

陈晓娜,郝玉光,赵英铭,等.樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)种子性状与环境的相关性[J].中国沙漠,2026,46(4): 109–119.

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)种子性状与环境的相关性

陈晓娜^{1,2}, 郝玉光¹, 赵英铭^{1,2}, 王靖思³, 贾海宽⁴, 范海江⁵

(1.中国林业科学研究院沙漠林业实验中心,内蒙古 磴口 015200; 2.国家林业和草原局植物新品种测试中心磴口分中心,内蒙古 磴口 015200; 3.巴林右旗巴林桥治沙林场,内蒙古 巴林右旗 025150; 4.呼伦贝尔市红花尔基林业局国家樟子松良种基地,内蒙古 红花尔基 021112; 5.呼伦贝尔市红花尔基林业局,内蒙古 红花尔基 021112)

摘要:樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)是防沙治沙人工林建植的主要树种,其种子性状在不同地理环境的分化现象日益严重。为探究其种子性状对环境因子的响应规律,本研究以自然降水量梯度分布的5个地区的樟子松种子为试材,测定并分析其种子大小、萌发及幼苗长势与环境因子的关系,评估樟子松在不同环境下的生长策略。结果表明:樟子松种子长度、种子宽度、种子厚度、千粒重、体积、萌发率、根长随年降水量的增加呈减小趋势,种子宽度、种子厚度、千粒重、体积、萌发率与年降水量呈显著的线性关系($P<0.05$),根长与年降水量呈显著的指数函数关系($P<0.05$)。樟子松种子长度、种子宽度、种子厚度、千粒重、体积、萌发率、根长随年日照时数的增加呈增大的趋势。随年平均气温的增加,种子长宽比降低,二者呈显著对数函数关系($R^2=0.5669$, $P<0.05$)。种子长度、种子宽度、种子厚度、体积、萌发率、千粒重、根长与年平均气温的关系均不显著($P>0.05$)。5个地区的樟子松种子表型性状具有显著性差异($P<0.05$),种子体积的变异系数最高,达17.96%。除种子长宽比以外,其他种子性状指标与年降水量呈负相关,与年日照时数呈正相关。总体来说,随日照时数增加和降雨量减少,5个地区樟子松人工林的种子变大,萌发率增加,且幼苗长势变好。种子性状与降水量和日照时数关系的权衡及其对樟子松繁殖与生长作用的机理有待于进一步研究。

关键词:形态特征; 萌发特性; 环境因子; 种子; 樟子松

文章编号: 1000-694X(2026)04-109-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00179

中图分类号: S791.253

文献标志码: A

0 引言

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)原产地为中国呼伦贝尔沙地和大兴安岭山地^[1-2],具有抗旱、耐寒及耐瘠薄等优良特性,是中国北方干旱半干旱地区防风固沙造林中常用树种,在水土保持与防风固沙等方面发挥着重要作用^[3-5]。近年来,随着栽植范围持续扩大,樟子松在不同地理环境下的生长响应及种子性状分化现象日益显著,其生长衰弱、天然更新受限等问题日渐显现,樟子松引种区人工林天然更新障碍解除机制与技术是当前面临的关键科学与技术问题^[6-8]。樟子松主要以种子繁

殖方式实现自然更新,种子更新发生与否取决于种子生命力的强弱和是否具备种子萌发的环境,因此,种子发育状况是其繁衍、扩散及生存过程中十分关键的环节。拥有繁育能力强的种子,已成为樟子松能够自然更新的首要条件。

郭米山等^[9]发现在25~30℃温水中浸泡24 h后,樟子松种子出苗时间有所缩短、出苗率也明显提高。王东丽等^[10]发现干旱会减少樟子松种子萌发数、延迟萌发。王浩宇等^[6]发现柠条(*Caragana korshinskii*)枯枝与青杨(*Populus cathayana*)枯叶浸提液对樟子松种子萌发呈现出低抑制高促进的效果。Marta等^[11]针对30~219 a林龄樟子松的观测显

收稿日期:2025-09-08; 改回日期:2025-10-21

资助项目:内蒙古自治区自然科学基金重点项目(2023ZD23)

作者简介:陈晓娜(1994—),女,内蒙古莫力达瓦达斡尔族自治旗人,硕士,工程师,主要研究方向为荒漠化防治。E-mail: 775164470@qq.com

通信作者:郝玉光(E-mail: Hyuguang@163.com)

示,林龄增长虽显著改变球果与种子形态特征,但对萌发能力及种子活力无实质性影响。Sandrine等^[12]则证实种子质量与萌发率、幼苗生长呈正相关,而与种子传播能力呈负相关。目前,有关樟子松种子的研究多关于繁育方式^[13-14]和抗性^[15-16]等方面,而对广域尺度下种子性状的地理变异及其与环境驱动因子的关联性仍缺乏系统性研究。鉴于樟子松在中国“三北”地区分布范围广,生长环境差异显著,其种子可能在长期适应中形成表型可塑性与遗传分化^[3]。因此,本研究选取沿降水梯度分布的5个樟子松人工林样地,研究不同地区樟子松种子表型结构和萌发特性两大主要种子性状的变异特征,探讨其与环境因子的相关性,旨在从种源层面揭示樟子松种质资源的适应性进化规律,为不同区域开展樟子松繁育和促进人工林更新提供理论基础依据。

1 材料与方法

1.1 样地选取

根据樟子松人工林在中国北方干旱半干旱地区的分布情况,沿水分梯度由东向西选取辽宁省阜新市彰武县章古台镇(ZGT,有少量自然更新苗)、内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗(KSKT,无自然更新

苗)、内蒙古自治区锡林郭勒盟多伦县(DL,有少量自然更新苗)、内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗(YQ,有极少量自然更新苗)、内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县(DK,无自然更新苗)5个代表性引种区。5个地区日照时数递增、降水量递减,构成了明显的水热环境梯度,5个地区所选林分林龄一致(约40 a),林木密度约1 110株hm⁻²、采样树木胸径为20~25 cm,树高为15~20 m,所有样地均位于相对平缓地段,无明显坡向差异,克什克腾旗土壤类型为栗钙土,其他4个地区土壤类型为风沙土,地理信息详见图1和表1。

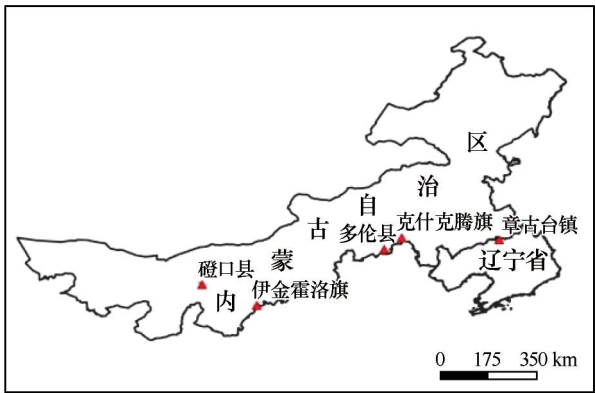


图1 樟子松取样地点分布
Fig.1 Distribution map of sampling sites of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

