植物生态学报 2024, **48** (2): 201-214 DOI: 10.17521/cjpe.2022.0210
Chinese Journal of Plant Ecology http://www.plant-ecology.com

低温胁迫对不同母树年龄柠条锦鸡儿种子萌发幼苗生理和生长的影响

高 敏[1] 缑倩倩[1,2*] 王国华[1,2,3] 郭文婷[1] 张 宇[1] 张 妍[1]

[1]山西师范大学地理科学学院, 太原 030031; [2]中国科学院西北生态环境资源研究院临泽内陆河流域研究站, 兰州 730010; [3]中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730010

摘 要 为探讨母树年龄、低温胁迫及其交互作用对柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)幼苗叶片生理和生长的影响, 该研究选取晋西北丘陵风沙区5种母树年龄(7、13、19、41和51 a)人工林柠条锦鸡儿的种子进行萌发, 取2个月左右幼苗为实验材料, 设置低温((–8 ± 1) ℃)胁迫, 进行不同时长低温处理: W1 (6 h)、W2 (12 h)、W3 (24 h)、W4 (48 h)和W5 (72 h), 并以常规温度(25 ℃)培养为对照, 测定幼苗与抗冻性相关的生理和生长指标, 并采用隶属函数法进行综合评价。研究结果表明: (1)低温胁迫对不同母树年龄柠条锦鸡儿种子源萌发幼苗光合作用色素和渗透调节物质的影响存在显著差异, 其中母树年龄和低温胁迫对幼苗叶片叶绿素(Chl) a含量有显著影响, 母树年龄、低温胁迫及其交互作用对柠条锦鸡儿幼苗的Chl b、Chl (a+b)、类胡萝卜素含量和Chl a/b均有显著影响; 低温胁迫和母树年龄与低温胁迫的交互作用对可溶性糖含量有显著影响, 母树年龄、低温及其交互作用对游离脯氨酸含量有显著影响。随着低温胁迫时间的增长, 柠条锦鸡儿幼苗叶片内Chl a、Chl b和Chl (a+b)含量整体呈先降后升的趋势, 而Chl a/b和类胡萝卜素含量呈先升后降的趋势; 游离脯氨酸含量则呈上升趋势。(2)低温胁迫对不同母树年龄柠条锦鸡儿种子源幼苗生长的影响差异显著, 一方面, 不同母树年龄种子萌发幼苗的株高、叶片数、干质量、主根长和根冠比均存在显著差异, 随母树年龄的增加呈先升后降的趋势; 另一方面, 低温胁迫对幼苗株高有显著抑制作用, 而母树年龄和低温胁迫的交互作用则对幼苗的上述生长参数没有显著影响。(3)通过聚类分析低温胁迫下柠条锦鸡儿幼苗的抗冻性生理指标综合评价值, 将5种幼苗的耐低温性划分为两大类: 第一类包括7、13 a母树种源幼苗, 耐低温性强; 第二类包括19、41、51 a母树种源幼苗, 耐低温性弱, 这表明低龄(7、13 a)母树柠条锦鸡儿种子萌发幼苗比高龄(19、41、51 a)母树的具有更强的抗冻性。综上, 生理指标Chl b含量、Chl (a+b)含量、类胡萝卜素含量、Chl a/b和生长指标株高、叶片数、干质量、主根长和根冠比可作为柠条锦鸡儿幼苗的抗冻性鉴定指标, 同时, 在人工促进柠条林天然更新时, 可以选用青壮年柠条锦鸡儿的种子进行幼苗培育, 进而提高人工林更新的成功率。

关键词 晋西北丘陵风沙区; 柠条锦鸡儿; 幼苗; 低温胁迫; 渗透调节; 光合色素; 根冠比

高敏, 缑倩倩, 王国华, 郭文婷, 张宇, 张妍 (2024). 低温胁迫对不同母树年龄柠条锦鸡儿种子萌发幼苗生理和生长的影响. 植物生态学报, 48, 201-214. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0210

Effects of low temperature stress on the physiology and growth of *Caragana korshinskii* seedlings from different mother tree ages

GAO Min[1], GOU Qian-Qian[1,2*], WANG Guo-Hua[1,2,3], GUO Wen-Ting[1], ZHANG Yu[1], and ZHANG Yan[1]

[1]College of Geographical Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China; [2]Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730010, China; and [3]Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730010, China

Abstract

Aims This study investigated the effects of mother tree age, low temperature stress, and their interaction on the growth and leaf physiological characteristics of *Caragana korshinskii* seedlings.

Methods In this study, seeds of *C. korshinskii* were selected from an artificial forest in the hilly and sandy area of northwest Shanxi Province, representing five mother tree ages (7, 13, 19, 41 and 51 a). These seeds were germinated, and the resulting seedlings (about 2 months) were used as test material. The low temperature stress was applied at (–8 ± 1) °C with varying stress levels: W1 (6 h), W2 (12 h), W3 (24 h), W4 (48 h) and W5 (72 h). A control group (CK) was maintained at 25 °C (normal temperature). Different growth and physiological

收稿日期Received: 2022-05-20 接受日期Accepted: 2023-05-16
基金项目: 国家自然科学基金(41807518和42171033)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41807518 and 42171033).
* 通信作者Corresponding author (gqqqianqian@163.com)

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

indicators related to frost resistance were determined, and a comprehensive evaluation was conducted using the membership function method.

Important findings The results showed that: (1) There were significant differences in the impact of low temperature stress on photosynthetic pigments and osmotic adjustment substances in *C. korshinskii* seedlings from different mother tree ages. Notably, mother tree age and low temperature stress had significant effects on chlorophyll (Chl) a content, while the contents of Chl b, Chl (a+b), carotenoid and Chl a/b in *C. korshinskii* seedlings were influenced by mother tree age, low temperature stress and their interaction. Low temperature stress as well as the interaction between low temperature stress and mother tree ages, had a significant effect on soluble sugar content, while mother tree ages, low temperature stress and their interaction significantly influenced free proline content. With the increasing low temperature stress duration, the contents of Chl a, Chl b, and Chl (a+b) in the leaves of *C. korshinskii* seedlings initially decreased and later increased, while the Chl a/b and carotenoid content exhibited an initial increase followed by a decreased, and the content of free proline increased. (2) Low temperature stress had variable effects on the growth of *C. korshinskii* seedlings from different mother tree ages. Plant height, leaf number, dry mass, main root length and root shoot ratio of seedlings germinated from seeds from different age plants displayed significant differences, with values initially increasing and then decreasing with the increase in mother tree age. However, low temperature stress significantly inhibited the plant height of the seedlings, with no significant interaction observed between mother tree age and low temperature stress on the aforementioned growth parameters. (3) Seedlings germinated from the seeds of young mothers (7, 13 a) showed stronger frost resistance than those from older mothers (19, 41, 51 a). In summary, physiological parameters including Chl b content, Chl (a+b) content, Chl a/b, carotenoid content and growth parameters such as plant height, leaf number, dry mass, main root length and root shoot ratio can serve as indicators for assessing frost resistance in *C. korshinskii* seedlings. Besides that, when promoting the natural regeneration of *C. korshinskii* forest through artificial means, selecting seeds from young and middle-aged *C. korshinskii* plants can enhance the success of regeneration.

Key words windy and sandy hilly area in northwest Shanxi; *Caragana korshinskii*; seedling; low temperature stress; osmoregulation; photosynthetic pigment; root shoot ratio

Gao M, Gou QQ, Wang GH, Guo WT, Zhang Y, Zhang Y (2024). Effects of low temperature stress on the physiology and growth of *Caragana korshinskii* seedlings from different mother tree ages. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 48, 201-214. DOI: 10.17521/cjpe.2022.0210

中国是世界上沙漠化土地最多的国家之一。为了有效遏制风沙危害, 中国在西北和华北干旱半干旱地区启动了一系列以人工植被建设作为主要生态修复措施的重大生态建设工程, 如“三北”防护林建设、退耕还林和“京津风沙源治理”等(李新荣等, 2013)。50余年来, 中国人工林面积迅速增长, 为防风固沙、保持水土、改善生态环境和满足社会发展需要提供了有力保障(赵文智, 2002; 常学礼等, 2009; 刘继亮等, 2018)。天然更新, 作为人工林可持续经营的关键, 一直是国内外人工林建设研究的重点(连相汝等, 2013)。然而, 目前大量研究发现, 自然条件下多数人工林无法实现有效天然更新, 这直接影响了风沙区人工林生态系统的质量和稳定及其防风固沙功能(王思琪等, 2018; 赵冲等, 2019; 王杰等, 2021)。

针对干旱半干旱风沙区人工种植的固沙植被衰退严重, 生产力下降, 天然更新稀少等问题, 国内外学者开展了大量研究(赵文智, 2002; 刘帅等, 2016)。非生物因素胁迫对固沙植被天然更新影响的研究主要集中在降水、土壤水分、土壤盐分、温度、光照和沙埋等对种子萌发、幼苗生长和定居的影响(Huang et al., 2004; 李荣平等, 2004; 李秋艳和赵文智, 2006; 刘国军等, 2010; Liu et al., 2012); 生物因素方面主要关注植物土壤种子库, 种子传播, 种子大小、质量、形状、附属物、表面结构等特征对天然更新过程的影响(张景光等, 2005; 于顺利等, 2007; 唐毅和刘志民, 2012)。尽管有大量研究对固沙植被天然更新进行了报道, 然而, 大多数实验都是针对单一环境因素对天然更新的影响, 研究结果与实际自然生境存在一定的差异, 对于多环境因素与人工固沙植物天然更新之间关系的研究还相对较少。

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)作为豆科锦鸡儿属植物, 根系发达, 具有耐旱、抗风蚀、耐沙埋

