨白梅[1]，马晓辉[2,3,4]

1. 甘肃中医药大学药学院，甘肃 兰州　730000
2. 教育部西北中藏药省部共建协同创新中心，甘肃 兰州　730000
3. 甘肃省珍稀中药资源评价与保护利用工程研究中心，甘肃 兰州　730000
4. 陇药产业创新研究院，甘肃 兰州　730000

摘　要：目的　旨在探究大田、林下和仿野生不同栽培方式对淫羊藿 *Epimedium brevicornu* 生长及黄酮类成分积累的影响，为其优良栽培方式选择及规范化生产提供科学依据。**方法**　在淫羊藿生长时期选择 7 个时间点测定不同栽培方式下淫羊藿的生长指标、光合参数、光照与温湿度、土壤理化性质及黄酮类成分含量，并通过单因素方差分析、Mantel test 相关性分析、主成分分析（principal component analysis，PCA）、正交-偏最小二乘法判别分析（orthogonal partial least squares discriminant analysis，OPLS-DA）和熵权-Topsis 法进行综合评价。**结果**　林下栽培的光照强度适中且稳定，土壤有机质、全氮、全磷和速效钾等养分显著高于其他 2 种方式，且淫羊藿的生长指标、净光合速率、总黄酮及黄酮醇苷类成分含量最高。Mantel test 相关性分析、PCA、OPLS-DA 和熵权-Topsis 法综合评价均表明林下栽培的综合表现最稳定、最优异，同时也筛选出淫羊藿适宜生长的环境区间。**结论**　林下栽培是淫羊藿最优的栽培方式，控制光照强度在 9 613～16 471 lx，空气湿度在 39%～50%，有机质在 42～45 g/kg，同时适当施肥更利于淫羊藿的生长和有效成分的合成。

关键词：淫羊藿；栽培方式；黄酮类成分；生长；光合参数

中图分类号：R282.6　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2026)22 - 9126 - 13

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.22.025

Effects of different cultivation methods on growth and medicinal active components of *Epimedium brevicornu*

ZHANG Yaxian[1], ZHU Tiantian[1, 2, 3], JIN Ling[1, 2, 3, 4], ZHANG Shuai[1], DONG Yaqin[1], LI Minglu[1], LI Ruiyan[1], YANG Baimei[1], MA Xiaohui[2, 3, 4]

1. College of Pharmacy, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China
2. Northwest Collaborative Innovation Center for Traditional Chinese Medicine and Tibetan Medicine Co-constructed by Gansu Province & Ministry of Education, Lanzhou 730000, China
3. Engineering Research Center for Evaluation, Protection, and Utilization of Rare Traditional Chinese Medicine Resources, Lanzhou 730000, China
4. Longyao Industrial Innovation Research Institute, Lanzhou 730000, China

Abstract: Objective　To investigate the effects of different cultivation methods—field cultivation, understory cultivation, and wild-simulated cultivation—on the growth and flavonoid accumulation of *Epimedium brevicornu* species, and provide a scientific basis for selecting optimal cultivation methods and standardized production. **Methods**　During the growth period of *E. brevicornu*, seven time points were selected to measure the growth indicators, photosynthetic parameters, light, temperature and humidity, soil physicochemical properties, and flavonoid contents under different cultivation methods. Comprehensive evaluation was conducted using one-way ANOVA, Mantel test correlation analysis, principal component analysis (PCA),

收稿日期：2026-05-03

基金项目：甘肃省科技重大专项（23ZDFA013-1）；甘肃省联合科研基金重大项目（25JRRA1171）；甘肃省药品监管科学研究项目（2026GSMP002）；甘肃省中药质量与标准研究重点实验室开放基金（ZYZL2025-03）；中国工程院战略研究咨询项目（GS2021ZDA06）

作者简介：张雅娴，女，硕士研究生，研究方向为中药资源保护、评价与可持续利用。E-mail: 13797336240@163.com

***通信作者：**朱田田，女，教授，研究方向为中药资源评价与分子生药学。E-mail: ztt0935@163.com

orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA), and the entropy weight-Topsis method. **Results** Understory cultivation exhibited moderate and stable light intensity, with significantly higher soil nutrient contents, including organic matter, total nitrogen, total phosphorus, and available potassium, compared to the other two methods. Additionally, *E. brevicornu* under understory cultivation showed the highest values in growth indicators, net photosynthetic rate, total flavonoids, and flavonol glycoside contents. Comprehensive evaluations using Mantel test correlation analysis, PCA, OPLS-DA, and the entropy weight-Topsis method consistently indicated that understory cultivation yielded the most stable and superior overall performance. Furthermore, the suitable environmental ranges for *E. brevicornu* growth were identified. **Conclusion** Understory cultivation is the optimal method for *E. brevicornu* cultivation. Controlling light intensity within the range of 9 613–16 471 lx, air humidity at 39%–50%, soil organic matter at 42–45 g/kg, along with appropriate fertilization, is more conducive to the growth and synthesis of active components in *E. brevicornu*.

Keywords: *Epimedium brevicornu* Maxim; cultivation methods; flavonoid components; growth; photosynthetic parameters

淫羊藿是小檗科植物淫羊藿 *Epimedium brevicornu* Maxim.、箭叶淫羊藿 *E. sagittatum* (Sieb.et Zucc.) Maxim.、柔毛淫羊藿 *E. pubescens* Maxim.或朝鲜淫羊藿 *E. koreanum* Nakai 的干燥叶，具有补肾阳、强筋骨、祛风湿的功效[1]。现代药理研究表明，淫羊藿苷、朝藿定 A、B、C 等黄酮类成分是其主要药效物质，可用于抗骨质疏松、抗肿瘤[2]、抗炎[3]、抗氧化和抗衰老[4]，2002 年，淫羊藿被列入《可用于保健食品的物品名单》[5-6]，该资源价值与市场关注度进一步得到重视。

淫羊藿作为一种阴生植物，适宜生长在海拔 650～3 500 m 的区域[7]，资源分布广泛，目前我国淫羊藿属植物分布约 52 种[8]，野生资源分布于陕西、四川、甘肃、贵州、重庆等地区的山地灌丛或林下，其中甘肃省主要是淫羊藿、箭叶淫羊藿和柔毛淫羊藿，淫羊藿密布于漳县、岷县、榆中、平凉等地；柔毛淫羊藿集中在文县、徽县、康县、武都等地；箭叶淫羊藿多见于文县、武都、徽县等地[7-10]。但野生淫羊藿因长期过度采收而难以满足产业化发展的需求，因此亟需开展人工栽培、保证药材的产量和品质。在生产过程中，淫羊藿栽培主要有大田栽培、林下栽培和仿野生栽培，关于不同栽培方式对淫羊藿生长、光合参数及药效成分积累规律的系统比较研究仍相对缺乏。因此，本研究以大田、林下、仿野生 3 种栽培方式下的淫羊藿为研究对象，通过比较分析不同栽培方式下淫羊藿的生长指标、光合参数及黄酮类成分含量的动态变化，并结合光照强度、空气温湿度和土壤指标开展相关性分析，旨在阐明不同栽培方式对淫羊藿生长与品质的影响，为其优良栽培方式选择及规范化生产提供科学依据。

1 材料与仪器

1.1 材料与采样设计

试验于 2025 年在甘肃榆中县官滩沟淫羊藿种植基地（103°56′24″E，35°52′48″N，海拔 2295.23 m）进行。土壤类型为砂壤土，未施肥前的初始肥力状况见表 1。以基地内已有的大田栽培、林下栽培和仿野生栽培 3 种栽培方式下的淫羊藿为研究对象，自 2025 年返青（4 月下旬到 5 月上旬）后开始观测。3 种栽培方式下淫羊藿均为小檗科植物淫羊藿、四年生植株。大田栽培区地形开阔平整，株距 20 cm，行距 30 cm；林下栽培区位于天然林分下，地形略有起伏，株行距同大田栽培；仿野生栽培区布设于接近天然生境的山地或林缘地带，地形起伏较大，植株间距不规则。

样地布设方面，在同一地块设置 5 个重复试验进行单因素设计，分别在大田栽培、林下栽培和仿野生栽培区随机设置 5 个样方，每个样方面积为 3 m×4 m（12 m^2），进行标记。每个样方内均包含约 50 株生长健壮、长势基本一致的淫羊藿植株。

表 1 不同栽培方式土壤肥力状况

Table 1 Soil fertility status under different cultivation methods

栽培方式	pH	有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	碱解氮/(mg·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	全钾/(g·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
大田栽培	7.3	35.31	1.89	125.49	0.26	28.25	1.20	95.00
林下栽培	6.8	38.65	2.05	120.45	0.25	26.56	1.22	95.27
仿野生栽培	6.9	27.35	1.04	64.45	0.17	8.02	1.19	87.00

