

不同光照条件对纤花香茶菜 生长发育和次生代谢物质的影响*

邹永珍¹, 吴倩儿¹, 梁可裕¹, 吴田¹, 詹若挺¹, 刘军民^{1,2}

1. 广州中医药大学中药学院, 广东 广州 510006
2. 广东银田农业科技有限公司, 广东 云浮 527300

摘要: 研究不同遮荫处理对纤花香茶菜农艺性状和化学成分含量的影响, 探索纤花香茶菜产量与药材品质形成的适宜光照条件, 为纤花香茶菜规范化种植技术提供科学依据。以纤花香茶菜种子实生苗为材料, 设置全光照100%(CK)、50%(T1)、35%(T2)、20%(T3) 4个处理, 于药材成株期测定纤花香茶菜的株高、茎粗、主茎节数等农艺性状; 采用紫外-可见分光光度法测定药材的总二萜、总黄酮和总酚酸的含量; 采用超高效液相色谱法测定咖啡酸、迷迭香酸、夏佛塔苷和槲皮素4种活性成分含量, 并通过相关性分析和熵权法进行综合评价。结果显示, T1处理的株高最大, 为54.74 cm, 且与对照组相比具有显著性差异; 对照组的茎粗最大, 为9.23 mm, 与T3处理具有显著性差异, 但与T1、T2均无显著性差异; 各个处理的主茎节数无显著性差异。随着遮荫程度增加, 叶干质量占比逐渐升高, 根干质量占比逐渐降低, 根冠比逐渐降低; 叶长、叶宽、叶面积、叶干质量和SPAD值均随着遮荫程度增加而逐渐增大; 各总成分及活性成分含量随光照强度的增加呈不同的变化规律, 总黄酮的含量逐渐增加, 总酚酸、咖啡酸和迷迭香酸含量逐渐减少, 而总二萜、夏佛塔苷和槲皮素含量在各个处理中无显著差异。通过熵权法得到各处理农艺性状综合得分结果为T1>CK>T2>T3, 化学成分综合得分结果为CK>T1>T2>T3。分析结果表明, 50%及35%光照强度适宜纤花香茶菜的生长和地上部分生物量积累; 20%光照强度适宜纤花香茶菜总黄酮成分积累; 全光照适宜纤花香茶菜总酚酸、咖啡酸及迷迭香酸成分积累; 综合分析纤花香茶菜农艺性状和质量指标, 50%光照强度的农艺性状综合评价最佳, 全光照的化学成分综合评价最佳。建议大田单作时, 于植株封行前进行50%的遮荫处理, 封行后植株生长旺盛期进行全光照处理。

关键词: 纤花香茶菜; 光照强度; 次生代谢物质

中图分类号: R28 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(XXXX)XX-0001-10

Effects of different light conditions on the growth and pharmacodynamic components of *Isodon lophanthoides* var. *graciliflorus*

ZOU Yongzhen¹, WU Qianer¹, LIANG Keyu¹, WU Tian¹, ZHAN Ruoting¹, LIU Junmin^{1,2}

1. School of Chinese Materia Medica, Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510006, China

2. Guangdong Yintian Agricultural Technology Co., Ltd., Yunfu 527300, China

* 收稿日期: 2025-07-01 录用日期: 2025-11-09 网络首发日期: 2025-11-XX

基金项目: 省级乡村振兴战略专项资金种业振兴行动项目(2024-NPY-00-048);
云浮中医药(南药)产业创新团队项目(云科函[2023]96号, 202301);
以农产品为单元的广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目(南药产业技术体系)
(2024CXTD24)

作者简介: 邹永珍(2000年生), 女; 研究方向: 中药材种质资源品质评价; E-mail: 2246233274@qq.com

通信作者: 刘军民(1973年生), 女; 研究方向: 中药材种质资源的鉴定与质量评价,

E-mail: liujunmin@gzucm.edu.cn



全文阅读

ZR20250118

Abstract: To study the effects of different shading treatments on the agronomic traits and chemical component contents and explore the suitable light conditions for the yield and quality of the *Isodon lophanthoides* var. *graciliflorus* (Benth.) H. Hara, and provide a scientific basis for the standardized planting techniques of *I. lophanthoides* var. *graciliflorus*. Taking the seedlings of the seeds of *I. lophanthoides* var. *graciliflorus* as materials, 4 treatments of 100% (CK), 50% (T1), 35% (T2), and 20% (T3) full light were set up. The plant height, stem diameter and the number of main stem segments were measured during the medicinal adult plant stage. The contents of the 3 total components were determined by ultraviolet-visible spectrophotometry. The contents of 4 active components were determined by ultra-performance liquid chromatography, and a comprehensive evaluation was conducted through correlation analysis and entropy weight method. The results show that treatment T1 had the largest height, which was 54.74 cm, and there was a significant difference from the control group. The stem diameter of the control group was the largest, at 9.23 mm, which was significantly different from that of T3, but there was no significant difference from T1 and T2. There was no significant difference in the number of main stem nodes in each treatment. With the increase of shading degree, the proportion of leaf dry matter content gradually increases, the proportion of roots dry matter content gradually decreases, and the root-crown ratio gradually decreases. The leaf length, leaf width, leaf area, leaf dry matter content and SPAD value all gradually increase with the increase of shading degree. The contents of each total component and active component showed different variation patterns with the increase of light intensity. The content of total flavonoids gradually increased, while the contents of total phenolic acid, caffeic acid and rosmarinic acid gradually decreased. However, there was no significant difference in the contents of total diterpenoids, charfortin and quercetin in each treatment. The comprehensive score results of agronomic traits of each treatment obtained by the entropy weight method were T1>CK>T2>T3, and the comprehensive score results of chemical composition were CK>T1>T2>T3. Based on a comprehensive analysis of the agronomic traits and quality indicators, the comprehensive evaluation of agronomic traits at 50% light intensity is the best, and the comprehensive evaluation of chemical components under full light is the best. Therefore, it is suggested that in field production, 50% shading treatment should be carried out before sealing, and full light treatment should be carried out during the vigorous growth period after sealing.

