DOI: 10.20103/j.stxb.202406221448
作建芬,林益超,刘维维,简胜,田森林,宁平,刘洋,黄建洪.聚乙二醇-6000 模拟干旱胁迫对三种牧草种子萌发及幼苗生长的影响.生态学报,2025,45(13):6414-6426.
Zuo J F, Lin Y C, Liu W W, Jian S, Tian S L, Ning P, Liu Y, Huang J H.Effects of simulated drought stress with PEG-6000 on seed germination and seedling growth of three species of forage grasses.Acta Ecologica Sinica,2025,45(13):6414-6426.

聚乙二醇-6000 模拟干旱胁迫对三种牧草种子萌发及幼苗生长的影响

作建芬[1],林益超[2],刘维维[1,3],简　胜[3],田森林[1],宁　平[1],刘　洋[1],黄建洪[1,*]
1 昆明理工大学环境科学与工程学院,昆明　650000
2 贵州省煤矿设计研究院有限公司,贵阳　550025
3 昆明冶金研究院有限公司,昆明　650031

摘要:干旱是严重影响种子萌发和幼苗生长的非生物胁迫条件之一。利用聚乙二醇-6000(PEG-6000)模拟干旱胁迫条件,研究了不同浓度 PEG-6000(0%,5%,10%,15%,20%)处理对高羊茅、黑麦草、披碱草种子发芽率、发芽势、相对发芽率、相对发芽势、发芽指数、胁迫指数、活力指数、抗旱系数和萌发系数的影响,测定了不同干旱胁迫条件下三种牧草幼苗的苗鲜重、根鲜重、株高,以及幼苗组织内 H_2O_2浓度、O_2^- 浓度、过氧化氢还原酶(CAT)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、叶绿素 a 浓度和叶绿素 b 浓度。进行了各指标间相关性分析和主成分分析,统计分析了各综合指标的因子负荷量及贡献率,计算了不同浓度 PEG-6000 处理下三种牧草各综合指标的主成分综合评价值,以及各指标对 PEG-6000 浓度的耐旱临界阈值,综合评价了三种牧草的抗旱性能和耐旱能力。综合耐旱临界值分析和抗旱能力综合评价结果显示,三种牧草抗旱性能从高到低依次为高羊茅>黑麦草>披碱草。本研究对抗旱草种的鉴定和筛选具有重要意义。

关键词:聚乙二醇-6000(PEG-6000);干旱胁迫;种子萌发;幼苗生长;抗旱性能评价;生理生化机制

Effects of simulated drought stress with PEG-6000 on seed germination and seedling growth of three species of forage grasses

ZUO Jianfen[1],LIN Yichao[2],LIU Weiwei[1,3],JIAN Sheng[3],TIAN Senlin[1],NING Ping[1],LIU Yang[1],HUANG Jianhong[1,*]
1 *Faculty of Environmental Science and Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650000, *China*
2 *Guizhou Research Institute of Coal Mine Design Co*, *Ltd.*, *Guiyang* 550025, *China*
3 *Kunming Metallurgical Research Institute Co.*, *Ltd.*, *Kunming* 650031, *China*

Abstract: Drought is a significant abiotic stress that severely impacts seed germination and seedling growth. In this study, PEG-6000 was employed to simulate drought stress conditions, and the effects of various concentrations of PEG-6000 (0%, 5%, 10%, 15%, 20%) on the germination rate, germinating potential, relative germination rate, relative germinating potential, germination index, stress index, vitality index, drought resistance coefficient and germination coefficient of *Festuca arundinacea*, *Ryegrass*, and *Lyme grass* seeds were investigated. The seedling fresh weight, root fresh weight, plant height, H_2O_2 content, O_2^- content, catalase (CAT) activity, superoxide dismutase (SOD) activity, chlorophyll a content and chlorophyll b content of three species of forage grasses seedlings under different drought stress conditions were measured. In this study, correlation and principal component analysis were conducted on each index. The factor loadings

基金项目:云南省重大科技专项计划(202302AB080010);国家重点研发计划项目(2023YFC3709105)
收稿日期:2024-06-22;　　**网络出版日期**:2025-04-28
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: huangjianhong78@163.com

and contribution rates of each comprehensive index were statistically analyzed. The principal component comprehensive evaluation value of each comprehensive index of three species of forage grasses under PEG-6000 treatment at different concentrations, and the critical threshold of drought tolerance of each index to PEG-6000 concentration were calculated. The drought resistance and drought tolerance of three species of forage grasses were comprehensively evaluated. The comprehensive analysis of drought tolerance critical values and the evaluation of drought resistance indicated that the drought resistance of the three species of forage grasses was ranked as *Festuca arundinacea* > *Ryegrass* > *Lyme grass*, in descending order. This research is of great significance for the identification and screening of drought-resistant grass species.

Key Words: PEG-6000; drought stress; seed germination; seedling growth; drought resistance evaluation; physiological and biochemical mechanisms

干旱是严重影响植物种子萌发和幼苗生长的非生物胁迫之一,种子萌发是植物生长过程中最关键和最敏感的阶段,极易受到干旱胁迫的影响[1]。干旱会诱导植物幼苗产生一系列反应,如光合作用抑制、氧化损伤增加和次生代谢产物积累等,从而大幅降低植物幼苗生物量和削弱植物幼苗防御干旱胁迫的能力[2]。预计这种趋势将在未来持续下去,全球多个地区的干旱发生频率和严重程度将会增加[3]。

草原是陆地上重要的生态系统之一,具有防风固沙、保持土壤、涵养水源、减少污染等生态功能[4]。近年来,随着全球温室效应加剧,部分陆地土壤水分流失增加,干旱区草本植物单位面积生物量不断降低[5]。高羊茅、黑麦草和披碱草均常被用于草地建设和草原生态系统修复,是全球气候变暖背景下高效预防干旱、半干旱地区草原退化的重要草种。高羊茅是温带地区常见的牧草和冷季草坪草,对高温、干旱胁迫和盐胁迫具有较高的耐受性,是我国西北乃至西部地区草坪建植的主要草种之一[6]。黑麦草是一种广泛种植的禾本科冷季型草,具有再生能力强、生长速度快、地上生物量大、可多次割草等特点[7]。披碱草是半干旱草原上一种多年生草本植物,表现出较高的耐盐性、耐碱性和耐沙性等特征[8]。

聚乙二醇(PEG)是一种惰性的非离子型药剂,其中具有高分子量的 PEG-6000 能够诱导渗透胁迫但不能通过细胞壁,常用于模拟干旱胁迫实验或维持水势均匀[9-10]。如 Meher 等[11]使用 PEG-6000 模拟干旱胁迫实验研究花生叶片和根系中 RNA 含量、相对含水量和叶绿素含量等变化。Mustamu 等[12]在 PEG-6000 模拟干旱胁迫条件下进行了 16 种玉米种子萌发阶段和早期幼苗生长阶段干旱耐受性评估,为其抗旱育种提供了理论参考依据。

目前尚缺乏同时对披碱草、黑麦草和高羊茅进行种子萌发抗旱性能综合评价,以及幼苗抗旱防御机制的研究。本研究利用 PEG-6000 模拟干旱胁迫条件,研究了不同浓度 PEG-6000(0%,5%,10%,15%,20%)模拟的干旱胁迫条件对上述三种牧草种子萌发和幼苗生长的影响,揭示了上述三种牧草幼苗防御干旱胁迫的生理生化机制。利用 SPSS 软件进行了各指标间相关性分析和主成分分析,以及各指标数据与 PEG-6000 浓度的一元线性回归拟合,统计分析了各综合指标的因子负荷量、贡献率和抗旱性能综合评价值,综合评价了三种牧草的抗旱性能和耐旱能力。本研究将为干旱、半干旱区域牧草的草种选择和幼苗抗旱生长提供理论依据。

