

温度对不同海拔砂生槐种子萌发和幼苗生长的影响

周娟娟

(甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070/省部共建青稞和牦牛种质资源与遗传改良国家重点实验室, 西藏 拉萨 850000/西藏自治区农牧科学院草业科学研究所, 西藏 拉萨 850000)

摘要:为了探究天然居群不同海拔砂生槐种源在恒定温度条件下的发芽特性,以6个海拔(2 948, 3 091, 3 584, 3 821, 4 064, 4 288 m)野生种源为研究对象,比较不同海拔破皮砂生槐种子在不同恒温处理(5~30℃)下的萌发和幼苗生长响应,旨在揭示砂生槐对温度变化的生态适应对策。结果表明,不同海拔的砂生槐种子均能萌发,且在15, 20, 25℃时发芽率可达到90%以上。随着温度上升,砂生槐种子的发芽势和发芽率整体呈现先增加后降低的趋势,高温(30℃)限制了种子萌发。不同种源砂生槐种子的发芽势和发芽率无明显变化规律。同一海拔的砂生槐幼苗鲜质量、根鲜质量和苗干质量随着温度升高先增加后降低,25℃时达到峰值。在5℃和10℃条件下,砂生槐种子仅能萌发,但不利于幼苗生长;高温(30℃)处理下,幼苗生长受到抑制。海拔4 064 m的砂生槐种子活力指数高于其他海拔的种子,海拔4 288 m的砂生槐幼苗苗长显著低于其他海拔幼苗。温度显著影响不同种源砂生槐种子的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、苗长、根长、根鲜质量、苗干质量和根干质量($p<0.05$)。海拔差异对砂生槐幼苗的发芽势、发芽指数、活力指数和苗干质量产生显著影响($p<0.05$)。温度和种源对砂生槐幼苗干质量的影响存在交互作用($p<0.05$)。

关键词:砂生槐;种源;种子萌发;幼苗生长

中图分类号:S757.2

文献标志码:A

Effects of Different Temperature and Altitude on Seed Germination and Seedling Growth of *Sophora Moorcroftiana* from Different Provenance

ZHOU Juanjuan

(College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Gansu Lanzhou 730070, China/State Key Laboratory of Highland Barley and Yak Germplasm Resources and Genetic Improvement, Tibet Lhasa, 850000, China/Institute of Pratacultural Science, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Science, Tibet Lhasa, 850000, China)

Abstracts: In order to find out the germination characteristics of *S. moorcroftiana* natural populations at different altitudes, six wild provenances (2 948, 3 091, 3 584, 3 821, 4 064, 4 288 m) were selected as the research objects to compare the responses of seed germination and seedling growth under different constant temperature treatments (5–30 °C). The aim is to reveal the ecological adaptation strategy to temperature change. The results showed that seeds of *S. moorcroftiana* could germinate at different altitudes, and the germination rate can reach more than 90% at 15 °C, 20 °C and 25 °C. With the increase of temperature, the germination potential and germination rate of the seeds increased first and then decreased, and the high temperature (30 °C) limited the seed germination. The germination potential and germination rate at different altitudes had no obvious change. The fresh weight, root fresh weight and dry weight initially increased and then decreased with the increase of temperature, reaching peak value at 25 °C. At temperature 5 °C and 10 °C, *S. moorcroftiana* seeds only exhibited germination, but not conducive to seedling growth. High temperature (30 °C) inhibited the growth of seedlings. The seed vitality index under 4 064m was highest compared to other altitudes, and seedling length under 4 288 m was significantly lower than other altitudes. Temperature significantly affected germination potential, germination rate, germination index, vigor index, seedling length, root length, root fresh weight, seedling dry weight and root dry weight ($p<0.05$), and altitude difference had significant effects on germination potential, germination index, vigor index and seedling dry weight ($p<0.05$). There was interaction between temperature and provenance on seedlings dry weight of *S. moorcroftiana* ($p<0.05$).

