

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.005

引用格式:曹婧,王文慧,李振松,等.少花蒺藜草异型种子对光照和水分条件的差异化适应策略研究[J].草地学报,2026,34(7):2393–2402

CAO Jing, WANG Wen-hui, LI Zhen-song, et al. Divergent Adaptation of *Cenchrus spinifex* Heteromorphic Seeds to Light and Water Conditions[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2393–2402

少花蒺藜草异型种子对光照和水分条件的差异化适应策略研究

曹婧^{1,2#}, 王文慧^{1#}, 李振松^{3*}, 戎郁萍^{2*}

(1. 青岛农业大学草业学院, 山东 青岛 266109; 2. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193;
3. 青岛恒星科技学院, 山东 青岛 266100)

摘要:种子异型性是入侵植物适应环境异质性的关键策略。为探究少花蒺藜草(*Cenchrus spinifex* Cav.)异型种子对环境因子的响应机制,本研究通过控制光照(全黑暗与12 h光照/12 h黑暗)和水分胁迫[聚乙二醇(Polyethylene glycol, PEG)模拟]观察异型种子(M型:大种子;P型:小种子)的萌发特性,并通过水分(正常、轻度干旱、重度干旱)与光照(高光、低光)交互作用分析幼苗生长、生物量分配及表型可塑性差异。结果表明:异型种子萌发率不受光照影响但受水分胁迫显著抑制;重度干旱下M型种子萌发能力更强且胚根、胚芽及生物量表现优于P型。M型植株在株高、分蘖、叶面积等形态性状上表型可塑性更高,倾向于增加地上资源投入以快速完成生活史;P型植株则在生物量分配格局上更具可塑性,通过提升根系占比增强胁迫耐受能力。研究表明,少花蒺藜草异型种子通过萌发与生长策略的“两头下注”形成适应机制,为其在逆境中成功入侵和扩展提供了生态基础。

关键词:入侵植物;少花蒺藜草;种子异型性;表型可塑性;生物量分配

中图分类号:S451

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2393-10

Divergent Adaptation of *Cenchrus spinifex* Heteromorphic Seeds to Light and Water Conditions

CAO Jing^{1,2#}, WANG Wen-hui^{1#}, LI Zhen-song^{3*}, RONG Yu-ping^{2*}

(1. College of Grassland, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong Province 266109, China;
2. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
3. Qingdao Hengxing University, Qingdao, Shandong Province 266100, China)

Abstract: Seed heteromorphism is a critical adaptive strategy for invasive plants to cope with environmental heterogeneity. To investigate the response mechanisms of heteromorphic seeds of *Cenchrus spinifex*, we examined germination characteristics of its two seed types (M-type: larger; P-type: smaller) under varying light (complete darkness vs. 12 h light/12 h dark) and moisture conditions (simulated by PEG gradients). Subsequent seedling growth, biomass allocation, and phenotypic plasticity were analyzed in response to the interaction between water availability (normal, mild, and severe drought) and light intensity (high and low intensity). The results showed that germination was unaffected by light but strongly inhibited by water stress; under severe drought, M-type seeds outperformed P-types in root length, bud length, and biomass. As seedlings, M-type plants showed higher phenotypic plasticity in morphological traits (plant height, tiller number, leaf area), favoring increased aboveground resource investment for rapid life cycle completion, whereas P-type plants exhibited greater plasticity in biomass allocation, enhancing stress tolerance through increased root biomass proportion.

收稿日期:2025-11-10;修回日期:2026-01-11

基金项目:山东省自然科学基金青年项目(ZR2025QC246);国家现代农业产业技术体系(CARS-34)资助

作者简介:曹婧(1993-),女,汉族,甘肃兰州人,博士,主要从事草地生态与入侵生物学研究, E-mail: caojing@qau.edu.cn;王文慧(2004-),女,汉族,山东济宁人,本科生,主要从事草地生态研究, E-mail: 3033313028@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: rongyuping@cau.edu.cn; 13121256799@163.com

In summary, the complementary germination and growth strategies of heteromorphic seeds in *C. spinifex* represent an effective “bet-hedging” mechanism, which is crucial for its successful invasion and spread across environmentally stressful and variable habitats.

Key words: Invasive plants; *Cenchrus spinifex* Cav.; Seed heteromorphism; Phenotypic plasticity; Biomass allocation

种子萌发在植物个体发育周期中扮演着非常重要的角色,种子异型性作为种子植物的一种特殊生理结构,已成为学界有关适应对策方面的研究热点^[1]。种子异型性是指同一植株产生两种或多种形态或行为不同的种子的现象^[2]。异型性种子通常具有不同的形态学特性、休眠和萌发特性^[3-4],如藜科异型种子通常表现为一类种子不休眠,而另一类种子具有休眠特性^[5],通常重量大、颜色浅的种子萌发率高于重量小、颜色深的种子^[6]。这种差异被称为两头下注策略(Bet-hedging strategy),是植物适应环境异质性的独特方式。除此之外,异型种子形成的植株在大小、形态特征、竞争力、生殖分配等方面通常也存在差异,这些差异或在后期发育过程中逐渐消失^[2]。虽然植物通常都具备可塑性,但是种群延续的压力使得入侵植物具有更强的表型可塑性^[4, 7-8]。研究表明种子异型性能够缓解新生境的选择压力,拓展自身的生态幅,还能提高在异质生境中的适合度,保持其入侵性^[9]。例如外来物种丛枝蓼(*Polygonum cespitosum*)的入侵与种内可塑性的变化有关,在不同的光照和水分条件下表现出相对较高的适应性^[10]。

少花蒺藜草(*Cenchrus spinifex* Cav.)种子具有异型性,分别为外形似芒果相对较大的M型种子和外形似梨相对较小的P型种子^[11]。研究表明,在自然生境条件下,少花蒺藜草刺苞萌发1粒种子(M型)的概率远大于2粒种子(P型),P型种子或休眠或作为生态补给补充种群数量,以此来发挥空间和时间上的两头下注策略^[12]。在全球气候变化背景下,光照和降水的时空格局改变可能对少花蒺藜草种群动态产生影响^[13]。研究表明,少花蒺藜草的株高、分蘖数和生物量分配可随环境条件变化发生显著变化^[14],但这种变化是否与种子异型性有关暂不明确。目前,关于少花蒺藜草种子异型性已有了一定研究,但主要集中在种子萌发阶段,缺乏对异型种子引起的植株形态、生物量分配等方面差异的系统研究。因此,本研究以少花蒺藜草种子异型性作为切入点,探究不同环境条件(光照、水分)对于少花蒺藜草异型种子萌发特性、生物量分配及表型可塑性的影响差异,以明确异型种子在应对环境变化的适应策略差异。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验所用少花蒺藜草种子于2019年9月采集于内蒙古科尔沁沙地(43°35' N, 122°17' E)。该地区属温带大陆性气候,海拔178 m,年平均气温6℃,年降水量350~450 mm。将少花蒺藜草刺苞中裸粒M和P型种子剥开并置于纸袋中,于室内常温黑暗环境下储藏备用。

