文章编号:1000-7601(2025)05-0026-08 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.03

干旱胁迫下 4 种一年生植物种子萌发特性及抗旱性评价

肖 斌[1],郭树江[1,3],李 亚[1],李得禄[1],王 飞[1,2]

(1. 甘肃省治沙研究所,甘肃 兰州 730070;2. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,甘肃 民勤 733300;
3. 甘肃临泽荒漠生态系统国家定位观测研究站,甘肃 临泽 734200)

摘 要:为了解干旱胁迫对一年生荒漠草本植物种子萌发的影响,以民勤荒漠绿洲过渡带典型植物雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、画眉草(*Eragrostis pilosa*)种子为试验材料,采用不同浓度 PEG-6000 溶液(5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%)模拟干旱胁迫,研究了 4 种一年生草本植物种子萌发指标、生长指标和恢复萌发率对干旱胁迫的响应,并采用隶属函数法综合评价了 4 种植物种子萌发期的抗旱性。结果表明:(1)随着 PEG-6000 浓度的增加,4 种植物种子萌发指标均呈显著下降趋势;当 PEG-6000 浓度分别为≥20%、30%、10%、30%时,雾冰藜、白茎盐生草、沙米和画眉草种子萌发受到显著抑制,与对照相比分别显著下降了 14.66%~99.14%、65.71%~83.81%、5.00%~95.00%、44.86%~73.83%;沙米种子萌发势、萌发指数显著高于其他 3 种植物($P<0.05$),白茎盐生草、雾冰藜种子活力指数显著高于其他两种植物($P<0.05$)。(2)4 种植物种子胚芽长、胚根长和鲜质量随 PEG-6000 浓度升高均呈下降趋势,当 PEG-6000 浓度≥10%时,雾冰藜、白茎盐生草、沙米和画眉草种子生长均受到显著抑制,与对照相比上述生长指标下降范围分别为 21.57%~98.24%、17.48%~87.91%、16.64%~89.58%、12.86%~94.87%。(3)干旱胁迫解除后,4 种植物种子恢复萌发率存在差异,表现为雾冰藜>画眉草>沙米>白茎盐生草。在 5%~25% PEG 浓度下,雾冰藜、白茎盐生草、沙米种子仍能恢复萌发;画眉草种子在各浓度下均能恢复萌发。(4)4 种植物种子萌发期抗旱性强弱表现为白茎盐生草>沙米>雾冰藜>画眉草。

关键词:荒漠草本植物;一年生植物;干旱胁迫;萌发特性;抗旱性评价

中图分类号:S58;Q945.34;Q945.78 **文献标志码**:A

Seed germination characteristics and drought resistance evaluation of four annual plants under drought stress

XIAO Bin[1], GUO Shujiang[1,3], LI Ya[1], LI Delu[1], WANG Fei[1,2]

(1. *Gansu Desert Control Resesrch Instituite*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
2. *Gansu Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem*, *Minqin*, *Gansu* 733300, *China*;
3. *Gansu Linze Desert Ecosystem National Observation and Research Station*, *Linze*, *Gansu* 734200, *China*)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of drought stress on seed germination of annual desert herbaceous plants. The seeds of *Bassia dasyphylla*, *Halogeton arachnoideus*, *Agriophyllum squarrosum*, and *Eragrostis pilosa* in the Minqin Desert Oasis Transitional Zone were used as experimental materials. PEG-6000 of different concentrations was applied to simulate drought stress. The response of germination indicators, growth indicators, and germination recovery rate of four annual herbaceous plant seeds to drought stress was analyzed, and the drought resistance of four plant seeds was evaluated comprehensively by the subordinate function method. The results showed that: (1) As PEG-6000 concentration increased, the germination indices of all four plant species declined significantly. When PEG-6000 concentrations were≥20%, 30%, 10%, and 30%, seed germination of *B. dasyphylla*, *H. arachnoideus*, *A. squarrosum*, and *E. pilosa* was significantly inhibited. Compared to the control,

收稿日期:2025-03-26 **修回日期**:2025-05-19

基金项目:中央引导地方发展专项(2424ZYQA052);国家地区科学基金(32360271,32360329);中央林业草原生态保护恢复资金项目(甘林规函[2024]755 号)

作者简介:肖斌(1984-),男,甘肃张掖人,高级工程师,主要从事荒漠生态研究。E-mail:1212235@qq.com

通信作者:郭树江(1984-),男,甘肃永昌人,研究员,主要从事荒漠生态研究。E-mail:shujguo@126.com

their germination rates decreased markedly by 14.66%~99.14%, 65.71%~83.81%, 5.00%~95.00%, and 44.86%~73.83%, correspondingly.The germination potential and germination index of *A. squarrosum* seeds were significantly higher than those of the other three species ($P<0.05$), while the vitality index of *H. arachnoideus* and *B. dasyphylla* seeds was significantly higher than that of the other two species ($P<0.05$).(2) The germ length, radicle length, and fresh mass of four plant seeds decreased with increasing PEG-6000 concentrations. When PEG-6000 concentration was ≥10%, the growth indicators of *B. dasyphylla*, *H. arachnoideus*, *A. squarrosum*, and *E. pilosa* seeds were significantly inhibited, showing reductions of 21.57%~98.24%,17.48%~87.91%, 16.64%~89.58%, and 12.86%~94.87%, respectively, compared to the control group. (3) After drought stress relief, recovery germination rates varied among the species, ranked as *B. dasyphylla* > *E. pilosa* > *A. squarrosum* > *H. arachnoideus*. Seeds of *B. dasyphylla*, *H. arachnoideus*, and *A. squarrosum* could resume germination at PEG concentrations of 5%~25%, while *E. pilosa* seeds exhibited recovery germination across all tested concentrations.(4) The drought resistance of the seeds of four plants during germination was as follows: *H. arachnoideus* > *A. squarrosum* > *B. dasyphylla* > *E. pilosa*.

