

5种禾草种子萌发及幼苗生长对干旱胁迫的响应和抗旱性评价

张杰雪^{1,2}, 王占青³, 全小龙¹, 梁军¹, 史惠兰³, 陈梦词¹, 乔有明¹

(1. 青海大学省部共建三江源生态和高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016; 2. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016; 3. 青海大学生态环境工程学院, 青海 西宁 810016)

摘要:为了解5种多年生禾草种子萌发期的抗旱性,采用聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱,分别以0, -0.05, -0.15, -0.30, -0.49 MPa PEG-6000溶液作渗透介质,研究了干旱胁迫对同德老芒麦、同德短芒披碱草、青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾、青海中华羊茅5种禾草品种种子的发芽率、发芽势、发芽指数以及幼苗苗高、根长和干重等6个指标的影响。结果表明,随着PEG溶液渗透势降低,5种禾草种子发芽率、发芽势、发芽指数以及幼苗苗高和干重均呈现降低趋势,但各草种的不同指标响应不一致,未发现高渗透势介质对发芽有促进作用,但一定范围的渗透势对青海冷地早熟禾和青海中华羊茅幼苗根的生长有促进作用,而对其他3种禾草幼苗的根则有抑制作用。采用隶属函数法对5种禾草萌发期抗旱性综合评价的结果是同德老芒麦>青海草地早熟禾>短芒披碱草>青海冷地早熟禾>青海中华羊茅。

关键词:多年生禾草; PEG-6000; 干旱胁迫; 种子萌发

中图分类号: S54 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2022)01-0021-08

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2022.01.003



三江源区的高寒草甸重度退化后用草甸原有的嵩草属(*Kobresia*)植物进行草地恢复或重建几乎是不可能的,只有采取人工播种或补播等措施才能实现快速恢复或植被重建的目的。而退化高寒草地恢复或重建一般采用披碱草属(*Elymus*)、早熟禾属(*Poa*)和羊茅属(*Festuca*)等多年生禾草的混播方式进行,播种深度在2 cm以内,播种后主要靠降水和土壤水分完成种子萌发和幼苗生长。由于播深浅,一旦遇到土壤长时间干旱,种子萌发和幼苗生长就会受到胁迫,出现种子不能发芽或幼苗不能存活的问题,特别是早熟禾等小粒

种子植物更易受到影响。萌发被认为是植物生命周期中最关键的阶段,是一个非常复杂的过程,在此过程中,种子需要迅速从休眠状态转换为加速代谢状态,以使胚根和胚芽形成^[1-2],这个过程对干旱胁迫非常敏感^[3]。有关禾草的研究发现,随着渗透势的降低,草地早熟禾(*Poa pratensis*)、冷地早熟禾(*P. crymophila*)等种子的萌发受到抑制^[4],多年生黑麦草(*Lolium perenne*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)和草地早熟禾种子的发芽势和发芽率随渗透势的降低先升高后下降^[5],但也有研究发现蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)种子的发芽率、发芽势、活力指数等随PEG溶液渗透势的降低而降低^[6],干旱胁迫对老芒麦(*Elymus sibiricus*)、披碱草(*E. dahuricus*)等多年生禾本科牧草萌发有显著影响,随着胁迫强度的增加,发芽率、发芽势和胚根长等指标均呈降低趋势^[7]。

聚乙二醇(Polyethylene glycol, PEG-6000)是高分子物质,能通过调节溶液的渗透压来限制水分进入种子内部,而不影响种子内营养物质的积累^[8],常被

收稿日期: 2020-11-10; **修回日期:** 2021-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(31760691); 国家重大研发计划(2017YFC0504803); 高等学校学科创新引智计划(D18013)

作者简介: 张杰雪(1995-),男,新疆人,硕士研究生。

E-mail: jxzhag@163.com

乔有明为通信作者。

E-mail: ymqiao@aliyun.com

作为干旱胁迫的渗透胁迫剂。通常采用不同渗透势的 PEG-6000 溶液诱导干旱胁迫,测定种子发芽率、发芽势、发芽指数,以及幼苗苗高、根长和干重等多个指标评价植物抗旱性^[9-10]。本试验研究了不同渗透势的 PEG 溶液对同德老芒麦(*Elymus sibiricus* cv. Tongde)、同德短芒披碱草(*Elymus breviaristatus* cv. Tongde)、青海冷地早熟禾(*Poa crymophila* cv. Qinghai)、青海草地早熟禾(*Poa pratensis* cv. Qinghai)、青海中华羊茅(*Festuca sinensis* cv. Qinghai)5 种禾草品种种子萌发以及幼苗生长的影响,以期验证高渗透势

是否促进几种多年生栽培牧草种子的萌发,为退化高寒草甸恢复和人工草地的建植及高寒地区牧草抗旱种质资源的选择、应用提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试禾草品种种子分别为同德老芒麦、同德短芒披碱草、青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾、青海中华羊茅的种子。种子采集信息见表 1。