1.2 试验设计

试验分为种子萌发试验与幼苗生长试验两部分。

种子萌发:试验于2020年10月至12月在中国农业大学温室内进行,光照强度为 $350 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,相对湿度为65%。设置种子类型(M和P型)、光照强度(全黑暗和12 h光照/12 h黑暗)及水分胁迫(采用聚乙二醇6000模拟(PEG 6000),浓度梯度为0, 5%, 10%, 15%, 20%和25%)双因素交互试验。每皿播种25粒种子,4次重复,每24 h观察种子萌发数,14 d后计算萌发率,测定其芽长、根长、芽重和根重。

幼苗生长:试验于2020年5月至10月在河北省张北县国家牧草产业技术体系综合试验站设施大棚内(41°28.70' N, 115°00.326' E)进行,该区域属于中温带大陆性季风气候,试验期间日平均高温为22.6℃,平均低温为11.2℃,日均日照时长为11.8 h。将M和P型种子播种于穴盘,两周后选取长势一致的植株移栽至花盆(19 cm×15 cm)中,每盆5株。使用改良Hoagland营养液,培养基质为蛭石和珍珠岩混合物(体积比2:1)。试验采用随机区组设计,每一区组包括种子类型(M和P型)、水分胁迫(正常水分 W_1 、轻度干旱 W_2 和重度干旱 W_3 ,分别为饱和含水量的70%~80%, 45%~55%和20%~30%)和光照强度(高光HL为全光照的85%,模拟林缘路边环境;低光LL为全光照的10%,模拟农田林下环境,通过塑料膜和遮阳网控制)处理,为避免因光照引起的温度差异,所有处理均置于同一且可通风的大棚内,每天定时监测高光与低光处理区域内的空气温度,两种光照

处理下的日平均温度与温度波动范围无明显差异。试验共12个处理组合,每种处理10个重复,总计120盆。

1.3 测量指标及测定

幼苗生长试验在处理90 d后进行破坏性取样。测定指标包括:

形态指标:株高、分蘖数、叶片数、叶长、叶宽、叶面积、比叶面积、叶形指数、叶面积指数。叶片用彩色图像扫描仪(Epson Perfection V700 Photo)进行扫描,计算叶形指数(Leaf shape index, LSI, $LSI = \text{叶片长度} / \text{叶片宽度}$);比叶面积(Specific leaf area, SLA = 叶片干重/叶面积);叶面积指数采用LAI测量仪LAI-2200测定。

生物量指标:根、茎、叶、小穗生物量(干重),并计算生物量分配格局。

表型可塑性指数(Phenotypic plasticity index, PPI)^[15]: $PPI = (V_{\max} - V_{\min}) / V_{\max}$ 。其中, $V_{\max}$ 表示性状的最大值, $V_{\min}$ 表示性状的最小值。PPI值的范

围是0~1,其中0表示没有可塑性,而1表示具有最大可塑性。

1.4 数据处理与分析

采用IBM SPSS Statistics(SPSS Inc., Chicago, IL, USA)进行数据分析,采用单因素、双因素或三因素方差分析检验各性状差异的显著性,多重比较采用LSD法($\alpha < 0.05$)。采用GraphPad Prism(GraphPad Software, San Diego, CA, USA)作图。

2 结果与分析

2.1 环境变化对少花蒺藜草异型种子萌发特性的影响

光照和种子类型对异型种子的萌发率无显著影响(图1a),对根长与芽长有极显著影响(图1b, c, $P < 0.001$)。在黑暗条件下, M型与P型种子的根长、芽长及根重均显著高于光照处理的种子。同一光照条件下, M型种子的根长、芽长及芽重均极显著高于P型种子($P < 0.001$)。

