

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.006

引用格式:安麒,高凯,孙忠林,等.少花蒺藜草植物功能性状对降雨量变化和遮光的响应[J].草地学报,2026,34(1):52–60
AN Qi, GAO Kai, SUN Zhong-lin, et al. Responses of Plant Functional Traits of *Cenchrus spinifex* to Rainfall Changes and Shading[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):52–60

少花蒺藜草植物功能性状对降雨量变化和遮光的响应

安麒,高凯*,孙忠林*,连继明,毕北
(内蒙古民族大学草业学院,内蒙古通辽028000)

摘要:全球变化背景下,植物入侵事件频发,入侵范围扩大。降雨和光照是影响入侵植物适应和扩散的重要生态因子。少花蒺藜草(*Cenchrus spinifex*)是科尔沁沙地主要入侵植物,近年来其入侵面积逐步扩大,严重威胁着当地生物多样性和生态系统功能,对其入侵和适应机制的探索是制订防控机制的重要依据。本试验通过管培方式建立少花蒺藜草野外原位研究样地,设置增雨,减雨和遮光3种处理,并增设对照试验,以探索植物功能性状的变化规律。结果表明:增雨和减雨均提高了少花蒺藜草株高,此外,增雨显著增加少花蒺藜草分枝数、繁殖枝数量、刺苞数并提高叶生物量和叶贡献率,减雨显著增加少花蒺藜草分蘖数并提高了总根长、根贡献率和刺苞贡献率;遮光显著降低少花蒺藜草冠幅、刺苞数、总根长和各器官生物量。研究表明少花蒺藜草能够通过调整株型特征、生物量及其分配等一系列途径适应降雨量和光照的变化。本研究为揭示少花蒺藜草在气候变化背景下的入侵和适应机制提供了理论依据,同时可为预测其适生或扩散区域提供参考。

关键词:少花蒺藜草;降雨量;遮光;株型特征;生物量

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0052-09

Responses of Plant Functional Traits of *Cenchrus spinifex* to Rainfall Changes and Shading

AN Qi, GAO Kai*, SUN Zhong-lin*, LIAN Ji-ming, BI Bei

(College of Pratacultural, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China)

Abstract: Under the context of global change, plant invasion events have become more frequent and widespread. Rainfall and light are important ecological factors that affect the adaptation and dispersal of invasive plants. *Cenchrus spinifex*, a major invasive plant in the Horqin Sandy Land China, has expanded its invasion area in recent years, posing significant threats to local biodiversity and ecosystem functions. Understanding its invasion and adaptation mechanisms is crucial for devising effective control strategies. In this study, we established an in situ field experiment by using pipe cultivation to explore the functional traits of *Cenchrus spinifex* under three treatments: increased rainfall, reduced rainfall, shading, and a control (CK) group. The results revealed that both increased rainfall and reduced rainfall significantly enhanced plant height. Increased rainfall increased branching, the number of reproductive branches, spiny burs, leaf biomass, and leaf contribution ratio significantly. Reduced rainfall promoted tiller number, total root length, root contribution ratio, and spiny bur contribution ratio significantly. In contrast, shading significantly reduced crown width, spiny bur number, total root length, and biomass of all organs. These findings indicate that *Cenchrus spinifex* adapts to variations in rainfall and light availability by modulating plant architecture, biomass of organ and biomass allocation. This study provides a theoretical basis for revealing the invasion and adaptation mechanisms of *Cenchrus spinifex* under the background of climate change, and to provide reference for predicting its suitable or spreading areas.

收稿日期:2025-01-20;修回日期:2025-03-07

基金项目:内蒙古自然科学基金(2023LHMS030507);草原少花蒺藜草、刺萼龙葵扩散机制与综合防控(S22002)资助

作者简介:安麒(2000-),男,汉族,云南楚雄人,硕士研究生,主要从事草地生态与环境修复研究,E-mail:1043591208@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:gaokai555@126.com, handsomezl@126.com

Key words: *Cenchrus spinifex*; Rainfall; Shading; Plant type characteristics; Biomass

外来生物入侵影响自然生态系统结构^[1-2],是导致生物多样性丧失的重要原因之一^[3]。日益加剧的全球变化和国际贸易规模的扩大导致更多的外来入侵物种被引入新的栖息地^[4]。降雨和光照是影响植物入侵和适应的关键因素之一,对入侵植物的入侵、定居、建群过程均有重要影响^[5]。在自然环境中,降雨是影响植物生长的关键环境因素^[6]。当植物体受水分胁迫时,其体内正常代谢会陷入紊乱,致使生命活动无法正常开展,甚至形态结构也会出现变异。降水时空格局的改变,极有可能对入侵植物的种群动态产生深远影响^[5]。光是植物必须的资源之一^[7],入侵植物对光的利用直接影响植物在自然生态系统中的生存和适合度^[8-9]。不同植物对光照和水分的需求不同,光照与水分增多或减少都会对植物的生长产生影响^[10-11]。例如,中国西部地区入侵植物骆驼蓬(*Peganum harmala*)在遮光和降雨减少不利于其生长时,会通过调节植株生长形态来适应逆境环境^[11]。光照和水分改变时,入侵植物鬼针草(*Bidens pilosa*)通过灵活的资源分配策略使其在有利条件下表现出生长最大化,在不利条件下提高对资源的捕获能力,维持生长^[12]。以上研究说明,入侵植物能够通过重塑形态来主动适应光照和水分的变化。

少花蒺藜草原产于北美洲及热带沿海地区^[13-14],是一年生禾本科草本植物,耐干旱耐贫瘠,具有球形刺苞,是一种高光效的C₄植物^[15]。在我国辽宁省西北部、内蒙古自治区东部和吉林省南部均有分布^[16],现已成为一种全球性入侵植物。内蒙古西辽河平原的科尔沁沙地少花蒺藜草入侵尤为严重,约占全国总入侵面积的80%,并呈现逐年递增的趋势^[17]。在野外条件下,少花蒺藜草繁殖能力极强^[18],在不同生境均有不同程度的入侵^[19]。它不仅与本土植物竞争生态位,还与作物竞争水分和养分^[20],排挤本土植物^[21],严重影响当地优质牧草的生长。