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

的特征, 是中国干旱半干旱地区固沙造林的重要先锋物种。但近年来很多人工柠条锦鸡儿林出现土壤水分失衡, 土壤干燥化严重, 更新幼苗生长缓慢甚至停滞的现象(成向荣等, 2009), 种群补员严重不足直接影响了沙区的生态恢复和防风固沙效益的可持续性。有研究发现人工柠条锦鸡儿林土壤种子库种子数量大, 但实现更新的幼苗数量稀少, 幼苗存活率低, 这是人工林难以实现天然更新的主要原因(闫兴富等, 2015; 孙毅和闫兴富, 2016)。例如, 聂春雷和郑元润(2005)的研究表明, 塔落岩黄耆(*Hedysarum fruticosum* var. *laeve*)、柠条锦鸡儿、圆头蒿(*Artemisia sphaerocephala*)与黑沙蒿(*A. ordosica*)等4种植物种子萌发与出苗最适宜的供水量都接近于当地种子萌发时期的平均降水量, 最适宜的沙埋深度为0.5–1.0 cm, 过多的水分和过深的沙埋会降低种子萌发率与出苗率; 闫兴富等(2016)的研究发现, 温度和干旱胁迫及二者的交互作用对柠条锦鸡儿种子的萌发率、萌发速率系数、萌发值、萌发指数和活力指数均具有极显著影响; 孙毅和闫兴富(2016)研究表明, 不同生境(柠条锦鸡儿灌丛、沙蒿灌丛和裸露沙地)和沙埋处理都对柠条锦鸡儿种子出苗率和留存率有显著影响。然而, 目前探讨生物和非生物等多种因素交互作用对幼苗存活影响的研究还相对有限(杨慧玲等, 2012)。

晋西北丘陵风沙区, 地处中国华北典型的农牧交错区, 不仅是我国沙漠化扩展最严重的地区之一, 也是京津风沙源治理工程的重点区域(刘爽等, 2019)。自20世纪70年代以来, 柠条锦鸡儿作为晋西北丘陵风沙区重要的防风固沙树种被大面积种植, 对维护该地区生态安全和稳定发展发挥着不可替代的作用(樊如月等, 2019)。但在柠条锦鸡儿种植后期, 人工固沙林出现大面积衰退和无法天然更新等现象, 种群补员严重不足, 直接影响了风沙区的生态恢复和防风固沙效益的可持续性(成向荣等, 2009)。对于干旱半干旱风沙区人工林的研究, 目前主要集中在降水、土壤水分、土壤盐分、光照和沙埋等对于植物生长和定居的影响上(Huang et al., 2004; Liu et al., 2012; 刘婧等, 2022), 而往往忽视植物生活史过程中的一些其他关键阶段, 如幼苗定植阶段; 尤其是低温对人工固沙植被种子萌发之后幼苗期的影响和调控机制的研究目前还相对较少。

植物幼苗期是其生活史中最为脆弱的时期, 幼苗对环境胁迫的抵御能力极低, 是植物天然更新的死亡高峰期(李芳兰等, 2009; 王国华和赵文智, 2016)。在晋西北丘陵风沙区, 柠条锦鸡儿种子一般7月下旬成熟, 7–9月大量萌发, 而10–12月随着秋冬季气温的降低, 幼苗极易受到冻害, 从而影响幼苗生长质量, 干旱低温往往导致萌发幼苗出现“闪苗”现象。然而, 针对柠条锦鸡儿天然更新过程(幼苗期)与低温冻害之间关系的系统研究目前还相对较少(缑倩倩, 2022), 尤其是在长时间尺度(种植50年以上), 不同母树年龄柠条锦鸡儿种子萌发的幼苗的生长生理特性是否存在差异, 不同种子源柠条锦鸡儿种子萌发的幼苗对低温胁迫的耐受性是否一致, 还需要进一步研究。因此, 本研究以不同母树年龄(7、13、19、41和51 a)柠条锦鸡儿种子萌发幼苗为研究对象, 通过实验室模拟低温, 拟探究低温胁迫对柠条锦鸡儿种子萌发幼苗生长和生理特性的影响; 明确不同母树年龄柠条锦鸡儿种子萌发的幼苗生长和生理特性对低温胁迫的适应性差异, 并进行抗冻性综合评价, 以期为人工固沙植被的可持续性建设提供科学指导和技术支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于晋西北丘陵风沙区典型区域忻州市五寨县石咀头村, 地理坐标为38.96°–38.98° N, 111.77°–111.79° E, 海拔1 370–1 533 m。本区气候属温带大陆性气候, 年平均气温4.9 ℃左右, 年降水量478.5 mm, 且降水主要集中于7、8月份, 约占年降水量的44%, 最冷月(1月)平均气温为–13.2 ℃, 最热月(7月)平均气温为20.0 ℃, 无霜期较短, 仅有110–130天, 初霜冻平均出现在9月18日, 风沙和冻害较为严重, 冬季长而寒冷。该区土壤类型主要以黄绵土、淡栗褐土为主, 土壤质地疏松, 孔隙度高, 透气性强。研究区内主要为人工植被覆盖, 乔木植物主要有小叶杨(*Populus simonii*)、旱柳(*Salix matsudana*)和油松(*Pinus tabuliformis*), 灌木植物主要有柠条锦鸡儿, 林下草本植物主要有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、蒿类(*Artemisia* spp.)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)等。

1.2 实验材料

于2020年7和8月在忻州市五寨县石咀头村选取

DOI: 10.17521/cjpe.2022.0210

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

坡度、坡位、坡向等立地条件相似, 群落发育较为完整且未平茬的5处不同林龄(7、13、19、41和51 a)典型柠条锦鸡儿林为调查样点。不同林龄柠条锦鸡儿林各选取3个样点, 每个样点均采用巢式取样法分别设置3个20 m × 20 m样方, 样点间距大于200 m, 样方间距25 m, 选取5株长势中等且发育良好的柠条锦鸡儿。在植株上收集已达到生理成熟期的荚果, 在室内风干及去除杂质后, 选取健康种子在自然条件下贮藏, 备用。于2021年4月在人工气候箱进行播种培育, 取2个月左右幼苗为实验材料。

1.3 实验设计

选取长势一致的, 来自5种林龄柠条锦鸡儿的种子培育的盆栽幼苗, 在人工气候箱内进行低温处理, 相对湿度设为70%, 光照时间设为8:00–17:00, 光照强度4 000 lx。根据1992–2020年五寨县气象站资料调查显示, 10–11月幼苗休眠前, 研究区日最低气温均值为–8.7 ℃, 且11月上中旬低于–8 ℃的最长持续时间为3天(图1)。因此,设置(–8 ± 1) ℃低温胁迫, 进行不同时长处理: W1 (6 h)、W2 (12 h)、W3 (24 h)、W4 (48 h)和W5 (72 h), 以25 ℃ (常规温度)培养为对照(CK), 并将5种低温胁迫处理划分为: 轻度(W1)、中度(W2、W3)、重度(W4、W5)。5种林龄总计30个处理组合, 每个培养钵作为1次重复, 每个处理10次重复。

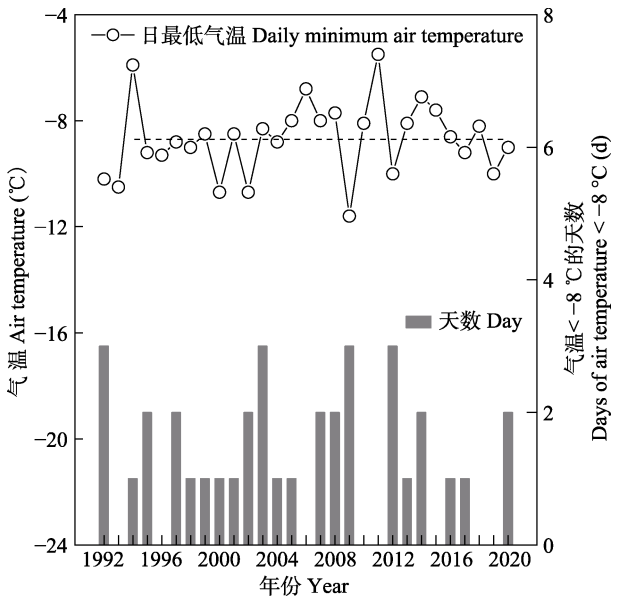


图1 1992–2020年五寨县11月日最低气温变化趋势。
Fig. 1 Trend of daily minimum air temperature in November of Wuzhai County from 1992 to 2020.

1.4 测定项目与方法

生理参数: 采样时间为8:00, 低温处理后, 取植株顶芽下的第3–8片完全展开叶片, 用蒸馏水擦净叶表面污物, 将叶片剪碎、混合均匀后进行不同生理指标测定, 每个指标做3个重复。采用80%丙酮法测定叶绿素含量; 用硫代巴比妥酸法测定丙二醛含量;采用酸性茚三酮法测量脯氨酸含量(刘新, 2015); 采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量(张志良和瞿伟菁, 2003)。

形态参数: 收获时小心地将幼苗连根挖出, 带回实验室用清水洗净, 用滤纸吸干表面水珠后测定幼苗的株高(SH) (用数字式游标卡尺测定)、主根长(TRL)和叶片数; 测定后分根、茎(含叶轴)和叶片在85 ℃烘箱中烘干48 h后用1/10 000电子天平分别称质量; 根据以上数据计算幼苗根茎比(RSR)、干质量和根冠比(RSHR)。计算公式如下:

RSR =主根长/茎长(株高) (1)

RSHR =根干质量/茎叶干质量 (2)