表1 樟子松材料采集信息

Table 1 Collection information of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* materials

引种区	纬度	经度	海拔/m	年均降水量/mm	年均气温/℃	年均日照/h	采集地点
ZGT	42.70°N	122.54°E	246.45	515.0	6.96	2 766.5	辽宁省阜新市彰武县章古台镇
KSKT	42.80°N	117.41°E	1 496.86	424.0	0.62	2 800.0	内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗
DL	42.20°N	116.49°E	1 275.00	384.0	2.71	2 941.1	内蒙古自治区锡林郭勒盟多伦县
YQ	39.25°N	109.78°E	1 416.00	377.0	7.06	3 011.0	内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗
DK	40.34°N	106.94°E	1 050.00	148.6	7.40	3 211.7	内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县

注:ZGT为章古台镇;KSKT为克什克腾旗;DL为多伦县;YQ为伊金霍洛旗;DK为磴口县。

1.2 试验材料

于2024年春季,在5个研究区的樟子松人工林内,各设置3块100 m×100 m样地。在各样地内,沿对角线随机选取20株生长健壮、无病虫害的樟子松作为采样单株。使用高枝剪于每株树冠中部、距地面10~15 m处,沿东西南北4个方向各采集成熟球果5个,每个地区共获取球果约1 200个。将同一地区的球果充分混合后,随机选取大小均匀、形态完整

的球果300个,将球果置于50℃烘箱内烘干至鳞片微裂,随后转入45℃温水中浸泡10 min,捞出后继续于50℃烘箱中烘至鳞片完全开裂,收集脱出种子^[17]。选择颗粒饱满、光泽度好且不存在病害或虫害的种子,开展种子表型特征观测和萌发试验。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 千粒重测定

采用五百粒法,在质量良好的种子里随机抽取

500粒,天平称重,换算为千粒重,3次生物学重复,取平均值。

1.3.2 种子表型性状的测定

采用Win Seedle种子和针叶图像分析系统软件获取种子表型结构指标,包括种子宽度(垂直子叶方向)、种子长度(平行子叶方向)、种子体积及表面积等,计算种子长宽比。利用电子数显游标卡尺(精确度0.01 mm)分别测量5份樟子松种子厚度。种子长度是种子纵向端点间的间距,宽度是横向端点间间距,厚度是腹面与背面的最大间距。从每份材料中随机选取100粒种子,3次生物学重复,共300粒种子,取平均值。

$$\text{种子长宽比} = \text{种子长度} / \text{种子宽度} \quad (1)$$

$$\text{变异系数} = \text{性状标准差} / \text{性状平均值} \times 100\% \quad (2)$$

1.3.3 种子萌发试验

在180 mm×125 mm大小的萌发袋中开展种子萌发试验。每袋樟子松种子数量为25粒,5次生物学重复。在实验室自然光照条件下进行,温度为20℃/25℃,相对湿度为50%~70%。种子萌发试验开始后,每天对所有供试种子的萌发数量进行观察与记录,根据萌发袋内的湿度酌情加水。观察过程中,胚根露出种皮视作种子萌发,持续3 d没有新种子萌发时,视为萌发结束。统计萌发数,利用电子数显游标卡尺(精确度0.01 mm)测量樟子松幼苗的根长和茎长;计算萌发率、萌发指数^[18]和活力指数^[19],公式如下:

$$\text{萌发率}(\%) = \text{种子萌发数} / \text{供试种子数} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{萌发指数} GI = \sum_{i=1}^n G_i / D_i \quad (4)$$

式中: t 为萌发情况观察的天数,以试验起始时刻为基准,每隔24 h进行一次观察记录,依次记为第1天($t=1$)、第2天($t=2$)……第 n 天($t=n$); G_i 为第 t 天的萌发种子数; D_i 为相应的萌发天数。

$$\text{活力指数} = \text{萌发率} \times (\text{幼苗根长} + \text{幼苗茎长}) \quad (5)$$

1.3.4 数据处理

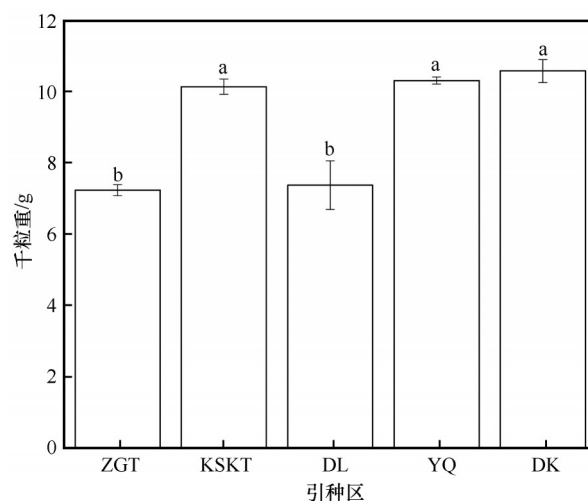
采用Excel 2010进行数据储存、整理和变异性分析;采用统计工具进行单因素方差分析(One way ANOVA),比较不同地区樟子松形态指标和萌发参数的差异,并分析种子性状与环境因子的相关性;采用Origin 2021进行绘图,并分析形态指标、萌发特性及幼苗生长指标的相关性;采用Excel 2010进行樟子松种子性状和环境因子的线性回归

分析。

2 结果与分析

2.1 不同地区樟子松种子千粒重

由图2可见,5个地区樟子松种子千粒重变化值为7.23~10.57 g。章古台地区的千粒重最小,仅为7.23 g,显著低于克什克腾旗、伊金霍洛旗和磴口县($P<0.05$)。磴口县的千粒重最大,达10.57 g,较章古台镇和多伦县分别增加了3.34 g和3.2 g,差异显著($P<0.05$),与克什克腾旗和伊金霍洛旗差异不显著($P>0.05$)。



注:不同字母代表不同地区樟子松差异性显著。ZGT为章古台镇;KSKT为克什克腾旗;DL为多伦县;YQ为伊金霍洛旗;DK为磴口县

图2 不同地区樟子松种子千粒重

Fig.2 Thousand-grain weight of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in different regions

2.2 不同地区樟子松种子表型性状

5个地区樟子松种子表型性状差异较显著($P<0.05$,表2)。克什克腾旗的种子长度和长宽比最大,分别为5.11 mm和1.76,与其他4个地区的种子有显著性差异($P<0.05$);磴口县种子宽度和厚度最大,分别为3.10 mm和1.71 mm,磴口县的种子宽度与伊金霍洛旗的种子宽度差异不显著($P>0.05$),与其他地区种子宽度差异显著($P<0.05$)。章古台镇的种子长度、宽度、厚度、体积和表面积最小。5个地区的6个樟子松种子表型性状指标变异系数为4.48%~17.96%,种子体积和表面积的变异较明显,其变异系数分别为17.96%和11.69%。

