

2 种茂名野生链荚豆属植物耐阴性初步评价

张 钰^{1,2}, 曾国兰², 尹爱国², 王玉祥^{1*}, 岳茂峰^{2*}

1. 新疆农业大学草业学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 广东石油化工学院生物与食品工程学院/广东省农产品绿色生产与农业智能装备重点实验室, 广东茂名 525000

摘 要: 果树生长会对果园生草植物造成一定的遮阴作用, 因此果园生草草种往往需具有一定的耐阴性。本研究以我国南方地区常见地被植物柴胡叶链荚豆 [*Alysicarpus bupleurifolius* (L.) DC.] 和链荚豆 [*Alysicarpus vaginalis* (L.) DC.] 为试验材料, 以全光照为对照 (CK) 设置不同程度遮阴处理, 测定柴胡叶链荚豆和链荚豆的生长和生理指标, 并进行耐阴性综合评价, 以明确 2 种链荚豆属植物是否具有作为果园生草草种的潜力。研究结果表明, 随着遮阴程度的增加, 柴胡叶链荚豆和链荚豆的叶宽、叶面积、株高和地上部占比总体呈上升趋势, 茎粗和总生物量呈下降趋势。相较于链荚豆, 柴胡叶链荚豆在遮阴 21 d 后的叶面积增加幅度更大, 且在遮阴 42 d 后的总生物量下降幅度更小。遮阴处理后, 2 种链荚豆属植物的 PS II 最大光化学量子产量 (F_v/F_m) 均高于 0.80, 说明遮阴对 2 种链荚豆属植物的光合系统并未造成严重伤害。2 种链荚豆属植物叶片相对电导率和丙二醛含量总体随着遮阴程度的增加呈上升趋势, 而二者在遮阴处理下过氧化物酶 (POD) 活性有所差异。柴胡叶链荚豆的 POD 活性随着遮阴程度的增加呈先升后降趋势, 而链荚豆则呈下降趋势。主成分分析将 14 个耐阴性系数转化为 2 个主成分, 其累计贡献率达 88.66%, 第 1 主成分中丙二醛含量贡献率最高, 第 2 主成分中叶片相对电导率贡献率最高。通过隶属函数法进行耐阴性综合评价结果显示, 在相同遮阴处理下柴胡叶链荚豆的综合评价价值高于链荚豆, 说明柴胡叶链荚豆的耐阴能力高于链荚豆。综上所述, 柴胡叶链荚豆和链荚豆均具有一定的耐阴性, 且柴胡叶链荚豆的耐阴性优于链荚豆, 都具有成为果园生草草种的潜力。

关键词: 链荚豆属植物; 耐阴性; 形态指标; 生理特性; 综合评价

中图分类号: S541+.9

文献标志码: A

Preliminary Evaluation of Shade Tolerance in Two Wild *Alysicarpus* Species from Maoming Region

ZHANG Yu^{1,2}, ZENG Guolan², YIN Aiguo², WANG Yuxiang^{1*}, YUE Maofeng^{2*}

1. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. College of Biology and Food Engineering, Guangdong University of Petrochemical Technology / Guangdong Provincial Key Laboratory for Green Agricultural Production and Intelligent Equipment, Maoming, Guangdong 525000, China

Abstract: The growth of fruit trees inevitably casts a certain degree of shade on the grass plants in the orchard. Therefore, the selected grass species usually need to possess a certain level of shade tolerance. This study investigated the shade tolerance of two prevalent ground cover species in southern China, *Alysicarpus bupleurifolius* (L.) DC. and *Alysicarpus vaginalis* (L.) DC.. Different shading treatments were set with full light as the control (CK). Growth and physiological indices of the two species were measured, and a comprehensive evaluation of the shade tolerance was conducted to assess the potential as ground cover species in orchards. Findings indicated that as shading intensified, both species exhibited an overall increase in the leaf width, leaf area plant height and the proportion of aboveground biomass, while the stem diameter and total biomass showed a downward trend. Compared with *A. vaginalis*, the leaf

收稿日期 2025-02-22; 接受日期 2025-03-21

基金项目 广东省自然科学基金项目 (No. 2022A1515011169); 广东省普通本科高校重点专项项目 (No. 2019KZDZX2009); 茂名市科技计划项目 (No. 2022S037)。

作者简介 张 钰 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农艺与种业 (草业)。*通信作者 (Corresponding author): 王玉祥 (WANG Yuxiang), E-mail: wyx9868@163.com; 岳茂峰 (YUE Maofeng), E-mail: 21376286@qq.com。

area of *A. bupleurifolius* increased faster after 21 days of shading treatment, and the total biomass decreased less after 42 days of shading treatment. After shading treatment, the PSII maximum photochemical quantum yield (Fv/Fm) of the two plants was higher than 0.80, and shading did not cause serious damage to the photosynthetic system of the two plants. The relative electrical conductivity and malondialdehyde content of the leaves of the two species generally rose with increased shading intensity, whereas the peroxidase activity (POD) activity under shading conditions displayed distinct patterns. With the increase of shading intensity, the POD activity of *A. bupleurifolius* increased first and then decreased, while that of *A. vaginalis* showed a downward trend. Principal Component Analysis (PCA) was performed to reduce the dimensionality of 14 shade tolerance indices into two principal components, which cumulatively accounted for 88.66% of the total variance. In the first principal component (PC1), the contribution rate of malondialdehyde (MDA) content was the highest. In the second principal component (PC2), the contribution rate of leaf relative conductivity was the highest. The results of comprehensive evaluation of shade tolerance by membership function method showed that *A. bupleurifolius* was higher than that of *A. vaginalis* under identical shading conditions, indicating that the shade tolerance of *A. bupleurifolius* was higher than that of *A. vaginalis*. In summary, both *A. bupleurifolius* and *A. vaginalis* exhibit noticeable shade tolerance, with *A. bupleurifolius* outperforming *A. vaginalis*, thereby affirming the potential as viable orchard ground cover species.

Keywords: *Alysicarpus* species; shade tolerance; morphological indices; physiological characteristics; comprehensive evaluation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.07.011

近 20 年来,林果业的快速发展有力地推动了农村地区经济的增长,已然成为现阶段乡村振兴战略实施进程中一项极为重要的产业依托^[1]。我国南方红壤丘陵区覆盖面积达 118 万 km²,约占全国陆地面积的 12.3%。该区域水热资源颇为丰富,是我国经济林果的关键产区^[2]。然而,由于南方丘陵山地区域红壤土质表现为酸化、抗蚀性差、肥力低等特性^[3-4],造成该地区山地丘陵果园水土流失严重,严重制约当地林果业的可持续发展。目前,“果-草”生态模式作为山地丘陵果园土壤管理中极具高效的模式,能够改良果园土壤生态环境,实现果园经济效益的提升^[5]。因此,筛选出适合我国南方地区果园种植的草种对推动当地果园可持续发展具有重要意义。

