

不同种源红桦种子的萌发特性

宿 昊<sup>1</sup>,申耀荣<sup>2</sup>,蔡 靖<sup>1,3</sup>,姜在民<sup>4\*</sup>,杨彩虹<sup>5</sup>,徐秀琴<sup>5</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;2. 甘肃省小陇山林业实验局洮坪林场,甘肃 陇南 742200;  
3. 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站,陕西 杨陵 712100;4. 西北农林科技大学 生命学院,陕西 杨陵 712100;  
5. 宁夏固原市六盘山林业局,宁夏 固原 756401)

**摘 要:**以陕西、宁夏、甘肃、青海 4 省 7 个种源地红桦种子为对象,测定各种源地红桦种子的千粒重、形态特征及在不同温度(30℃、25℃、20℃、15℃)和不同光照(无光照 0 h、半光照/半黑暗 12 h/12 h、全光照 24 h)条件下的萌发率与萌发特性,并与千粒重、环境因子进行相关性分析。结果表明,各种源千粒重大小为:凤县>泾源>宁陕>礼县>洛南>太白>湟中,洛南县、太白县和湟中县红桦种子的千粒重与其他种源存在显著差异;25℃为红桦种子最适萌发温度。在 15℃下,各种源红桦种子几乎不萌发。25℃下,各种源红桦种子萌发率显著高于其他温度;光照和光照时长都可以显著提高红桦种子的萌发率。全光照(24 h)下各种源红桦种子萌发率显著高于半光照/半黑暗(12 h/12 h)和全黑暗(0 h)条件;红桦种子萌发率与种子的千粒重呈显著正相关( $P=0.046<0.05$ ),与种源的海拔呈极其显著的负相关( $P=0.004<0.01$ );红桦种子萌发率与种源的年日照时长( $P=0.064>0.05$ )和年降雨量( $P=0.93>0.05$ )都没有相关性。

**关键词:**不同种源;红桦种子;萌发;温度;光照;相关性分析

**中图分类号:**S722.5      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2021)03-0109-06

Germination Characteristics of *Betula albo-sinensis* Seeds from Different Provenances

SU Hao<sup>1</sup>, SHEN Yao-rong<sup>2</sup>, CAI Jing<sup>1,3</sup>, JIANG Zai-min<sup>4\*</sup>, YANG Cai-hong<sup>5</sup>, XU Xiu-qin<sup>5</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Taoping Forest Farm, Xiaolongshan Forestry Experimental Bureau, Longnan 742200, Gansu, China; 3. Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling 712100, Shaanxi, China; 4. College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 5. Liupanshan Forestry Bureau, Guyuan 756401, Ningxia, China)

**Abstract:** *Betula albo-sinensis* seeds from seven provprovenances in Shaanxi, Ningxia, Gansu and Qinghai provinces were used as research objects to determine the thousand-grain weight (TGW), morphological characteristics, and germination characteristics under different temperatures (30, 25, 20, and 15℃) and different light conditions (no light 0 h, semi-light/semi-dark 12 h/12 h, full light 24 h). The correlation between germination rate, TGW and environmental factors were analyzed. The TGW of the seeds from different provenances was in the order of Fengxian>Jingyuan>Ningshan>Lixian>Luonan>Taibai>Huangzhong. The values of TGW of the seeds from Luonan, Taibai and Huangzhong were significant different with those from other provenances. At the temperature of 15℃, almost all the seeds did not germinate. At 25℃, the germination rate of seeds were significantly higher than other temperatures, indicating that the optimal temperature for the germination of *B. albo-sinensis* seeds was 25℃. Illumination and long time period illumination could significantly increase the seeds germination rate. Under the full light (24 h) condi-

收稿日期:2019-04-11 修回日期:2021-03-09  
基金项目:国家重点研发计划:红桦高效培育技术研究(2017YFD0600603-02)。  
作者简介:宿 昊。研究方向:森林植物。E-mail:suhao1992@126.com  
\* 通信作者:姜在民,教授,硕士生导师。研究方向:植物生物与生理学。E-mail:jiangzmz@163.com

tion,the germination rate was significantly higher than that of semi-light/semi-dark (12 h/12 h) and no light (0 h) conditions. The germination rate was significantly and positively correlated with the TGW ( $P=0.046<0.05$ ). The seed germination rate was significantly and negatively correlated with the elevation ( $P=0.004<0.01$ ). No correlation was found between the germination rate and the annual sunshine duration ( $P=0.064>0.05$ ) and annual rainfall ( $P=0.93>0.05$ ).

