DOI: 10.5846/stxb201409021746
闫兴富, 周立彪, 思彬彬, 孙毅, 高永峰, 王瑞霞.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,2016,36(7): - .
Yan X F, Zhou L B, Si B B, Sun Y, Gao Y F, Wang R X.Stress effects of simulated drought by polyethylene glycol on the germination of *Caragana korshinskii* Kom. seeds under different temperature conditions.Acta Ecologica Sinica,2016,36(7): - .

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

闫兴富[1,*], 周立彪[1], 思彬彬[1], 孙 毅[1], 高永峰[2], 王瑞霞[2]
1 国家民委生态系统模型及应用重点实验室 北方民族大学生物科学与工程学院, 银川 750021
2 宁夏白芨滩国家级自然保护区管理局, 灵武 750400

摘要:在人工气候箱控制的不同温度(10℃、15℃、20℃、25℃和 30℃)下,设置聚乙二醇(PEG-6000)质量百分比浓度分别为 0%、5%、10%、15%、20%、25%和 30%的 7 个模拟干旱胁迫处理,研究了柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)种子的萌发特性。结果表明:(1) 温度和 PEG 模拟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($P<0.01$)。(2) 种子萌发率在 15℃下最大,显著大于 10℃下的($P<0.01$),随着温度的继续升高逐渐减小;萌发速率系数随着温度的升高有减小的趋势,30℃下又显著增大;萌发值和萌发指数分别在 25℃和 20℃下最大,但均随温度的继续升高而显著减小($P<0.05$);活力指数随着温度的升高而减小,除在 10℃和 20℃间无显著差异外,其他温度间均差异显著($P<0.05$)。(3) 种子萌发率、萌发值和萌发指数在 15℃下与 PEG 浓度呈不显著的负相关关系,而在其他温度下均与 PEG 胁迫浓度显著负相关($P<0.05$),且相关系数均在 25℃或 30℃下最大;萌发速率系数在各温度下均与 PEG 胁迫浓度显著正相关;活力指数与 PEG 胁迫浓度呈显著负相关,相关系数随着温度的升高逐渐增大。(4) 萌发参数与 PEG 胁迫浓度间的回归模型表现为三次曲线、二次曲线和直线模型 3 种类型,其中以三次曲线模型为主,全部回归模型均达到显著性水平($P<0.05$);在 20℃以下的温度条件下,较低浓度 PEG 处理对柠条锦鸡儿种子萌发具有一定的促进作用,在 15℃下种子萌发对 PEG 模拟干旱胁迫的耐受性最强;柠条锦鸡儿种子在不同温度和干旱胁迫下的萌发模式是对其分布区生境长期适应和进化的结果。
关键词:柠条锦鸡儿;温度;干旱胁迫;聚乙二醇-6000;种子萌发

Stress effects of simulated drought by polyethylene glycol on the germination of *Caragana korshinskii* Kom. seeds under different temperature conditions

YAN Xingfu[1,*], ZHOU Libiao[1], SI Binbin[1], SUN Yi[1], GAO Yongfeng[2], WANG Ruixia[2]
1 *Key Laboratory of Ecosystem Model and Applications of State Nationalities Affairs Commission, College of Biological Science and Engineering, Beifang University of Nationalities, Yinchuan* 750021, *China*
2 *Administration Bureau of Baijitan National Nature Reserve of Ningxia, Lingwu* 750400, *China*

Abstract: In this study, we investigated the effect of drought on the germination characters of *Caragana korshinskii* Kom seeds under different temperature conditions. We carried out an experiment with 5 different constant temperatures (10℃, 15℃, 20℃, 25℃, and 30℃) controlled by artificial climate incubators and 7 simulated drought stress conditions created by different polyethylene glycol (PEG)-6000 concentrations (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, and 30%). The results revealed that temperature, simulated drought stress by PEG, and their interaction had a significant impact on the germination percentage (GP), coefficient of germination rate (CGR), germination value (GV), germination index (GI),

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31260151)
收稿日期:2014-09-02; **网络出版日期**:2015- -
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xxffyan@126.com

and vigor index (VI) of *C. korshinskii* Kom. seeds ($P<0.01$). Seeds at 15℃ showed the maximum GP that was significantly higher than that of seeds at 10℃ ($P<0.01$) and declined gradually as the temperature increased. CGR decreased (i.e., acceleration of germination schedule) with increasing temperature and a significant increase was identified at 30℃. The highest GV and GI were detected at 25℃ and 20℃, respectively, but both of them declined significantly with continued temperature increasing ($P<0.05$). VI decreased with increasing temperature and a significant difference was detected among all treatments at different temperatures ($P<0.05$), except for that between 10℃ and 20℃. The relationships between GP, GV, GI, and PEG concentrations at 15℃ were insignificantly negative, while the negative correlations were significant at all other temperatures ($P<0.05$) and the correlation coefficients maximized at 25℃ or 30℃. It was found that CGRs were positively correlated with the concentration of PEG at all temperatures. A significant negative correlation between VI and PEG concentration was identified and the correlation coefficient increased with increasing temperature. The regression models of germination parameters and PGE concentrations presented cubic curves, quadratic curves, and linear model and all models were significant ($P<0.05$). Below 20℃, lower concentration of PEG partly facilitated the germination of *C. korshinskii* Kom. seeds. The highest tolerance of seed germination to simulated drought stress of PEG was detected at 15℃. The germination pattern of *C. korshinskii* Kom. seeds to temperature and drought stress could be the result of long-term adaptation and evolution to the conditions of its natural distributing region.