Key words: *Isodon lophanthoides* var. *graciliflorus* (Benth.) H. Hara; light intensity; secondary metabolites

纤花香茶菜 [*Isodon lophanthoides* var. *graciliflorus* (Benth.) H. Hara] 为唇形科香茶菜属植物, 主要分布于广东、广西、福建等岭南地区, 常野生于阴湿的林下、田边、山坡地, 是一种喜阴的药用植物。其干燥地上部分作中药溪黄草入药(广东省食品药品监督管理局, 2011), 具有清热利湿、消炎利肝等功效, 临床常用于治疗急性黄疸型肝炎、肠炎等(中国科学院中国植物志编辑委员会, 1977; 广东省食品药品监督管理局, 2011)。含有丰富的次生代谢产物, 主要包括二萜类、黄酮类、酚酸类等成分(林恋竹, 2013), 具有抗肿瘤、抗氧化、抗病毒等多种药理活性(潘雪峰等, 2014), 是一种具有较高药用价值的岭南道地药材。

光照对喜阴植物形态结构、生理生化效应以及次生代谢产物合成都具有重要的调控和诱导作用(钱龙梁等, 2019)。在实际生产中, 可以通过合理调控光照条件来优化喜阴植物的生长发育和产量品质, 提高经济效益和社会效益。现有研究表明, 川芎苗期和第一次茎叶生长期的形态变化, 随着遮荫程度的增加, 其株高、茎粗、鲜质量、干质量、叶面积及苗期叶片数均呈现逐渐降低的趋势(陈小峰等, 2008); 轻度遮荫处理能够促进银杏叶中黄酮和萜内酯的合成和累积(贺小妮等, 2018); 三七植株的茎会随光照强度的增加表现出矮化、变粗的趋势, 强光环境可能会抑制细胞的伸长, 促进细胞的横向生长, 导致茎部形态的改变(陈黎明等, 2016);

过强的光照强度会抑制金线莲总黄酮的积累(陈常理等, 2023); 蒲公英总酚酸含量随着光照强度的降低呈先升高后降低的趋势, 82.6% 遮荫透光率时达到最高(孟宇航等, 2020)。当前, 生产上的遮荫技术主要分为生态遮荫和覆盖遮荫两种, 生态遮荫是一种利用自然环境的种植方式, 主要是通过药材种植地周围或其中种植比其植株更加高大的灌木, 或在经济林木、高大适生树种间作、套作。覆盖遮荫则是一种更为人工化的遮荫方式, 主要通过药用植物上方搭建遮阳结构来实现, 可灵活选择多种覆盖材料包括稻草、各种各样的棚膜以及遮阳网等(王晋等, 2023)。纤花香茶菜作为喜阴植物, 在岭南地区以大田单作方式种植广泛, 田间主要采用覆盖遮荫, 长期存在种植模式单一、遮荫条件不统一、占用基本农田、种植成本较高等问题。而恰当的遮荫条件不仅能够优化纤花香茶菜的生长发育和品质形成, 同时还能对其由覆盖遮荫转向生态遮荫的种植方式具有正向促进作用。目前, 业内尚缺乏针对纤花香茶菜喜阴的特性, 开展覆盖遮荫及生态遮荫条件的相关研究。基于此, 本研究通过设置不同遮荫处理组, 于成株期分析测定不同遮荫条件下纤花香茶菜的农艺性状和次生代谢物质的含量, 以期探索出适合纤花香茶菜药材产量与品质形成的最佳光照强度, 为纤花香茶菜粮药、果药间套作等规范化生态种植模式的探索提供科学依据, 并为其药材生产从大田单作向林药、光伏药等复合生态种植方向发展提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况及试验材料

试验地位于广州中医药大学时珍山(113°23'54"E, 23°03'49"N), 亚热带季风气候。年平均气温为 24.0 °C, 极端最高气温为 38.9 °C, 极端最低气温为 4.7 °C; 高温日数 41 d, 7 月 8—16 日出现历史第 3 强的高温过程。年降水量 2 005.6 mm, 年日照时数为 1 667.1 h。

供试材料纤花香茶菜种子实生苗。主要仪器设备: 双光束紫外可见分光光度计(A560 型, 上海翱艺仪器有限公司)、超高效液相色谱仪(LC-30AD, 日本岛津公司)、叶面积扫描仪(YMJ-C, 浙江托普仪器有限公司)、便携式叶绿素仪(SARD-502 型, 日本美能达公司)、便携手持式光照计(TES-1339R, 台湾泰仕, 中国)。材料: 对照品咖啡酸($w=99.7%$)、芦丁($w=91.7%$)、迷迭香酸($w=98.5%$)及槲皮素($w=$

98.5%)均购自中国食品药品检定研究院; 冬凌草甲素($w\geq 98%$)购自北京索莱宝科技有限公司; 夏佛塔昔($w=98%$, 成都埃法生物科技有限公司)。

1.2 试验设计

试验于 2023 年 4 月 26 日至 10 月 14 日在广州中医药大学时珍山进行。将培育好的纤花香茶菜种子实生苗(苗高约 10 cm), 移栽至花盆(口径 23 cm, 高 16 cm)中, 每盆种植 3 株, 每个处理 20 盆, 共 60 株。统一放置于荫蔽空旷地炼苗 30 d, 选取生长状态基本一致的幼苗, 随机分组试验。设置 4 个处理, 分别按照相对光强为全光照的 100%(对照组), 50%(T1), 35%(T2), 20%(T3)进行遮荫处理, 自然光条件下设立对照组, 对于其他 3 个试验组则通过搭建由黑色尼龙网构成的拱形遮阳棚实现不同程度的遮荫处理。选择全晴天, 于 10:00—12:00 每隔 20 min, 使用手持式光照计测量遮荫棚内以及对照组的光照强度, 各处理组相对光照强度分别为(93 540±1 735)、(45 467±1 010)、(33 710±2 129)、(18 554±1 138) lx。试验期间保持土壤适度湿润, 并进行统一除草、防病虫害管理。于 10 月中旬, 即纤花香茶菜成株期, 随机选取各试验组 5 盆植株, 作为 5 个生物学重复, 分别测定植株的主要农艺性状, 并剪取植株地上部分, 晒干、打粉、过 50 目筛, 即得药材样品粉末。