1.5 供试材料抗冻性综合评价

1.5.1 抗冻性评价方法

实验材料的抗冻性评价采用隶属函数法(张尚雄等, 2016)。供试柠条锦鸡儿幼苗各指标的隶属函数值, 计算公式如下:

$$\mu(X_j) = (X_j - X_{\min})/(X_{\max} - X_{\min}) \quad (3)$$

式中, X_j表示第j个指标值, $X_{\min}$表示第j个指标的最小值, $X_{\max}$表示第j个指标的最大值, 如某一指标与抗冻性呈负相关关系, 可用反隶属函数(4)计算其抗冻隶属函数值。

$$\mu(X_j) = (X_{\max} - X_j)/(X_{\max} - X_{\min}) \quad (4)$$

标准差系数(V_j):

$$V_j = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{\frac{n-1}{X_j}} \quad (5)$$

式中, $\bar{X}_j$表示各材料第j个指标平均值, X_{ij}表示i材料j性状的隶属函数值, V_j表示第j个指标的标准差系数。

各指标的权重(w_j):

$$w_j = \frac{V_j}{\sum_{j=1}^{n} V_j} \quad (6)$$

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

综合评价值(*D*):

$$D=\sum_{j=1}^{n}(\mu(X_j)\times w_j) \quad (7)$$

*D*值越大表明抗冻性越强。

1.5.2 抗冻性评价分级标准

抗冻性程度的划分标准参照张尚雄等(2016)的方法略作改动, 抗冻性划分标准: 0.6–1.0为高抗, 定为I级; 0.4–0.6为中抗, 定为II级; 0.3–0.4为低抗, 定为III级; 0–0.3为敏感, 定为IV级。

1.6 数据处理

本研究涉及的五寨县气象数据来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/wa)。实验数据以平均值±标准误表示, 采用SPSS 21.0软件进行单因素方差分析和Duncan's多重比较分析同一植物不同胁迫水平各个参数的差异显著性($p < 0.05$), 用相关性分析方法分析植物各生理性状之间的相关性。利用Origin 2021软件绘图。

2 结果和分析

2.1 母树年龄和低温胁迫对光合色素含量的影响

母树年龄和低温胁迫对叶绿素a含量有显著影响, 母树年龄、低温胁迫及其交互作用对叶绿素b、总叶绿素、类胡萝卜素含量和叶绿素比有显著影响(表1)。同一低温胁迫处理, 7 a母树的柠条锦鸡儿幼苗叶绿素a含量显著高于51 a母树的, 叶绿素b、总叶绿素含量显著高于13、19、41和51 a母树的。同一母树年龄, 随着低温胁迫的增加, 幼苗叶片的叶绿素b、叶绿素a、总叶绿素含量均呈先降后升的趋势, 分别在轻度、中度、重度低温胁迫时达到最低值, 比CK显著降低了66.71%、34.24%、42.46%。叶绿素比、类胡萝卜素含量均呈先升后降的趋势。同一低温胁迫处理, 19 a母树的柠条锦鸡儿幼苗叶绿素比显著高于7、13、41 a母树的, 与51 a母树的无显著性差异; 41 a母树的柠条锦鸡儿幼苗类胡萝卜素含量显著高于7、13、19和51 a母树的。同一母树年龄, 随着低温胁迫的增加, 柠条锦鸡儿幼苗的叶绿素比、类胡萝卜素含量均在轻度胁迫时达到最大值, 比CK显著增加了118.10%、86.10% (表1)。

2.2 母树年龄和低温胁迫对渗透调节物质的影响

母树年龄对可溶性糖含量无显著影响, 低温胁迫和母树年龄及其交互作用对可溶性糖含量有显著影响(表1)。随着低温胁迫时间的增加, 柠条锦鸡儿幼苗的可溶性糖含量呈先升后降的趋势, 在中度胁迫时达到最大值, 比CK显著增加了2.9%。

表1 柠条锦鸡儿幼苗各抗冻生理指标的双因素方差分析结果(平均值±标准误)

Table 1 Results of two-way ANOVA of frost resistant physiological indices of *Caragana korshinskii* seedlings (mean ± *SE*)

指标 Index	梯度 Gradient	叶绿素a含量 Chl a content ($mg\cdot g^{-1}$)	叶绿素b含量 Chl b content ($mg\cdot g^{-1}$)	总叶绿素含量 Chl (a+b) content ($mg\cdot g^{-1}$)	叶绿素比 Chl a/b	类胡萝卜素含量 Carotenoids content ($mg\cdot g^{-1}$)	可溶性糖含量 Soluble sugar content ($mg\cdot g^{-1}$)	游离脯氨酸含量 Free proline content ($mg\cdot g^{-1}$)	丙二醛含量 Malondialdehyde content ($\mu mol\cdot g^{-1}$)
L	L1	1.700 ± 0.088^{a}	0.968 ± 0.059^{a}	2.668 ± 0.125^{a}	1.910 ± 0.186^{c}	0.414 ± 0.037^{c}	0.003 ± 0.000^{a}	0.673 ± 0.040^{a}	0.032 ± 0.002^{a}
	L2	1.700 ± 0.084^{a}	0.727 ± 0.068^{b}	2.426 ± 0.129^{b}	2.581 ± 0.184^{b}	0.494 ± 0.028^{b}	0.003 ± 0.000^{a}	0.648 ± 0.048^{ab}	0.032 ± 0.008^{a}
	L3	1.569 ± 0.082^{ab}	0.648 ± 0.106^{c}	2.217 ± 0.178^{c}	2.899 ± 0.182^{a}	0.469 ± 0.024^{bc}	0.003 ± 0.000^{a}	0.590 ± 0.041^{bc}	0.026 ± 0.008^{a}
	L4	1.526 ± 0.064^{ab}	0.641 ± 0.099^{c}	2.167 ± 0.157^{c}	1.874 ± 0.077^{c}	1.033 ± 0.090^{a}	0.003 ± 0.000^{a}	0.552 ± 0.021^{c}	0.027 ± 0.002^{a}
	L5	1.482 ± 0.074^{b}	0.634 ± 0.095^{c}	2.117 ± 0.159^{c}	2.804 ± 0.218^{a}	0.439 ± 0.019^{bc}	0.003 ± 0.000^{a}	0.513 ± 0.017^{c}	0.028 ± 0.002^{a}
W	CK	2.068 ± 0.067^{a}	1.409 ± 0.051^{a}	3.476 ± 0.088^{a}	1.494 ± 0.072^{d}	0.367 ± 0.043^{d}	0.003 4 ± 0.000 0^{b}	0.547 ± 0.036^{bc}	0.035 ± 0.002^{a}
	W1	1.625 ± 0.037^{b}	0.469 ± 0.017^{d}	2.094 ± 0.049^{b}	3.259 ± 0.183^{a}	0.683 ± 0.074^{a}	0.003 5 ± 0.000 0^{a}	0.549 ± 0.042^{bc}	0.027 ± 0.001^{a}
	W2	1.360 ± 0.071^{c}	0.656 ± 0.079^{b}	2.016 ± 0.135^{b}	2.208 ± 0.190^{c}	0.543 ± 0.079^{c}	0.003 5 ± 0.000 0^{a}	0.532 ± 0.033^{c}	0.024 ± 0.002^{a}
	W3	1.545 ± 0.069^{bc}	0.599 ± 0.070^{bc}	2.144 ± 0.124^{b}	2.596 ± 0.199^{b}	0.619 ± 0.090^{ab}	0.003 5 ± 0.000 0^{a}	0.636 ± 0.039^{ab}	0.029 ± 0.002^{a}
	W4	1.432 ± 0.075^{c}	0.567 ± 0.060^{c}	2.000 ± 0.109^{b}	2.515 ± 0.204^{b}	0.569 ± 0.060^{bc}	0.003 4 ± 0.000 0^{b}	0.646 ± 0.033^{a}	0.030 ± 0.011^{a}
	W5	1.543 ± 0.071^{bc}	0.641 ± 0.058^{b}	2.184 ± 0.106^{b}	2.408 ± 0.186^{bc}	0.636 ± 0.100^{a}	0.003 4 ± 0.000 0^{b}	0.632 ± 0.055^{ab}	0.030 ± 0.002^{a}
F	L	3.086**	56.385**	9.640**	50.915**	161.596**	1.032	6.192**	0.375
	W	16.050**	274.704**	50.649**	58.151**	24.314**	5.103**	2.838**	0.504
	L × W	1.166	20.123**	2.324**	10.380**	13.488**	1.960**	3.856**	0.145

L, 母树年龄(L1–L5: 7、13、19、41、51 a); W, 低温胁迫, 轻度(W1: 6 h)、中度(W2、W3: 12 h、24 h)、重度(W4、W5: 48 h、72 h); L × W: 母树年龄和低温胁迫的交互作用。**, $p < 0.01$。同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

L, mother tree age (L1–L5: 7, 13, 19, 41, 51 a); W, low temperature stress: mild (W1: 6 h); moderate (W2, W3: 12 h, 24 h); severity (W4, W5: 48 h, 72 h); L × W, interaction of the mother tree age and hypothermia stress. **, $p < 0.01$. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments ($p < 0.05$). Chl, chlorophyll.