表2 不同地区樟子松种子表型性状指标

Table 2 Seed phenotypic traits of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in different regions

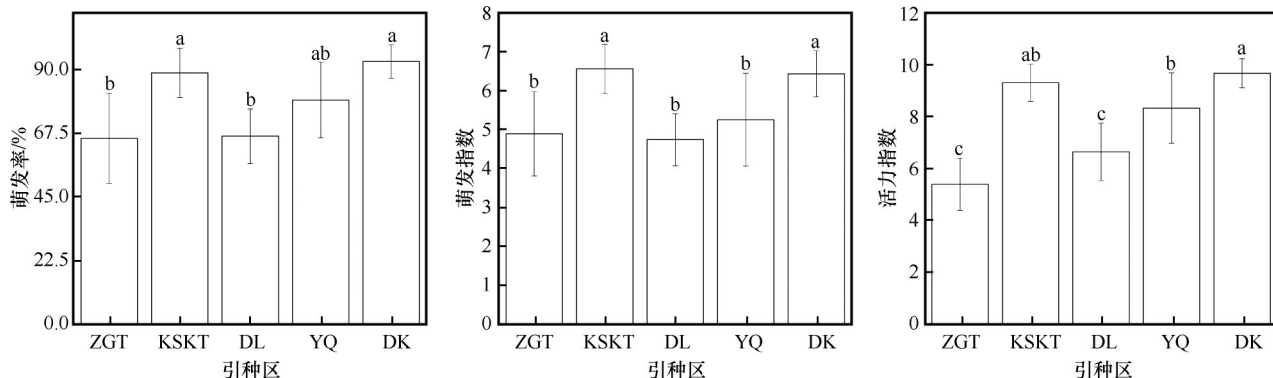
引种区	长度/mm	宽度/mm	长宽比	厚度/mm	体积/mm ³	表面积/mm ²
ZGT	4.46±0.44 ^d	2.64±0.22 ^c	1.69±0.16 ^b	1.46±0.17 ^c	14.08±3.37 ^c	26.31±4.15 ^c
KSKT	5.11±0.24 ^a	2.91±0.18 ^b	1.76±0.10 ^a	1.58±0.16 ^b	19.40±3.04 ^b	33.13±3.22 ^b
DL	4.49±0.49 ^d	2.68±0.24 ^c	1.68±0.49 ^b	1.50±0.16 ^c	14.67±3.70 ^c	26.95±4.62 ^c
YQ	5.04±0.44 ^b	3.08±0.22 ^a	1.64±0.14 ^c	1.58±0.14 ^b	21.35±4.20 ^a	34.41±4.58 ^a
DK	4.77±0.45 ^c	3.10±0.28 ^a	1.54±0.14 ^d	1.71±0.17 ^a	21.11±5.16 ^a	33.43±5.36 ^b
平均值	4.77	2.88	1.66	1.57	18.12	30.84
F值	218.58**	149.95**	101.55**	222.12**	243.68**	17.12**
变异系数/%	5.93	6.99	4.48	6.16	17.96	11.69

注:不同字母代表不同地区樟子松差异性显著。ZGT为章古台镇;KSKT为克什克腾旗;DL为多伦县;YQ为伊金霍洛旗;DK为磴口县。

2.3 不同地区樟子松种子萌发特性

从图3和图4看出,磴口县和章古台镇的樟子松种子萌发开始时间最早,2 d后开始萌发;磴口县的樟子松种子萌发率和活力指数最高,分别为92.80%和9.67;显著高于章古台镇和多伦县($P<0.05$),分别较章古台镇增加了41.46%和79.46%;但

磴口县的萌发持续时间最长,处理10 d后萌发结束。克什克腾旗的种子萌发虽晚,但其首日的萌发数最多,平均达13.40个。5个地区的种子在第3~4 d时达到萌发高峰,10 d内全部完成萌发,但萌发时间和峰值存在差异。克什克腾旗的萌发指数最高,为6.56,显著高于章古台镇、多伦县和伊金霍洛旗($P<0.05$)。



注:不同字母代表不同地区樟子松差异性显著。ZGT为章古台镇;KSKT为克什克腾旗;DL为多伦县;YQ为伊金霍洛旗;DK为磴口县

图3 不同地区樟子松种子萌发特性

Fig.3 Seed germination characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in different regions

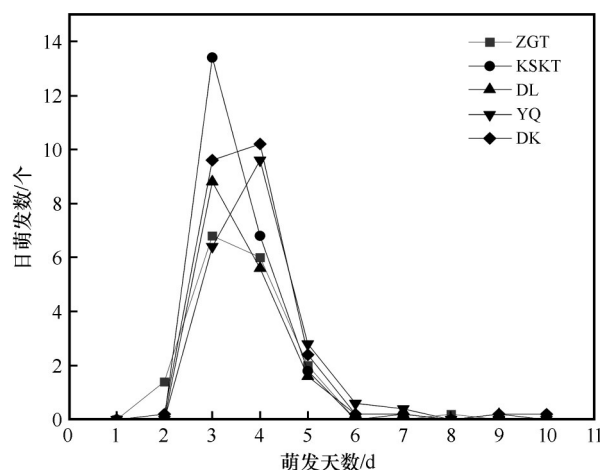
2.4 不同地区樟子松幼苗生长特性

由图5看出,5个地区樟子松幼苗根长的变化为3.86~5.15 cm,茎长的变化为4.46~5.41 cm。樟子松幼苗根长和茎长的变化趋势一致,克什克腾旗的根系和茎最长;克什克腾旗樟子松幼苗的根长、茎长与多伦县、伊金霍洛旗、磴口县的根长、茎长差异均不显著($P>0.05$),与章古台镇差异显著($P<0.05$)。

2.5 樟子松种子性状间的相关性

樟子松种子表型性状和种子萌发特性指标的

相关分析结果表明(图6),樟子松种子表型性状内部间的相关性较强,种子长度、宽度、厚度、表面积、体积和千粒重6个指标间均呈显著的正相关关系($P<0.05$)。种子宽度与种子体积、表面积、厚度、千粒重的相关系数较大,分别达到0.96、0.88、0.84和0.86,种子长宽比和除长度外的其他5个表型性状指标呈负相关关系,相关关系较显著($P<0.05$)。幼苗根长和茎长呈正显著关系($P<0.05$),相关系数为0.52。樟子松种子表型性状和萌发特性指标间的相关性也较强,除种子长宽比外,其他6个表型