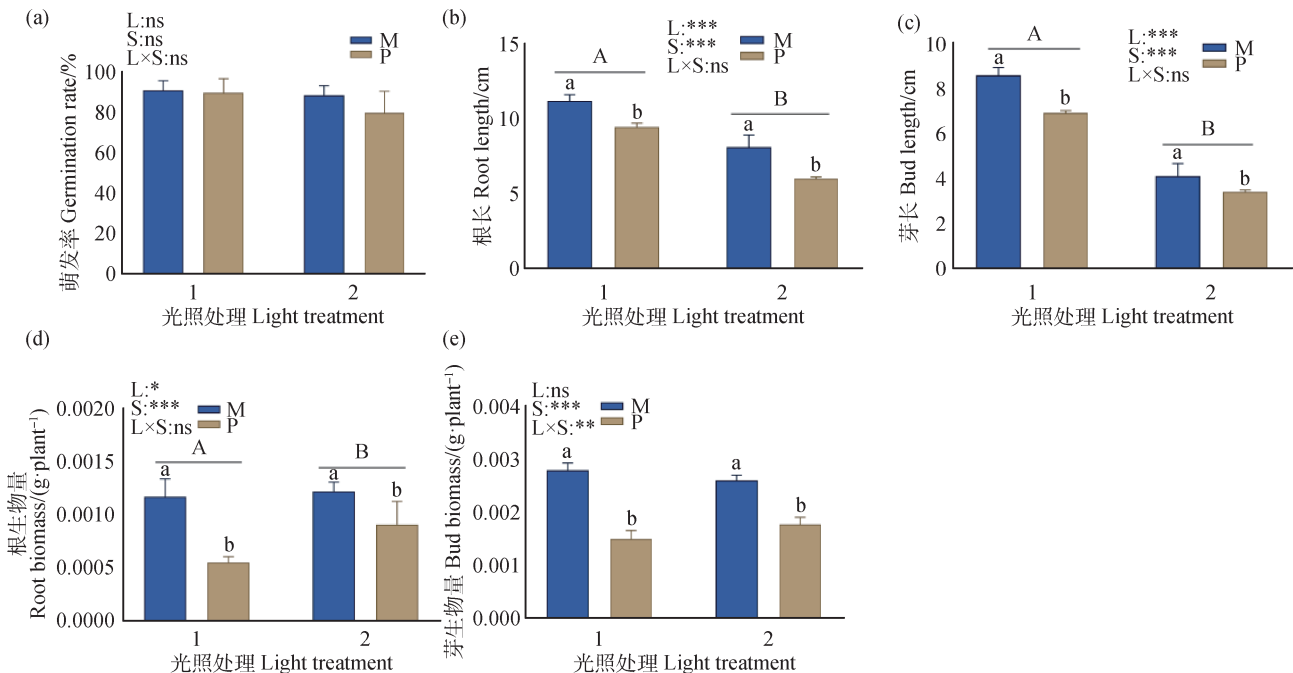


图1 光照对少花蒺藜草萌发率(a)、根长(b)、芽长(c)、根重(d)和芽重(e)的影响

Fig. 1 Effects of light on the germination rate (a), root length (b), bud length (c), root biomass (d), and bud biomass (e) of *C. spinifex*. Note: L represents light treatment; S represents seed type. The horizontal axis indicates different light treatments, 1 represents complete darkness, 2 represents 12 h light/12 h dark. Capital and lowercase letters respectively represent significant differences among different light treatments and different seed types; ns, *, **, *** denote $P > 0.05$, $P < 0.05$, $P < 0.01$, and $P < 0.001$, respectively. The same as below

Note: L represents light treatment; S represents seed type. The horizontal axis indicates different light treatments, 1 represents complete darkness, 2 represents 12 h light/12 h dark. Capital and lowercase letters respectively represent significant differences among different light treatments and different seed types; ns, *, **, *** denote $P > 0.05$, $P < 0.05$, $P < 0.01$, and $P < 0.001$, respectively. The same as below

PEG 浓度及种子类型对萌发率有极显著影响(图2),随着PEG浓度升高,萌发率呈下降趋势。在20%PEG浓度下,M型种子(76.25%)的萌发率较P型(49%)提高了55.6%,两者差异显著($P<0.01$)。PEG浓度对根长、芽长和芽重也产生极显著影响(图2b,c,e, $P<0.001$),根长随浓度升高而

降低,而芽长、根重与芽重则表现为先升高后降低的趋势,在5%PEG浓度时达到峰值。在不同种子类型之间,M型种子的芽长与芽重显著优于P型($P<0.05$),分别增加了14.1%和36.9%;而二者根长与根重无显著差异。PEG浓度与种子类型在各指标上无显著交互作用。

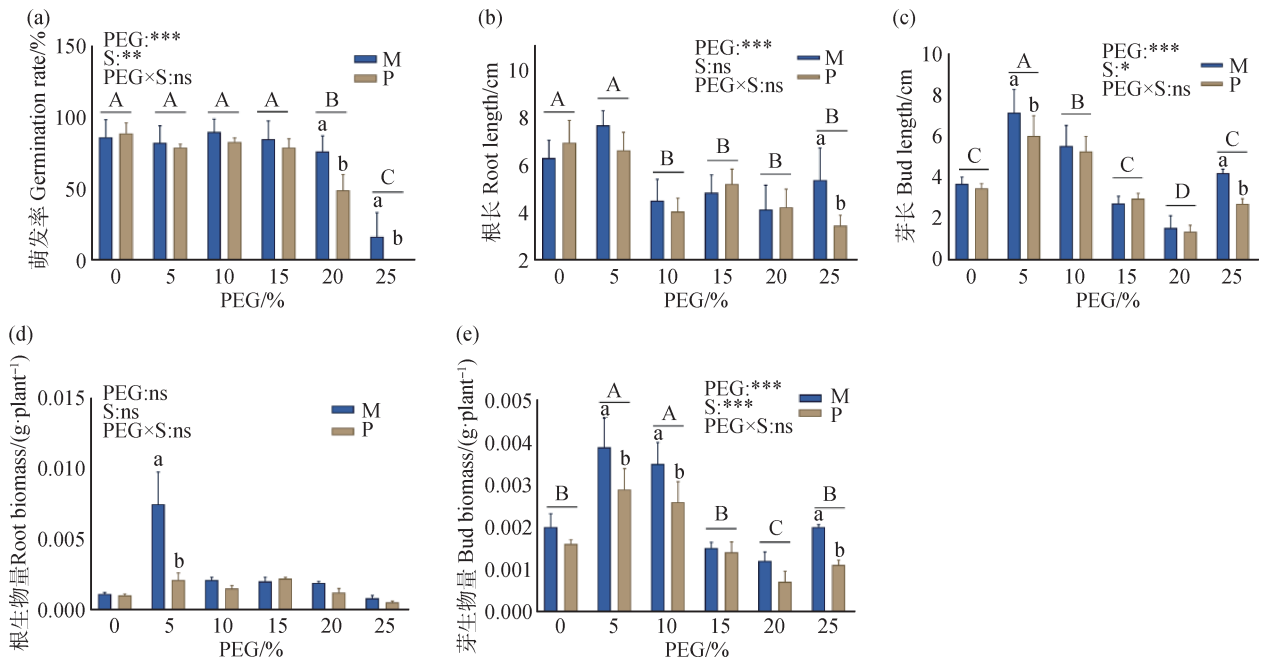


图2 PEG对少花蒺藜草萌发率(a)、根长(b)、芽长(c)、根重(d)和芽重(e)的影响

Fig. 2 Effects of PEG on the germination rate (a), root length (b), bud length (c), root biomass (d), and bud biomass (e) of *C. spinifex*

注:图中不同大、小写字母分别代表不同PEG处理、不同种子类型间有显著性差异

Note: Capital and lowercase letters respectively represent significant differences among different PEG treatments and different seed types

2.2 环境对少花蒺藜草异型种子生物量分配的影响

水分与光照条件对少花蒺藜草的总生物量及各构件生物量均无显著影响(图3),仅种子类型对各生物量指标有显著性影响($P<0.05$),M型植株各部位生物量及总生物量均极显著高于P型植株,表明其生物量积累具有固有优势。在生物量分配方面,PEG具有显著调控作用,而光照则无显著效应。随着干旱程度加剧,M型和P型植株均表现出地上生物量分配减少、地下生物量分配增加的整体响应趋势。此外,二者在分配策略上也存在差异:M型植株倾向于将更多生物量分配至小穗(约30%),而P型植株则表现出更高的根系分配占比(约20%)。种子类型极显著影响各构件生物量的分配($P<0.001$),但对根冠比无显著影响。