少花蒺藜草的入侵与扩散既与其具有较强的繁殖能力有关^[22],也与其在水分、光照等环境因子梯度上表现出较强的可塑性适应性密切相关^[15,23]。目前,国内有关少花蒺藜草植物功能性状受水分和光照影响的研究鲜有报道,少花蒺藜草在不同降雨量和光照条件下的入侵和适应机制尚缺乏充分的试验数据支持。本试验在内蒙古通辽市丰田镇少花蒺藜草集中分布区域设置研究样地,通过管培方式设置增雨,减雨,遮光3种处理,探索少花蒺藜草

在降雨量和光照发生变化条件下株型特征和生物量特征的变化规律,以期揭示少花蒺藜草在降雨量变化和遮光下的生长策略和适应机制,有助于更好地理解半干旱区域入侵植物的生态适应性和潜在的生态威胁,同时也为少花蒺藜草入侵风险评估和入侵区域预测提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古通辽市丰田镇内蒙古民族大学科技园区(122°3'46", 43°38'31")。该区域为温带大陆性半干旱季风气候,2024年平均温度6.3℃,1月份平均气温最低,7月份平均气温最高。年日照时数2800~3100 h。降雨多集中于夏季,近三年(2021—2023)降雨量分别为305.6 mm, 289.9 mm和298.3 mm,依据《中国土壤分类与代码》(GB/T 17296-2009),该试验地土壤类型为风沙土。

1.2 试验材料采集

于2023年10月在通辽市内蒙古民族大学科技园区采集少花蒺藜草刺苞。为防止少花蒺藜草刺苞活力的丧失,将刺苞采集完成后,装入纸袋置于阴凉干燥黑暗处,翌年备用。播种前进行萌发实验,90%以上刺苞可以发芽,视为其度过休眠期。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 挑选大小近乎一致的少花蒺藜草刺苞于2024年5月18日在科技园区试验地进行播种。生长季前将PVC管($d=30$ cm, $h=40$ cm)埋入土中,管内与管外土壤表面齐平,管内土壤为原生境风沙土,土壤过筛(20目)去除残留根系、杂物以及土壤原有少花蒺藜草种子,所有处理完成后,将土壤充分混匀并回填管内,保持管内土壤略低于管口2~3 cm。遮光处理(遮光)的PVC管上方1 m高度安装1层2针遮阳网用于控制光照,使用照度计(DLY-1802)测量后显示综合平均遮光度约50%(晴天,早晨遮光度约40%,中午遮光度约60%,傍晚遮光度约35%;阴雨天遮光度40%左右)。减雨处理的PVC管上方安装高透光度PC波浪瓦用于遮挡雨水(宽1.8 m),安装时一端略倾斜以便收集每次的雨水。如图1所示,设置遮光(遮光50%,自然降雨)、

增雨(相较于自然降雨增加1/3,全光照100%)、减雨(相较于自然降雨减少1/3,全光照100%)3种处理并设置对照(CK,自然降雨,全光照100%),每个处理5次重复,单个重复播种5粒少花蒺藜草刺苞,播后浇水1000 mL(折合自然降水14.2 mm)以保证少花蒺藜草出苗。在植株有3~5片真叶时进行定苗,各重复仅保留长势均匀的1株幼苗,试验期间人工去除

管口和周围其他植物。

CK和遮光依靠自然降雨,每次降雨结束2 h内根据HOBO雨量筒数据(美国Onset公司生产)进行雨量的添加,增加的雨量为每次降雨后收集的雨水。试验期间(2024年5月18日—2024年9月6日)降雨量和光合有效辐射如图2所示,共降雨18次,总降雨量261.96 mm,平均降雨量14.55 mm。

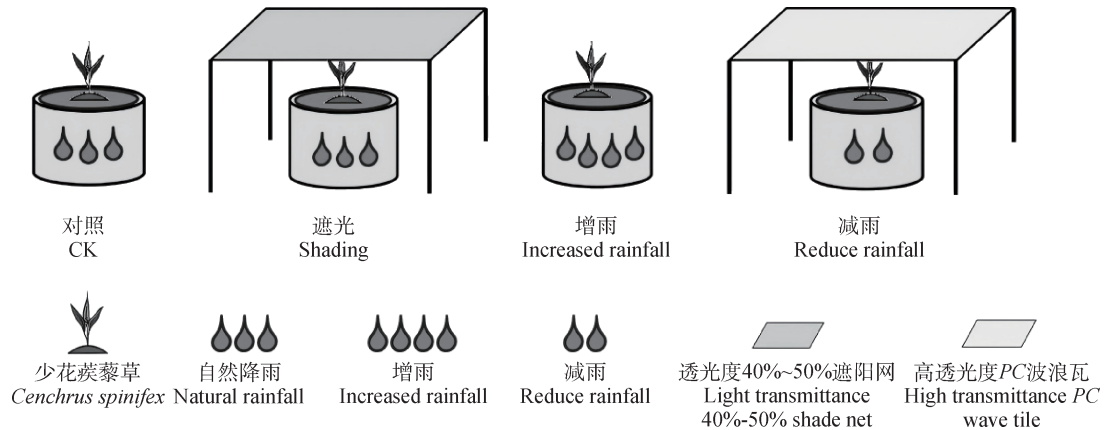


图1 少花蒺藜草降雨、光照处理试验设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental design of rainfall and light treatment of *Cenchrus spinifex*