1.2 样品采集

自 2025 年 5 月 16 日起，每隔 15 d 进行 1 次样品采集，至 8 月 16 日结束（采集时间分别为 2025 年 5 月 16 日、2025 年 6 月 1 日、2025 年 6 月 17 日、2025 年 7 月 2 日、2025 年 7 月 17 日、2025 年 8 月 3 日、2025 年 8 月 16 日，编号为 S1～S7），对于每种栽培方式，在每个样方内部，挑选生长状况一致的植株，采集部分完全展开且健康成熟的叶片并将其混合均匀，形成一个样品。总共采集 7 次，3 种栽培方式各有 5 个样方，因此共有 105 批样品（编号为 T1～T105），经甘肃中医药大学药学院晋玲教授鉴定为小檗科植物淫羊藿 *E. brevicornu* Maxim.。在每个样方内随机选取 5 株标记植株，采集其 0～20 cm 土壤，并将同一样方内多点采集的土样混合均匀，去除杂根和石子后风干。

1.3 仪器与试剂

LI-3000C 型便携式叶面积仪（美国 LI-COR 公司）；Li-6400XT 型便携式光合仪（美国 LI-COR 公司）；TES-1339R 型照度计（中国台湾泰仕公司）；OHR-WS60 型手持温湿度检测仪（中国虹润公司）；SB-5200DT 型超声波清洗仪（宁波新芝生物科技股份有限公司）；KX-500A 型多功能粉碎机（浙江武义鼎藏日用金属制品厂）；XSE 205DU 型电子天平（美国梅特勒-托利多公司）；LC-2023C-Plus 型高效液相色谱仪（紫外检测器，日本岛津公司）；SB-5200DT 型超声波清洗仪（宁波新芝生物科技股份有限公司）；UV725N 型紫外可见分光光度计（上海菁华科技仪器有限公司）；EX224ZH 型电子天平[奥豪斯仪器（常州）有限公司]；XSE 205DU 型万分之一天平（美国梅特勒-托利多公司）；101-1AB 型电热鼓风干燥箱（天津市泰斯特仪器有限公司）。

对照品淫羊藿苷（批号 T11A11B111118）、朝藿定 A（批号 JB247608）、朝藿定 B（批号 JB238802）、朝藿定 C（批号 N18GB166250），均购于上海源叶生物科技有限公司，质量分数≥98%。乙腈、甲醇均为色谱纯，无水乙醇（分析纯，天津市富宇精细化工有限公司），水为蒸馏水。

2 方法

2.1 不同栽培方式下淫羊藿的光照及温湿度测定

自 2025 年 5 月 16 日起，每隔 15 d，选择在光照相对稳定的 14:00～16:00 时对不同栽培方式下淫羊藿的光照强度和空气温湿度进行测定。使用照度计在标记植株的垂直方向上测量光照强度。使用手持温湿度检测仪在植株上方 1.5 m 处测量空气温度和空气湿度[11]。

2.2 不同栽培方式下淫羊藿光合参数测定

光合参数测定与光照及温湿度同步进行，选择晴朗天气 10:00～12:00 时，使用便携式光合仪测定净光合速率（Pn）、胞间 CO_2 浓度（C_i）、气孔导度（Gs）和蒸腾速率（Tr）[12-13]。

2.3 不同栽培方式下淫羊藿土壤指标测定

土壤理化性质测定参照土壤农化分析方法[14-15]，pH 酸度计测定 pH 值；重铬酸钾外加热法测定有机质；凯氏定氮法测定全氮；碱解扩散法测定碱解氮；NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定全磷；碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法测定有效磷；NaOH 熔融火焰光度法测定全钾；乙酸铵浸提火焰光度法测定速效钾。

2.4 不同栽培方式下淫羊藿生长指标测定

生长指标测定与光合参数同步进行。在每个栽培方式中各选取 30 株生长良好的植株进行挂牌标记，连续观测整个生长季，测量株高（地面至主茎最高叶片顶端）和植株距地面 1 cm 处主茎茎粗。每次测定时，3 种方式分别从已标记植株中采集 30 片新鲜叶片，利用便携式叶面积仪测定叶长、叶宽和叶面积[16]。

2.5 不同栽培方式下淫羊藿产量测定

于采收期将各样方内所有植株采收，立即称量总鲜质量，并将样品于 65 ℃烘干至恒定质量，称量各样方总干质量，并计算单株平均干质量、单位面积平均产量和亩产量（1 亩＝666.67 m^2）。

2.6 不同栽培方式下淫羊藿总黄酮含量测定

2.6.1 对照品溶液的制备 精确称取淫羊藿苷对照品 1 mg，用甲醇溶解并定容至 10 mL 量瓶中。制成 0.1 mg/mL 淫羊藿苷的对照品溶液。

2.6.2 供试品溶液的制备 精密称取不同栽培方式下淫羊藿叶片粉末 0.2 g，加入 70%乙醇 20 mL，称定质量，超声处理 1 h，放冷，再次称定质量并用 70%乙醇补足质量，使用 0.22 μm 微孔滤膜滤过，即得。

2.6.3 标准曲线的绘制 精密量取“2.6.1”项溶液 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mL 分别置于 6 个 10 mL 的量瓶中，加甲醇至刻度，以甲醇为空白，照紫外-可见分光光度法（《中国药典》2025 年版通则 0401），在 270 nm 波长处测定吸光度（A）值，

以 *A* 值为纵坐标（*Y*），质量浓度为横坐标（*X*），绘制标准曲线为 *Y*＝0.038 5 *X*＋0.005 9。

2.6.4 含量测定 精密吸取溶液 1 mL 置 25 mL 量瓶中，加 70%乙醇至刻度，摇匀，在 270 nm 波长下测量 *A* 值，将 *A* 值代入标准曲线计算样品总黄酮含量。

2.7 不同栽培方式下淫羊藿黄酮醇苷类成分指纹图谱的构建

2.7.1 对照品溶液的制备 精密称取淫羊藿苷和朝藿定 A、B、C 的对照品适量，加甲醇制成含淫羊藿苷和朝藿定 A、B、C 分别为 0.108、0.160、0.168、0.132 mg/mL 的混合对照品溶液，使用 0.22 μm 微孔滤膜滤过后备用。

2.7.2 供试品溶液的制备 同“2.6.2”项下制备方法。

2.7.3 色谱条件 Agilent XDB-C_{18}（250 mm×4.6 mm，5 μm）色谱柱，柱温 30 ℃；流动相为乙腈（B）-水（A），梯度洗脱（0～30 min，24%～26% B；30～31 min，26%～45% B；31～45 min，45%～47% B），体积流量 1.0 mL/min；检测波长 270 nm，进样体积 10 μL。

2.7.4 精密度试验 精密吸取淫羊藿供试品溶液，按照“2.7.3”项连续进样 6 次，每次 10 μL。计算得各共有峰保留时间 RSD＜1.597%，各共有峰峰面积 RSD＜0.76%。

2.7.5 重复性试验 取同一批淫羊藿样品，按照“2.7.2”项平行制备 6 份供试品溶液，按照“2.7.3”项下测定。计算得各共有峰保留时间 RSD＜0.937%，各共有峰峰面积 RSD＜0.549%。

2.7.6 稳定性试验 分别于 0、2、4、8、12、24 h 吸取淫羊藿供试品溶液进样，色谱条件下测定。计算得各共有峰保留时间 RSD＜0.866%，各共有峰峰面积 RSD＜0.770%。

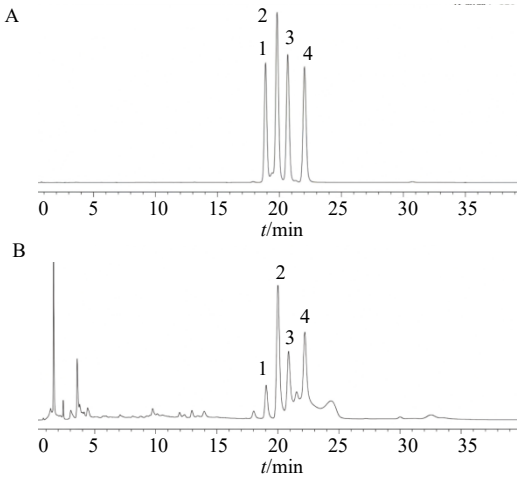
2.7.7 指纹图谱的构建和相似度评价 将 105 批（T1～T105）淫羊藿样品所得色谱图分别导入国家药典委员会“中药色谱指纹图谱相似度评价系统（2012 版）”软件进行处理，得到 105 批淫羊藿药材的 HPLC 图谱，随机选取一批样品（T1）作为参照图谱（R），时间窗宽度为 0.1 min，按中位数法生成对照图谱，生成淫羊藿药材中药指纹图谱，并进行相似度计算。

2.8 不同栽培方式下淫羊藿黄酮醇苷类成分的含量测定

2.8.1 对照品溶液的制备 同“2.7.1”项。

2.8.2 供试品溶液制备 同“2.6.2”项。

2.8.3 色谱条件 同“2.7.3”项。混合对照品溶液和供试品溶液色谱图见图 1。



1-朝藿定 A；2-朝藿定 B；3-朝藿定 C；4-淫羊藿苷。
1-epimedin A; 2-epimedin B; 3-epimedin C; 4-icariin.