2.3 环境对异型种子表型可塑性差异的影响

水分胁迫对少花蒺藜草的分蘖数、叶片数、叶形指数(LSI)、叶面积指数(LAI)及各构件生物量无显著影响,但显著调控株高、叶长、叶宽、叶面积、比叶面积(SLA)。光照条件显著影响株高和叶片性状(叶长、叶宽、叶面积、SLA),而对分蘖数无显著影响。种子类型极显著影响几乎所有表型性状和生物量指标,仅对LSI影响不显著。此外,部分因子间存在显著交互作用:种子类型与水分胁迫的交互作用显著影响LAI;种子类型与光照的交互作用显著影响株高、叶宽、叶面积、LSI和LAI;水分与光照的交互作用则显著影响株高、叶长、叶面积和SLA。三因素交互作用在所有性状中均不显著。

随着水分胁迫加剧,株高显著降低;低光条件增加了植株高度,且M型植株的株高始终高于P型。分蘖数与叶片数不受水分或光照处理的影响

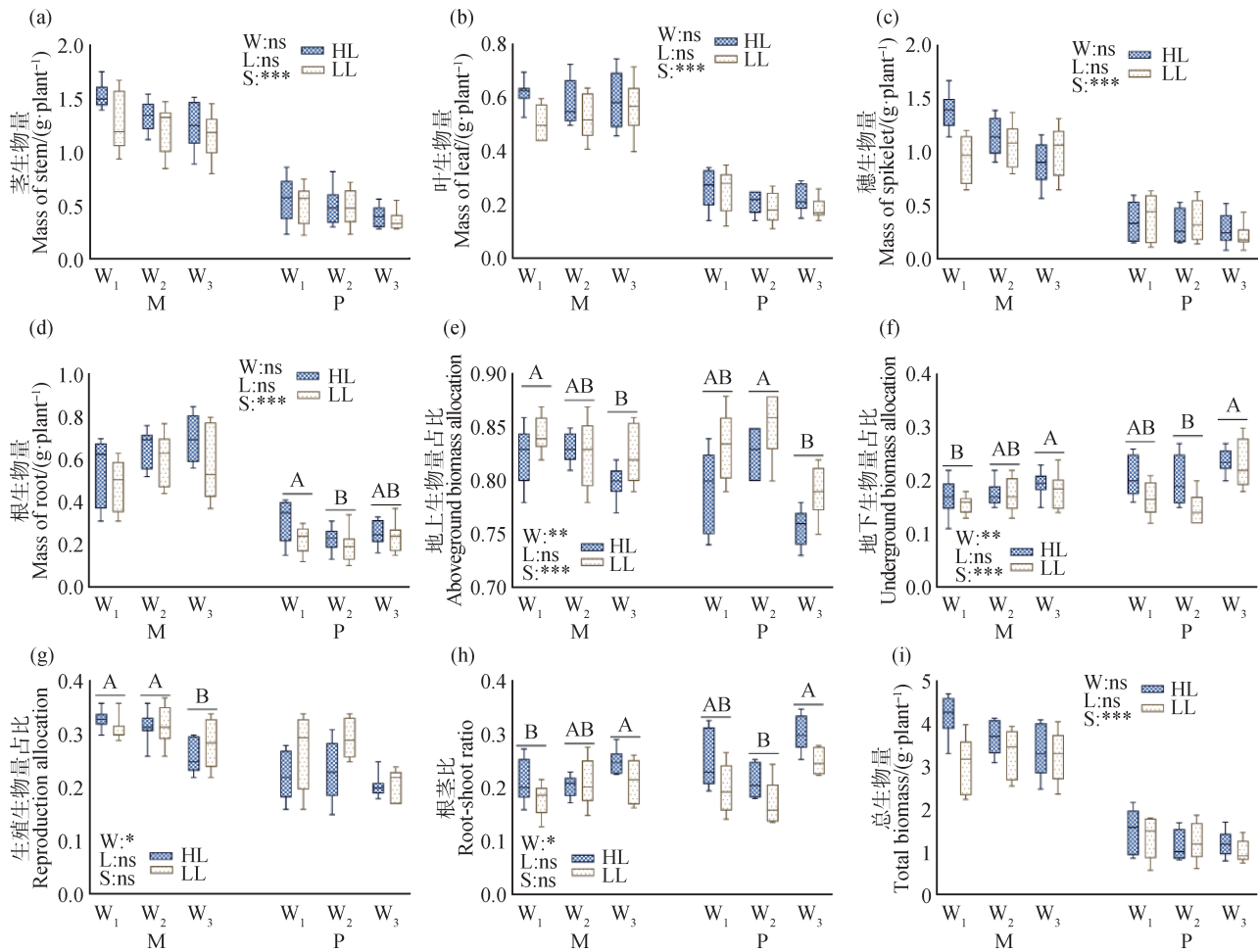


图3 环境条件对少花蒺藜草构件生物量及其分配的影响

Fig. 3 Effects of environmental conditions on biomass of different parts and its allocation of *C. spinifex*

注: W-水分胁迫处理(W₁、W₂和W₃分别代表正常水分、轻度干旱和重度干旱); L-光照处理(HL和LL分别代表高光和低光处理); S-种子类型; 横坐标代表不同光照处理-1代表黑暗处理, 2代表12h光照/12h黑暗处理。图中大写字母分别代表不同水分处理间有显著性差异; ns, *, **, ***分别代表 $P>0.05$, $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$ 。下同

Note: W, water stress treatment (W₁, W₂, and W₃ represent well-watered, mild drought, and severe drought, respectively); L, light treatment (HL and LL represent high light and low light, respectively); S, seed type. The horizontal axis indicates different light treatments: 1 represents complete darkness, 2 represents 12 h light/12 h dark. Capital letters represent significant differences among different water stress treatments. ns, *, **, *** denote $P>0.05$, $P<0.05$, $P<0.01$, and $P<0.001$, respectively. The same as below

(图4b,c),但M型植株的这两项指标均极显著高于P型($P<0.001$)。水分、光照和种子类型对叶长、叶宽、叶面积和SLA均有极显著影响(图4d-g),水分胁迫降低这些叶片性状值,在重度干旱(W₃)下达最低值;而低光环境则促使这些叶片性状值增加。LAI受光照与种子类型及其交互作用的显著调控:M型植株在高光下LAI更高(0.44),而P型植株在低光下LAI更高(0.27)。

