



喜旱莲子草在遮光环境下的生理生态参数响应模式和遮光防治阈值

黄旬 王玲 FAISAL Hayat 郭佳琦 黄佳乐 陈俊辰 李兆华

Response patterns of physiological and ecological parameters of *Alternanthera philoxeroides* to shading rate and its shading control threshold

HUANG Xun, WANG Ling, FAISAL Hayat, GUO Jiaqi, HUANG Jiale, CHEN Junchen, LI Zhaohua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0753>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同光环境下金边百里香的形态和生理可塑性

Morphological and physiological plasticity of *Thymus mongolicus* under different light conditions

草业科学. 2017, 11(10): 2130 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0189>

增温对喜旱莲子草入侵和竞争力的影响

Warming affects the invasion ability and competitiveness of the invasive plant *Alternanthera philoxeroides*

草业科学. 2020, 37(6): 1047 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0619>

遮阴对千根草构件性状、克隆生长及繁殖策略的影响

Effects of shading on phenotypic plasticity, clonal characteristics, and reproduction index of *Euphorbia thymifolia*

草业科学. 2021, 38(5): 918 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0518>

羊草根茎克隆形态可塑性研究进展

Advances in studies on morphological plasticity of *Leymus chinensis* rhizome

草业科学. 2019, 36(3): 821 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0378>

遮阴对两个绿豆品种光合作用和生长发育的影响

Effect of shading on photosynthesis and growth in two *Phaseolus aureus* varieties

草业科学. 2017, 11(6): 1247 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0416>

白颖苔草对不同浓度NaCl胁迫的响应及其耐盐阈值

Response of *Carex rigescens* to different NaCl concentrations and its salinity threshold calculation

草业科学. 2017, 11(3): 479 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0359>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0753

黄旬, 王玲, FAISAL Hayat, 郭佳琦, 黄佳乐, 陈俊辰, 李兆华. 喜旱莲子草在遮光环境下的生理生态参数响应模式和遮光防治阈值. 草业科学, 2022, 39(9): 1842-1848.

HUANG X, WANG L, FAISAL H, GUO J Q, HUANG J L, CHEN J C, LI Z H. Response patterns of physiological and ecological parameters of *Alternanthera philoxeroides* to shading rate and its shading control threshold. Pratacultural Science, 2022, 39(9): 1842-1848.

喜旱莲子草在遮光环境下的生理生态参数 响应模式和遮光防治阈值

黄旬¹, 王玲¹, FAISAL Hayat³, 郭佳琦¹, 黄佳乐¹, 陈俊辰¹, 李兆华^{1,2}

(1. 湖北大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430062; 2. 区域开发与环境影响湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430062;
3. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

摘要: 外来入侵植物喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 是在我国 40° N 以南省份大规模扩散的一种恶性杂草。光照是调节植物生长发育的重要环境因子, 选取 5 种遮光网 (平均遮光率分别为 51.0%、64.3%、69.7%、81.8% 和 88.3%) 对喜旱莲子草进行遮光处理, 通过研究喜旱莲子草的生理生态参数在不同遮光率下的响应模式, 探索该入侵物种的遮光防控阈值。结果表明: 1) 喜旱莲子草地上和地下生物量均随遮光率增加呈线性下降模式, 且以地下生物量的下降更为明显。2) 喜旱莲子草的形态参数 (分枝数、长分枝占比、叶片数、叶片厚度和叶面积) 对遮光具有极高的表型可塑性 (均值为 0.66), 且表型可塑性指数越高, 遮光对该参数的降低效果越大。3) 当遮光率在 61.9%~66.7% 后, 可将喜旱莲子草的地下生物量和分枝数降低一半以上, 随遮光率进一步升高, 对叶面积增大和相对叶绿素含量升高的促进作用也会受到抑制, 进而影响植株的光合作用。这些喜旱莲子草生长、形态性状和叶绿素含量参数的变化表明, 遮光率在 61.9%~66.7% 可有效降低其繁殖扩散能力。因此, 在入侵植物防治中, 可以参考此遮光率作为喜旱莲子草的遮光防治阈值。

关键词: 入侵植物; 恶性杂草; 防治; 遮光率; 形态参数; 可塑性指数; 遮光阈值

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)09-1842-07

Response patterns of physiological and ecological parameters of *Alternanthera philoxeroides* to shading rate and its shading control threshold

HUANG Xun¹, WANG Ling¹, FAISAL Hayat³, GUO Jiaqi¹, HUANG Jiale¹, CHEN Junchen¹, LI Zhaohua^{1,2}