1　研究方法

1.1　实验设计

本研究选择了高羊茅、黑麦草和披碱草三个草种,在铺有两层滤纸的培养皿(规格 150mm)中采用 PEG-6000 模拟干旱胁迫。高羊茅、黑麦草和披碱草种子在室温条件下分别用去离子水浸泡 12h 后用 30%的 H_2O_2 消毒 60s,再用去离子水清洗 5 次并吸干种子表面水分;选择大小均一、颗粒饱满的高羊茅、黑麦草和披碱草种子各 15 份(每份 100 粒),并分别放置在含有不同浓度 PEG-6000(0%,5%,10%,15%,20%)的培养皿中,每种处理重复 3 次。然后,将装有种子的培养皿放置在恒温恒湿培养箱(型号 HWM-80)中培养 25d,培养箱内保持 25℃,相对湿度 65%,提供 12h 光照处理和 12h 的黑暗处理。种子萌发期间每天需要更换一次滤纸和 PEG-

6000 溶液。当胚芽长度达 2mm 时视为发芽,从萌发实验第一天开始每天统计发芽种子数量。萌发实验结束(20d)后再继续培养 5d,待培养 25d 结束后分别收集各处理条件下的幼苗,测定幼苗的苗鲜重、根鲜重、株高、叶绿素 a 浓度、叶绿素 b 浓度、H_2O_2浓度、O_2^- 浓度、SOD 活性和 CAT 活性。

1.2 萌发相关参数计算

第 20 天萌发实验结束后,分别计算发芽率、发芽势、相对发芽率、相对发芽势、发芽指数、活力指数、胁迫指数、萌发系数、抗旱系数[13-14]。

发芽率(%)=(发芽种子数/供试种子数)×100%;

发芽势(%)=(萌发高峰期发芽种子数/供试种子数)×100%;

相对发芽率(%)=(干旱胁迫下种子发芽率/对照组种子发芽率)×100%;

相对发芽势(%)=(干旱胁迫下种子发芽势/对照组种子发芽势)×100%;

发芽指数(%)= $\sum \frac{Gt}{Dt}$,式中,Gt 为 t 天内发芽的种子数,Dt 为相应的发芽天数;

活力指数(%)=发芽指数×幼苗质量;

萌发系数=$1.00G_2+0.75G_4+0.50G_6+0.25G_8$,式中,$G_2$、$G_4$、$G_6$、$G_8$分别为不同实验条件下各草种第 2、4、6、8 天的种子发芽率;

胁迫指数(%)=(干旱胁迫下种子发芽指数/对照组种子发芽指数)×100%;

抗旱系数=干旱胁迫下种子萌发系数/对照组种子萌发系数;

1.3 幼苗中叶绿素 a、叶绿素 b 浓度的测定

叶绿素浓度根据 Wang 等[15]描述的方法采用新鲜幼苗叶片进行测定。用浓度为 80% (v/v)的丙酮分别从不同干旱条件下的高羊茅、黑麦草和披碱草幼苗叶片中提取叶绿素(0.1g),然后用分光光度计(UV-1601,瑞利有限公司,中国)分别在 646nm (叶绿素 a)和 663nm (叶绿素 b)下检测叶绿素浓度。

1.4 幼苗中 H_2O_2、O_2^- 浓度的测定

O_2^- 浓度的测定参照 Yan 等[16]采用的方法并稍作修改。首先用 5mL 磷酸盐缓冲液分别提取不同干旱条件下的高羊茅、黑麦草和披碱草幼苗粉末,在 1000r/min、4℃条件下离心 10min 后,取 25μL 上清液,加入 25μL 磷酸盐缓冲液和 50μL 羟胺混合,再加入 50μL 对氨基苯磺酸和 50μL α-萘胺,在 37℃下静置 5min 后立即在 540nm 下检测吸光度。计算 O_2^- 含量的标准为 $NaNO_2$(以 μmol/g 表示)。H_2O_2浓度的测定方法与 M.H 等[17]文章中的方法相似。用丙酮(4℃,0.2mL)分别提取不同干旱条件下的高羊茅、黑麦草和披碱草幼苗粉末,在 11500r/min 离心 15min,取上清液 0.5mL,加入硫酸钛(1%,0.1mL),常温下静置 10min,再次离心。然后立即在 410nm 下检测吸光度。

1.5 幼苗中 SOD、CAT 活性的测定

通过检测 H_2O_2的降解率来测定 CAT 活性,首先制备粗酶提取物,将 H_2O_2(20mmol/L, 2.4mL)与粗酶提取物(0.4mL)混合,并在 240nm 下检测吸光度,以每分钟吸光度变化 0.01 的量表示酶活性 1 U,CAT 活性用 U/g 表示[18]。通过测定 SOD 抑制硝基蓝四氮唑(NBT)光化学还原的能力来测定 SOD 活性,在 240nm 下检测混合溶液体系的吸光度,以每分钟抑制邻苯三酚氧化 50%的 SOD 量表示酶活性 1 U,SOD 活性用 U/g 表示[19]。

1.6 数据处理

使用 Microsoft Excel 2016 软件计算三种牧草种子发芽率、发芽势、相对发芽势、相对发芽率、H_2O_2浓度、O_2^- 浓度、CAT 活性、SOD 活性、苗鲜重、根鲜重、株高、叶绿素浓度的均值和标准差,并用 SPSS 软件(Ver 18, IBM, Armonk, NY, USA),采用单因素方差分析($P<0.05$)和 Tukey 检验($P<0.05$)计算并评价不同浓度 PEG-6000(0%,5%,10%,15%,20%)处理组别中上述指标显著性差异;使用 SPSS 软件进行各项指标间的 Pearson 相关系数计算和分析,并使用 Rstudio 中的 ggplot2 程序包生成相关性热图;使用 SPSS 软件进行数据标准化处

理和因子降维分析,得出 3 个综合指标 PCV Y_1、PCV Y_2、PCV Y_3,根据因子降维分析结果计算各综合指标的权重值(W_1、W_2、W_3),各指标主成分综合评价值= PCV Y_1负荷量× W_1+PCV Y_2负荷量× W_2+PCV Y_3负荷量× W_3。

2　结果与分析

2.1　不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫对种子萌发的影响

如图 1 所示,干旱胁迫导致高羊茅、黑麦草和披碱草的发芽率、发芽势、相对发芽率和相对发芽势均显著下降。对照组(0% PEG-6000)高羊茅、黑麦草和披碱草的发芽率最高分别为 88.5%、80.5%、70%,在 20% PEG-6000 处理下,高羊茅、黑麦草和披碱草的发芽率分别比对照组(0%PEG-6000)的降低了 79.7%、93.8%和 95.1%,发芽势分别比对照组的(0%PEG-6000)降低了 80.1%、94.0%和 95.0%。在 20%PEG-6000 处理下高羊茅的发芽率和发芽势均最高分别为 18%、17%,而披碱草的发芽率和发芽势最低均为 3.5%。在较低干旱胁迫强度(5%、10%PEG-6000)下,黑麦草的相对发芽率和相对发芽势较高,而在较高干旱胁迫强度(15%、20% PEG-6000)下,高羊茅的相对发芽率和相对发芽势均显著高于黑麦草和披碱草的。