在不同水分条件下,M型植株在分蘖数、叶片数和总生物量上表现出更高的可塑性,而P型植株则在生物量分配(根冠比、繁殖分配、地上与地下分

配)及LAI方面可塑性更强(图5a)。在不同光照条件下,M型植株在生物量相关性状(总生物量、叶生物量、茎生物量)及分蘖数、叶片数上可塑性更高;P型植株则在根冠比、繁殖分配、地上生物量分配和LAI上更具可塑性(图5b)。在水分与光照交互作用下,M型植株在绝大多数生物量积累性状上可塑性高于P型,而P型在LAI,LSI和地上生物量分配上可塑性更优(图5c)。总体而言,在交互环境下,M型植株通过调节表型性状来提高适应性,而P型植株则通过调节生物量分配展现出更好的可塑性。

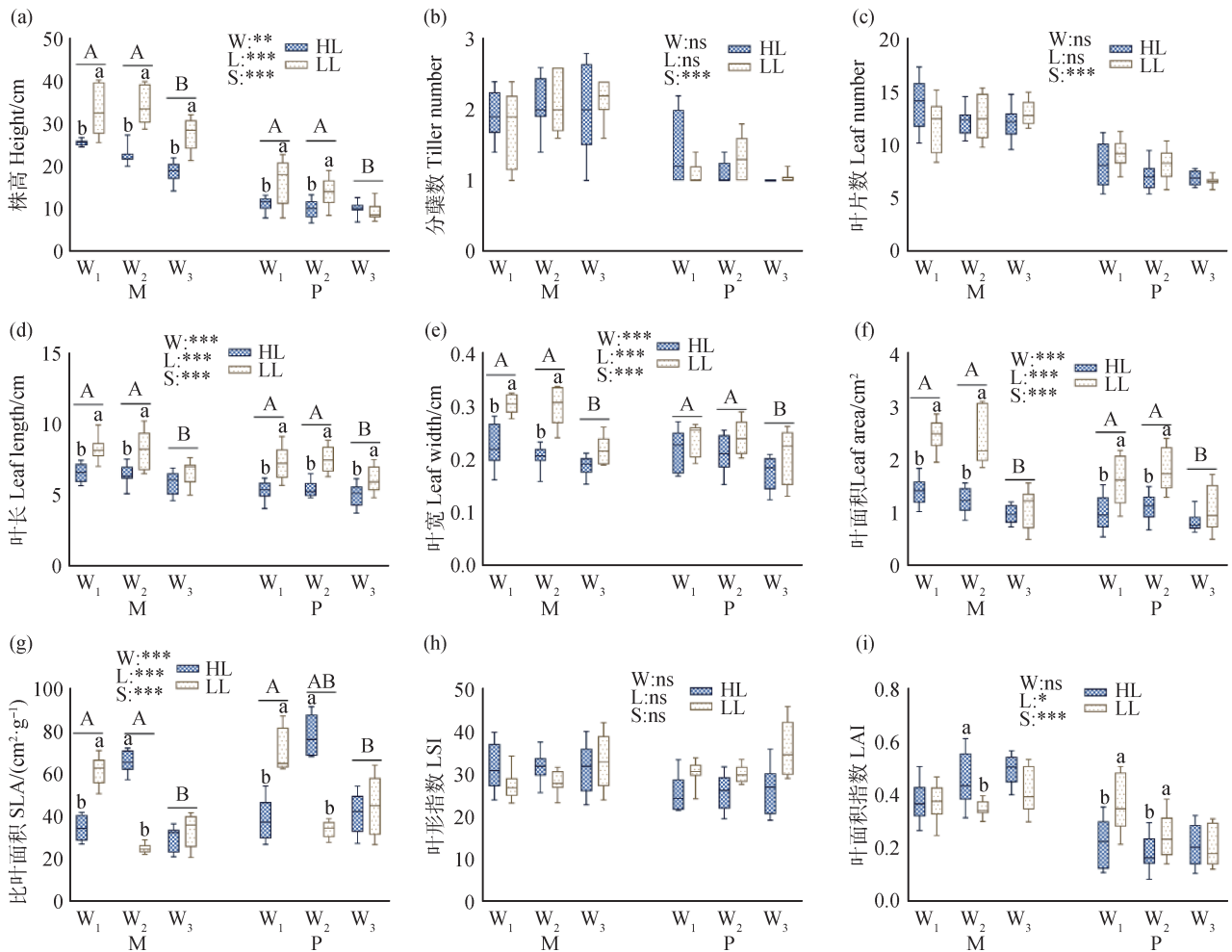


图4 环境条件对少花蒺藜草形态特征的影响

Fig. 4 Effects of environmental conditions on morphological characteristics of *C. spinifex*

注:图中大、小写字母分别代表不同水分处理、种子类型间有显著性差异

Note: Capital and lowercase letters respectively represent significant differences among different water stress treatments and seed types

3 讨论

3.1 异型种子萌发特性对环境异质性的差异化响应

种子异型性是植物对生境异质性的关键适应策略,尤其对入侵植物而言,萌发差异直接决定其定植与扩散的成功与否^[16]。种子萌发的需光性通常与种子的大小成反比^[17],而少花蒺藜草种子萌发对光照不敏感,这可能削弱了其对特定萌发微环境的依赖,从而增强了入侵潜力^[18]。尽管光照未显著影响少花蒺藜草异型种子的萌发率,但对胚根长、胚芽长及根生物量具有显著调控作用,表明萌发后的早期生长阶段对光环境敏感。黑暗条件下胚根与胚芽生长更优,可能与光敏色素 Pfr 向 Pr 的转化解除萌发抑制有关^[19]。此外, M 型种子在根芽长及生物量方面均优于 P 型种子,这与野外的观察结论

一致^[20]。

种子大小与吸水速率和发芽率密切相关,大种子通常具有更高的吸水速率和发芽率^[21]。例如,戟叶滨藜 (*Atriplex prostrata*) 和盐角草 (*Salicornia europaea*) 的大种子的发芽率均超过 90%, 显著高于小种子^[22]。随着 PEG 浓度升高, M 型种子的发芽率显著高于 P 型,符合“小种子延迟萌发”的理论模型^[23]。在干旱等干扰环境中,少花蒺藜草通过异型种子选择“两头下注”策略以降低长期灭绝风险^[24]; M 型种子凭借其更大的体积、更快的吸水速率和更丰富的胚乳储备,在条件适宜时优先快速萌发,抢占生态位^[25]; 而 P 型种子通过休眠形成土壤种子库,以分摊风险^[23]。因此,异型种子萌发差异是少花蒺藜草在多变环境中实现种群延续的核心机制^[26]。