**Key words:** different provenance; *Betula albo-sinensis* seed; germination; temperature; light; correlation analysis

红桦 (*Betula albo-sinensis*) 属桦木科 (Betulaceae) 桦木属 (*Betula*), 主要分布于暖温带及北亚热带的高、中山地区, 遍布我国云南、四川、河北、陕西、甘肃、青海、宁夏、山西等省份, 是森林的主要建群树种和造林先锋树种之一<sup>[1-2]</sup>。红桦具有多种用途: 木材坚硬、耐韧, 常为家具等优良用材; 树汁可做保健饮品, 是世界上公认的营养丰富的生理活性水; 树皮具一定药用价值, 具有治疗风湿病、关节炎、脚气的作用; 树干殷红, 可用于园林观赏<sup>[3]</sup>。

吴彦等<sup>[4]</sup>研究温度和光照对西南米亚罗林区的红桦种子萌发的影响, 任坚毅等<sup>[2]</sup>对太白山红桦种子萌发特性进行过研究, 但上述试验所采用的红桦种子皆采于单一种源地, 而有研究表明, 不同种源地同一树种的种子在形态特征和萌发特性上存在不同程度的差异<sup>[5-7]</sup>。因此, 有必要对不同种源地的红桦种子进行相关比较研究。

本研究通过采集陕西、甘肃、宁夏和青海 4 省 7 个种源地红桦种子, 进行不同温度和光照条件下种子萌发特性的研究, 揭示红桦种子萌发所依赖的条件与生境之间的关系, 以便提高红桦的人工种苗繁育效率, 并为规范化种植提供理论依据与技术指导。同时也为红桦引种工作提供一定的数据指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 种子采集和种源地概况

红桦种子于 2017 年 10 月分别采自陕西省宁陕县、太白县、洛南县、凤县, 甘肃省礼县, 宁夏回族自治区泾源县, 青海省湟中县 7 个种源地。每个种源地随机选取 30 株红桦进行采种, 再将采集的种子充分混合均匀。7 个种源地的气候全部为温带大陆性气候。各种源地具体位置及气候条件见表 1。

表 1 各种源地位置及气候条件  
Table 1 Location and climatic conditions of various sources

地点	经纬度	海拔/m	夏季昼间 平均温度/℃	夏季夜间 平均温度/℃	年降水量 /mm	年日照时长 /h
泾源县	106°15'E, 35°23'N	2 351	23	10	641.5	1 968.1
礼县	104°49'E, 34°15'N	2 636	28	14	488.2	1 968.1
凤县	107°10'E, 34°11'N	2 252	29	16	613.2	1 840.3
宁陕县	108°36'E, 33°22'N	2 379	30	16	921.2	1 750.0
太白县	107°22'E, 33°49'N	2 250	29	15	1 000.0	921.2
洛南县	110°08'E, 34°05'N	2 032	30	17	830.1	2 055.8
湟中县	101°36'E, 36°25'N	2 950	23	9	509.8	2 453.0

### 1.2 试验方法

1.2.1 种子千粒重测量 随机选取 100 粒新鲜种子, 参照《林木种子检验规程》(GB 2772-1999) 相关规定, 采用百粒重法测定种子千粒重<sup>[8]</sup>, 计算公式为:

千粒重/g =  $10 \times (W_1 + W_2 + \dots + W_8) / 8$  (1)  
式中,  $W_1, W_2, \dots, W_8$  为随机选取的每 100 粒种子的重量。