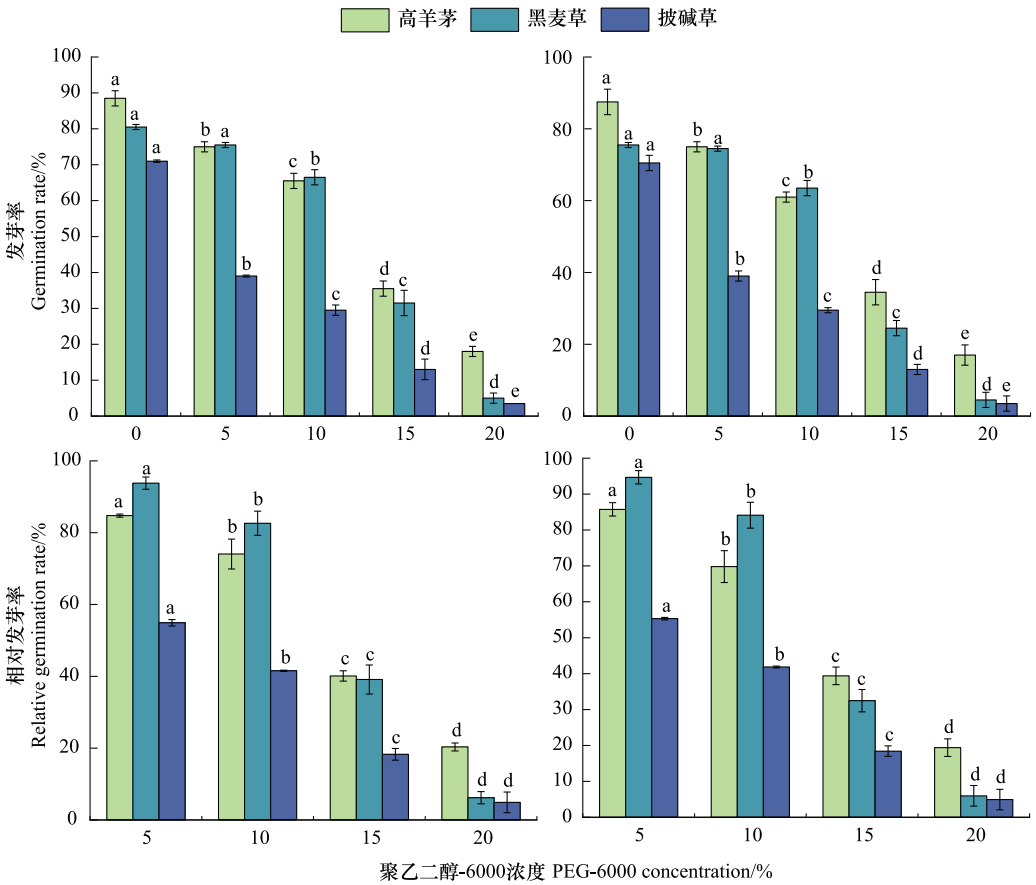

图 1　不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫对高羊茅、黑麦草和披碱草发芽率、发芽势、相对发芽率和相对发芽势的影响

Fig.1　Effects of simulated drought stress with different concentrations of PEG-6000 on germination rate, germination potential, relative germination rate and relative germination potential of *Festuca arundinacea*, *Ryegrass*, and *Lyme grass*

图中数据为三个平行处理的平均值,小写字母表示同一植物不同处理间差异显著(P<0.05)

2.2　不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫对种子发芽能力的影响

发芽指数和活力指数是评估种子发芽能力的重要指标,可以反映种子发芽速度和种子活力水平[20]。如图 2 所示,随着干旱胁迫强度的增加,高羊茅和披碱草的活力指数、发芽指数、胁迫指数和抗旱系数均显著降低。在 20%PEG-6000 处理下,高羊茅的活力指数、发芽指数、胁迫指数和抗旱系数均最高分别为 14.6、3.25、

0.13、0.25。黑麦草的活力指数和发芽指数随干旱胁迫强度的增加呈先增加后减少的趋势,5%PEG-6000 处理下最高分别为 356.41、16.17。黑麦草的胁迫指数和抗旱系数随干旱胁迫强度的增加而显著降低,在 20%PEG-6000 处理下最低分别为 0.04、0.25。在较低干旱胁迫(0%、5%、10%PEG-6000)下,黑麦草的胁迫指数和抗旱系数最高,但在较高干旱胁迫(15%、20%PEG-6000)下,高羊茅的胁迫指数和抗旱系数均显著高于黑麦草和披碱草。如图 3 所示,随着干旱胁迫强度的增加,高羊茅、黑麦草和披碱草种子的发芽时长均呈延长的趋势。各处理条件下高羊茅在第 2 天均开始发芽,黑麦草、披碱草在 0%、5%、10%、15%PEG-6000 处理下第 3 天均开始发芽,但在 20%PEG-6000 处理下第 6 天才开始发芽。

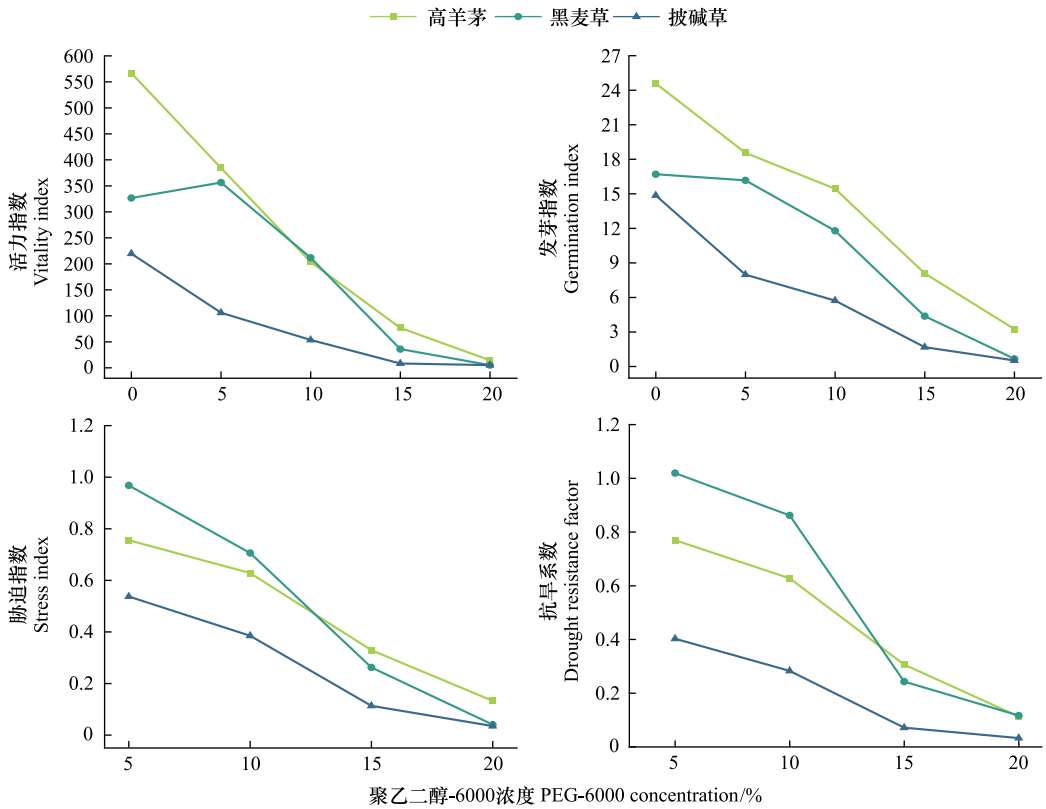

图 2 不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫对高羊茅、黑麦草和披碱草活力指数、发芽指数、胁迫指数和抗旱系数的影响

Fig.2 Effects of simulated drought stress with different concentrations of PEG-6000 on vitality index, germination index, stress index and drought resistance coefficient of *Festuca arundinacea*, *Ryegrass*, and *Lyme grass*

2.3 不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫对幼苗中活性氧和抗氧化酶的影响

干旱胁迫会导致植物细胞产生大量 ROS,ROS 的过度积累会损害植物细胞[21]。如图 4 所示,随着干旱胁迫强度的增加,高羊茅、黑麦草和披碱草幼苗中的 H_2O_2浓度和 O_2^- 浓度显著增加。与对照组(0%PEG-6000)相比,在 20%PEG-6000 处理下,高羊茅、黑麦草和披碱草幼苗的 O_2^- 浓度分别增加了 53.3%、44.9%和 42.4%。在所有干旱胁迫条件下披碱草幼苗的 H_2O_2浓度、O_2^- 浓度均最高。干旱胁迫对高羊茅、黑麦草和披碱草幼苗的 CAT 活性、SOD 活性均具有促进作用。在 0%和 5%PEG-6000 处理下黑麦草幼苗的 CAT 活性最高分别为 950.0U/g、989.5U/g,在 10%、15%和 20%PEG-6000 处理下披碱草幼苗的 CAT 活性最高分别为 1055.5U/g、1243.5U/g、1275.0U/g。

2.4 不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫对幼苗早期生长的影响

干旱是显著降低全球植物生长和产量的主要非生物胁迫之一[22]。如图 5 所示,高羊茅和披碱草的苗鲜重、根鲜重和株高均随干旱胁迫强度的增加而显著降低。披碱草的苗鲜重从 0%PEG-6000 处理下的 28.1mg