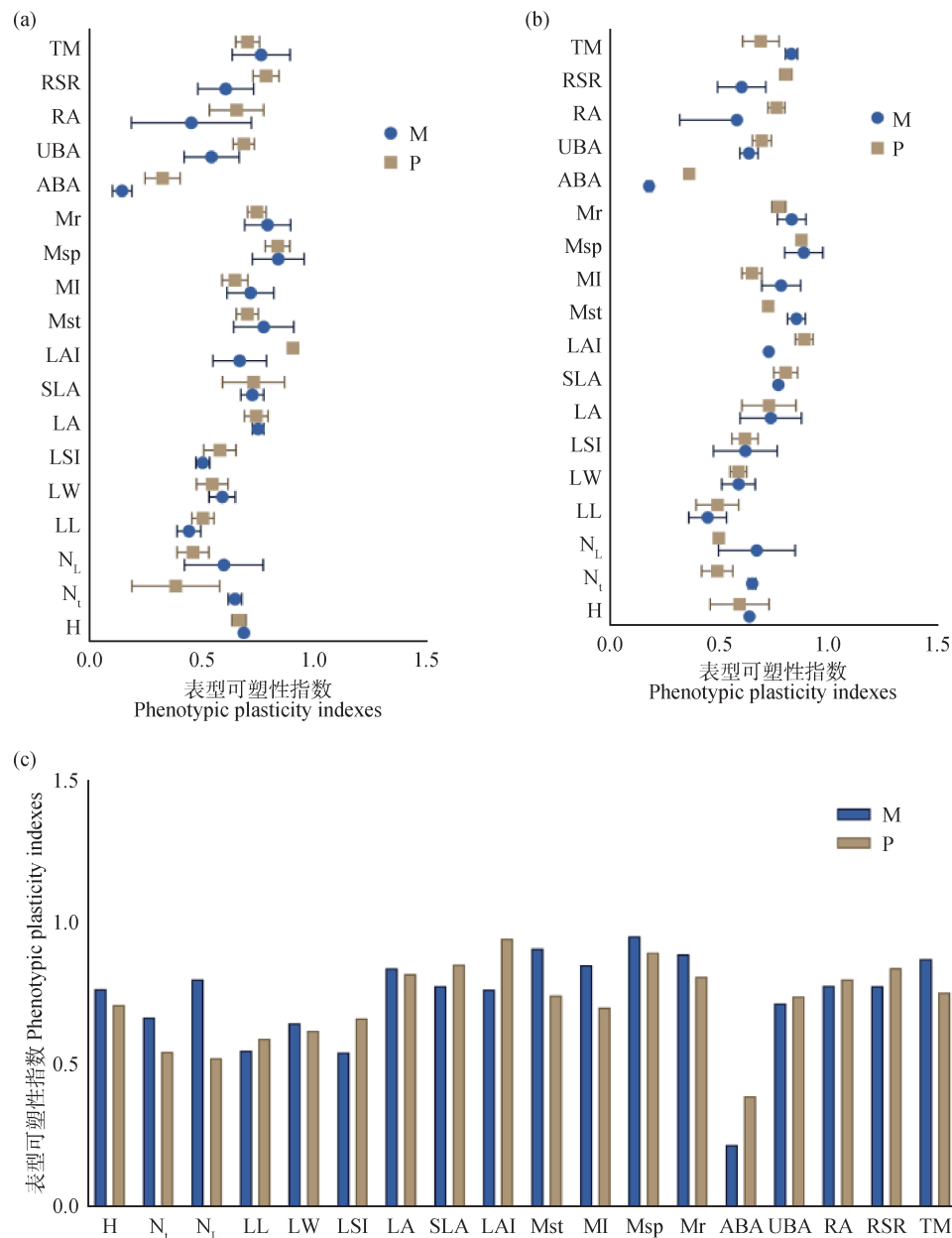


图 5 环境对异型种子表型可塑性指数的影响

Fig. 5 Effects of environmental conditions on phenotypic plasticity indices of heteromorphic seeds of *C. spinifex*

注:(a)(b)(c)分别为水分处理、光照处理、水分光照交互作用对少花蒺藜草各性状变量可塑性指数的影响。H表示高度; N_t 表示分蘖数; N_L 表示叶片数;LL表示叶片长;LW表示叶片宽;LSI表示叶形指数;LA表示叶面积;SLA表示比叶面积;LAI表示叶面积指数;Mst表示茎生物量;MI表示叶生物量;Msp表示小穗生物量;Mr表示根系生物量;ABA表示地上部生物量分配;UBA表示地下部生物量分配;RA表示繁殖分配;RSR表示根冠比;TM表示总生物量

Note: (a)(b)(c) represent effects of moisture treatment, light treatment and their interaction treatment on phenotypic plasticity index of *C. spinifex*'s characters respectively. H stands for height; N_t stands for tiller number; N_L stands for leaves number; LL stands for leaf length; LW stands for leaf width; LSI stands for leaf-shape index; LA stands for leaf area; SLA stands for specific leaf area; LAI stands for leaf area index; Mst stands for biomass of stem; MI stands for biomass of leaves; Msp stands for biomass of spikelet; Mr stands for biomass of root; ABA stands for aboveground biomass allocation; UBA stands for underground biomass allocation; RA stands for reproduction allocation; RSR stands for root-shoot ratio; TM stands for total biomass

3.2 异型种子响应环境变化的生物量分配策略差异

种子异型性不仅影响萌发行为,亦对幼苗建植与生物量分配具有持续效应^[27-29],表现为M型与P

型植株在各构件生物量分配上采取差异化适应策略。本研究中,水分是调控少花蒺藜草生物量分配的主要因子,显著影响着地上、地下与繁殖部位生物量分配及根冠比,而光照影响不显著。干旱环境

下,植株普遍通过提高地下部投资与根冠比以增强水分吸收,这符合干旱适应策略^[30]。值得注意的是,M型与P型植株对此响应不同:M型植株倾向于将更多资源分配给地上部器官,以竞争光资源;而P型植株则增强根系投资,采取保守的存活策略,二者形成了“资源利用型”与“抗逆存活型”的空间资源分配格局。这种“空间资源分配”差异与异型种子在萌发特性上的“时间错位”共同保障种群长期延续^[31],最大限度地提高了少花蒺藜草群体在异质环境中的适应能力^[32]。