DOI: 10.17521/cjpe.2022.0210

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

母树年龄、低温胁迫及其交互作用对游离脯氨酸含量有显著影响(表1)。随着低温胁迫时间的增加, 柠条锦鸡儿幼苗的游离脯氨酸含量呈上升的趋势, 在重度胁迫(W4)时达到最大值(0.65 mg·g^{-1}) (表1)。同一低温胁迫处理时, 7 a母树的柠条锦鸡儿幼苗游离脯氨酸含量显著高于19、41、51 a母树的, 与13 a母树的无显著差异。

2.3 母树年龄和低温胁迫对丙二醛含量的影响

母树年龄、低温胁迫及其交互作用对丙二醛含量无显著影响(表1)。随着低温胁迫时间的增加, 不同母树年龄柠条锦鸡儿幼苗的丙二醛含量呈先降后升的趋势, 在中度低温胁迫(W2)时达到最小值, 为0.024 μmol·g^{-1}。不同低温胁迫时间处理下, 不同母树年龄柠条锦鸡儿种子源萌发幼苗的丙二醛含量与CK均无显著差异(表1)。

2.4 母树年龄和低温胁迫对幼苗生长的影响

母树年龄对株高、主根长、叶片数、干质量、根茎比和根冠比均有显著影响, 而低温胁迫仅对株高有显著影响, 母树年龄和低温胁迫的交互作用则对上述生长参数没有影响(表2)。柠条锦鸡儿幼苗的株高、叶片数、干质量、主根长、根冠比均随着母树年龄的增加呈先升后降的趋势。无论有无低温胁迫, 13 a母树的柠条锦鸡儿幼苗的株高、叶片数、干质量均为最大值, 无低温胁迫处理时, 13 a母树的幼苗的株高显著大于7、19、41和51 a母树的; 叶片数显著大于7、41和51 a母树的, 与19 a母树的无显著差异; 干质量显著大于7和51 a母树的, 与19和41 a母树的无显著差异。19 a母树的柠条锦鸡儿幼苗, 其主根长、根茎比均大于其他母树年龄的幼苗, 主根长与41 a母树的无显著差异, 根茎比与7、41 a母树的无显著差异; 41 a母树的柠条锦鸡儿幼苗的根冠比显著大于13 a母树的, 且与7、19、51 a母树的无显著差异(表3)。

2.5 柠条锦鸡儿幼苗各生理指标与生长指标的相关性分析

生理指标与生理指标的相关性中, 叶绿素a与叶绿素b、总叶绿素含量极显著正相关; 叶绿素b与总叶绿素含量呈极显著正相关关系, 与叶绿素比、类胡萝卜素含量、可溶性糖含量呈极显著负相关关系; 叶绿素比与可溶性糖含量呈极显著正相关关系, 与总叶绿素含量呈极显著负相关关系; 总叶绿素含量与类胡萝卜素、可溶性糖含量呈极显著负相关关系; 可溶性糖含量与丙二醛含量呈显著负相关关系(表4)。

生长指标与生长指标的相关性中, 株高与叶片数、干质量极显著正相关, 与主根长、根茎比、根冠比极显著负相关; 主根长与根茎比极显著正相关; 叶片数与干质量呈极显著正相关关系, 与根茎比呈极显著负相关关系; 干质量与根茎比呈极显著负相关关系; 根茎比与根冠比呈显著正相关关系(表5)。

生长指标与生理指标的相关性中, 叶片数与叶绿素b含量、丙二醛含量呈显著负相关关系; 干质量与叶绿素b含量呈显著负相关关系, 与叶绿素比呈显著正相关关系; 根冠比与类胡萝卜素含量呈显著正相关关系(表5)。

2.6 低温处理下柠条锦鸡儿幼苗抗冻性生理指标的综合评价

植物的抗冻性不能用单一指标来判定, 本研究中, 低温胁迫时柠条锦鸡儿幼苗受冻害影响均较小, 故采用低温胁迫时各生理指标均值作为幼苗期抗冻能力综合评价的实测值, 并进行权重值衡量比较。结果表明, 7 a母树的柠条锦鸡儿种子萌发的幼苗抗冻性为I级, 综合评价值为0.636; 13 a母树种子萌发的幼苗抗冻性为II级, 综合评价值为0.530; 51 a

表2 母树年龄和低温胁迫对柠条锦鸡儿幼苗生长指标的双因素方差分析

Table 2 Two-factor ANOVA analysis of mother tree ages and low temperature stress on the growth of *Caragana korshinskii* seedlings

生长参数 Growth factor	母树年龄 Mother tree age		低温胁迫 Low temperature stress		母树年龄×低温胁迫 Mother tree age × low temperature stress	
	F	*p*	*F*	*p*	*F*	*p*
株高 Plant height (cm)	42.297	0.000	2.406	0.039	0.000	1
主根长 Taproot length (cm)	57.832	0.000	2.065	0.730	0.000	1
叶片数 Number of blades	23.410	0.000	2.826	0.533	0.026	1
干质量 Dry mass (g·plant^{-1})	46.560	0.000	0.253	0.938	0.002	1
根茎比 Root stem ratio	51.376	0.000	1.790	0.118	0.062	1
根冠比 Root shoot ratio	12.779	0.000	0.047	0.999	0.005	1

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

表3 母树年龄和低温胁迫对柠条锦鸡儿幼苗生长的影响(平均值±标准误)

Table 3 Effects of mother tree age and low temperature stress on the growth of *Caragana korshinskii* seedlings (mean ± *SE*)

母树年龄 Mother tree age (a)	低温胁迫 Low temperature stress	株高 Plant height (cm)	主根长 Taproot length (cm)	叶片数 Number of blades	干质量 Dry mass ($g \cdot plant^{-1}$)	根茎比 Root stem ratio	根冠比 Root shoot ratio
7	CK	16.71 ± 1.63^{Ab}	19.68 ± 1.42^{Abc}	49.00 ± 1.26^{Ac}	0.13 ± 0.01^{Ac}	1.24 ± 0.15^{Aab}	0.39 ± 0.01^{Bab}
	W1	15.00 ± 1.47^{Ab}	18.70 ± 1.35^{Abc}	48.00 ± 1.35^{ABc}	0.13 ± 0.01^{Ac}	1.49 ± 0.21^{Aab}	0.42 ± 0.01^{Aab}
	W2	14.43 ± 1.53^{Ab}	18.92 ± 1.46^{Abc}	47.00 ± 2.26^{ABc}	0.12 ± 0.01^{Ac}	1.49 ± 0.22^{Aab}	0.41 ± 0.01^{ABab}
	W3	13.87 ± 1.66^{Ab}	19.39 ± 2.03^{Abc}	46.00 ± 1.24^{ABc}	0.12 ± 0.01^{Ac}	1.50 ± 0.20^{Aab}	0.40 ± 0.01^{ABab}
	W4	13.60 ± 1.75^{Ab}	20.26 ± 1.55^{Abc}	45.00 ± 2.34^{ABc}	0.12 ± 0.01^{Ac}	1.49 ± 0.17^{Aab}	0.40 ± 0.01^{ABab}
	W5	13.45 ± 1.58^{Ab}	21.15 ± 1.45^{Abc}	44.00 ± 1.36^{Bc}	0.16 ± 0.03^{Ac}	1.49 ± 0.16^{Aab}	0.39 ± 0.01^{Bab}
13	CK	28.40 ± 2.98^{Aa}	15.78 ± 1.27^{Ac}	72.00 ± 7.68^{Aa}	0.29 ± 0.03^{Aa}	0.60 ± 0.10^{Ac}	0.19 ± 0.01^{Ab}
	W1	26.68 ± 2.44^{Aa}	14.73 ± 1.22^{Ac}	70.00 ± 6.72^{Aa}	0.28 ± 0.03^{Aa}	0.65 ± 0.13^{Ac}	0.22 ± 0.01^{Ab}
	W2	26.13 ± 2.65^{Aa}	14.95 ± 1.46^{Ac}	68.00 ± 7.43^{Aa}	0.27 ± 0.03^{Aa}	0.65 ± 0.13^{Ac}	0.20 ± 0.01^{Ab}
	W3	25.56 ± 2.78^{Aa}	15.40 ± 2.26^{Ac}	67.00 ± 7.72^{Aa}	0.27 ± 0.03^{Aa}	0.66 ± 0.13^{Ac}	0.20 ± 0.01^{Ab}
	W4	25.28 ± 3.15^{Aa}	16.28 ± 1.58^{Ac}	66.00 ± 6.55^{Aa}	0.27 ± 0.03^{Aa}	0.68 ± 0.13^{Ac}	0.19 ± 0.01^{Ab}
	W5	25.14 ± 2.66^{Aa}	17.17 ± 1.33^{Ac}	65.00 ± 4.72^{Aa}	0.26 ± 0.03^{Aa}	0.70 ± 0.12^{Ac}	0.19 ± 0.01^{Ab}
19	CK	18.89 ± 1.46^{Ab}	27.18 ± 2.02^{Aa}	64.83 ± 4.08^{Aab}	0.25 ± 0.02^{Aa}	1.46 ± 0.13^{Aa}	0.43 ± 0.10^{Aa}
	W1	17.17 ± 1.55^{Ab}	26.19 ± 2.44^{Aa}	63.83 ± 3.37^{Aab}	0.24 ± 0.02^{Aa}	1.72 ± 0.17^{Aa}	0.43 ± 0.10^{Aa}
	W2	16.62 ± 2.34^{Ab}	26.42 ± 2.03^{Aa}	62.83 ± 3.28^{Aab}	0.24 ± 0.02^{Aa}	1.72 ± 0.17^{Aa}	0.43 ± 0.10^{Aa}
	W3	16.05 ± 1.41^{Ab}	26.87 ± 2.35^{Aa}	61.83 ± 3.45^{Aab}	0.24 ± 0.02^{Aa}	1.72 ± 0.17^{Aa}	0.43 ± 0.10^{Aa}
	W4	15.77 ± 1.98^{Ab}	27.75 ± 1.77^{Aa}	60.83 ± 3.01^{Aab}	0.24 ± 0.02^{Aa}	1.71 ± 0.16^{Aa}	0.45 ± 0.09^{Aa}
	W5	15.63 ± 1.43^{Ab}	28.65 ± 2.33^{Aa}	59.83 ± 3.22^{Aab}	0.23 ± 0.02^{Aa}	1.71 ± 0.15^{Aa}	0.43 ± 0.10^{Aa}
41	CK	18.54 ± 0.58^{Ab}	23.17 ± 2.33^{Aab}	58.58 ± 2.49^{Abc}	0.22 ± 0.02^{Aab}	1.25 ± 0.06^{Aab}	0.44 ± 0.12^{Aa}
	W1	16.83 ± 0.65^{ABb}	22.17 ± 1.56^{Aab}	57.58 ± 3.45^{Aabc}	0.22 ± 0.02^{Aab}	1.46 ± 0.07^{Aab}	0.44 ± 0.12^{Aa}
	W2	16.38 ± 0.73^{Bb}	22.40 ± 1.44^{Aab}	56.58 ± 2.28^{Aabc}	0.21 ± 0.02^{Aab}	1.46 ± 0.07^{Aab}	0.44 ± 0.12^{Aa}
	W3	15.71 ± 0.65^{Bb}	22.85 ± 1.39^{Aab}	55.58 ± 2.33^{Aabc}	0.21 ± 0.02^{Aab}	1.46 ± 0.07^{Aab}	0.44 ± 0.12^{Aa}
	W4	15.43 ± 0.99^{Bb}	23.73 ± 2.06^{Aab}	55.58 ± 2.28^{Aabc}	0.21 ± 0.02^{Aab}	1.46 ± 0.07^{Aab}	0.44 ± 0.12^{Aa}
	W5	15.28 ± 0.78^{Bb}	24.63 ± 1.07^{Aab}	54.58 ± 1.96^{Aabc}	0.21 ± 0.02^{Aab}	1.47 ± 0.07^{Aab}	0.44 ± 0.12^{Aa}
51	CK	18.35 ± 1.23^{Ab}	18.82 ± 1.08^{Ac}	53.33 ± 3.77^{Abc}	0.17 ± 0.02^{Abc}	1.04 ± 0.06^{Ab}	0.30 ± 0.04^{Aab}
	W1	16.63 ± 1.16^{Ab}	17.81 ± 2.09^{Ac}	52.33 ± 3.37^{Abc}	0.17 ± 0.02^{Abc}	1.20 ± 0.08^{Ab}	0.29 ± 0.04^{Aab}
	W2	16.07 ± 1.26^{Ab}	18.04 ± 1.08^{Ac}	51.33 ± 4.22^{Abc}	0.17 ± 0.02^{Abc}	1.20 ± 0.08^{Ab}	0.30 ± 0.04^{Aab}
	W3	15.52 ± 1.44^{Ab}	18.50 ± 1.46^{Ac}	52.33 ± 3.78^{Abc}	0.16 ± 0.02^{Abc}	1.21 ± 0.08^{Ab}	0.30 ± 0.04^{Aab}
	W4	15.24 ± 1.35^{Ab}	19.37 ± 1.37^{Ac}	51.33 ± 3.26^{Abc}	0.16 ± 0.02^{Abc}	1.22 ± 0.08^{Ab}	0.30 ± 0.03^{Aab}
	W5	15.09 ± 1.22^{Ab}	20.28 ± 1.28^{Ac}	50.33 ± 3.66^{Abc}	0.16 ± 0.02^{Abc}	1.24 ± 0.07^{Ab}	0.29 ± 0.04^{Aab}

