

网络出版时间:2015-09-09 15:41

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.10.007

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150909.1541.014.html

干旱胁迫对砂生槐种子萌发和幼苗生长的影响

张艳福^{1,2,3},姚卫杰^{1,2,3},郭其强^{1,2,3},边巴多吉⁴,李慧娥¹

(1 西藏大学 农牧学院,西藏 林芝 860000;2 西藏高原森林生态教育部重点实验室,西藏 林芝 860000;

3 西藏林芝高山森林生态系统国家野外科学观测研究站,西藏 林芝 860000;

4 西藏自治区林业调查规划研究院,西藏 拉萨 850000)

【摘 要】 【目的】研究干旱胁迫对不同种源砂生槐种子萌发及幼苗生长的影响,筛选最耐旱的砂生槐种源。

【方法】2013-10,以采自西藏不同地区的 13 个种源砂生槐为研究对象,用质量浓度为 0,50,100,150,200,250 和 300 g/L 的 PEG6000 模拟干旱胁迫,分析干旱胁迫对 13 份不同种源砂生槐种子萌发及幼苗生长的影响,并选用 200 g/L PEG6000 胁迫下的发芽率、发芽势、发芽指数、上胚轴长、下胚轴长、胚根长等 6 个指标对不同种源砂生槐进行耐旱性评价。【结果】13 个种源砂生槐种子纵径、横径、硬实率和千粒质量 4 个基本特征间存在一定差异:种子纵径为 4.60~5.19 mm,种子横径为 3.70~3.98 mm,硬实率为 87.00%~100.00%,千粒质量为 38.19~47.14 g。低质量浓度(50~150 g/L)PEG6000 对砂生槐种子发芽率、发芽势有一定程度的促进作用,当 PEG6000 质量浓度高于 200 g/L 时,发芽率、发芽势均明显降低。当 PEG6000 质量浓度为 0~300 g/L 时,随着 PEG6000 质量浓度的增大,除贡嘎县江塘镇(GJT)种源外,其他种源种子的发芽指数总体上均呈逐渐下降趋势。总体上看,当 PEG6000 质量浓度为 0~100 g/L 时,各种源幼苗上胚轴长均较高;PEG6000 质量浓度高于 150 g/L 时,不同种源幼苗上胚轴长明显降低;PEG6000 质量浓度为 200 g/L 时,幼苗的上胚轴很短或为 0;而在 PEG6000 质量浓度为 250~300 g/L 时,所有幼苗未长出上胚轴。在 0~150 g/L PEG6000 胁迫下,13 个种源幼苗下胚轴长变化幅度并不大;当 PEG6000 质量浓度高于 200 g/L 时,下胚轴长明显下降,在 300 g/L PEG6000 胁迫下,13 个种源砂生槐幼苗下胚轴长均为 0 mm。在 PEG6000 质量浓度为 0~150 g/L 时,幼苗胚根长总体较高但变化幅度不大;当 PEG6000 质量浓度为 200 g/L 时,除南木林县艾玛乡(NML)种源外,其他种源幼苗的胚根长开始较大幅度下降;当 PEG6000 质量浓度为 250 g/L 时,胚根长进一步下降,其中有 7 个种源的幼苗胚根长为 0 mm;当 PEG6000 质量浓度为 300 g/L 时,所有种源幼苗的胚根长均为 0 mm。耐旱性综合评价结果显示,13 个种源中,有 2 个种源属耐旱型,3 个种源属较耐旱型,1 个种源属中间型,4 个种源属干旱较敏感型,3 个种源属干旱敏感型。【结论】适宜的干旱胁迫对砂生槐种子的萌发和幼苗生长有一定促进作用;13 个种源中,采自南木林县艾玛乡(NML)和朗县金东乡(LJD)的砂生槐耐旱性最强。

【关键词】 砂生槐;干旱胁迫;种子萌发;幼苗生长;耐旱性评价

【中图分类号】 S792.260.1;Q945.78

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2015)10-0045-12

Effect of drought stress on seed germination and seedling growth of *Sophora moorcroftiana*

ZHANG Yan-fu^{1,2,3}, YAO Wei-jie^{1,2,3}, GUO Qi-qiang^{1,2,3},
BIANBA Duo-ji⁴, LI Hui-e¹

(1 Agricultural and Animal Husbandry College, Tibet University, Nyingchi, Tibet 860000, China;

2 Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet Plateau, Ministry of Education, Nyingchi, Tibet 860000, China;

3 National Key Station for Field Scientific Observation & Experiment, Nyingchi, Tibet 860000, China;

【收稿日期】 2015-03-27

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31260189);西藏特色农牧资源研发协同创新中心建设项目;高原基础生态学术团队能力提升计划项目

【作者简介】 张艳福(1991—),男,河南淮滨人,在读硕士,主要从事高原植物生理生态研究。E-mail:zhangyanfusn@126.com

【通信作者】 李慧娥(1979—),女,陕西汉中,副教授,博士,主要从事植物生理与分子生物学研究。E-mail:lihuiesh@126.com

4 Research Institute of Forestry Investigation in Tibet Autonomous Region, Lhasa, Tibet 850000, China)

Abstract: 【Objective】 This paper studied the effects of drought stress on seed germination and seedling growth of *Sophora moorcroftiana* from different provenances to screen the most drought resistant provenances. 【Method】 In October 2013, the effects of PEG6000 (simulating drought stress) at different mass concentrations (0, 50, 100, 150, 200, 250 and 300 g/L) on seeds germination and seedling growth of 13 provenances were examined, and the drought resistant capacities of *S. moorcroftiana* from different provenances under 200 g/L PEG6000 stress were evaluated using six indexes including germination percentage, germination energy, germination index, epicotyl length, hypocotyl length, and radicle length. 【Result】 Differences existed among 13 provenances in four basic features including seed length, seed width, percentage of hard seeds and 1 000-seeds weight of *S. moorcroftiana*; the seed length was 4.60—5.19 mm, the seed width was 3.70—3.98 mm, the percentage of hard seeds was 87.00%—100.00%, and the 1 000-seeds weight was 38.19—47.14 g. The germination rate and germination energy were promoted by PEG6000 at low mass concentrations (50—150 g/L), but were decreased significantly when the mass concentration was above 200 g/L. With the increase of the PEG6000 mass concentration within 0—300 g/L, the seed germination index from all provenances except GJT generally declined. Overall, when the mass concentration of PEG6000 was 0—100 g/L, the epicotyl lengths of seedlings from all provenances were high, while the epicotyl lengths of seedlings from different provenances decreased significantly when PEG6000 mass concentration was above 150 g/L. When the mass concentration was 200 g/L, the epicotyls lengths were very short or close to 0 mm, and when the mass concentration was 250—300 g/L, all seedlings could not grow epicotyl. Under the stress at PEG6000 concentrations of 0—150 g/L, the hypocotyl lengths of seedlings from all 13 provenances changed slightly, hypocotyl lengths decreased significantly when the mass concentration was above 200 g/L, while hypocotyl lengths of seedlings from all provenances were 0 mm when the mass concentration was 300 g/L. The radicle lengths of seedlings were high with slight variations when the mass concentration was 0—150 g/L, and that of seedlings from all provenances except NML started to decline substantially when the mass concentration was 200 g/L. When the mass concentration was 250 g/L, the radicle lengths decreased further with 7 provenances decreased to 0 mm, while the radicle lengths of seedlings from all provenances were 0 mm when the mass concentration was 300 g/L. Comprehensive drought evaluation showed that there were two drought tolerant provenances, three relatively drought tolerant provenances, one intermediate provenance, four relatively drought sensitive provenances and three drought sensitive provenances among the 13 studied provenances. 【Conclusion】 Suitable drought stress could promote the seed germination and seedling growth of *S. moorcroftiana*. *S. moorcroftiana* from NML and LJD were the most drought resistant among all 13 provenances.