1.2.2 种子外部形态特征测量 每个种源地各随机抽取 50 粒完整饱满种子, 分别进行显微照相, 在显微镜下剔除坏死粒, 并利用 Image-Pro Plus 6.0 软件测量种长、种宽。

1.2.3 种子活力的测定 将不同种源地红桦种子

分别放入垫有 2 层滤纸的培养皿中, 加足量蒸馏水浸泡, 2 d 后待种子泡胀时吸去多余水分, 保持培养皿湿润, 每个种源重复 3 次, 每个重复 50 粒种子, 在 25℃ 条件下进行发芽试验, 隔日起开始记录发芽数。当连续 7 d 发芽种子数的平均值不足供测种子总数的 1% 时, 结束发芽试验, 分别计算发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数等活力指标。

1.2.4 温度和光照对不同种源地红桦种子萌发影响 温度控制: 设置 4 个恒温水平 (30℃、25℃、20℃、15℃), 设置连续光照, 光照有效辐射为  $220 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 湿度为 80%。

光照控制: 3 个光照水平 (无光照 (0 h)、半光照/半黑暗 (12 h/12 h)、全光照 (24 h)), 温度设置为

上述试验中得出的最适温度,光照有效辐射为 220  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,湿度为 80%。

从 7 个种源地里分别选择籽粒饱满的种子 50 粒,均匀放置在垫有 2 层纸的培养皿中,培养皿置于植物生长室(加拿大 Conviron,型号 CMP6050)中进行种子萌发试验。每种处理 3 个重复。每日观察种子萌发情况,挑出萌发粒,计数,并补充培养皿失水。当胚根突破果皮时,即认为种子萌发<sup>[2-7]</sup>。

1.2.5 测定指标和数据分析

发芽率 =  $n/N \times 100\%$  (2)

发芽势 =  $(n_t/N) \times 100\%$  (3)

发芽指数 =  $\sum(G_t/D_t)$  (4)

活力指数 =  $S_x$  发芽指数 (5)

式中, $n$  表示发芽种子数, $n_t$  表示第  $t$  天发芽的种子数, $N$  表示供试种子总数。 $D_t$  表示发芽日数, $G_t$  为与  $D_t$  对应的每日发芽种子数。 $S$  为一定时期内正常幼苗平均长度。试验所得数据用 Excel 2013 和 Sigma Plot 12.5 进行整理和做图,用 SPSS 19.0 对相关数据进行方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同种源红桦种子的千粒重和形态特征

测定结果表明,洛南、太白和湟中红桦种子的千粒重显著小于其他种源( $P<0.05$ ),其中凤县>泾源>宁陕>礼县>洛南>太白>湟中,各种源千粒重为 0.287 8~0.523 9 g,最大值与最小值相差 53.8%。不同种源地红桦种子种长的差异性与千粒重相同,而种宽只有泾源与凤县、洛南和太白存在显著差异( $P<0.05$ )(表 2)。

表 2 不同种源红桦种子的千粒重和形态特征

Table 2 Thousand-grain weight and characteristics of seeds from different provenances

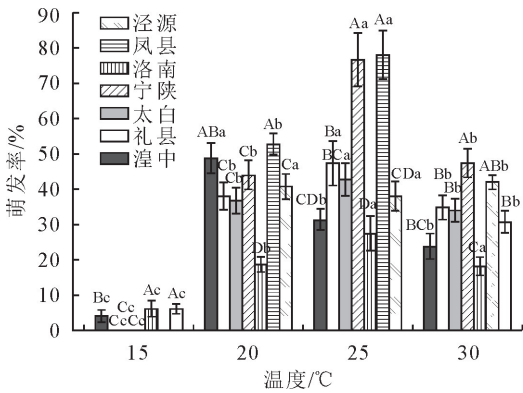
地区	千粒重/g	种长/mm	种宽/mm
泾源	0.606 4±0.019 6A	2.658±0.144A	1.720±0.156A
凤县	0.623 9±0.028 3A	2.648±0.166A	1.353±0.135B
洛南	0.366 1±0.030 4B	2.088±0.236B	1.234±0.138B
宁陕	0.572 1±0.021 4A	2.746±0.245A	1.582±0.148AB
太白	0.345 3±0.017 4B	2.269±0.159B	1.235±0.105B
礼县	0.506 4±0.029 4A	2.405±0.207A	1.654±0.105AB
湟中	0.287 8±0.016 5B	2.240±0.214B	1.560±0.124AB