W, 低温胁迫(轻度(W1: 6 h)、中度(W2、W3: 12 h、24 h)、重度(W4、W5: 48 h、72 h))。不同大写字母表示同一母树年龄下不同低温胁迫之间的差异显著($p < 0.05$); 不同小写字母表示同一低温胁迫下不同母树年龄之间的差异显著($p < 0.05$)。

W, low temperature stress (mild (W1: 6 h); moderate (W2, W3: 12 h, 24 h); severity (W4, W5: 48 h, 72 h)). Different uppercase letters indicate significant differences between different low temperature stress times under the same mother tree age ($p < 0.05$); different lowercase letters indicate significant differences between the mother tree ages under the same low temperature stress time ($p < 0.05$).

母树种子萌发的幼苗抗冻性为III级, 综合评价值为0.347; 19、41 a母树种子萌发的幼苗抗冻性为IV级, 综合评价值分别为0.200、0.283。综合抗冻性由强到弱排列顺序为7 a > 13 a > 51 a > 41 a > 19 a (表6)。同时采用组间连接法对综合评价值进行聚类分析, 建立聚类树状图(图2), 可以看出, 通过聚类将柠条锦鸡儿幼苗的耐低温性划分为两大类。其中, 第一类包括7、13 a母树的种源, 其耐低温性较强; 第二类包括19、41、51 a母树的种源, 其耐低温性较弱。

2.7 柠条锦鸡儿幼苗生理指标与苗期抗性综合指标相关性分析

将低温胁迫下柠条锦鸡儿幼苗的生理指标相对值与其综合评价值进行相关性分析, 结果显示, 叶绿素b、总叶绿素含量的相对值与综合评价值呈显著正相关关系($p < 0.01$), 相关系数分别为0.916、0.788; 叶绿素比、类胡萝卜素含量的相对值与综合评价值

DOI: 10.17521/cjpe.2022.0210

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

表4 低温处理下柠条锦鸡儿幼苗各抗冻性生理指标的相关性系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix of various frost resistant physiological indices of *Caragana korshinskii* seedlings under low temperature treatment

生理指标 Physiological index		光合指标 Photosynthetic index					渗透调节物质 Osmoregulation substance	
		叶绿素a含量 Chl a content	叶绿素b含量 Chl b content	叶绿素比 Chl a/b	总叶绿素含量 Chl (a+b) content	类胡萝卜素含量 Carotenoids content	可溶性糖含量 Soluble sugar content	游离脯氨酸含量 Free proline content
光合指标 Photosynthetic index	叶绿素b含量 Chl b content	0.650**						
	叶绿素比 Chl a/b	–0.179	–0.731**					
	总叶绿素含量 Chl (a+b) content	0.896**	0.920**	–0.520**				
	类胡萝卜素含量 Carotenoids content	–0.102	–0.468**	0.063	–0.326**			
渗透调节物质 Osmoregulation substance	可溶性糖含量 Soluble sugar content	–0.170	–0.318**	0.308**	–0.274**	0.129		
	游离脯氨酸含量 Free proline content	0.073	–0.025	0.066	0.023	–0.069	0.129	
膜脂过氧化指标 Membranelipid peroxidation index	丙二醛含量 Malondialdehyde content	0.123	0.127	–0.049	0.138	–0.073	–0.241*	0.026

Chl, chlorophyll. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

表5 低温处理下柠条锦鸡儿幼苗各生长指标与抗冻性生理指标的相关性系数矩阵

Table 5 Correlation coefficient matrix between growth indices and frost resistant physiological indices of *Caragana korshinskii* seedlings under low temperature treatment

指标 Index		生长指标 Growth index					
		株高 Plant height	主根长 Taproot length	叶片数 Number of blades	干质量 Dry mass	根茎比 Root stem ratio	根冠比 Root shoot ratio
生长指标 Growth index	主根长 Taproot length	–0.305**					
	叶片数 Number of blades	0.723**	–0.082				
	干质量 Dry mass	0.730**	0.160	0.749**			
	根茎比 Root stem ratio	–0.771**	0.741**	–0.461**	–0.288**		
	根冠比 Root shoot ratio	–0.307**	0.127	0.020	–0.167	0.215*	
生理指标 Physiological index	叶绿素a含量 Chl a content	0.102	–0.058	–0.017	0.004	–0.079	–0.069
	叶绿素b含量 Chl b content	–0.073	–0.058	–0.213*	–0.243*	0.056	–0.104
	叶绿素比 Chl a/b	0.143	0.002	0.203	0.249*	–0.124	–0.011
	总叶绿素含量 Chl (a+b) content	0.010	–0.064	–0.133	–0.140	–0.008	–0.096
	类胡萝卜素含量 Carotenoids content	–0.028	0.164	0.138	0.206	0.055	0.268*
	可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.029	–0.035	0.190	0.184	–0.038	0.095
	游离脯氨酸含量 Free proline content	0.095	–0.089	0.116	0.029	–0.041	–0.051
	丙二醛含量 Malondialdehyde content	–0.124	–0.063	–0.226*	–0.205	0.018	–0.014

Chl, chlorophyll. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

呈显著负相关关系($p < 0.05$), 相关系数分别为–0.777、–0.631。叶绿素a、可溶性糖、游离脯氨酸、丙二醛含量的相对值与抗性评价综合值差异不显著($p > 0.05$)。

3 讨论

3.1 母树年龄和低温胁迫对幼苗生理的影响

本研究通过前期野外调查发现, 不同林龄柠条

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

表6 不同林龄柠条锦鸡儿的种子萌发幼苗叶片耐低温性的各指标隶属函数值、权重及评价值

Table 6 Subordinate function value, weight and evaluation value of each index of leaf low temperature tolerance of *Caragana korshinskii* seedlings at different mother tree ages

林龄 Stand age	隶属函数值 Subordinate function value								抗冻综合评价值 Integrated assessment value (D)	排序 Sort order
	叶绿素a Chl a	叶绿素b Chl b	叶绿素比 Chl a/b	总叶绿素 Chl (a+b)	类胡萝卜素 Car	可溶性糖 SS	游离脯氨酸 Pro	丙二醛 MDA		
7	1.000	0.245	1.000	0.000	1.000	0.000	0.886	0.782	0.636	1
13	0.714	0.486	0.445	0.095	0.548	1.000	1.000	0.000	0.530	2
19	0.000	1.000	0.000	0.202	0.000	0.258	0.284	0.080	0.200	5
41	0.200	0.494	0.032	0.609	0.050	0.313	0.142	0.603	0.283	4
51	0.414	0.000	0.067	1.000	0.104	0.317	0.000	1.000	0.347	3
权重 Weight	0.104	0.101	0.167	0.132	0.152	0.119	0.118	0.107		

Car, carotenoid; Chl, chlorophyll; MDA, malondialdehyde; Pro, proline; SS, soluble sugar.