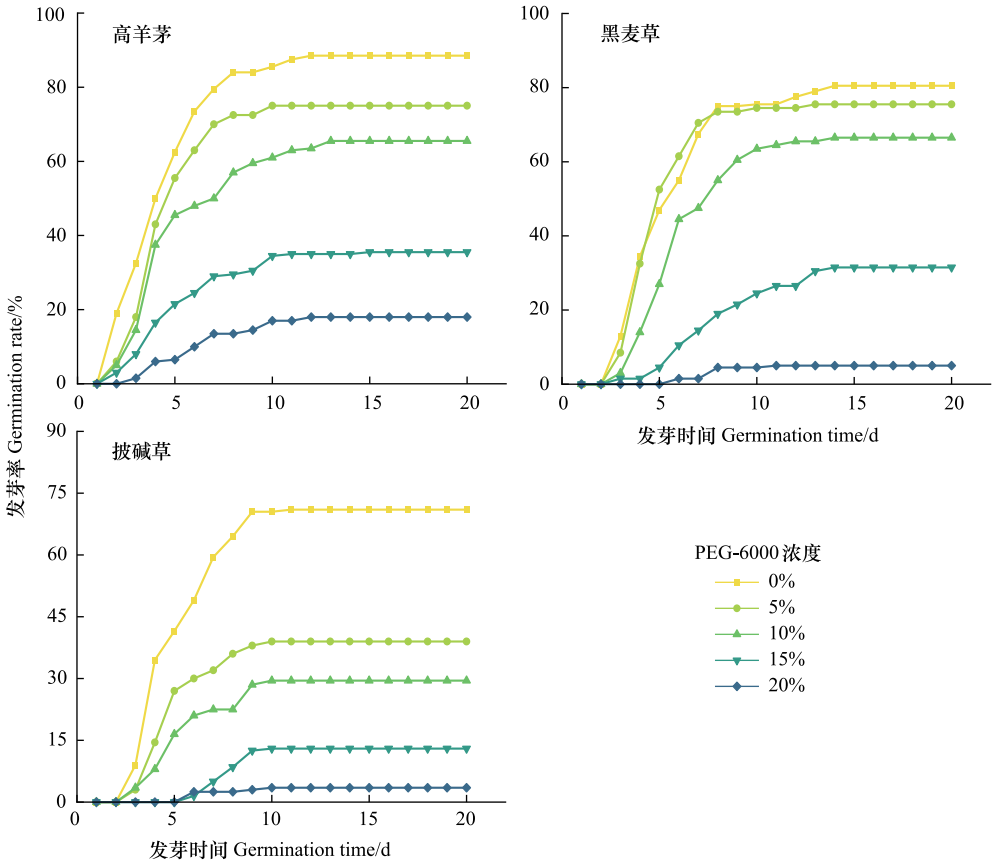

图 3　不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫对高羊茅、黑麦草和披碱草发芽时间的影响

Fig.3　Effects of simulated drought stress with different concentrations of PEG-6000 on germination time of *Festuca arundinacea*, *Ryegrass*, and *Lyme grass*

下降到了 20%PEG-6000 处理下的 1.9mg。在 20%PEG-6000 处理下,高羊茅的根鲜重和株高均最高分别为 3.8mg、4.5cm。黑麦草的苗鲜重、根鲜重和株高随着干旱胁迫强度的增加而先增加后减少,在 5%PEG-6000 处理下苗鲜重、根鲜重和株高均达到最大值分别是 25.7mg、26.5mg、22.05cm。随着干旱胁迫强度的增加,高羊茅、黑麦草和披碱草幼苗叶片中的叶绿素 a 浓度、叶绿素 b 浓度逐渐减少。在 20%PEG-6000 处理下披碱草幼苗中绿素 a 浓度与叶绿素 b 浓度的总和最高为 0.83mg,与对照组(0%PEG-6000)相比,在 20%PEG-6000 处理下,高羊茅和黑麦草幼苗叶片中叶绿素 a 浓度与叶绿素 b 浓度的总和分别降低了 64.4%和 68.5%。

2.5　耐旱临界值分析

表 1 显示了 11 个指标数据下降 50%和下降 100%时所对应的 PEG-6000 浓度,以活力指数为参考指标时高羊茅和披碱草的 D_0 和 D_{50} 均是最低的,高羊茅以叶绿素 b 浓度为参考指标时耐旱临界 PEG-6000 浓度最高为 16.1%—32.7%,以各指标的平均值为参考,高羊茅的耐旱临界 PEG-6000 浓度最高在 13.9%—25.5%,披碱草的耐旱临界 PEG-6000 浓度次之在 13.4%—24.8%,黑麦草的耐旱临界 PEG-6000 浓度最低在 12.6%—22.3%,该结果表明三种草中耐旱性能最好的是高羊茅。

2.6　耐旱能力综合评价

种子萌发期的抗旱性能受到多种因素的影响,图 6 显示了高羊茅、黑麦草和披碱草的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、胁迫指数、抗旱系数、萌发系数、苗鲜重、根鲜重、株高、叶绿素 a 浓度、叶绿素 b 浓度之间存在显著的正相关性,而 SOD 活性、CAT 活性、O_2^- 浓度、H_2O_2 浓度与发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、胁迫指数、抗旱系数、萌发系数、苗鲜重、根鲜重、株高、叶绿素 a 浓度、叶绿素 b 浓度之间存在显著的负相关性。如

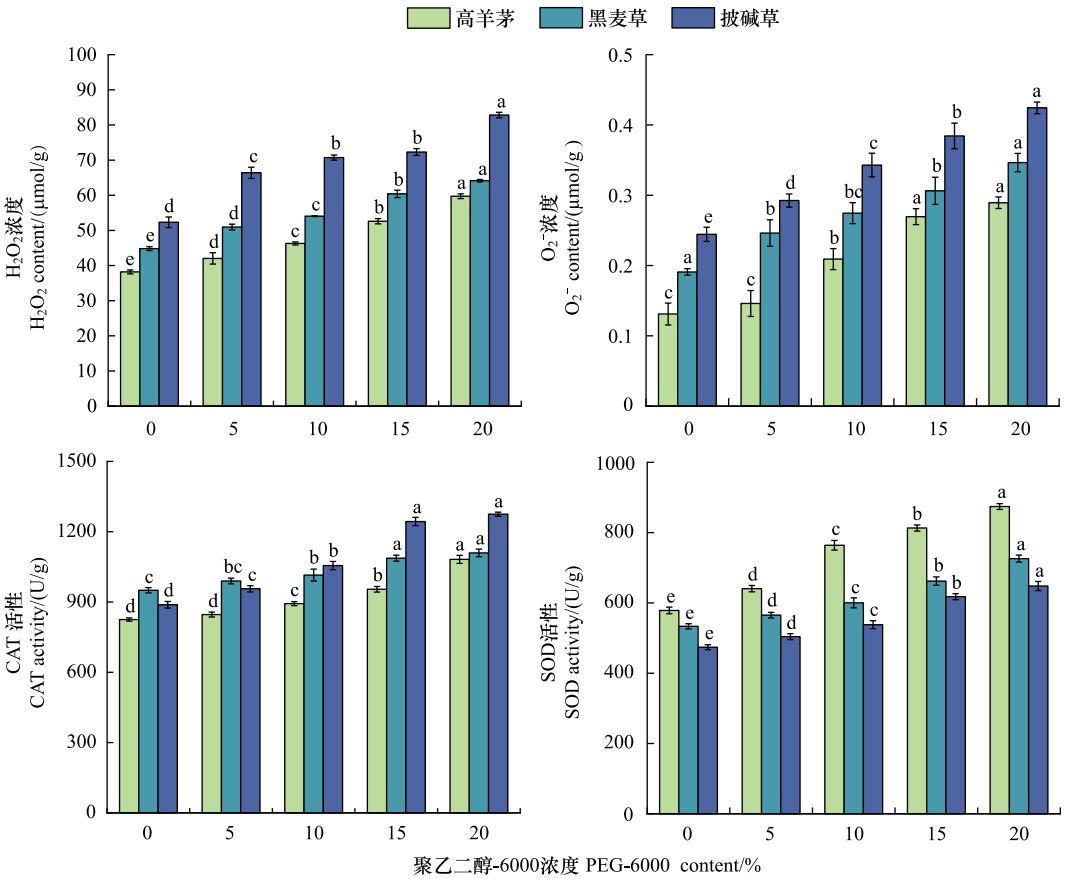

图 4 不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫对高羊茅、黑麦草和披碱草幼苗 H_2O_2 浓度、O_2^- 浓度、CAT 活性和 SOD 活性的影响