1.3 试验方法

1.3.1 农艺性状的测定 采用常规植物分类方法对植株主要性状的数量特征进行测定, 测定方法如下:

1) 株高。测定主茎顶端生长点到根茎基之间的距离, 将植株拉直用卷尺测量;

2) 主茎节数。主茎的茎节数量多少;

3) 茎粗。统一测量从基部向上数第 4~6 节最大直径, 使用游标卡尺测量;

4) 叶片形态特征及叶绿素 SPAD 值。自上而下采集第 3 对完全展开的健康叶片 1 片, 测量叶长、叶宽、叶面积并计算叶长宽比及比叶面积, 使用便携式叶绿素仪测定叶绿素 SPAD 值;

5) 干质量。植株于 70 °C 烘干至恒质量, 精确称量。

1.3.2 总二萜、总酚酸和总黄酮的含量测定 参照邱佳佳(2020)的方法, 分别以冬凌草甲素、咖啡酸、芦丁为对照品, 采用紫外可见分光光度法进行测定。

1.3.3 咖啡酸、迷迭香酸、夏佛塔昔和槲皮素的 UPLC 法含量测定 参照萧晓吉等(2023)的方法进行测定。色谱条件: 色谱柱为 WATERS ACQUITY UPLC BEH C18(1.7 μm , 2.1 mm×100 mm), 流动相: $\varphi=0.1%$ 甲酸溶液(A) - 甲醇(B), 洗脱梯度是 0~10 min,

20%~25%B;10~20 min,25%~30%B;20~35 min,30%~35%B;35~45 min,35%~45%B;流速为0.3 mL/min,柱温:30℃,检测波长:245 nm,进样量:2 μL。

1.3.4 纤花香茶菜性状及品质分析与评价 利用SPSS 21.0软件进行相关性分析,并结合熵权法进行综合评价。

1)根据信息论中信息熵的定义,对原始数据 X_{ij} (其中 i 为样本编号, j 为指标编号)进行极差标准化处理,得到标准化值

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}},$$

其中 $\min X_{ij}$ 和 $\max X_{ij}$ 分别为指标的最小值和最大值。

2)计算各指标信息熵 E_j 及权重 W_j

$$E_j = -(\ln n)^{-1} \sum P_{ij} \ln P_{ij},$$

$$W_j = (1 - E_j) / \sum (1 - E_j),$$

其中 P_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个样本的特征比重, $P_{ij} = Y_{ij} / \sum Y_{ij}$ 。

3)每个遮荫处理有5个重复,计算综合评分

$$Z = \sum (Y_{ij} \times W_j) / 5.$$

2 结果与分析

2.1 农艺性状测定结果

表1显示,随着遮荫程度的增加,株高、主茎节数均呈现先增后降的趋势。与CK相比,T1、T2和T3处理的株高分别显著提高了16.62%、13.68%、11.93%,而主茎节数在4个处理之间无显著性差异。随着遮荫程度的增加,茎粗呈现出逐渐下降的趋势,其中T3茎粗最小,与CK相比显著降低了42.58%。不同遮荫处理植株生长状况见图1。

表1 不同光照条件下纤花香茶菜茎的农艺性状¹⁾($\bar{x} \pm s, n=5$)

Table 1 Stem phenotypic characters under different light conditions of *I. lophanthoides* var. *graciliflorus*

处理	株高/cm	茎粗/mm	主茎节数
CK	46.94±3.10a	9.23±1.47a	16±1.02a
T1	54.74±2.85b	7.74±0.56a	18±0.75a
T2	53.36±2.46b	7.43±0.30a	19±1.83a
T3	52.54±4.74b	5.30±1.23b	18±1.79a

1) 同一列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

(a) 光照强度100%



(b) 光照强度50%



(c) 光照强度35%



(d) 光照强度20%



图1 成株期不同遮荫处理植株生长状态

Fig. 1 Growth status of plants under different shading treatments during adult plant stage

叶片形态(图2)和生理性状测定结果(表2)显示,不同的光照条件对纤花香茶菜叶片形态指标和生理指标有一定影响,随着遮荫程度增大,叶长、叶宽、叶面积、叶面积比、叶干质量和SPAD值均逐渐增大,即光照减弱,叶子形态由细长逐渐变成卵圆

形,叶面积增大,叶面积比增大,叶片变薄,叶绿素含量增多。

由表3可看出,随着遮荫程度增大,纤花香茶菜的茎、叶干质量和地上部分干质量呈先升后降趋势,整株干质量、根干质量呈下降趋势。T1处理的

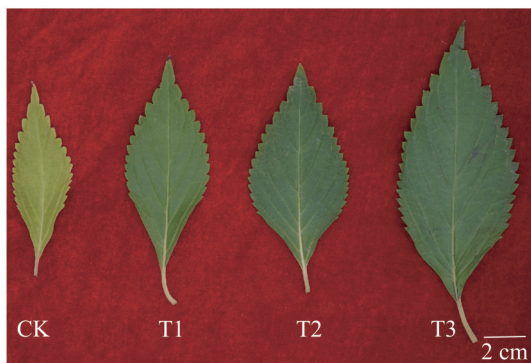


图2 不同光照条件下叶片形态特征

Fig. 2 Morphological characteristics of leaves under different lighting conditions

茎、叶干质量和地上部分干质量最大,分别为 6.26、7.42、13.67 g,分别占整株干质量的 38.4%、45.0%、83.4%,T2 次之,T3 最小,其中 T1 处理的茎、叶干质量和地上部分干质量与 T3 具有显著性差异。CK 处理的植株整株干质量和根干质量最大,其中,CK 处理的根干质量与 T1 处理有显著性差异,整株干质量无显著性差异。而 T1、T2 和 T3 处理的根冠比均显著小于 CK 处理的。可见适度遮荫有利于植株地上部分生物量的积累。