(1. Faculty of Resources and Environmental Science, Hubei University, Wuhan 430062, Hubei, China;

2. Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response of Hubei Province, Wuhan 430062, Hubei, China;

3. Chongqing institute of green and intelligent technology, CAS, Chongqing 400714, China)

Abstract: *Alternanthera philoxeroides* is an invasive plant widely distributed in the provinces south of 40° N in China. It has become a malignant weed that seriously threatens the biodiversity and ecosystem stability in China. Light intensity is an important environmental factor that regulates plant growth and development. It is important to investigate the specific response patterns of physiological and ecological parameters of *A. philoxeroides* to different light stress to explore its shading control threshold. In this experiment, we selected 5 types of shading nets (average shading rates 51.0%, 64.3%, 69.7%, 81.8%, and 88.3%) for the shading treatment of *A. philoxeroides*. The results were as follows: 1) The aboveground and underground

收稿日期: 2021-12-15 接受日期: 2022-04-01

基金项目: 农业农村部项目“2020 年度湖北省重大危害外来入侵物种调查监测与综合防控”(13200290)

第一作者: 黄旬 (1989-), 女, 湖北天门人, 在读硕士生, 研究方向为入侵生态学。E-mail: 1403074046@qq.com

通信作者: 李兆华 (1964-), 湖北天门人, 教授, 博士, 研究方向为恢复生态学。E-mail: zli@hubeu.edu.cn

biomass of *A. philoxeroides* decreased linearly with the increase in the shading rate. 2) Morphological parameters (branch number, proportion of long branches, number of leaves, leaf thickness, and leaf area) had high phenotypic plasticity on shading (mean value 0.66), and a higher phenotypic plasticity index had a higher reduction effect of shading on these parameters. 3) When the shading rate reached 61.9% to 66.7%, the underground biomass and branch number of the plant was reduced by more than half, and the promotion effect of shading on the increase in leaf area and SPAD value was inhibited, thus affecting the photosynthesis of the plant. The changes in growth, morphological, and chlorophyll content parameters of *A. philoxeroides* showed that the shading rate of 61.9% to 66.7% effectively reduced its propagation diffusion ability. Therefore, this shading rate can be used as the shading threshold for the control of *A. philoxeroides*.

Keywords: invasive plants; malignant weeds; prevention and control; shading rate; morphological parameters; plasticity index; shading threshold

Corresponding author: LI Zhaohua E-mail: zli@hubu.edu.cn

喜旱莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 是一种水陆双生的外来入侵恶性杂草, 在我国适生面积占国土面积的 22.2%^[1]。强大的克隆繁殖能力, 使其相比本地物种拥有更高的资源利用率和生长速率, 只需少量的陆生型喜旱莲子草片段, 经过一个生长季就能长成 1~3 m 宽的植株斑块^[2]; 水生型喜旱莲子草越冬后, 70% 以上的茎都可在一周内萌芽, 从 3 月到 8 月中旬可生长 5.08 m, 形成的漂浮垫层可从海岸线蔓延 4.6 m^[3]。喜旱莲子草不仅对我国生物多样性和生态系统造成了极大的威胁, 还会造成农作物大量减产^[4-6]。Mehmood 等^[7] 经过两年的田间试验发现喜旱莲子草不仅造成水稻 (*Oryza sativa*) 产量和直链淀粉的损失, 还会影响稻米蛋白质含量。

光照是影响植物生长发育的重要环境因子之一。自然界中的光环境会随着时间和空间发生变化, 导致植物接收到的光照强度、光照时间和光谱成分等发生改变, 从而影响植物的生长。对于遮光产生的光照强度变化, 植物可以通过表型可塑性改变生物量分配和形态来适应, 以维持正常的生长状态^[8]。表型可塑性也被认为是外来植物成功入侵的重要机制之一, 具有确定的遗传基础^[9]。

关于不同光照强度下喜旱莲子草的表型可塑性研究也有一些报道。陈中义等^[10] 发现在不同的光照强度下喜旱莲子草通过表型可塑性维持了相对稳定的空间生长格局, 是其成功入侵的一个重要机制。许建平^[11] 发现光照影响喜旱莲子草主茎和叶片的表型可塑性, 使植株在不同光环境下通过生长权衡来占据有利生境。班芷桦和王琼^[12] 在林下和林缘生境中观察到喜旱莲子草的优势种地位会