Key Words: *Caragana korshinskii* Kom.; temperature; drought stress; PEG-6000; seed germination

种子萌发是植物生活史的重要阶段,植物种子能对适宜萌发的环境条件做出反应,及时萌发并建立幼苗以避开不利于幼苗生长与存活的恶劣环境,从而提高物种的整体适合度[1-2]。温度和水分是影响干旱荒漠区植物种子萌发的两个关键生态因子。温度可直接影响非休眠种子的萌发或通过改变种子的休眠状态而间接对种子萌发产生影响,进而影响植物幼苗增补和种群更新及其动态。在一定的温度范围内,相对较高的温度对种子的萌发具有促进作用,超过某一特定温度范围的过高和过低温度均不利于种子萌发[3-4]。种子萌发的适宜温度一般在某一狭窄的温度范围[5-6],也有一些植物种子适宜在某一特定的温度萌发,但在不同植物间有较大差异,例如,合柱金莲木(*Sinia rhodoleuca*)[7]、云杉(*Picea asperata*)和红桦(*Betula albo-sinensis*)[8]等种子萌发的最适温度相对较高(25℃),而明党参(*Changium smyrnioides* Wolff)和峨参(*Anthrisc ussylvestris* Hoffm.)种子萌发的最适温度则较低(分别为 10℃和 5℃),在 18℃时几乎没有种子能够萌发[9]。

聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG)是一种强亲水性大分子有机物,用 PEG 溶液渗透模拟干旱胁迫简便易行,周期较短,被一些研究者广泛用于植物种子萌发期间的耐旱性方面的研究。低浓度 PEG 处理对种子萌发和出苗具有促进作用[10-11],因而生产实践中常用低浓度的 PEG 溶液对种子进行处理以提高种子活力和抗逆性[12]。高浓度的 PEG 溶液对种子萌发具有强烈的抑制作用,据回振龙等[13]报道,10% PEG 溶液即显著抑制紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)种子的萌发,而这一浓度的 PGE 溶液对栓皮栎(*Quercus variabilis*)种子的萌发仍具有促进作用;大量研究结果表明,种子萌发率、萌发势、萌发指数和活力指数等均随干旱胁迫强度的增大而减小[14-18],但多数植物种子能够耐受的 PEG 浓度临界值相对较高,例如,岷谷木蓝(*Indigofera lenticellata*)[6]和栓皮栎种子[11]萌发能够耐受的 PEG 临界浓度分别为 30%和 32%,甚至有些植物的种子经高度 PEG 处理后再经清水漂洗后仍能保持萌发活力[19],当然也有植物(苦马豆(*Swainsonia salsula*))的种子萌发不能耐受 10%以上浓度 PEG 的胁迫[15]。

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)是豆科(Leguminosae)锦鸡儿属旱生灌木,主要分布于沙地草场、荒漠或半荒漠地区的流动沙地和半固定沙地,是我国西北荒漠地区植树造林和沙漠化防治的主要灌木树种。柠条锦鸡儿种子萌发对干旱胁迫和沙埋环境[20]具有较强的耐性,例如,郑明清等[21]报道,2.5 mm 的单次供水量即可保证柠条锦鸡儿种子正常萌发。已有研究报道,在 15℃以上的恒温和 10/20℃的变温条件下,种子萌发率均随随 PEG 胁迫浓度的增大而减小,且温度与 PEG 胁迫的交互作用显著影响种子萌发[16]。曾彦军

等[22]在较大范围渗透势(-0.3 — -2.7 MPa)的 PEG 溶液胁迫下研究了柠条锦鸡儿种子的萌发特性,发现在渗透势为-1.8 MPa 和-2.1 MPa 的条件下萌发率仍可高达 26%和 15%,但 PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫对柠条锦鸡儿种子萌发的影响在不同温度条件下是否一致还不清楚。本研究设置 5 个不同的温度处理(10℃、15℃、20℃、25℃和 30℃),在每一温度处理,分别以百分比浓度为 0%、5%、10%、15%、20%、25%和 30%的 PEG-6000 溶液作为不同的模拟干旱胁迫处理,研究在不同温度条件下,PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫对柠条锦鸡儿种子萌发的影响,为这一重要荒漠灌木的种群更新和沙地植被恢复与重建提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　种子的采集

柠条锦鸡儿种子采自宁夏灵武白芨滩国家级自然保护区内龙坑林区的树龄 10 年的成年植株,2012 年 6 月下旬,在植株上摘取成熟的荚果,带回实验室凉干后手工剥出种子,并去除虫蛀和败育的种子后于室温下贮藏备用。