注: ZGT为章古台镇; KSKT为克什克腾旗; DL为多伦县;
YQ为伊金霍洛旗; DK为磴口县

图4 不同地区樟子松种子萌发进程

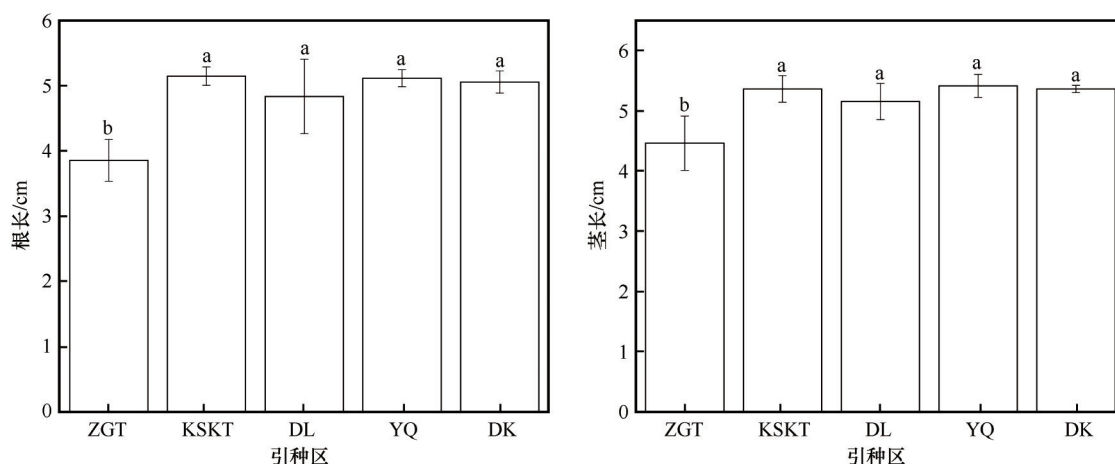
Fig.4 Seed germination process of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in different regions

性状指标与萌发率和活力指数间的相关性均较显著($P<0.05$),与幼苗长势也呈显著的正相关关系($P<0.05$)。樟子松种子活力指数与幼苗长势相关性显著($P<0.05$),其余2个萌发指标与幼苗长势相关性不强。樟子松种子表型和萌发特性指标间的相

关性多数达到了显著水平,说明其种子形态和萌发指标间具有较为复杂的联系,并不是独立存在的。

2.6 樟子松种子性状与环境因子的关系

在中国北方干旱半干旱区,自东向西分布的5个樟子松人工林区年降水量逐渐减少,而年日照时数逐渐增加,呈现明显的水热梯度分异。5个地区樟子松种子长宽比与年降水量呈幂指数函数关系,相关关系显著($R^2=0.7338, P<0.05$);随年降水量的增加,樟子松种子长宽比逐渐增大,种子长度、种子宽度、种子厚度、千粒重、体积、根长、萌发率则减小(图7)。樟子松种子长宽比与年日照时数呈负指数函数关系,相关关系显著($R^2=0.8322, P<0.05$),种子长度、种子宽度、种子厚度、千粒重、体积、根长、萌发率与年日照时数呈正相关关系(图8)。种子长宽比与温度呈显著的对数函数关系($R^2=0.5669, P<0.05$),随温度的增加,种子长宽比显著降低($P<0.05$),其他种子性状指标与温度的关系不显著(图9)。这说明3个环境因子中,年降水量和年日照时数对樟子松种子形态、萌发及幼苗生长的影响较大,温度对种子性状的影响较小。



注:不同字母代表不同地区樟子松差异性显著。ZGT为章古台镇; KSKT为克什克腾旗; DL为多伦县; YQ为伊金霍洛旗; DK为磴口县

图5 不同地区樟子松幼苗生长特性

Fig.5 Seedling growth characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in different regions

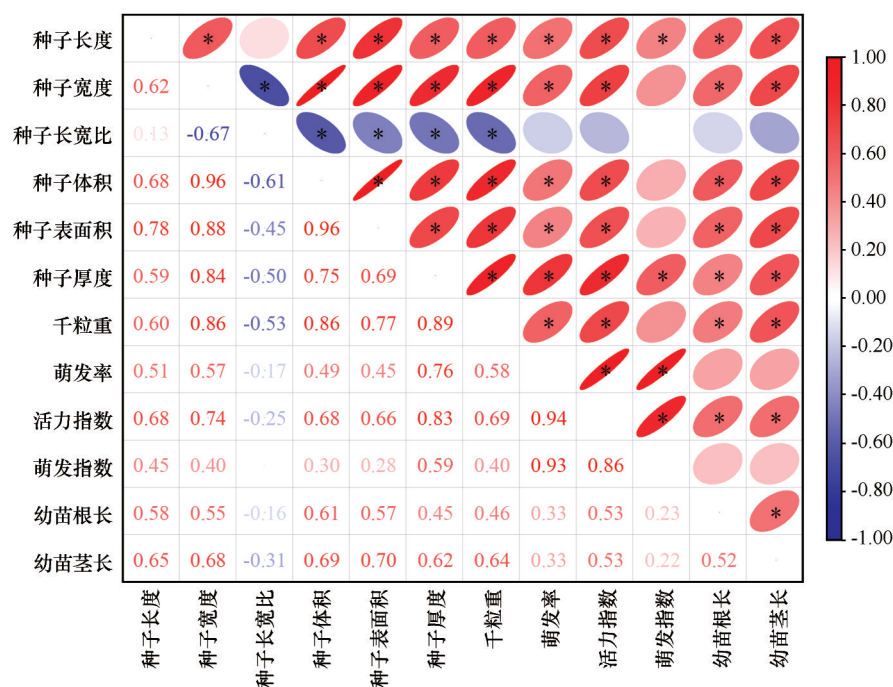
3 讨论

3.1 樟子松种子形态与年降水量、日照时数的关系

在长期的自然选择过程中,植物常通过改变体内各组成部分对营养元素的吸收程度来适应生存条件的变化及环境胁迫^[20-21]。不同区域的同一植物种类,因为地理环境的变化,会形成丰富的遗传变

异^[22-25]。种子是受环境因素作用而改变较小的繁殖器官,种子表型性状较根、茎、叶的表型性状更稳定^[26-27]。因此,在林业相关研究中,常将种子的地理变异情况与遗传分化改变作为优良种质资源筛选的重要指标,在充分利用林木资源与改良树木品质方面发挥着重要的作用^[28-30]。

5个地区的年日照时数和降水量对种子大小、



*表示在 $P < 0.05$ 水平下显著

图6 樟子松种子性状间的相关性

Fig.6 Correlation between seed characters in different regions of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