Fig.4 Effects of simulated drought stress with different concentrations of PEG-6000 on H_2O_2 concentration, O_2^- concentration, CAT activity and SOD activity of *Festuca arundinacea*, *Ryegrass*, and *Lyme grass seedlings*

图中数据为三个平行处理的平均值,小写字母表示同一植物不同处理间差异显著($P<0.05$);SOD:超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase;CAT:过氧化氢还原酶 Catalase

表 1 所示,各指标反映出高羊茅、黑麦草和披碱草的抗旱性能不完全一致。为了防止各指标代表的抗旱性能评价信息重叠,影响评价结果的准确性,针对 18 个指标进行了主成分分析,形成综合指标后再进行抗旱性能评价,从而保证抗旱性能综合评价结果客观准确。如表 2 所示,18 个指标被转化为三个新的综合指标 C(Ⅰ)、C(Ⅱ)、C(Ⅲ),这三个新的综合指标包含了来自上述 18 个指标 92.9%的信息。表 3 显示了高羊茅、黑麦草和披碱草不同干旱胁迫强度(0%、5%、10%、15%、20%PEG-6000)下的主成分综合评价值,高羊茅的抗旱性能综合评价值最高为 62.038,黑麦草的抗旱性能综合评价值为-33.244,披碱草的抗旱性能综合评价值最低为-84.959。一般认为,抗旱性能综合评价值越高,表示该物种的抗旱性能越强。研究结果表明供试的三种草中高羊茅的抗旱性能最好,其次是黑麦草,披碱草的抗旱性能最差。

3 讨论

本研究结果显示,在 PEG-6000 模拟干旱胁迫条件下,高羊茅、黑麦草和披碱草的发芽率、发芽势、相对发芽率、相对发芽势、活力指数、发芽指数、胁迫指数和抗旱系数均随干旱胁迫强度的增加而显著降低,其中当干旱胁迫强度最高(20%PEG-6000)时高羊茅种子的发芽率和发芽势最高,而披碱草种子的发芽率和发芽势在所有干旱胁迫强度下均最低。这一结果与早期研究结果相似,如 Naser 等[23]采用 PEG-6000 模拟干旱胁迫,研究了干旱胁迫下核桃种子胚根和胚芽组织成分变化对核桃种子萌发的影响,结果显示较高干旱胁迫强度下核桃种子的萌发受到了显著抑制。Helal 等[24]针对大麦种子的干旱实验结果也显示,随着干旱胁迫强度的增

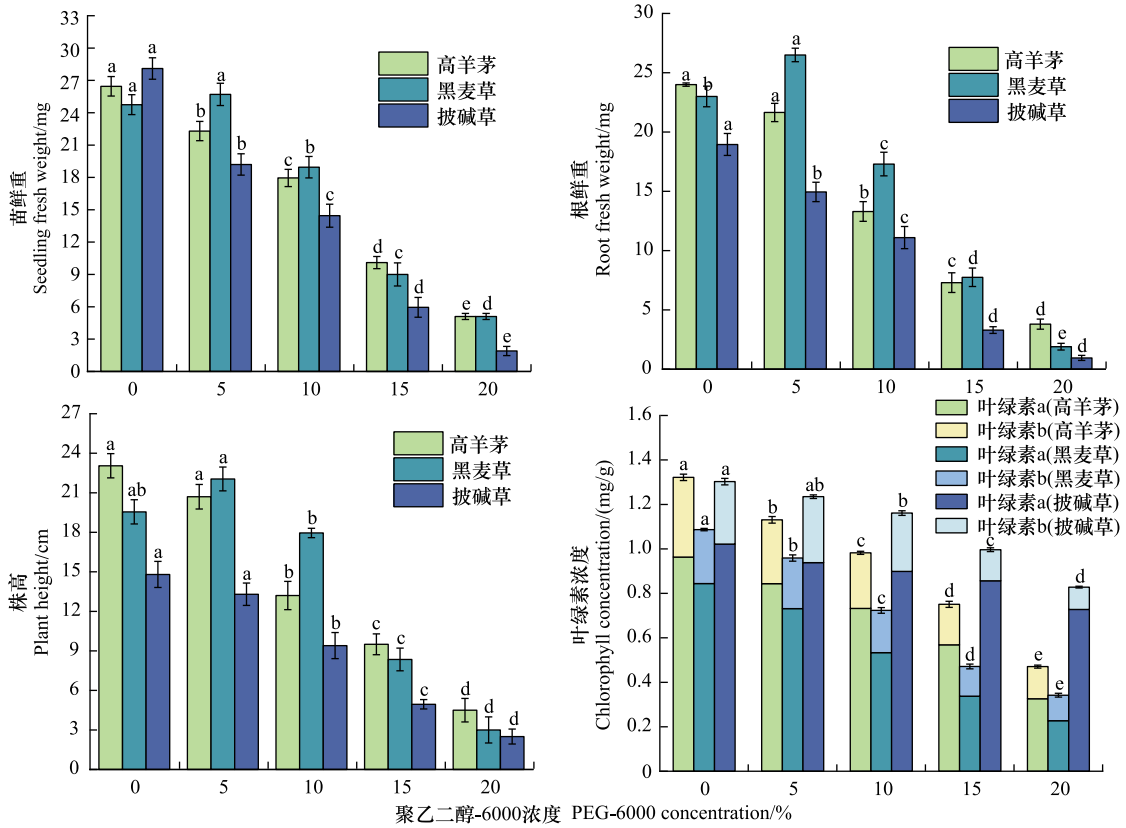

图 5　不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫对高羊茅、黑麦草和碱草幼苗幼苗鲜重、根鲜重、株高、叶绿素浓度的影响

Fig.5　Effects of simulated drought stress with different concentrations of PEG-6000 on seedling fresh weight, root fresh weight, plant height and chlorophyll concentration of *Festuca arundinacea*, *Ryegrass*, and *Lyme grass* seedlings

图中数据为三个平行处理的平均值,小写字母表示同一植物不同处理间差异显著($P<0.05$)

表 1　PEG-6000 模拟干旱胁迫下高羊茅、黑麦草和披碱草的耐旱性临界值和极限(%)值

Table 1　The critical values and limits of drought tolerance of *Festuca arundinacea*, *Ryegrass*, and *Lyme grass* seedlings under simulated drought stress with PEG-6000

指标 Index	高羊茅 *Festuca arundinacea*		黑麦草 *Ryegrass*		披碱草 *Lyme grass*	
	D_0	D_{50}	D_0	D_{50}	D_0	D_{50}
发芽率 Germination rate	25.1	11.7	22.0	7.4	19.1	8.7
发芽指数 Germination index	23.0	11.6	20.6	11.7	18.2	8.3
活力指数 Vitality index	18.5	8.9	18.5	10.4	16.5	7.3
胁迫指数 Stress index	22.9	14.4	20.0	12.7	19.7	12.5
萌发系数 Germination coefficient	27.4	14.2	20.4	11.8	19.0	10.8
抗旱系数 Drought resistance factor	26.3	17.0	19.8	13.0	18.6	11.8
发芽势 Germination potential	24.9	13.1	21.2	12.5	19.2	8.8
相对发芽率 Relative germination rate	24.2	15.1	21.2	13.8	21.0	13.2
相对发芽势 Relative germination potential	24.0	14.8	20.5	13.4	21.0	13.2
叶绿素 a 浓度 Chlorophyll a concentration	31.5	16.4	26.3	13.4	73.0	36.8
叶绿素 b 浓度 Chlorophyll b concentration	32.7	16.1	35.0	18.3	27.4	15.5
平均值 Average value	25.5	13.9	22.3	12.6	24.8	13.4

D_0:耐旱性极限值 Limit value of drought tolerance;D_{50}:耐旱性临界值 Critical value of drought resistance;