Key Words: *Sophora moorcroftiana*; provenance; seed germination; seedling growth

收稿日期:2024-05-06

基金项目:西藏自治区重点研发计划项目(XZ202201ZY0014N)。

作者简介:周娟娟(1987-),女,博士研究生,副研究员,主要从事高寒草地资源开发与利用研究,E-mail:zhoujjcaoye@126.com。

砂生槐(*Sophora moorcroftiana*),又名“西藏狼牙刺”,藏语名“吉瓦”^[1],为豆科(*Fabaceae*)苦参属(*Sophora* L.)多年生小灌木,是西藏特有植物,主要分布在海拔2 800~4 400 m的“一江两河”流域,据不完全统计,西藏全区自然种群面积约20.7×10⁴ hm²^[2]。砂生槐群落生境范围为山坡灌丛、沙质河漫滩、石质山坡、冲积形成的沙地等区域,是半干旱河谷地区植被群落的主要建群种之一,具耐旱、耐贫瘠、抗风沙等特性,是一种重要的防风固沙、水源涵养的典型灌丛;兼具药用和饲用价值,具有潜在开发利用的现实意义。砂生槐灌丛广泛分布的西藏雅鲁藏布江中游地区也是西藏经济社会发展的核心区域,受人类活动影响较大,加之砂生槐种群更新缓慢,灌丛面积缩小并呈现不同程度的退化,生态功能减弱^[3],引发了土壤沙化等一系列生态问题。因此,砂生槐植被重建对于减缓雅鲁藏布江流域干旱河谷地区生态功能退化、保护西藏高原的生态屏障具有重要意义^[4]。

砂生槐分布面积广,籽实结实率高,但萌发比例相当低,影响种群繁殖。以往研究主要集中在砂生槐的种群和群落结构^[5-6]、遗传多样性^[7,8]、繁殖特性^[9]、药用价值等方面^[10-11]。繁殖特性研究也多关注于砂生槐种子发芽特性对处理方式^[12-13]、逆境胁迫和^[14]植物生长调节剂^[15]等的响应。研究发现,温度和沙埋影响砂生槐种子的萌发特性,建议在沙埋环境种植砂生槐可采用调整生物量分配模式的生态对策^[16]。林玲等^[17]报道,日喀则萨迦的砂生槐具有较大千粒质量和较高的发芽率,且种子萌发所需时间较短,是砂生槐育苗首选的采种地。但温度和海拔协同对砂生槐种子萌发特性的研究尚未有报道。因此,本研究在砂生槐的分布区,以生境差异较大的6个海拔的天然群体为研究对象,比较不同群体砂生槐种子萌发和幼苗生长对不同恒温处理(5~30℃)的响应,旨在揭示砂生槐对温度变化的生态适应对策,为青藏高原沙化治理所需的砂生槐优良种源选择和优质苗木培育提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 种子采集

2022年7-10月在砂生槐分布区域开展野外调查,调查范围涵盖砂生槐的典型分布区,其主要分布在海拔2 800~4 400 m的西藏雅鲁藏布江中段流域的山坡、河谷、沙滩。依据取样点分布特点,兼顾取样点的海拔和生境差异,最后确定6个有代表性的种源(表1)进行种子萌发比较研究。

表1 供试砂生槐种子来源

编号	采集地	海拔/m	经纬度	生境
1	林芝米林	2 948	29°8'45.93"N,93°40'19.78"E	河滩林源灌丛冲积扇砾石地
2	林芝朗县	3 091	29°2'57.03"N,93°2'38.14"E	冲积扇砾石地
3	山南扎囊	3 584	29°15'25.28"N,91°13'46.74"E	冲积扇砾石地
4	日喀则南木林	3 821	29°21'19.82"N,89°06'06.58"E	河谷滩地
5	日喀则拉孜	4 064	29°09'24.24"N,87°31'48.33"E	河谷滩地
6	日喀则昂仁	4 288	29°12'36.32"N,87°27'25.90"E	山坡砾石地