锦鸡儿林林下存在大量萌发种子(图3), 但当年生更新幼苗存在不能越冬和难以成苗的问题。1992–2020年研究区10–11月(即幼苗休眠期前), 研究区日最低气温均值为–8.7 ℃, 且11月上中旬气温低于–8 ℃的最长持续时间一般为3天(图1)。因此, 本研究通过在人工气候箱设置低温胁迫, 对生长2个月左右的幼苗进行不同时长低温胁迫处理。研究结果表明, 母

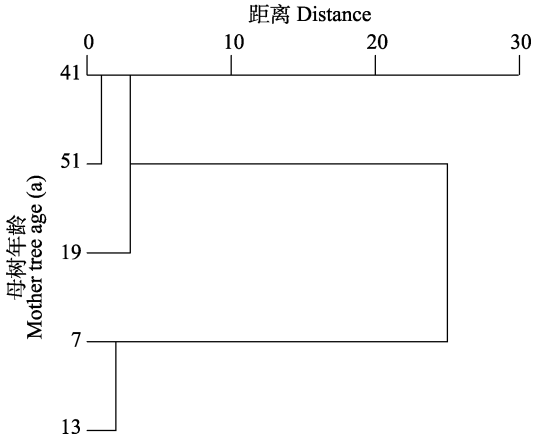


图2 柠条锦鸡儿幼苗的耐低温性聚类图。

Fig. 2 Low temperature tolerance clustering of *Caragana korshinskii* seedlings.



图3 柠条锦鸡儿人工林下种子萌发图。

Fig. 3 Seed germination under the artificial *Caragana korshinskii* plantation.

树年龄和低温胁迫对叶绿素a含量有显著影响, 母树年龄、低温胁迫及其交互作用对叶绿素b含量、总叶绿素含量、叶绿素比、类胡萝卜素含量有显著影响(表1)。随着低温胁迫时间的增加, 柠条锦鸡儿幼苗的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量呈先降后升的趋势, 分别在中度、轻度、重度低温胁迫处理时达到最低值。表明低温胁迫下, 叶片的光能捕获与传递能力首先被抑制, 而这种光能转化能力和捕获能力下降直接影响光合系统的协调性, 导致叶片光合作用能力降低(项洪涛等, 2021); 叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素含量达到最低值后均逐渐上升, 说明持续的低温处理并没有使叶绿体的结构受到破坏, 而是抑制了叶绿素的合成; 随着植物对低温胁迫的适应, 叶绿素含量在一定程度上会有所上升以尽量维持植物的光合作用。同时, 本研究还发现, 随低温胁迫时间的增加, 柠条锦鸡儿幼苗的叶绿素比、类胡萝卜素含量则呈先升后降的变化趋势, 均在轻度胁迫时达到最大值, 比对照组显著增加了118.10%和86.10%。表明在一定的低温环境下, 柠条锦鸡儿幼苗可以通过诱导光合色素含量提高, 保证光合作用顺利进行。但长时间过度低温, 光合色素含量便会下降, 以避免吸收过多光量子而造成光合机构的损伤和光合生产力的过度损失, 这是植物对低温胁迫的一种适应性表现(李清雪等, 2016)。

可溶性糖和游离脯氨酸作为重要的渗透调节物质, 低温胁迫下其含量的迅速增加能降低渗透势, 维持膨压, 是植物适应低温胁迫的一种重要机制(张凯等, 2013)。本研究中, 低温胁迫及母树年龄与低温胁迫的交互作用对可溶性糖含量有显著影响, 母树年龄、低温胁迫及其交互作用对游离脯氨酸含

DOI: 10.17521/cjpe.2022.0210

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

量有显著影响。随着低温胁迫时间的增加, 柠条锦鸡儿幼苗的可溶性糖含量呈先升后降的趋势, 轻度胁迫时达到最大值, 比对照显著增加了2.9%。柠条锦鸡儿幼苗的可溶性糖含量对低温敏感, 低温胁迫下生成可溶性糖来保护细胞, 随着低温持续时间的延长仍可一直保持在较高水平。表明低温胁迫下, 幼苗积累可溶性糖降低细胞渗透势以减缓因低温而导致的细胞失水。同时, 本研究还发现, 随着低温胁迫时间的增加, 柠条锦鸡儿幼苗的游离脯氨酸含量呈上升的趋势, 在重度低温胁迫处理时达到最大值。游离脯氨酸作为细胞质的渗透调节物质在柠条锦鸡儿幼苗对抗低温胁迫时起到平衡细胞代谢的作用, 以保持细胞内环境的相对稳定, 其含量的增加有利于提高幼苗的抗冻性, 可作为抗冻性评价的重要参考指标。

3.2 母树年龄和低温胁迫对幼苗生长的影响

本研究发现, 母树年龄对幼苗株高、主根长、叶片数、干质量、根茎比和根冠比有显著影响, 低温胁迫仅对幼苗的株高有显著影响, 母树年龄与低温胁迫的交互作用对上述生长指标均无显著影响(表2)。柠条锦鸡儿幼苗的株高、叶片数、干质量、主根长、根茎比和根冠比随着林龄的增加均呈先升后降的趋势, 株高、叶片数和干质量均在母树年龄13 a幼苗达到最大值, 主根长和根茎比均在母树年龄19 a幼苗达到最大值, 根冠比则在母树年龄51 a幼苗达到最大值(表3)。这表明母树年龄较小(7、13 a)的柠条锦鸡儿种子萌发的幼苗, 其形态特征可有效提高光合生产能力, 母树年龄较大(19–51 a)的幼苗, 其形态特征更倾向于主动提高水分利用效率。本研究区柠条锦鸡儿在种植18年后土壤水分损耗开始增加, 土壤干燥化程度趋于严重(王国华等, 2021), 柠条锦鸡儿植株以牺牲地上部分的生长为代价将更多光合产物分配至根系, 从而确保在土壤含水量较低的条件下维持存活与生长。同样, 柠条锦鸡儿幼苗生长过程中也表现出这一生物量分配权衡策略, 也表现了植物有效适应干旱环境而表现出的地上地下表型可塑性(Qiu et al., 2021)。同时, 本研究还发现, 低温胁迫对幼苗的株高具有显著影响(表3), 经受低温胁迫的幼苗, 其株高的生长发育均受到抑制。主要是低温会限制柠条锦鸡儿幼苗的代谢生长, 且低温胁迫时间越长, 损害越严重。

3.3 幼苗生理指标与生长指标及各生理指标之间的相关性

柠条锦鸡儿幼苗的生长指标与生理指标相关分析表明, 叶片数与叶绿素b、丙二醛含量呈显著负相关关系; 干质量与叶绿素b含量呈显著负相关关系, 与叶绿素比呈显著正相关关系; 根冠比与类胡萝卜素含量显著正相关, 表明在低温胁迫的影响下, 叶绿素b含量和叶绿素比之间呈相互消长关系, 即随着低温胁迫程度的增加, 叶绿素b含量逐渐降低, 但叶绿素比逐渐上升, 在一定程度上也维持着个体光合作用的正常发挥。同时, 叶片数的增加也大大提高了幼苗的光合作用面积, 在个体水平上增强了幼苗的光合生产能力, 而较大的根冠比则能够促进植物吸收更深土壤范围的水分和养分(罗宁等, 2014; 陈龙飞等, 2020), 从而在生理和形态方面协同抵御低温胁迫。

在一定胁迫范围内, 渗透调节物质的合成能够保持类囊体膜与细胞质膜的结构完整性与功能稳定性, 从而保证光合作用的正常进行(图4)。本研究中, 各低温胁迫处理下总叶绿素含量均显著低于对照组, 而渗透调节物质中可溶性糖含量则高于对照组, 并保持在较高水平, 中度、重度低温胁迫处理为游离脯氨酸含量的高值区, 保证了植物的正常生长。可见, 柠条锦鸡儿幼苗在冬季休眠期前的低温胁迫环境的适应中具有很强的光合能力, 这与其较高的渗透调节能力是分不开的。而且丙二醛含量与可溶性糖含量呈显著负相关关系(表4), 随着低温胁迫的增加, 可溶性糖含量一直保持在较高水平, 保持细胞膜的完整性, 明显降低了低温胁迫条件下丙二醛含量的增加幅度, 大大提高了幼苗对低温胁迫的抗性, 从而使幼苗得以维持正常的生长和发育。

3.4 低温处理下柠条锦鸡儿幼苗抗冻性指标的综合评价

评价植物抗逆性的指标较多, 直接利用单项指标评价其抗逆性, 难以全面准确地反映植物抗逆性, 应以多种指标来综合评价植物对逆境的适应能力。本研究利用隶属函数分析法, 采用鉴定指标相对值综合评价柠条锦鸡儿幼苗在低温胁迫下的抗性能力差异。本研究中, 幼苗的综合抗冻性由强到弱排列顺序为7 a母树幼苗> 13 a母树幼苗> 51 a母树幼苗> 41 a母树幼苗> 19 a母树幼苗(表6)。同时采用组间连接法对D值进行聚类分析将幼苗的耐低温性划分为