Key words: *Sophora moorcroftiana*; drought stress; seed germination; seedling growth; drought resistance evaluation

砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)又名“西藏狼牙刺”、“刺柴”、“金雀花”等,藏语名“吉瓦”^[1-2],为豆科槐属多年生矮灌木,是青藏高原特有种,主要分布在西藏的日喀则、山南、林芝以及拉萨市海拔2 800~4 400 m的山坡灌丛和河漫滩沙质土壤中。此外,据报道在印度、不丹、尼泊尔等国也有分布^[1,3]。砂生槐在雅鲁藏布江河谷常成大片群落,是该河谷区植被群落的主要建群种之一^[1,4]。砂生槐具有较强的耐瘠薄、抗旱、抗风沙等高原生态适应

性,因此有很好的防风固沙、保持水土的功能,并在药用、饲用与营养等方面具有很大开发利用价值^[5-7]。

在干旱半干旱地区,沙质土地的不合理利用往往会引起沙漠和戈壁面积的扩大,且干旱会严重影响陆地生态系统的结构与功能,导致生态环境恶化^[8]。青藏高原大部分地区处于干旱半干旱气候区,干旱是西藏西部干旱区面临的最主要气象灾害,也是雅鲁藏布江河谷地带常见的主要气象灾害之

—^[9-10]。而砂生槐作为乡土树种之一,在高原上具有较顽强的生存能力。

种子萌发是植物能够成苗的前提,萌发期是植物整个生活史中最重要、最脆弱的阶段,也是进行抗逆性研究的重要时期^[11-13]。干旱胁迫会使植物的发芽率降低、发芽高峰期推迟、幼苗生长发育减缓甚至停止发育^[14-16]。砂生槐虽大量结实,但在生境内萌发比例却相当低。目前,人们主要研究了温度^[17]、沙埋^[4-5,17]等对砂生槐种子萌发和幼苗生长的影响,以及不同种源砂生槐种子萌发的变异情况及其与海拔的关系^[18]。研究砂生槐在种子萌发期耐受干旱胁迫的能力对筛选和利用优质种源有重大意义,而关于干旱胁迫对砂生槐不同种源种子萌发特征的影响研究尚未见报道。本试验在海拔 2 900~3 900 m 砂生槐全分布区,选择生境差异较大的 13 个砂生槐天然种源种子为研究对象,通过对不同种源砂生槐

种实特征及其在人工模拟干旱胁迫条件下的发芽特征进行比较,结合隶属函数法对不同种源砂生槐的抗旱性进行评价,以期筛选出最为抗旱的砂生槐种源,为高原植被恢复中砂生槐种源的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 材 料

聚 乙 二 醇 6000 (Polyethylene glycol 6000, PEG6000),由广东光华科技股份有限公司生产。

供试种子于 2013-10 采自 13 个不同种源地(图 1,表 1)。其中海拔最低的种源地位于林芝地区林芝县米瑞乡,海拔 2 931 m;海拔最高的种源地位于日喀则市谢通门县东嘎乡,海拔 3 855 m。采集新成熟的带荚或已散落的种子带回实验室,手工脱粒后以水选法去除空粒、被害虫侵染的种子和夹杂物,晒干后于阴凉干燥处保存。

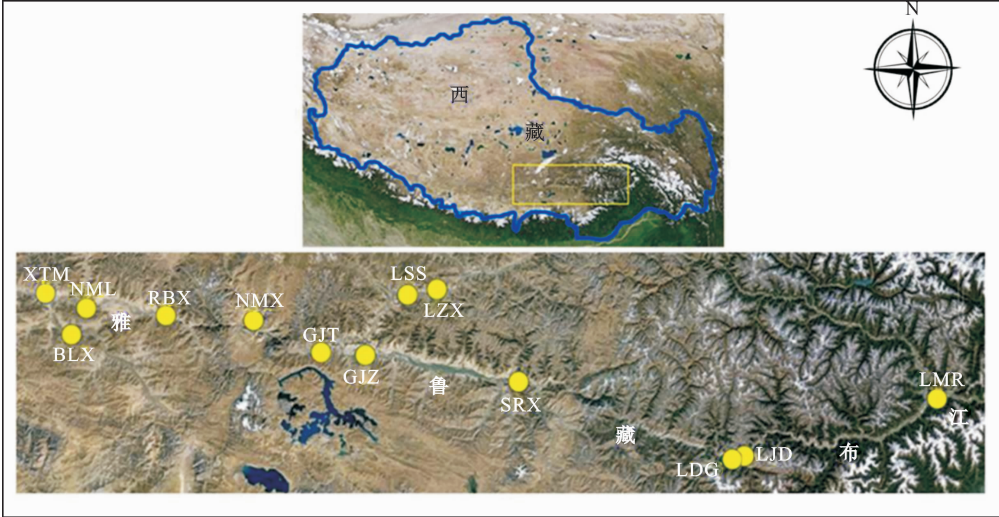


图 1 供试 13 个砂生槐种源地的分布
13 个种源代号同表 1

Fig. 1 Distribution of 13 provenances of *Sophora moorcroftiana*
The codes for 13 provenances are the same as table 1

表 1 供试 13 个砂生槐种源的地理位置及生境

Table 1 Geographic locations and habitats of the 13 provenances of *Sophora moorcroftiana*

种源地 Provenances location	种源代号 Provenances code	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Elevation	年降水量/ mm Annual rainfall	年蒸发量/ mm Annual evaporation	年均温/℃ Mean temperature	生境 Habitat
尼木县尼木乡 Nimu, Nimu	NMX	90°10′40″E	29°23′11″N	3 738	341.1	2 261.0	6.9	河谷滩地 Beachland
仁布县切娃乡 Qiewa, Renbu	RBX	89°37′30″E	29°20′30″N	3 782	385.0	2 203.5	6.5	河谷滩地 Beachland
谢通门县东嘎乡 Dongga, Xietongmen	XTM	88°50′09″E	29°21′26″N	3 855	418.1	2 400.0	5.8	河滩沙地 Sandy Beachland
南木林县艾玛乡 Aima, Nanmulin	NML	89°06′43″E	29°18′49″N	3 819	450.9	2 254.7	5.9	河阶沙地 Sandy river terrace
贡嘎县江塘镇 Jiangtang, Gongga	GJT	90°37′36″E	29°16′18″N	3 645	392.1	2 543.3	8.6	山坡沙地 Sandy hillside

续表 1 Continued table 1

种源地 Provenances location	种源代号 Provenances code	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Elevation	年降水量/ mm Annual rainfall	年蒸发量/ mm Annual evaporation	年均温/℃ Mean temperature	生境 Habitat
贡嘎县甲竹林镇 Jiazhulin, Gongga	GJZ	90°54′12″E	29°17′28″N	3 590	392.1	2 543.3	8.6	山坡沙地 Sandy hillside
拉萨市南山 Nanshan, Lhasa	LSS	91°06′52″E	29°38′21″N	3 622	426.5	2 355.6	8.0	山坡石砾地 Hillside gravel-land
林周县卡孜乡 Kazi, Linzhou	LZX	91°17′34″E	29°41′22″N	3 709	432.4	2 144.2	6.9	山坡林缘灌丛 Hillside forest shrub
朗县金东乡 Jindong, Langxian	LJD	93°19′55″E	29°01′43″N	3 048	667.8	2 200.0	7.6	河滩林缘灌丛 Riverside forest shrub
朗县洞嘎镇 Dongga, Langxian	LDG	93°15′35″E	29°00′14″N	3 157	667.8	2 200.0	7.6	冲积扇台地 Alluvial fan terrace
白朗县巴扎乡 Bazha, Bailang	BLX	89°02′20″E	29°09′40″N	3 845	432.3	2 768.5	6.3	冲积扇沙地 Sandy alluvial fan
桑日县绒乡 Rongxiang, Sangri	SRX	91°52′28″E	29°15′53″N	3 582	418.0	1 968.7	8.2	河谷滩地 Beachland
林芝县米瑞乡 Mirui, Nyingchi	LMR	94°31′00″E	29°27′04″N	2 931	688.1	1 792.2	8.7	河阶沙地 Sandy river terrace

1.2 种子基本特征测定

从每份供试材料中随机选取 100 粒种子,用游标卡尺(精度 0.01 mm)测量种子纵径和横径;从每份材料中随机选取 100 粒种子,于自来水中浸泡 48 h,统计未吸胀种子数量,计算硬实率(Hard seed percentage),3 次重复取平均值;再从每份材料中随机选取 100 粒种子,用电子分析天平(精度 0.000 1 g)称质量,测算其千粒质量,3 次重复取平均值。

1.3 种子处理及萌发胁迫试验设计

干旱胁迫模拟试验中,先将 PEG6000 配制成质量浓度分别为 50,100,150,200,250 和 300 g/L 的水溶液,与之对应的溶液水势约为-0.10,-0.20,-0.40,-0.60,-0.86 和-1.20 MPa^[19-20]。溶液水势的计算公式为:

$$\psi_s=[-(1.18\times10^{-2})C-(1.18\times10^{-4})C^2+(2.67\times10^{-4})CT+(8.39\times10^{-7})C^2T]/10。$$