图 1 混合对照品 (A) 和供试品溶液 (B) HPLC 色谱图

Fig. 1 HPLC chromatograms of mixed reference substances (A) and test sample solution (B)

2.8.4 线性关系考察 将上述混合对照品溶液分别进样 1、2、4、6、8、10 μL。以质量浓度为横坐标（*X*），峰面积为纵坐标（*Y*），绘制标准曲线，结果见表 2。

表 2 线性关系考察结果

Table 2 Results of linear relationship investigation

成分	回归方程	*r*
朝藿定A	$Y=2\times10^7X-19\,357$	0.999 8
朝藿定B	$Y=2\times10^7X-5\,540.6$	0.999 9
朝藿定C	$Y=1\times10^7X-13\,836$	0.999 7
淫羊藿苷	$Y=2\times10^7X-1\,398$	0.999 8

2.8.5 精密度考察 精密吸取混合对照品溶液，按“2.8.3”项下色谱条件连续进样 6 次，计算得到淫羊藿苷、朝藿定 A、B、C 的相对峰面积 RSD 分别为 0.52%、0.40%、0.51%、0.42%，均小于 1%，表明仪器精密度良好。

2.8.6 重复性考察 取同一时期淫羊藿样品粉末 6 份，每份 0.2 g，按“2.8.2”项下制备供试品溶液，按“2.8.3”项色谱条件测定，计算得到淫羊藿苷和朝藿定 A、B、C 质量分数的 RSD 分别为 0.44%、0.35%、0.20%、0.60%，表明该方法重复性较好。

2.8.7 稳定性考察 精密吸取淫羊藿供试品溶

液，按“2.8.3”项下色谱条件分别于 0、2、4、8、12、24 h 进样，计算得到淫羊藿苷和朝藿定 A、B、C 的相对峰面积 RSD 分别为 0.68%、0.43%、0.22%、0.21%，表明该供试品溶液在 24 h 内的稳定性良好。

2.8.8　加样回收率考察　精密称取已测定的样品 6 份，每份 0.1 g，分别按样品中待测成分含量的 50%、100%、150% 3 个水平精密加入对应的对照品溶液，计算得到淫羊藿苷和朝藿定 A、B、C 的平均加样回收率分别为 99.08%、98.76%、99.43%、100.12%，RSD 值分别为 0.58%、0.86%、0.42%、0.35%。

2.9　数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS Statistics（Version 26.0）对数据进行统计分析；采用单因素方差分析（One-way ANOVA）比较不同栽培方式间各指标的差异显著性（$P<0.05$），采用 Duncan 法进行多重比较。基于整个生长期内各指标测定的平均值，采用 Mantel test 相关性分析，检验生长指标、光合参数、光照强度、空气温湿度、土壤指标与黄酮含量之间的相关性。GraphPad prism 10.1.2 软件对筛选后的指标进行主成分分析（principal components analysis，PCA）；SIMCA 软件对所有指标进行正交-偏最小二乘法判别分析（orthogonal partial least squares-discriminant analysis，OPLS-DA）；基于所有指标进行熵权-Topsis 法综合评价。

3　结果与分析

3.1　不同栽培方式下淫羊藿各指标的差异比较

3.1.1　不同栽培方式下淫羊藿光照及温湿度测定结果　大田栽培的光照强度最强，数值在 9 564～18 210 lx 变化，并在 S3～S4 时期达到峰值，而林下栽培的光照强度数值在 7 979～10 974 lx，大于仿野生栽培的光照强度数值，但 2 种方式的光照强度变化幅度较小，数值相对稳定；而空气湿度随时间推进逐渐增加，和光照强度的峰值时段错开，其中大田栽培的空气湿度略高于其他 2 种栽培方式；空气温度则整体呈先上升后下降的趋势，3 种栽培方式的变化趋势基本相同，见图 2。

3.1.2　不同栽培方式下淫羊藿光合参数测定结果图 3-A 显示，Pn 整体呈先小幅波动后略升的趋势，在 S2～S3 时段达到较高值，其中林下栽培的平均值为 1.35～1.42 μmol/(m²·s)，仿野生栽培的平均值为 1.27～1.30 μmol/(m²·s)，大田栽培的平均值为 1.16～1.29 μmol/(m²·s)，林下栽培的数值始终

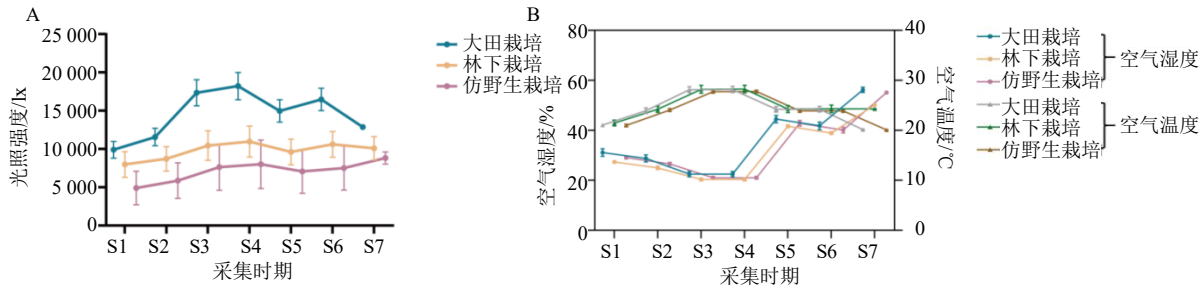


图 2　不同栽培方式对淫羊藿光照 (A) 及温湿度 (B) 的影响

Fig. 2　Effects of different cultivation methods on light (A), temperature and humidity (B) in *E. brevicornu*

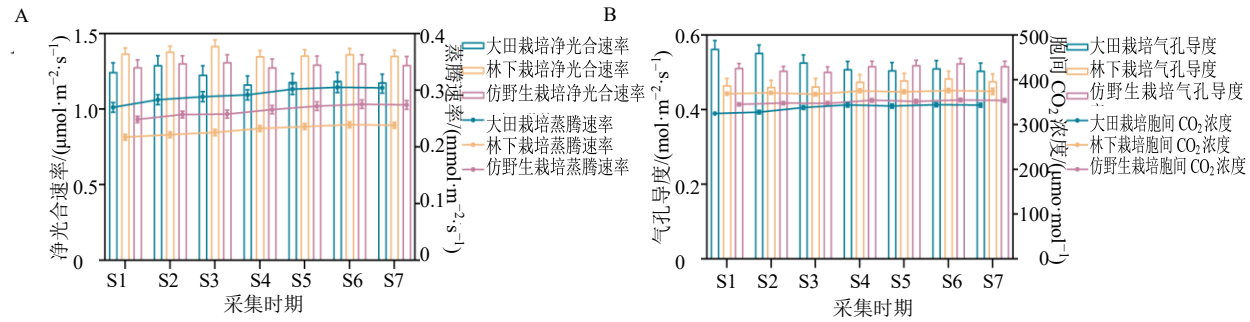


图 3　不同栽培方式对淫羊藿光合参数的影响

Fig. 3　Effects of different cultivation methods on photosynthetic parameters of *E. brevicornu*

最高，大田栽培最低；而 Tr 总体呈增加的趋势，在 S5～S6 达到峰值，且 3 种栽培方式的数值变化与 Pn 相反，大田栽培的平均值为 0.27～0.31 mmol/(m^2·s)，仿野生栽培的平均值为 0.24～0.27 mmol/(m^2·s)，林下栽培的平均值为 0.21～0.24 mmol/(m^2·s)，大田栽培的数值最高，林下栽培的数值最低。

图 3-B 显示，大田栽培的 Gs 在 S1 时数值最高，达 0.56 mol/(m^2·s)，随后逐步下降并趋于稳定，但林下栽培和仿野生栽培则是在 S6 时数值最高，分别达 0.48 mol/(m^2·s)和 0.52 mol/(m^2·s)，其变化较缓；而 C_i 整体随时间缓慢上升，并在 S6 时达到最高值，且与 Pn 的变化趋势形成一定关联，Pn 提升时，C_i 上升速率减缓。