Keywords: desert herbaceous plant; annual plant; drought stress; germination characteristics; drought resistance evaluation

随着全球变暖和气候变化,干旱荒漠区降水量减少、极端天气频发[1]、沙尘暴频繁,导致干旱愈加严重。水分是干旱区生态系统诸多生态过程的主要制约因子[2],包括植物种子萌发[3]、幼苗存活[4]、土壤-植被生态系统演变[5]等等。种子萌发是种子生活史过程中最脆弱的时期[6],对外界环境变化敏感,直接影响植物生长繁殖、种群持续与恢复重建[7]。植物种子萌发特性对非生物胁迫因子的响应机制是植物学家研究重点。作为干旱区生态系统的主要构成部分和恒有层片[8],一年生草本植物遍及沙质、盐碱土、砾质等荒漠土中,长期的进化过程中形成了复杂的生存适应策略,在防风固沙、物种多样性、生态系统持续稳定发展中发挥着重要作用[9-10]。因此,深入开展一年生草本植物种子萌发对干旱环境适应机制研究,对揭示植物抗旱机理、指导栽培实践以及优化生态恢复技术具有极其重要的意义。

雾冰藜(*Bassiada syphylla*)、白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、画眉草(*Eragrostis pilosa*)在民勤荒漠绿洲过渡带分布广泛,繁殖能力强,是良好的耐旱、耐贫瘠沙生植物,在保持该区生态平衡及可持续发展中发挥着重要作用[11-13]。但随着全球气候变化与地下水位下降,该区人工固沙林出现不同程度的衰败[14],一年生草本植物受生活史、功能特性等影响,对干旱环境变化更加敏感。目前,有关荒漠区白茎盐生草[15]、沙米[16-17]、画眉草[18]种子萌发期耐旱性研究已有相关报道,并分别找出了种子耐旱阈值和极限值;而对雾冰藜种子萌发期耐旱性研究报道很少,尤其是对这 4 种一年生草本植物种子萌发期耐旱差异性研究更是鲜有报道。

PEG-6000 是一种强亲水性的大分子有机物,能够夺取水分并造成植物干旱胁迫,常被作为水分胁迫剂用于模拟干旱胁迫。本文以民勤荒漠绿洲过渡带典型一年生草本植物雾冰藜、白茎盐生草、沙米、画眉草种子为试验材料,通过 PEG-6000 模拟干旱胁迫,测定其萌发指标、生长指标及胁迫解除后的恢复萌发率,并对 4 种一年生荒漠草本植物种子萌发期抗旱能力进行综合评价,以期为干旱荒漠区开展人工林草本层植物栽培与恢复提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试的 4 种荒漠植物种子 2023 年采集于民勤沙生植物园附近(102°03′~103°03′E, 38°05′~39°06′N,海拔为 1 378 m),人工处理后贮存于通风、干燥的种子室中待用。雾冰藜、白茎盐生草、沙米、画眉草种子的千粒重分别为 0.610、0.321、1.244、0.068 g,含水量分别为 6.392%、5.823%、8.376%、12.144%。当年采集的沙米和画眉草种子存在休眠现象,采用 400 mmol·L^{-1}乙烯利溶液打破休眠再进行控制试验[19-20]。用 5% NaClO 溶液浸泡种子 10~15 min,消除种子表面细菌,随后用蒸馏水清洗 3 次后自然风干待用。

1.2　试验方法

采用高分子渗透剂 PEG-6000 模拟干旱胁迫,设置了 7 个浓度梯度为 5%、10%、15%、20%、25%、

30%、35%，对应的渗透势分别为0.05、0.15、0.30、0.49、0.73、1.03、1.37 Mpa[21]，以蒸馏水处理为对照（CK）。选择籽粒饱满、大小均匀、无病虫害的种子置于垫有2层滤纸的培养皿（直径9 cm）中，每个培养皿中40粒种子，分别加入等量的不同浓度PEG-6000溶液，放入人工气候箱内在黑暗条件下萌发，温度为25℃，每个梯度设置了3次重复，发芽床2 d更换1次，确保PEG-6000溶液浓度保持在试验设计范围之内。以胚根突破种皮视为萌发，每天定时观测种子萌发数量，7 d后停止观测，每个培养皿中随机挑选5株幼苗，分别测定胚芽、胚根的长度及鲜质量。对未萌发的种子进行恢复萌发试验，用蒸馏水将各浓度下种子分别冲洗3次，稀释后每天定时观测，连续观测3 d后统计种子萌发数。

1.3 测定指标

$$\text{萌发率}(\%) = n/N \times 100\%$$

$$\text{萌发势}(\%) = n_1/N \times 100\%$$

$$\text{萌发指数} = \sum Nt/Dt$$

$$\text{活力指数} = GI \cdot S$$

$$\text{恢复萌发率}(\%) = (rn/N) \times 100\%$$

$$\text{总萌发率} = \text{萌发率} + \text{恢复萌发率}$$

式中，n为种子萌发粒数；N为种子总粒数；n_1为3 d内萌发种子数；Nt为在t日后的萌发数；Dt为相应的萌发天数；GI为萌发指数；S为幼苗长势，用萌发后幼苗长度表示，单位为cm；rn为种子恢复萌发粒数。