表 1 供试禾草种子

Table 1 Seeds of forage varieties used in the experiments

禾草品种	属	千粒重/g	收获时间	收获地点	缩写
同德老芒麦	披碱草属 <i>Elymus</i>	3.40	2019 年 8 月	同德县青海省牧草良种繁殖场	LM
同德短芒披碱草	披碱草属 <i>Elymus</i>	2.49	2019 年 8 月	同德县青海省牧草良种繁殖场	DP
青海冷地早熟禾	早熟禾属 <i>Poa</i>	0.19	2017 年 8 月	同德县青海省牧草良种繁殖场	LD
青海草地早熟禾	早熟禾属 <i>Poa</i>	0.17	2019 年 8 月	祁连县默勒镇瓦日尕村	CD
青海中华羊茅	羊茅属 <i>Festuca</i>	0.76	2019 年 8 月	同德县青海省牧草良种繁殖场	ZH

1.2 试验方法

1.2.1 禾草种子发芽的测定 2020 年 7 月 15 日从供试禾草种子中筛选出大小均匀、籽粒饱满的成熟种子,用 0.6% 的次氯酸钠(NaClO)溶液对种子和培养皿消毒 15 min,蒸馏水反复冲洗。将消毒的种子均匀摆放在铺有滤纸的培养皿,每个培养皿放置 100 粒。加 2 mL 不同渗透势的 PEG-6000 溶液,称取每个培养皿的原始重量,做好标记。PEG 溶液渗透势分别为 0 (CK),-0.05,-0.15,-0.30,-0.49 MPa,即 5 个处理,每个处理重复 5 次。发芽实验在人工智能光照培养箱中进行,白天和夜晚温度均为 25 ℃,湿度为 80%,光照强度为 2 000 lx,光周期 12 h。每天用称重法补水并记录正常发芽的种子数目,为了减少水势变动,每隔 5 d 更换 1 次无菌滤纸,并及时清理污染发霉的种子。种子发芽以种子的胚芽突破种皮 1~2 mm 为标准。连续记录 21 d,最后计算发芽率,发芽势和发芽指数。

发芽率(Germination rate, GR) = (发芽种子总数/供试种子总数) × 100%

相对发芽率 = (处理种子发芽率/对照种子发芽率) × 100%

发芽势(Germination potential, GP)是规定期限的最初 1/3 期间内的种子发芽数占供试种子数的百分

比为标准^[11],本实验以前 7 d 发芽为准。

相对发芽势 = (处理种子发芽势/对照种子发芽势) × 100%

发芽指数(Germination index, GI) = $\sum(Gt/Dt)$, 式中, Gt 为每天的种子发芽数, Dt 为相应的发芽天数。

相对发芽指数 = (处理种子发芽指数/对照种子发芽指数) × 100%

相对苗高 = (处理幼苗苗高/对照幼苗苗高) × 100%

相对根长 = (处理幼苗根长/对照幼苗根长) × 100%

相对干重 = (处理幼苗干重/对照幼苗干重) × 100%

1.2.2 禾草幼苗生长的测定 幼苗生长试验在人工智能培养箱中进行,白天和夜晚温度均为 25 ℃,湿度为 80%,光照强度为 2 000 lx,光周期 12 h。用 0.6% 的次氯酸钠溶液对种子和培养皿进行消毒 15 min,再用蒸馏水反复冲洗。将消毒过的每个品种约 200 粒种子均匀摆放在铺有滤纸的培养皿中,添加蒸馏水进行发芽,待胚芽长出后,将发芽的种子移植到基质为蛭石和珍珠岩(1:1)的穴盘上。每个穴盘为 25 孔,每孔移植 5 株,每种禾草各种植 5 孔,5 种禾草共移植 125

株,1 个渗透势处理(含对照)为 1 个穴盘,每个渗透势处理(含对照)设 3 次重复,即每个渗透势处理 3 个穴盘。用喷壶均匀喷洒不同渗透势 PEG (0 (CK), -0.05, -0.15, -0.30, -0.49 MPa) 8 mL, 对照 (CK) 喷洒蒸馏水,并用水分测定仪测定不同渗透势处理(含对照)下基质的水分含量,以后每隔 2 d 喷洒蒸馏水以补充基质水分(补充时用水分测定仪检测补充的水分是否达到不同处理基质的水分含量需求),使基质水分含量保持一定。以发芽日起,生长 15 d 后,从每个重复内随机取每种植物 10 株进行测定。将植株幼苗从穴盘中取出,用自来水冲洗根部附着的基质,表面水分晾干后,用游标卡尺测量苗高和根长,最终计算 10 株的平均值,然后将其装入纸袋置入烘箱于 65 ℃ 条件下将植株烘干至恒重后称重,得到 10 株植株总干重。