2.2 总二萜、总酚酸和总黄酮的含量测定结果

结果见图 3。总二萜含量随着遮荫程度的增加总体呈现递减趋势,但无显著性差异;总黄酮含量随遮荫程度增加而增加,T3 处理最高,为 1.91%,且与 CK 存在显著性差异,而 T2 和 T3 与其他处理组之间无显著差异;总酚酸含量随着遮荫程度增加而减少,全光照时最高,为 3.86%,与 T2、T3 处理存在显著性差异,T1 与其他各处理组差异不显著。

2.3 咖啡酸、迷迭香酸、夏佛塔昔和槲皮素的含量测定结果

供试品与对照品 UPLC 色谱图见图 4。4 种活性成分的含量测定结果见图 5。图 5 显示,随着遮荫程度的增加咖啡酸和迷迭香酸含量逐渐降低,咖啡酸 CK 组和 T3 处理之间存在显著的差异,而 T1、T2 处理与 CK、T3 处理未展现出显著性差异。迷迭香酸 CK 组与 3 个遮荫处理均表现出明显的差异,但各处理中夏佛塔昔和槲皮素的含量未展现出显著差异。

2.4 纤花香茶菜性状及品质分析与评价

2.4.1 相关性分析

结果显示(图 6),株高与叶长宽比存在显著负向关联性,与迷迭香酸、槲皮素呈极显著负向关系。茎粗与叶面积、SPAD、总黄酮、夏佛塔昔极显著负相关,与叶长宽比、地上干质量、

表 2 不同光照条件下纤花香茶菜叶的农艺性状¹⁾($\bar{x} \pm s, n=5$)Table 2 Leaf Phenotypic characters under different light conditions of *I. lophanthoides* var. *graciliflorus*

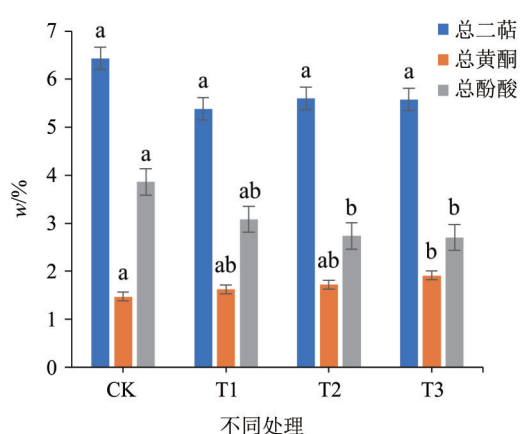
处理	叶长/cm	叶宽/cm	叶长宽比	叶面积/cm ²	叶干质量/g	叶面积比/(cm ² ·g ⁻¹)	SPAD 值
CK	11.25±0.66a	4.29±0.20a	2.65±0.19a	24.34±1.04a	0.105±0.01a	232.05±9.65a	31.63±2.93a
T1	11.73±0.51ab	4.86±0.27b	2.42±0.06b	30.59±3.25b	0.114±0.01a	268.28±8.09b	34.65±1.19b
T2	12.32±1.20bc	5.21±0.53b	2.37±0.08b	33.31±5.48b	0.121±0.02a	275.71±8.74b	36.57±2.95bc
T3	13.09±1.15c	5.87±0.51c	2.23±0.10c	39.80±6.71c	0.140±0.03b	284.52±7.69c	37.27±2.31c

1) 同一列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

表 3 不同光照条件下纤花香茶菜植株各部分干质量¹⁾($\bar{x} \pm s, n=5$)Table 3 The dry biomass of each part of the plant under different light conditions of *I. lophanthoides* var. *graciliflorus*

处理	干质量/g					干质量占比/%				根冠比/%
	叶	茎	根	地上部分	整株质量	叶	茎	根	地上部分	
CK	6.95±	5.71±	4.98±	12.67±	17.64±	39.2±	32.6±	27.8±	72.2±	39.0±
	1.41a	0.86a	1.30a	2.07a	2.88a	5.45a	4.39a	4.44a	4.44a	8.43a
T1	7.42±	6.26±	2.69±	13.67±	16.36±	45.0±	38.4±	16.6±	83.4±	19.8±
	0.95a	0.47a	0.18b	1.42a	1.16ab	3.00b	2.41a	2.07b	2.07b	3.11b
T2	6.28±	5.15±	2.26±	11.43±	13.69±	46.0±	37.6±	16.6±	83.4±	20.0±
	0.99ab	1.18a	0.65bc	2.14ab	2.31b	3.16b	6.43a	3.85b	3.85b	5.79b
T3	4.99±	3.70±	1.31±	8.72±	10.00±	49.6±	37.0±	13.6±	83.4±	15.6±
	1.41b	1.07b	0.25c	2.68b	2.66c	6.39b	5.34a	2.88b	7.50b	3.29b

1) 同一列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

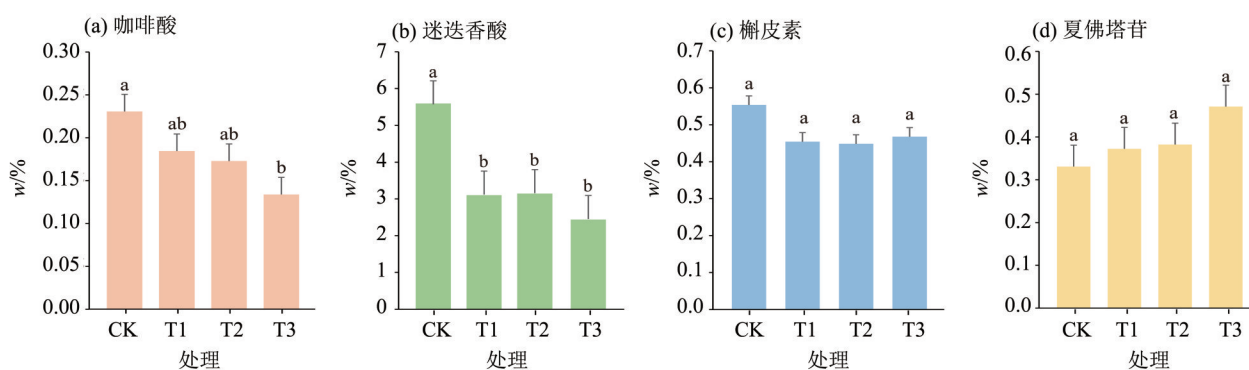


同一成分不同小写字母表示 $P < 0.05$ 差异显著。

图3 不同光照条件下纤花香茶菜总二萜、总黄酮和总酚酸含量

Fig. 3 Contents of total diterpenoids, total flavones and total phenolic acids of *I. lophanthoides* var. *graciliflorus*