萌发情况和幼苗长势的影响较大。随年日照时数的增加和年降水量的减少,樟子松种子宽度、厚度和体积呈增加趋势,而种子长宽比减小。在降水量低、日照充足的地区,樟子松可能通过调整自身生理机制,提高对有限水资源的利用效率,将更多营养物质集中分配给少量种子。加之日照时间增加促进樟子松光合作用,使其体内积累更多营养物质。这些物质的积累为种子发育提供了充足的养分,有效地促进了种子体积增长,因此,日照时间长且降水少的地区,樟子松种子越大。种子体积越大代表其吸收水分的表面积越大,体内存在的营养物质越丰富,能够供给萌发的储备物质越多,促使萌发迅速且整齐,进而改善幼苗及其后续的生长发育^[31]。多数研究强调适宜的温湿度对植物种子发育的促进作用,而本研究中樟子松对降水量减少、日照时数增加的独特响应,表现出该物种在特定环境下种子趋向结实数量少、个体体积大的适应策略。这表明作为适应北方寒冷干旱环境的树种,樟子松具有特殊的环境适应机制,能够在不利的环境变化中,通过改变种子性状来维持种群繁衍和发展。降水量减少和日照时数增加对樟子松的作用可能存在均衡阈值,而该阈值的大小及其变化有待于进一步研究。

沿降水梯度,不同地区樟子松种子体积与表面积变异区间较广,说明这2个种子表型结构受环境因素影响较大。不同区域樟子松的种子表型结构沿降水梯度变化差异均较显著,表明不同地区樟子松种子形态存在的差异不是偶然现象,而是种子形态对各区域环境变化的响应。不同地区种子体积与表面积区别,能够解释樟子松在育种选择上的潜力,即差异越大,潜力越大,为樟子松优良种质资源的选择提供理论数据支撑。然而章古台地区海拔最低,其种子千粒重也处于最低水平,分析原因可能是樟子松属于耐旱物种,水分并非主要限制因子,光因子可能起到更重要的作用,将来需要进一步研究。

3.2 樟子松种子萌发特性与环境的关系

种子萌发是植物生命的开始,受种子本身条件与外界环境条件的共同影响。种子萌发进程变化是植物对生存环境可预测性的功能性反映。本试验中,5个区域樟子松种子在10 d内完成了萌发,日萌发数均随时间的增加快速增长至峰值,随后逐渐下降。这种有明显的单一萌发峰值的现象,说明樟子松种子具有萌发早、速度快且历程短的特点,呈现出爆发型萌发的特点,该特性为樟子松更新提供

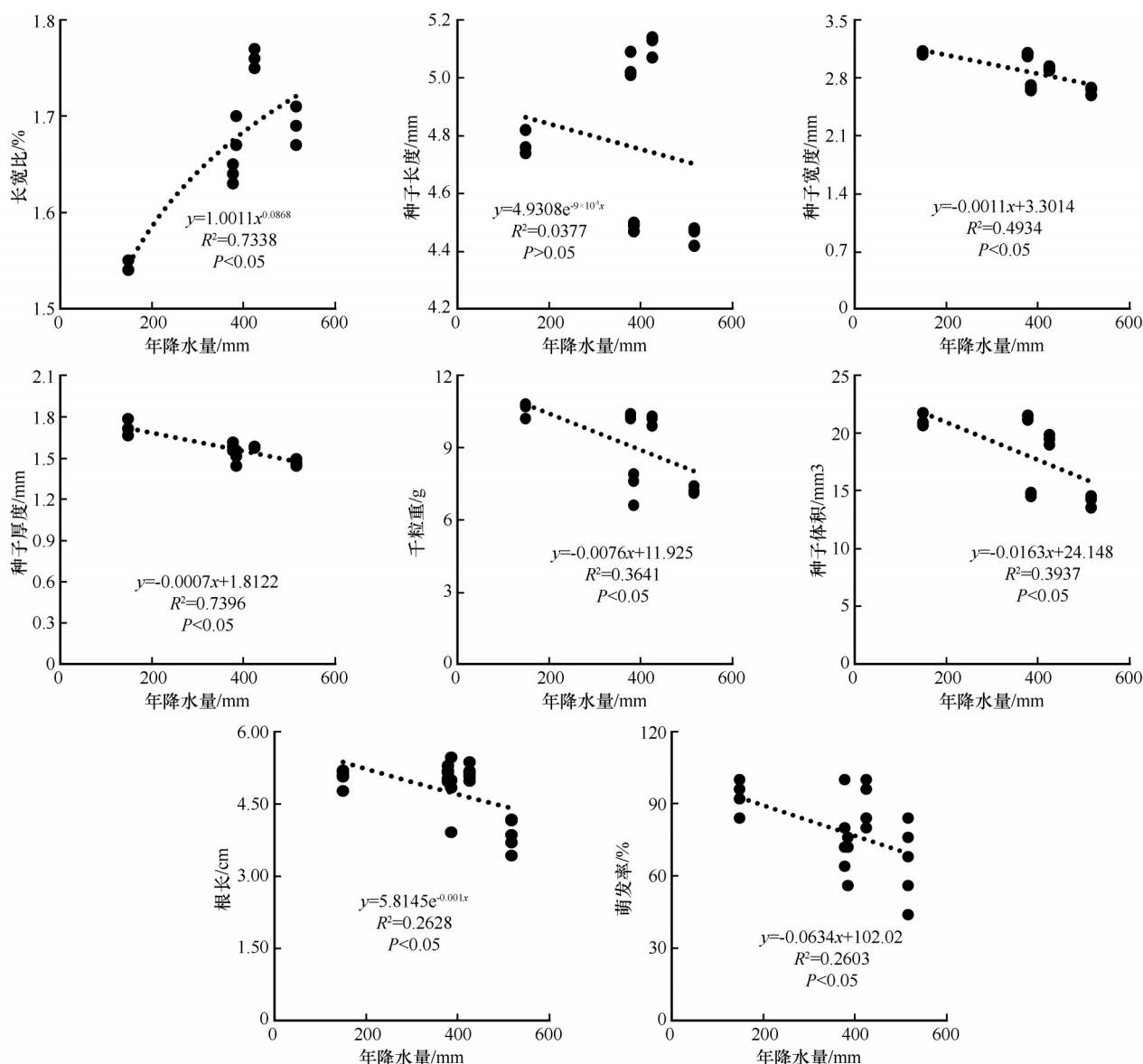


图7 樟子松种子表型性状与年降水量的关系

Fig.7 Relationship between seed phenotypic traits and precipitation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

了良好的生长条件。

降水量与温度是影响不同种源植物种子萌发的两个主要地理气候环境因子^[24]。前人研究发现,植物遗传物质与地理环境因子对不同地区的植物种子萌发率和萌发速度的影响较大^[32-33]。本试验中,不同区域樟子松的种子萌发指标沿降水梯度变化的差异均较显著。通过对樟子松种子萌发性状与环境因子的相关性分析发现,樟子松萌发特性与降水量呈负相关关系,与日照时数呈正相关关系,与温度的相关关系不显著,这可能是由于温度不是樟子松种子萌发的主导因素^[34],樟子松萌发率具有明显的变异,这类变异可能多是水热因子变化引起的。日照延长激活光敏色素调控的萌发信号通路,