逐渐被其他草本植物取代, 并采用盆栽试验证明了接骨草 (*Sambucus chinensis*) 可以作为中度遮阴的陆生生境下喜旱莲子草生物替代的控制材料。这表明: 1) 不同遮光率可能会影响喜旱莲子草的生长、形态; 2) 低光照可能会抑制喜旱莲子草的生长和表型可塑性带来的抗逆作用, 即存在遮光防控阈值。但喜旱莲子草对不同遮光率的生理生态参数响应模式尚不明确, 因此, 本研究以陆生型喜旱莲子草为研究对象, 通过设置不同的遮光梯度, 重点监测不同遮光率下喜旱莲子草生理生态参数的响应模式, 为探索该入侵物种的遮光防治阈值提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验在湖北省武汉市湖北大学资源环境学院的试验园 (30°34'27" N, 114°19'45" E) 中进行。

取中国农业科学院油料研究所试验田的土壤, 自然风干 (土壤含水量为 1.48%, 有机质含量为 1.41%), 过 0.15 mm 筛后, 与沙子 1:1 混合后作为培养基质。

喜旱莲子草是一种多年生宿根草本, 幼嫩时整株全绿, 成熟后茎部呈红褐色, 其茎上有茎节, 茎节处萌发嫩芽或分枝, 叶片于茎节处对生, 靠近地面的茎节上生根。全光照时匍匐生长在池塘、沟渠、河流、水田、旱田、草坪、果园等环境中, 遮阴明显的地方更倾向于直立生长^[13-15]。2020 年 10 月 16 日在武汉市外沙湖界标 (30°34'31" N, 114°19'46" E) 周围采集生长状况良好、长势一致的陆生型喜旱莲子草。剪取含 5 个茎节、长 25~28 cm、健康、生长一致且带完整顶梢的主茎。选取的主茎最下部茎节

均生有细小不定根。

购买市售的 9 种具有不同孔隙密度的遮光网, 2020 年 9 月 29 日至 10 月 9 日, 每天 09:00、12:00 和 15:00 在试验地点用手持照度计 (TA 8123) 测量全光照和 9 种遮光网遮光后的光照强度, 并计算遮光率。从中挑选出 5 种遮光率有明显差异的遮光网, 设置遮光率为不遮光 (CK)、51.0% ± 2.9% (L1)、64.3% ± 2.4% (L2)、69.7% ± 2.6% (L3)、81.8% ± 2.5% (L4) 和 88.3% ± 1.4% (L5) 的 6 组遮光环境。

1.2 试验方法

2020 年 10 月 16 日将喜旱莲子草垂直插扦入花盆中, 插扦深度 5~8 cm, 每盆 2 株, 共 25 盆, 用遮光率为 L1 的遮光网覆盖后进行预培养, 及时替换长势较差的植株。

2020 年 11 月 11 日, 待植株生长稳定后, 挑选长势较均一的 18 盆植株进行遮光处理。用选定的 5 种遮光网制作遮光棚, 每棚下放 3 盆, 另有不遮光的 3 盆作对照组 (CK)。

试验期间, 环境温度控制在 (28 ± 2) °C, 相对湿度 > 65%。每 3 d 浇一次水, 并用绿陇三合一土壤检测仪测定土壤湿度, 将湿度值控制在 6~8。每周根据茎叶生长状况调整植株摆放位置, 保证每盆植株都能完整遮光。

2021 年 1 月 13 日收获, 记录喜旱莲子草的分枝数、> 10 cm 的长分枝数、叶片数。选取顶端向下第 3 节的叶片测量叶面积、叶厚、相对叶绿素含量。用 ImageJ 测定叶面积, 用 CD-S15c 数显卡尺测量叶

片最宽处横断面厚度, 用 CCM-200 plus 叶绿素仪测定相对叶绿素含量。将洗净后的根、茎、叶分开, 放入 80 °C 烘箱中烘干 72 h 后, 分别测定根生物量、茎生物量和叶生物量。地上生物量 = 茎生物量 + 叶生物量, 根冠比 = 地下生物量/地上生物量。各参数可塑性指数的计算采用 Valladares 等^[16]的方法, 即各参数的最大值减去其最小值之差与其最大值之比。

1.3 数据处理

所有试验数据均用 Excel 2016 软件计算平均值和标准误。使用 SPSS 26.0 软件对数据进行单因素方差分析及差异显著性检验, 用 Excel 2016 对生物量和分枝数数据进行线性拟合。用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同遮光率处理下植株生物量