1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2010进行试验数据统计。利用SPSS 19.0进行差异显著性检验，Origin 2021完成图形绘制。采用隶属函数法对4种植物种子萌发期抗旱性进行综合评价，计算公式如下：

$$U(X_i) = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

式中，$U(X_i)$为各个指标的隶属值；X_i为第i个指标的相对变化值，X_i=（干旱胁迫处理下平均值-对照值）/对照值；$X_{\max}$为所有植物第i个指标相对变化值的最大值；$X_{\min}$表示所有植物第i个指标相对变化值的最小值。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对4种植物种子萌发的影响

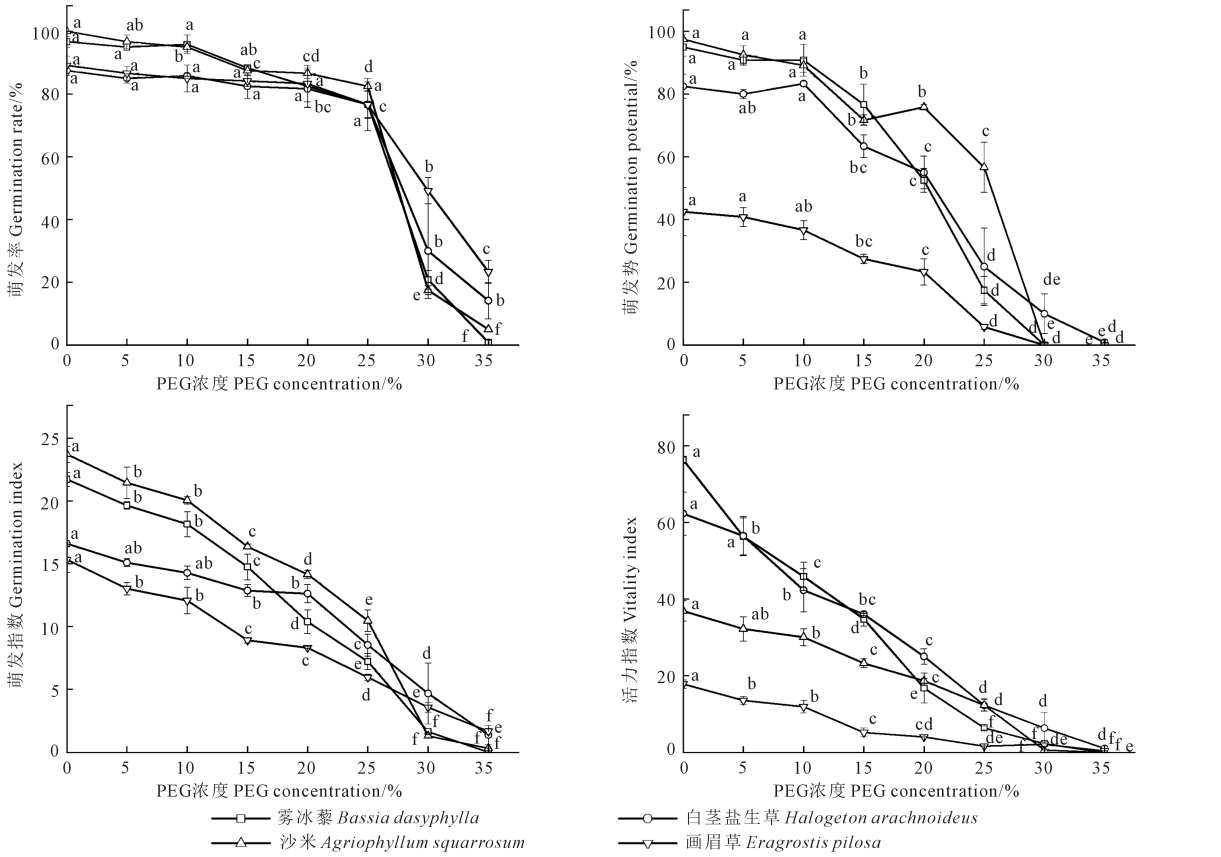
随着PEG浓度的增加，4种植物种子萌发率、萌发势、萌发指数、活力指数均呈下降趋势（图1），且不同浓度之间差异极显著（$P<0.01$）。4种植物种子萌发率均以对照最大，表明干旱胁迫抑制了种子萌发。雾冰藜种子在5%~15% PEG浓度下萌发率与对照差异不显著（$P>0.05$），在20%~35% PEG浓度下萌发率与对照相比显著下降了14.66%~99.14%（$P<0.05$）；白茎盐生草种子在5%~25% PEG浓度下萌发率与对照差异不显著（$P>0.05$），在30%~35% PEG浓度时萌发率与对照相比显著下降了65.71%~83.81%（$P<0.05$）；沙米种子在5% PEG浓度下萌发率与对照差异不显著（$P>0.05$），在10%~35% PEG浓度时萌发率与对照相比显著下降了5%~95%（$P<0.05$）；画眉草种子在5%~25% PEG浓度下萌发率与对照差异不显著（$P>0.05$），在30%~35% PEG浓度时萌发率与对照相比显著下降了44.86%~73.83%（$P<0.05$）。以上表明轻度干旱胁迫对4种植物种子的萌发影响不大，随着干旱胁迫程度加剧，抑制作用加强，对雾冰藜种子萌发率影响最大，画眉草最小。