式中: ψ_s 为水溶液的水势,MPa;C 为 PEG6000 的含量,g/L;T 为溶液温度,℃。

干旱胁迫试验开始前,将 13 个种源地成熟饱满的砂生槐种子分别于室温下用浓硫酸浸泡处理 60 min,然后用自来水彻底冲洗以打破种子的休眠;将处理后的种子置于铺有已灭菌纱布的瓷盘中,加无菌水,放入 HPX-9162MBE 型电热恒温培养箱中于 30℃吸胀 48 h,以确保种子休眠已被打破,期间适当补充无菌水。之后,选取已吸胀的砂生槐种子,经 1 g/L 高锰酸钾溶液消毒 1 min,蒸馏水冲洗 8 次。用吸水纸吸干种子表面水分后,将种子均匀放入垫有 3 层已灭菌滤纸的培养皿(直径 120 mm)中,每一种源地每单次处理 50 粒种子。分别向培养皿中加入 10 mL 不同质量浓度的 PEG6000 溶液,使滤纸

饱和但表面无明水,以加蒸馏水(PEG6000 质量浓度为 0 g/L,对应水势为 0 MPa)为对照。盖上皿盖以防止溶液蒸发。将培养皿置于 RTOP 系列智能人工气候培养箱内,在昼夜恒温条件下进行萌发试验。设定人工气候箱的光照时间为 12 h,光照黑暗交替,25℃恒温培养,连续培养 30 d。每处理重复 3 次。在种子发芽和幼苗生长期间,每 2 d 更换 1 次滤纸和 PEG6000 溶液,以使培养皿内的溶液水势保持恒定。种子的萌发以胚根长到种子长度的 1/2 为标志,每 24 h 记录 1 次发芽情况。

1.4 种子萌发参数的计算

根据记录的发芽结果,计算发芽率(Germination percentage,GP)、发芽势(Germination energy,GE)和发芽指数(Germination index,GI),计算公式^[11,21-22]如下:

$$GP=\text{发芽种子数}/\text{供试种子数}\times100\%。$$

式中:发芽种子数为试验结束时(30 d)的发芽种子总数。

$$GE=\text{规定时间内发芽种子数}/\text{供试种子数}\times100\%。$$

式中:规定时间为试验期的前 10 d。

$$GI=\sum(Gt/Dt)。$$

式中:Gt 为第 t 天的发芽种子数,Dt 为与 Gt 相对应的发芽天数。

1.5 幼苗参数的统计

试验结束后,从每个培养皿中随机选取 10 棵幼苗,用细线和游标卡尺(精度 0.01 mm)测量上胚轴长、下胚轴长和胚根长,结果取平均值。试验结束时幼苗总数不足 10 棵的,测量皿内全部幼苗的相关指标取平均值。

1.6 种子耐旱性的综合评价

利用模糊数学中求隶属函数值 (Membership value) 的方法对 13 个种源地的砂生槐耐旱性进行综合评价^[21,23],其公式如下:

$$F'_{ij} = (F_{ij} - F_{jmin}) / (F_{jmax} - F_{jmin}),$$
$$\bar{F}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F'_{ij}。$$

式中: F'_{ij} 为 i 种源 j 性状的隶属值, F_{ij} 为某种源某一指标的测定值, F_{jmax} 为某指标中的最大值, F_{jmin} 为某指标中的最小值, $\bar{F}_i$ 为 i 种源的总隶属函数值 (Total membership value), n 为测定指标数。

根据发芽率、发芽势、发芽指数、上胚轴长、下胚轴长和胚根长 6 个指标总隶属函数值的大小,依下列标准对耐旱性进行分级 (Drought resistance level):1 级,耐旱型,隶属函数值 >0.8 ;2 级,较耐旱型,隶属函数值为 $>0.6 \sim \leq 0.8$;3 级,中间型,隶属函数值为 $>0.4 \sim \leq 0.6$;4 级,干旱较敏感型,隶属函数值为 $>0.2 \sim \leq 0.4$;5 级,干旱敏感型,隶属函数值 ≤ 0.2 。

1.7 数据处理

利用 SPSS19.0 统计分析软件进行单因素方差分析 (one-way ANOVA),并在置信水平 95% 上用 Duncan's 方法进行多重比较,采用 LSD 法检验其差异显著性,每一指标均为 3 次重复的平均值,结果以“平均值 $\pm$ 标准差 (Mean $\pm$ SD)”表示。

表 2 不同种源砂生槐种子的基本特征

Table 2 Basic characteristics of *Sophora moorcroftiana* seeds from different provenances

种源代号 Provenances code	纵径/mm Length	横径/mm Width	硬实率/% Hard seed percentage	千粒质量/g 1 000 seeds weight
NMX	4.90 $\pm$ 0.02 d	3.76 $\pm$ 0.03 f	99.00 $\pm$ 1.00 ab	41.02 $\pm$ 0.02 i
RBX	5.08 $\pm$ 0.03 b	3.93 $\pm$ 0.01 b	96.00 $\pm$ 0.00 b	47.14 $\pm$ 0.16 a
XTM	5.08 $\pm$ 0.02 b	3.79 $\pm$ 0.01 ef	99.00 $\pm$ 1.00 ab	38.25 $\pm$ 0.13 j
NML	4.64 $\pm$ 0.04 f	3.53 $\pm$ 0.03 h	99.00 $\pm$ 1.00 ab	42.08 $\pm$ 0.04 g
GJT	5.06 $\pm$ 0.04 bc	3.80 $\pm$ 0.01 def	97.00 $\pm$ 3.00 ab	46.01 $\pm$ 0.06 b
GJZ	4.68 $\pm$ 0.03 ef	3.79 $\pm$ 0.01 ef	99.00 $\pm$ 1.00 ab	42.64 $\pm$ 0.05 f
LSS	4.92 $\pm$ 0.03 d	3.85 $\pm$ 0.01 cd	98.00 $\pm$ 0.00 ab	41.40 $\pm$ 0.28 h
LZX	5.19 $\pm$ 0.02 a	3.98 $\pm$ 0.01 a	87.00 $\pm$ 1.00 c	43.45 $\pm$ 0.06 d
LJD	4.99 $\pm$ 0.01 cd	3.90 $\pm$ 0.01 bc	97.00 $\pm$ 1.00 ab	43.67 $\pm$ 0.04 d
LDG	5.09 $\pm$ 0.01 b	3.83 $\pm$ 0.00 de	100.00 $\pm$ 0.00 a	42.32 $\pm$ 0.04 fg
BLX	4.63 $\pm$ 0.06 f	3.79 $\pm$ 0.04 ef	100.00 $\pm$ 0.00 a	43.04 $\pm$ 0.10 e
SRX	4.74 $\pm$ 0.04 e	3.81 $\pm$ 0.01 def	100.00 $\pm$ 0.00 a	44.85 $\pm$ 0.07 c
LMR	4.60 $\pm$ 0.01 f	3.70 $\pm$ 0.03 g	98.00 $\pm$ 0.00 ab	38.19 $\pm$ 0.03 j

注:13 个种源代号同表 1。同列数据后标不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note:The codes for 13 provenances are the same as table 1. Different small letters in each column indicate significant difference ($P<0.05$).

2.2 干旱胁迫对砂生槐种子萌发的影响

2.2.1 种子发芽率 由表 3 可见,试验结束时 (30 d) 对照的发芽率均在 73.33% 以上,其中 LDG 种源种子的发芽率最大,为 96.67%。随着 PEG6000 质量浓度的增加,13 份种源种子的萌发率均呈现出先

2 结果与分析

2.1 不同种源砂生槐种子的基本特征

本研究观察发现,不同种源砂生槐种子均为椭圆球形,表面黄色、淡黄褐色至红褐色或紫色,平滑且有光泽。由表 2 可知,13 个种源砂生槐种子纵径、横径、硬实率和千粒质量 4 个基本特征间存在一定差异。13 个种源种子的纵径为 4.60~5.19 mm,其中 LZX 种源种子纵径最大,为 5.19 mm,LMR 种源种子纵径最小,为 4.60 mm。种子横径为 3.70~3.98 mm,其中 LZX 种源种子的横径最大,为 3.98 mm;RBX 种源次之,为 3.93 mm;LMR 种源最小,为 3.70 mm。由此可见,LZX 种源种子的纵径和横径均为最大,而 LMR 种源种子的纵径和横径均为最小,说明 LZX 种源种子普遍较大,LMR 种源种子普遍较小。13 个种源种子的硬实率为 87.00%~100.00%,其中 LDG、BLX 和 SRX 3 个种源地种子的硬实率最高,均为 100.00%,LZX 种源种子的硬实率最低,为 87.00%,大部分种源地种子的硬实率差异不大,且普遍较高。千粒质量为 38.19~47.14 g,其中 RBX 种源种子的千粒质量最大,为 47.14 g,LMR 和 XTM 种源种子的千粒质量均较小,分别为 38.19 和 38.25 g。