遮荫通常促进资源向地上部分分配^[33],但本研究中光照对生物量分配无显著影响,可能与少花蒺藜草对光照不敏感的生态起源有关。M型植株各构件生物量及总生物量均高于P型,反映大种子在营养储备与幼苗建成方面的优势^[27]。

3.3 异型种子的表型可塑性差异

光照作为光合作用的主要驱动因子,对植物叶面积具有正向调控作用^[34]。本研究中,低光环境下少花蒺藜草通过增加叶长、叶宽、叶面积与比叶面积以捕获更多光资源,符合遮荫环境下植物提高SLA的普遍策略^[33]。高光环境下部分性状受限,可能与光抑制有关^[35]。值得注意的是,M型植株在高光下叶面积指数更高,而P型植株在低光下更优,这反映了二者在光资源利用上的生态位分化^[36]。水分胁迫对分蘖数、叶片数等性状影响不显著,说明少花蒺藜草在干旱条件下仍能维持基本生长。这与前人研究结果存在差异^[37],可能与水分胁迫程度差异有关。水分与光照交互作用显著影响株高、叶面积等性状,说明少花蒺藜草通过调节植株形态与叶片结构以适应复合环境胁迫。在光照和水分交互作用下,M型植株整体可塑性更高,主要通过调节生物量分配以适应环境变化。此外,弱光下SLA升高与干旱下根冠比增大,均体现其通过形态调整优化资源获取的能力^[33]。

少花蒺藜草在不同胁迫条件下均维持较高的表型可塑性指数,支持了“可塑性促进入侵”假说^[38]。这种可塑性在M型与P型植株间存在策略性差异:M型植株在不同光照强度下的可塑性更强,主要表现在地上部构件生物量方面;而P型植株在不同水分胁迫条件下的可塑性更强,主要体现在根系生物量方面^[39]。但在相同环境条件下,M型植株在抗旱性与耐荫性方面均优于P型,与其萌发阶

段的适应优势一致。这可能与少花蒺藜草刺苞的形态结构有关,M型种子在发育早期即暴露于环境胁迫,可能提前诱导并增强其环境适应能力^[20]。

综上所述,在资源相对充足时,M型植株偏向竞争地上部资源,而在胁迫环境下,P型植株则采取保守存活策略,体现其异型种子适应环境的多面性。M型和P型的这种表型差异可以解释为何少花蒺藜草能够在新的栖息地快速扩散,即通过异型性种子将后代所面对的环境风险分散到不同的表型^[27]。在全球气候变化背景下,极端干旱事件频发可能为少花蒺藜草提供更多入侵机会^[40-41],这一现象在其他入侵植物[如长叶相思树(*Acacia longifolia*)等]上也被证实^[42]。

4 结论

在异质生境中,少花蒺藜草的异型种子在萌发与幼苗生长阶段表现出明显的适应差异。M型种子体积大、营养储备丰富,在自然条件下萌发竞争力强;P型种子则更具抗旱性,在干旱胁迫下适应能力更强。这种萌发机制的分化,既有助于种群高效利用现有资源,也保障了其在多变环境中的持续生存。幼苗阶段,M型植株具有更高的表型可塑性(如株高、分蘖数和叶面积等),并倾向于采取“快速生长”策略,通过提高地上部资源分配以快速完成种群延续;P型植株则偏向调节生物量分配格局,如提升根冠比以增强在逆境中的适应能力。这种异型种子间的差异化适应机制,显著增强了少花蒺藜草的入侵力。

参考文献

- [1] JIMÉNEZ M A, GAXIOLA A, ARMESTO J J, et al. Bet-hedging strategies of native and exotic annuals promote coexistence in semiarid Chile [J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 126: 62-67
- [2] 王雷,董鸣,黄振英. 种子异型性及其生态意义的研究进展[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 578-590
WANG L, DONG M, HUANG Z Y. Review of research on seed heteromorphism and its ecological significance [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 578-590
- [3] WEI Y, DONG M, HUANG Z Y. Seed polymorphism, dormancy and germination of *Salsola affinis* (Chenopodiaceae), a dominant desert annual inhabiting the Junggar Basin of Xinjiang, China [J]. *Australian Journal of Botany*, 2007, 55(4): 464-470
- [4] FUNK J L. Differences in plasticity between invasive and