1.2　试验设计和播种方法

在室内智能人工气候箱(PQX-330A-12H 型,宁波莱福科技有限公司生产)控制的 5 个恒温条件(10℃、15℃、20℃、25℃和 30℃)下,分别设置 PEG-6000 百分比浓度为 0%、5%、10%、15%、20%、25%和 30% 7 个模拟干旱胁迫处理,共 35 个处理,每一处理设置 4 个重复。选择大小、形状基本一致的柠条锦鸡儿种子,每一重复用种子 40 粒,将种子播于直径为 120 mm 的培养皿中,以双层滤纸为萌发基质,用洗瓶将 PEG 溶液沿滤纸边缘注入培养皿底部,待浸透滤纸后将种子整齐侧放排列于滤纸上。播种后将培养皿置于上述不同温度下的人工气候箱中开始试验,人工气候箱的光照条件设置为 14 h 光照/10 h 黑暗(光照强度约 11500LX);试验期间每 48 h 更换培养基质(包括培养液)一次以排除水分蒸发对 PEG 溶液浓度的影响。

1.3　种子萌发参数的计算

以胚根伸出种皮 2 mm 为萌发标准,每 24 h 观测记录种子萌发一次,记录萌发的种子数,并以游标卡尺测定已萌发种子的胚根长度(mm),记录后及时取出已萌发的种子,观察记录至连续 2 周不再有种子萌发为止。评价种子活力的参数包括萌发率(germination percentage, GP)、萌发速率系数(coefficient of germination rate, CGR)、萌发值(germination value, GV)、萌发指数(germination index, GI)和活力指数(vigor index, VI),分别按下述公式计算有关萌发参数:$GP = n \times 100\%/N$,式中:n 和 N 分别为萌发种子数和试验过程中所用种子总数;

$$CRG = [\sum (t \times n)/\sum n] \times 100$$

式中,t 为自萌发试验开始时的天数,n 为在 t 天内萌发的种子数[23];

$$GV = MDG \times PV$$

式中,MDG (mean daily germination)为平均每天萌发的种子数,PV (peak value)为萌发试验期间平均每天的最大萌发种子数[24];$GI = \sum G_t/D_t$,式中:G_t为时间 t 天的萌发种子数,D_t为萌发试验天数;$VI = GP \times (L_r + L_S)$,式中:$L_r$和 L_s分别为幼苗根的长度(cm)和幼苗茎长度(cm)[23](本研究中以胚根长度代替幼苗根的长度)。

1.4　数据处理

在进行统计分析前将全部试验数据进行平方根转换,然后用二因素方差分析的方法分析温度和 PEG 溶液模拟干旱胁迫及其交互作用对种子萌发参数的影响;用单因素方差分析的最小显著差法(least significant difference, LSD)分析萌发参数在不同温度间及同一温度下不同 PEG 浓度间的差异;用 Pearson 相关分析法分析同一温度下 PEG 模拟干旱胁迫浓度与各萌发参数间的相关关系;用回归分析法分析不同温度下 PEG 模拟干旱胁迫浓度与各萌发参数间的关系;所有数据的统计分析均在 SPSS 13.0 软件中进行。用 Excel 2003 和 SigmaPlot 10.0 制作图表,图中萌发参数的数据以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 温度对柠条锦鸡儿种子萌发的影响

从表 1 可以看出,温度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($P<0.01$)。种子平均萌发率在 15℃下最大(78.7%),显著大于 10℃下的(65.4%,$P<0.01$),随着温度的升高逐渐减小,在 25℃和 30℃下的平均萌发率均显著低于其他温度下的($P<0.05$),二者间也差异显著($P<0.01$)(表 2);萌发速率系数的平均值随着温度的升高有减小的趋势,但当温度从 25℃升高到 30℃时又显著增大,除 20℃和 30℃间无显著差异外,其他温度间均差异显著($P<0.01$);萌发值在 10℃最小,随着温度的升高显著增大,当温度升高到 30℃时又显著减小($P<0.01$);萌发指数在 20℃下最大,随着温度的升高和降低均显著减小($P<0.05$);活力指数的最大值和最小值分别在 15℃和 30℃,除 10℃和 20℃间无显著差异外,其他温度间均差异显著($P<0.05$)(表 2)。

表 1 温度和 PEG 模拟干旱胁迫对柠条锦鸡儿种子萌发影响的二因素方差分析

Table 1 Two way ANOVA analysis of effects of temperature and simulated drought stress of polyethylene glycol (PEG) on the seed germination of *Caragana korshinskii* Kom

萌发参数 Germination parameter	温度 Temperature			干旱胁迫 Drought stress			温度×干旱胁迫 Temperature×Drought stress		
	df	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*
萌发率 Germination percentage, *GP*	4	231.05	0.000	6	95.09	0.000	24	7.28	0.000
萌发速率系数 Coefficient of germination rate, *CGR*	4	1143.61	0.000	6	128.94	0.000	24	3.85	0.000
萌发值 Germination value, *GV*	4	174.88	0.000	6	98.30	0.000	24	6.16	0.000
活力指数 Vigor index, *VI*	4	92.83	0.000	6	42.63	0.000	24	4.40	0.000
萌发指数 Germination index, *GI*	4	438.18	0.000	6	288.60	0.000	24	11.33	0.000