3.1.3 不同栽培方式下淫羊藿土壤指标测定 结果图 4 显示，大田栽培的 pH 平均值为 6.80～6.93，仿野生栽培的 pH 平均值为 6.54～6.74，林下栽培的 pH 平均值为 5.82～6.02，同一时间节点下均表现为大田栽培最高，仿野生栽培次之，林下栽培最低；而有机质含量呈现持续上升的趋势，其中林下栽培的平均值为 38.73～44.23 g/kg，大田栽培的平均值为 35.34～46.74 g/kg，仿野生栽培的平均值为 27.37～34.87 g/kg，林下栽培和大田栽培的数值均大于仿野生栽培。氮素相关指标随生长时间逐渐增加，全氮在 S6～S7 时段达到峰值，碱解氮在 S3～S4 时段达到峰值，而磷与有效磷含量整体呈先升后稳的变化趋势，全磷在 S5～S6 时段内达到最高值，有效磷在 S3～S4 时段内达到峰值，钾素相关指标则呈现先升后降的趋势，并在 8 月达到峰值，其变化均是林下栽培数值最高，仿野生栽培数值最低。

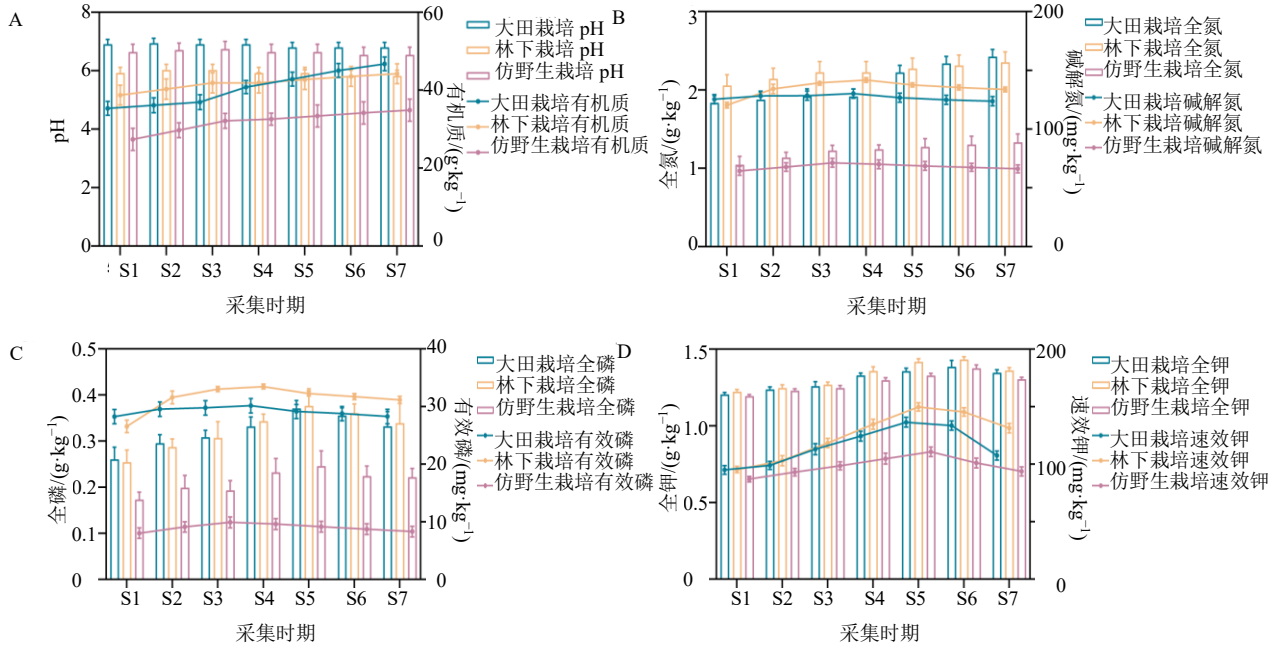


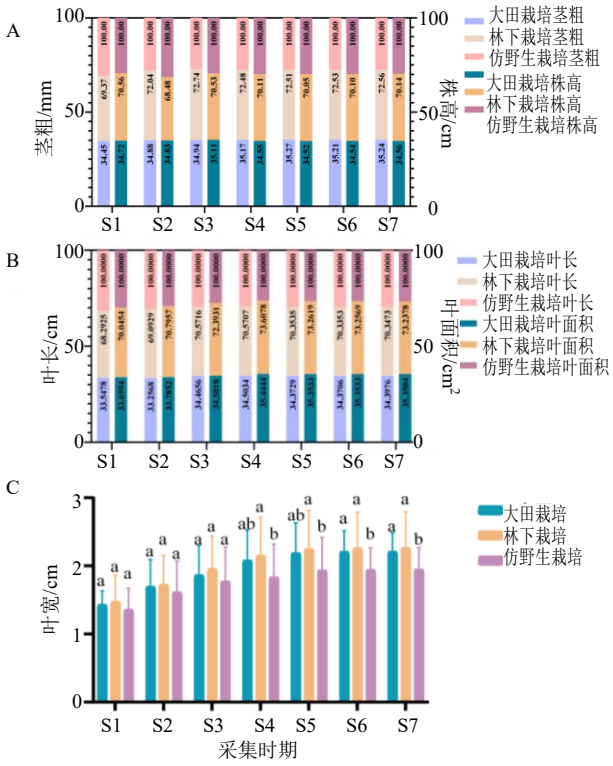
图 4 不同栽培方式对淫羊藿土壤指标的影响

Fig. 4 Effects of different cultivation methods on soil indicators of *E. brevicornu*

3.1.4 不同栽培方式下淫羊藿生长指标测定结果 图 5 显示，大田栽培、林下栽培和仿野生栽培的茎粗、株高、叶长、叶面积的差异不显著，表明其变化趋势相同，3 种栽培方式的茎粗增幅分别为 49%、55%和 30%，株高增幅分别为 223%、222%和 229%，叶长增幅分别为 77%、78%和 61%，叶面积的增幅分别为 175%、173%和 134%，其中林下栽培的各项指标增幅总体较高，3 种栽培方式下淫羊藿的叶宽也呈增加的趋势，其增幅分别为 54%、54%、43%。

3.1.5 不同栽培方式下淫羊藿产量测定结果 表 3 显示，大田栽培、林下栽培和仿野生栽培的各样方总鲜质量、各样方总干质量、单株干质量、单位面积产量和亩产量都存在显著差异，其中林下栽培的各项数值始终最高，大田栽培次之，仿野生栽培最低。

3.1.6 不同栽培方式下淫羊藿总黄酮含量测定结果 图 6 显示，总黄酮含量整体随时间推进呈上升趋势，说明生长后期是总黄酮积累的关键阶段，大田栽培的平均值为 36.13～49.02 mg/g，林下栽培



不同字母表示具有显著性差异，$P<0.05$，下图同。

Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$); same as below Figs.

图 5　不同栽培方式对淫羊藿生长指标的影响

Fig. 5　Effects of different cultivation methods on growth indicators of *E. brevicornu*

的平均值为 33.78～52.26 mg/g，仿野生栽培的平均值为 29.48～44.73 mg/g，且后期时段不同栽培方式间的含量差异保持稳定，始终为林下栽培最高，大田栽培次之，仿野生栽培最低。

3.1.7　指纹图谱的建立与相似度评价　对测得淫羊藿指纹图谱进行相似度评价，结果表明（图 7、表 4），各样品的相似度均在 0.9 以上，在不同栽培方式和不同时间下，淫羊藿的质量均较稳定。

3.1.8　不同栽培方式下淫羊藿黄酮醇苷类成分含量测定结果　图 8 显示，朝藿定 A、B、C 和淫羊藿苷的含量均随时间呈逐渐增加的趋势，与总黄酮的积累规律一致，且这 4 种成分的积累趋势高度同步，说明它们可能具有相似的调控机制，大田栽培、林下栽培、仿野生栽培的朝藿定 A 含量增幅分别为 295%、345%和 183%，朝藿定 B 增幅分别为 504%、546%和 490%，朝藿定 C 增幅分别为 493%、689%、478%，淫羊藿苷增幅分别为 733%、760%和 573%，其中林下栽培不仅数值始终最高，含量增幅也最大。

3.2　不同栽培方式下淫羊藿各指标的 Mantel test 分析

图 9 显示，林下栽培淫羊藿的生长指标、土壤指标、光照强度、Gs、C_i、Tr 与有效成分呈显著正相关，而 pH 与生长指标、Gs、C_i、Tr 呈显著负相关，与有效成分的相关性也较弱；大田栽培淫羊藿的生长指标、土壤指标、光照强度、Gs、Pn、C_i、Tr 亦与有效成分呈显著正相关，但 Gs 和 pH 与生长指标及土壤指标呈显著负相关；仿野生栽培淫羊藿的多数指标间呈正相关，只有 pH 与生长指标、Gs、C_i、Tr 呈负相关，且相关性较弱。

表 3　不同栽培方式下淫羊藿产量结果

Table 3　Yield of *E. brevicornu* under different cultivation methods

栽培方式	各样方总鲜质量/g	各样方总干质量/g	单株干质量/(g·株$^{-1}$)	单位面积产量/(kg·m^{-2})	产量/(kg·m^{-2})
大田栽培	4 368.920 0±56.8563^{b}	1 404.680 0±33.190 2^{b}	28.093 6±0.663 8^{b}	0.117 1±0.002 8^{b}	78.038 2±1.843 9^{b}
林下栽培	4 938.960 0±138.3529^{a}	1 529.880 0±75.350 6^{a}	30.597 6±1.507 0^{a}	0.127 5±0.006 3^{a}	84.993 8±4.186 2^{a}
仿野生栽培	3 699.420 0±132.7861^{c}	1 096.960 0±58.400 9^{c}	21.939 2±1.168 0^{c}	0.091 4±0.004 9^{c}	60.942 5±3.244 5^{c}

不同字母表示具有显著性差异。

a, b, and c indicate significant differences.