1.2 试验方法

1.2.1 萌发试验

采用培养皿滤纸发芽法^[12]进行萌发试验。选取生境差异较大的6个种源,大小一致、饱满均匀的供试砂生槐种子,用镊子破皮(保证胚完整)后于室温下分别用1%高锰酸钾消毒2 h,自来水冲洗5次,再用蒸馏水冲洗3次,晾干备用。温度设置为5,10,15,20,25,30℃(光照16 h/黑暗8 h)6个恒温处理,将供试砂生槐种子置于直径为9 cm垫有3层滤纸的培养皿中发芽,始终保持滤纸湿润而无明水,每个培养皿放置种子50粒,4次重复。将培养皿置于人工气候箱进行光照培养,每天适当补充蒸馏水以减少水势变动。每天统计发芽情况(种子的萌发以胚根长度达到与种子等长、胚芽长度达到种子一半作为发芽标准^[18-19]),14 d后萌发结束。

1.2.1 测定项目和方法

发芽第7天计算发芽势(Germination potential, GP),第14天统计发芽率,计算发芽率(Germination rate, GR)、发芽指数(Germination index, GI)、活力指数(Vigor index, VI),从每个培养皿中随机选取5株幼苗,用滤纸吸干水分后测量其苗长(Seedling length, SL)和根长(Root length, RL),并用电子天平称量其苗鲜质量(Seedling fresh weight, SFW)和根鲜质量(Root fresh weight, RFW),烘干后称其苗干质量(Seedling dry weight, SDW)(g/5株)和根干质量(Root dry weight, RDW)(g/5株),取平均值。各指标计算公式如下:

$$\text{发芽势}(\%) = 7 \text{ d内发芽种子数} / \text{供试种子} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{发芽率}(\%) = 14 \text{ d内发芽种子数} / \text{供试种子} \times 100 \quad (2)$$

发芽速率

$$GS = \left(N_1 + \frac{N_2 - N_1}{2} + \frac{N_3 - N_2}{3} + \dots + \frac{N_i - N_{i-1}}{i} \right) \times 100 \quad (3)$$

式中: N_i 为第*i*天发芽数; N 为相应的发芽天数。

$$\text{发芽指数 } GI = \sum Gt/Dt \quad (4)$$

式中: Gt 为逐日发芽数; Dt 为相应的发芽天数。

$$\text{活力指数 } VI = GI \times S \quad (5)$$

式中: GI 为发芽指数; S 为苗长。

1.3 数据处理

试验数据采用SPSS统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),Duncan法进行多重比较,分析不同处理间的差异。

2 结果与分析

2.1 温度对砂生槐种子萌发的影响

由表2可知,5~30℃恒温处理下,不同海拔的砂生槐种子均能萌发。随着温度上升,不同海拔砂生槐种子的发芽势和发芽率整体呈现增加趋势,仅在恒温10℃处理时,发芽势略有降低。温度达到

15℃后,发芽势和发芽率明显提升;其中15,20,25℃的发芽率均达到90%,15℃和25℃的发芽势亦均为80%以上。高温(30℃)处理,砂生槐种子的发芽势和发芽率略有下降。不同海拔砂生槐种子的发芽势和发芽率无明显变化规律;25℃和30℃温度下,海拔3821m的砂生槐种子的发芽势和发芽率低于其他种源种子,但差异不显著。

不同海拔砂生槐种子的发芽指数和活力指数随着温度升高而逐渐增大,5℃和10℃条件下砂生槐种子仅能萌发,不利于幼苗生长,未作统计。5~20℃不同海拔砂生种子的发芽指数均低于8,温度