遮光对喜旱莲子草的地上生物量、地下生物量、根冠比有极显著影响 ($P < 0.01$) (表 1)。为探究不同遮光率对喜旱莲子草生物量影响的程度, 对不同遮光率与其地上、地下生物量、根冠比进行了回归分析。遮光率对喜旱莲子草的地上、地下生物量均呈线性影响 ($R^2 > 0.95$), 随遮光率的增加生物量逐渐下降。相关关系公式分别为 $y = -0.8294x + 1.1705$ 和 $y = -1.0559x + 1.1150$, 相关系数分别为 0.8294 和 1.0559。喜旱莲子草的根冠比也随遮光率增加呈反对数式下降模式 ($R^2 > 0.98$), 其相关关系公式为 $y = -1.1252x^2 + 0.325x + 0.9454$ 。

表 1 不同遮光率处理下喜旱莲子草的生物量变化
Table 1 Effects of different shading rates on the biomass of *A. philoxeroides*

遮光梯度 Shading intensity	单株地上生物量 Aboveground biomass per plant/g	单株地下生物量 Underground biomass per plant/g	单株根冠比 Root shoot ratio per plant
CK	1.136 4 ± 0.168 4A	1.076 8 ± 0.166 2A	0.947 1 ± 0.018 6A
L1	0.781 9 ± 0.090 7B	0.629 8 ± 0.105 9B	0.801 5 ± 0.065 7B
L2	0.726 7 ± 0.073 1B	0.520 8 ± 0.075 1B	0.713 6 ± 0.033 8C
L3	0.568 4 ± 0.075 2C	0.347 9 ± 0.058 8C	0.609 4 ± 0.025 1D
L4	0.493 3 ± 0.116 3CD	0.235 4 ± 0.043 8CD	0.483 6 ± 0.033 6E
L5	0.370 3 ± 0.059 7D	0.128 3 ± 0.051 2D	0.335 4 ± 0.081 9F

CK、L1、L2、L3、L4、L5 分别表示不遮光和 51.0%、64.3%、69.7%、81.8% 和 88.3% 遮光率; 同列不同大写字母表示各处理间差异极显著 ($P < 0.01$); 下同。

CK, L1, L2, L3, L4, and L5 indicate not shading and shading rate of 51.0%, 64.3%, 69.7%, 81.8%, and 88.3% respectively. Different capital letters within the same column indicate highly significant differences among different treatments at the 0.01 level; this is applicable for the following figures.

2.2 不同遮光率处理下植株形态

喜旱莲子草的各形态参数对遮光的平均可塑性指数达到 0.66, 且分枝数、长枝占比、叶片数的可塑性指数皆在 0.80 左右(表 2)。遮光对喜旱莲子草的分枝在数量和长短枝分配上的影响极显著 ($P < 0.01$) (图 1)。随着遮光程度的增加, 喜旱莲子草的单株分枝数呈线性下降模式 ($y = -20.114x + 24.103$) ($R^2 = 0.9445$)。而单株长枝占比则与之相反, 呈持

表 2 喜旱莲子草形态参数对遮光的可塑性指数
Table 2 Effects of plasticity index of morphological parameters on the shading of *A. philoxeroides*

形态参数 Morphological parameters	可塑性指数 Plasticity index
分枝数 Shoot number	0.79
长枝占比 Long branch ratio	0.81
叶片数 Leaf number	0.76
叶片厚度 Leaf thickness	0.46
叶面积 Leaf area	0.48
平均 Average	0.66

续上升趋势。经统计, 当遮光率达到 L2 时, 其平均分枝数下降了 56.84%, 而平均长枝占比则增加了 100%。

叶片作为喜旱莲子草的临时储能器官, 其数量、面积、厚度受遮光率的影响极显著 ($P < 0.01$)。喜旱莲子草叶片的数量和厚度均随着遮光率的增加而下降, 且叶片厚度在 L2 和 L5 处出现了明显的下降(图 1)。而喜旱莲子草叶面积则随遮光程度的增加呈先增后降的趋势, 在 L2 处达到最大值。

2.3 不同遮光率处理下植株相对叶绿素含量

遮光对喜旱莲子草的相对叶绿素含量 (relative chlorophyll content, SPAD) 影响极显著 ($P < 0.01$)。喜旱莲子草的 SPAD 随遮光率增加呈先升后降的趋势(图 2)。在 L2 处达到最高值, 为 CK 的 1.64 倍; 之后再快速降低, L5 处, 平均 SPAD 已低于不遮光状态, 只有 CK 的 84.42%。以上喜旱莲子草的 SPAD 变化表明, 一定程度的遮光促进了叶片中叶绿素的合成, 而当遮光率达到 L2 以后, 这种促进作用则会随着遮光率的进一步增加而减弱, 直至完全消失,