2.2 不同温度下 PEG 模拟干旱胁迫对柠条锦鸡儿种子萌发的影响

PEG 模拟干旱胁迫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的影响均达极显著水平($P<0.01$)(表 1);相关分析结果表明,种子萌发率在所有温度下均与 PEG 胁迫浓度呈负相关关系,在除 15℃外的其他温度下均达显著水平($P<0.05$);萌发速率系数在所有温度下均与 PEG 浓度显著正相关,其中在 15℃、20℃和 30℃下达极显著水平($P<0.01$);在除 15℃外的其他温度下,萌发值和萌发指数均与 PEG 浓度显著负相关,相关系数分别在 30℃和 25℃下最大;活力指数在所有温度下均与 PEG 胁迫浓度呈显著负相关($P<0.05$),相关系数随着温度的升高逐渐增大。

表 2 温度对柠条锦鸡儿种子萌发的影响

Table 2 Effects of temperature on the seed germination of *Caragana korshinskii* Kom

温度 Temperature	萌发率 *GP* (%)	萌发速率系数 *CGR*	萌发值 *GV*	萌发指数 *GI*	活力指数 *VI*
10℃	65.4 ± 16.2a	2187.4 ± 326.1a	0.3 ± 0.2a	1.3 ± 0.5a	140.1 ± 38.3a
15℃	78.7 ± 11.3b	1186.8 ± 279.5b	1.2 ± 0.6b	3.1 ± 0.9b	166.1 ± 27.5b
20℃	73.1 ± 14.1a	903.3 ± 200.1c	1.9 ± 1.1c	3.9 ± 1.4c	154.9 ± 31.8a
25℃	54.5 ± 17.0c	731.7 ± 182.9d	2.7 ± 1.7c	3.7 ± 1.6b	116.7 ± 42.5c
30℃	41.1 ± 10.4d	908.6 ± 143.3c	0.9 ± 0.6b	2.1 ± 0.8c	87.5 ± 24.4d

同一萌发参数中的不同字母表示差异显著

从图 1 可以看出,在低于 20℃的温度下,较低浓度的 PEG 均对柠条锦鸡儿种子萌发具有一定的促进作用,例如,在 15℃下,PEG 浓度高达 20%时种子萌发率(85.6%)仍高于对照(0% PEG,萌发率为 79.4%),其中 10% PEG 处理种子的萌发率(83.8%)显著高于对照($P<0.05$),但随着 PEG 胁迫浓度的继续增大萌发率逐渐

减小;在较高温度下,种子萌发率随着 PEG 浓度的增大而持续减小。萌发速率系数总体趋势表现为随着 PEG 浓度的增大呈持续或波动性增大趋势,在 10℃和 30℃的较低 PEG 浓度下显著小于对照($P<0.05$)。在低于 20℃的温度条件下,萌发值、萌发指数和活力指数在较低 PEG 浓度下均有不同程度的增大,随着 PEG 浓度的继续增大持续减小;在 2 个较高温度(25℃和 30℃)下,3 个萌发参数均随着 PEG 胁迫浓度的增大而持续减小。

回归分析结果显示,在不同温度下,萌发参数与 PEG 胁迫浓度间的回归模型主要表现为三次曲线、二次曲线和直线模型,其中以三次曲线模型为主,全部回归模型均达到显著性水平($P<0.05$),尤其在两个较高温度(25℃和 30℃)下,除 30℃下的萌发速率系数外,其他萌发参数与 PEG 浓度间的回归模型均达极显著水平($P<0.01$)(表 3、图 1)。

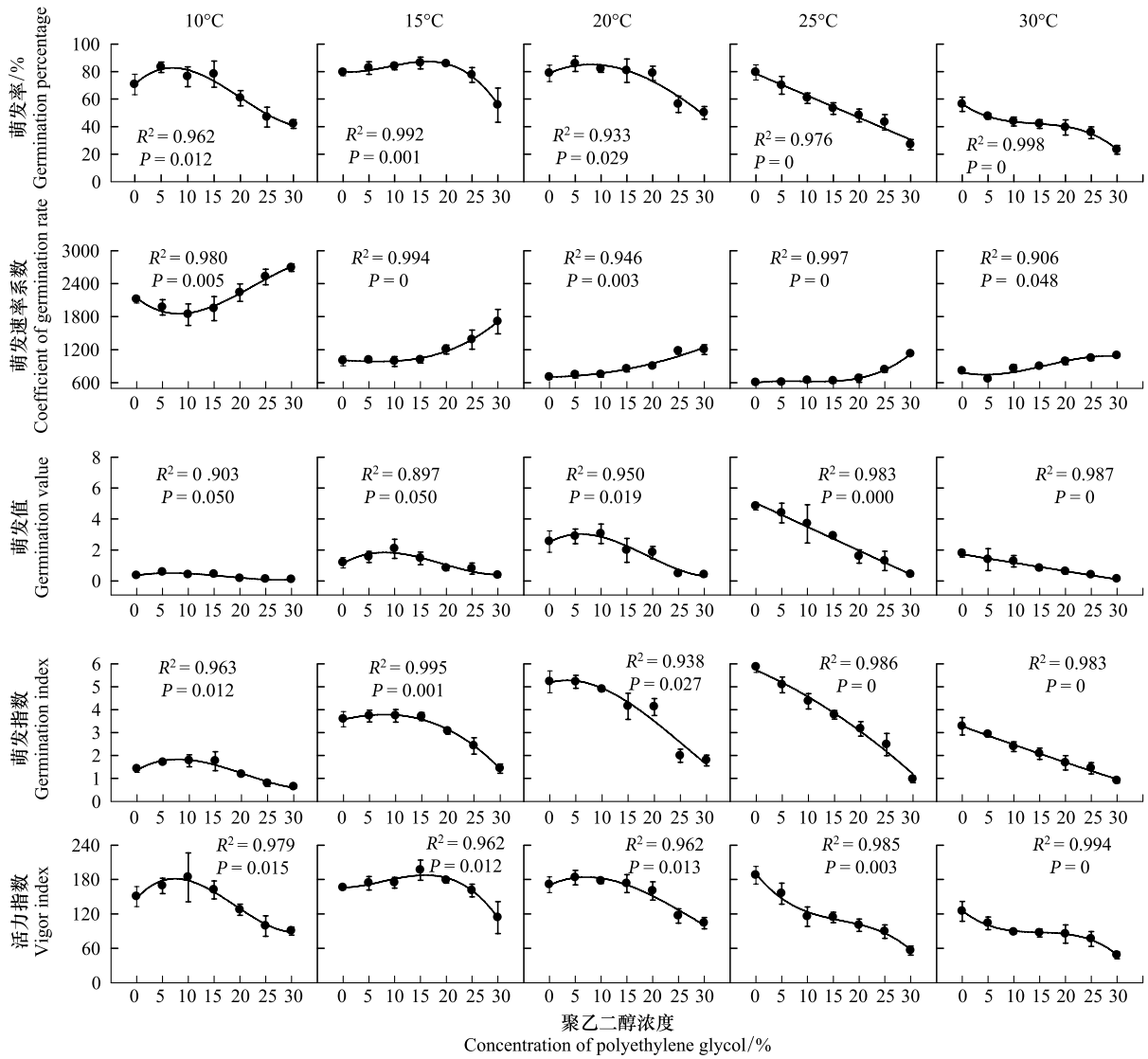

图 1　不同温度和聚乙二醇模拟干旱胁迫下柠条锦鸡儿种子的萌发率、萌发速率系数、萌发值、萌发指数和活力指数

Fig. 1　Germination percentage, coefficient of germination rate, germination value, germination index and vigor index of *Caragana korshinskii* Kom. seeds under different temperature and simulated drought stress of different concentrations of polyethylene glycol (PEG).

2.3　温度和 PEG 模拟干旱胁迫的交互作用对种子萌发的影响

从表 1 可以看出,温度和 PEG 模拟干旱胁迫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的影响均达到极显著水平($P<0.01$)。

表 3 不同温度下柠条锦鸡儿种子萌发参数和 PEG 浓度间的回归分析

Table 3 Regression analysis on the relationship between PEG concentration and germination parameters of *Caragana korshinskii* Kom. seeds

温度 Temperature	萌发率 *GP*				萌发速率系数 *CGR*				萌发值 *GV*				萌发指数 *GI*				活力指数 *VI*			
	Model	R^2	*F*	*P*	Model	R^2	*F*	*P*	Model	R^2	*F*	*P*	Model	R^2	*F*	*P*	Model	R^2	*F*	*P*
10℃	C	0.962	25.43	0.012	C	0.98	49.26	0.005	C	0.903	9.26	0.050	C	0.963	26.08	0.012	C	0.979	47.03	0.005
15℃	C	0.992	120.11	0.001	C	0.994	152.35	0.000	C	0.897	8.70	0.050	C	0.995	194.07	0.001	C	0.962	25.49	0.012
20℃	C	0.933	13.88	0.029	Q	0.946	34.99	0.003	C	0.950	19.00	0.019	C	0.938	15.20	0.027	C	0.962	25.14	0.013
25℃	L	0.976	205.13	0.000	C	0.997	314.95	0.000	L	0.983	292.98	0.000	Q	0.986	137.08	0.000	C	0.985	66.86	0.003
30℃	C	0.998	469.23	0.000	C	0.906	9.58	0.048	L	0.987	367.38	0.000	L	0.983	291.06	0.000	C	0.994	173.73	0.000

C、Q 和 L 分别表示三次曲线、二次曲线和直线模型 C, Q and L indicates Cubic, Quadratic and Linear model respectively.

3 讨论

种子萌发是植物生活史的关键环节,种子萌发策略对荒漠地区植物的种群更新及植被恢复都具有重要意义[22, 25-26]。种子萌发对植物种群动态的影响依赖于其所处特定环境的温度条件[27],因为在种子萌发过程中,种子内进行着活跃的物质代谢反应,在一定的范围内,相对较高的温度对种子萌发具有促进作用,超过某一特定温度范围的过高和过低温度均不利于种子萌发[4, 9]。例如,合柱金莲木种子在 15℃的相对低温下萌发即受到抑制[7],较低的温度不仅引起种子萌发率降低,萌发时间延迟,而且易导致幼苗畸形发育甚至死亡[3]。相反的研究结果也有报道,例如,盛海燕等[9]研究发现,15℃是明党参和峨参种子萌发的温度上限,高于这一温度萌发即受到明显抑制。

不同植物种子萌发对温度选择的这种较大差异可能与其分布区的自然生境有关,尤其在不可预测的荒漠生境中,种子萌发可能因环境的多变而具有更大的不确定性。本研究发现,柠条锦鸡儿种子萌发率在 15℃下最大,在低浓度 PEG 胁迫条件下最高可达 86.3%,高于这一温度后,萌发率随温度升高逐渐减小,30℃下萌发率最低;萌发值、萌发指数和活力指数均在 10℃下最小,且随温度的升高先增大后减小。尽管在 25℃下萌发较快,萌发值和萌发指数最大,但在这一温度下萌发率和活力指数均急剧下降,因此综合全部萌发参数看,15—20℃应该是柠条锦鸡儿种子萌发的适宜温度条件。在降雨量和降雨时间高度不确定的荒漠环境中,高温下种子萌发形成的幼苗可能因随之而来的干旱胁迫而面临大量死亡的风险[5]。柠条锦鸡儿种子于 6 月中下旬成熟散落,在干旱的荒漠地区,这一季节的土壤表面温度已达到甚至超过 30℃,根据我们在野外调查中的观察,成熟散落于地表的柠条锦鸡儿种子遇降雨萌发后几乎无一例外地因随之而来的干旱胁迫而死亡,这可能是造成柠条锦鸡儿种群难以自然更新的重要瓶颈因素。因此,较高的温度对种子萌发的抑制作用可保证少量的柠条锦鸡儿种子能够进入土壤种子库从而逃脱萌发后的死亡厄运,而对这些少量幸存的种子来说,能在偏低温度下萌发也是一种适应性的保护策略,因为在春季较低的温度条件下,种子遇有偶然的降水提早萌发可使幼苗有足够时间在夏季高温到来之前发育出强大的根系,提高对干旱胁迫的抵抗力[6],从而降低干旱造成的死亡风险,大大提高了种子萌发后幼苗存活和建立的机会。

水分是影响荒漠地区植物种子萌发、幼苗建立和生态系统稳定的主要环境因子,幼苗建立期间的水资源短缺是限制荒漠地区植物通过有性繁殖方式实现种群更新的重要瓶颈因素[28]。植物种子的萌发特性与其自然分布区的气候和生境条件密切相关,是植物对分布区自然生境长期适应的结果[1]。在萌发过程中,种子可通过增加保护酶活性和体内渗透调节物质适应水分胁迫,以最大限度地减轻水分胁迫对萌发过程带来的伤害[11],尤其是荒漠地区植物的种子在萌发过程中耐受水分胁迫的能力可能更强,甚至一些植物的种子在土壤含水量为 1—2%时即能启动萌发过程[5, 28]。PEG 模拟水分胁迫通过抑制种子的吸水过程而抑制种子的萌发[14],而且种子萌发后胚根和胚轴的生长对 PEG 胁迫的反应更为敏感[29]。大量研究结果显示,随着干旱胁迫程度的增强,萌发率、萌发指数和活力指数等均呈下降趋势[10, 14, 18, 30],但也有低浓度 PEG 处理促进植物种子萌发的研究报道[10-11],An 等[31]还发现,杠柳(*Periploca sepium* Bunge)种子的萌发在中等程度的 PEG 胁迫条件下不受温度的影响。本研究中,在 20℃以下时低浓度的 PEG 对柠条锦鸡儿种子萌发表现出一定的促进

作用,而在较高温度(25℃和 30℃)下,萌发率、萌发值、萌发指数和活力指数均随 PEG 胁迫程度的增强而减小,且萌发进程减缓,这些结果与上述研究者的结论基本一致,种子萌发在不同温度下对 PEG 胁迫反应的差异反映了温度和 PEG 模拟干旱胁迫对柠条锦鸡儿种子萌发的交互影响。与回振龙等[13]报道的紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)种子和王进等[15]报道的苦马豆种子能够耐受的 PEG 胁迫浓度(10%)相比,柠条锦鸡儿具有更强的耐受干旱胁迫的能力,尤其在 15℃和 20℃下,20% PEG 处理种子的萌发率仍高于对照,甚至最高 PEG 浓度(30%)处理的种子在 25℃和 30℃下仍有 26.9%和 23.1%能够萌发,表明本研究设置的最高 PEG 浓度可能未达到柠条锦鸡儿种子能够耐受的临界 PEG 浓度,但 30% PEG 已达到或超过一些植物种子的耐受临界值[6, 11, 29];从萌发率看,本研究低于 20℃条件下的 PEG 胁迫浓度均未达到李宏等[32]所定义的耐旱临界值与极限值标准,而在 25℃和 30℃下的 PEG 浓度也仅在其临界值范围内,曾彦军等[22]也有类似的研究报道。此外,根据孙景宽等[33]的报道,在 25℃下 20% PEG 胁迫时采自新疆吐鲁番地区的柠条锦鸡儿种子的萌发率即急剧降低,这与本研究的结果有一定出入,与曾彦军等[22]的结果相比差异更大,可能是不同种源地的种子导致了这些差异,但具体原因仍需要更多相关的研究数据提供佐证。

不同温度下柠条锦鸡儿种子的萌发参数与 PEG 浓度间的回归关系有一定差异,总的趋势是萌发参数与 PEG 浓度的相关性随温度的升高而增强,萌发率、萌发值、萌发指数和活力指数与 PEG 浓度的相关系数均在较高温度(25℃或 30℃)下最大,而在 15℃下仅萌发速率系数和活力指数与 PEG 浓度间的相关性达显著水平,表明在这一温度下柠条锦鸡儿种子萌发对干旱胁迫的耐受性最强,这与 Gorai 等[30]的研究报道一致,他们发现,*Henophyton deserti* 种子的萌发在 15°C 和 20°C 的较低温度下比 25°C 的较高温度下对 PEG 胁迫的耐性更强,刘自刚等[16]以桔梗(*Platycodon grandiflorum*)种子为材料,也发现萌发率在较低温度(10℃)下随着干旱胁迫程度的增强先增大后减小,而在较高温度下均随干旱胁迫程度的增强持续减小。在不可预测的荒漠环境中,植物种子的快速萌发和推迟萌发(或休眠)都是对分布区生境长期适应的结果,前一策略可通过延长种子萌发后幼苗的生长时间而增强在干旱环境中的竞争优势,而后一策略可提高种子对不稳定环境的适应能力[34],对干旱地区的植物来说,在水分胁迫条件下种子萌发率的降低可能是对干旱沙区生境的一种适应性机制[17],避免了种子遇少量降雨萌发形成的幼苗因缺乏连续降雨而造成的大量死亡[35],即有效降低了“闪苗”的风险。种子萌发在夏季高温条件下对干旱胁迫的敏感性提高了柠条锦鸡儿在沙区生境的适合度,是其在沙区环境的成功定居和种群更新的重要保障。夏季高温下遇有少量降雨而一定程度进入水合状态但并未萌发的种子可能因反复的吸水和脱水而进入次生休眠[36]以适应干旱胁迫[35],种子休眠率的提高[37]使更多的种子能够有机会进入土壤种子库而存活下来,尽管在种子散落期间面临强烈的昆虫和啮齿动物捕食的压力[38-39],但这些经反复吸水和脱水“诱导”而幸存下来的休眠种子可能会成为柠条锦鸡儿幼苗增补和种群更新的重要种子来源。另一方面,种子在较低温度下对干旱胁迫的较强耐受能力[16, 30]也为其在早春较低的温度条件下萌发提供了保障,这些幸存于土壤种子库中的休眠种子一旦遇有降水即可快速萌发[31],而种子在春季低温期间的提早萌发可保证幼苗根系充分发育的时间,增强幼苗对夏季降雨间隔期内强烈干旱的耐受能力,进而增大幼苗存活和建立的机会。

参考文献(References):

[1] Baskin C C, Baskin J M. Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination. San Diego: Academica Press, 1998: 16-17.

[2] Fennner M, Thompson K. The Ecology of Seeds. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.

[3] 丁琼, 王华, 贾桂霞, 郝玉光. 沙冬青种子萌发及幼苗生长特性. 植物生态学报, 2006, 30(4): 633-639.

[4] 宋兆伟, 郝丽珍, 黄振英, 李娜, 赵清岩. 光照和温度对沙芥和斧翅沙芥植物种子萌发的影响. 生态学报, 2010, 30(10): 2562-2568.

[5] 张颖娟, 王玉山, 李青丰. 西鄂尔多斯珍稀濒危植物长叶红砂种子萌发特征. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2572-2576.

[6] 曾璠, 冷俐, 包维楷, 周志琼. 旱生灌木岷谷木蓝种子的休眠与萌发特征. 生态学杂志, 2009, 28(12): 2452-2459.

[7] 柴胜丰, 蒋运生, 韦霄, 王满莲, 李虹, 漆小雪. 濒危植物合柱金莲木种子萌发特性. 生态学杂志, 2010, 29(2): 233-237.

[8] 吴彦, 刘庆, 何海, 林波, 尹华军. 光照与温度对云杉和红桦种子萌发的影响. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2229-2232.

[9] 盛海燕, 葛滢, 常杰, 李伟成. 环境因素对伞形科两种植物种子萌发的影响. 生态学报, 2004, 24(2): 221-226.

[10] 史薇, 徐海量, 赵新风, 凌红波, 李媛. 胀果甘草种子萌发对干旱胁迫的生理响应. 生态学报, 2010, 30(8): 2112-2117.
[11] 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. 西北植物学报, 2013, 33(10): 2043-2049.
[12] An Y Y, Liang Z S. Drought tolerance of*Periploca sepium* during seed germination: antioxidant defense and compatible solutes accumulation. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, 35(3): 959-967.
[13] 回振龙, 李自龙, 刘文瑜, 李朝周, 张鑫, 徐毅, 张晓芳, 王栋. 黄腐酸浸种对 PEG 模拟干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响. 西北植物学报, 2013, 33(8): 1621-1629.
[14] 李文娆, 张岁岐, 山仑. 水分胁迫下紫花苜蓿和高粱种子萌发特性及幼苗耐旱性. 生态学报, 2009, 29(6): 3066-3074.
[15] 王进, 张勇, 吕彪, 陈广泉, 颜霞. 干旱胁迫对破除硬实的苦马豆和披针叶黄华种子萌发影响. 西北林学院学报, 2011, 26(5): 82-86.
[16] 刘自刚, 沈冰, 张雁. 桔梗种子萌发对低温、干旱及互作胁迫的响应. 生态学报, 2013, 33(8): 2615-2622.
[17] Zeng Y J, Wang Y R, Zhang J M.Is reduced seed germination due to water limitation a special survival strategy used by xerophytes in arid dunes? Journal of Arid Environments, 2010, 74(4): 508-511.
[18] Zeng Y J, Wang Y R, Baskin C C, Baskin J M. Testing seed germination responses to water and salinity stresses to gain insight on suitable microhabitats for restoration of cold desert shrubs. Journal of Arid Environments, 2014, 100-101: 89-92.
[19] De Queiroga Miranda R, Correia R M, de Almeida-Cortez J S, Pompelli M F. Germination of *Prosopis juliflora* (Sw.) D C. seeds at different osmotic potentials and temperatures. Plant Species Biology, 2014, 29(3): E9-E20.
[20] 杨慧玲, 梁振雷, 朱选伟, 梅世秀, 王会勤, 申艳, 黄振英. 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, 2012, 32(24): 7757-7763.
[21] 郑明清, 郑元润, 姜联合. 毛乌素沙地 4 种沙生植物种子萌发及出苗对沙埋及单次供水的响应. 生态学报, 2006, 26(8): 2474-2484.
[22] 曾彦军, 王彦荣, 萨仁, 田雪梅. 几种旱生灌木种子萌发对干旱胁迫的响应. 应用生态学报, 2002, 13(8): 953-956.
[23] Boscagli A, Sette B. Seed germination enhancement in*Satureja montana* L. ssp. montana. Seed Science and Technology, 2001, 29(2): 347-355.
[24] Czabator F J. Germination value: an index combining speed and completeness of pine seed germination. Forest Science, 1962, 8(4): 386-396.
[25] 刘志民, 蒋德明, 高红瑛, 常学礼. 植物生活史繁殖对策与干扰关系的研究. 应用生态学报, 2003, 14(3): 418-422.
[26] 武高林, 杜国祯. 植物种子大小与幼苗生长策略研究进展. 应用生态学报, 2008, 19(1): 191-197.
[27] Keller M, Kollmann J. Effects of seed provenance on germination of herbs for agricultural compensation sites. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1999, 72(1): 87-99.
[28] Liu H L, Shi X, Wang J C, Yin LK, Huang Z Y, Zhang D Y. Effects of sand burial, soil water content and distribution pattern of seeds in sand on seed germination and seedling survival of*Eremosparton songoricum* (Fabaceae), a rare species inhabiting the moving sand dunes of the Gurbantunggut Desert of China. Plant and Soil, 2011, 345(1/2): 69-87.
[29] 朱教君, 李智辉, 康宏樟, 范业展. 聚乙二醇模拟水分胁迫对沙地樟子松种子萌发影响研究. 应用生态学报, 2005, 16(5): 801-804.
[30] Gorai M, El Aloui W, Yang X J, Neffati M. Toward understanding the ecological role of mucilage in seed germination of a desert shrub*Henophyton deserti*: interactive effects of temperature, salinity and osmotic stress. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 727-738.
[31] An Y Y, Liang Z S, Zhang Y.Seed germination responses of *Periploca sepium* Bunge, a dominant shrub in the Loess hilly regions of China. Journal of Arid Environments, 2011, 75(5): 504-508.
[32] 李宏, 程平, 郑朝晖, 孙守文, 李丕军, 王宝庆. 盐旱胁迫对 3 种新疆造林树木种子萌发的影响. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1466-1473.
[33] 孙景宽, 张文辉, 张洁明, 刘宝玉, 刘新成. 种子萌发期 4 种植物对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价研究. 西北植物学报, 2006, 26(9): 1811-1818.
[34] Rice K J, Dyer A R. Seed aging, delayed germination and reduced competitive ability in *Bromus tectorum*. Plant Ecology, 2001, 155(2): 237-243.
[35] 刘有军, 刘世增, 纪永福, 马全林, 张德魁, 张锦春, 魏林源. 碟果虫实种子萌发对策及生态适应性. 生态学报, 2010, 30(24): 6910-6918.
[36] Ramírez-Tobías H M, Peña-Valdivia C B, Trejo C, Aguirre R J R, Vaquera H H. Seed germination of *Agave* species as influenced by substrate water potential. Biological Research, 2014, 47(1): 11-11.
[37] Zhu Y J, Yang X J, Baskin C C, Baskin J, Dong M, Huang Z Y. Effects of amount and frequency of precipitation and sand burial on seed germination, seedling emergence and survival of the dune grass*Leymus secalinus* in semiarid China. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 399-409.
[38] 赵晓英. 三种锦鸡儿属植物的更新对策研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2004.
[39] 赵晓英, 任继周. 食种子动物对三种锦鸡儿属植物繁殖更新的影响. 生物多样性, 2005, 13(6): 514-519.