加速胚乳养分转化与胚根突破,提升萌发率,使幼苗能更高效地利用有限水分和养分进行细胞分裂与扩展,最终表现为种子更大、萌发率更高且幼苗生长量明显增大。这说明樟子松种子能很好地利用光热资源,因此形成了萌发开始早、时间短、数量高的萌发特性。本研究能够说明樟子松种子的生长除了自身因素外,还受气候因子的影响,而气候对植物的影响机理比较复杂。本研究观测时间短,取样次数不多,难以进行随时间变化的规律性分析,后续研究将逐步完善。

3.3 樟子松种子形态与萌发特性的关系

不同种源种子表型的变化体现了种子对不同生

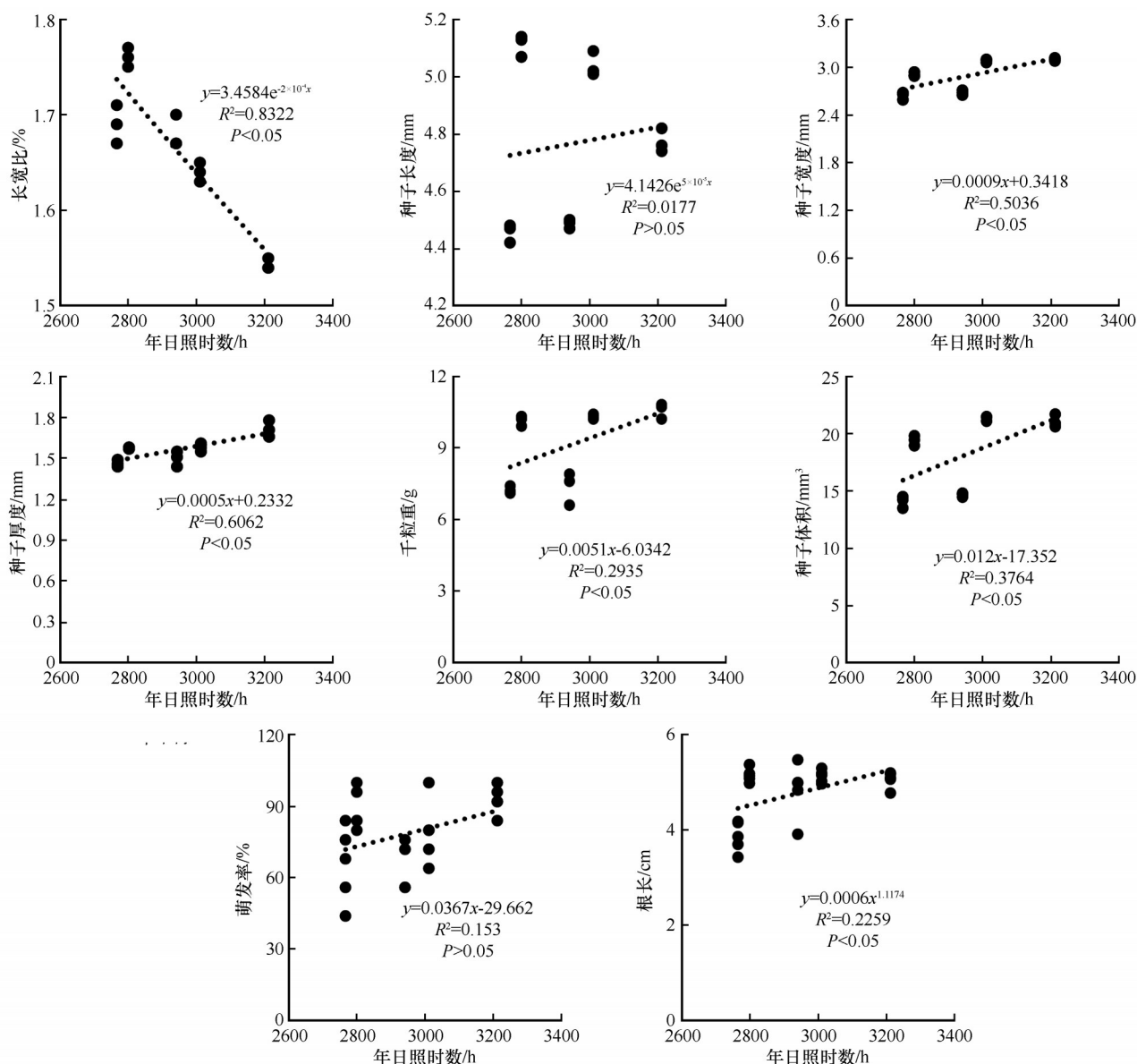


图8 樟子松种子表型性状与年日照时数的关系

Fig.8 Relationship between seed phenotypic traits and average annual sunshine hours of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

长环境的适应性,而种子萌发能力的变化则说明不同生存环境下种子的生存策略^[35]。种子形状会先改变种子萌发特性,进而作用于幼苗生长、植被建成乃至整个群落结构^[36]。通常情况下,大颗粒种子能增强后代在群落里的生存适合度与丰富度,而小颗粒种子能增强后代在群落更新中的贡献^[37]。对同一植物来说,种子越大,储备的能量越多,出苗潜力及概率也越高,在资源有限的环境中,大种子比小种子的种子萌发与幼苗更新能力的优势更大^[38-40],因此较大的种子,其萌发率也较大,本研究结果与其他研究结果一致。颗粒大且萌发率高的樟子松种源具有较高的保护和利用价值;种子颗粒小的种源,可能具有较

高的遗传多样性。然而,本研究仅对5个地区的樟子松种子表型性状与萌发特性两个方面进行了差异性分析,具有一定的局限性。因此,后续将开展田间播种试验,综合分析出苗率与苗期生长等方面性状,深入探究不同地区樟子松的生长规律与逆境胁迫情况,更加全面地了解区域间的差异,为樟子松的优良种质资源筛选提供基础数据支撑。