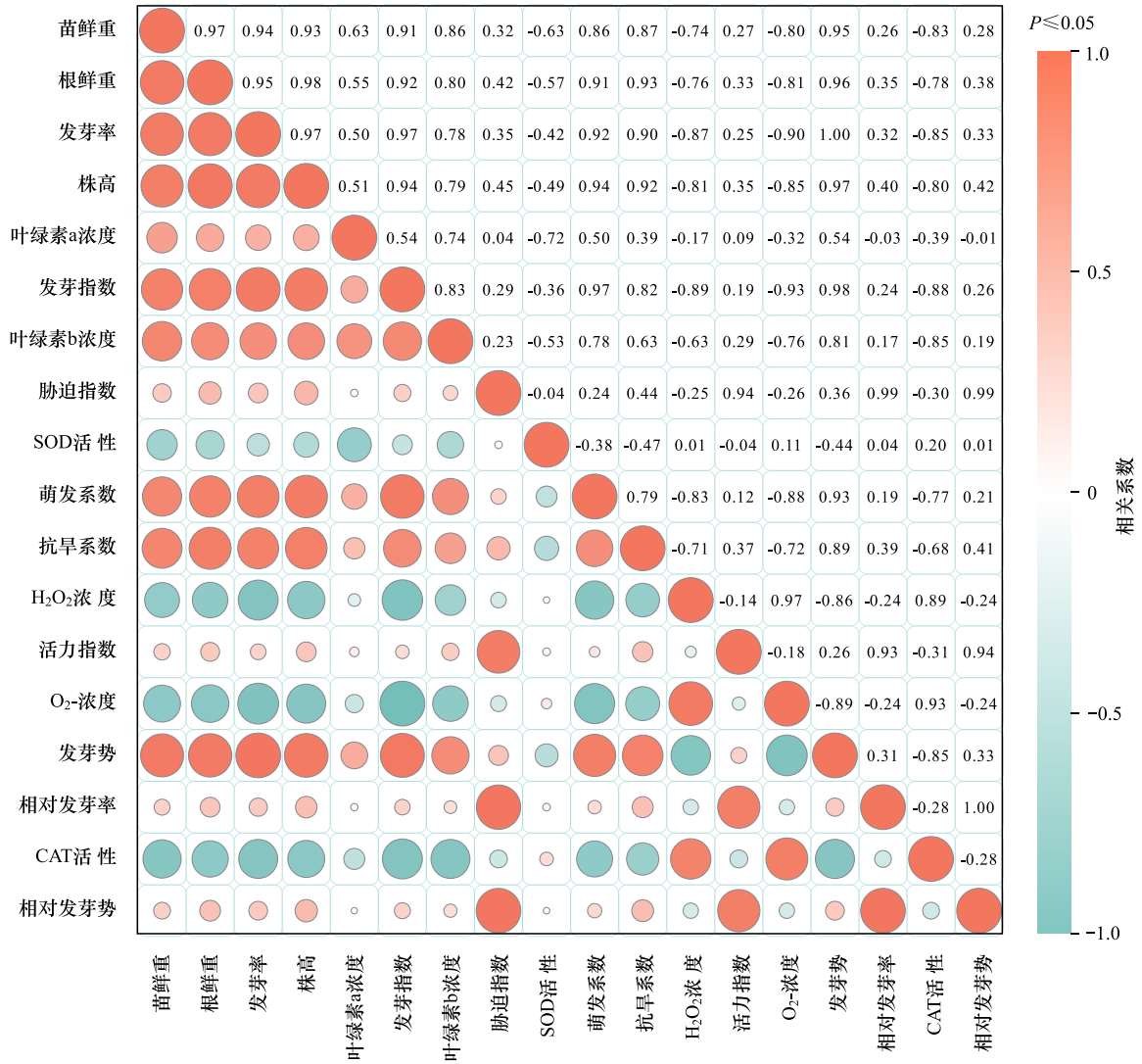

图 6 高羊茅、黑麦草和披碱草各指标间的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis among indicators of *Festuca arundinacea*, *Ryegrass*, and *Lyme grass*

表 2 各综合指标的因子负荷量及贡献率

Table 2 Factor load and contribution rates of each comprehensive index

指标负荷量 Index load	C Ⅰ	C Ⅱ	C Ⅲ
发芽率 Germination rate	0.085	−0.031	−0.044
发芽指数 Germination index	0.084	−0.051	−0.076
胁迫指数 Stress index	0.040	0.249	0.053
活力指数 Vitality index	0.080	−0.062	−0.063
萌发系数 Germination coefficient	0.077	0.012	0.028
抗旱系数 Drought resistance factor	0.034	0.246	0.106
发芽势 Germination potential	0.085	−0.032	−0.028
相对发芽率 Relative germination rate	0.036	0.257	0.013
相对发芽势 Relative germination potential	0.037	0.254	0.029
苗鲜重 Seedling fresh weight	0.083	−0.044	0.096
根鲜重 Root fresh weight	0.084	−0.015	0.066
株高 Plant height	0.085	−0.003	0.015

续表

指标负荷量 Index load	C Ⅰ	C Ⅱ	C Ⅲ
叶绿素 a 浓度 Chlorophyll a concentration	0.047	-0.090	0.382
叶绿素 b 浓度 Chlorophyll b concentration	0.074	-0.056	0.117
SOD 活性 SOD activity	-0.039	0.078	-0.471
H_2O_2浓度 H_2O_2 concentration	-0.073	0.032	0.307
O_2^- 浓度 O_2^- concentration	-0.077	0.039	0.234
CAT 活性 CAT activity	-0.076	0.023	0.152
贡献率 Contribution rate/%	64.082	19.542	9.323

C Ⅰ:综合指标Ⅰ Comprehensive indicator Ⅰ;C Ⅱ:综合指标Ⅱ Comprehensive indicator Ⅱ;C Ⅲ:综合指标Ⅲ Comprehensive indicator Ⅲ;SOD:超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase;CAT:过氧化氢还原酶 Catalase

表 3　高羊茅、黑麦草和披碱草的抗旱性能综合评价值

Table 3　Comprehensive evaluation values of drought resistance of *Festuca arundinacea*, *Ryegrass*, and *Lyme grass*

种类 Species	聚乙二醇-6000 浓度 PEG-6000 concentration	PCV Y_1	PCV Y_2	PCV Y_3	综合评价值 Comprehensive evaluation	排序 Order
高羊茅 *Festuca arundinacea*	0%	4.684	-3.479	-0.762	40.510	1
	5%	4.123	1.523	-0.594	51.920	
	10%	1.918	1.632	-1.151	25.928	
	15%	-1.131	0.710	-1.518	-13.100	
	20%	-3.493	0.154	-2.067	-43.221	
	总计	6.100	0.540	-6.092	62.038	
黑麦草 *Ryegrass*	0%	2.893	-2.829	-0.144	23.174	2
	5%	3.944	2.637	0.655	55.867	
	10%	1.791	2.256	0.051	-27.485	
	15%	-2.412	0.450	-0.744	-27.485	
	20%	-4.625	-0.542	-1.227	-57.315	
	总计	1.591	1.972	-1.410	-33.244	
披碱草 *Lyme grass*	0%	2.001	-2.937	0.977	14.384	3
	5%	0.782	1.177	2.047	16.595	
	10%	-1.049	0.510	1.956	-7.024	
	15%	-4.031	-0.543	1.291	-46.247	
	20%	-5.393	-0.718	1.230	-62.666	
	总计 Total	-7.691	-2.512	7.502	-84.959	

PCV Y1:第 1 个主成分得分值 The first principal component score value;PCV Y2:第 2 个主成分得分值 The second principal component score value;PCV Y3:第 3 个主成分得分值 The third principal component score value

加,大麦种子的发芽率逐渐降低,在 20%PEG 处理下供试的 10 个大麦品种种子发芽率下降幅度均最大。干旱胁迫是全球普遍存在的一种非生物胁迫,是限制植物生长和发育的主要环境因素[25]。干旱胁迫引起的种子内部代谢紊乱是干旱条件下种子发芽率和发芽势降低的主要原因之一[26]。种子在萌发过程中的高效吸水对种子内部酶反应、营养物质代谢和运输起着重要的作用。在萌发阶段,种子首先吸收水分并促进内部新陈代谢,使复杂的有机化合物分解成简单的小分子化合物,种子再利用小分子化合物进行萌发[27]。但在干旱条件下,由于水分吸收减少以及酶活性改变使胚乳中营养物质的水解速率减缓,发育中的胚轴获取营养物质的效率降低,导致种子发芽率下降[28]。Benadjaoud 等[29]在早期研究中指出水势下降会导致发芽率显著减少。Bu 等[30]研究发现干旱胁迫使种子的不同部位需要更长的时间来吸水,导致发芽速率较慢且不均匀。如图 7 所示,在干旱胁迫下,种子内部与萌发和抗旱相关的酶活性降低,种子内部的细胞分裂受到抑制,内部组织的发育受到阻碍,导致种子的抗旱能力和活力指数降低[31]。

本研究中随着干旱胁迫强度的增加,高羊茅、黑麦草和披碱草幼苗中的 H_2O_2浓度、O_2^- 浓度、CAT 活性和 SOD 活性显著增加。SOD 和 CAT 是植物在氧化应激条件下清除细胞内 ROS 的主要成分[32]。SOD 是植物细胞中的重要抗氧化剂,它可以将超氧化物转化为 H_2O_2和分子氧,从而避免超氧化物对植物细胞造成损害;CAT 则能够直接将 H_2O_2分解为 H_2O 和 O_2,及时协调植物细胞中的抗氧化过程[33-34]。在本研究中与对照组(0%PEG-6000)相比,干旱胁迫对高羊茅、黑麦草和披碱草幼苗中 SOD 和 CAT 的活性均产生了促进作用。Xu 等[35]通过研究施加外源硅对玉米在干旱胁迫下生长和发育的影响也得到了类似的结果。在本研究中,高羊茅幼苗在干旱胁迫下可能存在如图 7 所示的抗氧化防御机制,从而维持幼苗组织内较低的 ROS 含量和较高的 SOD 活性。

干旱胁迫严重抑制了高羊茅、黑麦草和披碱草幼苗的生长,随着干旱胁迫强度的增加,三种草幼苗的苗鲜重、根鲜重、株高、叶绿素 a 浓度和叶绿素 b 浓度均显著降低。干旱胁迫主要通过抑制植物的生长从而降低植物的生物量。植物生长过程中根系在营养物质合成、固定、水分和养分吸收等方面发挥着重要作用,并与抗旱能力密切相关[36]。在水分不足的条件下,植物倾向于增强它们的根系结构,以便从更深的土壤层提取水分[37]。光合作用则是植物生长的主要机制,干旱胁迫通过抑制和破坏光合作用来影响植物生长。如图 7 所示,在干旱胁迫条件下,植物幼苗中抗氧化酶活性受到抑制,ROS 过量产生,一方面会严重损害细胞内叶绿体结构,导致脂质过氧化和叶绿素含量显著降低[38],另一方面会改变幼苗生长素的梯度,降低幼苗生长素的合成,从而严重抑制幼苗生长,最终减少幼苗的生物量[39]。在本研究中,即使在较高的干旱胁迫强度(15%、

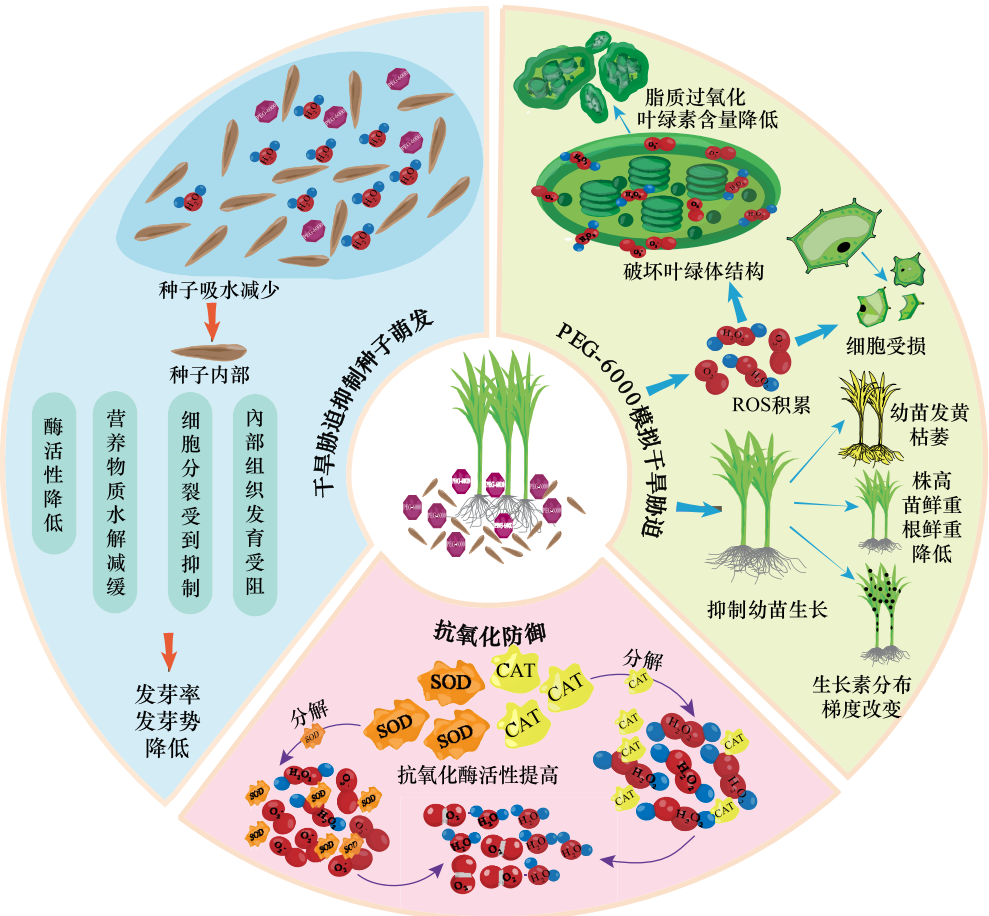

图 7 PEG-6000 模拟干旱胁迫对高羊茅、黑麦草、披碱草种子萌发特性和幼苗生长的影响示意图

Fig.7 Schematic diagram of the effects of simulated drought stress with PEG-6000 on seed germination characteristics and seedling growth of *Festuca arundinacea*, *Ryegrass*, and *Lyme grass*

20%PEG-6000)下,高羊茅仍具有较高的株高、苗鲜重和根鲜重,且高羊茅的耐旱临界 PEG-6000 浓度和抗旱综合评价值均最高,表明高羊茅具有较好的抗旱生长和发育的能力。

4　结论

本研究采用不同浓度的 PEG-6000 模拟干旱胁迫,研究干旱胁迫对高羊茅、黑麦草和披碱草的种子萌发和幼苗生长过程的影响。综合耐旱临界值分析和抗旱能力综合评价结果显示,供试的三种牧草抗旱性能从高到低依次为高羊茅>黑麦草>披碱草。结合本研究结果,根据不同区域受干旱胁迫强度的差异性,针对性选择合适的抗旱草种将有望提高干旱、半干旱地区草原植被覆盖率,并降低草原生态建设成本。

参考文献(References):

[1] 高霞, 石凤翎, 王涛, 郝俊峰, 高翠萍, 刘思博. PEG-6000 模拟干旱胁迫对黄芪属种子萌发的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2024(7): 97-104, 111.

[2] Cheng S B, Yang X Z, Zou L, Wu D D, Lu J L, Cheng Y R, Wang Y, Zeng J, Kang H Y, Sha L N, Fan X, Ma X, Zhang X Q, Zhou Y H, Zhang H Q. Comparative physiological and root transcriptome analysis of two annual ryegrass cultivars under drought stress. Journal of Plant Physiology, 2022, 277: 153807.

[3] Bai W, Wang HLin S. Magnitude and direction of green-up date in response to drought depend on background climate over Mongolian grassland. Science of The Total Environment, 2023, 902

[4] 晔蕊罕, 希吉日塔娜, 常虹, 刘思博, 张璞进, 刘欣超, 殷国梅, 温超, 单玉梅, 刘桂香. 草地生态系统土壤与植被对极端干旱的响应研究进展. 畜牧与饲料科学, 2024, 45(2): 58-72.

[5] 孙小富, 唐华江, 杨红文, 廖加法. 我国草地退化原因及治理对策. 安徽农业科学, 2024, 52(9): 39-44.