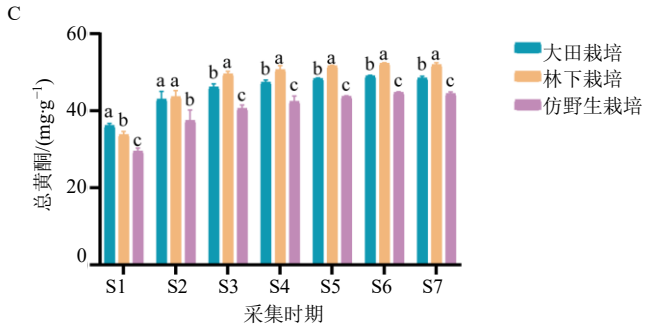
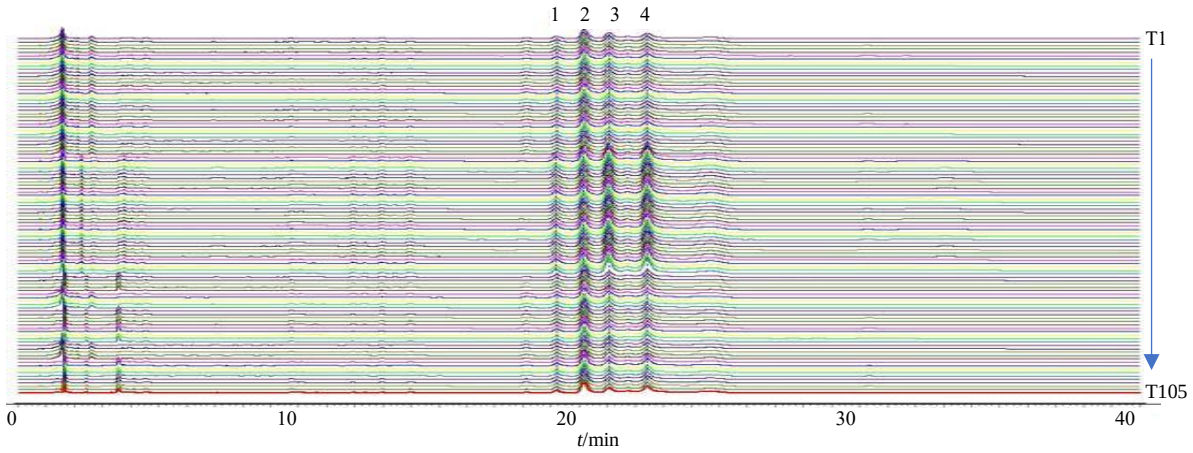


图 6　不同栽培方式下淫羊藿总黄酮含量变化

Fig. 6　Changes in total flavonoid content of *E. brevicornu* under different cultivation methods

3.3　不同栽培方式下淫羊藿各指标的 PCA

对淫羊藿各指标进行因子分析，其特征值和方差贡献率见表 5。淫羊藿第 1 主成分特征值为 7.066，第 2 主成分特征值为 4.348，前 2 个指标解



1-朝藿定 A；2-朝藿定 B；3-朝藿定 C；4-淫羊藿苷。

1-epimedin A; 2-epimedin B; 3-epimedin C; 4-icariin.

图 7　105 批淫羊藿 HPLC 指纹图谱

Fig. 7　HPLC fingerprint of 105 batches of *E. brevicornu*

表 4　相似度评价结果

Table 4　Similarity evaluation results

样本	相似度	样本	相似度	样本	相似度	样本	相似度	样本	相似度	样本	相似度	样本	相似度
T1	0.983	T16	0.982	T31	0.984	T46	0.983	T61	0.978	T76	0.939	T91	0.985
T2	0.985	T17	0.939	T32	0.985	T47	0.939	T62	0.975	T77	0.978	T92	0.978
T3	0.979	T18	0.977	T33	0.978	T48	0.978	T63	0.974	T78	0.945	T93	0.975
T4	0.976	T19	0.945	T34	0.975	T49	0.945	T64	0.950	T79	0.970	T94	0.974
T5	0.974	T20	0.970	T35	0.974	T50	0.972	T65	0.940	T80	0.983	T95	0.981
T6	0.951	T21	0.983	T36	0.981	T51	0.984	T66	0.976	T81	0.984	T96	0.941
T7	0.940	T22	0.984	T37	0.941	T52	0.985	T67	0.944	T82	0.980	T97	0.979
T8	0.978	T23	0.979	T38	0.979	T53	0.979	T68	0.972	T83	0.976	T98	0.942
T9	0.943	T24	0.976	T39	0.942	T54	0.976	T69	0.942	T84	0.973	T99	0.973
T10	0.972	T25	0.973	T40	0.973	T55	0.973	T70	0.982	T85	0.982	T100	0.982
T11	0.984	T26	0.980	T41	0.982	T56	0.977	T71	0.985	T86	0.938	T101	0.985
T12	0.985	T27	0.938	T42	0.985	T57	0.943	T72	0.979	T87	0.940	T102	0.979
T13	0.963	T28	0.976	T43	0.980	T58	0.971	T73	0.967	T88	0.943	T103	0.976
T14	0.977	T29	0.944	T44	0.977	T59	0.983	T74	0.975	T89	0.971	T104	0.974
T15	0.975	T30	0.971	T45	0.975	T60	0.984	T75	0.981	T90	0.984	T105	0.982

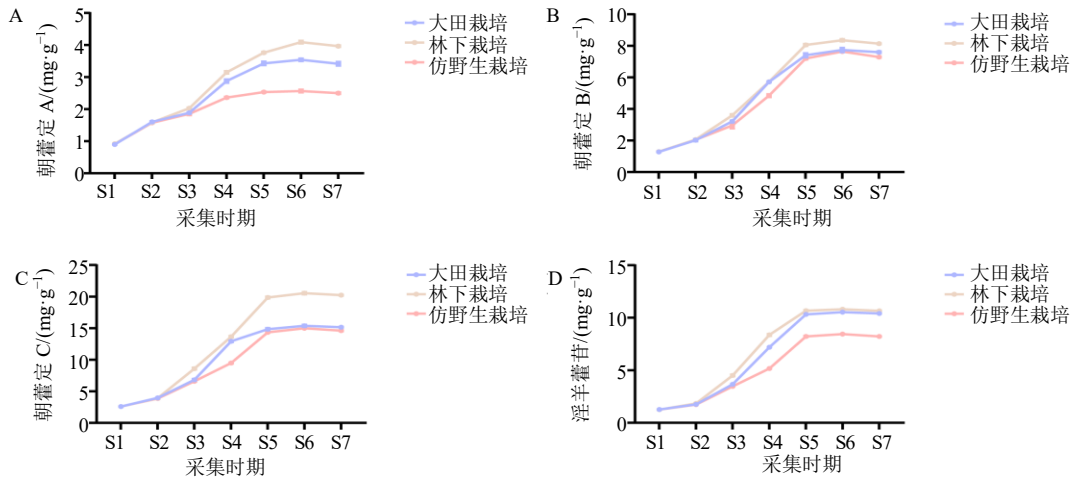
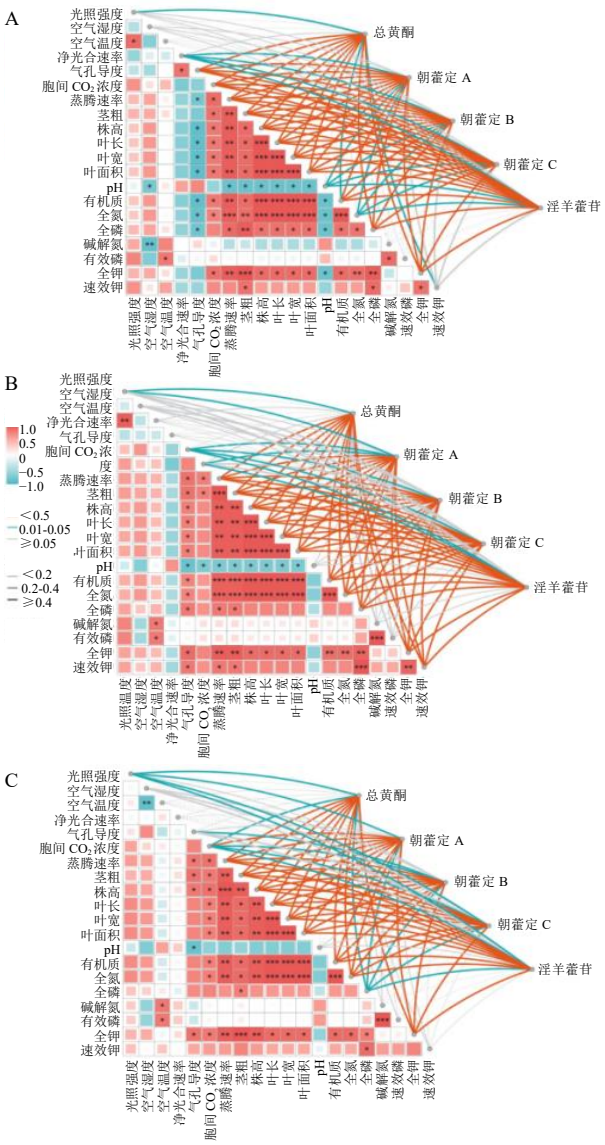