1.2.3 抗旱性综合评价方法 采用模糊数学中隶属函数法对供试禾草种质抗旱性进行综合评价。求出 5 种供试禾草的各指标在模拟干旱处理下的平均隶属函数值,计算公式如下:

$$u(X_{ab}) = (X_{ab} - X_{bmin}) / (X_{bmax} - X_{bmin})$$

式中: X_{ab} 为 a 禾草 b 指标在某一处理下的均值, X_{bmax} 为当前处理下 b 指标测定最大值, X_{bmin} 为当前处理下 b 指标最小值,当测定指标为负向指标时,应采用反隶属函数:

$$u(X_{ab}) = (X_{bmax} - X_{ab}) / (X_{bmax} - X_{bmin})$$

然后把 b 指标在全部处理下的隶属值累加,求其

平均值,该平均值即为 a 牧草 b 指标的耐旱隶属函数值,其值越大代表供试种质抗旱性越强。

1.3 数据处理

发芽势和发芽率数据在进行方差分析前进行反正弦转换($\arcsin \sqrt{P}$)以使数值方差齐性,分析之后再行逆转换。用 SPSS 20.0 进行方差分析,不同处理间采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著性差异法(LSD)进行处理间差异显著性比较。用 Origin 2018 绘图。

2 结果与分析

2.1 渗透势对 5 种禾草种子萌发的影响

2.1.1 渗透势对禾草种子发芽率和发芽势的影响

对照的发芽率显示,5 种禾草种子发芽率在 70%~90%,其中草地早熟禾最低,只有 71%。PEG 溶液处理后发芽率总体变化趋势是随着 PEG 渗透势的逐步降低而下降,但不同禾草的发芽率对不同渗透势的响应有所不同(图 1)。-0.05 和 -0.15 MPa 处理下同德老芒麦发芽率与 CK 的发芽率无显著差异,青海冷地早熟禾的发芽率也未受到 -0.05 MPa 处理的显著影响。但 2 个高渗透势溶液处理已引起同德短芒披碱草、青海草地早熟禾及中华羊茅发芽率的显著下降($P < 0.05$)。渗透势低于 -0.30 MPa 后,同德老芒麦、同德短芒披碱草、青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾及青海中华羊茅的发芽率分别比对照降低了 21%、22%、

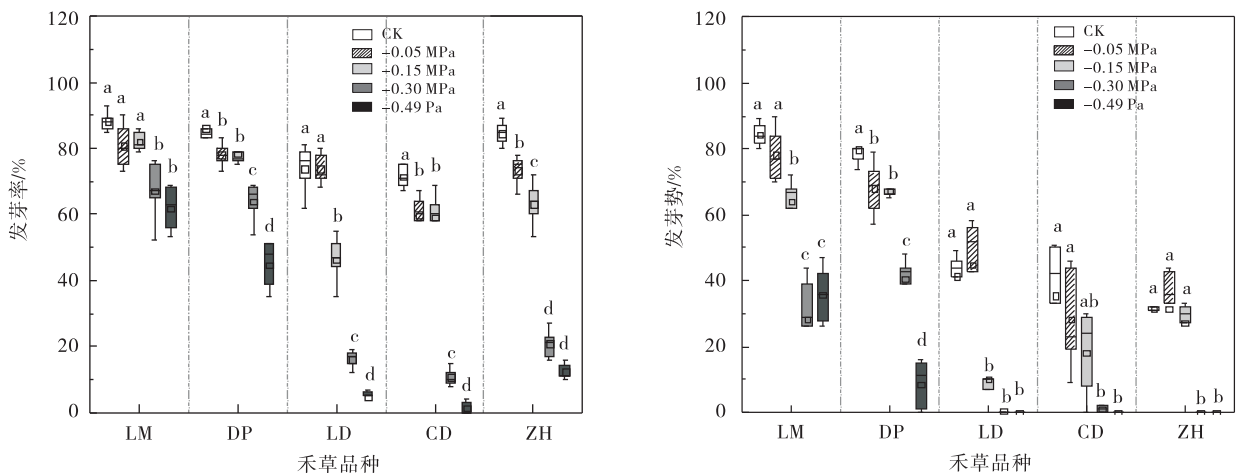


图 1 渗透势下禾草种子发芽率和发芽势

Fig. 1 Effects of osmotic potential on the germination rate and germination potential of grass seeds

注:不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著性($P < 0.05$);LM:同德老芒麦,DP:同德短芒披碱草,LD:青海冷地早熟禾,CD:青海草地早熟禾,ZH:青海中华羊茅

58%、60%和64%，特别是两种早熟禾和中华羊茅的发芽率下降严重。

同德老芒麦、同德短芒披碱草种子的发芽势均大于80%，而青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾及青海中华羊茅发芽势均不到45%，特别是中华羊茅的发芽势只有32%，表明3种小粒禾草种子的发芽具有不整齐性(图1)。PEG溶液处理后5种禾草种子发芽势的变化趋势与发芽率基本一致，因PEG渗透势和禾草的不同存在一定的差异，PEG渗透势为-0.30 MPa时，同德老芒麦、同德短芒披碱草的发芽势分别比对照降低了56%和39%，青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾及青海中华羊茅发芽势接近于0，表明这一渗透势已严重影响这3种禾草的发芽整齐性。