表2 温度对不同海拔砂生槐种子萌发的影响

温度/℃	海拔/m	发芽势 GP/%	发芽率 GR/%	发芽指数 GI	活力指数 VI
5	2948	26.00±0.03ab	45.00±0.03a	3.23±0.41a	-
	3091	16.00±0.04b	32.00±0.02b	2.69±0.66a	-
	3584	26.00±0.03ab	41±0.03ab	2.94±0.39a	-
	3821	26.00±0.03ab	43.00±0.02a	3.55±0.34a	-
	4064	28.00±0.04ab	44.00±0.04a	4.06±0.79a	-
	4288	36.00±0.06a	51.00±0.04a	3.75±0.63a	-
10	2948	30.00±0.05a	65.00±0.08a	4.91±0.66a	-
	3091	11.00±0.03b	58.00±0.03a	2.50±0.44b	-
	3584	20.00±0.02b	62.00±0.03a	3.69±0.04ab	-
	3821	15.00±0.03b	66.00±0.03a	3.19±0.42b	-
	4064	16.00±0.02b	63.00±0.03a	3.29±0.37b	-
	4288	18.00±0.03b	63.00±0.04a	3.30±0.34b	-
15	2948	85.00±0.04a	91.00±0.02a	7.28±1.28b	109.96±16.19bc
	3091	83.00±0.08a	94.00±0.03a	6.19±0.57b	93.07±7.15c
	3584	84.00±0.07a	95.00±0.02a	7.09±0.70b	104.81±5.22bc
	3821	84.00±0.05a	91.00±0.03a	6.59±0.45b	101.51±5.28bc
	4064	92.00±0.02a	97.00±0.01a	9.50±0.30a	149.73±4.90a
	4288	92.00±0.04a	94.00±0.03a	7.70±0.22ab	122.55±4.89b
20	2948	79.00±0.08abc	97.00±0.02a	6.50±0.25a	161.69±2.93b
	3091	74.00±0.03bc	94.00±0.03a	6.05±0.86a	153.80±20.81b
	3584	86±0.03ab	95.00±0.03a	6.36±0.33a	152.13±7.11b
	3821	67.00±0.06c	92.00±0.03a	5.78±1.02a	139.61±16.99b
	4064	90.00±0.04a	97.00±0.02a	7.82±0.50a	201.35±8.83a
	4288	85.00±0.03ab	94.00±0.03a	6.85±0.46a	173.82±7.27ab
25	2948	96.00±0.02a	96.00±0.02a	9.96±0.27b	306.37±6.07a
	3091	87.00±0.03a	92.00±0.03a	9.53±0.55b	292.18±10.71a
	3584	98.00±0.01a	99.00±0.01a	10.55±0.59ab	309.63±27.88a
	3821	84.00±0.07a	91.00±0.07a	9.05±0.52b	283.43±13.70a
	4064	92.00±0.02a	96.00±0.02a	11.87±0.92a	324.81±16.50a
	4288	89.00±0.07a	95.00±0.07a	10.76±0.49ab	331.15±4.50a
30	2948	89.00±0.06a	93.00±0.04a	10.21±0.97a	244.02±17.69ab
	3091	92.00±0.07a	92.00±0.07a	10.90±0.87a	245.68±22.67ab
	3584	90.00±0.06a	90.00±0.06a	10.52±1.46a	246.13±25.39ab
	3821	74.00±0.08a	80.00±0.08a	9.26±1.56a	220.11±30.24b
	4064	85.00±0.11a	95.00±0.03a	10.62±1.12a	237.46±19.83ab
	4288	95.00±0.03a	96.00±0.02a	12.67±0.71a	265.34±9.53a

注:表中数据为平均值±标准误;同一温度中同列不同小写字母表示差异显著(p<0.05),下同。

升高至25℃后,发芽指数最高上升至12.67。25℃和30℃下,种子的活力指数显著高于15℃和20℃,且30℃低于25℃温度处理。15~25℃温度范围内,海拔4064m砂生槐种子的活力指数高于其他海拔种子,在15℃和20℃时差异显著($p<0.05$)。

2.2 温度对砂生槐种子幼苗生长的影响

不同温度对来自不同海拔砂生槐幼苗生长的苗长和根长的影响,见表3。随着温度升高,苗长和根长呈现增长的趋势,25℃达到最大值。2948,3091m,3584,3821,4064,4288m6个不同海拔砂生槐幼苗的苗长和根长分别为30.75,30.67,29.34,31.33,27.37,30.77cm和19.60,20.67,19.41,19.22,16.99,17.20cm。高温(30℃)处理,幼苗生长受抑制,苗长和根长低于20℃和25℃处理。不同恒温(15~25℃)处理中,不同海拔砂生槐幼苗的苗长和根长差异不显著。仅在30℃处理,海拔4288m砂生槐幼苗的苗长显著低于其他种源幼苗($p<0.05$)。