图 8　不同栽培方式下淫羊藿黄酮醇苷类含量变化

Fig. 8　Changes in flavonol glycoside content in *E. brevicornu* under different cultivation methods



红色格表示正相关，蓝色格表示负相关，$^{*}P<0.05$　$^{**}P<0.01$　$^{***}P<0.001$。

Red grids indicate positive correlation, blue grids indicate negative correlation. $^{*}P < 0.05$　$^{**}P < 0.01$　$^{***}P < 0.001$.

图 9　大田栽培 (A)、林下栽培 (B) 和仿野生栽培 (C) 的 Mantel test 分析热图

Fig. 9　Mantel test analysis heatmaps of field cultivation (A), understory cultivation (B), and wild-simulated cultivation (C)

释了淫羊藿各指标总和的 76.09%，表明前 2 个主成分能代表淫羊藿 76.09%的信息，因此认为原来的 15 个指标能够综合成 2 个主因子，作为评价淫羊藿的主成分。由表 6 可知，决定第 1 主成分大小的主要是茎粗、全磷、速效钾、有机质、叶面积，决定第 2 主成分大小的主要是 Pn、Tr、C_i、pH。为进一步确定 3 种栽培方式之间的差异因素，对数据进行 PCA 分析，PC1 和 PC2 的贡献率分别为 47.10%和

表 5　淫羊藿各指标的特征值和方差贡献率

Table 5　Eigenvalues and variance contribution rates of various indicators of *E. brevicornu*

成分	初始特征值		
	总计	方差百分比/%	累积方差贡献率/%
1	7.066 000	47.10	47.10
2	4.348 000	28.99	76.09
3	1.811 000	12.07	88.16
4	0.977 100	6.51	94.68
5	0.350 100	2.33	97.01
6	0.179 600	1.20	98.21
7	0.096 760	0.65	98.86
8	0.080 950	0.54	99.39
9	0.033 780	0.23	99.62
10	0.030 960	0.21	99.83
11	0.013 500	0.09	99.92
12	0.005 988	0.04	99.96
13	0.003 166	0.02	99.98
14	0.002 075	0.01	99.99
15	0.001 287	0.01	100.00

表 6　主成分载荷矩阵

Table 6　Principal component loading matrix

指标	主成分1	主成分2
光照强度	0.515	−0.687
空气湿度	0.312	−0.329
空气温度	0.247	0.090
净光合速率	0.112	0.934
气孔导度	−0.562	−0.690
胞间CO_2浓度	0.576	0.771
蒸腾速率	−0.100	−0.971
茎粗	0.968	−0.162
叶面积	0.906	−0.226
pH	−0.553	−0.808
有机质	0.919	−0.166
全氮	0.856	−0.089
全磷	0.918	−0.265
全钾	0.806	−0.171
速效钾	0.916	−0.083

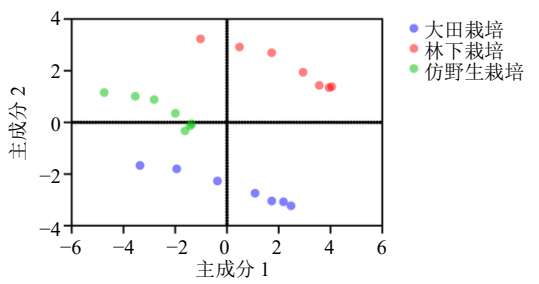


图 10　淫羊藿各指标的 PCA

Fig. 10　PCA analysis of various indicators of *E. brevicornu*

28.99%，累积贡献率接近 80%，表明 2 个主成分可以呈现淫羊藿各指标的特征信息。

总体来看，林下栽培的样本特征与大田栽培、仿野生栽培有显著差异。林下栽培在 PC1 和 PC2 都得正分，表明在此环境下，淫羊藿的生长形态更优、活性成分含量更高、土壤养分更充足；大田栽培在 PC1 得正分，PC2 得负分，说明在此环境下，淫羊藿的生长形态和活性成分积累也较好，但其光合生理活性较弱；仿野生栽培在 PC1 得负分，PC2 得正分，表示在此环境下的淫羊藿生长较弱，活性成分积累不足，但光合作用较强。综上，林下栽培是最利于淫羊藿生长、活性成分积累和光合生理活性的方式。

3.4 不同栽培方式下淫羊藿各指标的 OPLS-DA 分析

以 25 个指标成分的内容为自变量（*X*），以伪矩阵编码样本类为因变量（*Y*），计算 OPLS-DA 模型（图 11）。在 OPLS-DA 模型中，R^2_X为 0.97，R^2_Y为 0.995，Q^2 为 0.988，R^2_Y和 Q^2 都比较接近 1，说明该模型效果较好。由 Loading 图可知，代表大田栽培的点离空气湿度、Tr、pH 较近，有机质、总黄酮、朝藿定 C、全氮这些指标离代表林下栽培的点较近，而代表仿野生栽培的点离 pH 较近，表明这些指标可能是导致 3 种栽培方式差异的关键因素。由 VIP 图可知，特征值大于 1 的有 3 个，其中最高特征值是光照强度为 4.17，第 2 特征值是碱解氮为 1.69，第 3 特征值是 C_i 为 1.38，这 3 个指标可以作为区分 3 种栽培方式的关键指标。此外采用 200 次置换检验表明该模型有效可靠。

3.5 不同栽培方式下淫羊藿各指标的熵权-TOPSIS 法综合评价

本实验 25 个指标为正向指标，需使用计算得到 25 个指标的信息熵值和权重（表 7）[17]，并构

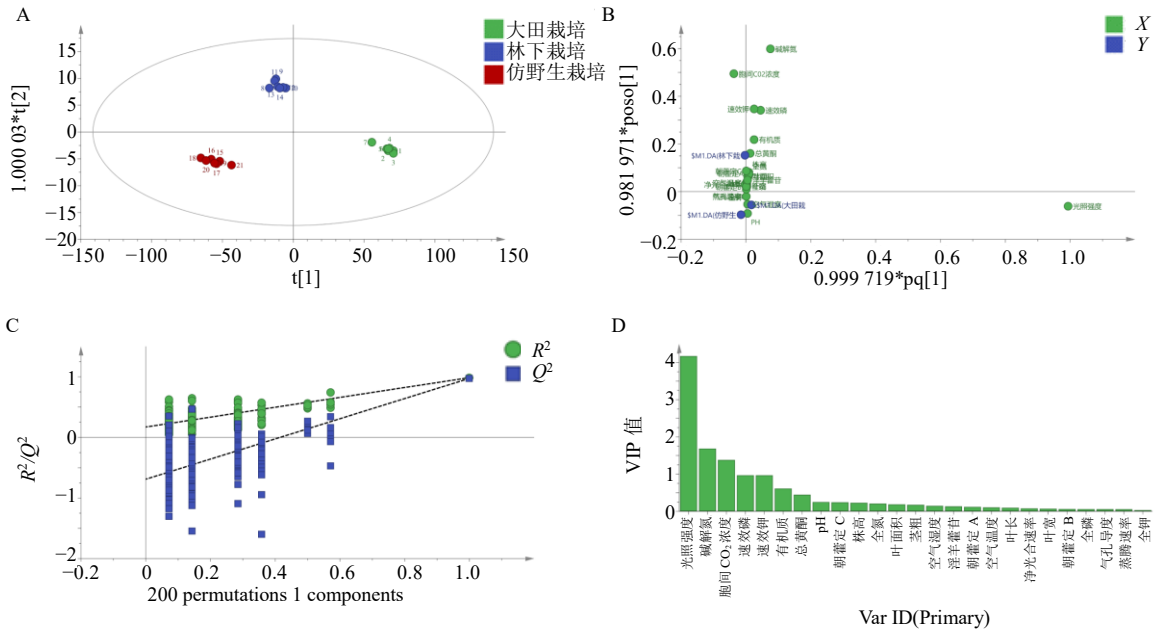


图 11 OPLS-DA 散点图 (A)、OPLS-DA 分析 loading 图 (B)、200 次置换检验图 (C) 和 VIP 图 (D)