升高后降低的趋势。其中 GJT、LSS、LJD、BLX、SRX 和 LMR 种源种子的发芽率均在 50 g/L PEG6000 胁迫下达到最大值;NMX、RBX、XTM、GJZ、LZX 和 LDG 种源种子的发芽率均在 100 g/L PEG6000 胁迫下达到最大值;NML 种源种子的发

芽率在 50 和 100 g/L PEG6000 胁迫下均为 100.00%。当 PEG6000 质量浓度为 0~150 g/L 时,各种源种子发芽率的变化幅度不大;当 PEG6000 质量浓度达到 200 g/L 时,除 NML、LSS 和 LZX 种源外,其他种源种子的发芽率均开始大幅下降,降幅最大的为 SRX 和 LMR 种源,其发芽率

仅为各自对照发芽率的 1.89%和 6.26%;当 PEG6000 质量浓度达到 250 g/L 时,仅有 6 个种源地种子能够发芽,但发芽率均很低,且均低于 20.00%;当 PEG6000 质量浓度达到 300 g/L 时,所有种源种子均不再萌发。

表 3 不同质量浓度 PEG6000 对各种源砂生槐种子发芽率的影响

Table 3 Effect of PEG6000 with different mass concentrations on germination rate of

Sophora moorcroftiana seeds from different provenances %

种源代号 Provenances code	PEG6000 质量浓度/(g·L ⁻¹) PEG6000 mass concentrations						
	0(CK)	50	100	150	200	250	300
NMX	73.33±3.00 a	85.00±2.00 a	88.34±3.34 a	73.33±2.00 a	36.67±4.00 ab	0	0
RBX	85.00±5.00 a	86.67±4.00 a	95.00±5.00 a	86.67±3.67 a	20.00±2.67 b	0	0
XTM	88.34±4.67 a	93.33±0.00 a	97.92±2.09 a	85.00±3.00 a	46.67±3.34 b	1.67±0.87 c	0
NML	88.34±4.67 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	98.34±1.67 a	97.50±2.50 a	6.67±1.34 b	0
GJT	82.16±2.85 a	90.84±4.17 a	90.00±0.00 a	69.17±4.17 a	22.50±3.50 b	0	0
GJZ	95.00±1.67 a	96.67±3.34 a	100.00±0.00 a	95.00±3.00 a	65.00±5.00 a	0	0
LSS	76.67±3.34 c	98.34±1.67 a	88.33±5.00 b	86.67±3.34 bc	81.67±1.67 bc	8.06±2.06 d	0
LZX	95.84±0.84 a	97.50±2.50 a	100.00±0.00 a	96.67±3.34 a	95.00±5.00 a	12.05±2.96 b	0
LJD	85.00±4.00 a	86.67±3.34 a	85.00±5.00 a	81.67±1.67 a	72.50±2.50 a	1.85±0.85 b	0
LDG	96.67±3.34 a	91.67±3.34 ab	98.34±1.67 a	93.80±1.21 a	48.24±4.24 b	0	0
BLX	90.00±3.33 a	96.67±3.34 a	86.67±6.34 a	82.83±4.83 a	60.65±4.65 ab	18.05±3.05 bc	0
SRX	88.34±8.34 a	100.00±0.00 a	95.00±5.00 a	67.50±7.50 b	1.67±1.67 c	0	0
LMR	93.34±3.34 a	95.84±0.84 a	92.50±3.50 a	90.00±0.00 a	5.84±0.84 b	0	0

注:13 个种源地代号同表 1。同行数据后标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。表 4~8 同。

Note:The codes for 13 provenances are the same as table 1. Different small letters in each row indicate significant difference (P<0.05).

The same table 4~8.

2.2.2 种子发芽势 发芽势是反映种子品质的重要指标之一,发芽势高的种子一般被认为在播种后

发芽整齐均匀^[24]。不同质量浓度 PEG6000 对 13 个种源砂生槐种子发芽势的影响如表 4 所示。

表 4 不同质量浓度 PEG6000 对各种源砂生槐种子发芽势的影响

Table 4 Effect of PEG6000 with different mass concentrations on germination energy of

Sophora moorcroftianaseeds from different provenances %

种源代号 Provenances code	PEG6000 质量浓度/(g·L ⁻¹) PEG6000 mass concentrations						
	0(CK)	50	100	150	200	250	300
NMX	73.33±4.00 a	77.50±3.50 a	78.34±1.67 a	45.00±3.00 ab	6.67±0.00 b	0	0
RBX	85.00±5.00 a	86.67±3.00 a	86.67±3.34 a	75.00±1.67 a	0	0	0
XTM	88.34±3.67 a	93.33±0.00 a	91.25±4.58 a	56.67±3.34 b	10.00±2.67 c	0	0
NML	88.34±3.67 a	98.34±1.67 a	98.34±1.67 a	52.50±3.50 b	31.67±4.67 bc	0	0
GJT	78.71±6.30 ab	85.84±0.84 a	59.17±4.17 abc	33.34±3.34 bcd	13.34±3.34 cd	0	0
GJZ	95.00±1.67 a	95.00±5.00 a	86.67±3.34 ab	66.67±3.34 ab	35.24±2.91 bc	0	0
LSS	76.67±3.34 a	98.34±1.67 a	58.33±5.00 ab	48.06±6.95 ab	12.50±4.00 b	0	0
LZX	95.84±0.84 a	97.50±2.50 a	94.17±0.84 a	92.50±2.50 a	61.82±1.82 b	0	0
LJD	85.00±6.00 a	86.67±7.34 a	85.00±5.00 a	47.50±2.50 ab	25.84±4.84 b	0	0
LDG	96.67±3.34 a	91.67±3.34 a	90.84±5.84 a	63.80±2.80 ab	31.48±3.48 bc	0	0
BLX	90.00±3.33 a	96.67±3.34 a	81.67±5.00 a	38.70±6.31 b	8.70±2.70 bc	0	0
SRX	88.34±4.34 a	100.00±0.00 a	79.62±5.39 ab	36.67±3.34 bc	0	0	0
LMR	93.34±3.34 a	88.34±1.67 a	74.17±4.17 a	25.84±3.84 b	0	0	0

由表 4 可知,试验过程中不同种源种子对照处理的发芽势均在 73.33%以上,其中 LDG 种源的发芽势最大,为 96.67%。除 GJZ、LDG 和 LMR 种源外,其余种源种子的发芽势均随着 PEG6000 质量浓

度的增加呈现出先升后降的趋势。13 个种源中,XTM、GJT、LSS、LZX、LJD、BLX 和 SRX 种源种子的发芽势均在 50 g/L PEG6000 胁迫下达到最大值;NMX 种源种子的发芽势在 100 g/L PEG6000

胁迫下达到最大值,此时发芽势为其对照的 106.83%;RBX 及 NML 种源种子的发芽势在 50 和 100 g/L PEG6000 胁迫处理下基本相等,分别是各自对照的 101.96%和 111.32%。在 0~100 g/L PEG6000 胁迫下各种源种子发芽势变化不大,与发芽率的变化情况相似;当 PEG6000 质量浓度达到 150 g/L 时,除 LZX 种源外,其他种源种子的发芽势均开始较大幅度下降,降幅最大的为 LMR 种源,其发芽势仅为对照的 27.68%;当 PEG6000 质量浓度为 200 g/L 时,发芽势继续大幅下降,并出现 3 个发芽势为 0 的种源;在 PEG6000 质量浓度为 250~300 g/L 时,各种源种子的发芽势均为 0。由此可见,与发芽率相比,干旱对发芽势的影响更为明显。

在 PEG6000 质量浓度为 50~100 g/L 时,不同种源种子的发芽率和发芽势在此条件下基本达到最

大值,且大部分种源种子的发芽率和发芽势均大于各自对照。

2.2.3 种子发芽指数 发芽指数综合了种子萌发数量、萌发速度及整齐程度 3 个因素,较单纯的发芽率能更全面地反映种子的萌发情况^[11]。由表 5 可见,13 个种源砂生槐种子对照处理的发芽指数为 5.44~13.79。随 PEG6000 质量浓度的增大,除 GJT 外,其他种源种子的发芽指数总体上均呈逐渐下降趋势,这与其发芽率和发芽势的变化情况存在一定差异。随着 PEG6000 质量浓度的增大,GJT 种源种子的发芽指数经历了一个先升后降的过程,在 50 g/L PEG6000 胁迫下发芽指数达到最大值,为其对照的 131.07%。以上结果表明,PEG6000 质量浓度越高,干旱胁迫程度越大,对各项发芽指标的影响越大,对发芽的抑制作用也就越明显。