不同温度对来自不同海拔砂生槐幼苗生长的苗鲜质量、根鲜质量、苗干质量和根干质量的影响如表3所示。不同海拔砂生槐幼苗鲜质量、根鲜质

量和苗干质量随着温度上升逐渐增加,25℃时达到极值;30℃高温处理后,幼苗鲜质量、根鲜质量和苗干质量又有下降。25℃处理中,2948,3091,3584,3821,4064,4288m6个不同海拔砂生槐5株幼苗鲜质量分别为1.08,0.96,1.16,0.98,0.96,1.12g,明显高于其他温度;15,20,25,30℃处理下砂生槐幼苗根鲜质量和苗干质量差异不大。15,20,25,30℃处理下,不同海拔砂生槐幼苗的根干质量无差异,均为0.01g/5株。

2.3 温度和海拔对砂生槐种子萌发和幼苗生长的交互作用

由表4的方差分析可知:温度显著影响不同海拔砂生槐种子萌发的发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、苗长、根长、根鲜质量、苗干质量和根干质量($p<0.05$),海拔仅对砂生槐幼苗的发芽势、发芽指数、活力指数和苗干质量产生显著影响($p<0.05$)。温度和海拔对砂生槐幼苗的苗干质量的影响存在交互作用($p<0.05$),温度和海拔对砂生槐种子萌发和幼苗生长的其他指标不存在交互作用。

表3 温度对不同海拔砂生槐幼苗苗长、根长、鲜质量、根鲜质量、苗干质量和根干质量的影响

温度/℃	海拔/m	苗长 SL/cm	根长 RL/cm	苗鲜质量 SFW/(g·5株 ⁻¹)	根鲜质量 RFW/(g·5株 ⁻¹)	苗干质量 SDW/(g·5株 ⁻¹)	根干质量 RDW/(g·5株 ⁻¹)
15	2948	15.10±0.25a	11.22±0.27a	0.63±0.02a	0.05±0.01a	0.14±0.00ab	0.01±0.00a
	3091	15.03±0.33a	12.12±1.09a	0.66±0.01a	0.05±0.01a	0.15±0.01a	0.01±0.00a
	3584	14.78±0.87a	10.73±1.51a	0.57±0.03a	0.04±0.01a	0.14±0.00a	0.01±0.00a
	3821	15.40±1.01a	12.40±0.93a	0.63±0.06a	0.05±0.00a	0.14±0.00ab	0.01±0.00a
	4064	15.77±0.97a	11.77±0.58a	0.59±0.02a	0.05±0.01a	0.12±0.01b	0.01±0.00a
	4288	15.91±0.95a	12.06±1.64a	0.62±0.04a	0.04±0.01a	0.13±0.01ab	0.01±0.00a
20	2948	24.87±1.23a	17.56±0.81a	0.84±0.03ab	0.06±0.00a	0.16±0.00a	0.01±0.00a
	3091	25.41±0.20a	16.57±0.74a	0.83±0.02ab	0.06±0.00a	0.15±0.00a	0.01±0.00a
	3584	23.92±1.55a	17.32±1.58a	0.80±0.02b	0.06±0.01a	0.15±0.00a	0.01±0.00a
	3821	24.14±1.09a	16.44±1.14a	0.82±0.02ab	0.06±0.00a	0.16±0.01a	0.01±0.00a
	4064	25.76±0.75a	16.99±0.68a	0.90±0.02a	0.07±0.01a	0.16±0.01a	0.01±0.00a
	4288	25.38±0.84a	17.20±1.31a	0.80±0.06b	0.06±0.00a	0.17±0.01a	0.01±0.00a
25	2948	30.75±1.04a	19.60±1.51a	1.08±0.05b	0.07±0.01a	0.19±0.00a	0.01±0.01a
	3091	30.67±0.67a	20.67±1.00a	0.96±0.05b	0.07±0.00a	0.19±0.01a	0.01±0.01a
	3584	29.34±3.93a	19.41±0.86a	1.16±0.07a	0.07±0.01a	0.19±0.00a	0.01±0.00a
	3821	31.33±0.33a	19.22±1.11a	0.98±0.04b	0.07±0.00a	0.19±0.00a	0.01±0.01a
	4064	27.37±0.61a	20.21±0.75a	0.96±0.03b	0.07±0.00a	0.20±0.00a	0.01±0.00a
	4288	30.77±1.00a	20.86±1.84a	1.12±0.05ab	0.07±0.01a	0.20±0.01a	0.01±0.00a
30	2948	23.89±0.25a	12.82±0.01a	0.64±0.03b	0.05±0.00a	0.11±0.00a	0.01±0.00a
	3091	22.53±0.43ab	13.88±1.01a	0.72±0.07ab	0.06±0.00a	0.11±0.00a	0.01±0.00a
	3584	23.40±1.11a	12.63±1.42a	0.75±0.07a	0.05±0.00a	0.11±0.00a	0.01±0.00a
	3821	23.78±0.52a	13.41±0.16a	0.64±0.04b	0.05±0.01a	0.09±0.00b	0.01±0.00a
	4064	22.37±0.47ab	11.82±0.45a	0.70±0.02ab	0.05±0.00a	0.12±0.00a	0.01±0.00a
	4288	20.94±0.27b	12.33±0.60a	0.62±0.05b	0.06±0.01a	0.09±0.00b	0.01±0.00a