4种植物种子在PEG浓度为5%~10%时萌发势与对照之间均无显著差异（$P>0.05$），雾冰藜、沙米和画眉草在PEG浓度为30%、35%时萌发势均为0，表明水分胁迫抑制了种子萌发，而白茎盐生草虽然在30%和35% PEG浓度下仍有萌发，但与对照相比显著下降了87.88%和98.99%。在不同浓度下，雾冰藜、沙米和画眉草种子萌发指数与对照之间差异显著（$P<0.05$），而白茎盐生草种子在5%和10% PEG浓度下萌发指数与对照之间无显著差异（$P>0.05$），在15%~35% PEG浓度下萌发指数与对照相比显著下降了22.45%~91.49%（$P<0.05$）。雾冰藜和画眉草种子在干旱胁迫下活力指数与对照相比显著下降（$P<0.05$），分别下降了26.15%~99.99%和23.78%~97.38%；白茎盐生草和沙米种子活力指数在5% PEG浓度下与对照无显著差异（$P>0.05$），但在10%~35% PEG浓度下活力指数与对照相比显著（$P<0.05$）下降了9.34%~98.25%和12.68%~99.88%。以上表明干旱胁迫抑制了4种植物种子的萌发势、萌发指数和活力指数，推迟了种子萌发进程，种子活力下降。

由表1可知，在干旱胁迫下，萌发率变化主要受PEG浓度及植物种的共同作用（$P<0.01$），而受植物物种作用影响不显著（$P>0.05$）。萌发势、萌发指数与活力指数变化均受植物物种、PEG浓度及两者共同作用的影响（$P<0.01$），其中沙米种子萌发势、萌发指数显著高于其他3种植物（$P<0.05$），白茎盐生草与雾冰藜种子活力指数显著高于其他2种植物（$P<0.05$）。

2.2　干旱胁迫对 4 种植物幼苗生长的影响

如表 2 所示,随着 PEG 浓度的增加,4 种植物种子胚芽长、胚根长和鲜质量均呈下降趋势,且不同浓度之间均呈极显著差异($P<0.01$),表明水分胁迫不同程度地抑制了 4 种植物幼苗生长。在 5% PEG 浓度下,雾冰藜、白茎盐生草和画眉草幼苗胚芽长度



注:不同小写字母表示同一物种在不同胁迫水平下差异显著($P<0.05$)。下同。

Notes: Different lowercase letters indicate significant differences between different stress levels under the same species ($P<0.05$). The same below.

图 1　干旱胁迫对 4 种植物种子萌发率、萌发势、萌发指数和活力指数的影响

Fig.1　Effects of drought stress on seed germination rate, germination potential, germination index, and vitality index of 4 plant seeds

表 1　萌发指标的双因素方差分析结果

Table 1　Two-way ANOVA results of germination indexes

指标 Index	变异源 Source of variation	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	*F* 值 *F* value	*P* 值 *P* value
萌发率 Germination rate	植物种 Species	3	86.89	1.53	0.22
	PEG 浓度 PEG concentration	7	12067.52	212.81	<0.01
	植物种×PEG 浓度 Species×PEG concentration	21	170.52	3.01	<0.01
萌发势 Germination potential	植物种 Species	3	6745.49	133.01	<0.01
	PEG 浓度 PEG concentration	7	12784.97	252.09	<0.01
	植物种×PEG 浓度 Species×PEG concentration	21	472.47	9.32	<0.01
萌发指数 Germination index	植物种 Species	3	98.72	59.13	<0.01
	PEG 浓度 PEG concentration	7	549.41	329.09	<0.01
	植物种×PEG 浓度 Species×PEG concentration	21	15.19	9.10	<0.01
活力指数 Vitality index	植物种 Species	3	2865.22	150.39	<0.01
	PEG 浓度 PEG concentration	7	3744.42	196.53	<0.01
	植物种×PEG 浓度 Species×PEG concentration	21	302.09	15.86	<0.01

与对照差异不显著($P>0.05$),但仍分别下降了 14.22%、2.73%、8.96%,在 10%~35% PEG 浓度下,幼苗胚芽长度分别比对照显著降低了 21.57%~98.24%、17.48%~87.91%、12.86%~78.74%;在 5%和 10% PEG 浓度下,沙米幼苗胚芽长度与对照差异不显著($P>0.05$),分别下降了 0.76%和 6.56%,在 15%~35% PEG 浓度下,幼苗胚芽长度比对照显著降低了16.64%~87.82%。以上分析表明,在 PEG 浓度分别为 10%、10%、15%、10%时,雾冰藜、白茎盐生草、沙米和画眉草种子胚芽生长明显受到抑制,干旱胁迫对沙米胚芽生长影响最大,对画眉草影响最小。

在 5% PEG 浓度下,雾冰藜、白茎盐生草幼苗胚根长度与对照差异不显著($P>0.05$);在 10%~35% PEG 浓度下,幼苗胚根长度分别比对照显著降低了 33.92%~97.79%、25.40%~76.97%。在 5%~20% PEG 浓度下,沙米幼苗胚根长度与对照差异不显著($P>0.05$);在 25%~35% PEG 浓度下,幼苗胚根长度比对照显著降低了 18.22%~87.70%。在 5%和 10% PEG 浓度下,画眉草幼苗胚根长度与对照差异不显著($P>0.05$);在 15%~35% PEG 浓度下,幼苗胚根长度比对照显著降低了 55.69%~78.78%。以上表明,在 PEG 浓度分别为 10%、10%、25%、15%时,雾冰藜、白茎盐生草、沙米和画眉草种子胚根生长明显受到抑制。结合胚芽生长状况,4 种植物的胚芽生长受到胁迫的抑制程度大于胚根生长。