4 结论

5个樟子松分布区的种子表型性状具有显著性差异,其中种子体积的变异系数最高。樟子松种子颗粒越大,其萌发率也越高,种子大小和萌发

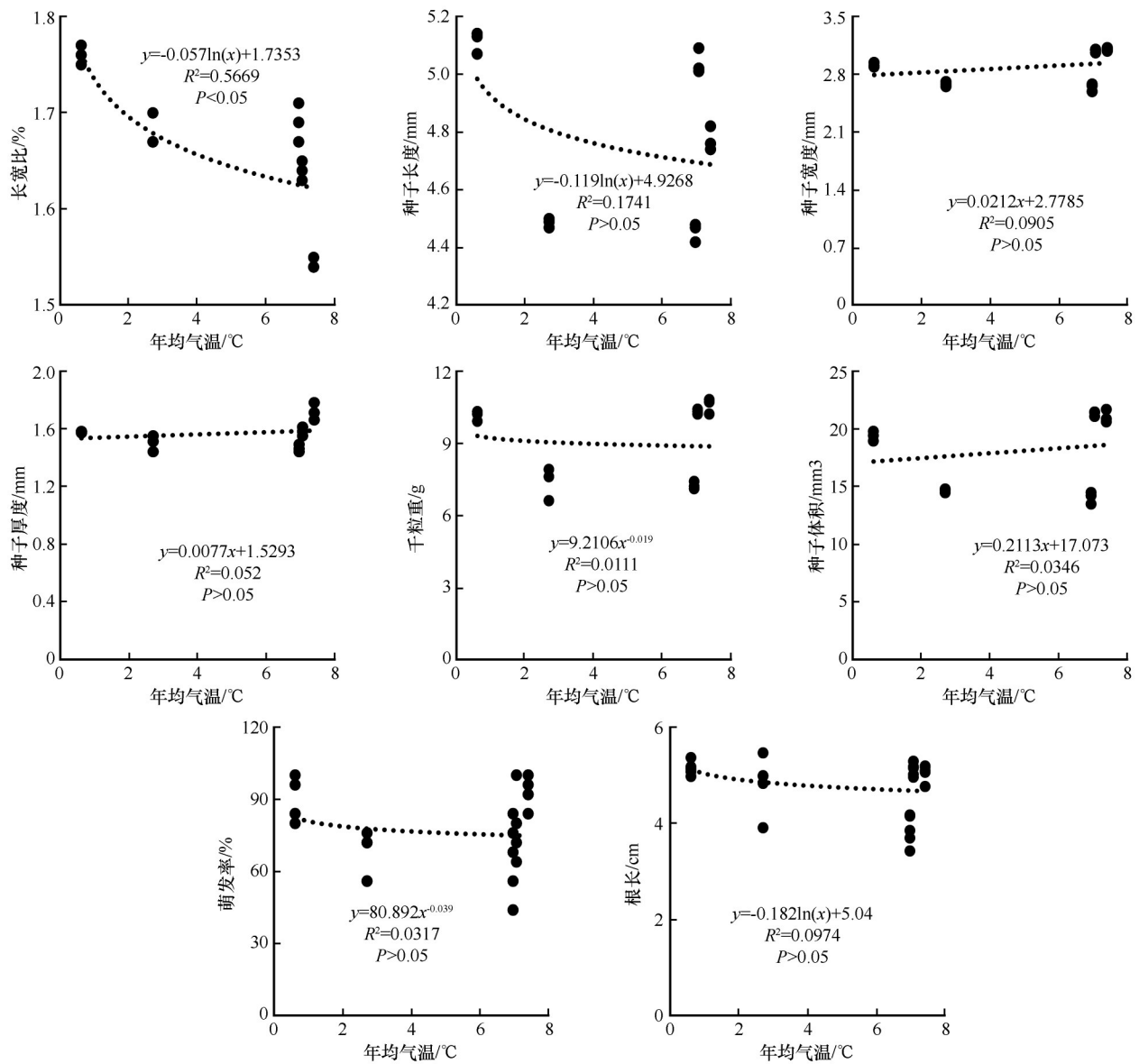


图9 樟子松种子表型性状与年均气温的关系

Fig.9 Relationship between seed phenotypic traits and temperature of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

特性呈显著的正相关关系。樟子松种子多个形态指标的协同作用显著,种子萌发时间早、萌发速度快且耗时较短。不同地区樟子松的种子形态和萌发指标差异显著,相关分析和线性回归分析结果也显示,不同地区的年均气温对樟子松种子性状的影响不显著,而年降水量和年日照时数对樟子松多数种子性状的影响显著。随日照时数的增加和降水量的减少,5个地区樟子松人工林的种子逐渐变大,萌发率增加,且幼苗长势越来越好。

参考文献:

[1] 池静姚,潘磊磊,Kwon S M,等.呼伦贝尔沙地樟子松天然林结构多样性和竞争对树木生长的影响[J].中国沙漠,2024,44

(5):29-40.
[2] 郑万钧.中国树木志(第1卷)[M].北京:中国林业出版社,1983.
[3] 张日升,王东丽,王翠萍,等.干旱胁迫对不同引种区樟子松种子萌发与幼苗生长的影响[J].林业资源管理,2022(3):60-66.
[4] 曾德慧,尤文忠,范志平,等.樟子松人工固沙林天然更新特征[J].应用生态学报,2002,13(1):1-5.
[5] Zhu J J,Fan Z P,Zeng D H,et al.Comparison of stand structure and growth between artificial and natural forests of *Pinus sylvestris* var.*mongolica* on sandy land[J].Journal of Forestry Research,2003,14(2):103-111.
[6] 王浩宇,刘建功,袁泓昌,等.3种浸提液对樟子松种子萌发和幼苗生长的影响[J].森林工程,2023,39(3):30-39.
[7] 宋立宁,朱教君,郑晓.基于沙地樟子松人工林衰退机制的营