表4 温度和海拔及其交互作用

Item	GP	GR	GI	VI	SL	RL	SFW	RFW	SDW	RDW
T	269.42*	227.63*	119.04*	614.31*	468.80*	1218.14*	0.38	475.74*	264.97*	470.92*
A	4.78*	2.70	4.87*	6.06*	0.21	0.45	0.42	0.29	4.35*	0.72
T×A	1.12	49.25	1.00	1.53	0.77	0.92	0.48	1.23	5.00*	0.92

注:*表示差异显著, $p < 0.05$ 。

3 讨论与结论

植物种子萌发是生命的起始,是植物能够成苗的前提,也是进行植物抗逆性研究的重要时期^[20-21]。因此,种子萌发是植株能否成功建植的关键阶段,常被用来评价植物适应干旱半干旱气候的能力^[22]。砂生槐灌丛集中分布于雅鲁藏布江流域中段的宽谷、两侧低山及拉萨河、年楚河等主要支流的宽谷内^[23]。本试验针对海拔在2 900~4 300 m的6个砂生槐天然居群进行研究,这些居群涵盖了砂生槐的主要分布区,具有代表性。这些区域位于雅鲁藏布江中游,分布地域狭小,纬度跨度约6°,年降水量和年日均温、生长期变化较小,因此地理种源变异较小。以往研究表明,砂生槐种子发芽率低,仅为10%左右。本研究中,种子经过破皮处理后,在不同恒温条件下均能萌发,说明砂生槐种子的休眠主要是由于种皮硬实造成的。破除种皮是解除砂生槐种子休眠的有效方法之一。温度是种子萌发的必要条件,种子需要达到一定的积温才能顺利发芽^[24],温度显著影响植物发芽。在本研究中,随着温度上升,砂生槐种子的发芽势和发芽率整体呈现先增加后降低的趋势,且在15~25℃的发芽率可达到90%以上。可见,砂生槐种子最适发芽温度在15~25℃,温度过低和过高均不利于砂生槐种子的发芽。这与大部分的研究结果相同^[25]。研究发现,采自较高海拔的种子具有较高的发芽率和活力指数^[26],本研究中,日喀则拉孜海拔4 064 m砂生槐种子的活力指数显著高于其他海拔种子。而日喀则昂仁县海拔4 288 m砂生槐幼苗的苗长显著低于其他种源幼苗,这可能是由于砂生槐为了适应高海拔的环境条件,促进了地下部分的生长分配以提高生存能力,进而抵制了地上部分的生长。