注:同一列中不同大写字母表示同一形态特征下不同种源的差异显著( $P<0.05$ )。下同。

2.2 不同温度处理对不同种源红桦种子发芽率的影响

在 15℃下,除泾源、洛南和湟中有少量种子萌发以外,其余种源地没有种子萌发,萌发率最高的为泾源和洛南种源,仅为 6.00%,表明此温度条件不

适宜种子萌发。在 20℃下,泾源、湟中县种子萌发率达到最大值(40.67%、48.67%),显著高于 15℃和 30℃处理( $P<0.05$ ),而略高于 25℃(38.00%、31.33%);在 25℃下,凤县、宁陕、礼县、太白种子萌发率显著高于其他温度处理( $P<0.05$ )。而洛南种子萌发率虽在 25℃时最大,但其萌发率随着温度的变化差异不显著( $P>0.05$ )(表 3)。这可能是因为洛南种源种子坏死率高、种子活力较低,影响了该种源的萌发率。总的来看,随着温度的升高,红桦种子萌发率先升高后降低,大部分种源在 25℃下萌发率达到最大值。表明 25℃为红桦种子最适萌发温度(图 1)。



注:不同大写字母表示不同种源在同一温度下差异显著( $P<0.05$ );不同的小写字母表示同一种源在不同温度处理间差异显著( $P<0.05$ )。

图 1 不同温度条件下不同种源红桦种子的发芽率

Fig. 1 Germination rate of the seeds from different provenances under different temperatures

2.3 不同光照处理对不同种源红桦种子发芽率的影响

在全黑暗(0 h)条件下,洛南种源萌发率最高(15.33%),太白种源萌发率最低(4.00%)。各种源种子虽都能萌发,但相较其他光照条件种子萌发率都为最小值。红桦种子虽然能在黑暗条件下萌发,但黑暗条件会抑制种子的萌发,表明光照条件不是影响红桦种子萌发的主导因素;在半光照/半黑暗(12 h/12 h)条件下,7 个种源种子萌发率差异不显著,萌发率在 15.33%~33.33%;在全光照(24 h)条件下,凤县(78.00%)和宁陕(76.67%)显著高于其他 5 个种源的萌发率。7 个种源种子萌发率都高于半光照/半黑暗(12 h/12 h)和全黑暗(0 h)条件下的种子萌发率,各种源种子萌发率均达到最大值。除洛南县以外,其余种源在光照条件下种子萌发率都有显著的提高(图 2),表明光照和光照的时间都可以显著的提高红桦种子的萌发率。

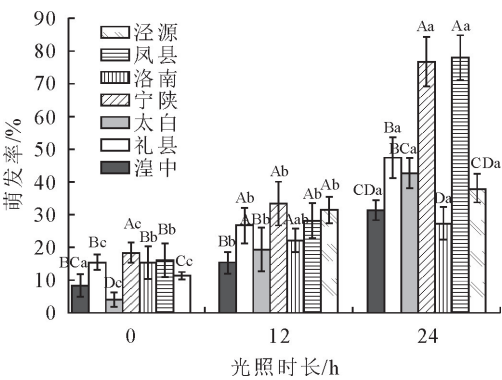
2.4 种子千粒重和环境因子对不同种源红桦种子发芽率的影响

通过对种子千粒重和环境因子与不同种源红桦种子萌发率(最适条件:25℃、全光照 24 h)进行相关性分析;红桦种子萌发率与千粒重呈显著正相关( $P=0.046<0.05$ ),各种源萌发率随着千粒重的增大而增大(图 3a);萌发率与种源的海拔呈极其显著的负相关( $P=0.004<0.01$ ),各种源萌发率随着种源海拔的升高而减小(图 3b);萌发率与各种源的年日照时长( $P=0.064>0.05$ )和年降雨量( $P=0.93>0.05$ )都没有相关性(图 3c、d)。

