



水分胁迫对发草种子萌发和幼苗生长的影响

孟思宇 李晓青 魏小星 刘文辉 张永超 鲍根生

Effects of water stress on seed germination and seedling growth of *Deschampsia caespitosa* collected from five provenances

MENG Siyu, LI Xiaoqing, WEI Xiaoxing, LIU Wenhui, ZHANG Yongchao, BAO Gensheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0469>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度、光照和水分对飞扬草种子萌发和幼苗生长的影响

Effect of temperature, light length and water condition on *Euphorbia hirta* germination and seedling growth

草业科学. 2017, 11(7): 1452 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0578>

盐胁迫对醉马草和高羊茅种子萌发及幼苗生长的影响

Effects of NaCl stress on seed germination and seedling growth of two cold-season grasses

草业科学. 2021, 38(5): 870 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0391>

外源NO对盐胁迫下沙打旺种子萌发和幼苗生长的影响

Effect of nitric oxide on seed germination and seedling growth of *Astragalus adsurgens* under NaCl stress

草业科学. 2017, 11(7): 1459 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0523>

香豆素对苏丹草种子萌发和幼苗生长的影响

Effect of coumarin on *Sorghum sudanense* seed germination and seedling growth

草业科学. 2017, 11(11): 2279 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0008>

油菜素内酯对盐胁迫下黑麦草种子萌发及幼苗生长的生理调控作用

Physiological regulation of brassinosteroids on seed germination and seedling growth in *Lolium perenne* in response to salt stress

草业科学. 2021, 38(6): 1110 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629..2021-0034>

不同温度下PEG-6000渗透胁迫对歪头菜种子发芽的影响

Effects of osmotic stress by PEG-6000 on germination of *Vicia unijuga* seeds under different temperature conditions

草业科学. 2019, 36(5): 1323 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0122>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0469

孟思宇, 李晓青, 魏小星, 刘文辉, 张永超, 鲍根生. 水分胁迫对发草种子萌发和幼苗生长的影响. 草业科学, 2022, 39(8): 1531-1539.

MENG S Y, LI X Q, WEI X X, LIU W H, ZHANG Y C, BAO G S. Effects of water stress on seed germination and seedling growth of *Deschampsia caespitosa* collected from five provenances. Pratacultural Science, 2022, 39(8): 1531-1539.

水分胁迫对发草种子萌发和幼苗生长的影响

孟思宇, 李晓青, 魏小星, 刘文辉, 张永超, 鲍根生

(青海省青藏高原优质牧草种质资源利用重点实验室 / 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 水分是影响发草种子萌发和幼苗成功定植的主要限制因素, 也是决定高寒退化湿地生态修复能否成功的关键所在。基于此, 本研究以青海省和四川省 5 个地理种群发草 (*Deschampsia caespitosa*) 为研究对象, 采用不同 PEG 浓度溶液模拟水分胁迫环境, 测定不同采集地发草发芽率、发芽指数、幼苗高度及胚根长度。结果表明: 随水分胁迫程度增加, 发草种子发芽率、发芽指数、幼苗高度和胚根长度不断降低。水涝 (年均降水量 860 mm) 或干旱 (年均降水量 150 mm) 条件抑制发草种子的萌发和幼苗生长, 而湿生条件 (年均降水量 400~800 mm) 是发草种子萌发和幼苗建植的理想环境。水势模型能准确预测发草种子在不同水势条件下种子萌发进程, 预测结果与实测种子发芽率一致。由此可见, 水分条件对发草种子萌发和幼苗生长具有可塑性, 可为发草在高寒退化湿地生态修复和人工引种驯化提供基础数据。

关键词: 高寒湿地; 发草; PEG-6000; 种子萌发; 幼苗生长; 水势模型

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)08-1531-09

Effects of water stress on seed germination and seedling growth of *Deschampsia caespitosa* collected from five provenances

MENG Siyu, LI Xiaoqing, WEI Xiaoxing, LIU Wenhui, ZHANG Yongchao, BAO Gensheng

(Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau / Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract: Water is regarded as one of the crucial abiotic factors that determines the fate of *Deschampsia caespitosa* seed germination. Consequently, success in terms of seed germination will determine the effect of ecological restoration in alpine wetlands. Therefore, we collected seeds from fruits of *D. caespitosa* from five provenances in Qinghai and Sichuan Province, and conducted a seed germination experiment to examine the effect of water potential on its seed germination ability and seedling growth. Our results demonstrated that seed germination rate, seed germination energy, seedling height, and radicle length decreased with increasing concentration of Polyethylene glycol 6000. Seed germination and seedling growth of *D. caespitosa* seeds collected from waterlogged (mean annual rainfall 860 mm) or arid (mean annual rainfall 150 mm) areas were largely inhibited. Contrasting this, germination and seedling growth of seeds collected from wetlands (mean annual rainfall 400~800 mm) were improved. Our study clearly showed that the hydrotime model can adequately describe the germination time course of *D. caespitosa* seeds under different water potentials, and the conclusion derived from the

收稿日期: 2021-07-30 接受日期: 2022-02-24

基金项目: 青海省科技创新平台建设专项“青藏高原草种质资源创新与利用服务平台”(2021-ZJ-T01); 国家自然科学基金项目 (32060398、U21A20239); 青海省“昆仑英才·高端创新创业人才”计划项目

第一作者: 孟思宇 (1997-), 女, 辽宁铁岭人, 在读硕士生, 主要从事草地有害生物防控的研究。E-mail: 2012370280@qq.com

通信作者: 鲍根生 (1980-), 男, 青海乐都人, 副研究员, 博士, 研究方向为禾草内生真菌。E-mail: baogensheng2008@hotmail.com

hydrotime model is consistent with the observed data. In conclusion, the water conditions of *D. caespitosa* had a variable role in regulating the seed germination and seedling growth. These findings could shed a light on the restoration of degraded wetlands and cultivation and breeding of *D. caespitosa* in alpine wetland region.