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

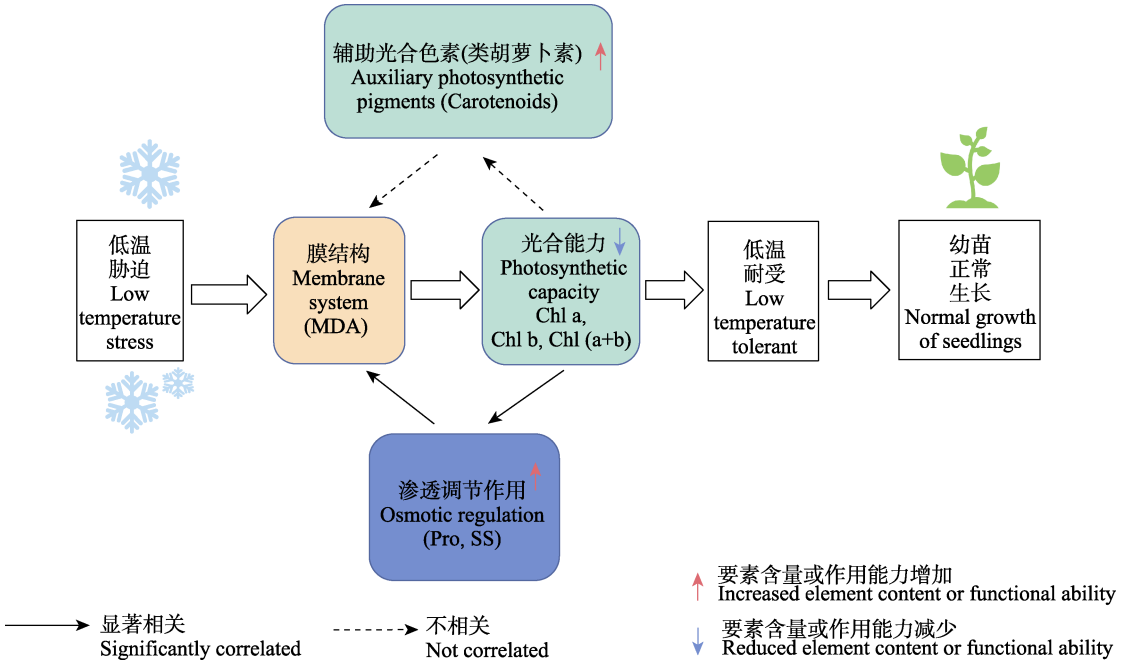


图4 柠条锦鸡儿幼苗响应低温胁迫的模式图。Chl a, 叶绿素a; Chl b, 叶绿素b; Chl (a+b), 总叶绿素; MDA, 丙二醛; Pro, 游离脯氨酸; SS, 可溶性糖。

Fig. 4 Pattern diagram of *Caragana korshinskii* seedlings responding to low temperature stress. Chl a, chlorophyll a; Chl b, chlorophyll b; Chl (a+b), total chlorophyll; MDA, malondialdehyde; Pro, proline; SS, soluble sugar.

两大类。其中, 第一类包括7、13 a母树幼苗, 其耐低温性强; 第二类包括19、41、51 a母树幼苗, 其耐低温性较弱。由此可见, 母树年龄小的柠条锦鸡儿幼苗比母树年龄大的抗冻性更强, 说明柠条锦鸡儿幼苗的抗冻性受母树年龄的影响。对于种植较早的衰退林分则可优先选用青壮年柠条锦鸡儿产生的种子进行补播, 弥补因天然更新不及时而造成的森林资源的断层, 从而促进人工林的可持续性发展。

植物的抗冻性与多种生理因素有关, 因此不能用单一的指标来衡量(梁坤伦等, 2019)。本研究发现, 低龄母树(7、13 a)的柠条锦鸡儿幼苗比高龄母树(19、41、51 a)的柠条锦鸡儿幼苗具有更强的抗冻性。通过对低温胁迫下幼苗生理指标的相对值与综合评价值的相关性分析, 发现低温胁迫下柠条锦鸡儿幼苗的叶绿素b、总叶绿素含量的相对值与综合评价值显著正相关, 叶绿素比、类胡萝卜素含量的相对值与综合评价值显著负相关。综合比较不同生理指标发现, 光合色素含量是衡量植物抗冻性强弱的重要指标。

4 结论

低温胁迫下, 不同母树年龄柠条锦鸡儿幼苗一方面通过主动调节自身叶片光合色素和渗透调节物质含量来维持正常的光合和生理活动, 即增加叶片中类胡萝卜素含量、叶绿素比、游离脯氨酸含量和可溶性糖含量维持叶片渗透压, 提高保水能力, 使丙二醛含量维持在较低水平, 从而使幼苗保持光合速率; 另一方面, 幼苗通过形态调整, 增加叶片数量, 提高光合作用面积, 在个体水平上增强光合生产能力和生物量积累, 从而保证个体正常生长, 同时增加根冠比, 促进植物吸收更深层土壤范围的水分和养分。因此, 柠条锦鸡儿幼苗在生理和形态方面形成了一种良性互馈关系。但不同种源林龄对柠条锦鸡儿幼苗抗冻性的影响也存在一定差异: 低龄母树(7、13 a)的柠条锦鸡儿幼苗比高龄(19、41、51 a)的柠条锦鸡儿幼苗具有更强的抗冻性。

参考文献

Chang XL, Cai MY, Zhang JP, Li JY (2009). Effect of artificial forestation on desertification in typical area of Horqin Sandy Land. *Journal of Desert Research*, 29, 611-616. [常学礼, 蔡明玉, 张继平, 李健英 (2009). 科尔沁沙地典型地区人工造林对沙漠化过程的影响. 中国沙漠, 29, 611-616.]

Chen LF, He ZB, Ming J, Du J, Lin PF, Zhu X (2020). Review of the effects of freeze-thaw processes on soil respiration.

DOI: 10.17521/cjpe.2022.0210

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Arid Zone Research, 37, 917-924. [陈龙飞, 何志斌, 明姣, 杜军, 蔺鹏飞, 朱喜 (2020). 冻融作用对土壤呼吸影响的研究进展. 干旱区研究, 37, 917-924.]

Cheng XR, Huang MB, Shao MA, Yu MK (2009). Canopy interception of tree and shrub plantations in a farming-pastoral zone of Loess Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 28, 1213-1217. [成向荣, 黄明斌, 邵明安, 虞木奎 (2009). 黄土高原农牧交错带人工乔灌木林冠截留. 生态学杂志, 28, 1213-1217.]

Fan RY, Li QF, He YM, Duan RH, Qu Y (2019). Response of the herb layer community to the density of *Caragana microphylla* plantation. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 33, 177-182. [樊如月, 李青丰, 贺一鸣, 段茹晖, 曲艳 (2019). 柠条林分密度对林带间草本群落的影响. 干旱区资源与环境, 33, 177-182.]

Gou QQ (2022). *Construction and Maintenance of Artificial Caragana korshinskii Forest in the Hilly and Sandy Area of Northwest Shanxi.* China Meteorological Press, Beijing. [缑倩倩 (2022). 晋西北丘陵风沙区人工柠条林建设与营造. 气象出版社, 北京.]

Huang Z, Dong M, Gutterman Y (2004). Factors influencing seed dormancy and germination in sand, and seedling survival under desiccation, of *Psammochloa villosa* (Poaceae), inhabiting the moving sand dunes of Ordos, China. *Plant and Soil*, 259, 231-241.

Li LF, Bao WK, Pang XY, Leng L (2009). Seedling emergence, survival and growth of five endemic species in the dry valley of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 2219-2230. [李芳兰, 包维楷, 庞学勇, 冷俐 (2009). 岷江干旱河谷5种乡土植物的出苗、存活和生长. 生态学报, 29, 2219-2230.]

Li QX, Lan L, Jia ZQ, Liu T, Feng LL, He LXZ, Li H (2016). Response of chlorophyll fluorescence characteristics of seedlings of four *Caragana* species to repeated low temperature stresses. *Scientia Silvae Sinicae*, 52(10), 31-37. [李清雪, 兰岚, 贾志清, 刘涛, 冯莉莉, 何凌仙子, 李虹 (2016). 4种锦鸡儿属植物幼苗叶绿素荧光参数对重复低温胁迫的响应. 林业科学, 52(10), 31-37.]

Li QY, Zhao WZ (2006). Responses of seedlings of five desert species to simulated precipitation change. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28, 414-420. [李秋艳, 赵文智 (2006). 5种荒漠植物幼苗对模拟降水量变化的响应. 冰川冻土, 28, 414-420.]

Li RP, Jiang DM, Liu ZM, Li XH, Li XL, Yan QL (2004). Effects of sand-burying on seed germination and seedling emergence of six psammophytes species. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15, 1865-1868. [李荣平, 蒋德明, 刘志民, 李雪华, 李晓兰, 闫巧玲 (2004). 沙埋对六种沙生植物种子萌发和幼苗出土的影响. 应用生态学报, 15, 1865-1868.]

Li XR, Zhang ZS, Huang L, Wang XP (2013). Review on eco-hydrological process and mutual feedback mechanism of artificial vegetation system in sandy areas of China. *Science Bulletin*, 58, 397-410. [李新荣, 张志山, 黄磊, 王新平 (2013). 我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述. 科学通报, 58, 397-410.]

Lian XR, Lu FD, Liu CJ, Pang YJ, Liu CY, Chang Y, Cui JQ (2013). Research progress of natural regeneration of forest plantation in China. *World Forestry Research*, 26(6), 52-58. [连相汝, 鲁法典, 刘成杰, 庞延军, 刘春艳, 常玉, 崔洁琼 (2013). 我国人工林天然更新研究进展. 世界林业研究, 26(6), 52-58.]

Liang KL, Jia CZ, Sun JH, Wang MY, Fu H, Mao ZX (2019). Evaluation of physiological responses and tolerance to low-temperature stress of ten *Elymus nutans* varieties. *Acta Prataculturae Sinica*, 28, 111-121. [梁坤伦, 贾存智, 孙金豪, 王明艳, 傅华, 毛祝新 (2019). 高寒地区垂穗披碱草种质对低温胁迫的生理响应及其耐寒性评价. 草业学报, 28, 111-121.]

Liu GJ, Zhang XM, Li JG, Fan DD, Deng CZ, Hou JG, Xin RM (2010). Effects of water supply and sand burial on seed germination and seedling emergence of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum*. *Journal of Desert Research*, 30, 1085-1091. [刘国军, 张希明, 李建贵, 范冬冬, 邓潮洲, 侯建国, 信汝明 (2010). 供水量及沙埋厚度对两种梭梭出苗的影响. 中国沙漠, 30, 1085-1091.]