3 结论与讨论

种子发芽率是衡量种子质量的重要指标<sup>[8]</sup>,物种间种子大小与其萌发有着紧密的关系<sup>[9-12]</sup>。野外红桦林的种子产量巨大,饱满种子的比例 $>50\%$ ,从而使红桦林拥有了一个潜力巨大的种子库,这对于

红桦林的自然更新有很大的意义<sup>[2]</sup>。但不同种源地由于生境不同,经过长期的自然选择,种子形态和千



注:不同大写字母表示同一光照处理下不同种源的差异显著( $P<0.05$ );不同的小写字母表示同一种源下不同光照处理间差异显著( $P<0.05$ )。

图 2 不同光照时长下不同种源红桦种子的萌发率

Fig. 2 Germination rate of the seeds from different provenances under different light durations

表 3 不同种源红桦种子活力指标的测定

Table 3 Vigor index of the seeds from different provenances

地区	发芽率/%	发芽势	发芽指数	活力指数
泾源	50.67±2.08A	43.33±3.56A	3.35±0.16A	8.38±0.51A
凤县	52.62±5.61A	37.33±1.784A	3.39±0.24A	10.51±0.24A
洛南	28.65±4.85B	12.67±2.34B	1.16±0.15B	3.43±0.52B
宁陕	44.00±1.32AB	34.60±3.54AB	2.85±0.12A	6.55±0.36AB
太白	38.00±3.29B	18.00±2.14B	1.72±0.22B	3.57±0.75B
礼县	36.24±3.56B	18.00±1.04B	1.72±0.10B	3.23±0.39B
湟中	32.67±8.20B	14.67±3.24B	1.59±0.13B	3.30±0.66B

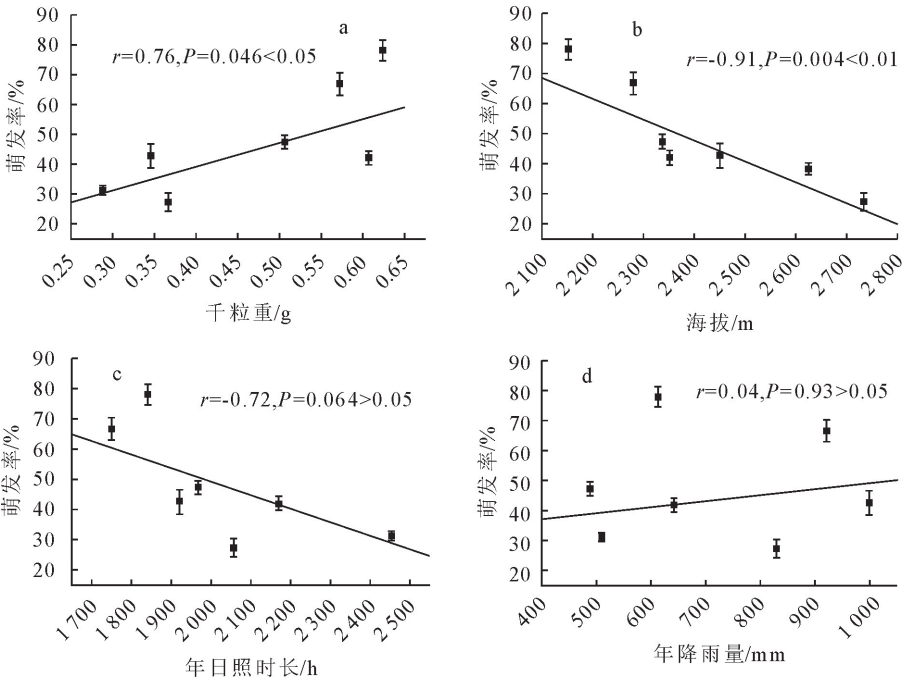


图 3 红桦种子大小和环境因子对不同种源红桦种子发芽率的影响

Fig. 3 Effect of seed size and environmental factors on germination rate from different provenances