Keywords: alpine wetland; *Deschampsia caespitosa*; Polyethylene glycol 6000; seed germination; seedling growth; hydrotime model

Corresponding author: BAO Gensheng E-mail: baogensheng2008@hotmail.com

近年来,由于全球气候变暖和人类活动等因素的综合作用造成青藏高原高寒湿地面积呈持续缩减^[1-2]。同时,青藏高原特殊的地理环境和生态系统的脆弱性成为退化高寒湿地修复主要限制因素^[3-4],而适应湿地环境的草种匮乏是现阶段高寒湿地植被修复的瓶颈问题^[5-6]。可见,从原湿地草地群落筛选出对高寒湿生环境适应性较强的乡土草种是实现高寒退化湿地植被修复的有效途径。

发草 (*Deschampsia caespitosa*) 系禾本科发草属多年生草本植物,是青藏高原高寒湿地和高寒沼泽重要的乡土草种^[7],成为退化高寒沼泽湿地植被恢复的重要生态型草种^[8]。国外有关发草研究起步较早,发现发草对非生物逆境(冷冻、干旱、贫瘠土壤、水淹、重金属)表现出较强适应性^[9-11];同时,发草也表现出耐牧、抗虫和抗病能力^[12-13]。相比之下,国内有关发草研究较少,主要集中于种子萌发特性、种子繁殖技术、栽培驯化和适生地植物群落特征等方面^[7, 14-17]。另外,国外研究发现发草是一种表型可塑性较强的植物,这与发草植株形态、生理、生长发育及繁殖特性等相关^[9-10, 12, 18]。表型可塑性是植物同一基因型在不同环境中表现出不同表型差异的特性,表型差异是植物应对不同生物和非生物逆境的关键生存策略^[19-20]。其中,土壤水分是植物种子萌发和幼苗生长阶段所经历的最普遍的环境胁迫之一,成为影响植物种群更新潜力和扩张能力的外部关键限制因素^[21-22]。

Evans 和 Etherington^[23] 研究发现采自湿地环境的种子对水分胁迫非常敏感,而干旱区植物种子表现出较强的干旱适应能力。Ludewig 等^[24] 研究也发现湿润区和干旱区生境的种子在水分胁迫条件下出现明显差异。可见,种子成熟环境的水分条件对植物种子萌发和幼苗生长表现出较强的生态生理特性的可塑性。然而,有关不同采集地发草种子如何响应水分胁迫及地理生境对发草种子萌发特性

是否存在可塑性等方面的研究尚未开展。

基于此,本研究以四川省和青海省 5 个不同采集地的发草种子为研究对象,采用不同浓度 PEG-6000 模拟水分胁迫的方法研究水分胁迫对发草种子萌发和幼苗生长影响,旨在明晰水分胁迫对发草种子萌发和幼苗定植的影响,确定不同采集地发草种子萌发的基础水势,进而为利用发草修复和治理青藏高原退化高寒湿地提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验种子来源

2014 年 8 月至 9 月中旬发草种子成熟季节在青海省西宁市大通县水滩地、四川省松潘县高寒灌丛及红原县高寒湿地采集发草种子(表 1),采集标准为发草是采集地草地群落优势种(盖度高于 50%),每个种群随机采集 30 株单株。带回实验室并置于 4℃ 冰箱备用。

1.2 试验设计

1.2.1 种子处理

随机挑选部分大小均匀、籽粒饱满的不同采集地发草种子,用 1% 次氯酸钠溶液消毒 5 min,随后用蒸馏水冲洗数次,晾干备用。

1.2.2 不同渗透势 PEG-6000 溶液配制

参照 Michel 和 Kaufmann 方法^[25],将 PEG-6000 配制成渗透势分别为 -0.2、-0.4、-0.6、-0.8、-1.0 和 -1.2 MPa 的处理液,以添加蒸馏水为对照,在直径 12 cm 灭菌培养皿内放置双层定性滤纸[双圈牌,通用电气生物科技(杭州)有限公司],然后在不同处理的培养皿中分别添加不同渗透势处理液,对照组加入 5 mL 蒸馏水。随机挑选 50 粒消毒的不同采集地发草种子摆放于培养皿内,5 次重复,称量每皿的初始重量。将供试培养皿置于人工气候箱(RTOP,杭州拓普仪器有限公司)内,在 25℃(前期试验中发

表 1 发草种子采集地信息
Table 1 The information of *Deschampsia caespitosa* seeds collected from five provenances

编号 Number	采集地 Collection site	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Elevation/m	年均气温 Mean annual temperature/℃	年均降水量 Mean annual rainfall/mm
SC1	四川省松潘县牟尼乡 Muni Township, Songpan County, Sichuan Province	32°40'01" N, 10°30'48" E	3 280	5.7	860
SC2	四川省红原县江茸乡 Jiangrong Township, Hongyuan County, Sichuan Province	32°31'51" N, 10°20'13" E	3 543	2.9	720
QH1	青海省大通县向化藏族乡 Xianghua Tibetan Township, Datong County, Qinghai Province	37°05'14" N, 101°53'06" E	3 114	0.8	590
QH2	青海省大通县朔北藏族乡 Shuobei Tibetan Township, Datong County, Qinghai Province	37°07'03" N, 101°50'37" E	3 043	3.9	450
QH3	青海省大通县斜沟乡 Xiegou Township, Datong County, Qinghai Province	36°58'40" N, 101°34'60" E	2 743	2.0	150

大写字母缩写QH和SC表示发草种子采集地为青海省和四川省,大写字母后面数字表示在同一省份所采集样点编号;下表同。
The abbreviations SC and QH indicate that seeds were sampled from Qinghai and Sichuan Province, respectively. The numbers following SC and QH indicate sampled seeds of *Deschampsia caespitosa* collected from same province; this is applicable for the following tables as well.