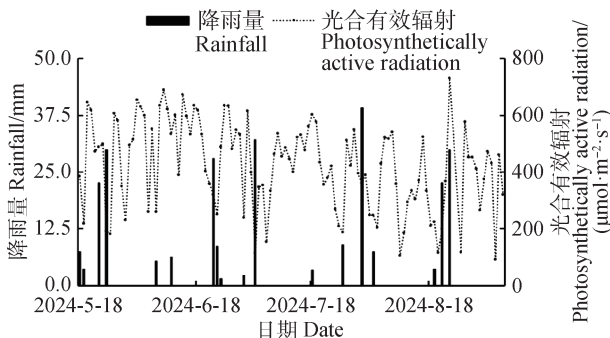


图2 试验期间降雨量和光合有效辐射

Fig. 2 Rainfall and Photosynthetically active radiation during the test

1.3.2 测定指标及方法 株高(cm):于成熟期取样时用卷尺(精确度:0.01 cm)测量植株自然状态下根基部位到植株顶穗高度。

冠幅(cm):于成熟期取样时用卷尺(精确度:0.01 cm)测量植株自然状态下最南端与最北端、最东端与最西端长度,取平均值作为冠幅直径。计算公式如下:

$$CW = \frac{L_{SN} + L_{EW}}{2}$$

式中,CW, L_{SN} 和 L_{EW} 分别表示冠幅、南北向长度(cm)和东西向长度(cm)。

茎粗(mm):游标卡尺(精确度:0.01 mm)测量植株主枝的第一茎节中部宽度。

分蘖数量:每个植株的近地表分蘖数。

分枝数量:其他茎节和叶腋处产生的枝条数量。

营养枝数量:未产生果穗的分枝数量。

生殖枝数量:产生果穗的分枝数量。

总根长(cm):通过植物根系分析系统(FK-GX02)测量少花蒺藜草的总根长。

刺苞数量:每株植株随机选取100粒刺苞称重计算单个刺苞质量,刺苞总重除以单刺苞重得到刺苞数量。

生物量(g):将所有少花蒺藜草植株全株连根挖出后,带回实验室放入烘箱经105℃杀青30 min后,置入85℃烘箱24 h烘干至恒重,随后进行根、茎、叶、果穗和刺苞的分离,利用电子天平(精确度:0.001 g)进行测量。

生物量分配(%):各器官生物量占植株总生物量的百分比。计算公式如下:

$$OCR = \frac{B_Q}{B_T} \times 100\%$$

式中,OCR, B_Q 和 B_T 分别表示某器官贡献率(Contribution rate of organ biomass, OCR)、特定(根、茎、叶或刺苞)器官生物量(Organ biomass, B_Q)和植株总生物量(Total plant biomass, B_T)。

1.3.3 数据分析和指标计算 采用单因素方差(One-way ANOVA)检验降雨量变化对少花蒺藜草株型特征、生物量特征的影响,并利用Duncan法进行多重比较,用独立样本t检验分析遮光处理对表型特征、生物量特征的影响,所有数据分析利用IBM SPSS Statistics 26.0完成,采用Excel 2019作图。

2 结果与分析

2.1 降雨量变化与遮光对株型特征的影响

2.1.1 降雨量变化对少花蒺藜草株型特征的影响 由表 1 可知,除茎粗、冠幅和营养枝数量外,少花蒺藜草的株型特征受降雨量影响显著($P<0.05$)。增雨和减雨处理显著提高了少花蒺藜草株高($P<0.05$),较 CK 处理分别提高 16.84% 和 25.77%,但

减雨处理和增雨处理间无显著差异;减雨处理显著增加少花蒺藜草分蘖数量,但增雨处理和 CK 处理间差异不显著,大小顺序为:减雨>增雨>CK;增雨处理显著提高少花蒺藜草分枝数量、繁殖枝数量和刺苞数量,但减雨处理和 CK 间差异不显著,大小顺序为:增雨>减雨>CK;减雨处理显著增加少花蒺藜草总根长,但增雨处理和 CK 间差异不显著,大小顺序为:减雨>增雨>CK。

表 1 不同降雨量对少花蒺藜草株型特征的影响

Table 1 Effects of different rainfall on plant type characteristics of *Cenchrus spinifex*

处理 Treatment	对照 CK	增雨 Increase rainfall	减雨 Reduce rainfall
株高 Plant height/cm	37.83±1.48 ^b	44.20±1.62 ^a	47.58±1.33 ^a
茎粗 Stem thickness/mm	3.59±0.30 ^a	3.75±0.10 ^a	3.88±0.12 ^a
冠幅 Crown width/cm	237.13±13.37 ^a	250.29±5.95 ^a	249.38±12.49 ^a
分蘖数量 Number of tillers	6.00±0.32 ^b	6.60±0.24 ^b	7.80±0.49 ^a
分枝数量 Number of branches	1506.00±205.84 ^b	2725.00±306.44 ^a	1679.20±226.67 ^b
营养枝数量 Number of vegetative branches	449.00±100.72 ^a	770.00±80.64 ^a	643.00±136.24 ^a
繁殖枝数量 Number of propagating branches	1057.00±122.73 ^b	1955.00±273.51 ^a	1036.20±121.98 ^b
刺苞数量 Number of bracts	8305.20±1147.50 ^b	14 481.60±2813.94 ^a	9666.60±1251.48 ^b
总根长 Total root length	17 513.54±1 411.63 ^b	14 599.38±1 700.79 ^b	26 171.99±1 867.47 ^a

注:表中数据为平均值±标准误差,同行不同字母表示处理间的差异具有统计学意义($P<0.05$)。下同

Note: The data in the table are mean± standard error, and the difference between treatments is statistically significant ($P<0.05$). The same as below