由表 3 可知,在 5%和 10% PEG 浓度下,雾冰藜幼苗鲜质量与对照差异不显著($P>0.05$),但仍比对照分别下降了 3.24%、12.92%;在 15%~30%PEG 浓度下,幼苗鲜质量比对照显著降低了 27.43%~59.70%;在 35% PEG 浓度下,雾冰藜幼苗鲜质量为 0。在 5% PEG 浓度下,白茎盐生草幼苗鲜质量与对照差异不显著($P>0.05$),但仍比对照下降了7.69%;在 10%~35% PEG 浓度下,幼苗鲜质量比对照显著降低了 19.23%~55.77%。在 5% PEG 浓度下,沙米幼苗鲜质量与对照差异不显著($P>0.05$),比对照上升了 1.04%;在 10%~35% PEG 浓度下,幼苗鲜质量

表 2 干旱胁迫对 4 种植物幼苗胚芽长、胚根长的影响/cm

Table 2 Effects of drought stress on germ and radicle length of 4 plant seedlings

PEG 浓度/% PEG Concentration	雾冰藜 *B.dayphylla*		白茎盐生草 *H.arachnoide*		沙米 *A.squarrosum*		画眉草 *E.pilosa*	
	胚芽长 Germ length	胚根长 Radicle length	胚芽长 Germ length	胚根长 Radicle length	胚芽长 Germ length	胚根长 Radicle length	胚芽长 Germ length	胚根长 Radicle length
0(CK)	1.61±0.08a	1.90±0.02a	1.82±0.07a	1.92±0.26ab	0.49±0.02a	1.06±0.05a	0.56±0.01a	0.60±0.01a
5	1.38±0.11ab	1.49±0.17ab	1.77±0.15a	1.97±0.21a	0.49±0.01a	1.01±0.06ab	0.51±0.03ab	0.53±0.02a
10	1.26±0.06bc	1.26±0.06b	1.50±0.09b	1.43±0.19bc	0.46±0.01a	1.01±0.08ab	0.49±0.04b	0.49±0.02a
15	1.10±0.03c	1.26±0.10b	1.39±0.05b	1.41±0.10bc	0.41±0.01b	1.00±0.05ab	0.32±0.06c	0.33±0.06b
20	0.80±0.13d	0.79±0.12c	0.77±0.12c	1.21±0.04cd	0.36±0.01c	0.96±0.04ab	0.28±0.04c	0.30±0.06b
25	0.56±0.12d	0.77±0.19c	0.48±0.01d	0.96±0.04cd	0.31±0.02d	0.87±0.08b	0.26±0.01c	0.27±0.01bc
30	0.28±0.02e	0.62±0.04c	0.43±0.04d	0.74±0.15de	0.25±0.01e	0.28±0.02c	0.16±0.01d	0.16±0.01c
35	0.03±0.03f	0.04±0.04d	0.22±0.07d	0.44±0.17e	0.06±0.01f	0.12±0.01d	0.12±0.01d	0.13±0.02c

注:同列不同小写字母表示同一物种在不同胁迫水平下差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences between different stress levels under the same species ($P<0.05$). The same below.

表 3 干旱胁迫对 4 种植物幼苗鲜质量的影响/mg

Table 3 Effects of drought stress on fresh mass of 4 plant seedlings

PEG 浓度/% PEG concentration	雾冰藜 *B.dayphylla*	白茎盐生草 *H.arachnoide*	沙米 *A.squarrosum*	画眉草 *E.pilosa*
0(CK)	20.67±2.91a	17.33±0.08a	32.00±1.16a	2.60±0.15a
5	20.00±0.58a	16.00±1.73ab	32.33±1.20a	2.23±0.32a
10	18.00±1.53ab	14.00±1.16bc	26.00±3.22b	2.37±0.24a
15	15.00±1.73bc	14.00±1.00bc	18.00±1.73c	1.60±0.35b
20	14.33±0.33bc	12.00±0.58cd	15.33±1.77c	1.10±0.06bc
25	12.33±1.86cd	11.33±0.67cd	14.00±1.00cd	0.70±0.06cd
30	8.33±1.20d	10.33±0.67de	9.33±0.88d	0.37±0.03d
35	0.00e	7.67±0.88e	3.33±0.33e	0.13±0.03d

比对照显著降低了 18.75%~89.58%。在 5%和 10% PEG 浓度下,画眉草幼苗鲜质量与对照差异不显著($P>0.05$),但仍比对照分别下降了 14.10%和 8.97%;在 15%~35% PEG 浓度下,幼苗鲜质量比对照显著降低了 38.46%~94.87%。

2.3　干旱胁迫对 4 种植物种子恢复萌发率的影响

由图 2 可知,干旱胁迫解除后,随着 PEG 浓度的增加,4 种植物种子恢复萌发率整体呈上升趋势,均在 35% PEG 浓度时最高,且不同浓度之间均差异极显著($P<0.01$)。经方差分析表明,雾冰藜和画眉草种子恢复萌发率显著高于沙米和白茎盐生草($P<0.05$),雾冰藜种子恢复萌发率显著高于画眉草($P<0.05$),沙米和白茎盐生草种子恢复萌发率差异不显著($P>0.05$),具体表现为雾冰藜>画眉草>沙米>白茎盐生草。在干旱胁迫和胁迫解除后,雾冰藜、白茎盐生草、沙米种子总萌发率在 5%~25% PEG 浓度之间时与对照差异不显著($P>0.05$),而在 30%~35% PEG 浓度时与对照相比显著降低($P<0.05$),以上说明轻度的水分胁迫抑制了这 3 种植物种子萌发,但在胁迫解除后植物种子仍能恢复萌发,具有一定适应干旱胁迫的能力;画眉草种子总萌发率在 10%~35% PEG 浓度时低于对照均差异不显著($P>0.05$),而在 5% PEG 浓度时高于对照但差异不显著($P>0.05$)。