表 5 不同质量浓度 PEG6000 对各种源砂生槐种子发芽指数的影响

Table 5 Effect of PEG6000 with different mass concentrations on germination index of *Sophora moorcroftiana* seeds from different provenances

种源代号 Provenances	PEG6000 质量浓度/(g · L ⁻¹) PEG6000 mass concentrations						
	0(CK)	50	100	150	200	250	300
NMX	9.33±1.92 a	5.54±1.75 ab	5.13±0.77 ab	0.87±0.54 b	0.13±0.10 b	0	0
RBX	9.79±1.09 a	7.57±0.85 a	3.17±1.13 b	2.88±0.53 b	0	0	0
XTM	11.21±0.96 a	9.24±0.21 b	7.22±0.15 c	1.80±0.55 d	0.42±0.21 de	0	0
NML	10.89±1.19 a	6.86±1.55 ab	7.70±1.93 a	1.84±0.77 bc	1.67±0.47 bc	0	0
GJT	5.44±1.22 ab	7.13±3.22 a	4.19±2.08 ab	1.76±1.39 ab	0.73±0.15 ab	0	0
GJZ	13.77±1.07 a	8.09±0.61 ab	5.36±1.85 bc	4.83±2.08 bc	1.74±0.74 bc	0	0
LSS	7.85±1.86 a	7.67±1.81 a	4.76±1.62 a	2.52±1.52 a	0.44±0.14 a	0	0
LZX	13.79±1.54 a	10.82±1.06 ab	8.04±1.99 ab	3.19±1.43 ab	0.30±0.16 b	0	0
LJD	11.46±1.54 a	8.77±1.18 ab	6.48±0.83 bc	3.36±1.16 cd	1.47±0.65 d	0	0
LDG	13.59±1.42 a	9.37±1.47 ab	9.65±1.22 ab	3.94±1.24 ab	1.16±1.00 b	0	0
BLX	12.05±1.04 a	9.39±0.11 ab	3.71±1.25 bc	1.60±0.87 c	0.15±0.08 c	0	0
SRX	8.55±0.15 a	6.13±0.29 b	3.70±1.41 c	1.19±1.05 d	0	0	0
LMR	8.27±1.27 a	5.13±1.25 ab	4.67±1.63 abc	0.64±0.14 bc	0	0	0

2.3 干旱胁迫对砂生槐幼苗生长的影响

2.3.1 幼苗上胚轴长 从表 6 可以看出,13 个种源种子对照处理的上胚轴长为 5.69~14.83 mm。随着 PEG6000 质量浓度的增加,NMX、RBX、GJZ、LJD、LDG 和 BLX 种源的幼苗上胚轴长均呈先升后降趋势,且均在 50 g/L PEG6000 胁迫下达到最大值;其他种源幼苗的上胚轴长均呈现逐渐下降的趋势。总体上看,当 PEG6000 质量浓度为 0~100 g/L 时,各种源幼苗上胚轴长均较高;当 PEG6000 质量浓度高于 150 g/L 时,不同种源幼苗上胚轴长均大幅度降低;当 PEG6000 质量浓度为 200 g/L 时,幼苗的上胚轴很短或为 0;PEG6000 质量浓度为 250~300 g/L 时,所有幼苗未长出上胚轴。

2.3.2 幼苗下胚轴长 由表 7 可知,13 个种源砂

生槐种子对照幼苗的下胚轴长为 6.35~8.17 mm。随着 PEG6000 质量浓度的增加,NMX、RBX、LSS、LJD、LDG、BLX 和 LMR 种源砂生槐幼苗的下胚轴长均呈现出先升后降的趋势,且均在 50 g/L PEG6000 胁迫下达到最大值;其他种源幼苗下胚轴长均逐渐下降。总体上看,在 0~150 g/L PEG6000 胁迫下,13 个种源砂生槐幼苗下胚轴长的变化幅度并不大;当 PEG6000 质量浓度为 200 g/L 时,下胚轴长下降幅度略有增大,但除了 LDG 和 SRX 种源之外,其他种源砂生槐幼苗的下胚轴长均在 3.00 mm 以上;在 250~300 g/L PEG6000 胁迫下,仅有 BLX 种源的幼苗在 250 g/L PEG6000 胁迫下长出下胚轴,长度为 2.98 mm,其他种源幼苗下胚轴长均为 0 mm。

表 6 不同质量浓度 PEG6000 对各种源砂生槐幼苗上胚轴长的影响

Table 6 Effect of PEG6000 with different mass concentrations on seedling epicotyl length of *Sophora moorcroftiana* from different provenances

种源代号 Provenances code	PEG6000 质量浓度/(g · L ⁻¹) PEG6000 mass concentrations						mm
	0(CK)	50	100	150	200	250	300
NMX	5.69±1.75 abc	10.32±0.37 a	7.13±0.50 ab	1.90±0.11 bc	0.16±0.10 c	0	0
RBX	7.81±1.61 ab	9.54±0.04 a	8.99±0.41 ab	4.49±0.81 bc	0	0	0
XTM	12.33±1.06 a	10.09±1.00 ab	6.38±1.24 bc	3.47±1.21 cd	0.27±0.11 d	0	0
NML	10.59±1.38 a	4.37±0.74 ab	7.57±0.96 a	4.58±0.93 ab	1.30±0.71 b	0	0
GJT	10.05±1.23 a	9.93±1.04 a	5.69±1.75 ab	2.94±2.35 b	0	0	0
GJZ	9.46±1.90 ab	10.38±1.05 a	4.50±0.82 abc	3.32±1.43 bc	0.16±0.06 c	0	0
LSS	9.48±1.84 a	7.29±1.69 a	6.20±0.01 ab	1.10±0.77 bc	1.27±0.78 bc	0	0
LZX	10.72±1.29 a	10.35±0.51 a	10.61±1.31 a	4.88±0.22 b	1.08±0.42 c	0	0
LJD	5.76±0.29 a	8.86±1.06 a	7.06±0.29 a	0.75±0.43 b	1.37±0.37 b	0	0
LDG	8.03±0.97 a	8.71±1.40 a	5.03±0.48 b	1.00±0.40 c	0	0	0
BLX	10.49±1.08 a	12.48±1.10 a	3.45±0.26 b	1.76±1.15 b	0	0	0
SRX	14.83±0.42 a	10.32±0.80 b	9.67±1.30 b	0.77±0.17 c	0	0	0
LMR	10.43±0.57 a	9.17±1.36 ab	4.28±0.28 bc	0.59±0.59 c	0	0	0

表 7 不同质量浓度 PEG6000 对各种源砂生槐幼苗下胚轴长的影响

Table 7 Effect of PEG6000 with different mass concentrations on seedling hypocotyl length of *Sophora moorcroftiana* from different provenances

种源代号 Provenances code	PEG6000 质量浓度/(g · L ⁻¹) PEG6000 mass concentrations						mm
	0(CK)	50	100	150	200	250	300
NMX	6.66±0.05 a	7.25±0.45 a	7.24±0.26 a	5.88±1.08 a	4.47±0.54 a	0	0
RBX	6.55±0.47 a	6.92±0.91 a	5.87±0.52 a	5.85±0.68 a	3.54±0.09 b	0	0
XTM	7.05±0.43 a	6.30±0.12 ab	6.10±0.12 ab	5.57±0.29 ab	4.79±0.15 b	0	0
NML	7.20±0.09 a	4.60±0.56 b	6.28±0.40 ab	5.95±0.65 ab	4.71±0.20 b	0	0
GJT	7.38±0.19 a	6.95±0.74 a	5.03±0.14 b	5.69±1.05 ab	3.11±0.30 c	0	0
GJZ	7.62±0.13 a	6.54±0.05 b	5.84±0.55 b	5.95±0.02 b	4.54±0.17 c	0	0
LSS	6.35±0.79 a	6.38±0.33 a	6.22±0.44 a	4.53±0.15 b	4.64±0.79 b	0	0
LZX	6.55±0.41 a	6.36±0.28 ab	5.85±0.42 abc	5.43±0.39 bc	5.04±0.21 c	0	0
LJD	7.19±0.57 a	9.52±0.19 a	8.68±0.22 a	6.26±0.24 a	6.07±0.30 a	0	0
LDG	7.25±0.20 a	8.20±0.65 a	7.22±0.40 a	5.68±0.95 a	2.08±1.08 b	0	0
BLX	6.36±1.47 a	7.84±0.21 a	5.42±0.69 abc	5.99±1.03 ab	3.66±0.17 bc	2.98±0.17 c	0
SRX	8.17±0.84 a	7.95±0.06 a	6.82±0.67 ab	6.39±0.03 b	0	0	0
LMR	7.73±0.06 ab	7.91±0.33 a	6.87±0.52 bc	6.46±0.34 c	4.53±0.12 d	0	0