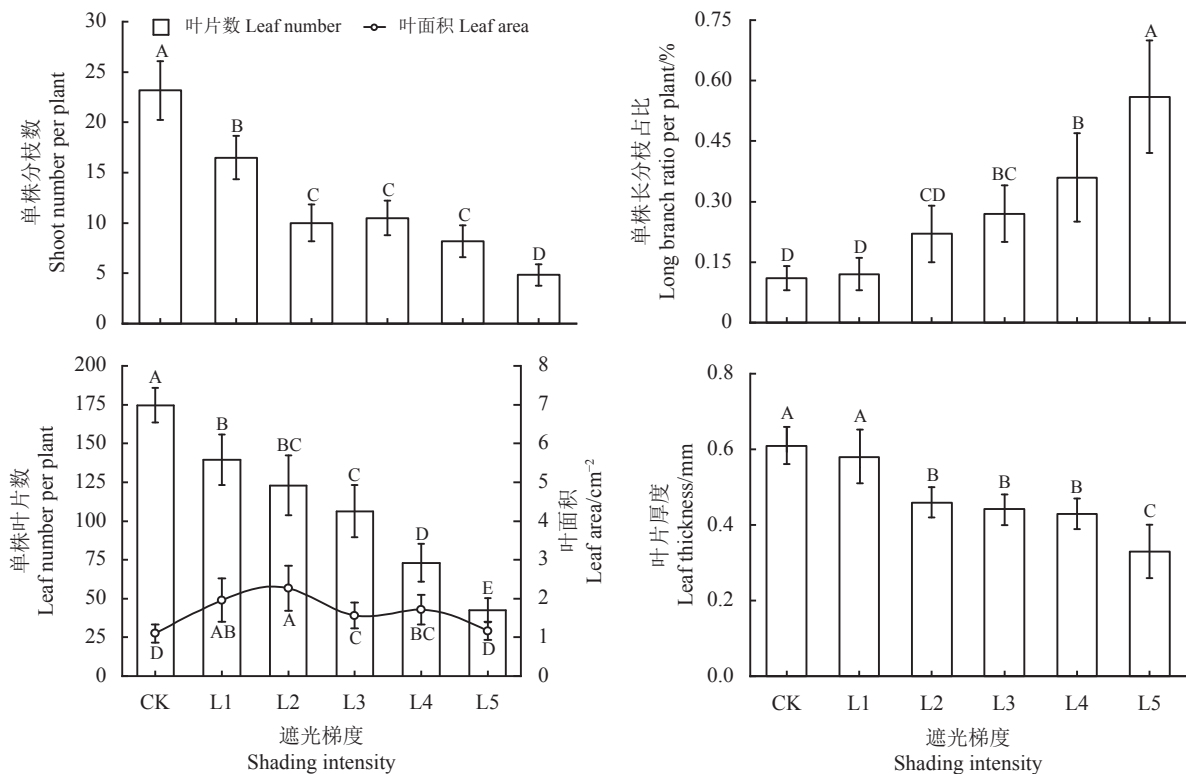


图 1 不同遮光率对喜旱莲子草形态的影响

Figure 1 Effects of different shading rates on the shape of *A. philoxeroides*

不同大写字母表示各处理间差异极显著 ($P < 0.01$); 图 2 同。

Different capital letters indicate highly significant differences among different treatments at the 0.01 level; this is applicable for the following Figure 2.

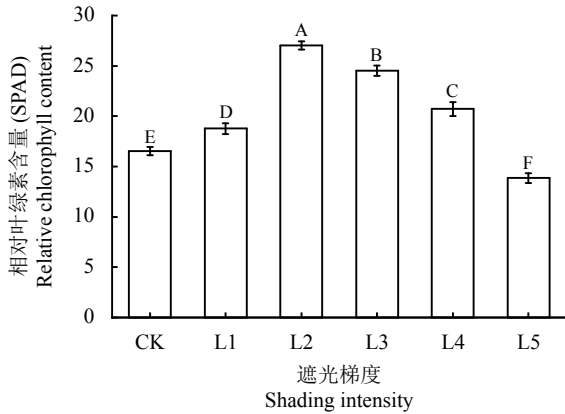


图2 不同遮光率对喜旱莲子草相对叶绿素含量的影响
Figure 2 Effects of different shading rates on the relative chlorophyll content of *A. philoxeroides*

不同大写字母表示各处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。

Different capital letters indicate highly significant differences among different treatments at the 0.01 level.