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.
 [2] 宁小斌,张晓晨,史伟. 西藏砂生槐种群资源现状调查及发展探讨[J]. 中南林业调查规划,2022,41(3):50-54.
 [3] 郭其强,方江平,边多,等. 不同干扰形式对砂生槐群落结构特征的影响[J]. 西北植物学报,2009,29(8):1670-1677.
 [4] 崔广帅,张林,沈维,等. 西藏雅鲁藏布江流域中段砂生槐灌丛生物量分配及碳密度[J]. 植物生态学报,2017,41(1):53-61.
 [5] 赵文智. 砂生槐沙生适应性初步研究[J]. 植物生态学报,1998(4):379-384.

[6] 宁小斌,张晓晨,史伟. 西藏砂生槐种群资源现状调查及发展探讨[J]. 中南林业调查规划,2022,41(3):50-54.
 [7] 刘莹. 砂生槐群体遗传特性与代表群体表型性状研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.
 [8] 杨兰,李慧娥,郭其强. 青藏高原特有种砂生槐的核心种质构建[J]. 植物生理学报,2022,58(6):1133-1144.
 [9] 王文娟,贺达汉,刘一岑,等. 植物生长调节剂对砂生槐种子发芽特性的影响[J]. 湖北农业科学,2010,49(9):2158-2160.
 [10] 杨青霞. 砂生槐种子水溶性生物碱对溃疡性结肠炎小鼠模型的干预效应及机制研究[D]. 兰州:兰州大学,2023.
 [11] 王聚乐,崔超英,徐福春,等. 西藏不同区域砂生槐在不同采收时间的花、茎、叶及种子中苦参碱、氧化苦参碱含量比较[J]. 西藏大学学报(自然科学版),2012,27(2):28-31.
 [12] 王文娟,薛永伟. “吸湿-回干”处理对砂生槐种子萌发的影响[J]. 农业科学研究,2018,39(1):89-92.
 [13] 李紫帅,柳文杰,张真真,等. 不同施氮方式及施氮量对砂生槐生长及生根的影响[J]. 东北林业大学学报,2023,51(1):22-26.
 [14] 张艳福,姚卫杰,郭其强,等. 干旱胁迫对砂生槐种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(10):45-56.
 [15] 杨爽,方江平,唐佳,等. 西藏砂生槐丛生芽的诱导[J]. 吉林农业大学学报,2011,33(4):381-384.
 [16] 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.
 [17] 林玲,叶彦辉,罗建,等. 青藏高原特有种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.
 [18] 曹仕龙,廖暑杰,胡龙兴,等. 四种饲草种子在不同浓度盐胁迫下的萌发特性和产量[J/OL]. 草业科学,10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0310.
 [19] 国家标准总局. 牧草种子检验规程:GB 2930—1982[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
 [20] 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):742-751.
 [21] GORAI M, EL ALOUI W, 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(1):727-738.
 [22] 梁晓宁,梁爽,梁宇鹏,等. 外源钙对镉胁迫下荻种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志,2024,43(7):2018-2025.
 [23] 赵阿曼,刘志民,康向阳,等. 西藏特有植物砂生槐天然居群遗传多样性研究[J]. 生物多样性,2003,11(2):91-99.
 [24] CHAVARÍN-MARTÍNEZ C D, GUTIÉRREZ-DORADO R, PERALES-SÁNCHEZ J X K, et al. Germination in Optimal Conditions as Effective Strategy to Improve Nutritional and Nutraceutical Value of Underutilized Mexican Blue Maize Seeds [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2019, 74(2):192-199.
 [25] 赵丹丹,马红媛,亓雯雯,等. 禾豆牧草种子萌发对温度和光照的响应[J]. 草业科学,2023,40(12):3062-3072.
 [26] VERA M L. Effects of Altitude and Seed Size on Germination and Seedling Survival of Heathland Plants in North Spain [J]. Plant Ecology, 1997, 133(1):101-106.