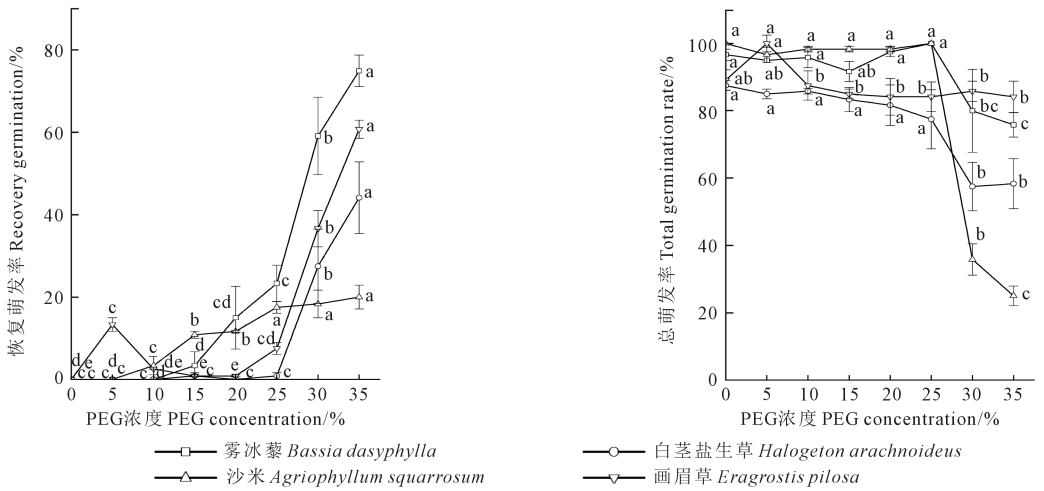


图 2　干旱胁迫对 4 种植物种子恢复萌发率和总萌发率的影响

Fig.2　Effects of drought stress on the recovery germination rate and total germination rate of 4 plant seeds

2.4　4 种植物萌发期抗旱性综合评价

为更客观全面地评价 4 种植物种子萌发期的抗旱性,利用萌发率、萌发势、萌发指数等 9 项指标的相对变化率进行综合分析,分别计算出各指标在不同植物中的隶属值,并以各植物的平均隶属值作为评价其抗旱性强弱的综合指标,其值越大,抗旱性越强。结果显示(表 4),4 种植物 9 项指标的隶属函数值存在一定差异,其平均值介于 0.554~0.589,4 种植物种子萌发期的抗旱性由强到弱依次为白茎盐生草、沙米、雾冰藜、画眉草。

表 4　4 种植物的抗旱性综合评价

Table 4　Comprehensive evaluation of drought resistance among 4 plant species

指标 Index	隶属函数值 Subordinate function value			
	雾冰藜 *B.dayphylla*	白茎盐生草 *H.arachnoide*	沙米 *A.squarrosum*	画眉草 *E.pilosa*
萌发率 Germination rate	0.717	0.774	0.711	0.808
萌发势 Germination potential	0.551	0.600	0.613	0.514
萌发指数 Germination index	0.538	0.648	0.568	0.561
活力指数 Vitality index	0.392	0.486	0.523	0.400
胚芽长 Germ length	0.537	0.568	0.715	0.594
胚根长 Radicle length	0.512	0.633	0.726	0.541
鲜质量 Fresh mass	0.650	0.747	0.581	0.528
恢复萌发率 Recovery germination rate	0.293	0.122	0.136	0.204
总萌发率 Total germination rate	0.800	0.724	0.649	0.839
均值 Mean	0.555	0.589	0.580	0.554
排序 Rank	3	1	2	4

3　讨　论

多数研究表明,干旱胁迫抑制植物种子萌发数量、进程及活力,种子萌发率、萌发势、萌发指数等指标随着胁迫程度增加而降低[22-23],这主要是因为植物种子内部细胞活性氧的生成加速[24-25],使细胞受到损伤或周期异常[26],导致种子无法正常萌发。本研究也进一步验证了这一点,随着 PEG 浓度不断

加深,4种一年生草本植物种子萌发率下降,种子萌发时间、高峰都出现滞后,活力指数同时也受到抑制。本研究发现,植物物种、PEG浓度及其交互作用影响着3种植物种子萌发指标。在低PEG浓度下雾冰藜(5%~15%)、白茎盐生草(5%~25%)、沙米(5%)和画眉草(5%~25%)种子的萌发率与对照相比差异不显著,表明轻度干旱胁迫对植物种子萌发影响不大,但随着PEG浓度的升高4种植物种子萌发率显著下降,这可能是植物种子在轻度干旱胁迫下通过调整脯氨酸等物质来维持相对正常的渗透势,使种子能够顺利萌发。同时,4种植物种子萌发势、萌发指数、活力指数均显著下降,其下降幅度明显大于萌发率的变化幅度,这表明植物种子萌发速度、整齐度及活力对干旱胁迫更为敏感。