2.3.3 幼苗胚根长 种子萌发后,胚根的延伸可以反映植物定居成苗的特性^[11]。从表 8 可以看出,13 个种源砂生槐对照处理幼苗的胚根长为 13.21~30.09 mm。随着 PEG6000 质量浓度的升高,除 XTM 和 SRX 种源幼苗的胚根长逐渐下降外,其他种源幼苗的胚根长均呈现出先升高后降低的变化趋势。13 个种源中,NMX、RBX、LSS、LZX、BLX 和 LMR 种源幼苗的胚根长均在 50 g/L PEG6000 胁迫下达到最大值,NML、GJT、GJZ、LJD 和 LDG 种源幼苗的胚根长均在 100 g/L PEG6000 胁迫下达到最大值。在 PEG6000 质量浓度为 0~150 g/L 时,幼苗胚根长总体较高且变化幅度不大;当 PEG6000 质量浓度为 200 g/L 时,除 NML 种源外,其他种源幼苗的胚根长开始较大幅度地下降;当 PEG6000 质量浓度为 250 g/L 时,胚根长进一步下

降,其中有 7 个种源的幼苗胚根长为 0;当 PEG6000 质量浓度为 300 g/L 时,所有种源幼苗的胚根长均为 0。这与发芽率的变化趋势基本吻合。

以上结果显示,PEG 质量浓度越高,即干旱胁迫程度越大,其对幼苗生长指标的影响也越大。

2.4 不同种源砂生槐耐旱性的综合评价

从以上试验结果来看,PEG6000 质量浓度大于 200 g/L 时,其对各种源砂生槐种子萌发和幼苗生长总体上均有明显影响。因此,本研究采用隶属函数法对 13 个种源砂生槐在 200 g/L PEG6000 胁迫下的种子萌发及幼苗生长指标,即发芽率、发芽势、发芽指数、上胚轴长、下胚轴长和胚根长 6 个指标进行分析,对其进行耐旱性综合评价,计算得到 13 个种源砂生槐的总隶属函数值如表 9 所示,并据此对砂生槐进行了耐旱级别划分。表 9 表明,13 个砂生

槐种源的耐旱级别中,有 2 个种源属 1 级(耐旱型), 3 个种源属 2 级(较耐旱型),1 个种源属 3 级(中间型),4 个种源属 4 级(干旱较敏感型),3 个种源属 5 级(干旱敏感型)。由此可知,采自南木林县艾玛乡(NML)和朗县金东乡(LJD)的砂生槐的耐旱性最强。

表 8 不同质量浓度 PEG6000 对各种源砂生槐幼苗胚根长的影响

Table 8 Effect of PEG6000 with different mass concentrations on seedling radicle length of

Sophora moorcroftiana from different provenances mm

种源代号 Provenances code	PEG6000 质量浓度/(g · L ⁻¹) PEG6000 mass concentrations						
	0(CK)	50	100	150	200	250	300
NMX	15.04±1.88 ab	32.31±1.13 a	21.19±2.10 ab	15.72±1.99 ab	5.36±0.04 ab	0	0
RBX	20.96±1.90 a	28.86±1.52 a	22.06±2.52 a	16.02±1.22 ab	5.48±1.03 bc	0	0
XTM	21.84±0.62 a	21.18±1.17 a	21.68±1.36 a	18.01±0.36 ab	4.92±0.20 bc	2.01±0.08 c	0
NML	17.87±1.15 ab	15.29±0.37 ab	20.31±1.08 a	12.73±1.49 b	13.05±1.44 b	3.62±0.05 c	0
GJT	16.57±1.33 ab	19.56±1.40 a	19.60±0.40 a	14.25±1.16 ab	10.88±1.58 b	0	0
GJZ	18.66±0.78 ab	28.71±1.10 a	28.95±1.34 a	17.15±0.93 ab	12.02±0.41 bc	0	0
LSS	13.21±1.90 bcd	25.80±1.00 a	21.27±0.89 ab	18.70±0.80 abc	10.35±0.60 cd	5.24±0.37 de	0
LZX	20.65±1.09 a	23.20±1.00 a	20.59±1.58 a	17.61±0.77 a	10.17±1.21 b	4.61±0.16 bc	0
LJD	30.09±1.80 ab	21.57±0.81 abc	37.31±1.14 a	20.45±0.43 abc	12.87±1.01 bc	2.19±0.19 c	0
LDG	25.71±2.66 ab	21.54±1.66 ab	32.56±1.59 a	20.88±2.47 ab	10.65±1.08 bc	0	0
BLX	22.57±1.67 a	29.35±1.16 a	20.76±1.71 ab	19.07±1.29 ab	8.55±1.38 bc	5.28±1.31 c	0
SRX	27.26±0.50 a	23.93±1.91 ab	18.43±1.23 ab	12.25±0.91 bc	2.09±0.15 c	0	0
LMR	22.23±0.15 ab	29.33±1.02 a	17.75±1.32 abc	18.70±1.88 ab	4.73±0.54 bc	0	0

表 9 干旱胁迫下砂生槐各生长指标隶属函数值及耐旱性综合评价

Table 9 Comprehensive evaluation of stand-growth index membership value and drought resistance of

Sophora moorcroftiana under drought stress

种源代号 Provenances code	隶属函数值 Membership value						总隶属函数值 Total membership value	耐旱级别 Drought resistance level
	发芽率 Germination percentage	发芽势 Germination energy	发芽指数 Germination index	上胚轴长 Epicotyls length	下胚轴长 Hypocotyls length	胚根长 Radicles length		
NMX	0.37	0.11	0.07	0.12	0.74	0.30	0.29	4
RBX	0.19	0	0	0	0.58	0.31	0.18	5
XTM	0.47	0.16	0.24	0.20	0.79	0.26	0.35	4
NML	1.00	0.51	0.96	0.95	0.78	1.00	0.87	1
GJT	0.22	0.22	0.42	0	0.51	0.80	0.36	4
GJZ	0.66	0.57	1.00	0.12	0.75	0.91	0.67	2
LSS	0.83	0.20	0.25	0.93	0.76	0.75	0.62	2
LZX	0.97	1.00	0.17	0.79	0.83	0.74	0.75	2
LJD	0.74	0.42	0.84	1.00	1.00	0.98	0.83	1
LDG	0.49	0.51	0.67	0	0.34	0.78	0.47	3
BLX	0.62	0.14	0.09	0	0.60	0.59	0.34	4
SRX	0	0	0	0	0	0	0	5
LMR	0.04	0	0	0	0.75	0.24	0.17	5

3 讨 论

本研究中,13 种不同种源的砂生槐种子在大小、千粒质量和硬实率方面存在差异,这可能是不同的海拔、气候等环境因素综合影响的结果。青藏高原由于气压低、多风等原因蒸发量较大,本研究中降水量较少、蒸发量较大和平均气温较低的种源地种子较小、硬实率较高,从生境气候来看蒸发量对种子大小和硬实率影响较大。本研究不同种源砂生槐种子的大小与林玲等^[7]对不同砂生槐天然群体种实性状表型多样性的研究结果基本一致,但部分种源种

子的千粒质量与其研究结果存在差异,这可能是采种区域不同所致。孙霞等^[24]对多花木兰(*Indigofera amblyatha*)等的研究显示,种子形态特征受水分等环境因素影响较大,本研究的结果与其相似。本研究显示,不同种源砂生槐种子的大小、千粒质量与萌发特性之间无明显关系,而种子硬实率与发芽率和发芽势有一定程度的联系,如 PEG6000 质量浓度为 0~300 g/L 时,硬实率最低的 LZX 种源种子发芽率均在 95.00% 以上,发芽势均在 61.82% 以上,明显高于其他种源种子。不同种源砂生槐种子的基本特征存在差异,这与砂生槐对不同环境条件