2.1.2 渗透势对禾草种子发芽指数的影响 2种披碱草属禾草对照的种子发芽指数不到20%，2种早熟禾及青海中华羊茅对照的种子发芽指数在10%左右；不同渗透势的PEG溶液对5种禾草种子发芽指数的影响与发芽率和发芽势一致，随着PEG渗透势的逐步降低，发芽指数急剧降低(表2)。当PEG渗透势降为-0.15 MPa时，青海冷地早熟禾发芽指数比对照低50%以上，PEG渗透势降至-0.30 MPa时，同德老芒麦和同德短芒披碱草种子的发芽指数低于对照50%，而青海草地早熟禾和青海中华羊茅的发芽指数降幅超过80%，表明低渗透势PEG溶液处理可导致5种禾草种子的活力进一步降低。

表2 渗透势下禾草种子发芽指数

Table 2 Effect of osmotic potential on the germination index of grass seeds

处理	发芽指数				
	LM	DP	LD	CD	ZH
CK	18.95±0.70 ^a	18.51±0.84 ^a	10.34±1.25 ^a	9.75±1.83 ^a	10.66±0.37 ^a
-0.05 MPa	16.62±2.29 ^a	14.37±1.82 ^b	10.67±1.91 ^a	7.69±1.90 ^b	9.06±2.23 ^b
-0.15 MPa	13.95±1.63 ^b	14.14±0.64 ^b	4.83±1.06 ^b	6.96±1.47 ^b	7.72±0.75 ^b
-0.30 MPa	8.37±2.58 ^c	9.29±1.11 ^c	1.57±0.19 ^c	0.98±0.43 ^c	1.73±0.55 ^c
-0.49 MPa	8.52±1.20 ^c	4.66±1.18 ^d	0.40±0.24 ^c	0.09±0.12 ^c	0.92±0.24 ^c

注：数值为平均值±标准差，同列不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著性($P < 0.05$)。

2.2.1 渗透势对禾草幼苗干重的影响 同德老芒麦和同德短芒披碱草幼苗干重在PEG渗透势为-0.05 MPa就出现降低($P < 0.05$)。PEG渗透势分别降为-0.15和-0.30 MPa时对青海冷地早熟禾和青海草地早熟禾幼苗干重开始产生影响，而对青海中华羊茅

2.2 渗透势对5种禾草幼苗生长的影响

2.2.1 渗透势对禾草幼苗苗高和根长的影响 不同渗透势的PEG溶液对5种禾草幼苗苗高和根长均有不同程度的影响(图2)。与对照相比，PEG溶液渗透势降为-0.30 MPa时，同德老芒麦苗高出现明显下降，而同德短芒披碱草在-0.15 MPa时就已出现显著下降，PEG溶液渗透势继续降低后，对2种披碱草属植物幼苗苗高的影响不再显著。青海草地早熟禾和青海冷地早熟禾的幼苗苗高显著降低分别出现在PEG溶液渗透势低于0.05 MPa和-0.15 MPa时，而青海中华羊茅幼苗苗高在PEG渗透势低于-0.49 MPa时显著降低。

不同渗透势的PEG溶液对同德老芒麦幼苗根长无显著影响，对短芒披碱草、青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾和青海中华羊茅幼苗根长的影响程度有所不同(图2)。PEG溶液渗透势降为-0.15 MPa时，同德短芒披碱草幼苗根长相比对照显著缩短($P < 0.05$)。-0.05 MPa PEG溶液对青海冷地早熟禾和青海草地早熟禾幼苗根长无显著影响，但-0.15 MPa和-0.30 MPa PEG溶液能显著增加两者的幼苗根长($P < 0.05$)，当PEG渗透势降为-0.49 MPa时，两者的幼苗根长受到抑制，相比对照显著缩短($P < 0.05$)。与对照相比，-0.49 MPa的PEG渗透势并不能引起中华羊茅幼苗根长的显著降低，一定范围的PEG溶液渗透势(-0.05~-0.30 MPa)对中华羊茅幼苗的根生长有促进作用。

幼苗干重的影响在渗透势为-0.30 MPa时才表现出来($P < 0.05$)。PEG溶液渗透势降到-0.49 MPa时，同德老芒麦、同德短芒披碱草、青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾和青海中华羊茅幼苗干重分别比对照降低33%、25%、33%、40%和24%(表3)。