研究[27-28]表明,轻度干旱胁迫对植物幼苗胚根生长有促进作用,反之则抑制胚根生长;不同植物幼苗生长对干旱胁迫的响应存在差异[29-30]。本研究中,白茎盐生草在5% PEG浓度时幼苗胚根长度略高于对照,表明了轻度干旱胁迫对白茎盐生草幼苗胚根生长有一定的促进作用,这主要是因为低浓度PEG处理引起了水分亏缺,植物种子通过提高幼苗根和芽营养再分配以吸收更多水分来满足萌发需要[28],但随着PEG浓度的上升,干旱胁迫对种子的抑制作用远超这种促进作用,幼苗生长受阻。雾冰藜、沙米和画眉草种子胚芽长、胚根长和鲜质量随着PEG浓度的增加而显著下降,表明干旱胁迫抑制了3种植物幼苗生长,导致在干旱荒漠环境下植物幼苗很难从土壤中获取水分等营养物质,最终影响植物的生长、存活及繁殖。在高浓度胁迫下,4种植物幼苗出现不同程度"芽苗短小"的现象,表明了植物幼苗抗旱能力已达极限,即使植物种子萌发,幼苗胚根、胚芽生长受阻,仍导致幼苗死亡。

水分胁迫解除后,雾冰藜、白茎盐生草、沙米种子在5%~25% PEG浓度下仍能恢复萌发,画眉草种子在各浓度下均能恢复萌发,与对照均差异不显著($P>0.05$),这与罗光宏等[31],李祎等[32]的研究结果一致,这可能是植物种子通过降低萌发率以适应干旱环境的生态策略,避免种子过早萌发而死亡。干旱胁迫诱发植物种子休眠,当降水发生后,干旱胁迫得到缓解,休眠的种子恢复萌发,这是干旱荒漠区植物种子适应干旱环境的重要表现[32],这是荒漠植物在长期的进化过程中形成的适应干旱贫瘠环境的一种策略。

植物种子萌发期抗旱性反映了植物在干旱环境中的生存适应能力[33],受到多种因素的影响[34]。为了更加全面了解民勤荒漠-绿洲过渡带4种一年生草本植物种子萌发期的抗旱能力,本研究通过萌发状况、幼苗生长及恢复萌发率等9个指标,结合主成分分析方法进行综合评价发现,白茎盐生草抗旱性最高,画眉草最低,其抗旱能力与种子本身特性以及生理状况有关。不同生长期植物的抗旱能力存在差异,植物种子萌发期抗旱强弱与苗期是否一致仍有待进一步研究。

4 结 论

干旱胁迫对4种一年生草本植物种子萌发指标和生长指标均有显著影响,其抑制作用随着PEG浓度的增加而增大。低浓度PEG-6000对雾冰藜(5%~15%)、白茎盐生草(5%~25%)、沙米(5%)和画眉草(5%~25%)种子的萌发率影响不大,高浓度PEG-6000显著抑制种子萌发。10%及以上PEG-6000浓度对雾冰藜、白茎盐生草、画眉草幼苗长度产生显著影响,而15%及以上PEG-6000浓度对沙米幼苗长度影响较大。干旱胁迫解除后,随着PEG浓度的增加,4种植物种子恢复萌发率整体呈上升趋势,均在35% PEG浓度时最高,说明植物种子在萌发期具有一定的抗旱性,采取降低萌发率以适应干旱环境的策略,轻度干旱胁迫复水后仍恢复萌发。主成分综合评价,4种一年生草本植物种子萌发期抗旱性表现为白茎盐生草>沙米>雾冰藜>画眉草。

参 考 文 献:

[1] 冯延芝, 赵阳, 王保平, 等. 干旱复水对楸叶泡桐幼苗光合和叶绿素荧光的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(4): 1-8.
FENG Y Z, ZHAO Y, WANG B P, et al. Effects of drought and rewatering on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of *Paulownia catalpifolia* seedlings [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(4): 1-8.

[2] 王新平, 张志山, 张景光, 等. 荒漠植被影响土壤水文过程研究述评[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 196-201.
WANG X P, ZHANG Z S, ZHANG J G, et al. Review to researches on desert vegetation influencing soil hydrological processes[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(2): 196-201.

[3] 杨竹青, 王磊, 张雪, 等. 典型固沙植物种子萌发和幼苗生长对土壤水分的响应[J]. 干旱区研究, 2024, 41(5): 830-842.
YANG Z Q, WANG L, ZHANG X, et al. Seed germination and seedling growth of typical sand-fixing plants in response to soil moisture [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(5): 830-842.

[4] 潘慧超, 王俊锋, 敖云娜, 等. 干旱胁迫下华北驼绒藜种子大小及苞片对萌发和幼苗生长的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 399-405.
PAN H C, WANG J F, AO Y N, et al. Effects of seed size and bract of *Ceratoides* arborescens on germination and seedling growth under drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(2): 399-405.

[5] 陈俊芳, 吴宪, 杨佳绒, 等. 全球气候变化下干旱及复水对植物和

土壤微生物的影响:进展与展望[J]. 生态学杂志, 2023, 42(12): 3038-3049.
CHEN J F, WU X, YANG J R, et al. Effects of drought and rewatering on plants and soil microorganisms under climate change: review and perspectives[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(12): 3038-3049.

[6] MILLER T E. Effects of emergence time on survival and growth in an early old-field plant community[J]. Oecologia, 1987, 72(2): 272-278.

[7] 何璐, 虞泓, 范源洪, 等. 植物繁殖生物学研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2010, 29(5): 456-460.
HE L, YU H, FAN Y H, et al. Research progress in plant reproductive biology[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2010, 29(5): 456-460.

[8] 梁存柱, 王炜, 朱宗元, 等. 荒漠区一年生植物层片的组织格局与生态适应模式[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(1): 77-83.
LIANG C Z, WANG W, ZHU Z Y, et al. The organization patterns and ecological adaptive modes of annual plant synusia in desert regions [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(1): 77-83.

[9] 张德魁, 马全林, 刘有军, 等. 河西走廊荒漠区一年生植物组成及其分布特征[J]. 草业科学, 2009, 26(12): 37-41.
ZHANG D K, MA Q L, LIU Y J, et al. Composition and distribution characteristics of annual plant in desert area in Hexi Corridor[J]. Pratacultural Science, 2009, 26(12): 37-41.