- native plants from a low resource environment[J]. *Journal of Ecology*, 2008, 96(6):1162-1173
- [5] CAO D C, BASKIN C C, BASKIN J M, et al. Comparison of germination and seed bank dynamics of dimorphic seeds of the cold desert halophyte *Suaeda corniculata* subsp. *mongolica*[J]. *Annals of Botany*, 2012, 110(8):1545-1558
- [6] YAO S X, LAN H Y, ZHANG F C. Variation of seed heteromorphism in *Chenopodium album* and the effect of salinity stress on the descendants[J]. *Annals of Botany*, 2010, 105(6):1015-1025
- [7] VALLADARES F, GIANOLI E, GÓMEZ J M. Ecological limits to plant phenotypic plasticity[J]. *The New Phytologist*, 2007, 176(4):749-763
- [8] HIATT D, FLORY S L. Populations of a widespread invader and co-occurring native species vary in phenotypic plasticity[J]. *New Phytologist*, 2020, 225(1):584-594
- [9] BOSSDORF O, AUGÉ H, LAFUMA L, et al. Phenotypic and genetic differentiation between native and introduced plant populations[J]. *Oecologia*, 2005, 144(1):1-11
- [10] MATESANZ S, HORGAN-KOBELSKI T, SULTAN S E. Phenotypic plasticity and population differentiation in an ongoing species invasion[J]. *PLoS One*, 2012, 7(9):e44955
- [11] 张衍雷, 张瑞海, 付卫东, 等. 不同农作措施对少花蒺藜草 (*Cenchrus pauciflorus* Benth) 种子库及其繁殖能力的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(3):312-320
- ZHANG Y L, ZHANG R H, FU W D, et al. Effects of different cultivation practices on the amount of seeds in the soils and seed production of *Cenchrus pauciflorus* Benth[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(3):312-320
- [12] 安瑞军, 王永忠, 田迅. 外来入侵植物——少花蒺藜草研究进展[J]. *杂草科学*, 2015, 33(1):27-31
- AN R J, WANG Y Z, TIAN X. Research progress of the invasive plant—*Cenchrus pauciflorus* [J]. *Weed Science*, 2015, 33(1):27-31
- [13] 孙忠林, 淑琴, 高凯, 等. 少花蒺藜草入侵现状、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
- [14] 曲婷, 田迅, 周立业. 入侵植物少花蒺藜草种子异型性及种群维持策略[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(8):2622-2628
- QU T, TIAN X, ZHOU L Y. Seed heteromorphism and population maintenance strategy of invasive plant *Cenchrus pauciflorus* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(8):2622-2628
- [15] PENNACCHI J P, LIRA J M S, RODRIGUES M, et al. A systemic approach to the quantification of the phenotypic plasticity of plant physiological traits: the multivariate plasticity index[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2021, 72(5):1864-1878
- [16] LIU R R, WANG L, TANVEER M, et al. Seed heteromorphism: an important adaptation of halophytes for habitat heterogeneity[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9:1515
- [17] MILBERG P, ANDERSSON L, THOMPSON K. Large-seeded spices are less dependent on light for germination than small-seeded ones[J]. *Seed Science Research*, 2000, 10(1):99-104
- [18] ZHANG M, ZHU J J, YAN Q L. Review on influence mechanisms of light in seed germination: review on influence mechanisms of light in seed germination[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(8):899-908
- [19] SONG K, CHOI G. *Phytochrome regulation of seed germination [M]//Phytochromes*. New York, NY: Springer New York, 2019:149-156
- [20] 曲婷, 周立业. 入侵植物少花蒺藜草异型种子萌发策略及其幼苗生长特性[J]. *草业学报*, 2022, 31(6):91-100
- QU T, ZHOU L Y. Seed germination strategy and seedling growth characteristics of heteromorphic seeds of the invasive weed *Cenchrus incertus* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(6):91-100
- [21] ACOSTA Y, PÉREZ L, ESCALANTE D, et al. Heteromorphic seed germination and seedling emergence in the legume *Teramnus labialis* (L. f.) Spreng (Fabaceae) [J]. *Botany*, 2020, 98(7):371-379
- [22] CARTER C T, UNGAR I A. Germination response of dimorphic seeds of two halophyte species to environmentally controlled and natural conditions[J]. *Canadian Journal of Botany*, 2003, 81(9):918-926
- [23] ABLEY K, GOSWAMI R, LOCKE J C W. Bet-hedging and variability in plant development: seed germination and beyond[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2024, 379(1900):20230048
- [24] MATSUO M, SAKAI T, KAWANO Y. Seed heteromorphism in *Carolina* dayflower (*Commelina caroliniana* Walter) [J]. *Weed Biology and Management*, 2016, 16(4):169-176
- [25] SIMONS A M, JOHNSTON M O. Environmental and genetic sources of diversification in the timing of seed germination: implications for the evolution of bet hedging[J]. *Evolution*, 2006, 60(11):2280-2292
- [26] LEVERETT L D, JOLLS C L. Cryptic seed heteromorphism in *Packera tomentosa* (Asteraceae): differences in mass and germination[J]. *Plant Species Biology*, 2014, 29(2):169-180
- [27] SIMONS A M. Modes of response to environmental change and the elusive empirical evidence for bet hedging[J]. *Proceedings: Biological Sciences*, 278(1712):1601-1609
- [28] VELIJEVIC N, STRBANOVIC R, POSTIC D, et al. Effects of seed coat colour on the seed quality and initial seedling growth of red clover cultivars (*Trifolium pratense*) [J]. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 2017, 21(3):174-177
- [29] KADEREIT G, NEWTON R J, VANDELOOK F. Evolutionary ecology of fast seed germination—a case study in *Amaranthaceae/Chenopodiaceae* [J]. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2017, 29:1-11
- [30] COMAS L H, BECKER S R, CRUZ V M V, et al. Root traits contributing to plant productivity under drought[J]. *Frontiers*

- in Plant Science, 2013, 4: 442
- [31] SCHOLL J P, CALLE L, MILLER N, et al. Offspring polymorphism and bet hedging: a large-scale, phylogenetic analysis[J]. Ecology Letters, 2020, 23(8): 1223-1231
- [32] STARRFELT J, KOKKO H. Bet-hedging—a triple trade-off between means, variances and correlations [J]. Biological Reviews, 2012, 87(3): 742-755
- [33] SIEBENKÄS A, SCHUMACHER J, ROSCHER C. Phenotypic plasticity to light and nutrient availability alters functional trait ranking across eight perennial grassland species [J]. AoB Plants, 2015, 7: plv029
- [34] 曾译欧. 光照对植物枝叶生长和生物量的影响研究进展[J]. 农业技术与装备, 2022(12): 57-59
- ZENG Y O. Research progress on the effects of light on the growth and biomass of plant branches and leaves [J]. Agricultural Technology & Equipment, 2022(12): 57-59
- [35] 许大全, 张玉忠, 张荣铎. 植物光合作用的光抑制[J]. 植物生理学通讯, 1992, 28(4): 237-243
- XU D Q, ZHANG Y Z, ZHANG R X. Photoinhibition of photosynthesis in plants [J]. Plant Physiology Communications, 1992, 28(4): 237-243
- [36] 王多栋, 高金晖, 王晓英. 植物对逆境的光合生理生态适应性研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(8): 43-45, 47
- WANG D D, GAO J H, WANG X Y. Research on the stress adaptation of plant physiological ecology of photosynthesis [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(8): 43-45, 47
- [37] 张志新, 田迅. 干旱和灌溉条件下小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]. Prata-cultural Science, 2011, 28(2): 185-188
- [38] VÁZQUEZ D P, GIANOLI E, MORRIS W F, et al. Ecological and evolutionary impacts of changing climatic variability [J]. Biological Reviews, 2017, 92(1): 22-42
- [39] VALLADARES F, MATESANZ S, GUILHAUMON F, et al. The effects of phenotypic plasticity and local adaptation on forecasts of species range shifts under climate change [J]. Ecology Letters, 2014, 17(11): 1351-1364
- [40] CAO J, XU J, PAN X B, et al. Potential impact of climate change on the global geographical distribution of the invasive species, *Cenchrus spinifex* (Field sandbur, Gramineae) [J]. Ecological Indicators, 2021, 131: 108204
- [41] YANNELLI F A, HUGHES P, KOLLMANN J. Preventing plant invasions at early stages of revegetation: the role of limiting similarity in seed size and seed density [J]. Ecological Engineering, 2017, 100: 286-290
- [42] MORAIS M C, FREITAS H. The acclimation potential of *Acacia longifolia* to water stress: implications for invasiveness [J]. Plant Science, 2012, 196: 77-84

(责任编辑 闵芝智)