2.1.2 遮光对少花蒺藜草株型特征的影响 由表 2 可知,遮光处理对少花蒺藜草各株型特征均有不同程度降低,其中遮光处理显著降低少花蒺藜草冠

幅、刺苞数量和总根长($P<0.05$)。遮光导致少花蒺藜草冠幅降低 22.86%、刺苞数减少 65.04%、总根长减少 40.43%。

表 2 遮光对少花蒺藜草株型特征的影响

Table 2 Effect of Shading on plant type characteristics of *Cenchrus spinifex*

处理 Treatment	对照 CK	遮光 Shading	<i>t</i>	<i>P</i>
株高 Plant height/cm	37.83±1.48 ^a	36.79±1.43 ^a	0.502	0.629
茎粗 Stem thickness/mm	3.59±0.30 ^a	3.51±0.18 ^a	0.218	0.833
冠幅 Crown width/cm	237.13±13.37 ^a	182.93±12.59 ^b	2.951	0.018
分蘖数量 Number of tillers	6.00±0.32 ^a	5.20±0.49 ^a	1.372	0.207
分枝数量 Number of branches	1506.00±205.84 ^a	1264.20±191.84 ^a	0.859	0.415
营养枝数量 Number of vegetative branches	449.00±100.72 ^a	349.60±69.06 ^a	0.814	0.439
繁殖枝数量 Number of propagating branches	1057.00±122.73 ^a	916.60±131.91 ^a	0.779	0.458
刺苞数量 Number of bracts	8305.20±1147.50 ^a	2903.20±575.20 ^b	4.209	0.003
总根长 Total root length	17 513.54±1 411.63 ^a	10 432.48±1692.86 ^b	3.213	0.012

2.2 降雨量变化与遮光对生物量的影响

2.2.1 降雨量变化对少花蒺藜草生物量的影响 由表 3 可知,不同降雨量对少花蒺藜草的生物量有不同程度影响,与 CK 相比,增雨导致叶生物量增加了 49.13% ($P<0.05$),与减雨相比,增雨导致叶生物量增加了 66.35%,大小顺序为:增雨>CK>减雨,但 CK 和减雨间差异不显著。增雨导致少花蒺藜草的总生物量、茎生物量、穗生物量有不同程度的增

加,而减雨增加了少花蒺藜草的根生物量和刺苞生物量,但均未达到显著水平。

2.2.2 遮光对少花蒺藜草生物量的影响 由表 4 可知,遮光显著降低少花蒺藜草的总生物量和各器官生物量($P<0.05$),与 CK 处理相比,少花蒺藜草的总生物量、根生物量、茎生物量、叶生物量、刺苞生物量和穗生物量分别减少的 66.92%,69.41%,68.85%,60.28%,75.2% 和 54.84%。

表 3 不同降雨量对少花蒺藜草生物量的影响

Table 3 Effects of different rainfall on the biomass of *Cenchrus spinifex*

处理 Treatment	对照 CK	增雨 Increase rainfall	减雨 Reduce rainfall
总生物量 Total biomass/g	831.25±165.98 ^a	1036.82±69.71 ^a	780.32±107.01 ^a
根生物量 Root biomass/g	84.26±15.45 ^a	70.78±7.71 ^a	96.85±14.44 ^a
茎生物量 Stem biomass/g	331.79±85.48 ^a	391.56±35.08 ^a	247.02±36.78 ^a
叶生物量 Leaf biomass/g	252.90±45.97 ^b	377.16±26.91 ^a	226.73±36.88 ^b
刺苞生物量 Spiny bract biomass/g	137.07±31.03 ^a	164.01±23.39 ^a	184.44±37.71 ^a
穗生物量 Spike biomass/g	25.22±4.19 ^a	33.32±9.33 ^a	25.28±7.54 ^a

表 4 遮光对少花蒺藜草生物量的影响

Table 4 Effects of shading on biomass of *Cenchrus spinifex*

处理 Treatment	对照 CK	遮光 Shading	<i>t</i>	<i>P</i>
总生物量 Total biomass/g	831.25±165.98 ^a	274.97±50.66 ^b	3.206	0.026
根生物量 Root biomass/g	84.26±15.45 ^a	25.78±5.08 ^b	3.595	0.016
茎生物量 Stem biomass/g	331.79±85.48 ^a	103.36±21.60 ^b	2.591	0.032
叶生物量 Leaf biomass/g	252.90±45.97 ^a	100.44±20.41 ^b	3.031	0.016
刺苞生物量 Spiny bract biomass/g	137.07±31.03 ^a	33.99±6.55 ^b	3.250	0.012
穗生物量 Spike biomass/g	25.22±4.19 ^a	11.39±2.42 ^b	2.860	0.021

2.3 降雨量变化和遮光对生物量分配的影响

2.3.1 降雨量变化对少花蒺藜草生物量分配的影响 由图 3a 所示,降雨量变化对少花蒺藜草生物量分配有显著影响($P<0.05$)。CK、增雨和减雨的叶贡献率分别为 31.50%、36.47% 和 28.77%,与减雨相比,增雨显著提高少花蒺藜草叶贡献率($P<0.05$),但减雨与 CK 差异不显著。CK、增雨和减雨根贡献率分别为 10.51%、7.07% 和 13.48%,减雨显著提高少花蒺藜草根贡献率($P<0.05$),但 CK 与增雨、减雨差异不显著;CK、增雨和减雨刺苞贡献率

分别为 17.19%、15.63%、23.17%,减雨显著提高少花蒺藜草刺苞贡献率($P<0.05$),但 CK 与增雨处理间差异未达到显著水平。

由图 3b 可知,降雨量变化对少花蒺藜草营养繁殖分配有显著影响($P<0.05$)。CK、增雨和减雨少花蒺藜草营养分配分别为 79.68%、81.14% 和 73.70%,繁殖分配分别为 20.32%、18.86% 和 26.30%。减雨处理显著降低少花蒺藜草营养分配并显著提高繁殖分配,大小顺序为:减雨>CK>增雨,但增雨与 CK 营养和繁殖分配差异不显著。