草种子最适温度)、相对湿度 80%、10 h 光照/14 h 黑暗条件下进行发芽试验,每隔 24 h 依据初始培养皿重量补充适量蒸馏水。每日定时观察种子发芽情况,种子胚根长 2 mm 视为发芽种子,直至 3 d 内未出现发芽种子。统计不同采集地发草种子发芽数量,计算发芽率(germination rate, GR)和发芽势(germination energy, GE)。同时,从每皿内随机挑选 5 株幼苗测量幼苗高度和胚根长度。其中,发芽率和发芽势计算公式如下:

$$\text{发芽率}(GR) = \text{发芽种子数} / \text{供试种子数} \times 100\%; \quad (1)$$
$$\text{发芽势}(GE) = 7\text{d内种子发芽数量} / \text{供试种子数} \times 100\%。 \quad (2)$$

1.3 种子萌发水势模型

种子萌发速率与渗透势主要参照 Bradford^[26]方法:
$$\theta_H = [\Psi - \Psi_{b(g)}]t_g。 \quad (3)$$

式中: θ_H 指特定种子种群水势常数(MPa·h), Ψ 指发芽试验中设定水势, $\Psi_{b(g)}$ 指达到发芽分数 g 时所需的基本水势或临界阈值, t_g 指达到发芽分数 g 所需时间。同种种子种群 $\Psi_{b(g)}$ 值呈正态分布,其中,中位数 $\Psi_{b(50)}$ 、标准偏差 σ_{Ψ_b} 被认为是该种子种群的特征值,上述特征值可通过重复概率分析方程计算^[26-27]。

$$\text{probit}(g) = [\Psi - (\theta_H/t_g)\Psi_{b(50)}] / \sigma_{\Psi_b}。 \quad (4)$$

预测值与实测值间的拟合程度可通过方程的决

定系数(R^2)来确定;其中, $y_{\text{实测}}$ 表示实际观测数值, $y_{\text{预测}}$ 表示通过方程 5 预测值, $\bar{y}_{\text{实测}}$ 表示实际观测数值的平均数。若 $R^2 = 1$ 代表预测值和实测值拟合程度最佳。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{\text{实测}} - y_{\text{预测}})^2}{\sum (y_{\text{实测}} - \bar{y}_{\text{实测}})^2}。 \quad (5)$$

1.4 统计分析

采用单因素方差分析方法检测不同渗透势对同一采集地发草种子发芽率、发芽势、幼苗高度和胚根长度的影响。其中,不同渗透势为固定变量,种子发芽(发芽率和发芽势)和幼苗形态(幼苗高度和胚根长度)特性为响应变量。为满足变量方差齐性和正态分布要求,发芽率和发芽势采用对数转化,幼苗高度和胚根长度采用反正弦转化。所有数据利用 SPSS 19.0 进行分析。

2 结果

2.1 渗透胁迫对不同采集地发草种子发芽率和发芽势的影响

渗透胁迫显著影响发草种子发芽率和发芽势(表 2)。水分充足环境中发草种子发芽率和发芽势最高;而随着渗透胁迫增加,发草种子发芽率和发芽势快速降低;其中, QH1、QH2、QH3 和 SC1 种子

表 2 不同渗透势对同一采集地发草种子发芽率、发芽势、幼苗高度和胚根长度影响的单因素方差分析
Table 2 One-way analysis of variance results for seed germination rate, seed germination energy, seedling height, and radicle length of *Deschampsia caespitosa* collected from five provenances under different values of osmotic potential

采集地 Collection site	发芽率 Germination rate		发芽势 Germination energy		幼苗高度 Seedling height		胚根长度 Radicle length	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
SC1	18.07	< 0.01	19.43	< 0.01	29.22	< 0.01	31.34	< 0.01
SC2	63.16	< 0.01	267.20	< 0.01	112.77	< 0.01	66.90	< 0.01
QH1	93.84	< 0.01	334.24	< 0.01	31.92	< 0.01	143.89	< 0.01
QH2	79.34	< 0.01	78.56	< 0.01	129.84	< 0.01	877.70	< 0.01
QH3	21.25	< 0.01	45.76	< 0.01	15.75	< 0.01	167.87	< 0.01

在-0.8 MPa 渗透环境中发芽率为 0, SC2 种子发芽率仅为 5.13%。随渗透胁迫增加至-1.0 MPa, SC2 种子发芽率为 0; 渗透胁迫增加至-0.6 MPa 时, 不同采集地发草种子发芽势均为 0 (图 1)。不同采集地发草种子在相同渗透胁迫环境中发芽率和发芽势存在显著差异 (表 2) ($P < 0.05$), 水分充足条件下各采集地发草发芽率和发芽势均表现为 QH1 > SC2 > QH2 > QH3 > SC1, 轻度渗透胁迫 (-0.2、-0.4 MPa) 环境下 QH1 和 SC2 发草发芽率和发芽势较高, 发芽率显著高于 QH2、QH3 和 SC1 发草 ($P < 0.05$); 重度渗透胁迫 (≥ -0.6 MPa) 环境下不同采集地发草发芽率和发芽势差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.2 渗透胁迫对不同采集地发草幼苗高度和胚根长度的影响

不同渗透胁迫显著影响发草幼苗高度和胚根长度 (表 2)。水分充足条件下, SC2 发草幼苗高度最高, 而 QH2 发草幼苗高度显著低于其他采集地发草幼苗高度 (图 2) ($P < 0.05$); 随渗透胁迫增加, SC1、SC2 和 QH1 发草幼苗高度快速降低, 而 QH2 和 QH3 发草幼苗高度缓慢降低。在水分充足环境中 SC2 胚根最长, 而 QH3 胚根最短; 随渗透胁迫程度增加, SC2 发草胚根长度快速变短; 在轻度胁迫环境中 (≤ -0.4 MPa) QH1、SC1 和 SC2 胚根长度显著大于 QH2 和 QH3 ($P < 0.05$), 而渗透水势超过-0.4 MPa 后胚根长度快速降低且在-0.8 MPa 水势条件下胚根长度为 0。