的生态适应有一定关系,但也可能受到遗传等其他因素的影响。

PEG 作为一种大分子渗透调节剂或水分胁迫剂,在种子萌发试验中常被用来降低水势,以模拟干旱土壤环境对植物正常生长的影响^[16,25-26]。从本研究的结果来看,不同质量浓度 PEG6000 溶液对 13 个种源砂生槐种子萌发和幼苗生长特征均产生了不同程度的影响。前人研究发现,胡麻(*Linum usitatissimum*)^[22]、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)^[27]和大豆(*Glycine max*)^[21]种子受到 PEG6000 胁迫后其发芽特征同样受到影响。本研究表明,不同质量浓度 PEG6000 对砂生槐种子萌发和幼苗生长的影响存在明显差异,这与各质量浓度 PEG6000 处理后种子和幼苗受到的干旱胁迫程度有关,是 PEG 作为水分胁迫剂发挥作用的结果。

有研究表明,渗透调节处理可以促使种子提前萌动,完成种子发芽前相应的生理生化准备,较低浓度 PEG 能减缓种子的吸水能力,降低种子在快速吸水过程中细胞受伤害的可能,从而提高种子的发芽率和成苗率^[28]。张凤银等^[29]研究了 PEG6000 对宿根天人菊(*Gaillardia aristata*)种子萌发的影响,发现 PEG6000 质量浓度为 20~50 g/L 时种子的发芽率均高于对照(PEG 质量浓度为 0 g/L);李志萍等^[15]对栓皮栎(*Quercus variabilis*)的研究结果显示,在 50~100 g/L PEG6000 胁迫下栓皮栎种子发芽率均高于对照,且在 50 g/L PEG6000 胁迫下达到最大值。本研究中,低质量浓度(50~100 g/L,对应水势为 -0.10~-0.20 MPa)的 PEG6000 胁迫处理也对砂生槐种子萌发和幼苗生长表现出一定的促进作用或不明显的抑制作用。此外,砂生槐上胚轴长、下胚轴长和胚根长在 50~100 g/L PEG6000 胁迫下的变化,应与发芽率和发芽势在相应浓度下的变化有一定联系,因为种子发芽为幼苗生长创造了基础条件^[30]。另外,低质量浓度 PEG6000 对种子发芽的促进作用并未在发芽指数上体现出来,这可能是因为 PEG6000 质量浓度为 0 g/L(对照)时,种子在试验开始的 1~3 d 发芽数量较大,使发芽指数体现出随 PEG6000 质量浓度上升而下降的特点。在 50 g/L PEG6000 胁迫下,LDG 种源种子的发芽率、发芽指数和幼苗胚根长均低于对照和 100 g/L PEG6000 胁迫处理,这种特殊现象可能由此种源种子特性所导致。薛建国等^[31]的研究也发现,低质量浓度 PEG6000 溶液会使部分种源的华北驼绒藜(*Ceratoides arborescens*)和梭梭(*Haloxylon ammo-*

dendron)的发芽率有所下降。这说明在某些物种特定种源上,低质量浓度 PEG6000 处理对种子的发芽并未体现出促进作用。

高质量浓度 PEG6000 胁迫会抑制植物种子的萌发^[15]。有研究结果显示,150 g/L PEG6000 胁迫下,芒(*Miscanthus sinensis*)和荻(*Triarrhena sacchariflora*)^[32]的发芽率和发芽指数均显著下降;200 g/L PEG6000 处理下,牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)^[33]无法萌发;PEG6000 质量浓度为 200 g/L 时,不同条件储存的中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)^[34]的发芽率均明显下降,当 PEG6000 质量浓度达到 250 g/L 时种子基本不能发芽。同样在本研究中,随着 PEG6000 质量浓度的升高,砂生槐种子萌发和幼苗生长的各指标值总体均有不同程度下降,且 PEG6000 质量浓度越高,各指标值的下降幅度越大;当 PEG6000 质量浓度达到 300 g/L(对应水势为 -1.20 MPa)时,各种源砂生槐种子的发芽率等指标均为 0,可见 300 g/L PEG6000 所产生的水分胁迫效果已经达到或超过了 13 个种源种子的耐旱极限,因此种子在这一质量浓度下均失去了发芽能力。这说明干旱胁迫程度较强时,其对砂生槐种子萌发和幼苗生长有十分明显的抑制作用。从本研究结果来看,干旱胁迫对不同种源砂生槐种子萌发的影响程度不同,例如当 PEG6000 质量浓度达到 250 g/L(对应水势为 -0.86 MPa)时,仍有 6 个种源的砂生槐能够发芽,一定程度上也说明砂生槐具有较强的干旱耐受性。

植物耐旱性是一个受多种因素影响的复杂的数量性状,且每个与耐旱性有关的性状对植物耐旱性都有贡献。因此,利用单一性状指标鉴定植物的耐旱性有很大局限性,难以全面准确地反映耐旱性强弱,必须结合多种指标进行综合评价^[35]。王利彬等^[21]在 150 g/L PEG6000 胁迫下,基于相对发芽势、相对发芽率和相对胚根长等 4 项指标,利用隶属函数法对黑龙江省 91 份大豆种质资源进行了芽期耐旱性综合评价,从中筛选出耐旱型品种 6 份,较耐旱型品种 12 份;王兰芬等^[23]在 218.0 g/L PEG6000 胁迫下,以相对发芽势、相对发芽率和相对下胚轴长等作为耐旱性评价指标,同样利用隶属函数法对 113 份绿豆(*Vigna radiata*)种质的芽期耐旱性进行了综合评价,从中筛选出 1 份高抗种质和 16 份抗性种质。本研究用发芽率、发芽势、发芽指数、上胚轴长、下胚轴长、胚根长 6 个指标对 13 个不同种源地砂生槐进行耐旱性评价,结果发现,来自西

藏日喀则地区南木林县艾玛乡和西藏林芝地区朗县金东乡的砂生槐种子的耐旱性最强,均可作为干旱区植被恢复育苗的种源。可见,虽然砂生槐本身具有较强的耐旱能力,但不同种源地的砂生槐耐旱能力大小亦有所不同。

【参考文献】

- [1] 韦 直. 中国植物志:第 40 卷 [M]. 北京:科学出版社,1994:77-78.
Wei Z. China flora: Volume 40 [M]. Beijing: Science Press, 1994:77-78. (in Chinese)
- [2] 王国严,方江平,许新勇,等. 雅鲁藏布江中游干旱沙地砂生槐种群结构与点格局分析 [J]. 中国沙漠,2010,30(5):1092-1098.
Wang G Y, Fang J P, Xu X Y, et al. Population structure and spatial point pattern of *Sophora moorcroftiana* in arid sandy land in the middle reaches of Yarlung Zangbo Rive, Tibet [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(5):1092-1098. (in Chinese)
- [3] 吴征镒. 西藏植物志:第 2 卷 [M]. 北京:科学出版社,1985:716-718.
Wu Z Y. Tibet flora: Volume 2 [M]. Beijing: Science Press, 1985:716-718. (in Chinese)
- [4] 赵文智. 砂生槐沙生适应性初步研究 [J]. 植物生态学报, 1998,22(4):379-384.
Zhao W Z. A preliminary study on the arenaceous adaptability of *Sophora moorcroftiana* [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 1998,22(4):379-384. (in Chinese)
- [5] 赵文智,刘志民. 西藏特有灌木砂生槐繁殖生长对海拔和沙埋的响应 [J]. 生态学报,2002,22(1):134-138.
Zhao W Z, Liu Z M. Responses of growth and reproduction of *Sophora moorcroftiana* to altitude and sand-burying in Tibet [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002,22(1):134-138. (in Chinese)
- [6] 沈渭寿,李海东,林乃峰,等. 雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果 [J]. 生态学报,2012,32(17):5609-5618.
Shen W S, Li H D, Lin N F, et al. Screening trial for the suitable plant species growing on sand dunes in the alpine valley and its recovery status in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17):5609-5618. (in Chinese)
- [7] 林 玲,王军辉,罗 建,等. 砂生槐天然群体种实性状的表型多样性 [J]. 林业科学,2014,50(4):137-143.
Lin L, Wang J H, Luo J, et al. Phenotypic diversity of seed and fruit traits in natural populations of *Sophora moorcroftiana* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(4):137-143. (in Chinese)
- [8] 裴宗平,余莉琳,汪云甲,等. 4 种干旱区生态修复植物的苗期抗旱性研究 [J]. 干旱区资源与环境,2014,28(3):204-208.
Pei Z P, Yu L L, Wang Y J, et al. Comparative research on drought resistance of 4 plant species in ecological regeneration on arid area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(3):204-208. (in Chinese)
- [9] 杜 军,杨志刚. 西藏自治区县级气候区划 [M]. 北京:气象出版社,2011:2-5.
Du J, Yang Z G. The country climate regionalization of Tibet autonomous region [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2011:2-5. (in Chinese)
- [10] 杨春艳,沈渭寿,林乃峰. 西藏高原气候变化及其差异性 [J]. 干旱区地理,2014,37(2):290-298.
Yang C Y, Shen W S, Lin N F. Climate change and its regional differences over the Tibet Plateau [J]. Arid Land Geography, 2014, 37(2):290-298. (in Chinese)
- [11] 李志萍,张文辉,崔豫川. NaCl 和 Na₂CO₃ 胁迫对栓皮栎种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 生态学报,2015,35(3):1-17.
Li Z P, Zhang W H, Cui Y C. Effects of NaCl and Na₂CO₃ stresses on seed germination and seedling growth of *Quercus variabilis* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3):1-17. (in Chinese)
- [12] Yang Y, Liu Q, Wang G X, et al. Germination, osmotic adjustment, and antioxidant enzyme activities of gibberellin-pretreated *Picea asperata* seeds under water stress [J]. New Forests, 2010, 39(2):231-243.
- [13] Gorai M, Aloui W E, Yang X J, et al. Toward understanding the ecological role of mucilage in seed germination of a desert shrub *Henophyton deserti*: Interactive effects of temperature, salinity and osmotic stress [J]. Plant and Soil, 2014, 374:727-738.
- [14] 何芳兰,赵 明,王继和,等. 几种荒漠植物种子萌发对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价研究 [J]. 干旱区地理,2011,34(1):100-106.
He F L, Zhao M, Wang J H, et al. Response to droughty stresses and drought-resistances evaluation of seed germination of four desert vegetation [J]. Arid Land Geography, 2011, 34(1):100-106. (in Chinese)
- [15] 李志萍,张文辉,崔豫川. PEG 模拟干旱胁迫对栓皮栎种子萌发及生长生理的影响 [J]. 西北植物学报,2013,33(10):2043-2049.
Li Z P, Zhang W H, Cui Y C. Effects of PEG simulated drought stress on seed germination and growth physiology of *Quercus variabilis* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(10):2043-2049. (in Chinese)
- [16] Pouresmaeil H. The physiological effects of water stress by PEG-6000 on germination of mungbean (*Vigna radiata*) genotypes [J]. International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 2014, 7(13):1344-1345.
- [17] 王文娟,贺达汉,唐小琴,等. 不同温度和沙埋深度对砂生槐种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 中国沙漠,2011,31(6):1437-1442.
Wang W J, He D H, Tang X Q, et al. Effects of different temperature and sand burial depths on seed germination and seedling growth of *Sophora moorcroftiana* [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(6):1437-1442. (in Chinese)
- [18] 林 玲,叶彦辉,罗 建,等. 青藏高原特有砂生槐不同种源

- 地种子萌发特征研究 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(4): 508-513.
- Lin L, Ye Y H, Luo J, et al. Seed germination of different provenances of *Sophora moorcroftiana*, an endemic species to the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Forest Research, 2014, 27(4): 508-513. (in Chinese)
- [19] Michel B E, Kaufmann M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000 [J]. Plant Physiol, 1973, 51: 914-916.
- [20] 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等. 环境因子对木棉种子萌发的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33(2): 382-388.
- Zheng Y L, Ma H C, Robert S, et al. Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 382-388. (in Chinese)
- [21] 王利彬, 刘丽君, 裴宇峰, 等. 大豆种质资源芽期抗旱性鉴定 [J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(1): 36-42.
- Wang L B, Liu L J, Pei Y F, et al. Drought resistance identification of soybean germplasm resources at bud stage [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(1): 36-42. (in Chinese)
- [22] 汪 磊, 谭美莲, 严明芳, 等. PEG 模拟干旱对胡麻种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 227-232.
- Wang L, Tan M L, Yan M F, et al. Effects of simulated drought stress by PEG on sprouting and seedling growth of flax (*Linum usitatissimum* L.) [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(6): 227-232. (in Chinese)
- [23] 王兰芬, 武 晶, 景蕊莲, 等. 绿豆种质资源芽期抗旱性鉴定 [J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(3): 498-503.
- Wang L F, Wu J, Jing R L, et al. Drought resistance identification of mungbean germplasm resources at bud stage [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2014, 15(3): 498-503. (in Chinese)
- [24] 孙 霞, 高信芬. 聚乙二醇(PEG)模拟干旱胁迫对干旱河谷 5 种木蓝种子萌发的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(3): 317-322.
- Sun X, Gao X F. Effect of polyethylene glycol (PEG) simulated drought stress on seed germination of five species of *Indigofera* L. from dry valleys [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2010, 16(3): 317-322. (in Chinese)
- [25] Emmerich W E, Hardegree S P. Polyethylene glycol solution contact effects on seed germination [J]. Agronomy Journal, 1990, 82: 1103-1107.
- [26] Khodarahmpour Z. Effect of drought stress induced by polyethylene glycol (PEG) on germination indices in corn (*Zea mays* L.) hybrids [J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(79): 18222-18227.
- [27] 胡卉芳, 王照兰, 史万光, 等. PEG 胁迫下达乌里胡枝子种子萌发期的抗旱性差异 [J]. 中国草地学报, 2007, 29(6): 86-91.
- Hu H F, Wang Z L, Shi W G, et al. Study on drought resistance of different *Lespedeza davurica* materials at seed germination stage stressed with PEG [J]. Chinese Journal of Grassland, 2007, 29(6): 86-91. (in Chinese)
- [28] Burgass R W, Powell A A. Evidence for repair processes in the invigoration of seeds by hydration [J]. Annals of Botany, 1984, 53(5): 753-757.
- [29] 张凤银, 陈禅友, 胡志辉. PEG-6000 胁迫对宿根天人菊种子萌发及幼苗生理特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(1): 132-136.
- Zhang F Y, Chen C Y, Hu Z H. Effects of PEG-6000 stress on seed germination and seedling physiological characteristics of *Gaillardia aristata* Pursh [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(1): 132-136. (in Chinese)
- [30] 朱灿灿, 史锋厚, 沈永宝, 等. PEG 处理对油松种子萌发的影响 [J]. 种子, 2007, 26(8): 63-67.
- Zhu C C, Shi F H, Shen Y B, et al. Effects of PEG treatment on germination of Chinese Pine seed [J]. Seed, 2007, 26(8): 63-67. (in Chinese)
- [31] 薛建国, 韩建国, 王显国, 等. NaCl 和 PEG 对华北驼绒藜和梭梭种子萌发的影响 [J]. 草地学报, 2008, 16(5): 470-474.
- Xue J G, Han J G, Wang X G, et al. Effects of NaCl and PEG on seed germination of two xerophytic species *Ceratoides arborescens* and *Haloxylon ammodendron* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2008, 16(5): 470-474. (in Chinese)
- [32] 何 淼, 赵保成, 李 强, 等. PEG 胁迫对芒和荻种子萌发的影响 [J]. 草业科学, 2013, 30(4): 577-582.
- He M, Zhao B C, Li Q, et al. Effects of different concentrations of polyethylene glycol on seeds germination of *Miscanthus sinensis* and *Triarrhena sacchariflora* [J]. Pratacultural Science, 2013, 30(4): 577-582. (in Chinese)
- [33] 齐淑艳, 段继鹏, 郭婷婷, 等. 入侵植物牛膝菊种子萌发对 PEG 模拟干旱胁迫的响应 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1190-1194.
- Qi S Y, Duan J P, Guo T T, et al. Seed germination of invasive species *Galinsoga parviflora* under drought stress simulated by PEG [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(5): 1190-1194. (in Chinese)
- [34] 米志英, 金文兵, 朱振华, 等. 储藏温度、NaCl 及 PEG 渗透处理对中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia*) 种子萌发的影响 [J]. 中国沙漠, 2015, 35(4): 1-5.
- Mi Z Y, Jin W B, Zhu Z H, et al. Effects of storage temperature, NaCl and PEG osmotic treatment on seed germination of *Caragana intermedia* [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(4): 1-5. (in Chinese)
- [35] 梁建秋, 张明荣, 吴海英. 大豆抗旱性研究进展 [J]. 大豆科学, 2010, 29(2): 341-346.
- Liang J Q, Zhang M R, Wu H Y. Advances in drought tolerance of soybean [J]. Soybean Science, 2010, 29(2): 341-346. (in Chinese)