粒重存在较大差异。而种子大小的地理变异趋势从东往西逐渐由大变小,受经度影响较大;种子千粒重的变异趋势是由东北向西南逐渐由大变小,变异较缓慢,受纬度影响较大<sup>[9]</sup>。很多研究也都表明生活在干燥或者郁闭度高、稳定的生境中的植株通常有较大的种子,而在空旷、潮湿、易受干扰的生境中的物种通常生产较小的种子<sup>[13-14]</sup>。在本研究中,洛南县、太白县和湟中县红桦种子的千粒重与其他种源存在显著差异,其中陕西凤县和宁夏泾源种源的种长、种宽和千粒重均较大;陕西北部和甘肃礼县种源的种长、种宽和千粒重均相对较小;陕西的洛南、太白和青海湟中种源的种长、种宽和千粒重均最小。这基本符合植物种子的地理变异规律。种子活力的高低常与由品种遗传特性所制约的种子形态特征,如种子大小、色泽,种皮的结构、厚薄及种子的化学组成等,以及种子在形成、发育、收获、贮藏、处理、加工过程中的环境条件等有密切关系<sup>[11]</sup>。在本研究中,泾源、凤县两地种子形态特征指标显著高于其他种源地,种子活力指标也显著高于其他种源地,种子活力最强。

温度是种子萌发所需生态条件中极为重要的一个因素,在种子萌发的整个过程中起着非常重要的作用<sup>[15]</sup>。本研究结果表明,温度是影响红桦种子萌发的关键因素,对种子萌发有极显著影响。红桦种子的最适萌发温度为 25℃,这与 A. Perala *et al*<sup>[16]</sup>的结果相一致。但泾源、湟中 2 个种源红桦种子在 20℃下萌发率最高,这与泾源和湟中自然气候条件有关,红桦长期生长在此地区,对温度产生了不同的适应性。红桦种子每年 9 月成熟并很快散落,之后将面临寒冬,因此很难在当年萌发。当其越过寒冷的冬季后,温度上升至满足其萌发时,种子开始萌发。在泾源和湟中红桦林分布区,夏季昼间最高气温不超过 23℃,夜间不超过 10℃,都低于其他种源地的平均气温,因此可以认为 2 个种源红桦种子对低温的适应实际上是长期自然选择的结果。

光也是影响种子萌发的重要生态因子之一<sup>[17]</sup>。依据种子萌发过程对光的响应特点,植物的种子分为忌光性、需光性和光中性 3 种类型<sup>[18]</sup>。本研究结果表明,在适宜的温度和水分条件下,光成为促进红桦种子萌发的重要因子,随光照时间的增加,种子萌发率有显著的提高。在全光照及半光照/半黑暗条件下的萌发率显著高于黑暗条件下,这说明红桦种子是一种需光型的种子;在全暗条件下,7 个种源红桦虽都能在无光条件下萌发,但发芽率显著低于有光条件下,这与任坚毅等<sup>[2]</sup>、吴彦等<sup>[4]</sup>的研究结果一致。这也表明光是红桦种子萌发的重要因素。徐燕

等<sup>[19]</sup>的研究也表明光照对林下的红桦种子生长是有利的。在温度和水分达到萌发条件后,郁闭度较高的林下红桦种子难以大量萌发。这也从种子萌发的角度解释了秦岭、太白山等地红桦种群缺少幼龄个体,自然更新困难<sup>[2,20-21]</sup>的原因。