Fig. 11 OPLS-DA score plot (A), OPLS-DA loading plot (B), 200-permutation test plot (C), and VIP plot (D)

建加权矩阵，参考文献计算[18]其各指标到最优方案的距离（D_i^+）和到最劣方案的距离（D_i^-），计算各指标与最优解的欧氏贴近度（C_i）。根据 C_i 值对不同批淫羊藿样品进行排序。结果见表 8，林下栽培的 *C* 值为 0.313～0.701，平均水平较高，且有 S5、S6、S7 3 个时间段进入前 5 名，整体表现最优；大田栽培的 *C* 值为 0.379～0.732，在 S6 时达到最高，表明其在特定时期综合表现突出，但早期表现较弱；仿野生栽培的 *C* 值为 0.204～0.508，整体偏低，综合表现较弱。总体来看，在整个生长周期内，林下栽培的综合表现最稳定、最优异，是淫羊藿栽培的最优方式。

3.6 淫羊藿的适宜生长区间筛选

描述性统计分析是对数据模拟分析的基础，而第 75 百分位可以用来描述数据的集中趋势[19]。尹丽霞等[20]提出手术时间 75 百分位数是指将统计的手术时间按升序排列，位于第 75 百分位数的手术时间即为 75thT time，它是手术部位感染危险因

表 7 各指标的信息熵值和权重

Table 7 Information entropy values and weights of each indicator

指标	信息熵值	权重
光照强度	0.929 1	0.036 55
空气湿度	0.862 5	0.070 82
空气温度	0.924 2	0.039 05
净光合速率	0.933 9	0.034 05
气孔导度	0.921 0	0.040 70
胞间CO_2浓度	0.945 7	0.028 00
蒸腾速率	0.927 8	0.037 19
茎粗	0.938 9	0.03147
株高	0.948 8	0.026 38
叶长	0.943 2	0.029 28
叶宽	0.946 2	0.027 73
叶面积	0.936 8	0.032 54
pH	0.911 8	0.045 44
有机质	0.951 4	0.025 06
全氮	0.927 2	0.037 52
全磷	0.940 1	0.030 88
碱解氮	0.896 9	0.053 10
有效磷	0.892 4	0.055 42
全钾	0.925 1	0.038 59
速效钾	0.9129	0.044 86
总黄酮	0.964 5	0.018 29
朝藿定A	0.915 3	0.043 64
朝藿定B	0.894 3	0.054 47
朝藿定C	0.888 2	0.057 62
淫羊藿苷	0.880 9	0.061 35

表 8 21 批淫羊藿样品的品质排序

Table 8 Quality ranking of 21 batches of *E. brevicornu* samples

栽培方式	采集时期	D^+	D^-	C值	排名
大田栽培	S1	0.159 39	0.097 07	0.378 514 828	17
	S2	0.138 73	0.107 73	0.437 101 741	14
	S3	0.122 60	0.122 09	0.498 963 081	12
	S4	0.097 29	0.143 72	0.596 334 589	7
	S5	0.062 87	0.164 39	0.723 357 524	2
	S6	0.061 36	0.167 17	0.731 505 657	1
	S7	0.074 59	0.168 55	0.693 207 996	6
林下栽培	S1	0.170 21	0.077 60	0.313 129 003	19
	S2	0.150 35	0.099 96	0.399 331 498	15
	S3	0.128 82	0.124 77	0.492 015 041	13
	S4	0.105 41	0.148 97	0.585 620 274	8
	S5	0.075 03	0.174 39	0.699 188 349	4
	S6	0.076 93	0.176 07	0.695 932 960	5
	S7	0.074 56	0.174 86	0.701 077 651	3
仿野生栽培	S1	0.190 28	0.048 82	0.204 191 110	21
	S2	0.171 86	0.058 88	0.255 184 306	20
	S3	0.158 97	0.075 58	0.322 221 545	18
	S4	0.143 14	0.089 98	0.385 979 566	16
	S5	0.115 37	0.117 19	0.503 910 044	11
	S6	0.117 12	0.119 03	0.504 039 899	10
	S7	0.121 68	0.125 50	0.507 720 479	9

素分层的重要指标。故为进一步得出淫羊藿的适宜生长区间，可以 21 个样本的淫羊藿总黄酮和淫羊藿苷均值为基础，计算两者的第 75 百分位数。结果表明，总黄酮为 49.015 mg/g，淫羊藿苷为 10.324 mg/g，将同时满足总黄酮≥49.015 mg/g 且淫羊藿苷≥10.324 mg/g 的样本定义为“高品质”，共筛选出 4 个点，为 S5 林下栽培、S6 林下栽培、S7 林下栽培和 S6 大田栽培，对这 4 个样本的光照、温湿度及土壤指标进行统计，结果如表 9 所示。

表 9 淫羊藿适宜生长区间

Table 9 Suitable growth range of *E. brevicornu*

指标	单位	适宜区间	平均值
光照强度	lx	9 613.333～16 471.111	11 695.682
空气湿度	%	38.904～50.142	43.115
空气温度	℃	24.233～24.302	24.261
pH	/	5.820～6.800	6.090
有机质	$g·kg^{-1}$	42.733～45.040	43.885
全氮	$g·kg^{-1}$	2.271～2.350	2.317
碱解氮	$mg·kg^{-1}$	124.900～137.626	132.926
全磷	$g·kg^{-1}$	0.339～0.376	0.357
有效磷	$mg·kg^{-1}$	28.773～32.260	30.957
全钾	$g·kg^{-1}$	1.360～1.432	1.398
速效钾	$mg·kg^{-1}$	131.333～149.800	140.033

4 讨论

本研究结果表明林下栽培是当前最适宜淫羊藿生长的栽培方式。首先，在环境因素方面，光照强度对淫羊藿的生长和有效成分的积累至关重要，朝鲜淫羊藿 *E. koreanum* 在适当强光下，其黄酮类物质和淫羊藿苷含量均显著高于弱光条件[21]，而过强的光照则会对柔毛淫羊藿的药效成分产生抑制作用[22]，这表明存在一个最佳光照范围能促进淫羊藿有效成分的积累。淫羊藿作为一种阴生植物[23]，过高强度光照会抑制其生长，本文中大田栽培的光照强度明显高于林下与仿野生栽培，强光虽为光合作用提供了能量基础，但也使蒸腾速率显著提高，抑制净光合速率的提升，这便导致大田光合生理活性较弱。而林下的光照强度比大田更适合淫羊藿的生长[24]。此外，土壤理化性质在不同栽培方式下也呈现出显著差异，林下栽培中的土壤有机质、全氮、全磷和速效钾等养分含量均显著高于大田和仿野生栽培[25]，这可能由于林下环境中丰富的枯枝落叶分解为土壤提供有机质补充，促进土壤微生物通过植物根际影响其生长和

次生代谢物积累[26-28]，虽然仿野生栽培也有枯枝落叶的分解，但其曾用于淫羊藿的种植，可能存在一定的连作障碍，导致土壤养分缺失[29]。最后，在生长指标和有效成分方面，林下栽培中的淫羊藿在茎粗、株高、叶长、产量和净光合速率等指标上均表现最佳，同时其总黄酮和淫羊藿苷、朝藿定 A、B、C 的含量也最高；而在大田环境下，较高的蒸腾速率可能导致植物将更多的能量用于其生长，而非次生代谢物的合成[30]；仿野生栽培下的淫羊藿生长速度较慢，其有效成分积累也相对不足[31]。