[10] 李辛, 赵文智. 雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)种子萌发和幼苗生长对盐碱胁迫的响应[J]. 中国沙漠, 2018, 38(2): 300-306.
LI X, ZHAO W Z. Effects of salt-alkaline mixed stresses on seed germination and seedling growth of *Bassia dasyphylla* in desert region [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(2): 300-306.

[11] 王国华, 任亦君, 缑倩倩. 河西走廊荒漠绿洲过渡带封育对土壤和植被的影响[J]. 中国沙漠, 2020, 40(2): 222-231.
WANG G H, REN Y J, GOU Q Q. The changes of soil physical and chemical property during the enclosure process in a typical desert oasis ecotone of the Hexi Corridor in northwestern China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(2): 222-231.

[12] 何志斌, 赵文智. 黑河流域荒漠绿洲过渡带两种优势植物种群空间格局特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 947-952.
HE Z B, ZHAO W Z. Spatial pattern of two dominant shrub populations at transitional zone between oasis and desert of Heihe River basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 947-952.

[13] 梁存柱, 刘钟龄, 朱宗元, 等. 阿拉善荒漠区一年生植物层片物种多样性及其分布特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 897-903.
LIANG C Z, LIU Z L, ZHU Z Y, et al. Specific diversity and distribution characteristics of annualsynusia in Alashan desert[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(6): 897-903.

[14] 陈芳, 纪永福, 张锦春, 等. 民勤梭梭人工林天然更新的生态条件[J]. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1691-1695.
CHEN F, JI Y F, ZHANG J C, et al. Ecological conditions for natural regeneration of artificial *Haloxylon ammodendron* plantations in Minqin oasis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(9): 1691-1695.

[15] 程龙, 韩占江, 石新建, 等. 白茎盐生草种子萌发特性及其对盐旱胁迫的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 131-136.
CHENG L, HAN Z J, SHI X J, et al. Seed germination characteristics and the response to salt and drought stress in *Halogeton arachnoideus* Bieb[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(3): 131-136.

[16] 陈文, 马瑞君, 王桔红. 盐和 PEG 模拟干旱胁迫对沙米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 113-119.
CHEN W, MA R J, WANG J H. Effect of salt and drought simulated by PEG on seed germination and seedling growth of *Agriophyllum squarrosum*[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(4): 113-119.

[17] 刘雨洁, 孙红, 李晓凤, 等. 流动沙丘先锋植物沙蓬种子库和萌发特性综述[J]. 草业科学, 2024, 41(10): 2207-2216.
LIU Y J, SUN H, LI X F, et al. A review of seed bank and germination characteristics of *Agriophyllum squarrosum*, a pioneer plant on mobile sand dunes [J]. Pratacultural Science, 2024, 41(10): 2207-2216.

[18] 万琪, 叶耘伶, 唐丽, 等. 不同温度条件下水分和盐分胁迫对画眉草种子萌发的影响[J]. 草原与草坪, 2022, 42(3): 154-159.
WAN Q, YE Y L, TANG L, et al. Effects of water stress and salt stress on seed germi-nation of *Eragrostis pilosa* under different temperature regimes[J]. Grassland and Turf, 2022, 42(3): 154-159.

[19] 范树高. 沙米种子休眠机理及休眠破除方法的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
FAN S G. Seed dormancy mechanism and breaking methods in *Agriophylum squarrosum*(L.) Moq[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.

[20] 李雪华, 李晓兰, 蒋德明, 等. 画眉草种子萌发对策及生态适应性[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 607-610.
LI X H, LI X L, JIANG D M, et al. Germination strategy and ecological adaptability of *Eragrostis pilosa*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4): 607-610.

[21] MICHEL B E, KAUFMANN M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000[J]. Plant Physiology, 1973, 51(5): 914-916.

[22] 姜黎, 田长彦. 不同温度盐爪爪种子发芽特性和幼苗期耐旱性[J]. 草业科学, 2023, 40(3): 674-679.
JIANG L, TIAN C Y. Drought tolerance during seed germination and young seedling period of *Kalidium foliatum* under different temperatures[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(3): 674-679.

[23] 王亚楠, 赵思明, 曹兵. PEG-6000 模拟干旱胁迫下 10 种草本植物萌发期抗旱性比较[J]. 草地学报, 2020, 28(4): 983-989.
WANG Y N, ZHAO S M, CAO B. Study on drought resistance of ten herbaceous plants under PEG-6000 simulated drought stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(4): 983-989.

[24] KAYA M D, OKÇU G, ATAK M, et al. Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus annuus* L.)[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 24(4): 291-295.

[25] ZHANG M, JIN Z Q, ZHAO J, et al. Physiological and biochemical responses to drought stress in cultivated and Tibetan wild barley[J]. Plant Growth Regulation, 2015, 75(2): 567-574.

[26] PEKOL S, BALO L M C, CELIK A Y. Evaluation of genotoxic and cytotoxic effects of environmental stress in wheat species with different ploidy levels[J]. Turkish Journal of Biology, 2016, 40(2): 580-588.

[27] 段敏敏, 孙宗玖, 李培英. PEG 胁迫下新疆地区狗牙根种子的萌发特性[J]. 草业科学, 2016, 33(7): 1275-1284.
DUAN M M, SUN Z J, LI P Y. Germination characteristics of *Cynodon dactylon* seed in Xinjiang under PEG stress[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(7): 1275-1284.

(下转第 46 页)