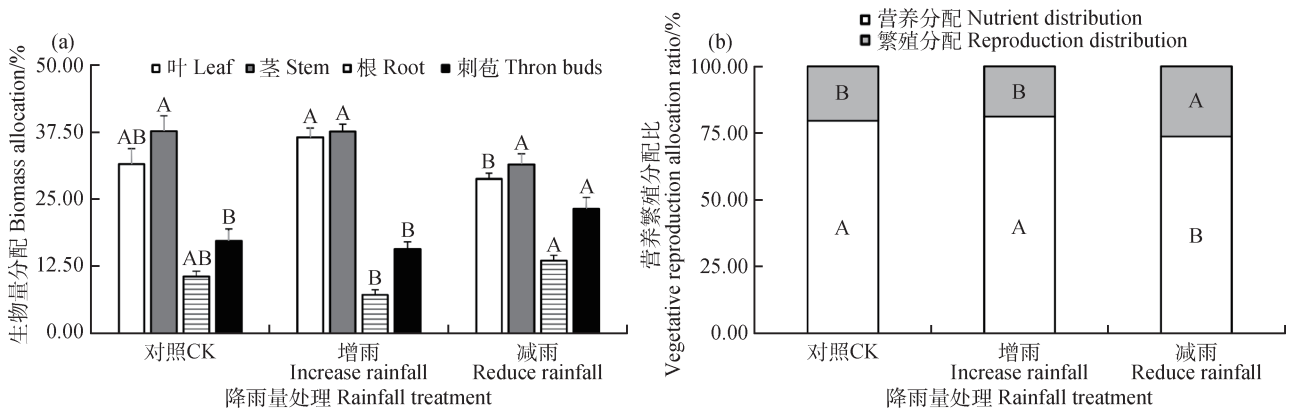


图 3 不同降雨量对少花蒺藜草生物量分配的影响

Fig. 3 Effects of different rainfall on biomass allocation of *Cenchrus spinifex*

注:图中(a)表示各器官间生物量分配、(b)表示营养繁殖分配,不同大写字母表示不同降雨量对少花蒺藜草各器官生物量贡献率以及营养繁殖分配有显著差异

Note: In the figure, (a) represents the biomass distribution among various organs, (b) represents the distribution of vegetative reproduction, and different letters indicate that there are significant differences in the contribution rate of different rainfall to the biomass of each organ and the distribution of nutrient reproduction

2.3.2 遮光对少花蒺藜草生物量分配的影响 图4a、4b分别是是遮光处理对少花蒺藜草各器官生物量分配及营养繁殖分配的影响,遮光处理改变了少花蒺藜草各器官贡献率,具体表现为:茎贡献率、根贡献率和刺苞贡献率呈现出一定程度的下降趋势,而叶贡献率则有所增加,但增

减幅度均较小;CK处理和遮光处理下少花蒺藜草营养分配分别为79.68%,83.24%;繁殖分配为20.32%,16.76%,遮光使少花蒺藜草的营养分配有所增加,繁殖分配相应减少。但少花蒺藜草生物量分配的变化在光照变化上未呈现出显著差异。

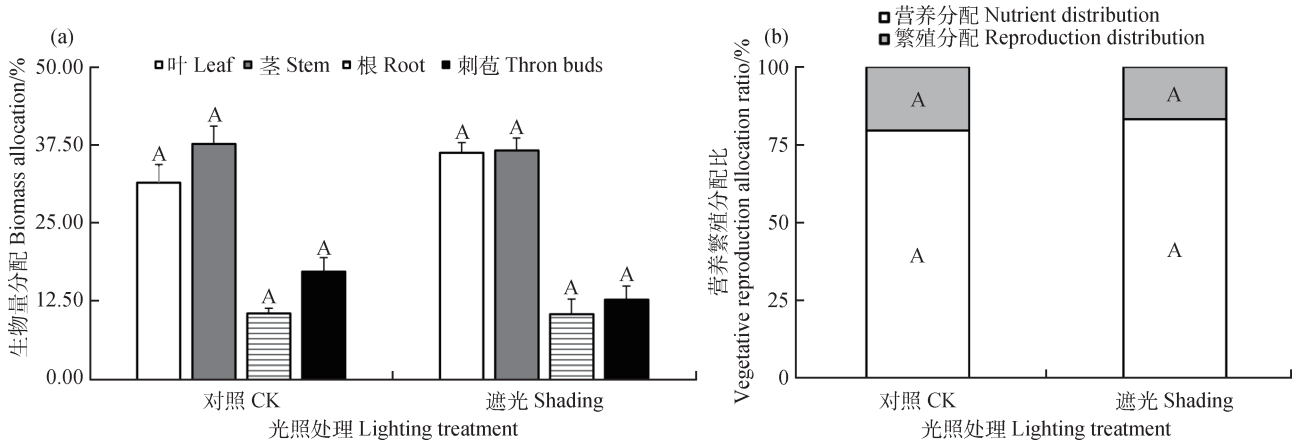


图4 遮光对少花蒺藜草生物量分配的影响

Fig. 4 Effects of shading on biomass allocation of *Cenchrus spinifex*

注:图中(a)表示各器官间生物量分配、(b)表示营养繁殖分配,不同大写字母表示遮光对少花蒺藜草各器官生物量贡献率以及营养繁殖分配有显著差异

Note: In the figure, (a) represents the biomass distribution among various organs, (b) represents the distribution of vegetative reproduction, and different letters indicate that there are significant differences in the contribution rate of Shading to the biomass of each organ and the distribution of nutrient reproduction

3 讨论

3.1 少花蒺藜草株型特征对降雨量变化和遮光的响应

入侵植物的成功入侵不仅取决于其自身生物学特性,也与植物发育过程中同环境的相互作用有关^[24-25]。而入侵地光照、温度、降雨等环境条件间的互作,是解释植物入侵与扩散的重要机制^[26-27]。水分和光照是影响植物生长发育的重要因子,也是影响外来植物入侵的重要因素。

降雨减少时,少花蒺藜草为了获得更多的光照和空气,将更多的光合产物分配到茎的生长上,使茎伸长,表现为株高增加,这也是植物在长期进化中形成的一种适应机制^[28]。且在降雨减少条件下少花蒺藜草分蘖数和总根长显著增加,这是因为少花蒺藜草对水分的适应具有很强的应激性^[29],水分匮乏时,为保证其植株的正常生长,少花蒺藜草将有限的光合产物分配到分蘖和根等有助于其扩展的生长部位^[19]。地上部分,分蘖数的增加意味着更多的地上部分生长点,从而扩大植株的覆盖面积,