本实验通过关联分析进一步揭示了林下栽培优异的内在因素。Mantel test 分析和 PCA 结果表明，在林下环境中，淫羊藿的生长形态更优、活性成分含量更高、土壤养分更充足，从而使其生长与有效成分合成同步提升，例如在黄芪 *Astragalus membranaceus* 的研究中也发现，生长速率与多糖、黄酮等活性成分的积累之间存在协同关系[32]。OPLS-DA 揭示了区分 3 种栽培方式的决定性指标可能是光照强度、碱解氮和胞间 CO_2 浓度。熵权-Topsis 法综合评价了不同时间下的 3 种栽培方式，表明大田栽培在 S5 和 S6 2 个时期下的表现最好，这是因为该时期的大田环境在淫羊藿苷、朝藿定 C、有效磷、朝藿定 B 等高权重指标上的变化明显，从而使其评分较高，而大田栽培在 S7 的评分低于林下栽培，是因为高强度光照抑制了大田环境下淫羊藿的生长，导致其各指标变化减缓，而林下栽培下的指标一直处于增长的状态，在 S7 实现反超，由此推断林下栽培更适合作为长期、稳定的一种生产方式，而大田栽培则在特定的时间下可以发挥出短期优势。经过统计分析也得出，控制光照强度在 9613～16 471 lx，空气湿度在 39%～50%，有机质在 42～45 g/kg，同时适当施肥更利于淫羊藿的生长和有效成分的合成。

综上所述，相较于大田和仿野生栽培，林下栽培更适合淫羊藿的种植。大田栽培通过强化田间管理，能获得较高产量，但生产成本投入较大；林下栽培利用其自身独特的森林环境，可减少管理投入，并兼顾生态保护，是实现中药材绿色生产的重要途径之一，但其产量和生长周期依赖于林地类型，具有不确定性；仿野生栽培是在接近天然生境的环境中进行自然栽种，具有一定的生态恢复和资源保护意义，但其淫羊藿产量和品质弱于大田和林下栽培。本研究也存在一些不足，第一，试验仅在甘肃省榆中县一个地方开展，观测周期为单一生长季，未进行多年多点重复，第二，未量化林下环境中不同林分类型、密度及植被对淫羊藿生长和有效成分积累的影响，第三，未深入研究影响淫羊藿黄酮类成分合成的关键基因、酶活性以及生物合成通路等分子机制，后续仍需对其进行探索，扩大试验点，这将有助于为淫羊藿的优质高效生产提供理论指导。

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: 350.

[2] Jiang J, Zhao B J, Song J, *et al*. Pharmacology and clinical application of plants in *Epimedium* L. [J]. *Chin Herb Med*, 2016, 8(1): 12-23.

[3] 鲁宗良, 李成伟, 文金财, 等. 基于抗炎生物效价的淫羊藿质量评价研究 [J]. 中草药, 2025, 56(15): 5519-5528.

[4] Wu B, Xiao X, Li S S, *et al*. Transcriptomics and metabonomics of the anti-aging properties of total flavones of *Epimedium* in relation to lipid metabolism [J]. *J Ethnopharmacol*, 2019, 229: 73-80.

[5] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 卫生部关于进一步规范保健食品原料管理的通知 (2002 年第 51 号) [EB/OL]. (2002-02-28) [2026-3-25]. https://zwfw.nhc.gov.cn/kzx/zcfg/xspylsp_237/200202/t20020228_1316.html.

[6] 张华峰, 杨晓华. 淫羊藿在食品工业中的应用现状与展望 [J]. 食品工业科技, 2010, 31(5): 390-393.

[7] 中国科学院中国植物志编辑委员会主. 中国植物志-第二十九卷-被子植物门, 双子叶植物纲, 木通科, 小檗科: 被子植物门 双子叶植物纲 木通科 小檗科 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 262-263.

[8] Zhang Y J, Li J Q, Wang Y, *et al*. Taxonomy of *Epimedium* (Berberidaceae) with special reference to Chinese species [J]. *Chin Herb Med*, 2021, 14(1): 20-35.

[9] 马晓辉, 刘立, 孙少伯, 等. 淫羊藿资源现状及潜在分布区划研究 [J]. 中国现代中药, 2020, 22(7): 1022-1026.

[10] 董博, 王克鹏, 宋秉生, 等. 甘肃淫羊藿资源分布及产地土壤养分状况调查 [J]. 甘肃农业科技, 2015, 46(2): 126-138.

[11] Shin Y K, Lee J G. Effects of light intensity and temperature on growth and secondary metabolite production of *Centella asiatica* in vertical farms [J]. *Hortic Environ Biotechnol*, 2025, 66(6): 1437-1456.

[12] 杨媛, 张丽莎, 汪扬媚, 等. 不同行比配置对间作大豆株型塑造与光合能力的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2026, 44(2): 49-59.

[13] 李佳雯, 何奕成, 田大栓, 等. 高寒草甸植物水分利用效率的季节动态调控机制 [J/OL]. 生态学杂志, 2026-08-19.https://zwfw.nhc.gov.cn/kzx/zcfg/xspylsp_237/200202/t20020228_1316.html.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-107.

[15] Ji C H, Li W Y, Yao L, *et al*. Impact of various fertilization types and application rates on *Salvia miltiorrhiza* quality and the composition of its root microbial community [J]. *Ind Crops Prod*, 2025, 230: 121071.

[16] Xu W L, Chen L, Yang J L, *et al*. Multidimensional quality evaluation of *Artemisia argyi* as a medicinal crop: Phenotypic traits, chemical composition, and pharmacodynamic activity of wild and cultivated populations [J]. *Ind Crops Prod*, 2025, 234: 121508.

[17] 迟静, 贺玲, 毕夏, 等. 基于多指标成分定量联合化学计量学及熵权 TOPSIS 模型评价不同产地天葵子的质量 [J]. 中药新药与临床药理, 2026, 37(2): 789-796.

[18] 姚雨含, 金蕾明, 王莹, 等. 基于指纹图谱和一测多评联合 TOPSIS 及 RSR 法对红果小檗药材质量评价 [J]. 中国药学杂志, 2026, 61(7): 758-763.

[19] 黄琳. 广州市挥发性有机物对人群逐日死亡人数影响的研究 [D]. 广州: 暨南大学, 2023.

[20] 尹丽霞, 李晓江, 王春先, 等. 肿瘤专科医院手术时间 75 百分位数统计及其在手术部位感染监测中的作用 [J]. 中国肿瘤临床与康复, 2013, 20(1): 89-98.

[21] Dong R, Feng Y C, Liu L J, *et al*. Influence of light intensity on the effective chemical contents of *Epimedium koreanum Nakai* [J]. 2003, *Int J Mol Sci*, 45(3): 56.

[22] 张长泰, 马文青, 徐超群, 等. 梯度光强下柔毛淫羊藿“贵同柔毛 1 号”光合参数动态响应及光抑制效应研究 [J]. 中国现代中药, 2025, 27(6): 1081-1088.

[23] Yang L L, Zhou S W, Hou Y W, *et al*. Blue light induces biosynthesis of flavonoids in *Epimedium sagittatum* (Sieb. et Zucc.) Maxim. leaves, a study on a light-demanding medicinal shade herb [J]. *Ind Crops Prod*, 2022, 187: 115512.

[24] Liu P, Li E Y, Ma Y, *et al*. Allelopathic potential of *Haloxylon ammodendron* against *Syntrichia caninervis* and comparative analysis of soil microbial differences between inside and outside of the bare patches under its canopies [J]. *Appl Soil Ecol*, 2024, 194: 105205.

[25] Meng S Y, Gong Y F, Hu W, *et al*. Effects of soil physicochemical properties under different cultivation methods on the accumulation of effective compounds in *Epimedium* [J]. *J Soil Sci Plant Nutr*, 2026, 26(1): 3048-3059.

[26] Ding Y H, Gao X D, Shu D T, *et al*. Enhancing soil health and nutrient cycling through soil amendments: Improving the synergy of bacteria and fungi [J]. *Sci Total Environ*, 2024, 923: 171332.

[27] Yuan X, Qin H Y, Wang Y, *et al*. Coupled effects of tree species and understory morel on modulating soil microbial communities and nutrient dynamics [J]. *Microorganisms*, 2026, 14(1): 99.

[28] Sandhu S S, Alom J, Ansari B H, *et al*. The secret dialogue between plant roots and the soil microbiome: A hidden force shaping plant growth and development [J]. *Physiol Mol Plant Pathol*, 2025, 140: 102908.

[29] 陈加利, 胡体龙, 李宏英, 等. 青稞连作对根际土壤理化性质及酶活性的影响 [J]. 西南农业学报, 2026, 39(5): 568-578.

[30] Gong F S, Meng J H, Xu H W, *et al*. The molecular mechanism regulating flavonoid production in *Rhododendron chrysanthum* Pall. against UV-B damage is mediated by RcTRP5 [J]. *Int J Mol Sci*, 2024, 25(24): 13383.

[31] Lan Y M, Zhang M, Han M, *et al*. Differences in the quality, yield, and soil microecology of ginseng in different planting environments [J]. *Horticulturae*, 2023, 9(4): 520.

[32] Li X J, Mu Y T, Hua M, *et al*. Integrated phenotypic, transcriptomics and metabolomics: Growth status and metabolite accumulation pattern of medicinal materials at different harvest periods of *Astragalus membranaceus mongholicus* [J]. *BMC Plant Biol*, 2024, 24(1): 358.

[责任编辑 时圣明]