槲皮素显著正向关联性,与总干质量、根冠比、总酚酸、咖啡酸、迷迭香酸呈极显著正向关系,相关性较强,可以通过茎粗大小简单判断总黄酮、总酚酸和指标性成分含量高低以及植株生物量大小。叶长宽比与叶面积、SPAD、夏佛塔昔呈极显著负向关系,与根冠比、总酚酸、迷迭香酸极显著正相关,

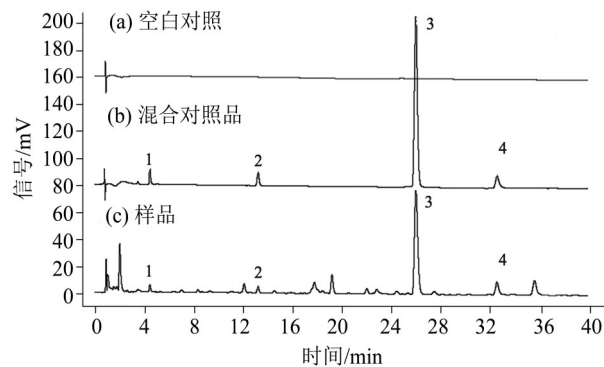


同一成分不同小写字母表示 $P < 0.05$ 差异显著。

图5 不同光照条件下纤花香茶菜4种活性成分含量柱状图

Fig. 5 Histogram of content of 4 Chemical component of *I. lophanthoides* var. *graciliflorus*

进一步对不同遮荫处理与各性状指标之间的相关性进行分析,结果见表4。结果显示,株高、叶面积、SPAD、叶占比、总黄酮、夏佛塔昔与遮荫程度具有显著的正相关性,即遮荫程度越高,株高、叶面积、SPAD、叶占比的值越大,总黄酮、夏佛塔昔百分含量越高;茎粗、叶长宽比、地上部分干质量、总干质量、总酚酸、咖啡酸、迷迭香酸与遮荫程度具有显



1:咖啡酸;2:夏佛塔昔;3:迷迭香酸;4:槲皮素。

图4 空白对照、混合对照品和供试品UPLC色谱图

Fig. 4 UPLC chromatograms of blank control, mixed control and test products

可以根据叶形和叶面积大致判断叶绿素、夏佛塔昔、总酚酸、咖啡酸和迷迭香酸的含量高低。总干质量与地上部分干质量呈极显著正相关,与根冠比、总酚酸、咖啡酸呈显著正相关,与根冠比与总酚酸、迷迭香酸和槲皮素均极显著正相关,与总黄酮呈极显著负相关,可以根据根冠比大致判断其余4个成分含量的高低。迷迭香酸与总黄酮、夏佛塔昔均呈显著负相关。叶、茎占比与其他各项指标无相关性。

著负相关性,即随着遮荫程度的增高,茎粗、叶长宽比、地上部分干质量、总干质量的值越小,总酚酸、咖啡酸、迷迭香酸的百分含量越低;茎占比、总二萜和槲皮素没有通过显著性检验。

2.4.2 焯权法 对不同处理5个重复的纤花香茶菜的9个农艺性状及7个化学成分指标建立原始数据矩阵,对各指标进行标准化处理后,依次计算出

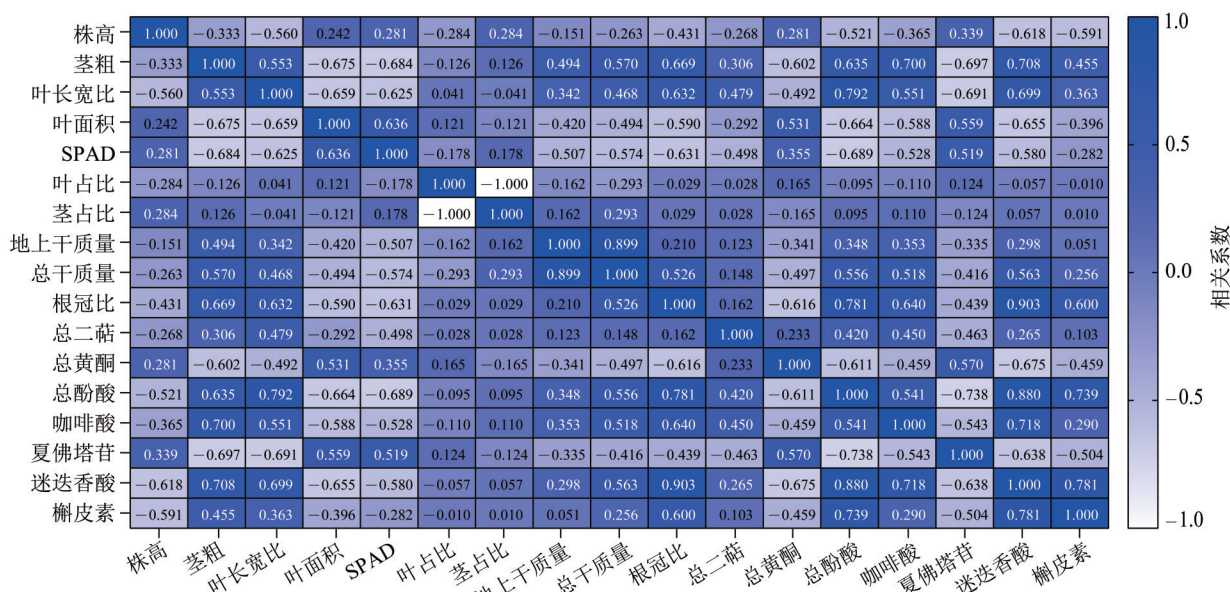


图6 不同光照条件下纤花香茶菜各性状之间的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficient between characters under different light conditions of *I. lophanthoides* var. *graciliflorus*