帮助植株在较为干旱环境中占据空间以获得更多光能维持生长^[30];地下通过增加根长来扩大根系的分布范围,进而利用土壤中更大范围和更深层的水分,来满足自身生长发育对水分的基本需求^[31],这与沙丘上少花蒺藜草根长显著高于农田^[19],干旱与灌溉条件下的少花蒺藜草相关研究结果一致^[32]。此外,干旱对不同品种早熟禾(*Poa annua*)影响的研究^[33]也证实了这一点。降雨增加导致少花蒺藜草分枝数、繁殖枝数量和刺苞数显著升高,表现为提高繁殖投入比率的繁殖策略^[34],这可能是降雨增加,水分和矿物质资源变得相对丰富,少花蒺藜草将满足其自身生长外的资源用于增加繁殖输出,将更多的光合产物用于增加株高及分枝数量,随着分枝的生长和发育,在分枝上分化出更多的叶片,以获得更多光合面积,进而吸收和转化更多太阳能,为繁殖枝的生长提供更多能量,提高繁殖能力,从而产生更多刺苞来保证种群的繁殖成功^[35]。

弱光环境使少花蒺藜草光合速率降低,无法为植株的生长提供足够能量^[36],本研究中遮光条件下少花蒺藜草的各株型特征均小于CK,其中刺苞数量

和总根长达到显著差异水平,这可能是因为由于在模拟自然遮光条件下,光照强度较弱,光合作用受限,供光合利用的能量不足,个体生长受到抑制^[37],为适应光照不足的环境,优先将有限的光合产物分配到维持基本生命活动上,而减少对株型生长的投入^[38],导致植株的茎、叶等营养器官生长减缓,株高、分枝数、根长等株型特征都会相应减小,这与魏巍等人报道的模拟飞机草(*Chromolaena odorata*),薇甘菊(*Mikania micrantha*)两种入侵植物在季风林遮光条件下,植株的物质积累减小,植物生长受到显著抑制的结果相似。

3.2 少花蔺藜草生物量特征对降雨量变化和遮光的响应

植物对环境变化的响应不仅体现在形态特征等方面,也体现在生物量及其生物量分配对策方面。生物量及其分配作为重要的参考指标之一,已在植物对胁迫生境的响应能力研究中得到证实^[39]。在本研究中,增雨条件下少花蔺藜草总生物量,各器官生物量及其贡献率均高于减雨和CK,其中叶生物量和叶贡献率显著高于减雨和CK,这说明降雨的增加会导致少花蔺藜草把更多的物质资源分配给叶,更利于其充分利用光能,且由于水分充足时,植物将较多的资源分配至地上部分,满足其正常营养生长的需要,进而增雨和CK的营养分配显著高于减雨。而在减雨条件下,少花蔺藜草根贡献率,刺苞贡献率和繁殖分配显著高于CK和增雨,这是因为水分亏缺时,少花蔺藜草将较多的资源分配至地下部分^[32],从而有利于其从土壤中获取更多的水分及营养,保证植物体在水分较少的环境中生存^[19]。在水分胁迫环境下,植物生物量分配的权衡将从营养生长向繁殖生长转移,增加繁殖分配。这与刘金平等人基于水分胁迫下菵草的繁殖策略结果相一致。

光是生境中主要的环境因子之一,植物对光能的捕获和利用效率高是其能否适应环境并很好的生存下去的决定性因素^[7-9]。本研究中,遮光条件下少花蔺藜草总生物量及其各器官生物量均显著低于CK,这是因为在生物量积累方面,光照强度和光照时间会影响植物的光合作用。充足的光照可以为光合作用提供能量,促进植物将二氧化碳和水转化为有机物质,从而增加生物量,植物生长得更为茂盛,积累的碳水化合物更多。遮光处理使少花

蔺藜草光合作用减弱,但呼吸作用仍在持续进行,进而消耗有机物质,在光合产物供应不足的情况下,呼吸消耗使作用于生物量积累的有机物质进一步减小。但少花蔺藜草生物量分配无显著差异,这说明遮光主要影响少花蔺藜草生物量积累,这可能是因为遮光处理下的少花蔺藜草长期处于弱光环境,它们已经形成了特定的生长形态和生物量分配方式,只要光照的波动不大,就会维持原有的资源分配模式^[40],将大部分能量用于维持基本的生命活动,而不会因光照的变化就轻易改变生物量在根、茎、叶、刺苞等器官之间的分配比例^[41]。

4 结论

减雨导致少花蔺藜草株高、分蘖数、总根长和根生物量增加,光合产物更多分配至根部以扩大根系分布范围获取更多水分和营养来适应干旱环境;增雨导致少花蔺藜草将更多资源分配给叶,以获取更多光能,并提高繁殖枝数量和刺苞数以保证种群繁殖成功。遮光导致少花蔺藜草总生物量及各器官生物量均显著降低,但生物量在各器官间的分配仍保持原有的资源分配模式。

参考文献

- [1] 刘艳杰,黄伟,杨强,等. 近十年植物入侵生态学重要研究进展[J]. 生物多样性,2022,30(10):276-292
LIU Y J, HUANG W, YANG Q, et al. Research advances of plant invasion ecology over the past 10 years[J]. Biodiversity Science, 2022, 30(10): 276-292
- [2] WEIDENHAMER J D, CALLAWAY R M. Direct and indirect effects of invasive plants on soil chemistry and ecosystem function[J]. Journal of Chemical Ecology, 2010, 36(1): 59-69
- [3] CLEMPUT E V, MEERBEEK K V, HELSEN K, et al. Remotely sensed plant traits can provide insights into ecosystem impacts of plant invasions: a case study covering two functionally different invaders[J]. Biological Invasions, 2020, 22(12): 3533-3550
- [4] SEEBENS H, ESSL F, DAWSON W, et al. Global trade will accelerate plant invasions in emerging economies under climate change[J]. Global Change Biology, 2015, 21(11): 28-40
- [5] 孙忠林,淑琴,高凯,等. 少花蔺藜草入侵现状、适应机制和防控策略[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1196-1202
SUN Z L, SHU Q, GAO K, et al. Invasion status, adaptive mechanism and control strategy of field sandbur: a review[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5): 1196-1202
- [6] 董通. 新疆干旱时空演变特征及其对草地物候影响研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2022: 15-17