种子萌发需要适宜的温度、充足的水分、适当的光照等环境因子,不同植物种子萌发所需条件不同。不同的环境因子的作用各不相同,但又彼此联系,综合影响着种子的生命活动<sup>[22-25]</sup>。同类种子由于生境的不同,导致种子萌发率也不相同。植物种子在长期的进化过程中形成了一系列的适应生存环境的对策,而影响种子萌发的因素一般可分为 2 类:其中种子的大小是萌发的内因。本研究得出,红桦种子的发芽率与种子千粒重呈显著正相关。这是由于较大的种子内含有更多的营养物质,而种子在最初萌发过程中所需的营养物质主要来源于种子提前所储备的营养物质<sup>[26]</sup>。此外,种子的生境条件是萌发的外因。本研究表明,红桦种子萌发率与种源的海拔呈极其显著的负相关,萌发率随着种源海拔的升高而减小。这可能一方面是由于随着海拔的升高,导致环境的温度也降低。而温度条件又显著影响着红桦种子的萌发。另一方面,随着海拔的升高,环境因子也愈发恶劣,种子重量减少<sup>[27]</sup>。而种子质量的减少也造成了萌发率的降低。除上述结论以外,本研究还得出,红桦种子萌发率与种源的年日照时长和年降水量都没有相关性的结论。这可能是由于光照和水分不是红桦种子萌发的主导因素,在本研究中各种源地红桦种子即使在无光照的条件下也能萌发。

综合比较得出,不同种源的红桦种子在 25℃、光照 24 h 下萌发率最高,质量越大的种子萌发率也越高。其中泾源、凤县两地种子活性最强。研究结果也进一步解释了为何野外红桦成年植株每年产生几十万乃至几百万成熟种子,而植株周围实生幼苗较少的原因。这可以初步为红桦幼苗的培育工作提供一定的参考数据。下一步可继续进行不同种源地红桦种子在近自然条件下(如变温、湿度、萌发基质等)萌发特性的研究,为红桦引种工作制定一个更加广泛的标准。

参考文献:

[1] 杨士同. 秦岭南坡红桦林木本植物天然更新影响因子分析[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学,2015.

[2] 任坚毅,林玥,岳明. 太白山红桦种子的萌发特性[J]. 植物生态学报,2008,32(4):883-890.

[3] 巩小强. 红桦树在林业生产中的开发与应用[J]. 中国林副特产,2011(3):99-100.

[4] 吴彦,刘庆,何海,等. 光照与温度对云杉和红桦种子萌发的影

响[J]. 应用生态学报, 2014, 15(12): 2229-2232.

WU Y, LIU Q, HE H, *et al.* Effects of light and temperature on seed germination of *Picea asperata* and *Betula albo-sinensis*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 15(12): 2229-2232. (in Chinese)

[5] 宋丽华, 王娅丽. 几个臭椿种源种子的生物学特性变异研究[J]. 农业科学研究, 2005, 26(1): 18-22.

[6] 谢英赞, 王朝英, 马立辉, 等. 不同种源区桉楠种子形态、发芽特征及幼苗生长情况研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 92-99.

XIE Y Z, WANG C Y, MA L H, *et al.* Seed trait and seedling growth of *Phoebe zhennan* from different provenances[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 92-99. (in Chinese)

[7] 潘燕, 王帅, 王崇云, 等. 云南松与云南油杉种子风力传播特征比较[J]. 植物分类与资源学报, 2014, 36(3): 403-410.

PAN Y, WANG S, WANG C Y, *et al.* Comparison of seed weed-dispersed characteristics between *Pinus yunnanensis* and *Keteleeria evelyniana*[J]. Plant Diversity, 2014, 36(3): 403-410. (in Chinese)

[8] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志第 52 卷第 2 分册[M]. 北京: 科学出版社, 1983.

[9] 李世杰, 赵鸿宾. 油松全分布区地理种源各形态性状特征地理变异和生长规律[J]. 辽宁林业科技, 1992(2): 5-13.

[10] 潘苗, 左菲菲, 盛继露, 等. 南方红豆杉不同种源种子千粒重、生活力、营养化学成分含量的比较及其与生态因子的关系[J]. 植物研究, 2016, 36(3): 360-367.

PAN M, ZUO F F, CHENG J L, *et al.* Comparison of 1000-seed weight, viability and chemical content in the seed of *Taxus chinensis* var. *mairei* from different areas and its relationship with ecological factors[J]. Bulletin of Botanical Research, 2016, 36(3): 360-367. (in Chinese)

[11] 唐效蓉, 李宇珂, 曾令文. 马尾松种子千粒重配合力及杂种优势分析[J]. 湖南林业科技, 2016, 43(5): 34-39.