进而抑制叶绿素的合成。

3 讨论

喜旱莲子草专化的劳动分工能力,表现为地下部分专化吸收地下资源,与其他植物争夺水分、营养和地面生态位;而地上部分则专化地上扩繁,占据空间生态位和抢夺光资源,再通过克隆整合进行物质传输与共享,生境中养分越高这种分工能力就越强^[17-18]。当喜旱莲子草遭遇遮阴逆境时,会导致地上部分通过光合作用获取的能量减少,致使其地上部分的生物量下降。植株的地下部分会通过克隆整合对地上部分进行资源支持来缓解逆境压力,进而使地下生物量也随着遮光率的增加呈下降趋势^[19]。从喜旱莲子草的生物量变化规律可以看出,植株的生物量随遮光率增加而持续降低,且地下生物量的降低幅度更大。当遮光率达到 L2 (61.9%~66.7%) 时,就可将地下生物量降低一半以上。而喜旱莲子草的地下根茎才是主要决定其繁殖分配和地上部分生长的部位^[20]。这对拥有发达的地下根茎和更强的昆虫采食防御能力的陆生型喜旱莲子草的防治具有重要意义^[21]。

在本研究中,喜旱莲子草的形态对遮光率变化表现出了极高的表型可塑性。结合分枝数、长枝占比和叶片数等指标的单株变化量来看,发现表型可塑性指数越高,遮光对该形态指标的降低效果越明显。这说明喜旱莲子草可能主要通过形态可塑性来

适应不同的光环境。

强大的分枝发生能力是其能发展成为优势种群的重要原因之一^[11]。本研究中,随遮光率不断增加,喜旱莲子草的分枝发生能力持续降低,转而将茎生物量更多地投入到分枝的伸长上,以逃离遮光环境,大幅度降低了喜旱莲子草的生存和繁衍能力。同时,遮光会使喜旱莲子草通过降低叶片数量和叶片厚度来减少在叶部的资源分配,使得叶部作为临时存储器官延缓干扰对幼嫩分株片段影响的能力减弱^[22]。一定程度的遮光还会促使喜旱莲子草通过表型可塑性来增大叶面积,以最大化的获取光资源,但当遮光率增加到 L2 (61.9%~66.7%) 后,随遮光率增加这种促进作用会被抑制。

叶绿素的生物合成量对光合作用至关重要,在实际检测中可以用 SPAD 指标基本反映出其含量水平^[23-25]。光照是影响叶绿素合成、分解过程动态平衡的主要外部因素。形成叶绿素所需要的光照强度较低,而在强光下形成的单线态氧会损伤叶绿体,造成光损伤使叶绿素含量降低,因此,在本研究中出现遮光后叶绿素含量升高的现象。与石栎 (*Lithocarpus fohaiensis*) 幼苗、海芋 (*Alocasia macrorrhiza*) 等随光照强度减弱叶绿素含量增加的结果是一致的^[26-27]。当遮光率高于 L2 (61.9%~66.7%) 后 SPAD 值开始下降,主要是因为弱光环境下,植物体内与叶绿素合成有关的基因表达减弱,而与其分解有关的基因表达则会增加^[28-29],进而导致叶绿素合成受阻,影响其光合作用。因此,只有当遮光率高于 L2 (61.9%~66.7%) 后,才能有效降低喜旱莲子草的光合作用能力。

4 结论

本研究表明,遮光率增加显著降低了喜旱莲子草的生物量,改变了其生长资源的分配模式,使其将更多的资源用于向外扩张以逃离遮光环境,从而降低了其生存繁殖能力。喜旱莲子草强大的表型可塑性虽能缓解遮光逆境带来的不利影响,但当遮光率在 61.9%~66.7%,这种由表型可塑性带来的抗逆作用会被抑制。因此,可在实际工作中将 61.9%~66.7% 作为喜旱莲子草的遮光防治阈值,来减缓其定殖扩张速度,让本地耐阴物种有更多的生长机会并发展成为优势物种,从而进一步抑制喜旱莲子草的生长。

参考文献 References:

- [1] YAN H, FENG L, ZHAO Y, FENG L, ZHU C. Prediction of the spatial distribution of *Alternanthera philoxeroides* in China based on ArcGIS and MaxEnt. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 21: e00856.
- [2] SAINTY G, MCCORKELLE G, JULIEN M. Control and spread of alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb., in Australia: Lesson for other regions. *Wetlands Ecology and Management*, 1998, 5: 195-201.
- [3] LIU C H, YU D. The bud and root sprouting capacity of *Alternanthera philoxeroides* after over-wintering on sediments of a drained canal. *Hydrobiologia*, 2009, 623(1): 251-256.
- [4] 马瑞燕, 王韧. 喜旱莲子草在中国的入侵机理及其生物防治. *应用与环境生物学报*, 2005, 11(2): 246-250.
MA R Y, WANG R. Invasion mechanism and biological control of alligatorweed *Alternanthera philoxeroides* (amaranthaceae), in China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2005, 11(2): 246-250.
- [5] 谢国文, 江月玲, 聂国娇, 王惟荣, 何静欣. 我国外来入侵物种喜旱莲子草的生态风险及预警. // 风险分析和危机反应的创新理论和方法: 中国灾害防御协会风险分析专业委员会第五届年会论文集. 南京: 中国灾害防御协会风险分析专业委员会, 2012.
XIE G W, JIANG Y L, NIE G J, WANG W R, HE J X. Ecological risk analysis and precaution of invasive alien species *Alternanthera philoxeroides* in China. // Innovative Theories and Methods of Risk Analysis and Crisis Response. Proceedings of the 5th Annual Conference of Risk Analysis Committee of China Disaster Prevention Association. Nanjing: Risk Analysis Committee of China Association for Disaster Prevention, 2012.
- [6] WU H, ISMAIL M, DING J Q. Global warming increases the interspecific competitiveness of the invasive plant alligator weed, *Alternanthera philoxeroides*. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 1415-1422.
- [7] MEHMOOD A, TANVEER A, JAVED M M, MUHAMMAD A N, MUHAMMAD N, TASAWER A. Estimation of economic threshold level of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb.) to Tackle Grain quality and yield losses in Rice. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2017, 64(2): 208-218.
- [8] 江源, Manfred Meurer. 德国南部落叶阔叶林下常见植物的光适应性研究: 以德国 Kraichtal 地区落叶阔叶林为例. *植物学报*, 2001, 43(9): 960-966.
JIANG Y, MANFRED M. Study on the adaptation of certain species to light condition under the deciduous broad-leaved forests in southern Germany: Taking the forest communities in Kraichtal, Germany as an example. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(9): 960-966.
- [9] 熊韞琦, 赵彩云. 表型可塑性外来植物的成功入侵. *生态学杂志*, 2020, 39(11): 3853-3864.
XIONG Y Q, ZHAO Y C. Phenotypic plasticity and the successful invasion of alien plants. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(11): 3853-3864.
- [10] 陈中义, 王府京, 王英英, 江红英. 光照强度对 2 种来源的空心莲子草生长的影响. *长江大学学报 B (自然科学版)*, 2007, 4(1): 68-71.
CHEN Z Y, WANG F J, WANG Y Y, JIANG H Y. Influence of light intensity on growth of *Alternanthera philoxeroides*, an alien invasive plant. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2007, 4(1): 68-71.
- [11] 许建平, 张小萍, 曾波, 袁慎鸿, 刘建辉, 刘明智. 完全水淹环境中光照和溶氧对喜旱莲子草表型可塑性的影响. *生态学报*, 2014, 34(2): 258-268.
XU J P, ZHANG X P, ZENG B, YUAN S H, LIU J H, LIU M Z. Effects of light and dissolved oxygen on the phenotypic plasticity of *Alternanthera philoxeroides* in submergence conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 258-268.
- [12] 班芷桦, 王琮. 喜旱莲子草和接骨草竞争对模拟增温的响应. *植物生态学报*, 2015, 39(1): 43-51.
BAN Z H, WANG Q. Responses of the competition between *Alternanthera philoxeroides* and *Sambucus chinensis* to simulated warming. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(1): 43-51.
- [13] 李扬汉. 中国杂草志. 北京: 中国农业出版社, 1998: 81-82.
LI Y H. Weed Records of China. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 81-82.
- [14] 娄远来, 沈晋良. 水花生的根、茎、叶形态解剖特征及生态适应性. *江苏农业学报*, 2005, 21(4): 277-282.
LOU Y L, SHEN J L. Anatomical study on vegetative organs and ecological adaption of *Alternanthera philoxeroides*. *Jiangsu Journal of Agriculture*, 2005, 21(4): 277-282.