- DONG T. The spatiotemporal evolution of drought and its effect on grassland phenology in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022: 15-17
- [7] DURAND L Z, GOLDSTEIN G. Photosynthesis, photoinhibition, and nitrogen use efficiency in native and invasive tree ferns in Hawaii[J]. *Oecologia*, 2001, 126(3): 345-354
- [8] DUTILLEUL P, HAN L, VALLADARES F, et al. Crown traits of coniferous trees and their relation to shade tolerance can differ with leaf type: a biophysical demonstration using computed tomography scanning data[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 172
- [9] LIU S L, LUO Y, YANG R, et al. High resource-capture and use efficiency, and effective antioxidant protection contribute to the invasiveness of *Alnus formosana* plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, 96: 36-47
- [10] 孟繁滢, 金乃轩, 王自奎. 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*, 2023, 40(8): 2121-2128
- MENG F Y, JIN N X, WANG Z K. Effects of light and water on alfalfa growth and water use [J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(8): 2121-2128
- [11] 杨瑞, 黄俊华, 张玉蕾. 光照与水分对骆驼蓬形态特征和生物量的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2024(5): 77-81
- YANG R, HUANG J H, ZHANG Y L. Effects of light and water on morphological characteristics and biomass of *Peganum harmala* [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2024 (5): 77-81
- [12] 潘玉梅, 唐赛春, 韦春强, 等. 不同光照和水分条件下鬼针草属入侵种与本地种生长、光合特征及表型可塑性的比较[J]. *生物多样性*, 2017, 25(12): 1257-1266
- PAN Y M, TANG S C, WEI C Q, et al. Comparison of growth, photosynthesis and phenotypic plasticity between invasive and native *Bidens* species under different light and water conditions[J]. *Biodiversity Science*, 2017, 25(12): 1257-1266
- [13] ZHANG Z X, TIAN X, SUN L. Germination behaviour of *Cenchrus pauciflorus* seeds across a range of salinities [J]. *Weed Research*, 2017, 57(2): 91-100
- [14] VANDERZON A P M. New combinations in *Cenchrus* and *Urochloa* (Gramineae) [J]. *Blumea: Biodiversity, Evolution and Biogeography of plants*, 2019, 64(3): 214-225
- [15] 徐军, 李青丰, 王树彦, 等. 少花蒺藜草开花习性种子萌发特性研究[J]. *中国草地学报*, 2011, 33(2): 12-16
- XU J, LI Q F, WANG S Y, et al. Research on flowering behavior and seed germination of *Cenchrus pauciflorus* [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, 33(2): 12-16
- [16] 周全来, 王正文, 齐凤林, 等. 少花蒺藜草生物生态学特征与综合防除策略[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2593-2600
- ZHOU Q L, WANG Z W, QI F L, et al. Biological and ecological characteristics of *Cenchrus pauciflorus* and the integrated control strategies[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(8): 2593-2600
- [17] 张福胜, 姚影. 通辽地区外来入侵植物少花蒺藜草发生情况与防治措施[J]. *北方农业学报*, 2018, 46(5): 98-101
- ZHANG F S, YAO Y. Occurrence and control measures of alien invasive species *Cenchrus pauciflorus* Benth in Tongliao[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2018, 46(5): 98-101
- [18] 田迅, 张志新, 陈艳东. 科尔沁沙地不同地区少花蒺藜草种子库与种子活力结构特征[J]. *中国草地学报*, 2015, 37(6): 85-90
- TIAN X, ZHANG Z X, CHEN Y D. Seed bank and seed structure characteristics of seed vigor of *Cenchrus pauciflorus* in Korqin Sandy Land[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(6): 85-90
- [19] 淑琴, 孙忠林, 马崇勇, 等. 科尔沁沙地4种生境少花蒺藜草表型特征和生物量分配[J]. *草业科学*, 2023, 40(2): 329-337
- SHU Q, SUN Z L, MA C Y, et al. Phenotypic characteristics and biomass allocation of *Cenchrus pauciflorus* in four different habitats in Horqin Sandy Land [J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(2): 329-337
- [20] 杜广明, 曹凤芹, 刘文斌, 等. 辽宁省草场的少花蒺藜草及其危害[J]. *中国草地*, 1995, (3): 71-73
- DU G M, CAO F Q, LIU W B, et al. The distribution and harmfulness of *Cenchrus Pauciflorus* in Liaoning Province [J]. *Grassland of China*, 1995, (3): 71-73
- [21] 李盼畔, 何旭诺, 左然玲, 等. 4种蒺藜草属杂草在中国的潜在适生性预测[J]. *杂草学报*, 2022, 40(2): 15-23
- LI P P, HE X N, ZUO R L, et al. Prediction of potential habitability of four *Cenchrus* weeds in China [J]. *Journal of Weed Science*, 2022, 40(2): 15-23
- [22] BOSSHOF O, AUGÉ H, LAFUMA L, et al. Phenotypic and genetic differentiation between native and introduced plant populations[J]. *Oecologia*, 2005, 144(1): 1-11
- [23] 张琦, 田迅, 马文静, 等. 入侵植物长刺蒺藜草对不同程度干旱胁迫的适应对策[J]. *植物检疫*, 2023, 37(1): 27-32
- ZHANG Q, TIAN X, MA W J, et al. Adaptive countermeasures of invasive plant *Cenchrus longispinus* to different degrees of drought stress[J]. *Plant Quarantine*, 2023, 37(1): 27-32
- [24] 张雪. 多种环境因素介导下养分波动对外来植物入侵的影响机制[D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2024: 22-24
- ZHANG X. Multiple environmental factors mediate the impact mechanism of nutrient fluctuations on alien plant invasion[D]. Changchun: Institute of Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2024: 22-24
- [25] 王姝, 周道玮. 植物表型可塑性研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8161-8169
- WANG S, ZHOU D W. Research on phenotypic plasticity in plants: an overview of history, current status, and development trends[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8161-8169
- [26] ENDERS M, HAVEMANN F, RULAND F, et al. A conceptual map of invasion biology: Integrating hypotheses into a consensus network[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2020, 29(6): 978-991
- [27] RICHARDS C L, BOSSHOF O, MUTH N Z, et al. Jack of all trades, master of some? On the role of phenotypic plasticity