2.3 不同渗透势条件下发草种子萌发进程模型

低渗透势条件下 (≤ -0.6 MPa), 水分拟合模型能准确预测 SC1、QH1、QH2 和 QH3 发草种子萌发

进程 (图 3); 而渗透势低于-0.8 MPa 时, 水分模型能准确拟合 SC2 种子萌发进程。另外, SC2 和 QH1 发草种子 $\psi_{b(50)}$ 较低, 分别为-0.44 和-0.51 MPa; 而 SC1 发草种子 $\psi_{b(50)}$ 最高 (-0.05 MPa) (表 3)。

3 讨论

水分是影响植物种子萌发和幼苗定植的最关键非生物因素之一, 也是决定植物种群稳定和扩张的内部驱动力^[28-29]。大量研究结果表明, 随着水分胁迫加剧, 种子萌发数量会持续降低; 同时, 幼苗生长和根系发育也会被严重抑制, 并最终造成植物种群存活率快速降低^[30]。本研究发现, 随着水分胁迫程度增加, 供试发草种子发芽率、发芽指数、幼苗高度和胚根长度快速降低。尤其渗透胁迫大于-0.4 MPa 条件下, 发草种子发芽特性和幼苗生长被严重抑制; 当渗透胁迫超过-1.0 MPa 时, 种子不能萌发。上述结果说明发草种子对水分胁迫较为敏感, 轻度干旱易造成种子休眠, 而重度干旱易造成发草种子永久休眠。造成这种现象原因主要为: 发草生境主要为高寒草原、林地、河边和沼泽地带, 生境内土壤含水量充盈是发草种子成功萌发的主要条件^[12]。另外, 发草植株在营养生长阶段保持较高的水分利用效率和较低的蒸腾速率, 而这一过程将延续至生殖生长阶段, 水分可能是影响发草成功形成种子的关键影响因子^[31]。然而, 雷舒涵等^[32]对甘肃天祝地区采集发草种子水分胁迫研究发现, 随水分胁迫程度增加, 发草种子萌发率呈先增加后降低变化; 造成这种差异原因主要与水分胁迫设定梯度相关, 两个研究中轻度水分胁迫 PEG 浓度分别为-0.1 和-0.2 MPa, 从而推测发草抗旱能力较弱。另外, 张睿昕等^[14]

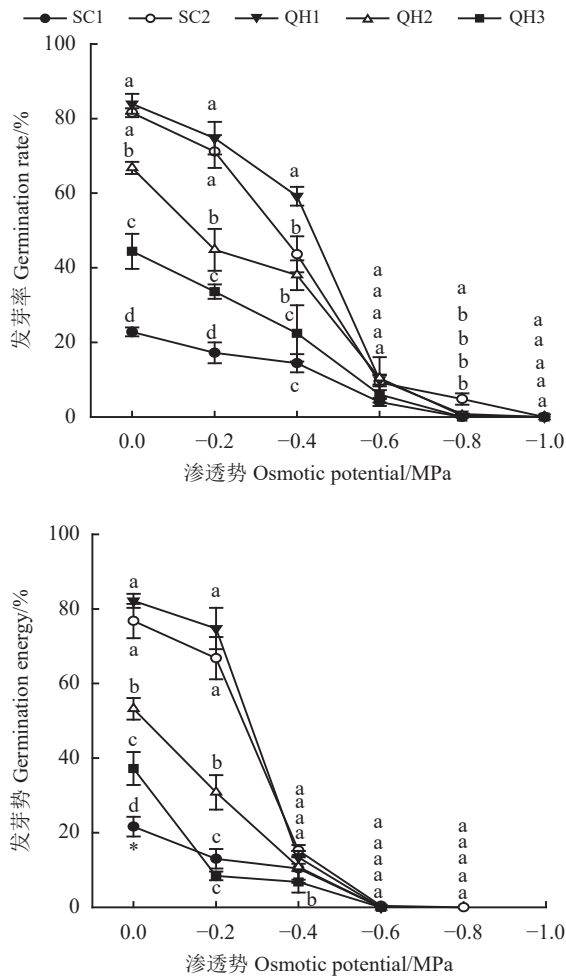


图 1 不同采集地发草种子在不同渗透胁迫条件下发芽率和发芽势的变化

Figure 1 Effects of different values of osmotic potential on seed germination rate and germination energy of *Deschampsia caespitosa* collected from five provenances

不同小写字母表示同一水势条件下不同采集地差异显著 ($P < 0.05$)。SC1: 四川省松潘县牟尼乡; SC2: 四川省红原县江茸乡; QH1: 青海省大通县向化藏族乡; QH2: 青海省大通县朔北藏族乡; QH3: 青海省大通县斜沟乡; 图 2 同。

Different lowercase letters in the same osmotic potential value indicate significant difference between different provenances at the 0.05 level. SC1: Muni Township, Songpan County, Sichuan Province; SC2: Jiangrong Township, Hongyuan County, Sichuan Province; QH1: Xianghua Tibetan Township, Datong County, Qinghai Province; QH2: Shuobei Tibetan Township, Datong County, Qinghai Province; QH3: Xiegou Township, Datong County, Qinghai Province; this is applicable for Figure 2 as well.