链荚豆属为蝶形花科植物,广泛分布于我国南方地区的广东、广西、云南、海南等省(区)^[6]。该属植物花色清雅、叶片小巧^[7-8],具有成坪迅速,耐旱能力强等特性,可作为地被植物^[9]。该属植物也是优良的牧草。研究表明,链荚豆[*Alysicarpus vaginalis* (L.) DC.]的营养丰富,消化率高,可用于放牧、晒制干草或青贮饲料^[10]。此外,链荚豆属植物根系发达,能够固定土壤中的养分,防止水土流失,提高土壤肥力,还可作为绿肥植物用于改良土壤^[11]。可见,链荚豆属植物具有成为果园生草草种的潜力。

由于果树生长会对生草植物造成一定的遮阴作用,因此生草植物需具有一定的耐阴性。目前,

国内外关于链荚豆属植物的相关研究主要集中在其坪用价值、饲用价值等方面,其耐阴性研究还未见报道。本研究拟通过评价 2 种茂名野生链荚豆属植物柴胡叶链荚豆[*Alysicarpus bupleurifolius* (L.) DC.]和链荚豆(*A. vaginalis*)的耐阴性,掌握遮阴条件下其生长及生理特性,并采用主成分分析与隶属函数分析法对 2 种链荚豆属植物的耐阴性进行综合评价,明确其耐阴能力,为其在果园应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选用当年生长一致的柴胡叶链荚豆、链荚豆(表 1),于 2023 年 7 月 1 日分栽于直径 25 cm 的花盆中,栽培基质用营养土:红壤土=1:1 混合,栽培条件一致,每种处理 5 个重复。生长恢复 2 周后进行遮阴处理,2 种植物在试验期间均处于营养生长期。

表 1 2 种链荚豆属植物种质来源及特征
Tab. 1 Germplasm sources and characteristics of two species of *Alysicarpus*

种质名称 Germplasm name	来源 Source	性质 Nature	特征 Characteristics
柴胡叶链荚豆 <i>A. bupleurifolius</i>	广东省 茂名市	野生资源	叶线性,茎直立或披散,多分枝,高约 35 cm
链荚豆 <i>A. vaginalis</i>	广东省 茂名市	野生资源	茎平卧或上部直立,叶近圆形,高约 22 cm

1.2 方法

1.2.1 试验设计 将长势相似的柴胡叶链荚豆、链荚豆植株放置于不同遮阴度的遮阴网中,利用照度计采集不同遮阴处理下微环境在早上 9:00 和 10:00 的光照强度,取均值作为遮阴处理下的光强。分别设置 4 种处理:全光照(CK)、40%遮阴(LS,轻度遮阴)、60%遮阴(MS,中度遮阴)、80%遮阴(HS,重度遮阴)。用规格为 1.8 m×1.6 m×1.5 m 的铁框架,将不同遮阴度的黑色遮阴网覆盖在框架上形成四面遮阴环境。遮阴处理期间正常养护,2 种植物各 40 盆,共持续 42 d。

1.2.2 植物生物量的测定 试验 21、42 d 时测定生长指标。每组处理每次取样选取 5 个重复,使用电子天平(SQP,赛多利斯科学仪器有限公司)称量各器官生物量:根鲜质量(root fresh weight, FRW)、茎鲜质量(stem fresh weight, FSW)、叶鲜质量(leaf fresh weight, FLW)、总生物量(total biomass, TB)。

1.2.3 植物形态建成指标的测定 使用卷尺测定从地面量至叶尖或花序顶端的绝对高度作为株高(plant height, PH);使用直尺测量叶长(leaf length, LL)和叶宽(leaf width, LW);利用 Image J 软件分析叶片叶面积值(leaf area, LA)^[12];使用游标卡尺测量茎粗(stem diameter, SD)。

1.2.4 叶片生理指标测定 采用 FluorPen 手持式叶绿素荧光仪(FP110,捷克 PSI)每周测定 PS II 最大光化学量子产量(F_v/F_m);采用手持式叶绿素仪(TYS-4N,中科维禾)测定叶片叶绿素含量(SPAD 值);采用电导仪法测定叶片相对电导率(leaf relative conductivity, REC);采用烘干法测定叶片含水率(relative water content of leaves, RWC)^[13];采用硫代巴比妥酸法(TBA 法)测定丙二醛(MDA)含量^[14];采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[15]。

1.3 数据处理

通过 Microsoft Excel 整理数据并用 GrphPad Prism 绘制图表。利用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析,以 Duncan's 新复极差法检验差异显著性;并对 2 种链荚豆属植物的生长和生理指标值进行主成分分析和隶属函数分析。

为了增强综合评价指标体系的可信度,本研究对所选的 15 项指标的原始数据进行了标准化处理,以消除量纲差异对评估结果的潜在影响。

借鉴前人研究基础上计算 15 个指标的耐阴系数(α)、综合指标系数、综合指标值 $[Z(x)]$ 、隶属函数值 $[\mu(x)]$ 以及相应的权重和综合评价值(D)^[16]。其中,耐阴系数(α)=某一遮阴处理下某指标的测定值/对照处理下该指标的测定值。

2 结果与分析

2.1 不同遮阴处理对 2 种链荚豆属植物生物量的影响

不同遮阴处理 2 种链荚豆属植物的生物量变化如表 2、表 3 所示。遮阴对 2 种植物的生物量分配产生了显著影响。遮阴 21、42 d,柴胡叶链荚豆和链荚豆的叶占比、茎占比、地上部占比均有所升高,根占比有所下降。遮阴 21 d,LS、MS、HS 处理柴胡叶链荚豆的地上部生物量均高于 CK,而链荚豆在 MS、HS 处理的地上部生物量显著下降。与 CK 相比,柴胡叶链荚豆在 LS 处理的总生物量增加 12.81%,MS、HS 处理的总生物量分别减少 1.39%、13.69%;链荚豆在 LS、MS、HS 处理的总生物量分别减少 18.08%、56.42%、62.05%。

遮阴 42 d,柴胡叶链荚豆的地上部生物量 MS 处理显著高于 CK,LS、HS 处理与 CK 差异不显著;而链荚豆 LS、MS、HS 处理的地上部生物量显著低于 CK。与 CK 相比,柴胡叶链荚豆在 LS、MS、HS 处理的总生物量分别减少 5.66%、19.40%、28.28%;链荚豆在 LS、MS、HS 处理的总生物量分别减少 26.03%、52.94%、68.98%。

2.2 不同遮阴处理对 2 种链荚豆属植物形态建成的影响

不同遮阴处理 2 种链荚豆属植物的形态建成变化如表 4、表 5 所示。遮阴 21 d,2 种链荚豆属植物的株高均随遮阴程度的增加而上升,其中 HS 处理柴胡叶链荚豆的株高达 60.34 cm,链荚豆的株高为 34.62 cm。遮阴 42 d,柴胡叶链荚豆的株高随遮阴程度的增加呈上升趋势;链荚豆在 LS、MS 处理的株高与 CK 差异不显著,但 HS 处理较 CK 显著下降 24.12%。随着遮阴程度的增加,柴胡叶链荚豆和链荚豆的茎粗在遮阴 21、42 d 均呈明显下降趋势,CK 的茎粗显著高于其他处理。