表4 遮荫程度与各性状之间的相关分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis between shading degree and each trait

指标	相关系数	指标	相关系数
株高	0.5015** (0.0243)	总干质量	-0.7069*** (0.0005)
茎粗	-0.7574*** (0.0001)	总二萜	-0.2964 (0.3496)
叶长宽比	-0.7921*** (0.0000)	总黄酮	0.6159** (0.0330)
叶面积	0.7691*** (0.0001)	总酚酸	-0.8190*** (0.0011)
SPAD	0.6847*** (0.0009)	咖啡酸	-0.7248*** (0.0077)
叶占比	0.6549*** (0.0017)	夏佛塔苷	0.5755* (0.0502)
茎占比	0.3628 (0.1159)	迷迭香酸	-0.8706*** (0.0002)
地上干质量	-0.4840** (0.0306)	槲皮素	-0.4830 (0.1117)

1) 括号内为P值,***P<0.01,**P<0.05,*P<0.1。

信息熵值及各指标权重系数,结果见表5~6。由表5可知,叶面积、叶占比和茎占比的权重系数较大,其指标值离散程度大,提供的信息量多;而SPAD的权重系数最小,指标离散程度小,提供的信息量少。由表6可知,迷迭香酸和总酚酸的权重系数较大,槲皮素的权重系数最小。将权重系数代入计算公式,

计算不同遮荫程度纤花香茶菜农艺性状与质量的综合得分,结果见表7~8。结果显示,以农艺性状为考量指标,综合评分处理T1>T2>T3>CK,以化学成分等质量性状为考量指标,综合评分处理CK>T1>T2>T3。基于熵权法的评价结果,50%的遮荫有利于生产中农艺性状的改良,而全光照则有利于次生代谢产物的积累。

表5 农艺性状信息熵及权重

Table 5 Information entropy and weight of phenotypic traits

指标	E_j	W_j
株高	0.943	0.104
茎粗	0.944	0.102
叶面积	0.894	0.192
SPAD	0.969	0.055
叶干质量	0.944	0.101
茎干质量	0.948	0.093
地上部分干质量	0.953	0.085
叶占比	0.915	0.154
茎占比	0.936	0.115

3 讨论

纤花香茶菜作为喜阴植物,常野生于溪边湿地、沟边、田边及林中,在大田种植时,通常需要搭建遮荫网等设施来调控光照强度,即其本身适合生态遮荫的种植方式。在岭南地区油棕及澳洲坚果林地分布广泛,光伏农业作为新兴产业也在不断扩

表6 化学成分信息熵及权重
Table 6 Entropy and weight of chemical composition information

指标	E_j	W_j
总二萜	0.919	0.158
总黄酮	0.943	0.112
总酚酸	0.912	0.171
咖啡酸	0.927	0.141
夏佛塔苷	0.943	0.110
迷迭香酸	0.892	0.210
槲皮素	0.950	0.097

表7 农艺性状平均综合得分及排序($n=5$)
Table 7 Average composite score and ranking of phenotypic traits

处理	综合得分	排序
CK	0.443	4
T1	0.554	1
T2	0.508	2
T3	0.451	3

表8 化学成分平均综合得分及排序($n=5$)
Table 8 Average composite score and ranking of chemical components

处理	综合得分	排序
CK	0.644	1
T1	0.364	2
T2	0.340	3
T3	0.338	4

大种植范围(Miskin et al., 2019), 光伏太阳能板下、油棕与澳洲坚果林下都具有较大的种植空间、通透性好且较为荫蔽(李静等, 2013; 欧阳子龙等, 2022; 黄莹, 2023), 十分适宜纤花香茶菜的种植(汤俊超等, 2022)。课题组前期研究发现, 油棕林(遮光率为70%~90%)和光伏板下(遮光率为60%~80%)种植的纤花香茶菜的生长发育状况优于澳洲坚果林(遮光率为30%~50%)和大田单作(遮荫网遮光率为50%~60%), 澳洲坚果林下试点种植生长状况比较差, 尤其到高温在夏季植株会枯黄。基于此, 本实验设置50%、35%、20%的光照强度, 以探索纤花香茶菜的适宜光照条件。

不同植物对光强变化的适应性差异较大, 喜阴药用植物偏好生长在荫蔽环境中, 暴露在全日照下生长易受胁迫而表现出不良态势(张永清, 1987; 靳

红磊等, 2021)。研究发现光照调控对纤花香茶菜的生长发育过程具有较大影响, 随着遮荫程度的增加, 株高呈现先升高后下降的趋势, 茎粗则呈现下降趋势, 在光照强度为20%时茎粗显著小于其他3个处理组, 表明在过度遮荫时植株可能会出现苗茎瘦弱现象。黄跃鹏等(2014)研究发现随着光照强度减弱, 烤烟植株茎围也会随之减小, 与本实验的结果一致。在遮荫条件下, 叶片变薄, 叶面积增大, 叶片由细长形变成卵圆形, 由黄绿色变成深绿色, 叶绿素含量增多, 可能有助于植株进行光合作用, 积累更多的有机物质。对不同光照条件下纤花香茶菜植株各部位干质量分析发现, 3个遮荫处理的地上部分干质量占比均显著高于全光照, 4个处理中茎的干质量占比无显著差异, 说明了低光强时地上部分生物量分配会增加。现有各项研究表明(谭淑娟等, 2020; 林晓宇等, 2022; 孟繁滢等, 2023), 随着遮荫程度增加, 植物会改变外部形态, 减少根系生物量分配, 更加倾向将较高比例的生物量分配到叶片, 增加地上生物量的积累, 增加对光能的捕获来满足生长发育需求。在光照强度为50%和35%时纤花香茶菜的株高、茎粗和地上部分的生物量都处于较佳水平, 此光照强度对纤花香茶菜的药用部位累积效果较好, 农艺性状表现整体较佳, 故50%和35%光照强度适宜纤花香茶菜生长发育以及有利于植株地上部分生物量的积累。