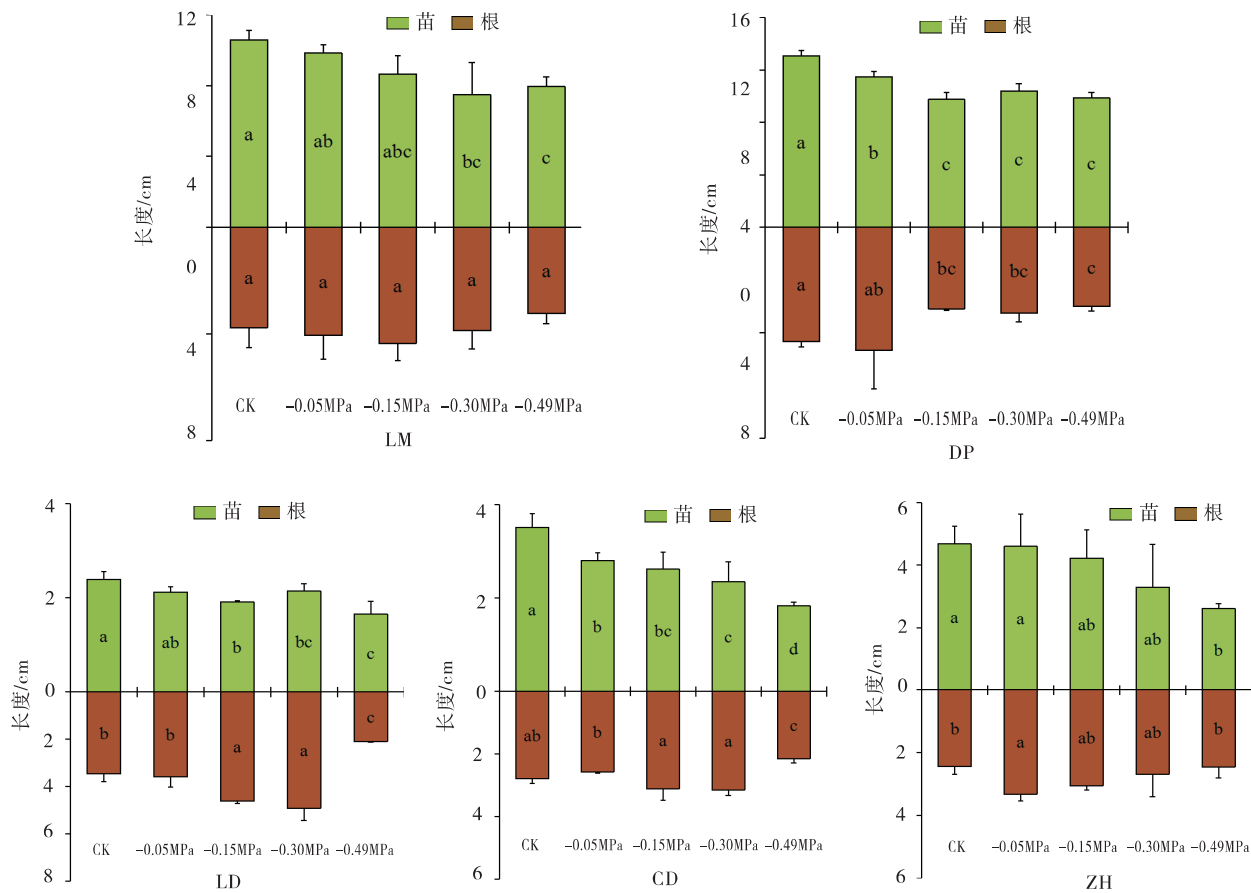


图 2 渗透势下禾草幼苗苗高和根长

Fig. 2 Effect of osmotic potential on shoot and root length of grass seedlings

表 3 渗透势对禾草幼苗干重的影响

Table 3 Effect of osmotic potential on dry weight of grass seedlings

处理	干重/mg				
	LM	DP	LD	CD	ZH
CK	46.83±3.05 ^a	55.07±4.25 ^a	4.30±0.40 ^a	3.63±0.21 ^a	8.80±0.30 ^a
-0.05 MPa	37.13±3.73 ^b	46.70±3.39 ^b	3.90±0.17 ^a	3.20±0.36 ^{ab}	8.00±0.26 ^{ab}
-0.15 MPa	37.10±2.19 ^b	41.50±2.21 ^{bc}	3.93±0.15 ^a	2.80±0.26 ^{bc}	8.10±0.36 ^{ab}
-0.30 MPa	33.50±2.31 ^{bc}	42.43±2.15 ^{bc}	3.07±0.31 ^b	2.63±0.31 ^{cd}	7.80±0.60 ^b
-0.49 MPa	30.50±0.87 ^c	41.07±0.85 ^c	2.90±0.20 ^b	2.17±0.31 ^d	6.70±0.56 ^c

注:数值为平均值±标准差,同列不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著性($P<0.05$),干重是 10 株幼苗的总重

2.3 5 种禾草抗旱性综合评价

利用隶属函数对 5 种禾草 PEG 处理下的相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数以及幼苗相对苗高、相对根长和相对干重进行综合评价,得到 5 种禾草的抗旱性(表 4),其中青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾和青海中华羊茅相对根长数据采用隶属函数计算,5 种禾草的相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数以及幼苗相对苗高和相对干重均采用反隶属函数计算。根据隶属函数的平均值进行排序,得出 5 种禾草的抗旱性强弱依次为:同德老芒麦>青海草地早熟禾>同德