遮阴 21、42 d,柴胡叶链荚豆的叶长均随遮阴程度的增加呈明显增加趋势;链荚豆的叶长随遮阴程度的增加呈先上升后下降趋势。柴胡叶链荚豆和链荚豆的叶宽值均在 HS 处理最大,且显

表 2 不同遮阴处理（21 d）2 种链荚豆属植物的生物量
Tab. 2 Biomass of two *Alysicarpus* species (after 21 days) of different shading treatments

植物 Plant	处理 Treatment	根鲜质量 Fresh root weight/g	根占比 Proportion of root/%	茎鲜质量 Fresh stem weight/g	茎占比 Proportion of stem/%	叶鲜质量 Fresh leaf weight/g	叶占比 Proportion of leaf/%	地上部分生物量 Aboveground biomass/g	地上部占比 Proportion of above-ground part/%	总生物量 Total bio-mass/g
柴胡 叶链 荚豆	CK	14.00±0.54 ^a	32.48	15.78±0.47 ^b	36.60	13.32±0.69 ^b	30.92	29.10±0.56 ^b	67.52	43.10±0.27 ^b
	LS	13.84±0.51 ^a	28.43	19.06±0.52 ^a	39.21	15.72±0.40 ^a	32.36	34.78±0.55 ^a	71.57	48.62±1.02 ^a
	MS	8.22±0.45 ^b	19.32	18.68±0.69 ^a	43.92	15.60±0.46 ^a	36.76	33.64±0.68 ^a	78.69	42.50±0.49 ^b
	HS	7.16±0.50 ^b	19.19	16.12±0.49 ^b	43.36	13.92±0.35 ^b	37.45	30.68±1.07 ^b	82.42	37.20±0.83 ^c
链荚 豆	CK	24.32±0.59 ^a	27.16	12.00±0.32 ^a	26.21	9.48±0.44 ^b	20.69	21.48±0.56 ^b	46.90	45.80±0.56 ^a
	LS	10.12±0.43 ^b	48.16	13.04±0.74 ^a	34.73	14.36±1.11 ^a	38.11	27.40±1.51 ^a	72.84	37.52±1.45 ^b
	MS	6.08±0.26 ^c	30.64	6.64±0.68 ^b	33.00	7.24±0.42 ^c	36.36	13.88±0.98 ^c	69.36	19.96±1.13 ^c
	HS	4.80±0.38 ^c	27.46	5.24±0.42 ^b	30.12	7.34±0.43 ^c	42.42	12.58±0.44 ^c	72.54	17.38±0.81 ^c

注：不同小写字母表示相同植物不同遮阴处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different shading treatments of the same plant ($P<0.05$).

表 3 不同遮阴处理（42 d）2 种链荚豆属植物的生物量
Tab. 3 Biomass of two *Alysicarpus* species (after 42 days) of different shading treatments

植物 Plant	处理 Treatment	根鲜质量 Fresh root weight/g	根占比 Proportion of root/%	茎鲜质量 Fresh stem weight/g	茎占比 Proportion of stem/%	叶鲜质量 Fresh leaf weight/g	叶占比 Proportion of leaf/%	地上部分生物量 Aboveground biomass/g	地上部占比 Proportion of above-ground part/%	总生物量 Total bio-mass/g
柴胡 叶链 荚豆	CK	30.72±0.49 ^a	40.44	26.54±0.30 ^b	34.94	18.70±0.37 ^b	24.62	45.24±0.37 ^b	59.56	75.96±0.61 ^a
	LS	25.44±0.35 ^b	35.50	27.72±0.55 ^{ab}	38.67	18.50±0.27 ^b	25.83	46.22±0.59 ^b	64.50	71.66±0.67 ^b
	MS	13.20±0.40 ^c	21.55	27.90±0.24 ^a	45.57	20.12±0.33 ^a	32.88	48.02±0.14 ^a	78.45	61.22±0.35 ^c
	HS	8.86±0.07 ^d	16.27	28.28±0.47 ^a	51.91	17.34±0.37 ^c	31.82	45.62±0.67 ^b	83.73	54.48±0.69 ^d
链荚 豆	CK	19.66±0.48 ^a	45.83	17.36±0.15 ^a	40.52	5.86±0.22 ^a	13.65	23.22±0.24 ^a	54.17	42.88±0.59 ^a
	LS	9.06±0.09 ^b	28.56	16.78±0.10 ^b	52.90	5.88±0.09 ^a	18.54	22.66±0.12 ^b	57.26	31.72±0.18 ^b
	MS	6.22±0.07 ^c	30.82	8.62±0.08 ^c	42.72	5.34±0.05 ^b	26.46	13.96±0.08 ^c	60.85	20.18±0.07 ^c
	HS	3.76±0.08 ^d	28.28	6.72±0.07 ^d	50.53	2.82±0.07 ^c	21.20	9.54±0.12 ^d	64.44	13.30±0.09 ^d

注：不同小写字母表示相同植物不同遮阴处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different shading treatments of the same plant ($P<0.05$).

表 4 不同遮阴处理（21 d）2 种链荚豆属植物的形态建成
Tab. 4 Plant morphogenesis of two *Alysicarpus* species (after 21 days) of different shading treatments

植物 Plant	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem thick/cm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶面积 Leaf area/cm ²
柴胡叶链 荚豆	CK	45.56±0.67 ^d	0.31±0.00 ^a	3.19±0.11 ^c	2.00±0.06 ^b	4.49±0.02 ^d
	LS	53.94±0.79 ^c	0.28±0.00 ^b	4.15±0.06 ^b	1.93±0.06 ^b	4.89±0.03 ^c
	MS	56.18±0.38 ^b	0.27±0.00 ^c	4.17±0.13 ^b	2.11±0.06 ^b	5.98±0.03 ^b
	HS	60.34±0.68 ^a	0.26±0.00 ^d	4.90±0.10 ^a	2.43±0.08 ^a	9.49±0.03 ^a
链荚豆	CK	26.14±0.64 ^d	0.26±0.00 ^a	2.33±0.08 ^b	1.85±0.04 ^b	3.17±0.04 ^b
	LS	28.34±0.31 ^c	0.24±0.00 ^b	2.92±0.06 ^a	1.85±0.05 ^b	3.05±0.05 ^b
	MS	30.26±0.44 ^b	0.24±0.00 ^{bc}	3.16±0.11 ^a	1.93±0.05 ^{ab}	3.19±0.03 ^b
	HS	34.62±0.42 ^a	0.23±0.00 ^c	2.52±0.07 ^b	2.07±0.07 ^a	3.71±0.04 ^a

注：不同小写字母表示相同植物不同遮阴处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different shading treatments of the same plant ($P<0.05$).