不同遮荫处理对纤花香茶菜中总二萜含量变化影响不显著, 对总黄酮和总酚酸含量变化影响较大, 其中, 总黄酮含量随着光照强度增加一直呈现出下降趋势。研究表明, 光照强度对黄酮含量的影响并不是简单的线性关系, 而是存在一个最适光强, 王华田等(2002)发现银杏叶片在42%自然光强下总黄酮含量最高, 朱肖锋等(2009)发现马蹄金叶在76.19%透光率下总黄酮含量最高, 大于或小于该临界值, 黄酮含量都会下降, 与本实验研究结果有所差异, 推测黄酮含量的最佳光强可能在20%~35%之间或者小于20%, 本实验遮荫梯度设置不够完全, 可能未能涵盖适合黄酮含量积累的最佳光强, 后续可以增加遮荫梯度探索黄酮积累最佳光照条件。黄酮类化合物在植物体内具有多种重要的生态和生理功能, 其合成和积累受多种环境因素的影响, 其中光照和温度扮演着举足轻重的角色。这两者可直接影响到合成途径中关键酶的活性, 很大程度上对植株黄酮类物质的合成积累产生显著调节作用。相关研究发现(徐文燕等, 2006; 陈雷等,

2013;房贤涛等,2023),较低的平均温度能促进黄酮类物质的积累,主要归因于黄酮类物质合成途径中相关酶的活性在低温下得到显著提升,从而有效推动了黄酮类物质的生成和积累。所以本实验中总黄酮含量随着遮荫程度的增加而增加,可能是由于遮荫程度的差异产生不同的温度条件,使合成黄酮类成分的酶活性受到影响,从而使得总黄酮含量存在差异。除此之外,其他环境因素如紫外辐射、高CO₂浓度、适度干旱以及合理地施肥等也可以促进黄酮类化合物的合成。这些环境因素可能通过影响植物的生长和代谢过程,进而调节黄酮类化合物的合成和积累。

本实验中总酚酸含量随着光照强度的降低而减少,而孟宇航(2020)在蒲公英研究中总酚酸在适当光强82.6%时含量最高,后随着遮荫程度增加而显著下降,表明了光照强度较大时有利于总酚酸积累。张少平等(2023)在研究柠檬香茅中发现,部分萜类成分相对含量在不同光照下影响不大。本实验中20%光照强度有利于纤花香茶菜中总黄酮成分的积累,全光照有利于纤花香茶菜中总酚酸成分的积累。

纤花香茶菜药材中的二萜类、黄酮类和酚酸类均具有丰富的药理活性,本研究选取咖啡酸、迷迭香酸、夏佛塔昔和槲皮素4个活性成分作为测定指标用来评价不同光照条件下纤花香茶菜药效质量,实验中的迷迭香酸的含量随着光照强度的提高呈上升趋势,与张顺仓等(2017)研究夏枯草中的迷迭香酸结果一致。槲皮素含量随着光照强度减弱大致呈现下降趋势,在全光照时含量值最高,与前人(朱再标等,2018;陈常理等,2023)研究相似。在全光照条件下,咖啡酸、迷迭香酸含量最高,而各处理中夏佛塔昔和槲皮素的含量无显著性差异。全光照时夹带着紫外辐射的增强,夏枯草和丹参等植物对强紫外辐射会产生酚酸类物质增加的积极响应(刘景玲等,2015;王园等,2017),酚酸类物质具有紫外吸收和抗氧化的特点,会形成天然屏障来修复紫外辐射对植物的损伤,使植物对强光产生适应与防御。因此全光照有利于纤花香茶菜中酚酸类物质成分的积累。

药材质量受到多种因素影响,单从某一性状或指标来评价不尽合理(谢文波等,2025),本实验采用相关性分析和熵权法来对不同光照条件处理的

纤花香茶菜的药材品质进行综合评价。在农艺性状中,叶面积和叶占比的信息熵较小,表明在不同遮荫处理下,叶面积和叶占比的变异程度较大;综合评分光照强度50%>35%>20%>100%。在药效成分中,迷迭香酸和总酚酸的信息熵较小,表明在不同遮荫处理下,两者的变异程度较大;综合评分光照强度100%>50%>35%>20%。光照强度为50%的质量表现仅次于全光照,本实验中只设置了4个遮荫处理,进行综合评价样本量较小且遮荫梯度跨度较大,后续可以细化50%遮荫到全光照之间的遮荫梯度。由上述综合评分排序可知,50%光照强度适宜纤花香茶菜生长发育以及有利于植物地上部分生物量的积累,全光照有利于总酚酸和活性成分的积累,可以考虑纤花香茶菜种植前期进行遮荫处理,促使植株生长发育和生物量增加,后期再进行全光照处理,促使植株的药效成分积累。吕晋惠(2013)的研究中,深入探讨不同程度遮荫处理对金莲花的生长发育以及生理响应中发现40%和60%遮荫促进单株开花量和花径,持续遮荫80 d,金莲花生长得到显著促进,当遮荫时间延长到120 d时,其生长受到不利影响,在夏季高温季节采用40%或60%遮荫防止灼伤,夏末秋初则及时撤去遮荫棚。作为参照,后续试验可以定期进行各项性状和指标测定,获取纤花香茶菜整个生长期品质的动态变化,寻求纤花香茶菜在生长发育时期的适宜遮荫度和遮荫时间,具体的种植方法还需深入探究,为纤花香茶菜高产优质提供更科学更全面的依据。

综合看来,50%及35%光照强度适宜纤花香茶菜的生长和地上部分生物量积累;20%光照强度适宜纤花香茶菜总黄酮成分积累;全光照适宜纤花香茶菜总酚酸、咖啡酸及迷迭香酸成分积累;综合分析纤花香茶菜农艺性状和质量指标,50%光照强度的农艺性状综合评价最佳,全光照的化学成分综合评价最佳。因此,建议生产上大田单作时,可考虑于封行前进行50%的遮荫处理,封行后因土壤水分蒸发速率有所降低,且气温及光照强度渐低,可依据植株生长状态进行全光照处理;若采用粮药、林药、光伏药等生态种植模式种植时,亦应营造适合的光照强度,以促进纤花香茶菜植株的生长和次生代谢产物的合成与积累,实现其药材生产的优质与高产。

参考文献:

陈常理,李文略,安霞,等,2023.光照强度对金线莲多糖和黄酮类物质含量的影响[J].分子植物育种,21(15):5103-

5109.