短芒披碱草>青海冷地早熟禾>青海中华羊茅。

3 讨论

植物种子的萌发期和幼苗生长期为生命周期最敏感时期^[12],极易受到外界环境因子的影响,且不同植物的种子在干旱条件下表现出不同的发芽能力^[13-14]。多数研究表明,种子的发芽率、发芽势、发芽指数等随着渗透势的降低而降低,即很多植物种子的萌发都会受到抑制^[15-16],这是由于活性氧的产生加速^[17-18],导致细胞损伤、细胞周期异常^[19],致使种子不能正常发

表 4 5 种禾草抗旱指标隶属函数值及抗旱性综合评价

Table 4 The value of membership function and comprehensive evaluation of drought tolerance of five grasses

禾草品种	相对发芽率	相对发芽势	相对发芽指数	相对苗高	相对根长	相对干重	平均值	排名
LM	0.528	0.444	0.401	0.579	0.560	0.560	0.512	1
DP	0.472	0.564	0.455	0.344	0.422	0.524	0.464	3
LD	0.363	0.416	0.470	0.477	0.490	0.498	0.452	4
CD	0.395	0.443	0.655	0.398	0.548	0.535	0.496	2
ZH	0.254	0.166	0.489	0.519	0.452	0.416	0.383	5

芽。有人对老芒麦和不同品种草地早熟禾的研究发现随着 PEG 溶液渗透势降低,干旱胁迫加剧,种子的发芽率和发芽势均呈现下降趋势^[20-22];任昉等^[23]对羊茅属,段金秀等^[24]对草地早熟禾的研究也表明,高渗透势能提高禾草种子发芽率、发芽势和发芽指数,低渗透势溶液抑制种子的萌发,这可能是植物在轻度水分亏缺时,补偿与超补偿生长效应的表现^[25-26],也可能是在低渗透势胁迫下细胞内膜系统的某些酶得到了激发,从而提高了种子的萌发能力^[27]。本研究未发现高渗透势提高 5 种禾草种子发芽率、发芽势和发芽指数的情况,且 5 种禾草种子萌发对渗透调节的响应不完全一致,高渗透势(-0.05 MPa)PEG 溶液对同德老芒麦和青海冷地早熟禾发芽率没有显著影响,但已能引起同德短芒披碱草、青海草地早熟禾和中华羊茅发芽率的下降,预示田间轻度干旱可能影响这 3 种禾草的发芽;低渗透势(<-0.30 MPa)PEG 溶液能显著降低 5 种禾草种子的发芽率,与前人的研究结果相一致。5 种禾草种子对照的发芽指数均较低,表明供试禾草种子的活力较低;PEG 溶液渗透势降到 -0.30 MPa 时 5 种禾草的发芽指数显著降低,表明低渗透势 PEG 溶液处理可导致其种子的活力进一步降低甚至失活。较低种子活力加上低渗透势共同作用是导致发芽率和发芽势显著下降的主要原因。幼苗苗高对渗透调节的响应类似于种子发芽的情况,总的趋势是随渗透势降低而降低,是由于渗透势的降低使植物吸收水分的能力降低,茎叶生长受到抑制^[29]。不同禾草根长对模拟干旱胁迫的响应表现出差异,一定范围的 PEG 溶液渗透势能促进青海冷地早熟禾和青海中华羊茅幼苗根的生长,但当渗透势达到 -0.49 MPa 时,5 种禾草幼苗根的生长均受到抑制,这与梁国玲等^[23]对羊茅属、孙清洋^[20]和曾怡^[30]对老芒麦和披碱草的研究结果相一致。在干旱胁迫下,植物吸收水分和营养物质优先

供给地下器官(胚根),从而利于幼苗的成活和生长,是植物水分缺乏时适应环境的一种表现^[31-32]。当渗透势达到 -0.49 MPa 时,已经超过植株忍耐的强度范围,植株的生长受到强烈抑制,甚至死亡。

植物抗旱性受多种因素的影响,不同植物对同一指标的抗旱性反应也不一定相同^[34]。植物萌发过程涉及复杂的生理生化作用^[35],用单一的指标难以准确地反映牧草萌发期抗旱性的强弱,必须运用多个指标进行综合评价^[36-37]。季波等^[7]对老芒麦、披碱草等 10 种多年生禾本科牧草萌发期的抗旱性研究中发现老芒麦的抗旱性强于披碱草,杨满业等^[40]对老芒麦、同德短芒披碱草等 5 种禾草萌发期抗旱性研究中也发现老芒麦的抗旱性强于同德短芒披碱草;鲁存海^[4]在对 8 种野生早熟禾抗旱性研究比较中发现,草地早熟禾萌发期的抗旱性强于冷地早熟禾,这均与本研究禾草的抗旱性顺序一致。本研究发现 5 种禾草在萌发期同德老芒麦的抗旱性最强,其次是青海草地早熟禾、同德短芒披碱草和青海冷地早熟禾,而青海中华羊茅的抗旱性最差,这是由于种子萌发期的抗旱性与种子本身的特性与生理状况有着密切的关系,不同牧草种子对干旱的敏感性不同,可能与种子大小和每种禾草自身的活力有关^[15]。

4 结论

不同渗透势对 5 种禾草种子萌发和幼苗生长均有显著影响,总体上,随着 PEG 溶液渗透势降低,5 种禾草种子发芽率、发芽势、发芽指数以及幼苗苗高和干重均降低;但各草种的不同指标响应不一致,未发现高渗透势介质对发芽有促进作用,但一定范围的渗透势对青海冷地早熟禾和青海中华羊茅幼苗根的生长有促进作用,而对其他 3 种禾草幼苗的根则有抑制作用。利用隶属函数对 5 种禾草进行综合评价,其萌发期抗旱

性强弱依次为:同德老芒麦>青海草地早熟禾>同德短芒披碱草>青海冷地早熟禾>青海中华羊茅。

参考文献:

- [1] Rajjou L, Duval M, Gallardo K, *et al.* Seed germination and potential[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2012, 63:507—533.
- [2] Nonogaki H, Bassel G W, Bewley J D. Germination—Still a mystery[J]. *Plant Science*, 2010, 179(6):574—581.
- [3] Paul E Verslues, Manu Agarwal, Surekha Katiyar Agarwal, *et al.* Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status[J]. *The Plant Journal*, 2006, 45(4):523—539.
- [4] 鲁存海. 8 种野生早熟禾抗旱性及草坪质量综合评价研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2010.
- [5] 王红俊. 9 种冷季型草坪草耐盐性、抗旱性及坪用性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [6] 王莹. 五种禾本科牧草抗旱性综合评价[D]. 银川:宁夏大学, 2015.
- [7] 季波, 时龙, 徐金鹏, 等. 10 种禾本科牧草种质资源萌发期抗旱性评价[J]. *种子*, 2020, 39(7):12—18.
- [8] 高汝勇. PEG 胁迫对 3 种草坪草种子萌发的影响[J]. *现代农村科技*, 2019(10):67—68.
- [9] 刘贵河, 郭郁频, 任永霞, 等. PEG 胁迫下 5 种牧草饲料作物种子萌发期的抗旱性研究[J]. *种子*, 2013, 32(1):15—19.
- [10] 王平, 王沛, 孙万斌, 等. 8 份披碱草属牧草苗期抗旱性综合评价[J]. *草地学报*, 2020, 28(2):397—404.
- [11] 梁军, 全小龙, 史惠兰, 等. 甘肃马先蒿对五种禾草的化感潜力研究[J]. *草地学报*, 2019, 27(4):889—897.
- [12] Patade V Y, Maya K, Zakwan A. Seed priming mediated germination improvement and tolerance to subsequent exposure to cold and salt stress in Capsicum[J]. *Research Journal of Seed Science*, 2011, 4(3):125—136.
- [13] A E de Villalobos, Peláez D V. Influences of temperature and water stress on germination and establishment of *Prosopis caldenia* Burk [J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, 49(2):321—328.
- [14] Joel Flores, Oscar Briones. Plant life—form and germination in a Mexican inter—tropical desert: effects of soil water potential and temperature[J]. *Journal of Arid Environments*, 2001, 47(4):485—497.
- [15] 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.
- [16] 闫兴富, 周立彪, 思彬彬, 等. 不同温度下 PEG-6000 模拟干旱对柠条锦鸡儿种子萌发的胁迫效应[J]. *生态学报*, 2016, 36(7):1989—1996.
- [17] Mehmet Demir Kaya, Gamze Okçu, Mehmet Atak, *et al.* Seed treatments to overcome salt and drought stress during germination in sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 24(4):291—295.
- [18] 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(4):567—574.
- [19] Pekol S, Balo lu M C, Çelik Altunoğlu 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.
- [20] 孙清洋. 老芒麦萌发和幼苗生长对两种渗透胁迫的不同响应[D]. 北京:中国农业科学院, 2016:12—15.
- [21] 孙可蒙, 隋晓青, 王玉祥, 等. PEG 模拟干旱胁迫下 12 份新疆野生无芒雀麦种质萌发期抗旱性评价[J]. *草原与草坪*, 2020, 41(6):102—107.
- [22] 王彬, 李长鼎, 兰剑, 等. 聚乙二醇-6000 胁迫下十二个草地早熟禾品种萌发期抗旱性比较研究[J]. *北方园艺*, 2012(24):54—58.
- [23] 任响霏, 许金凤, 朱瑾, 等. 模拟干旱胁迫下镁对高羊茅种子萌发的影响[J]. *草原与草坪*, 2017, 37(3):8—13.
- [24] 段金秀, 程鹏舞. 模拟干旱对草地早熟禾种子萌发的影响[J]. *吉林农业*, 2014(20):25—26.
- [25] 郑利, 赵松岭. 半干旱区春小麦超补偿作用的初步研究[J]. *西北植物学报*, 1995, 15(8):125—133.
- [26] 高世铭, 赵松岭. 半干旱区春小麦水分亏缺补偿效应研究[J]. *西北植物学报*, 1995, 15(8):32—39.
- [27] 肖亮, 易自力, 段楚青, 等. 水分胁迫对芒草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *中国草地学报*, 2014, 36(3):40—46.
- [28] L van den Berg, Zeng Y J. Response of South African indigenous grass species to drought stress induced by polyethylene glycol (PEG) 6000[J]. *South African Journal of Botany*, 2005, 72(2):284—286.
- [29] Barbara Tokarz, Tomasz Wójtowicz, Wojciech Makowski, *et al.* What is the Difference between the Response of Grass Pea (*Lathyrus sativus* L.) to Salinity and Drought Stress—A Physiological Study [J]. *Agronomy*,

- 2020,10(6).
- [30] 曾怡. 川西北高原野生老芒麦种质资源抗旱性初步研究[D]. 成都:四川农业大学,2009:15-22.
- [31] 田永雷,白春利,丁海君,等. 老芒麦种质对干旱胁迫的生理响应[J]. 草原与草坪,41(2):70-74.
- [32] 曾彦军,王彦荣. 几种旱生灌木种子萌发对干旱胁迫的响应[J]. 生态学报,2002,13(8):953-956.
- [33] 高雪芹,伏兵哲,穆怀彬,等. PEG-6000 干旱胁迫对沙芦草种子萌发特性的影响及其抗旱性评价[J]. 种子,2013,32(8):11-16.
- [34] 牛奎举,金小煜,李慧萍,等. 甘肃野生草地早熟禾萌发期抗旱性鉴定与评价[J]. 草地学报,2016,24(5):1041-1049.
- [35] 陈小倩,徐庆国. PEG-6000 干旱胁迫对 5 种牧草种子萌发的影响研究[J]. 中国农学通报,2015,31(26):7-11.
- [36] 李京蓉,周学斌,马真,等. 6 种高寒牧区禾本科牧草抗旱性研究与评价[J]. 草地学报,2018,26(3):659-665.
- [37] 熊阳阳,韩博. 3 种禾本科牧草萌发期和苗期的抗旱性研究[J]. 安徽农业科学,2018,46(7):88-91.
- [38] 李怡,侯向阳,武自念,等. 羊草种质资源抗旱性综合评价[J]. 中国草地学报,2019,41(1):75-82.
- [39] 王晓龙,李红,杨墨,等. 6 种冷季型草坪草抗旱性比较研究[J]. 黑龙江畜牧兽医,2017(3):129-131.
- [40] 杨满业,肖冰雪,郑群英,等. 川西北高原 5 种牧草苗期抗旱性比较研究[J]. 草业与畜牧,2015(6):8-14+19.

Response of seed germination and seedling growth of five grasses to drought stress and evaluation of their drought resistance

ZHANG Jie-xue^{1,2}, WANG Zhan-qing³, QUAN Xiao-long¹, LIANG Jun¹,
SHI Hui-lan³, CHEN Meng-ci¹, QIAO You-ming¹

(1. *The State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China*; 2. *College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China*; 3. *College of Ecol-Environmental Engineering, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China*)

Abstract: In order to investigate the drought resistance of 5 perennial graminoid grasses during the germination period, polyethylene glycol (PEG-6000) was used to simulate drought stress. A series of PEG-6000 concentrations, 0, -0.05, -0.15, -0.30, -0.49 MPa, were used as osmotic media. The perennial graminoid studied were *Elymus sibiricus* cv. Tongde, *Elymus breviaristus* cv. Tongde, *Poa crymophila* cv. Qinghai, *Poa pratensis* cv. Qinghai and *Festuca sinensis* cv. Qinghai. The germination rate, germination potential, germination index and shoot length, root length and dry weight of seedlings were used as indicators. The results showed that the seed germination rate, germination potential, germination index, shoot length and dry weight of the 5 grasses reduced with the decrease of osmotic potential, but the response of different indicators of each grass was inconsistent. High osmotic potential media did not affect the germination, but promoted the growth of seedling roots of *Poa crymophila* cv. Qinghai and *Festuca sinensis* cv. Qinghai, and inhibited the roots of the other three grass seedlings. The Membership Function showed that the overall drought resistance of the five grasses during the germination period was ranked as: *Elymus sibiricus* cv. Tongde > *Poa pratensis* cv. Qinghai > *Elymus breviaristus* cv. Tongde > *Poa crymophila* cv. Qinghai > *Festuca sinensis* cv. Qinghai.

Key words: perennial gramineous grass; PEG-6000; drought stress; seed germination