[12] 陈登科. 甜菜种子的剖仁率、生芽变色、千粒重与发芽率的关系[J]. 甜菜糖业, 1980(3): 65-67.

[13] 孙妹亭, 陈美渝, 李苹. 北京市居民小区景观林内景观质量评价研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 297-305.

SUN M T, CHEN M Y, LI P. Assessment on in-forest quality of landscape forest in residential area in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(5): 297-305. (in Chinese)

[14] 张文杰, 屈培源, 张文博. 城市公园的“近自然”模式改造以新乡市人民公园为例[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 181-184.

ZHANG W J, QU P Y, ZHANG W B. The reformation of “close to nature” mode of urban parks: a case study of Xinxian people's park[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1): 181-184. (in Chinese)

[15] 王宝增, 王韦娜, 刘颖, 等. 光照、温度和土壤水分对非洲凤仙种子萌发的影响[J]. 种子, 2016, 35(6): 78-81.

WANG B Z, WANG W N, LIU Y, *et al.* Effect of light, temperature and soil moisture on seed germination of *Impatiens walleriana* Hook. F. [J]. Seed, 2016, 35(6): 78-81. (in Chinese)

[16] PERALA A, ALM A A. Reproductive ecology of birch: a review[J]. Forest Ecology and Management, 1990, 15: 1-17.

[17] FINCH-SAVAGE W E, LEUBNER-METZGER G. Seed dormancy and the control of germination[J]. New Phytologist, 2006, 171: 501-523.

[18] 张敏, 朱教君, 闫巧玲. 光对种子萌发的影响机理研究进展[J]. 植物生态学报, 2012, 36(8): 899-908.

ZHANG M, ZHU J J, YAN Q L. Review on influence mechanisms of light in seed germination[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(8): 899-908. (in Chinese)

[19] 徐燕, 张远彬, 乔匀周, 等. 光照强度对川西亚高山红桦幼苗光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2007, 22(4): 1-4.

XU Y, ZHANG Y B, QIAO Y Z. Effects of light intensity on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of red birch seedlings in subalpine area, western China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(4): 1-4. (in Chinese)

[20] 傅志军, 郭俊理. 太白山红桦林的初步研究[J]. 植物生态学报, 1994, 18(3): 261-270.

[21] 李家俊. 太白山自然保护区综合考察论文集 [M]. 西安: 陕西师范大学出版社, 1989: 141-158.

[22] 高妍夏, 康冰, 迪玮寺, 等. 秦岭中段红桦次生林更新特征研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(1): 163-169.

GAO Y X, KANG B, DI W S, *et al.* Regeneration characteristics of betula albo-sinensis secondary forests in the middle range of Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2013, 41(1): 163-169. (in Chinese)

[23] ERIKSSON O. Seed size variation and its effect on germination and seedling performance in the clonal herb *Convallaria majalis* [J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(9): 1343-1353.

[24] 张蕾, 张春辉, 吕俊, 等. 青藏高原东缘 31 种常见杂草种子萌发特性极其与种子大小的关系[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2115-2121.

ZHANG L, ZHANG C H, LÜ J, *et al.* Seed germination characteristics and their correlations with seed sizes of 31 common weeds in eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(10): 2115-2121. (in Chinese)

[25] SHEN S, SHARMA A, KOMATSU S. Characterization of proteins responsive to gibberellin in the leaf-sheath of rice (*Oryza sativa* L.) seedling using proteome analysis[J]. Biol Pharm Bull, 2003(26): 129-136.

[26] 王玲玲, 刘亚萍, 张光飞. 温度和光照对侧柏种子萌发的影响[J]. 种子, 2015, 34(3): 1-5.

[27] BAKER H G. Seed weight in relation to environmental conditions in California[J]. Ecology, 1972, 53(6): 997-1010.