- 林方案[J].生态杂志,2017,36(11):3249-3256.
- [8] 朱教君,曾德慧,康宏樟.沙地樟子松人工林衰退机制[M].北京:中国林业出版社,2005.
- [9] 郭米山,王谦,高广磊,等.沙埋和种子处理对樟子松贮藏种子萌发出苗的影响[J].中国水土保持科学,2016,14(6):86-93.
- [10] 王东丽,张日升,方祥,等.固沙樟子松种子萌发与幼苗生长对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J].浙江农林大学学报,2020,37(1):60-68.
- [11] Marta P, Javier V P, Luis B, et al. Does the age of *Pinus sylvestris* mother trees influence reproductive capacity and offspring seedling survival? [J]. Forests, 2022, 13(6):37.
- [12] Sandrine D, Thomas C, Jacques L. Seed mass, seed dispersal capacity, and seedling performance in a *Pinus sylvestris* population [J]. Écoscience, 2003, 10(2):168-175.
- [13] 姚泽,王祺,张元恺,等.干旱荒漠区樟子松种子繁育技术研究[J].农业与技术,2013,33(6):40-41.
- [14] 尤国春.樟子松沙地育苗技术研究[J].防护林科技,2005(6):17-18.
- [15] 李银科,刘世增,康才周,等.温度对樟子松和沙地云杉种子萌发特征的影响[J].水土保持通报,2011,31(4):73-77.
- [16] 高春智,何炎红,田有亮,等.不同浓度赤霉素浸种对樟子松种子萌发的影响[J].内蒙古农业大学学报,2012,33(3):67-72.
- [17] 黄小军.河北省木兰林场四合永分场樟子松育苗与病虫害防治技术[J].南方农业,2024,18(8):230-232.
- [18] 李素亚,董雪霏,郑林洋,等.79份芥蓝材料种子萌发期耐盐碱筛选与评价[J/OL].植物遗传资源学报,1-15[2026-01-20].<https://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20250901001>.
- [19] 杨竹青,王磊,张雪,等.典型固沙植物种子萌发和幼苗生长对土壤水分的响应[J].干旱区研究,2024,41(5):830-842.
- [20] 陈佳瑞,王国梁,孟敏,等.干旱胁迫对3种灌木不同器官化学计量特征的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):73-81.
- [21] 董雪,海鹭,韩春霞,等.干旱区降雨梯度对沙冬青根-茎-叶生态化学计量特征的影响[J].林业科学研究,2023,36(5):60-71.
- [22] 岳华峰,邵文豪,井振华,等.苦楮种子形态性状的地理变异分析[J].林业科学研究,2010,23(3):453-456.
- [23] 李丽霞,逢玉娟,高燕,等.不同种源野生北沙参种子表型及萌发特性的研究[J].种子,2021,40(6):101-106.
- [24] 郝向春,周帅,韩丽君,等.不同种源辽东栎种子和幼树指标变异及相关分析[J].植物资源与环境学报,2021,30(4):1-11.
- [25] 许泽楠,邓伟,李娟娟,等.不同种源黄连木种子形态多样性及地理变异分析[J].林业与生态科学,2022,37(3):338-345.
- [26] 渠纪腾,闫毛毛,戴晓港,等.马尾松、黄山松及其杂种球果形态和种子性状变异[J].南京林业大学学报(自然科学版),2012,36(6):143-146.
- [27] 李娟霞,白小明,李萍,等.不同种源一年生早熟禾种子质量和幼苗生长特性与生态因子的相关性[J].草原与草坪,2024,44(3):62-70.
- [28] 宋丽华,李涛.宁夏地区几个臭椿种源种子的生物学特性研究[J].种子,2007(5):7-9.
- [29] 杨志玲,谭梓峰,王依清.不同种源木姜叶柯种子生物学性状变异及质量特征研究[J].广西植物,2021,4(12):2024-2032.
- [30] 苏石诚,韦小丽,杨彬,等.不同种源花榈木种子性状和苗期生长特性比较[J].种子,2021,40(3):9-14.
- [31] 董雪,辛智鸣,张冉浩,等.沙冬青种子形态和比叶面积沿降水梯度的变化特征[J].干旱区资源与环境,2019,33(12):172-178.
- [32] 汪洋,闫慧娟,张国君,等.油松不同种源种子萌发特性[J].西北林学院学报,2015,30(6):143-146.
- [33] 高成杰,缪迎春,李瑾,等.不同种源云南松种子发芽性状与幼苗早期生长[J].东北林业大学学报,2021,49(8):1-5.
- [34] 宿昊,申耀荣,蔡靖,等.不同种源红桦种子的萌发特性[J].西北林学院学报,2021,36(3):109-114.
- [35] 王晓伟,陈丽,邱爱军,等.盐、旱胁迫对霸王种子萌发的影响[J].中国野生植物资源,2021,40(10):39-44.
- [36] 田宏,刘洋,熊军波,等.不同种源截叶铁扫帚种子特性和萌发差异[J].种子,2020,39(4):105-109.
- [37] Coomes D A, Grubb P J. Colonization tolerance, competition and seed-size variation within functional groups [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2003, 18(6):283-291.
- [38] Leishman M R, Westoby M. Hypotheses on seed size: tests using the semiarid flora of western New South Wales, Australia [J]. The American Naturalist, 1994, 143:890-906.
- [39] 潘慧超,王俊锋,敖云娜,等.干旱胁迫下华北驼绒藜种子大小及苞片对萌发和幼苗生长的影响[J].应用生态学报,2021,32(2):399-405.
- [40] 缙倩倩,高敏,张宇,等.晋西北丘陵风沙区不同种植年限柠条的种子形态特征[J].应用生态学报,2022,33(11):2907-2914.

Correlation between environmental factors and seed traits of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

Chen Xiaona^{1,2}, Hao Yuguang¹, Zhao Yingming^{1,2}, Wang Jingsi³, Jia Haikuan⁴, Fan Haijiang⁵

(1. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China;

2. Dengkou Station of New Plant Variety Testing Center, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China; 3. Bairin Bridge Sand-

control Forest Centre in Bairin Right Banner, Bairin Right Banner 025150, Inner Mongolia, China; 4. Hulun Buir City

Honghua Erji Forestry Bureau National *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Seed Base, Honghua Erji 021112, Inner Mongo-

lia, China; 5. Hulun Buir City Honghua Erji Forestry Bureau, Honghua Erji 021112, Inner Mongolia, China)

Abstract: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* has become one of the main tree species for the establishment of artificial forests for sand prevention and control. The differentiation phenomenon of its seed traits in different geographical environments is becoming increasingly serious. In order to investigate the changes in seed phenotype and germination characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in different regions, the seeds of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* from 5 regions distributed along a natural precipitation gradient were used as test materials. The variation rules of seed size, germination, and seedling growth on precipitation were analyzed, in order to understand the growth adaptation strategies of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to environmental factors. The results showed that the seed length, seed width, seed thickness, thousand-grain weight, volume, germination rate, and root length of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* showed a decreasing trend with the increase in precipitation. The seed width, seed thickness, thousand-grain weight, volume, and germination rate had a significant linear relationship with precipitation ($P < 0.05$); the root length had a significant exponential function relationship with precipitation ($P < 0.05$). Seed length, seed width, seed thickness, thousand grain weight, volume, germination rate, and root length increased with the increase of sunshine hours. The ratio of seed length to width decreased with the increase of temperature, and there was a significant logarithmic function relationship between the two ($R^2 = 0.5669$, $P < 0.05$). The relationship between seed length, seed width, seed thickness, seed volume, germination rate, thousand grain weight, root length, and temperature was not significant ($P > 0.05$). The seed length, seed width, volume, and surface area of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seeds in different regions had significant differences ($P < 0.05$). The coefficient of variation of seed volume was the highest (17.96%). Except for the length-width ratio, other seed traits were negatively correlated with the average annual precipitation, were positively correlated with the average annual sunshine hours. In general, with the increase of sunshine hours and the decrease in precipitation, the seeds of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* became larger in five regions, the germination rate increased, and seedling growth improved. The mechanisms underlying the trade-offs between seed traits and precipitation/photoperiod relationships, as well as their effects on the reproduction and growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, warrant further investigation.

Key words: morphological characteristics; germination characteristic; environmental factor; seed; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*