研究发现在遭遇干旱和高温条件下,发草发芽率快速降低;徐秀丽^[33]研究也发现滨发草(*Deschampsia littoralis*)在低温条件下能保持较高发芽率。这也为发草主要分布在高寒草甸、沼泽地和林地,而干旱草原和荒漠地带未曾出现发草种群提供直接证据。同时,上述研究也证实中低温度和水分充足是发草

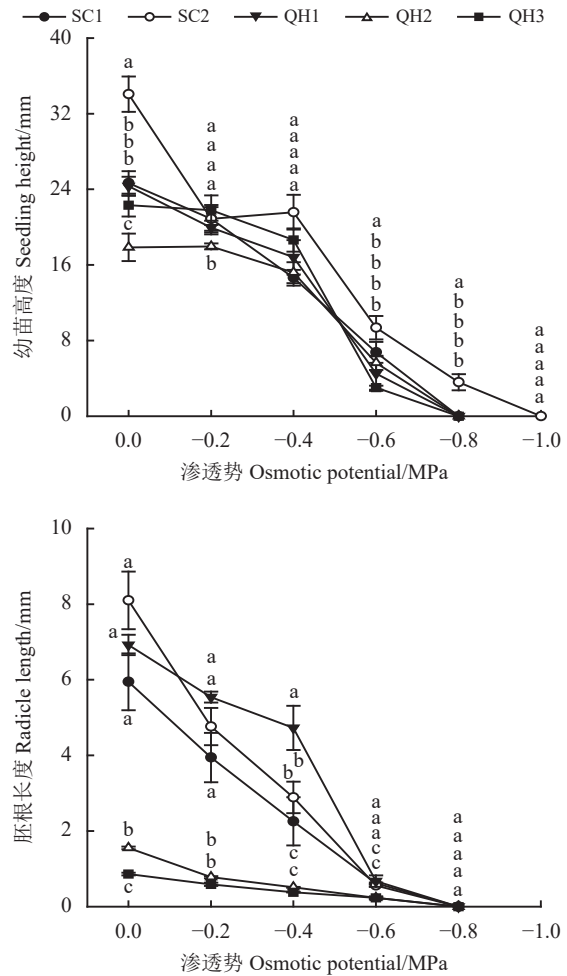


图 2 不同采集地发草种子在不同渗透胁迫条件下幼苗高度和胚根长度变化

Figure 2 Effects of different values of osmotic potential on seedling height and radicle length of *Deschampsia caespitosa* collected from five provenances

种子萌发的最适条件。

植物生长和种子形成环境对种子萌发能力存在调控作用^[34],其中,土壤水分含量可调控种子萌发和决定幼苗存活能力^[35-36]。Evans 和 Etherington^[23]研究发现种子萌发特性与种子形成环境的土壤含水量密切相关,干旱环境成熟的植物种子在土壤水分亏缺条件保持较高发芽率;而湿润环境成熟的种子在土壤水分亏缺条件下不能发芽。Lima 和 Meiado^[37]研究也发现土壤水分含量对仙人掌(*Pilosocereus catingicola*)种子发芽特性具有显著影响,表现为湿润环境中形成种子对干旱胁迫更为敏感;进一步证明不同生境对种子萌发特性具有较强的可塑性^[38-39]。本研究发现四川省和青海省采集 5 份发草种子发芽率存在明显差异(图 1),根据左大康^[40]按照年降水

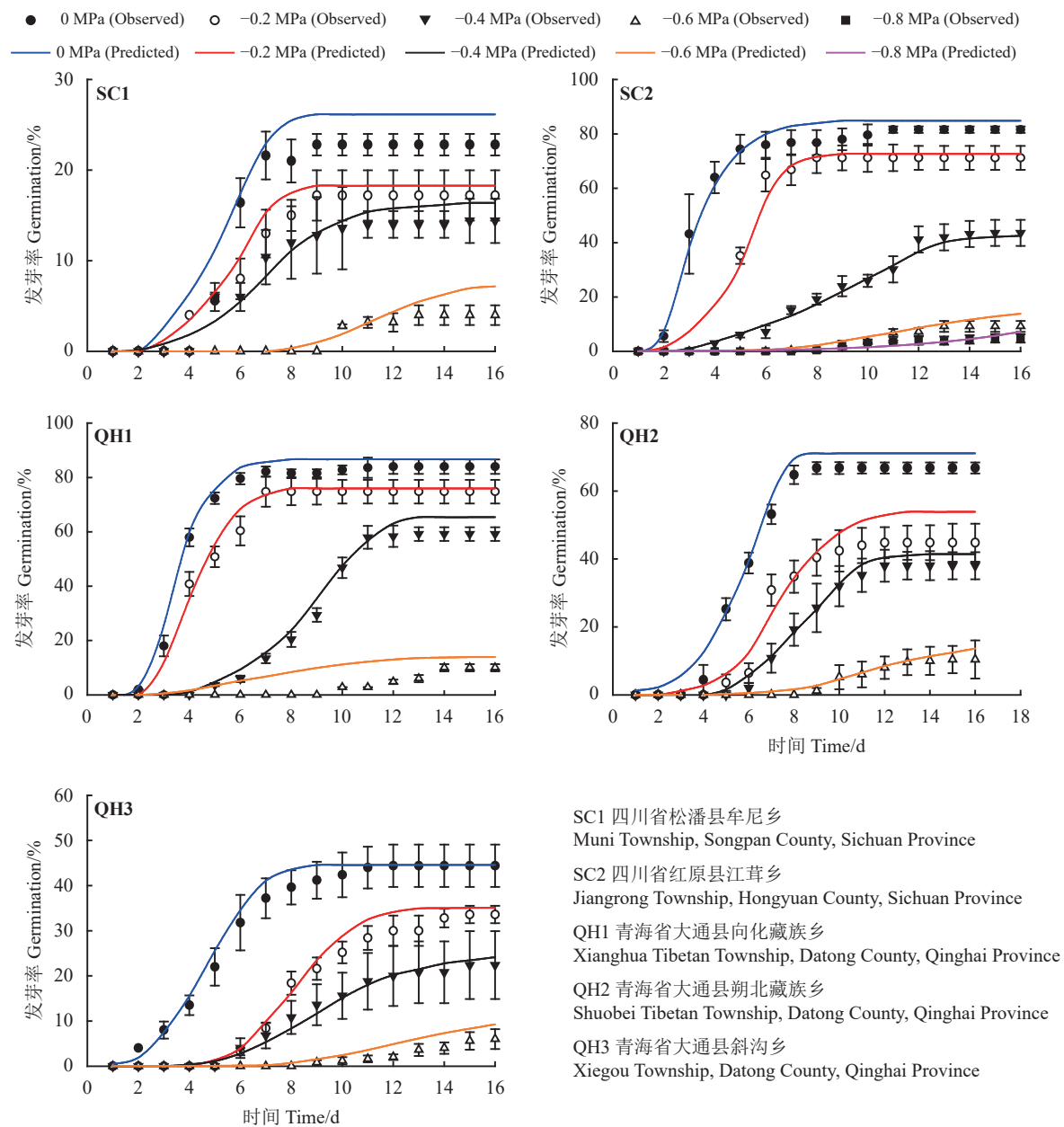


图 3 不同采集地发草种子在不同渗透势条件下预测(线)和实测(点)萌发进程模拟
Figure 3 Predicted (line) and observed (dot) germination time course of the response of *Deschampsia caespitosa* collected from five provenances to water potential

量对全国干湿地区的划分标准(年降水量 < 200 mm 为干旱地区, 200~400 mm 为半干旱地区, 400~800 mm 为半湿润地区, 年降水量 > 800 mm 为湿润地区), 本研究结果表现为湿润区 SC1 (降水量 860 mm) 和干旱区 QH3 (降水量 150 mm) 发草种子发芽率最低, 而半湿润区 (降水量均值 586 mm) 种子发芽率较高。这表明采集地降水量过高或干旱条件均能抑制发草种子萌发, 说明土壤含水量是发草种子萌发关键影响因素, 而适度土壤含水量却能加速种子萌发进程。由此可见, 不同生境对种子萌发特性

具有一定可塑性, 但对种子发芽能力调控能力表现出种间异质性^[23,41]。

众多研究证明水势模型可准确预测植物种子萌发进程, 已成为不同水分胁迫下种子萌发进程预测的经典方法^[42-43]。基于不同水分胁迫梯度, 水势模型可预测种子萌发 $\Psi_{b(50)}$ 、水势时间和标准偏差等关键种子萌发指标, 进而预测不同采集地植物种子萌发必备的基本参数值^[26]。本研究也证明水势模型能较好地模拟不同采集地发草种子发芽进程, 这一研究结果与其他植物种子利用水势模型预测种子萌

表 3 基于水势模型估计不同采集地发草种子萌发的基础水势

Table 3 Seed germination parameters for response of *Deschampsia caespitosa* collected from five provenances to water potential based on hydrotime model analysis

采集地 Collection site	回归方程 Regression equation	水势时间值 Constant hydrotime/ (Mpa·h ⁻¹)	基础水势[Ψ _{b(50)}] Base water potential for 50% of seeds to germinate	标准偏差[σ _{Ψ_{b(50)}}] Standard deviation of Ψ _{b(50)}	R ²
SC1	y = 0.771x - 0.052	176.5	-0.05	0.77	0.81
SC2	y = 0.230x - 0.440	50.5	-0.44	0.23	0.97
QH1	y = 0.237x - 0.512	59.5	-0.51	0.24	0.90
QH2	y = 0.360x - 0.286	115.5	-0.29	0.36	0.96
QH3	y = 0.284x - 0.437	92.5	-0.28	0.28	0.94

发过程一致^[36, 44]。不同水分胁迫下发草种子萌发形成水势模拟进程与不同水势条件种子萌发率变化结果高度相似。例如,采集于 SC2 和 QH1 发草种子在不同水分胁迫条件下维持较高发芽率,而这与 SC2 和 QH1 发草种子具有较低的 $\Psi_{b(50)}$ 和较短发芽周期结果相吻合;说明 SC2 和 QH1 发草种子萌发对水分要求不高,轻度干旱条件下种子能成功萌发。同时, SC1 发草种子发芽 $\Psi_{b(50)}$ 较高且发芽周期较长也与 SC1 在不同水分胁迫下发芽率较低结论一致,说明 SC1 发草种子萌发对水分要求较高,充足水分条件下种子能快速萌发,而干旱条件下种子将进入生理休眠状态贮存于土壤,形成长久性种子库。另外,本研究初步通过构建水势模型来预测不同水分胁迫对发草种子萌发进程的影响,通过分析水势模型相关参数来预测种子萌发进程,进而深刻解读种子萌发过程中所涵盖的生态学和生物学意

义^[3, 45]。这将进一步深刻理解水分在发草种子萌发过程的关键作用和揭示采集地生境在发草种子进程调控及萌发特性的可塑性。

4 结论

综上所述,本研究发现不同采集地发草种子萌发对水分胁迫敏感性存在差异。其中,水涝(SC1)或干旱环境(QH3)不利于发草种子萌发,而降水量介于 400~800 mm 半湿润环境(SC2、QH1 和 QH2)是发草种子萌发的理想生境;这一研究结果为发草主要分布区为高寒林地、沼泽等湿生环境提供直接证据。同时,也证明水分是影响发草种子成功萌发和种群快速建植的关键限制因子。另外,水势模型预测不同采集地发草的基础水势也将为利用发草对不同退化湿生草地开展植被恢复提供基础数据。

参考文献 References:

[1] 赵志龙, 张镔铨, 刘林山, 刘峰贵, 张海峰. 青藏高原湿地研究进展. 地理科学进展, 2014, 33(9): 1218-1230.
ZHAO Z L, ZHANG Y L, LIU L S, LIU F G, ZHANG H F. Advances in research on wetlands of the Tibetan Plateau. Progress in Geography, 2014, 33(9): 1218-1230.

[2] MIEHE G, SCHLEUSS P-M, SEEGER E, BABEL W, BIERMANN T, BRAENDLE M, CHEN F H, CONERS H, FORKEN T, GERKEN T, GRAD H-F, GUGGENBERGER G, HAFNER S, HOLZAPFEL M, INGRISCH J, KUZUYAKOV Y, LAI Z P, LEHNERT L, LEUSCHNER C, LIU J Q, LIU S B, MA Y M, MIEHE A, MOSBRUGGER V, NOLTIE H J, SCHMIDT J, SPIELVOGEL S, UNTEREGELSBACHER S, WANG Y, WILLINGHOFER S, XU X L, YANG Y P, ZHANG S R, OPGENOORTH L, WESCHE K. The *Kobresia pygmaea* ecosystem of the Tibetan highlands-origin, functioning and degradation of the world's largest pastoral alpine ecosystem: *Kobresia* pastures of Tibet. *Science of The Total Environment*, 2019, 648: 754-771.

[3] LU S L, CHEN F, ZHOU J F, HUGHES A C, MA X Q, GAO W W. Cascading implications of a single climate change event for fragile ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecosphere*, 2020, 11(9): e03243.

[4] WEI D, ZHAO H, HUANG L, QI Y H, WANG X D. Feedbacks of alpine wetlands on the Tibetan plateau to the atmosphere. *Wetlands*, 2020, 40(4): 787-797.

- [5] 韩大勇, 杨永兴, 杨杨, 李珂. 放牧干扰下若尔盖高原沼泽湿地植被种类组成及演替模式. 生态学报, 2011, 31(20): 5946-5955.
HAN D Y, YANG Y X, YANG Y, LI K. Species composition and succession of swamp vegetation along grazing gradients in the Zoige Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 5946-5955.
- [6] GAO J, LI X L, CHENG A, YANG Y W. Degradation of wetlands on the Qinghai-Tibet Plateau: A comparison of the effectiveness of three indicators. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(4): 658-667.
- [7] 孙明德, 孙连生, 吕金博. 发草是高寒地区的优良牧草. 青海草业, 1994, 8(8): 7-8.
SUN M D, SUN L S, LYU J B. *Deschampsia caespitosa* is an excellent forage in alpine region. *Qinghai Prataculture*, 1994, 8(8): 7-8.
- [8] 罗巧玉, 王彦龙, 陈志, 马永贵, 任启梅, 马玉寿. 水分逆境对发草脯氨酸及其代谢途径的影响. 草业学报, 2021, 30(5): 75-83.
LUO Q Y, WANG Y L, CHEN Z, MA Y G, REN Q M, MA Y S. Effect of water stress on proline accumulation and metabolic pathways in *Deschampsia caespitosa*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(5): 75-83.
- [9] DAVY A J, TAYLOR K. Water characteristics of contrasting soils in the Chiltern Hills and their significance for *Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv. *Journal of Ecology*, 1974, 62(2): 367-378.
- [10] DAVY A J, TAYLOR K. Seasonal changes in the inorganic nutrient concentrations in *Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv. in relation to its tolerance of contrasting soils in the Chiltern Hills. *Journal of Ecology*, 1975, 63(1): 27-39.
- [11] MERRILL E H, COLBERG P J. Defoliation, waterlogging and dung influences allocation patterns of *Deschampsia caespitosa*. *Journal of Range Management*, 2003, 56(6): 634-639.
- [12] DAVY A J. *Deschampsia Caespitosa* (L.) Beauv. *Journal of Ecology*, 1980, 68(3): 1075-1096.
- [13] MASSEY F P, HARTLEY S E. Physical defences wear you down: Progressive and irreversible impacts of silica on insect herbivores. *Journal of Animal Ecology*, 2009, 78(1): 281-291.
- [14] 张睿昕, 鱼小军, 邓利强, 薛鑫. 温度对发草种子萌发和幼苗生长的影响. 草原与草坪, 2010, 30(1): 42-44.
ZHANG R X, YU X J, DENG L Q, XUE X. Effects of temperature on *Deschampsia caespitosa* seed germination and seedling growth. *Grassland and Turf*, 2010, 30(1): 42-44.
- [15] 顾文毅. 发草种子繁殖技术研究. 青海科技, 2007, 14(4): 30-32.
GU W Y. Study on seed propagation technology of *Deschampsia caespitosa*. *Qinghai Science and Technology*, 2007, 14(4): 30-32.
- [16] 王彦龙, 马玉寿, 施建军, 李世雄, 盛丽. 发草栽培驯化研究初报. 青海畜牧兽医杂志, 2019, 49(2): 21-24.
WANG Y L, MA Y S, SHI J J, LI S X, SHENG L. Study on cultivation and domestication of *Deschampsia caespitosa*. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2019, 49(2): 21-24.
- [17] 罗巧玉, 王彦龙, 杜雷, 刘念, 李丽, 马玉寿. 黄河源区发草适生地植物群落特征及其土壤因子解释. 草业学报, 2021, 30(4): 80-89.
LUO Q Y, WANG Y L, DU L, LIU N, LI L, MA Y S. Plant community diversity and soil factor interpretation of adaptive region of *Deschampsia caespitosa* in the source region of the Yellow River. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(4): 80-89.
- [18] CHOI B, JEONG H, KIM E. Phenotypic plasticity of *Capsella bursa-pastoris* (Brassicaceae) and its effect on fitness in response to temperature and soil moisture. *Plant Species Biology*, 2019, 34(1): 5-10.
- [19] LEVIS N A, ISDANER A J, PFENNIG D W. Morphological novelty emerges from pre-existing phenotypic plasticity. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(8): 1289-1297.
- [20] GOMEZ J M, PERFECTTI F, ARMAS C, NARBONA E, GONZALEZ-MEGIAS A, NAVARRO L, DESOTO L, TORICES R. Within-individual phenotypic plasticity in flowers fosters pollination niche shift. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4109.
- [21] ATTA K, PAL A K, JANA K. Effects of salinity, drought and heavy metal stress during seed germination stage in ricebean [*Vigna umbellata* (Thunb.) Ohwi and Ohashi]. *Plant Physiology Reports*, 2021, 12: 109-115.
- [22] LIU M L, LI M, LIU K C, SUI N. Effects of drought stress on seed germination and seedling growth of different maize varieties. *Journal of Agricultural Science*, 2015, 7(5): 231-240.
- [23] EVANS C E, ETHERINGTON J R. The effect of soil water potential on seed germination of some British plants. *New Phytologist*, 1990, 115(3): 539-548.
- [24] LUDEWIG K, ZELLE B, ECKSTEIN R L, MOSNER E, OTTE A, DONATH T W. Differential effects of reduced water potential on the germination of floodplain grassland species indicative of wet and dry habitats. *Seed Science Research*, 2014, 24(1): 49-61.
- [25] MICHEL B E, KAUFMANN M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiology*, 1973, 51(5): 914-916.
- [26] BRADFORD K J. A water relations analysis of seed germination rates. *Plant Physiology*, 1990, 94(2): 840-849.

- [27] CHENG Z Y, BRADFORD K J. Hydrothermal time analysis of tomato seed germination responses to priming treatment. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50(330): 89-99.
- [28] ROBERTS E H, ELLIS R H. Water and seed survival. *Annals of Botany*, 1989, 63(1): 39.
- [29] BASKIN C C. Seed ecology: A diverse and vibrant field of study. *Seed Science Research*, 2017, 27(2): 61-64.
- [30] SEVIK H, CETIN M. Effects of water stress on seed germination for select landscape plants. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2015, 24(2): 689-693.
- [31] 任青吉, 李宏林, 卜海燕. 玛曲高寒沼泽化草甸 51 种植物光合生理和叶片形态特征的比较. *植物生态学报*, 2015, 39(6): 593-603.
- ERN Q J, LI H L, BU H Y. Comparison of physiological and leaf morphological traits for photosynthesis of the 51 plant species in the Maqu alpine swamp meadow. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(6): 593-603.
- [32] 雷舒涵, 杨妮妮, 余倩倩, 张浩玮, 田彦锋, 白小明. 甘肃地区 10 个野生观赏草种子萌发期抗旱性评价. *草业科学*, 2016, 33(12): 2475-2484.
- LEI S H, YANG N N, XU Q Q, ZHANG H W, TIAN Y F, BAI X M. Evaluation of drought resistance of ten wild ornamental grass germplasm during seed germination stage. *Pratacultural Science*, 2016, 33(12): 2475-2484.
- [33] 徐秀丽. 冷藏和温度对高寒草甸两类常见植物种子萌发特性的影响. 兰州: 兰州大学硕士学位论文, 2007.
- XU X L. Effect of cold stratification and temperature on seed germination of two types of plant of the alpine meadow. Master Thesis. Lanzhou: Lanzhou University, 2007.
- [34] ELNAGGAR A, EI-KEBLAWY A, MOSA K A, NAVARRO T. Adaptive drought tolerance during germination of *Salsola drummondii* seeds from saline and nonsaline habitats of the arid Arabian deserts. *Botany*, 2019, 97(2): 123-133.
- [35] RAMIREZ-TOBIAS H M, PENA-VALDIVIA C B, TREJO C, AGUIRRE J R, HUMBERTO V H. Seed germination of *Agave* species as influenced by substrate water potential. *Biological Research*, 2014, 47(1): 11.
- [36] HU X W, FAN Y, BASKON C C, WANG Y R. Comparison of the effects of temperature and water potential on seed germination of Fabaceae species from desert and subalpine grassland. *American Journal of Botany*, 2015, 102(5): 649-660.
- [37] LIMA A T, MEIADO M V. Discontinuous hydration alters seed germination under stress of two populations of cactus that occur in different ecosystems in Northeast Brazil. *Seed Science Research*, 2017, 27(4): 292-302.
- [38] ELBERSE I, VAN-DAMME J, VAN-TIENDEREN P. Plasticity of growth characteristics in wild barley (*Hordeum spontaneum*) in response to nutrient limitation. *Journal of Ecology*, 2003, 91(3): 371-382.
- [39] ZHOU D W, WANG T H, VALENTINE I. Phenotypic plasticity of life-history characters in response to different germination timing in two annual weeds. *Canadian Journal of Botany*, 2005, 83(1): 28-36.
- [40] 左大康. 现代地理学辞典. 北京: 商务印书馆, 1990.
- ZUO D K. A Modern Dictionary of Geography. Beijing: The Commercial Press, 1990.
- [41] MEYER S E, MONSEN S B. Habitat-correlated variation in mountain big sagebrush (*Artemisia tridentata* ssp. *vaseyana*) seed germination patterns. *Ecology*, 1991, 72(2): 739-742.
- [42] ALVARADO V, BRADFORD K J. A hydrothermal time model explains the cardinal temperatures for seed germination. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(8): 1061-1069.
- [43] BRADFORD K J. Applications of hydrothermal time to quantifying and modeling seed germination and dormancy. *Weed Science*, 2002, 50(2): 248-260.
- [44] 李廷山, 王娟, 胡小文. 4 种野豌豆种子萌发对水分胁迫的响应. *草业科学*, 2013, 30(8): 1200-1207.
- LI T S, WANG J, HU X W. Response of four *Vicia* species seed germination to water stress. *Pratacultural Science*, 2013, 30(8): 1200-1207.
- [45] ALLEN P, MEYER S, KHAN M A. Seed Biology: Advances and Applications. Wallingford, UK: CAB International, 2000.

(责任编辑 张瑾)