- [15] 潘晓云. 冠层恒定性: 外来入侵种喜旱莲子草对遮荫、密度和干扰的生长反应. 上海: 复旦大学博士后论文, 2005.
PAN X Y. Canopy constancy: Growth response to shade, density, and disturbance of an invasive alien species, *Alternanthera philoxeroides*. Postdoctoral Thesis. Shanghai: Fudan University, 2005.
- [16] VALLADARES F, WRIGHT S J, LASSO E, KITAJIMA K, PEARCY R W. Plastic phenotypic response to light of 16 congeneric shrubs from a panamanian rainforest. *Ecology*, 2000, 81(7): 1925-1936.
- [17] XI D G, YOU W H, HU A A, HUANG P, DU D L. Developmentally programmed division of labor in the aquatic invader *Alternanthera philoxeroides* under homogeneous soil nutrients. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 485.
- [18] 吕晓倩, 韩翠敏, 奚道国, 游文华. 克隆整合有利于喜旱莲子草入侵本地植物种群. 江西农业大学学报, 2019, 41(6): 1093-1102.
LYU X Q, HAN C M, XI D G, YOU W H. Clonal integration facilitates *Alternanthera philoxeroides* invading to native plant populations. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2019, 41(6): 1093-1102.
- [19] 张淑敏, 陈玉福, 董鸣. 匍匐茎草本绢毛匍匐委陵菜对局部遮荫的克隆可塑性. 植物学报, 2000, 42(1): 89-94.
ZHANG S M, CHEN Y F, DONG M. Clonal plasticity in response to partial neutral shading in the stoloniferous herb *Potentilla reptans* var. *sericophylla*. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(1): 89-94.
- [20] 贾昕, 傅东静, 潘晓云, 李博, 陈家宽. 陆生生境中喜旱莲子草的生长模式. 生物多样性, 2007, 15(3): 241-246.
JIA X, FU D J, PAN X Y, LI B, CHEN J K. Growth pattern of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*) in terrestrial habitats. *Biodiversity Science*, 2007, 15(3): 241-246.
- [21] 高芳磊, 郭素民, 闫明, 李钧敏, 于飞海. 不同生境下空心莲子草响应模拟昆虫采食的生长和化学防御策略. 生态学报, 2018, 38(7): 2344-2352.
GAO F L, GUO S M, YAN M, LI J M, YU F H. Effects of simulated insect herbivory on the growth and chemical defense of *Alternanthera philoxeroides* in different habitats. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(7): 2344-2352.
- [22] 董必成. 喜旱莲子草克隆片段的适应策略. 北京: 北京林业大学博士学位论文, 2014.
DONG B C. Adaptive strategies of *Alternanthera philoxeroides* clonal fragments. PhD Thesis. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [23] 马素霞, 王艳玲, 唐剑武. 水稻冠层叶片土壤、作物分析仪器开发值与叶绿素、叶氮含量及净光合速率的变化特征. 科学技术与工程, 2016, 16(24): 147-152.
MA S X, WANG Y L, TANG J W. Variation of rice canopy SPAD value and chlorophyll, leaf nitrogen content and net photosynthetic rate. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(24): 147-152.
- [24] FERREIRA V S, PINTO R F, SANT A C. Low light intensity and nitrogen starvation modulate the chlorophyll content of *Scenedesmus dimorphus*. *Journal of Applied Microbiology*, 2016, 120(3): 661-670.
- [25] LIU X, YUE L, ZHONG S. Interplay between light and plant hormones in the control of *Arabidopsis* seedling chlorophyll biosynthesis. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1433.
- [26] 吴飞燕, 伊力塔, 李修鹏, 殷秀敏, 刘美华, 余树全. 不同光照强度对石砾幼苗叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响. 东北农业大学学报, 2012, 43(4): 88-92.
WU F Y, YI L T, LI X P, YIN X M, LIU M H, YU S Q. Effect of different light intensity on intensity chlorophyll content and chlorophyll fluorescence in *Lithocarpus glaber*. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, 43(4): 88-92.
- [27] 李娟, 林位夫, 周立军. 不同光照度生境对海芋块茎形态、淀粉含量及叶绿素含量的影响. 华南农业大学学报, 2016, 37(3): 62-66.
LI J, LIN W F, ZHOU L J. Effect of light intensity on tuber morphology, starch content and leaf chlorophyll content of calla lily. *Journal of South China Agricultural University*, 2016, 37(3): 62-66.
- [28] ZHANG X Y, LI T, TAN G F, HUANG Y, WANG F, XIONG A S. Effects of dark treatment and regular light recovery on the growth characteristics and regulation of chlorophyll in water dropwort. *Plant Growth Regulation*, 2018, 85(2): 293-303.
- [29] WU X Y, KHAN R Y, GAO H J, LIU H B, ZHANG J, MA X H. Low light alters the photosynthesis process in cigar tobacco via modulation of the chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and gene expression. *Agriculture*, 2021, 11(8): 755.

(责任编辑 苟燕妮)