陈雷,常丽,曹福亮,等,2013.银杏叶黄酮类化合物含量及相

- 关酶活性对温度和干旱胁迫的响应[J].西北植物学报, 33(4):755-762.
- 陈黎明,罗美佳,夏鹏国,等,2016.光强对三七生长、光合特性及有效成分积累的影响[J].时珍国医国药,27(12):3004-3006.
- 陈小峰,王庆亚,陈开宁,2008.不同光照条件对苜蓿外部形态与内部结构的影响[J].武汉植物学研究,26(2):163-169.
- 房贤涛,游晴如,王洪飞,等,2023.播期及温度对紫两优737农艺性状、品质和类黄酮含量的影响[J].福建农业学报,38(7):772-782.
- 广东省食品药品监督管理局,2011.广东省中药材标准(第二册)[M].广东:广东科技出版社:347-353.
- 贺小妮,郑鹏坤,胡喜巧,等,2018.光照对红豆杉幼苗生长及黄酮、多糖含量的影响[J].现代园艺,(7):19-20.
- 黄莹,2023.澳洲坚果林下套种中药材鸡骨草栽培技术[J].现代园艺,46(6):54-55.
- 黄跃鹏,陈永明,谢晓斌,等,2014.成熟期光照强度对烤烟农艺性状及产质量的影响[J].安徽农业科学,42(9):2581-2583.
- 靳红磊,明宇,王宏斌,2021.阴生和阳生植物在光合结构及功能中的差异概述[J].中山大学学报(自然科学版),60(6):1-8.
- 李静,马帅鹏,庞振才,等,2013.油棕园间套种菠萝对土壤养分及酶活性的影响[J].中国农学通报,29(31):36-41.
- 林恋竹,2013.溪黄草有效成分分离纯化、结构鉴定及活性评价[D].广州:华南理工大学.
- 林晓宇,朱强根,刘慧,等,2022.光照对植物枝叶生长和生物量的影响研究进展[J].现代园艺,45(2):1-4.
- 刘景玲,齐志鸿,郝文芳,等,2015.UV-B辐射和干旱对丹参生长和叶片中酚酸类成分的影响[J].生态学报,35(14):4642-4650.
- 吕晋慧,李艳锋,王玄,等,2013.遮阴处理对金莲花生生长发育和生理响应的影响[J].中国农业科学,46(9):1772-1780.
- 孟繁滢,金乃轩,王自奎,2023.光照和水分对紫花苜蓿生长和水分利用的影响[J].草业科学,40(8):2121-2128.
- 孟宇航,谢小翌,张喜春,2020.光照强度对蒲公英营养品质的影响[J].北京农学院学报,35(3):40-43.
- 欧阳子龙,李香林,贾湘璐,等,2022.间作对澳洲坚果牛大力根茎叶和土壤中微量元素含量的影响[J].广西林业科学,51(2):241-248.
- 潘雪峰,张慧晔,林建云,等,2014.不同加工方法对中药溪黄草主要化学成分的影响[J].湖北农业科学,53(21):5217-5220.
- 钱龙梁,李佳佳,曹福亮,等,2019.生物遮荫对银杏幼苗次生代谢的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),43(3):189-194.
- 邱佳佳,2020.基于化学组分的溪黄草药材种质资源鉴定及品质评价[D].广州中医药大学.
- 谭淑娟,李婷,余素睿,等,2020.光照强度对8种红树植物幼苗生长和生物量分配的影响[J].生态科学,39(3):139-146.
- 汤俊超,吴宜文,张姚,等,2022.浅谈“光伏+农业”产业的发展模式[J].中国农学通报,(11):144-152.
- 王华田,谢宝东,姜岳忠,等,2002.光照强度对银杏叶片发育及黄酮和内酯含量的影响[J].江西农业大学学报(自然科学版),24(5):617-622.
- 王晋,刘峰,张应香,等,2023.遮荫技术对茶叶品质的影响[J].河南农业,(6):43-44.
- 王园,党悦方,张典,等,2017.夏枯草幼苗中有效成分与生理指标的增强UV-B辐射的动态响应[J].西北大学学报(自然科学版),47(3):414-421.
- 萧晓吉,邱佳佳,刘军民,等,2023.溪黄草药材4种基原植物的UPLC特征图谱鉴别研究[J].天然产物研究与开发,35(6):1038-1048.
- 谢文波,魏伟锋,马庆,等,2025.基于UPLC及熵权TOPSIS法分析不同趁鲜加工方式对千里香质量的影响[J].中山大学学报(自然科学版中英文),64(6):16-23.
- 徐文燕,高微微,何春年,2006.环境因子对植物黄酮类化合物生物合成的影响[J].世界科学技术-中医药现代化,8(6):68-72.
- 张少平,邱珊莲,黄惠明,等,2023.遮荫对柠檬香茅中萜类化合物及其合成酶基因影响研究[J].热带亚热带植物学报,31(3):355-362.
- 张顺仓,石凯强,王瑞,等,2017.不同强度的红白光质对夏枯草生长、光合特性及迷迭香酸积累的影响[J].分子植物育种,15(8):3254-3260.
- 张永清,1987.日光对药用植物的影响及其控制利用[J].齐鲁药事,(1):5-8.
- 中国科学院中国植物志编辑委员会,1977.中国植物志(第66卷)[M].北京:科学出版社:416.
- 朱肖锋,周守标,杨集辉,等,2009.不同光照强度对马蹄金叶的特征及总黄酮含量的影响[J].激光生物学报,18(1):62-66.
- 朱再标,杨金凤,郭巧生,等,2018.不同光强对垂盆草生长和药材品质及抗氧化活性的影响[J].中国中药杂志,43(22):4404-4409.
- MISKIN C K, LI Y, PERNA A, et al, 2019. Sustainable co-production of food and solar power to relax land-use constraints[J]. Nat Sustain, 2(10):972-980.