[6] 周钰佩, 刘慧霞, 于成, 林丽果, 林选栋. 硅对不同盐生境下高羊茅生物量及渗透调节物质含量的影响. 生态学报, 2017, 37(16): 5514-5521.

[7] 关昊, 姚佳明, 张欣栎, 王硕, 宋欣瑶, 刘信宝, 张敬, 徐彬. 多年生黑麦草 LpPIL15-like 基因转录模式及耐逆功能分析. 中国草地学报, 2024, 46(2): 24-34.

[8] 邱涌森, 郑玉莹, 谢文刚. 我国垂穗披碱草遗传育种研究进展. 中国草地学报, 2022, 44(2): 98-106.

[9] 郭晋梅, 刘娟, 董宽虎. PEG 胁迫对白羊草种子萌发的影响. 中国草地学报, 2015, 37(2): 58-62.

[10] Huang H, Song S Q. Change in desiccation tolerance of maize embryos during development and germination at different water potential PEG-6000 in relation to oxidative process. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 68: 61-70.

[11] Meher, Shivakrishna P, Ashok Reddy K, Manohar Rao D. Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content, relative water content (RWC), and chlorophyll content in peanut leaves and roots. Saudi Journal of Biological Sciences, 2018, 25(2): 285-289.

[12] Elizabeth Mustamu N, Tampubolon K, Alridiwirsah, Basyuni M, AL-Taey D K A, Jawad Kadhim AL Janabi H, Mehdizadeh M. Drought stress induced by polyethylene glycol (PEG) in local maize at the early seedling stage. Heliyon, 2023, 9(9): e20209.

[13] 孙宗玖, 李培英, 阿不来提, 吉鹏飞. 种子萌发期 38 份偃麦草种质耐盐性评价. 草业科学, 2012, 29(7): 1105-1113.

[14] 程继铭, 于思敏, 马佳, 朱雅婷, 闫兴富. 温度与 PEG-6000 模拟干旱对沙棘种子萌发的影响. 种子, 2020, 39(10): 97-101, 105.

[15] Wang W X, Zheng W L, Lv H F, Liang B, Jin S G, Li J L, Zhou W W. Animal-derived plant biostimulant alleviates drought stress by regulating photosynthesis, osmotic adjustment, and antioxidant systems in tomato plants. Scientia Horticulturae, 2022, 305: 111365.

[16] Yan H L, Chen H X, Zhao J L, Yao T, Ding X C. Postharvest H_2O_2 treatment affects flavor quality, texture quality and ROS metabolism of 'Hongshi' kiwifruit fruit kept at ambient conditions. Food Chemistry, 2023, 405: 134908.

[17] Hasanuzzaman M, Nahar K, Anee T I, Khan M I R, Fujita M. Silicon-mediated regulation of antioxidant defense and glyoxalase systems confers drought stress tolerance in *Brassica napus* L. South African Journal of Botany, 2018, 115: 50-57.

[18] Wang X L, Lu Z M, Su J L, Li Y Y, Cao M M, Gao H. 24-Epibrassinolide delays senescence in harvested kiwifruit through effects on mitochondrial membrane and antioxidant activity. LWT, 2020, 118: 108833.

[19] Pan Y, Zhao T, Krokene P, Yu Z F, Qiao M, Lu J, Chen P, Ye H. Bark beetle-associated blue-stain fungi increase antioxidant enzyme activities and monoterpene concentrations in *Pinus yunnanensis*. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1731.

[20] 屈璐璐, 山丹, 李晓杰, 马一鸣, 张晓明, 王俊杰. PEG 模拟干旱胁迫对 5 份三叶草材料种子萌发的影响. 种子, 2019, 38(12): 109-112.

[21] 熊海琳, 田小霞, 毛培春, 郑明利, 孟林, 付娟娟. 褪黑素浸种对干旱胁迫下白三叶种子萌发和幼苗生长的影响. 中国草地学报, 2024, 46(5): 23-32.

[22] Oh M, Komatsu S. Characterization of proteins in soybean roots under flooding and drought stresses. Journal of Proteomics, 2015, 114: 161-181.

[23] Lotfi N, Soleimani A, Vahdati K, Ramazan Ç. Comprehensive biochemical insights into the seed germination of walnut under drought stress. Scientia Horticulturae, 2019, 250: 329-343.

[24] Hellal F A, El-Shabrawi H M, Abd El-Hady M, Khatab I A, El-Sayed S A A, Abdelly C. Influence of PEG induced drought stress on molecular and biochemical constituents and seedling growth of Egyptian barley cultivars. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, 2018, 16(1): 203-212.

[25] Wang X X, Gao Y G, Wang Q J, Chen M, Ye X L, Li D M, Chen X D, Li L, Gao D S. 24-Epibrassinolide-alleviated drought stress damage influences antioxidant enzymes and autophagy changes in peach (*Prunus* persicae L.) leaves. Plant Physiology and Biochemistry, 2019, 135: 30-40.

[26] 乌日力嘎, 邓宇, 孙墨可. PEG-6000 模拟干旱胁迫对冬黑麦生理指标的影响. 浙江农业科学, 2024, 65(4): 894-899.

[27] Kaur R, Prasad K. Elucidation of temperature dependent hydration behaviour of chickpea seeds: Prerequisite for germination. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2023, 50: 102669.

[28] Batool M, El-Badri A M, Wang C Y, Mohamed I A A, Wang Z K, Khatab A, Bashir F, Xu Z H, Wang J, Kuai J, Wang B, Zhou G S. The role of storage reserves and their mobilization during seed germination under drought stress conditions of rapeseed cultivars with high and low oli contents. Crop and Environment, 2022, 1(4): 231-240.

[29] Benadjaoud A, Dadach M, El-Keblawy A, Mehdadi Z. Impacts of osmopriming on mitigation of the negative effects of salinity and water stress in seed germination of the aromatic plant *Lavandula stoechas* L. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2022, 31: 100407.

[30] Bu Y Y, Guo P, Ji Y L, Zhang S T, Yu H S, Wang Z W. Effects of Epichloë sinica on *Roegneria kamoji* seedling physiology under PEG-6000 simulated drought stress. Symbiosis, 2019, 77(2): 123-132.

[31] Basal O, Szabó A, Veres S. PEG-induced drought stress effects on soybean germination parameters. Journal of Plant Nutrition, 2020, 43(12): 1768-1779.

[32] 季杨, 张新全, 彭燕, 梁小玉, 黄琳凯, 马啸, 马迎梅. 干旱胁迫对鸭茅根、叶保护酶活性、渗透物质含量及膜质过氧化作用的影响. 草业学报, 2014, 23(3): 144-151.

[33] 任迎虹, 祁伟亮, 王飞, 刘松青, 王萍, 陈卓缘. 干旱胁迫对桑树叶片氧化损伤及超微结构的影响. 中国野生植物资源, 2020, 39(12): 1-7.

[34] 陈浩维, 邓明华, 黄尧瑶, 彭春秀, 文锦芬. 干旱胁迫对玫瑰花瓣膜脂过氧化及抗氧化酶活性的影响. 西北植物学报, 2018, 38(5): 885-893.

[35] Xu J Q, Guo L F, Liu L W. Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. Environmental and Experimental Botany, 2022, 201: 104974.

[36] 袁野梅, 柳隽瑶, 高秀丽, 薛璟, 王仁忠. 温带草原 7 种针茅植物根系特征及其对环境因子变化的适应. 生态学报, 2022, 42(21): 8784-8794.

[37] Kapoor D, Bhardwaj S, Landi M, Sharma A, Ramakrishnan M, Sharma A. The impact of drought in plant metabolism: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. Applied Sciences, 2020, 10(16): 5692.

[38] 张翠梅, 师尚礼, 陈建纲. 干旱胁迫对苜蓿幼苗叶绿素荧光特性和膜脂过氧化的影响. 草原与草坪, 2019, 39(1): 16-27.

[39] Ru C, Hu X T, Chen D Y, Wang W E, Song T Y. Heat and drought priming induce tolerance to subsequent heat and drought stress by regulating leaf photosynthesis, root morphology, and antioxidant defense in maize seedlings. Environmental and Experimental Botany, 2022, 202: 105010.