表 5 不同遮阴处理 (42 d) 2 种链荚豆属植物的形态建成
Tab. 5 Plant morphogenesis of two *Alysicarpus* species (after 42 days) of different shading treatments

植物 Plant	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem thick/cm	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶面积 Leaf area/cm ²
柴胡叶链荚豆	CK	55.34±0.45 ^d	0.50±0.00 ^a	2.75±0.03 ^d	1.77±0.03 ^b	6.46±0.11 ^c
	LS	75.54±0.68 ^c	0.34±0.00 ^b	4.18±0.04 ^c	1.49±0.03 ^c	6.77±0.11 ^{bc}
	MS	78.08±1.08 ^b	0.31±0.01 ^c	4.90±0.04 ^b	1.48±0.02 ^c	7.14±0.06 ^b
	HS	85.60±0.67 ^a	0.29±0.01 ^c	5.31±0.03 ^a	2.19±0.02 ^a	10.83±0.19 ^a
链荚豆	CK	53.40±0.43 ^a	0.35±0.00 ^a	3.82±0.07 ^b	0.78±0.02 ^c	3.70±0.06 ^d
	LS	54.52±0.73 ^a	0.32±0.00 ^b	3.79±0.03 ^b	0.76±0.02 ^c	4.88±0.07 ^c
	MS	53.54±0.48 ^a	0.31±0.00 ^b	4.06±0.05 ^a	0.94±0.03 ^b	5.32±0.04 ^b
	HS	40.52±0.62 ^b	0.26±0.00 ^c	3.65±0.03 ^b	1.27±0.03 ^a	6.21±0.07 ^a

注：不同小写字母表示相同植物不同遮阴处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different shading treatments of the same plant ($P<0.05$).

著高于 CK。遮阴 21 d, LS、MS、HS 处理柴胡叶链荚豆的叶面积均显著增加, 分别增加 8.91%、33.18%、111.36%, 而链荚豆仅在 HS 处理的叶面积显著增加, 增加 17.03%。遮阴 42 d, LS、MS、HS 处理柴胡叶链荚豆的叶面积分别增加 4.80%、10.53%、67.65%, 链荚豆的叶面积分别增加 31.89%、43.78%、67.84%。

2.3 遮阴对 2 种链荚豆属植物生理指标的影响

2.3.1 F_v/F_m 和叶绿素含量变化 2 种链荚豆属植物在不同遮阴条件下叶片的 F_v/F_m 随时间的变化情况如图 1 所示。柴胡叶链荚豆的 F_v/F_m 随遮阴时间的增加呈先降后升趋势, 其中 MS 处理的 F_v/F_m

在整个观察期内略高于 HS、LS 处理。链荚豆的 F_v/F_m 则呈先升后降趋势, 在遮阴 21 d 达到峰值后下降, 其中 HS、MS 处理下降尤为明显。CK、LS 处理的 F_v/F_m 变化趋势相似, 数值相近。

2 种链荚豆属植物在不同遮阴条件下的叶绿素含量随时间的变化情况如图 2 所示。柴胡叶链荚豆的叶绿素含量随遮阴时间的增加呈先升高后趋于平稳, MS、HS 处理的变化趋势相似, 且 MS 处理的叶绿素含量最高。链荚豆的叶绿素含量在 LS、MS 处理随遮阴时间的增加呈逐渐上升趋势, 其中 MS 处理在遮阴 42 d 达到最高值, 而 HS 处理则呈下降趋势, 并在遮阴 42 d 达到最低值。

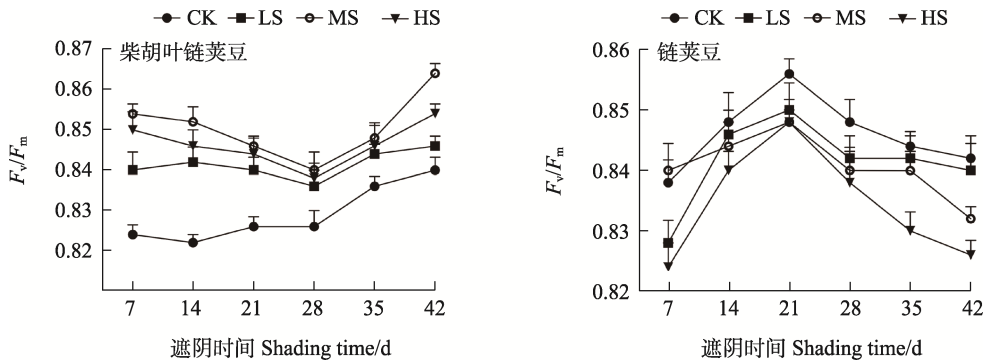


图 1 不同遮阴处理 2 种链荚豆属植物叶片 F_v/F_m 变化
Fig. 1 Changes in F_v/F_m of leaves of two *Alysicarpus* species under different shade treatments

2.3.2 生理指标变化 由表 6、表 7 可以看出, 遮阴对 2 种链荚豆属植物生理指标的变化。遮阴 21、42 d, 所有处理叶片的 F_v/F_m 均大于 0.80。与 CK 相比, 遮阴 21 d, 链荚豆叶片的 F_v/F_m 差异不显著, 柴胡叶链荚豆所有处理叶片的 F_v/F_m 显著升高; 遮阴 42 d, 除链荚豆 HS 处理的 F_v/F_m 显著降低外, 其他各处理之间均差异不显著。遮阴 21 d, 与 CK 相比, 除 HS 处理链荚豆叶片的叶绿素含量

差异不显著外, 2 种链荚豆属植物其他处理叶片的叶绿素含量均显著增加。遮阴 42 d, 与 CK 相比, 柴胡叶链荚豆所有处理叶片的叶绿素含量均显著增加; 除 HS 处理链荚豆叶片的叶绿素含量有所降低外, 其他处理叶片的叶绿素含量均显著增加。

随着遮阴程度的不断增加, 2 种链荚豆属植物叶片的相对电导率呈上升趋势。除遮阴 21 d, LS 处理柴胡叶链荚豆的叶片相对电导率与 CK 差

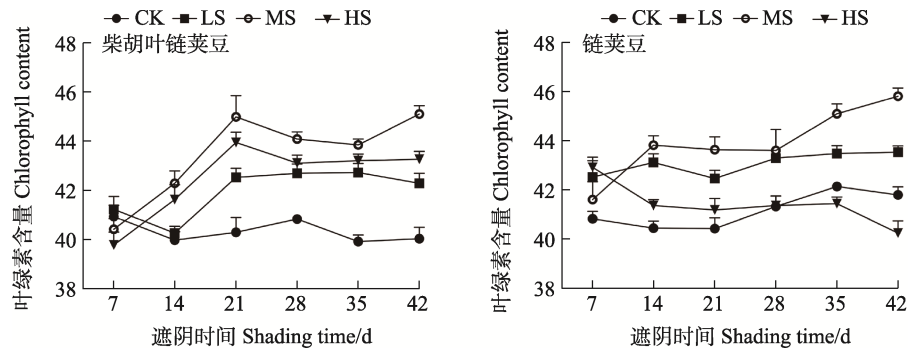


图 2 不同遮阴处理 2 种链荚豆属植物叶片的叶绿素含量变化

Fig. 2 Changes in chlorophyll content of leaves of two *Alysicarpus* species under different shade treatments

表 6 不同遮阴处理（21 d）2 种链荚豆属植物的生理指标

Tab. 6 Physiological indices of two *Alysicarpus* species after 21 days of different shading treatments

植物 Plant	处理 Treatment	F_v/F_m	SPAD	REC/%	RWC/%	丙二醛含量 MDA content/ ($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	POD 活性 POD activity/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)
柴胡叶 链荚豆	CK	0.83 ± 0.00^b	40.30 ± 0.60^c	40.71 ± 0.97^c	77.32 ± 2.29^c	38.09 ± 0.40^c	2437.11 ± 27.02^c
	LS	0.84 ± 0.00^a	42.54 ± 0.37^b	45.16 ± 1.05^c	78.82 ± 1.45^{bc}	41.62 ± 0.39^b	2619.80 ± 56.61^b
	MS	0.85 ± 0.00^a	45.00 ± 0.87^a	53.13 ± 2.18^b	83.38 ± 1.73^b	42.05 ± 0.34^b	2926.67 ± 94.37^a
	HS	0.84 ± 0.00^a	43.96 ± 0.42^{ab}	68.30 ± 1.84^a	89.05 ± 1.47^a	45.16 ± 0.54^a	2509.90 ± 37.19^{bc}
链荚豆	CK	0.86 ± 0.00^a	40.42 ± 0.44^c	37.23 ± 0.64^c	88.16 ± 1.12^a	26.86 ± 0.62^d	2970.23 ± 60.49^a
	LS	0.85 ± 0.00^a	42.46 ± 0.34^{ab}	43.46 ± 1.24^b	86.95 ± 1.25^{ab}	29.10 ± 0.49^c	2302.13 ± 48.70^b
	MS	0.85 ± 0.00^a	43.64 ± 0.52^a	42.11 ± 0.60^b	85.52 ± 1.76^{ab}	31.50 ± 0.37^b	1570.79 ± 42.53^c
	HS	0.85 ± 0.00^a	41.18 ± 0.46^{bc}	48.32 ± 1.01^a	83.03 ± 0.83^b	36.00 ± 0.76^a	1263.31 ± 56.54^d

注：不同小写字母表示相同植物不同遮阴处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different shading treatments of the same plant ($P<0.05$).

表 7 不同遮阴处理（42 d）2 种链荚豆属植物的生理指标

Tab. 7 Physiological indices of two *Alysicarpus* species after 42 days of different shading treatments

植物 Plant	处理 Treatment	F_v/F_m	SPAD	REC/%	RWC/%	丙二醛含量 MDA content/ ($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$)	POD 活性 POD activity/ ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)
柴胡叶 链荚豆	CK	0.840 ± 0.00^b	40.04 ± 0.46^c	39.90 ± 0.94^d	75.07 ± 1.59^b	30.34 ± 0.42^c	2523.15 ± 23.84^b
	LS	0.856 ± 0.00^a	42.30 ± 0.40^b	43.65 ± 1.35^c	78.35 ± 2.37^b	31.08 ± 0.39^c	3095.52 ± 39.09^a
	MS	0.864 ± 0.00^a	45.12 ± 0.34^a	54.85 ± 0.56^b	84.25 ± 0.80^a	32.48 ± 0.41^b	3301.65 ± 59.08^a
	HS	0.856 ± 0.00^a	43.28 ± 0.32^b	59.44 ± 0.75^a	86.19 ± 1.58^a	34.90 ± 0.27^a	2365.48 ± 25.74^b
链荚豆	CK	0.842 ± 0.00^a	41.80 ± 0.32^c	42.98 ± 0.79^c	61.49 ± 1.81^a	25.28 ± 0.34^d	3176.67 ± 178.83^a
	LS	0.840 ± 0.00^a	43.54 ± 0.25^b	47.73 ± 1.95^b	57.73 ± 1.52^{ab}	35.84 ± 0.52^c	2572.17 ± 129.74^b
	MS	0.832 ± 0.00^{ab}	45.82 ± 0.33^a	46.89 ± 0.82^b	54.42 ± 1.79^{bc}	40.74 ± 1.31^b	2437.10 ± 53.82^b
	HS	0.826 ± 0.00^b	40.24 ± 0.49^d	51.11 ± 0.23^a	48.97 ± 2.80^c	44.79 ± 0.36^a	2019.84 ± 179.00^c

注：不同小写字母表示相同植物不同遮阴处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different shading treatments of the same plant ($P<0.05$).

异不显著外，其他各处理遮阴 21、42 d 叶片的相对电导率均显著高于 CK。遮阴 21、42 d，柴胡叶链荚豆随着遮阴程度的增加，其叶片的相对含水量均逐渐增加；MS、HS 处理叶片的相对含水量显著高于 CK。链荚豆叶片的相对含水量变化与

柴胡叶链荚豆相反，随着遮阴程度的增加，链荚豆叶片的相对含水量呈降低趋势，HS 处理叶片的相对含水量显著低于 CK。

随着遮阴程度的增加，遮阴 21、42 d，2 种链荚豆属植物的 MDA 含量均呈上升趋势，但遮阴

42 d 链荚豆的 MDA 含量增加速度高于柴胡叶链荚豆, 其含量在 LS、MS、HS 处理分别增加 41.77%、61.16%、77.18%, 而柴胡叶链荚豆分别增加 2.44%、7.05%、15.03%; 遮阴 21 d, LS、MS、HS 处理柴胡叶链荚豆的 POD 活性均显著高于 CK, 且 MS 处理的 POD 活性最高; 链荚豆在 LS、MS、HS 处理的 POD 活性均随着遮阴程度的增加而降低, 且均显著低于 CK。遮阴 42 d, LS、MS 处理柴胡

叶链荚豆叶片的 POD 活性显著高于 CK, 而 HS 处理则与 CK 差异不显著; 链荚豆在遮阴处理的 POD 活性均显著低于 CK, 其变化趋势与遮阴 21 d 的结果相似。

2.4 2 种链荚豆属植物耐阴性综合评价

根据 2 种链荚豆属植物遮阴 42 d 各处理的指标值, 计算得出的各单项指标的耐阴系数 α 值见表 8。

表 8 不同遮阴处理 (42 d) 2 种链荚豆属植物的耐阴系数 α 值
Tab. 8 Shade tolerance coefficients α value of two *Alysicarpus* species (after 42 days) of different shading treatments

植物 Plant	处理 Treatment	α 值 α value													
		FLW	TB	PH	SD	LL	LW	CHL	REC	RWC	MDA	POD	FRW	FSW	F_v/F_m
柴胡 叶链 荚豆	LS	1.52	0.84	0.68	1.37	1.05	1.02	1.09	1.04	1.02	1.23	0.83	1.04	0.99	1.06
	MS	1.78	0.84	0.61	1.41	1.10	1.03	1.37	1.12	1.07	1.31	0.43	1.05	1.08	1.13
	HS	1.93	1.23	0.59	1.55	1.68	1.02	1.49	1.15	1.15	0.94	0.29	1.07	0.93	1.08
链荚 豆	LS	0.99	0.97	0.91	1.02	1.32	1.00	1.11	0.94	1.42	0.81	0.46	0.97	1.00	1.04
	MS	1.06	1.21	0.89	1.00	1.44	0.99	1.09	0.89	1.61	0.77	0.32	0.50	0.91	1.10
	HS	0.96	1.63	0.76	0.76	1.68	0.98	1.19	0.80	1.77	0.68	0.19	0.39	0.48	0.96

遮阴 42 d, 2 种链荚豆属植物各处理耐阴系数的主成分分析结果见表 9。前 2 个主成分的贡献率依次为 68.63%和 20.03%, 累计贡献率达 88.66%。第 1 主成分中, 丙二醛含量、 F_v/F_m 、叶片相对含水率、株高与总生物量的特征向量较大; 第 2 主成分中, 叶片相对电导率和叶面积的特征向量较大。

基于主成分分析结果, 采用隶属函数法对遮阴条件下 2 种链荚豆属植物综合指标值[Z(x)]、隶属函数值[$\mu(x)$]及其权重以及综合评价值(D)进行计算, 并基于 D 值对 2 种链荚豆属植物的耐阴性进行排序(表 10)。结果表明, 柴胡叶链荚豆在 LS 处理的 D 值最大, 2 种链荚豆属植物在轻度遮阴处理的 D 值均大于其他遮阴处理。

3 讨论

植物能够凭借对自身形态结构的主动调控来达成与外界光照强度变化的动态适配, 无论是光照强度的升高还是显著降低, 均会对植物生长发育造成影响^[17-18]。在本研究中, 随着遮阴程度的增加, 2 种链荚豆属植物的株高、叶长、叶宽、叶面积、叶占比、茎占比、地上部占比均呈上升趋势, 而生物量则呈下降趋势。遮阴处理下, 植物体内的物质优先向茎与叶进行调配, 促使其地上部分生物量得以增加, 增强其在弱光环境下的

表 9 综合指标系数及贡献率
Tab. 9 Comprehensive index coefficients and proportions

指标 Index	综合指标系数 Comprehensive index coefficient	
	第一主成分 The first principal component	第二主成分 The second principal component
丙二醛含量	-0.99	0.00
F_v/F_m	0.98	0.16
叶片相对含水率	0.94	0.32
株高	0.93	0.29
总生物量	0.93	-0.29
茎鲜质量	0.92	0.00
POD 活性	0.92	-0.12
叶长	0.85	0.51
叶宽	-0.84	0.52
叶鲜质量	0.83	-0.33
叶绿素含量	0.74	0.00
茎粗	-0.65	-0.63
叶片相对电导率	0.44	0.88
叶面积	-0.64	0.69
根鲜质量	0.62	-0.65
特征值	10.29	3.00
贡献率/%	68.63	20.03
累计贡献率/%	68.63	88.66

生存竞争力与资源利用效率^[19-21]。结果表明, 遮阴胁迫对 2 种链荚豆属植物的生长和形态均产生显著影响, 但二者在生长和形态方面对遮阴胁迫

表 10 综合指标值[Z(x)]、隶属函数值[μ(x)]及其权重、综合评价值(D)及耐阴性排序

Tab. 10 Comprehensive index value (Z), subordinate function value (u) and weight, comprehensive evaluation value (D) and order of shade tolerance

植物 Plant	处理 Treatment	Z(x)		μ(x)		D	排序 Order
		Z1	Z2	μ1	μ2		
柴胡 叶链 荚豆	LS	1.28	-0.15	1.00	0.29	0.84	1
	MS	0.62	0.89	0.76	0.73	0.75	2
	HS	-0.68	1.55	0.30	1.00	0.46	4
链荚 豆	LS	0.48	-0.85	0.71	0.00	0.55	3
	MS	-0.19	-0.83	0.47	0.01	0.37	5
	HS	-1.50	-0.62	0.00	0.10	0.02	6

的响应并不一致。从遮阴处理的总生物量变化来看，遮阴 21、42 d 各处理柴胡叶链荚豆的总生物量下降比例均小于链荚豆，说明遮阴胁迫对柴胡叶链荚豆生长造成的影响小于链荚豆。

叶片的大小和形状直接影响植物对光能的摄取效率与利用程度^[22-23]。叶绿素荧光参数 F_v/F_m 反映 PS II 反应中心光能转换效率，是植物光合生理的重要研究参数。在正常光照条件下， F_v/F_m 一般介于 0.80~0.85 之间，低于 0.80 表明光抑制^[24-25]。在本研究中，不同遮阴处理不同时期 2 种链荚豆属植物的 F_v/F_m 均处于正常范围。说明遮阴对 2 种植物的光合系统并未造成严重伤害，二者均具有较强的耐阴能力。此外，2 种链荚豆属植物在适度遮阴（LS、MS）条件下的叶绿素含量升高也表明，二者能够在一定遮阴条件下通过增加叶绿素含量来获得更多的光能^[26-27]。可见，2 种链荚豆属植物均具有一定的耐阴能力。在适度遮阴处理下可以通过增加叶绿素含量来更高效地获取光能以适应弱光环境。

遮阴处理下，植物的细胞质膜会遭受一定程度的损伤，致使其膜透性显著增大，细胞内部的电解质顺势向外渗出，进而引发细胞液的电导率升高，该现象反映了植物细胞在遮阴环境下生理状态的改变^[28-29]。本研究中，遮阴处理下 2 种链荚豆属植物的相对电导率增加，这意味着细胞膜结构和功能受损。MDA 是植物膜系统于过氧化反应进程中所生成的关键产物，其在反映植物膜结构受氧化胁迫损伤程度方面具有重要指示意义^[30]。在本研究中，遮阴 21、42 d 两种链荚豆属植物各处理的 MDA 含量均呈上升趋势，但在遮阴 42 d，链荚豆的 MDA 含量上升速度高于柴胡叶链荚豆。

结果表明在长期的遮阴处理下，链荚豆较柴胡叶链荚豆受到的伤害更大。

植物可以通过产生酶类如 POD 活性等物质来消除因胁迫而产生活性氧对生理的伤害^[31]。在本研究中，柴胡叶链荚豆的 POD 活性随着遮阴程度的增加呈现先升后降趋势，链荚豆的 POD 活性均呈现下降趋势。在植物体内，ROS 与 MDA 含量呈现上升趋势时，植物会启动自身的抗氧化防御机制，通过上调 SOD、POD、CAT 等抗氧化酶的活性水平，以此维持活性氧产生与清除过程的动态平衡，进而实现对 MDA 含量的有效调控与降低，保障植物细胞的生理功能完整性与代谢稳态，增强植物在逆境环境下的生存适应能力与抗逆性能表现^[32-33]。可见，柴胡叶链荚豆在遮阴处理下可以通过提升 POD 活性来清除活性氧的含量，以减少细胞膜的损伤^[34-35]。链荚豆的 POD 活性降低可能意味着其在遮阴条件下抗氧化能力减弱，无法有效清除体内产生的活性氧，从而导致氧化损伤加剧。

通过构建隶属函数能够将植物抗逆性相关的各项指标进行量化处理，进而综合计算出评价 D 值来评价植物的耐性能力已经被广泛应用^[36-37]。本试验基于 D 值对 2 种链荚豆属植物的耐阴能力进行综合分析，发现在相同遮阴处理下柴胡叶链荚豆的 D 值均大于链荚豆，说明柴胡叶链荚耐阴能力优于链荚豆。

综上所述，2 种茂名野生链荚豆属植物均具有一定的耐阴能力，但其生长和生理指标对遮阴的响应并不完全相同。在遮阴胁迫下，柴胡叶链荚豆通过增加叶面积、提高叶绿素含量、维持较高的 POD 活性以及降低 MDA 含量，进而维持生长。相比之下，链荚豆在遮阴条件下的抗氧化能力较弱，导致其氧化损伤更为严重，生物量下降幅度更大。综合分析表明，柴胡叶链荚豆具有更强的耐阴能力，可适合在郁闭度较高的果园种植，而链荚豆的耐阴能力则相对较弱，适用于郁闭度较低的环境。本研究结果为链荚豆属植物在我国南方果园生草中的应用提供重要理论依据。

参考文献

[1] 王凌霞, 李忠武, 王丹阳, 陈佳, 胡晓倩, 宁珂. 红壤低山丘陵区水土流失防治分区方法与措施配置: 以宁都县小洋小流域为例[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1169-1178.
WANG L X, LI Z W, WANG D Y, CHEN J, HU X Q,

- NING K. Methods and measures for soil and water conservation in hilly red soil regions in south china: a case study of Xiaoyang watershed in Ningdu[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(5): 1169-1178. (in Chinese)
- [2] 蔡旭东, 周怡雯, 刘窑军, 李朝霞, 戴翠婷, 王天巍, 邓俊. 南方红壤区坡耕地不同耕作措施综合生态效益评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 281-287.
- CAI X D, ZHOU Y W, LIU Y J, LI C X, DAI C T, WANG T W, DENG J. Evaluation on comprehensive ecological benefit of different tillage measures on sloping land in red soil area of south China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5): 281-287. (in Chinese)
- [3] 解开治, 徐培智, 严超, 张发宝, 陈建生, 唐拴虎, 黄旭, 顾文杰. 不同土壤改良剂对南方酸性土壤的改良效果研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(20): 160-165.
- JIE K Z, XU P Z, YAN C, ZHANG F B, CHEN J S, TANG S H, HUANG X, GU W J. Study the effects of soil improvement on acid soil in the south of China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(20): 160-165. (in Chinese)
- [4] 张秀, 张黎明, 龙军, 陈翰阅, 范协裕, 邢世和, 徐福祥. 亚热带耕地土壤酸化程度差异及影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 441-450.
- ZHANG X, ZHANG L M, LONG J, CHEN H Y, FAN X Y, XING S H, XU F X. Soil acidification degree difference and impact factors of subtropical cropland[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(3): 441-450. (in Chinese)
- [5] 曹俊. 长期生草对红壤坡地枇杷园根际微生态的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
- CAO J. Effects of long-term sod culture on rhizosphere microecology of loquat orchard in red soil slope[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023. (in Chinese)
- [6] 字学娟, 李茂, 易克贤. 链荚豆种质资源形态特征变异研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(13): 29-31, 46.
- ZI X J, LI M, YI K X. Morphological diversity of *Alysicarpus vaginalis*[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(13): 29-31, 46. (in Chinese)
- [7] 曾小飏, 苏仕林, 贾桂康, 蔡成翔. 百色市野生草坪草生物学及坪用特性评价[J]. 广西农业科学, 2006(5): 572-574.
- ZENG X B, SU S L, JIA G K, CAI C X. Assessment on biological and turf-used characteristics of wild resources of lawn grass in Baise city[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2006(5): 572-574. (in Chinese)
- [8] 字学娟, 杨石有, 李茂. 8 份链荚豆种质坪用价值评价[J]. 热带农业科学, 2017, 37(3): 74-78.
- ZI X J, YANG S Y, LI M. Assessment of turf quality of eight accessions of *Alysicarpus vaginalis* germplasm[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2017, 37(3): 74-78. (in Chinese)
- [9] 字学娟, 杨石有, 李茂. 应用隶属函数法综合评价链荚豆种质抗旱性[J]. 福建农业学报, 2016, 31(8): 844-848.
- ZI X J, YANG S Y, LI M. Drought-resistance of *Alysicarpus vaginalis* germplasms evaluated by subordinate function values[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31(8): 844-848. (in Chinese)
- [10] 刘国道, 罗丽娟, 白昌军, 王东劲, 郑学勤. 海南豆科饲用植物资源及营养价值评价[J]. 草地学报, 2006(3): 254-260.
- LIU G D, LUO L J, BAI C J, WANG D J, ZHENG X Q. A Survey of Hainan island forage legume resources and assessment of their nutritional values[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006(3): 254-260. (in Chinese)
- [11] 郇恒福, 黄嘉璞, 线琳, 黄冬芬, 洪继旺, 刘国道. 施用豆科绿肥对酸性土壤有机磷组分的动态影响[J]. 草地学报, 2014, 22(6): 1216-1221.
- XUN H F, HUANG J P, XIAN L, HUANG D F, HONG J W, LIU G D. Dynamic effects of Leguminous green manure on the organic phosphorus fractions of acid soil[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(6): 1216-1221. (in Chinese)
- [12] 刘小锐, 黄成东, 祝红伟. 叶用莴苣叶面积测定方法的研究[J]. 中国蔬菜, 2020(12): 78-81.
- LIU X R, HUANG C D, ZHU H W. Studies on measuring methods of leaf area in lettuce[J]. *China Vegetables*, 2020 (12): 78-81. (in Chinese)
- [13] 何佳蕾, 白史且, 孙林, 吕杰, 李达旭, 鄢家俊, 常丹, 谢彩云, 左相兵, 张建波. 10 份沿阶草种质资源不同遮阴处理对农艺性状及叶片含水量影响的研究[J]. 草学, 2024(1): 57-68, 73.
- HE J L, BAI S Q, SUN L, LYU J, LI D X, YAN J J, CHANG D, XIE C Y, ZUO X B, ZHANG J B. Effects of different shading treatments on agronomic traits of 10 germplasm resources of *Ophiopogon*[J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2024(1): 57-68, 73. (in Chinese)
- [14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI H S. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [15] ANDRÉ D D, JOSÉ T P, JOAQUIM E, CARLOS E, ENÉAS G. Effect of salt stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of salt-tolerant and salt-sensitive maize genotypes[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2005, 56(1): 87-94.
- [16] 赵雪瑶, 赵丹丹, 张鸽香. 3 种毛茛科地被植物对遮阴的生理响应及耐阴性评价[J]. 草业科学, 2024, 41(12): 2880-

2890.
ZHAO X Y, ZHAO D D, ZHANG G X. Physiological response and shade tolerance of three Ranunculaceae ground cover plants under different shading treatments[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(12): 2880-2890. (in Chinese)
- [17] YURINA K, KYOUNG K K, HYUNSEUNG H, CHANGHOO C. Growth and quality of sprouts of six vegetables cultivated under different light intensity and quality[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2015, 56(4): 437-443.
- [18] 秦玉芝, 覃丽, 何长征, 潘妃, 谢洁, 陈慧, 罗江龙, 丁旭, 熊兴耀. 遮光处理对马铃薯农艺性状和产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(1): 1-6.
QIN Y Z, QIN L, HE C Z, PAN F, XIE J, CHEN H, LUO J L, DING X, XIONG X Y. Effect of shading treatment on the agronomic traits and yield of potato[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2017, 43(1): 1-6. (in Chinese)
- [19] 张艳. 7 种委陵菜属植物光适应性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021.
ZHANG Y. Research on the light adaptability of seven *Potentilla* species[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021. (in Chinese)
- [20] RUBERTI I, SESSA G, CIOLFI A, POSSENTI M, CARABELLI M, MORELLI G. Plant adaptation to dynamically changing environment: the shade avoidance response[J]. Biotechnology Advances, 2012, 30(5): 1047-1058.
- [21] 聂小英, 朱春晓, 郑东升, 陈阳峰, 李自强, 肖深根. 遮光处理对草珊瑚光合特性及叶片解剖结构的影响[J]. 西北植物学报, 2021, 41(6): 995-1002.
NIE X Y, ZHU C X, ZHENG D S, CHEN Y F, LI Z Q, XIAO S G. Effects of shading treatment on photosynthetic characteristics and leaf anatomical structure of *Sarcandra glabra*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(6): 995-1002. (in Chinese)
- [22] TSUKAYA H. Leaf shape: genetic controls and environmental factors[J]. The International Journal of Developmental Biology, 2005, 49(5/6): 547-555.
- [23] 包玉, 王志泰. 不同遮阴处理大叶黄杨叶片生理响应[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(12): 5470-5471.
BAO Y, WANG Z T. Leaf physiological response of *Euonymus japonicus* to different shading treatments[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(12): 5470-5471. (in Chinese)
- [24] PENG G J, JIANG R X, XU J, GUO L, GAO R F, LIU Y. Underestimated chlorophyll a fluorescence measurements on *Buxus microphylla* red winter leaves[J]. Photosynthetica, 2017, 55(4): 561-567.
- [25] ROBAKOWSKI P, WYKA T. Winter photoinhibition in needles of *Taxus baccata* seedlings acclimated to different light levels[J]. Photosynthetica, 2010, 47(4): 527-535.
- [26] 张广忠, 张露荷, 黄华梨, 马存世, 赵通, 胡秉芬, 戚建莉, 朱红斌. 甘肃沿黄灌区 10 个枣树品种叶绿素荧光特性的比较分析[J]. 经济林研究, 2021, 39(4): 177-184, 220.
ZHANG G Z, ZHANG L H, HUANG H L, MA C S, ZHAO T, HU B F, QI J L, ZHU H B. Chlorophyll fluorescence characteristics comparison of 10 jujube varieties in irrigation area along the Yellow River in Gansu province[J]. Non-wood Forest Research, 2021, 39(4): 177-184, 220. (in Chinese)
- [27] 黄秋婵, 韦友欢. 阳生植物和阴生植物叶绿素含量的比较分析[J]. 湖南农业科学, 2009(8): 141-142.
HUANG Q C, WEI Y H. Comparative analysis of chlorophyll content on several sun plants and shade plants[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2009(8): 141-142. (in Chinese)
- [28] SARAHJANE C, CHRISTINE G. A dynamic of the shade-induced plasticity in *Arabidopsis thaliana* rosette leaf development reveals new components of the shade-adaptative response[J]. Annals of Botany, 2006, 97: 443-452. (in Chinese)
- [29] 张甦嘉. 遮阴对 3 种地被植物幼苗生长及生理生化特性的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2015.
ZHANG S J. The influence of shade on the growth of seedlings and physiological-biochemical characteristics of three ground cover plants[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [30] 范玉凝. 基于果园生草对常夏石竹耐荫性的研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2021.
FAN Y N. Based on the research on the negative tolerance of orchard grass to *Dianthus plumarius*[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [31] 孙君梅, 周文, 宫春亭. 不同光照强度对金钱树幼苗生长的影响[J]. 热带林业, 2022, 50(2): 37-40.
SUN J M, ZHOU W, GONG C T. Effects of different light intensity on the growth of *Zamioculcas zamiifolia* seedlings[J]. Tropical Forestry, 2022, 50(2): 37-40. (in Chinese)
- [32] 张梦如, 杨玉梅, 成蕴秀, 周滔, 段晓艳, 龚明, 邹竹荣. 植物活性氧的产生及其作用和危害[J]. 西北植物学报, 2014, 34(9): 1916-1926.
ZHANG M R, YANG Y M, CHENG Y X, ZHOU T, DUAN X Y, GONG M, ZOU Z R. Generation of reactive oxygen species and their functions and deleterious effects in plants[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(9): 1916-1926. (in Chinese)
- [33] DHRITI K, SIMRANJEET S, VIJAY K, ROMINA R, RAM P, JOGINDER S. Antioxidant enzymes regulation in plants in reference to reactive oxygen species (ROS) and reactive

- nitrogen species (RNS)[J]. *Plant Gene*, 2019, 19: 100182.
- [34] 张振博, 贾春兰, 任佰朝, 刘鹏, 赵斌, 张吉旺. 氮磷配施对夏玉米产量和叶片衰老特性的影响[J]. *作物学报*, 2023, 49(6): 1616-1629.
- ZHANG Z B, JIA C L, REN B C, LIU P, ZHAO B, ZHANG J W. Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on yield and leaf senescence physiological characteristics in summer maize[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(6): 1616-1629. (in Chinese)
- [35] SAJID H, MUHAMMAD F S, MUHAMMAD S, MUHAMMAD I, ABDUL S, MUHAMMAD A W, HAROON Z K. Biochemically triggered heat and drought stress tolerance in rice by proline application[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2020, 40(1): 305-312
- [36] 朱莹, 高康, 滕文军, 蓝嘉华, 张辉, 范希峰, 岳跃森, 滕珂, 温海峰, 武菊英, 丁国昌. 遮荫对 5 种观赏草表型的影响及耐荫性评价[J]. *草地学报*, 2023, 31(7): 2096-2106.
- ZHU X, GAO K, TENG W J, LAN J H, ZHANG H, FAN X F, YUE Y S, TENG K, WEN H F, WU J Y, DING G C. Effects of shade on phenotypes and shade tolerance evaluation of five ornamental grasses[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(7): 2096-2106. (in Chinese)
- [37] 陈菊艳, 邓伦秀, 李鹤, 龙海燕, 徐超然. 遮光对贵州原产两种金花茶生长发育和生理特性的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(3): 83-90.
- CHEN J Y, DENG L X, LI H, LONG H Y, XU C R. Effects of shading on growth, development and physiology of two golden camellia species originated in Guizhou province[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2022, 46 (3): 83-90. (in Chinese)