- in plant invasions[J]. *Ecology Letters*, 2006, 9(8): 981-993
- [28] 陈佳宁, 冯海旭, 苏慧, 等. 入侵植物少花蒺藜草对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. *草原与草坪*, 2023, 43(3): 77-85
- CHEN J N, FENG H X, SU H, et al. Physiological response and drought resistance evaluation of invasive plants *Cenchrus pauciflorus* to drought[J]. *Grassland and Turf*, 2023, 43(3): 77-85
- [29] 陈佳宁, 王舒琦, 罗亚勇, 等. 养分及水分对少花蒺藜草光合特性及抗氧化酶活性的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(10): 3091-3102
- CHEN J N, WANG S Q, LUO Y Y, et al. Effects of nutrients and water on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of *Cenchrus pauciflorus* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(10): 3091-3102
- [30] 拉本, 胡娟, 张旭萍. 干旱胁迫对植物生理的影响以及分子机制的响应研究进展[J]. *青海草业*, 2022, 31(4): 31-35
- LA B, HU J, ZHANG X P. Research progress on the effect of drought on plant physiology and the response of molecular mechanism[J]. *Qinghai Prataculture*, 2022, 31(4): 31-35
- [31] 王满莲, 冯玉龙. 紫茎泽兰和飞机草的形态、生物量分配和光合特性对氮营养的响应[J]. *植物生态学报*, 2005, (5): 697-705
- WANG M L, FENG Y L. Effects of soil nitrogen levels on morphology, biomass allocation and photosynthesis in *Ageratina Adenophora* and *Chromolaena Odorata* [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, (5): 697-705
- [32] 张志新, 章恺, 田迅. 干旱与灌溉生境下少花蒺藜草生物构件的特征[J]. *草业科学*, 2012, 29(12): 1899-1902
- ZHANG Z X, ZHANG K, TIAN X. Characteristics of biological components of *Cenchrus pauciflorus* under wet and dry habitats[J]. *Pratacultural science*, 2012, 29(12): 1899-1902
- [33] 金不换, 陈雅君, 吴艳华, 等. 早熟禾不同品种根系分布及生物量分配对于旱胁迫的响应[J]. *草地学报*, 2009, 17(6): 813-816
- JIN B H, CHEN Y J, WU Y H, et al. Response of root distribution and biomass allocation of different *Poa* L. varieties to drought stress[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(6): 813-816
- [34] 张志新, 田迅. 干旱和灌溉条件下少花蒺藜草分株生物量分配特征[J]. *草业科学*, 2011, 28(2): 185-188
- ZHANG Z X, TIAN X. Characteristics of biomass allocation of *Cenchrus pauciflorus* under arid and irrigated habitats [J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(2): 185-188
- [35] 李海韵, 田迅, 吕广超, 等. 不同养分水平对入侵植物少花蒺藜草表型特征及生物量分配的影响[J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20240626.1124.007.html>, 2024-06-26/2025-06-17
- LI H Y, TIAN X, LU G C, et al. Effects of different nutrient levels on phenotypic characteristics and biomass allocation of invasive plant *Cenchrus pauciflorus* [J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20240626.1124.007.html>, 2024-06-26/2025-06-17
- [36] 霍艳利, 曲婷, 高凯, 等. 不同类型的少花蒺藜草种子萌发对水分和光照的响应[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(4): 51-56, 63
- HUO Y L, QU T, GAO K, et al. Response of seed germination of different types of *Cenchrus incertus* to water and light [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(4): 51-56, 63
- [37] 许凯扬, 叶万辉, 李国民, 等. 入侵种喜旱莲子草对光照强度的表型可塑性反应[J]. *武汉植物学研究*, 2005(6): 560-563
- XU K Y, YE W H, LI G M, et al. Phenotypic plasticity in response to light intensity in the invasive species *Alternanthera philoxeroides* [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2005 (6): 560-563
- [38] 徐燕云, 吴晓梅, 麻汉林, 等. 加拿大一枝黄花幼苗生长对土壤水分、光强的响应[J]. *浙江林业科技*, 2011, 31(2): 13-18
- XU Y Y, WU X M, MA H L, et al. Response of seedlings growth of *Solidago canadensis* to water and light intensity [J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2011, 31 (2): 13-18
- [39] 樊星, 蔡检, 刘金平, 等. 局部遮光对鹅绒委陵菜基株形态塑性及生物量配置的影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(3): 172-180
- FAN X, CAI J, LIU J P, et al. Effect of partial shading on the morphological plasticity and biomass allocation of *Potentilla anserina* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(3): 172-180
- [40] 袁淑娜, 潘剑, 黄坚雄, 等. 遮光对五指毛桃植株生物量分配及营养成分组成特征的影响[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(8): 1641-1650
- YUAN S N, PAN J, HUANG J X, et al. Response analysis of plant nutrient composition characteristics of *Ficus hirta* Vahl under different light intensity [J]. *Chinese Journal of Tropical Crop*, 2024, 45(8): 1641-1650
- [41] ZHANG H, ZHAO Y, ZHU J K. Thriving under stress: how plants balance growth and the stress response[J]. *Developmental Cell*, 2020, 55(5): 529-543

(责任编辑 付 宸)