Liu J, Gou QQ, Wang GH, Zhao FX, Tang XJ (2022). Changes of vegetation community and soil characteristics of 50 years old artificial *Caragana korshinskii* in sandy-hilly region of northwest Shanxi Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 36, 219-230. [刘婧, 缑倩倩, 王国华, 赵峰侠, 唐学娟 (2022). 晋西北丘陵风沙区50年林龄人工柠条林植被群落及其土壤特性变化. 水土保持学报, 36, 219-230.]

Liu JL, Zhao WZ, Li FR, Pan CC (2018). Effects of introduced sand-fixing vegetation on community structure and diversity in ground-dwelling arthropods. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 1357-1365. [刘继亮, 赵文智, 李锋瑞, 潘成臣 (2018). 人工固沙植被恢复对地表节肢动物群落组成及多样性的影响. 生态学报, 38, 1357-1365.]

Liu S, Liao JX, Xiao C, Fan XH (2016). Effects of biotic neighbors and habitat heterogeneity on tree seedling survival in a secondary mixed conifer and broad-leaved forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 711-722. [刘帅, 廖嘉星, 肖翠, 范秀华 (2016). 长白山次生针阔混交林乔木幼苗存活的影响因素分析. 植物生态学报, 40, 711-722.]

Liu S, Wang Y, Liu HL, Zhang L (2019). Soil physical properties under different restoration measures in the northwest of Shanxi Province. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 25, 235-244. [刘爽, 王雅, 刘海龙, 张鸾 (2019). 晋西北不同土地恢复管理措施下土壤物理性状分析. 植物营养与肥料学报, 25, 235-244.]

Liu X (2015). *Guidance for Plant Physiology Experiments.*

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

China Agricultural Press, Beijing. [刘新 (2015). 植物生理学实验指导. 中国农业出版社, 北京.]

Liu ZM, Zhu JL, Deng X (2012). Arrival vs. retention of seeds in bare patches in the semi-arid desertified grassland of Inner Mongolia, northeastern China. *Ecological Engineering*, 49, 153-159.

Luo N, Wei S, Li J, Gu WR, He D, Qu TM, Qiao TC, Yang ZF (2014). Effects of low-temperature stress on root system characteristics and electric conductivity of maize seedlings. *Chinese Journal of Ecology*, 33, 2694-2699. [罗宁, 魏湜, 李晶, 顾万荣, 贺丹, 曲天明, 乔天长, 杨振芳 (2014). 低温胁迫对玉米苗期根系特征及电导率的影响. 生态学杂志, 33, 2694-2699.]

Nie CL, Zheng YR (2005). Effects of water supply and sand burial on seed germination and seedling emergence of four dominant psammophytes in the Ordos Plateau. *Acta Phytoecologica Sinica*, 29, 32-41. [聂春雷, 郑元润 (2005). 鄂尔多斯高原4种主要沙生植物种子萌发与出苗对水分和沙埋的响应. 植物生态学报, 29, 32-41.]

Qiu T, Sharma S, Woodall CW, Clark JS (2021). Niche shifts from trees to fecundity to recruitment that determine species response to climate change. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 719141. DOI: 10.3389/fevo.2021.719141.

Sun Y, Yan XF (2016). Seed emergence and growth of *Caragana korshinskii* in different habitats. *Acta Prataculturae Sinica*, 25, 186-195. [孙毅, 闫兴富 (2016). 不同生境下柠条种子出苗及幼苗生长特征. 草业学报, 25, 186-195.]

Tang Y, Liu ZM (2012). Advances, trends and challenges in seed bank research for sand dune ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 891-898. [唐毅, 刘志民 (2012). 沙丘生态系统种子库研究现状、趋势与挑战. 植物生态学报, 36, 891-898.]

Wang GH, Zhao WZ (2016). Effects of sand-burying on seed germination and seedling growth of *Caragana korshinskii* Kom. *Arid Land Geography*, 39, 95-103. [王国华, 赵文智 (2016). 不同沙埋深度对当年生柠条锦鸡儿种子萌发及幼苗生长的影响. 干旱区地理, 39, 95-103.]

Wang GH, Song B, Xi LL, Gou QQ (2021). Growth and reproduction dynamics of different-aged artificial *Caragana korshinskii* in sandy-hilly region of northwest Shanxi Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32, 2079-2088. [王国华, 宋冰, 席璐璐, 缑倩倩 (2021). 晋西北丘陵风沙区不同林龄人工柠条生长与繁殖动态特征. 应用生态学报, 32, 2079-2088.]

Wang J, Lu JX, Wang XZ, Cui JT, Wang LD, Liu YQ, Si RX, Jia ZK (2021). Natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantations in 9–10 years after thinning. *Journal of Beijing Forestry University*, 43(12), 17-28. [王杰, 陆景星, 王相震, 崔靖亭, 王利东, 刘彦清, 司瑞雪, 贾忠奎 (2021). 华北落叶松人工林间伐后9～10年林下天然更新研究. 北京林业大学学报, 43(12), 17-28.]

Wang SQ, Wu SH, Zhu XM, Ge YX (2018). Research progress in natural regeneration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation. *World Forestry Research*, 31, 58-62. [王思琪, 武曙红, 朱晓梅, 葛玉祥 (2018). 我国樟子松人工林天然更新研究进展. 世界林业研究, 31, 58-62.]

Xiang HT, Zheng DF, He N, Li W, Wang ML, Wang SY (2021). Research progress on the physiological response of plants to low temperature and the amelioration effcectiveness of exogenous ABA. *Acta Prataculturae Sinica*, 30, 208-219. [项洪涛, 郑殿峰, 何宁, 李琬, 王曼力, 王诗雅 (2021). 植物对低温胁迫的生理响应及外源脱落酸缓解胁迫效应的研究进展. 草业学报, 30, 208-219.]

Yan XF, Liu JL, Bei ZL, Liu CD, Gao YF, Wang RX (2015). Characteristics of seed germination and seedling growth of *Caragana korshinskii* under different light intensities. *Chinese Journal of Ecology*, 34, 912-918. [闫兴富, 刘建利, 贝盏临, 刘存德, 高永峰, 王瑞霞 (2015). 不同光强条件下柠条锦鸡儿的种子萌发和幼苗生长特征. 生态学杂志, 34, 912-918.]

Yan XF, Zhou LB, Si BB, Sun Y, Gao YF, Wang RX (2016). Stress effects of simulated drought by polyethylene glycol on the germination of *Caragana korshinskii* Kom. seeds under different temperature conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 1989-1996. [闫兴富, 周立彪, 思彬彬, 孙毅, 高永峰, 王瑞霞 (2016). 不同温度下PEG-6000模拟干旱对柠条锦鸡儿种子萌发的胁迫效应. 生态学报, 36, 1989-1996.]

Yang HL, Liang ZL, Zhu XW, Mei SX, Wang HQ, Shen Y, Huang ZY (2012). Effects of sand burial and seed size on seed germination, seedling emergence and growth of *Caragana korshinskii* Kom. (Fabaceae). *Acta Ecologica Sinica*, 32, 7757-7763. [杨慧玲, 梁振雷, 朱选伟, 梅世秀, 王会勤, 申艳, 黄振英 (2012). 沙埋和种子大小对柠条锦鸡儿种子萌发、出苗和幼苗生长的影响. 生态学报, 32, 7757-7763.]

Yu SL, Chen HW, Li H (2007). Review of advances in ecology of seed mass. *Journal of Plant Ecology*, 31, 989-997. [于顺利, 陈宏伟, 李晖 (2007). 种子重量的生态学研究进展. 植物生态学报, 31, 989-997.]

Zhang JG, Wang XP, Li XR, Zhang ZS, Wang G, Wang S, Ma FY (2005). Advances and prospect of researches on desert plant life history strategies. *Journal of Desert Research*, 25, 306-314. [张景光, 王新平, 李新荣, 张志山, 王刚, 王桑, 马风云 (2005). 荒漠植物生活史对策研究进展与展望. 中国沙漠, 25, 306-314.]

Zhang K, Mu XQ, Sun XY, Wang MZ, Hu SW (2013). Effects of temperature change on seed germination, seedling growth and physiological characteristics in rape and companion weeds. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 1132-1141. [张凯, 慕小倩, 孙晓玉, 汪梦竹, 胡胜武 (2013). 温度变化对油菜及其伴生杂草种苗生长和幼苗生理特性的影响. 植物生态学报, 37, 1132-1141.]

Zhang SX, Nimapingcuo, Xu YM, Miao YJ, Baosaihenna,

DOI: 10.17521/cjpe.2022.0210

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Zhang WH (2016). Physiological responses to low temperature stress and cold resistance evaluation in three *Elymus* species. *Pratacultural Science*, 33, 1154-1163. [张尚雄, 尼玛平措, 徐雅梅, 苗彦军, 包赛很那, 张卫红 (2016). 3个披碱草属牧草对低温胁迫的生理响应及苗期抗寒性评价. 草业科学, 33, 1154-1163.]

Zhang ZL, Qu WJ (2003). *Experimental Instruction of Plant Physiology*. Higher Education Press, Beijing. 32-227. [张志良, 瞿伟菁 (2003). 植物生理学实验指导. 高等教育出版社, 北京. 32-227.]

Zhao C, Cai YB, Huang X, Liu QQ, Zhu CX, Yu JD, Wang ZN, Liu B (2019). Effects of Chinese fir litter cover on its seedling emergence and early growth. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30, 481-488. [赵冲, 蔡一冰, 黄晓, 刘青青, 朱晨曦, 于姣妲, 王正宁, 刘博 (2019). 杉木凋落物覆盖对自身幼苗出土和早期生长的影响. 应用生态学报, 30, 481-488.]

Zhao WZ (2002). Impact of plantation on spatial heterogeneity of soil moisture in horqin sandy land. *Acta Pedologica Sinica*, 39, 107-113. [赵文智 (2002). 科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响. 土壤学报, 39, 107-113.]

责任编委: 邓建明 责任编辑: 李 敏

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology