

聚乙二醇(PEG)模拟干旱胁迫对干旱河谷 5种木蓝种子萌发的影响*

孙霞^{1,2} 高信芬^{1**}

(¹中国科学院成都生物研究所 成都 610041)

(²中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 以川西干旱河谷地区的5种木蓝属植物的种子为材料,观测其形态特征以及聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱胁迫对种子萌发的影响。实验结果表明,供试木蓝属植物种子的物理特征(大小、千粒重)与萌发特性之间无显著相关性,而种子硬实率与发芽率则显著相关;不同浓度的PEG胁迫对种子的萌发均有一定的延缓作用,并且种子的发芽率、发芽势和发芽指数均随胁迫强度的增加呈现下降趋势。综合比较5种木蓝植物种子的抗旱性,在PEG浓度低于150 g/L的轻度干旱胁迫下抗旱性由强到弱依次为:刺序木蓝>河北木蓝~灰色木蓝~四川木蓝>多花木蓝;与采自茂县岷江河谷的刺序木蓝相比,来源于泸定大渡河河谷的刺序木蓝的种子萌发对土壤水分的要求较低,并且相同水分条件下后者发芽率、发芽势和发芽指数也显著高于前者,这可能与各自的种源地在气候、水分及土壤条件上的差异有关。图3 表5 参25

关键词 聚乙二醇(PEG); 干旱胁迫; 木蓝; 种子; 萌发

CLC Q948.112.3 : Q945.78

Effect of Polyethylene Glycol (PEG) Simulated Drought Stress on Seed Germination of Five Species of *Indigofera* L. from Dry Valleys*

SUN Xia^{1,2} & GAO Xinfen^{1**}

(¹Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Using the seeds of five species of *Indigofera* L. (Leguminosae-Papilionoideae DC.) collected from dry valleys in western Sichuan, China as test material, the effect of polyethylene glycol (PEG-6000) simulated drought stress on their germination was studied. The results indicated that there was no obvious relationship between seed germination property and its physical characters (such as seed size, thousand seed weight) under drought stress, but seed germination rate is obviously related to its hard seed percentage. The results also showed that PEG solution of different concentration could retard the germination of seeds in different strength, and the germination rate, germination potential and germination index all decreased with increasing of PEG concentration. The drought-resistance order of five species under lower level drought stress at 50~150 g/L PEG solution was *I. silvestrii* > *I. bungeana* ≈ *I. cinerascens* ≈ *I. szechuensis* > *I. amblyantha*. The seed germination of *I. silvestrii* from Daduhe River valley (Luding) requires lower water condition than that from Min River valley (Maonian), and the former's germination rate, germination potential and germination index all are obviously higher than latter in the same water level. This might be due to the differences of microenvironment (such as climate, rainfall, soil etc) in the two places. Fig 3, Tab 5, Ref 25

Keywords polyethylene glycol (PEG); drought stress; *Indigofera*; seed; germination

CLC Q948.112.3 : Q945.78

木蓝属(*Indigofera* L.)是豆科蝶形花亚科(Leguminosae-Papilionoideae DC.)中一个大属,约有700~800种,广泛分布于热带和亚热带地区,在我国主产于西南部及南部,四川是其主要分布区之一^[1]。四川木蓝、灰色木蓝、河北木蓝和刺序木蓝是四川西部干旱河谷地区常见的几种优势灌木,其生长及植株形态对土壤水分的变化比较敏感。多花木蓝仅分布于中国长江以北地区,在岷江上游干旱河谷支沟中湿润的沟边有少量分布。作为川西干旱河谷地区的本地植物种,这几

种木蓝属灌木具有适应当地气候与环境的机制,在植被恢复中具有潜在的利用价值。

种子萌发是植物生活史的一个关键环节,种子萌发特性及其与生态因子关系的研究是种子生理生态学的重要内容。干旱胁迫作为植物逆境胁迫的最普遍的形式,是影响种子萌发的重要因素。种子萌发对干旱胁迫的响应反映了其适应局地环境的生态机制。对生长于不同生境中的植物萌发特性的研究可揭示其生活史特征,为本地植物种的开发利用提供依据^[2]。有关种子萌发特性与干旱胁迫关系的研究比较多^[3~9],目前关于多花木蓝萌发特性已有相关研究^[10~12],而木蓝属其他种的萌发研究尚未见报道,也没有干旱胁迫下木蓝种子萌发种内与种间的比较研究。木蓝属灌木开花及结果量较大,但在贫瘠的干旱河谷地区,当年生灌木幼苗稀少,种群更新

收稿日期: 2010-01-06 接受日期: 2010-01-26

*“十一五”国家重大科技支撑计划课题(No. 2006BAC01A11)资助
Supported by the Key Sci-tech Project of the 11th Five-year Plan of China (No. 2006BAC01A11)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: xfgao@cib.ac.cn)

速度缓慢. 我们研究了5种木蓝属种子的物理特性、种子萌发对PEG模拟干旱胁迫的响应及种内与种间的差异, 以期为深入探索干旱河谷地区木蓝属灌木对当地环境的适应机理和野生木蓝种质的开发利用提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 材料

供试种子采自岷江上游干旱河谷和大渡河上游干旱河谷地区, 共5个种(表1). 种子于2008年10月、11月采收后, 置于通风条件良好的室内风干, 正常保存. 选择成熟、饱满且大小适中、均匀一致的种子作为萌发实验材料. 实验开始前, 将种子于-4℃冰箱中存放1 wk, 以解除休眠.

表1 供试材料

Table 1 Experiment materials

植物名称 Species	采集地 Localities	采集时间 Collected time
多花木蓝 <i>I. amblyantha</i>	岷江上游(茂县) Maoxian, Min River valley	2008.10
四川木蓝 <i>I. szechuensis</i>	岷江上游(茂县) Maoxian, Min River valley	2008.10
河北木蓝 <i>I. bungeana</i>	大渡河上游(泸定) Luding, Daduhe River valley	2008.11
刺序木蓝 I <i>I. sylvestrii</i> I	岷江上游(茂县) Maoxian, Min River valley	2008.10
刺序木蓝 II <i>I. sylvestrii</i> II	大渡河上游(泸定) Luding, Daduhe River valley	2008.11
灰色木蓝 <i>I. cinerascens</i>	大渡河上游(泸定) Luding, Daduhe River valley	2008.11

1.2 方法

1.2.1 种子物理特征 选择籽粒饱满、发育良好的成熟种子或果实, 将其置于双面胶带上, 在体视显微镜下观察其形状、颜色、表面纹饰并拍照, 同时用游标卡尺测量种子的大小, 每份样品测量10粒, 取平均值. 并分别从各供试材料中随机选取100粒种子, 称重, 测其千粒重; 种子含水量根据《国际种子检验规程》(ISTA)的规定, 采用高温烘干法, 于105℃、12 h烘干^[13], 3次重复.

1.2.2 种子硬实率与生活力 分别随机抽取净种子50粒, 浸泡于自来水中24 h, 统计未吸涨种子数, 计算种子硬实率, 3次重复. 在自来水中浸种24 h后, 种皮依旧坚硬不吸胀的种子确定为硬实种子.

种子硬实率=硬实种子数/供试种子总数×100%

种子活力采用TTC染色法检测. 选出3个重复, 每个重复50粒种子, 将种子用温水(约35℃)浸泡1 d, 使种子充分吸胀, 以增强种胚的呼吸强度, 使显色迅速(对仍未吸胀的种子, 则用针刺破种皮, 使之尽快充分吸胀. 剥出种仁, 加入适量1% TTC以充分浸泡种仁为度). 然后置于恒温箱中(30~35℃)保温60 min, 观测染色情况. 胚和子叶全部染色或仅有部分分子叶染色较淡的种子为有活力种子, 其余均为无活力种子^[14~16].

种子生活力=有活力种子数/供试种子总数×100%

1.2.3 PEG胁迫实验 干旱胁迫条件由聚乙二醇(PEG 6000)溶液产生. 共设6组水分梯度, 即PEG质量浓度分别为0(蒸馏水对照组)、50、100、150、200、250 g/L, 与之对应的溶

液水势约为0、-0.10、-0.20、-0.40、-0.60、-0.86 MPa^[17]. 在昼/夜变温条件下萌发, 3次重复, 每次重复50粒种子. 发芽实验前, 用始温50℃的水浸种24 h. 再用1%的次氯酸钠溶液浸泡杀菌30 min, 然后用蒸馏水洗净, 阴干. 再将种子均匀放入垫有两层滤纸的9 cm培养皿中, 加入对应浓度的PEG溶液. 将培养皿放入人工气候箱(型号 PYX-300Q-300L)内进行种子萌发实验, 设定人工气候箱光照强度为35 μmol m⁻² S⁻¹(每天7:00~19:00光照, 其余黑暗), 温度为昼/夜25℃/15℃(昼14 h/夜10 h). 实验过程中, 每3 d更换一次滤纸, 补充相应浓度的PEG溶液, 以保持培养皿内溶液浓度恒定. 种子的萌发以胚根长到种子长度的1/2为标志, 将发芽种子挑出, 每24 h记录一次发芽情况. 实验时间为41 d.

对于未发芽的种子用TTC染色法检测, 分出有活力的种子、死种子及硬实种子.

2 数据处理

采用Excel 2003程序绘图和SPSS 13.0统计分析实验数据, 进行相同植物的不同PEG浓度以及相同PEG浓度下不同植物间的Duncan方法0.05显著水平上的多重比较. 根据每天记录的种子发芽数据计算以下指标: 1) 发芽率是指发芽实验结束时, 正常发芽的种子数与供试种子总数的百分比, 计算公式为: $r_G = N/D \times 100\%$; 2) 发芽势是指种子发芽数达到高峰时的正常发芽种子总数与供试种子总数的百分比, 计算公式为: $p_G = N_M/D \times 100\%$; 3) 发芽指数是种子发芽数和发芽速度的综合测试指标, 计算公式为: $I_G = \sum (N_i/n)$.

其中, r_G 为发芽率, p_G 为发芽势, I_G 为发芽指数, N_i 为第*i*天发芽的种子数量, N 为发芽种子总数, N_M 为种子发芽达到最高峰时的发芽种子数量(本实验中设定为从实验开始日起, 22 d内发芽种子数量), n 为与 N_i 相对应的种子发芽天数, D 为供试种子的总数^[18].

3 结果与分析

3.1 种子物理性质

木蓝种子的形状、颜色、表面纹饰各不相同(图1), 6组

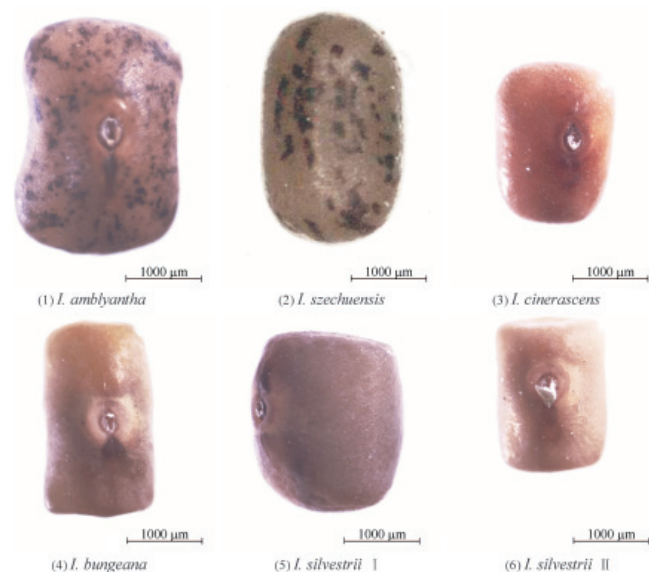


图1 种子的形态

Fig. 1 Morphological characters of *Indigofera* seeds

表2 5种木蓝属植物种子的物理性质 ($\bar{x} \pm s$, $N=3$)
Table 2 Physical characters of *Indigafera* seeds ($\bar{x} \pm s$, $N=3$)

Species	<i>I. amblyantha</i>	<i>I. szechuensis</i>	<i>I. cinerascens</i>	<i>I. bungeana</i>	<i>I. silvestrii</i> I	<i>I. silvestrii</i> II
长度 Length (l/mm)	3.54±0.50 a	3.31±0.59 a	2.32±0.23 d	2.57±0.24 c	2.49±0.34 cd	2.81±0.26 b
宽度 Width (b/mm)	2.63±0.26 a	2.09±0.16 b	1.87±0.11 c	1.98±0.14 bc	1.86±0.18 c	1.85±0.28 c
千粒重 1000 seeds weight (m/g)	20.78±1.12 a	12.22±1.03 b	6.56±1.04 d	8.30±0.10 c	7.98±0.10 d	6.90±0.12 d
千粒干重 Thousand-seed dry weight (m_{DW} /g)	18.66±0.09 a	11.02±0.10 b	5.64±1.30 e	7.30±0.07 c	7.06±0.10 c	6.20±1.11 d
含水量 Moisture content (r/%)	10.26±0.09 c	9.81±0.13 d	14.13±1.07 a	12.12±0.48 b	11.53±0.50 b	10.15±0.27 cd

不同小写字母代表行向各指标显著差异 ($P<0.05$)。下同

The different small letters in lines indicate significant difference ($P<0.05$). The same below

表3 木蓝种子的硬实率与活力 ($\bar{x} \pm s$, $N=3$)
Table 3 Hard seed percentage and seed viability of five species of *Indigafera* ($\bar{x} \pm s$, $N=3$)

Species	<i>I. amblyantha</i>	<i>I. szechuensis</i>	<i>I. cinerascens</i>	<i>I. bungeana</i>	<i>I. silvestrii</i> I	<i>I. silvestrii</i> II
硬实率 Hard seed percentage (r/%)	88.00±2.00 b	90.00±4.00 ab	68.00±3.46 c	96.67±2.31 a	84.67±1.15 bc	70.00±9.17 c
生活力 seed viability (r/%)	99.33±1.15	98.00±2.00	98.67±1.15	100.00±0.00	96.00±2.00	92.00±2.00

木蓝基本形状为圆柱形或椭圆形, 表面均光滑无毛, 其中多花木蓝和四川木蓝表面纹饰比较明显, 部分供试河北木蓝种子表面具少量纹饰, 而灰色木蓝、刺序木蓝表面几乎无纹饰。基本颜色为褐色、棕色、灰绿色, 表面纹饰为黑色或黑褐色。

5种木蓝种子在大小(长度和宽度)、千粒重、含水量上均有不同程度的差异(表2), 其中多花木蓝种子大小、千粒重与其他木蓝种类相比明显偏大, 两个干旱河谷的刺序木蓝居群的种子大小、千粒重、含水量也有显著差异, 这是对干旱河谷气候、水分和土壤条件适应的结果。

3.2 种子硬实率与活力

川西干旱河谷的这几种乡土木蓝种子硬实率均较高, 测定结果均在70%以上, 其中河北木蓝种子硬实率高达96.67%(表3)。木蓝种子的硬实特性是对干旱河谷高温缺水条件的适应, 也是造成木蓝种子发芽困难的主要原因之一。

经TTC染色, 供试木蓝种子的染色率均在92%~99%之间(表3), 所以认为实验所用的木蓝种子活力很高, 发芽潜力良好。

3.3 PEG胁迫下种子发芽特征

3.3.1 发芽过程的基本特征 从图2中可以看出, 随着干旱胁迫程度加剧, 供试木蓝种子的发芽时间有一定的延缓, 发芽率也逐渐降低。在蒸馏水对照(0 g/L)和低浓度PEG溶液(50 g/L)的培养条件下, 种子发芽的准备期为2~3 d, 发芽高峰期比较明显。随着PEG溶液浓度的增大, 发芽准备期和高峰期逐渐延迟, 且这种延缓作用随PEG溶液浓度升高而愈加明显; 在PEG溶液为250 g/L的培养条件下, 四川木蓝发芽准备期长达30 d, 且40 d内的发芽率极低(仅为2.63%), 发芽高峰期不显著(不同木蓝种类有所差异); 在300 g/L PEG溶液培养条件下, 所有木蓝种子在实验进行的40 d内均未见萌发, 全部受到干旱胁迫的抑制。

3.3.2 发芽率 从图3中发芽各项指标的对比可以看出, 供试木蓝种子发芽率均因干旱胁迫的加剧而降低。PEG胁迫对种子萌发的影响(以四川木蓝为例)如下: 与对照相(0 g/L PEG)相比, 在50 g/L PEG浓度下四川木蓝种子的发芽率为73%, 下降了9%; 在100 g/L和150 g/L PEG浓度下, 发芽率比相邻水分浓度分别下降了7%和3%; 但当PEG浓度大于150 g/L时, 发芽率下降幅度明显加大, 在200 g/L和250 g/L的PEG处理下, 四川木蓝种子发芽率分别下降了16%和44%; PEG浓

度为300 g/L时, 发芽率为0, 即种子发芽完全被抑制。总体上看, 同一水分梯度下供试木蓝物种之间的差异为: 在PEG浓度低于200 g/L的轻度及中度干旱胁迫下, 刺序木蓝II和四川木蓝种子发芽率最高, 在对照PEG浓度为0时高达82%, 二者的抗旱性优于其它供试种。但与刺序木蓝II相比, 四川木蓝对干旱胁迫较敏感, 随着PEG浓度升高, 发芽率下降幅度较为显著; 在250 g/L PEG浓度下, 发芽率仅为2.67%, 说明其抗旱性较刺序木蓝II差。实验结果显示, 虽然河北木蓝和刺序木蓝I种子在PEG浓度为0时的发芽率较低, 分别为48.67%和40%, 但由于其发芽率在50~250 g/L PEG浓度范围内变化幅度不大, 尤其是刺序木蓝I, 在PEG浓度为250 g/L时仍保持14.67%的发芽率, 且相邻水分梯度间差异不显著($P>0.05$), 故其抗旱性较强。

实验结束后对未发芽的种子进行活力检测, TTC染色情况显示所有未萌发胚和子叶着色情况良好, 种子均有活力, 推测是由于硬实种子引起种皮透水性差, 从而阻止了种子萌发。

3.3.3 发芽势 发芽势是反映种子品质的重要指标之一。一般认为, 发芽势高的种子播种后发芽整齐^[5]。本次发芽实验设定为从实验开始日起, 22 d内发芽种子数量占供试种子数的百分比为标准, 结果如表4所示。随着胁迫程度的增强, 各组木蓝种子发芽势均呈下降趋势(表4), 说明在PEG模拟干旱胁迫条件下, 种子的发芽高峰期滞后。以四川木蓝为例, 在50 g/L PEG胁迫下, 种子发芽势比对照下降了3.33%, 差异不显著($P>0.05$), 从100 g/L PEG开始下降幅度明显增大, 各相邻水分梯度间发芽差异显著($P\leq 0.05$)。研究发现, 发芽势比发芽率对干旱胁迫更敏感^[19-20]。因此, 在干旱河谷的水分条件下, 干旱可能首先影响发芽势, 而后影响发芽率。

3.3.4 发芽指数 本实验数据(表5)显示, 系列水分梯度下, 各组木蓝种子发芽指数均随干旱胁迫的加剧而下降, 经方差分析, 除河北木蓝和刺序木蓝I在200 g/L到250 g/L的PEG浓度下差异不显著外, 其它种类均差异显著($P\leq 0.05$)。由于发芽指数不仅包含了发芽的种子数量, 还包括了发芽的日期, 是良好的种子活力指标, 它对水分胁迫的反应更加灵敏, 供试木蓝种子的发芽指数从50 g/L的PEG浓度就开始明显下降。种内种间变化趋势如图4所示, 在0~150 g/L的PEG浓度范围内, 各组供试种发芽指数的大小关系为: 刺序木蓝II>四

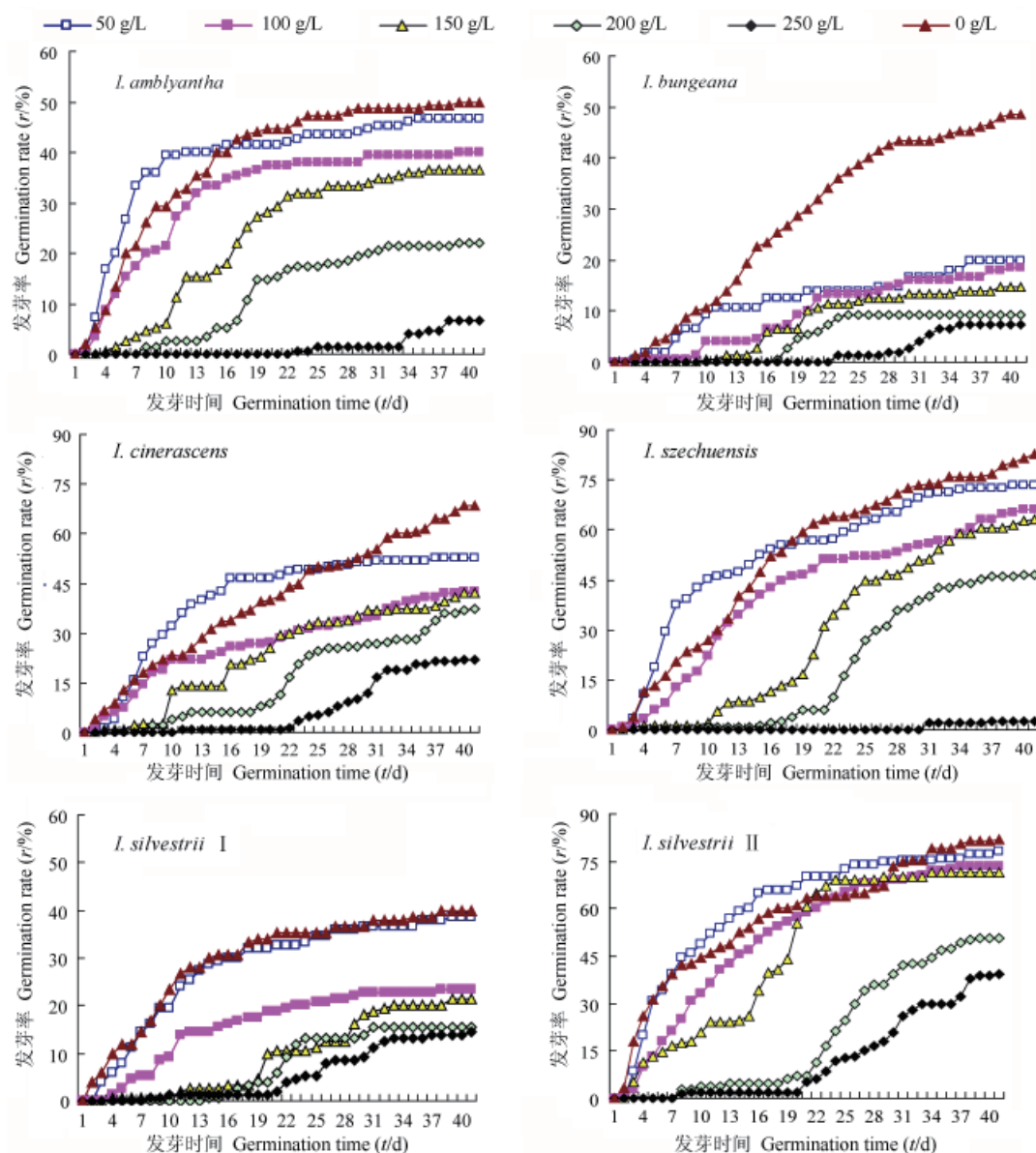


图2 水分梯度下木蓝属种子的发芽过程
Fig. 2 Germination course of *Indigofera* seeds under moisture gradient

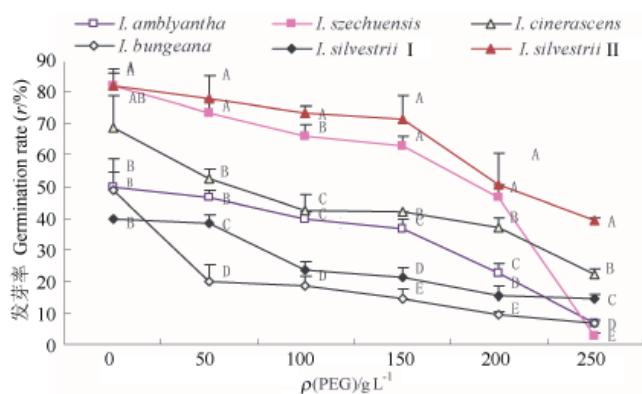


图3 不同PEG浓度下供试种子的发芽率
Fig. 3 Germination rate of *Indigofera* seeds under different PEG concentrations
不同大写字母代表差异显著 ($P < 0.05$)
The different capital letters show significant difference at ($P < 0.05$)

川木蓝 > 多花木蓝 > 灰色木蓝 > 刺序木蓝 I > 河北木蓝; 在 PEG 浓度为 200~300 g/L 的重度干旱胁迫下, 灰叶木蓝、四川木蓝和多花木蓝发芽指数急剧下降, 进一步表明这三种木蓝对重度干旱的适应能力较其余两种木蓝差。

4 讨论

通过对两个干旱河谷木蓝种子形态的比较观察, 发现产地对植物种皮形态的影响很小, 只是在种子的大小、质量上有所不同, 表明同种、不同居群植物的种子形状、颜色、附属物等性状一致^[21]。供试木蓝种子的物理特征 (大小、千粒重) 与萌发特性之间无显著关联, 而种子硬实率与发芽率显著相关。两个不同居群的刺序木蓝种子大小、千粒重、含水量表现出一定差异, 在平均值周围有较小幅度的波动, 这可能与两个干旱河谷的气候、水分及土壤条件有关。由此可见, 种子的形态特征主要受遗传因素的控制, 环境因素也对其具有

表4 不同PEG浓度下供试种子的发芽势 ($\bar{x} \pm s$, $N=3$)Table 4 Germination potential of *Indigofera* seeds under different PEG concentrations ($\bar{x} \pm s$, $N=3$)

$\rho(\text{PEG})/\text{g L}^{-1}$	<i>I. amblyantha</i>	<i>I. szechuensis</i>	<i>I. cinerascens</i>	<i>I. bungeana</i>	<i>I. silvestrii</i> I	<i>I. silvestrii</i> II
0	49.56 $\pm$ 5.82 aB	66.00 $\pm$ 2.41 aA	50.00 $\pm$ 2.41 aB	38.67 $\pm$ 1.76 aC	35.33 $\pm$ 1.77 aC	64.00 $\pm$ 3.06 bA
50	43.33 $\pm$ 2.91 aD	62.67 $\pm$ 1.77 aB	49.34 $\pm$ 1.15 aC	14.00 $\pm$ 1.33 bF	34.67 $\pm$ 1.76 aE	72.67 $\pm$ 3.06 aA
100	38.00 $\pm$ 1.15 bC	52.00 $\pm$ 1.76 bB	32.00 $\pm$ 3.06 cD	13.33 $\pm$ 1.77 bF	20.67 $\pm$ 1.77 bE	65.33 $\pm$ 1.34 bA
150	32.00 $\pm$ 2.00 cC	44.67 $\pm$ 1.34 cB	33.33 $\pm$ 1.76 bC	12.00 $\pm$ 1.15 bcD	11.33 $\pm$ 0.67 cD	69.34 $\pm$ 3.06 abA
200	17.33 $\pm$ 1.34 dB	26.67 $\pm$ 3.72 dA	24.66 $\pm$ 1.15 bC	9.33 $\pm$ 1.77 cD	13.33 $\pm$ 1.76 cC	24.67 $\pm$ 1.76 cA
250	1.33 $\pm$ 0.67 eC	0.00 $\pm$ 0.00 eD	5.33 $\pm$ 0.67 eB	1.78 $\pm$ 0.39 dC	5.33 $\pm$ 1.76 dB	12.67 $\pm$ 3.53 dA

不同小写字母代表列向各指标差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母代表行向各指标差异显著 ($P<0.05$). 下同

The different small letters in columns show significant difference ($P<0.05$), and the different capital letters in lines show significant difference ($P<0.05$). The same below

表5 不同PEG浓度下供试种子的发芽指数 ($\bar{x} \pm s$, $N=3$)Table 5 Germination index of *Indigofera* seeds under different PEG concentrations ($\bar{x} \pm s$, $N=3$)

$\rho(\text{PEG})/\text{g L}^{-1}$	<i>I. amblyantha</i>	<i>I. szechuensis</i>	<i>I. cinerascens</i>	<i>I. bungeana</i>	<i>I. silvestrii</i> I	<i>I. silvestrii</i> II
0	12.93 $\pm$ 0.47 aC	14.75 $\pm$ 0.52 aB	11.61 $\pm$ 0.09 aD	5.82 $\pm$ 0.05 aE	9.59 $\pm$ 0.28 aE	19.96 $\pm$ 0.62 aA
50	11.11 $\pm$ 0.27 bC	12.88 $\pm$ 0.49 bB	10.06 $\pm$ 0.19 bD	7.45 $\pm$ 0.34 bE	7.45 $\pm$ 0.34 bE	18.00 $\pm$ 0.35 bA
100	8.80 $\pm$ 0.56 cC	9.20 $\pm$ 0.02 cB	7.82 $\pm$ 0.32 cD	3.50 $\pm$ 0.12 cE	3.50 $\pm$ 0.12 cE	12.44 $\pm$ 0.13 cA
150	4.21 $\pm$ 0.24 dC	5.04 $\pm$ 0.09 dB	4.40 $\pm$ 0.08 dE	1.66 $\pm$ 0.09 dD	1.66 $\pm$ 0.09 dD	11.07 $\pm$ 0.11 dA
200	1.90 $\pm$ 0.11 eC	2.88 $\pm$ 0.31 eB	0.70 $\pm$ 0.06 eE	1.08 $\pm$ 0.05 eD	1.08 $\pm$ 0.05 eD	3.39 $\pm$ 0.07 eA
250	0.31 $\pm$ 0.04 fD	0.12 $\pm$ 0.08 fB	0.37 $\pm$ 0.04 fD	0.96 $\pm$ 0.07 eC	0.96 $\pm$ 0.07 eC	2.30 $\pm$ 0.04 fA

一定的影响作用。

硬实引起的休眠是防止种子在不适合幼苗存活的条件延迟萌发的一种机制, 将增加种子在整个生活史阶段成功萌发的机会, 是植物适应不确定降水和不可预测环境的一种对策^[2]。木蓝种子含水量低说明其种皮透水性差, 其70%~96.67%的高硬实率也说明了这一点。另外, 刺序木蓝 I 种子的硬实率为84.67%, 显著高于刺序木蓝 II (为70%), 这与其发芽率显著低于相同条件下刺序木蓝 II 的发芽率有直接关系 (例如, 两个刺序木蓝居群在PEG浓度为0时发芽率分别为40%和82%, 差异极为显著)。但是, 河北木蓝种子萌发率低、发芽速度较慢是否与其高硬实率 (98%) 导致的种皮透水性差有关, 还有待深入研究。

各种浓度PEG处理胁迫对供试木蓝种子的萌发均有一定的延缓作用。其中, 300 g/L PEG处理的种子在试验结束后仍未能萌发, 表明这5种木蓝种子萌发的临界PEG水分胁迫值应小于300 g/L; 由于本试验所设置的PEG浓度梯度是从250 g/L直接到300 g/L, 因此并不能准确确定实验所用木蓝种子萌发的临界PEG水分胁迫浓度。从总体上看, 随着PEG浓度的增加, 5种木蓝种子的发芽率、发芽指数和发芽势随胁迫强度的增加呈现下降趋势, 但在150~200 g/L PEG培养条件下, 灰色木蓝、刺序木蓝 I、刺序木蓝 II 的发芽势轻微上升; 刺序木蓝 II 在PEG浓度0~50 g/L范围内的发芽势也呈上升趋势, 这可能是轻度水分亏缺下, 植物的补偿与超补偿生长效应的表现^[22-23]。此外, 在种子萌发初期, 低水平PEG胁迫下的种子萌发率稍高于对照组, 也可能与干旱胁迫下植物的补偿与超补偿效应有关。

植物种子的发芽湿度与植物种群所在地的气候和生境条件密切相关, 是植物对自然环境的一种适应^[24-25]。综合比较系列水分梯度下各组木蓝种子发芽率、发芽势、发芽指数3项指标认为, 在PEG浓度低于150 g/L的轻度干旱胁迫下, 刺序木蓝两个居群的种子的抗旱性优于其它种; 其次为河北木蓝、灰色木蓝、四川木蓝, 这3种木蓝对干旱的适应能力大致在同一水平; 最后为多花木蓝。在PEG浓度高于250 g/L的重

度干旱下, 四川木蓝发芽率、发芽势和发芽指数下降最为显著, 说明其严重干旱胁迫适应力最差。同时, 与刺序木蓝 I 相比, 刺序木蓝 II 种子萌发对土壤水分的要求较低, 相同水分条件下的发芽率、发芽势和发芽指数也显著高于刺序木蓝 I, 这可能与各自的种源地大渡河上游干旱河谷和岷江上游干旱河谷的气候、水分及土壤条件差异有关。

致谢 感谢中国科学院成都生物研究所冷俐高级实验师在种子萌发实验中给予指导和帮助以及裴建高级实验师在实验仪器使用上提供指导和便利条件。

References

- Fang YY (方云亿), Zheng CZ (郑朝宗). A study on the genus *Indigofera* Linn. from China. *Acta Phytota Sin* (植物分类学报), 1989, **27** (3): 161~177
- Zhao XY (赵晓英), Ren JZ (任继周), Wang YR (王彦荣), Li YM (李延梅). Germination responses to temperature and moisture in seed from three species of *Caragana*. *Acta Bot Bor-Occid Sin* (西北植物学报), 2005, **25** (2): 211~217
- Song H. Seed germination of *Thuja orientalis* under PEG osmose treatment. *J For Res*, 1996, **7** (2): 11~15
- Evans CE, Etherington JR. The effects of soil-water potential on seed germination of some British plants. *New Phytol*, 1990, **115**: 539~548
- Zhu JJ (朱教君), Li ZH (李智辉), Kang HZ (康宏樟), Fan YZ (范业展). Effects of polyethylene glycol (PEG)-simulated drought stress on *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seed germination on sandy land. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2005, **16** (5): 801~804
- Chang XL (常学礼), Zhao WZ (赵文智). Study on moisture physiology of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Populus simonii* and water condition of woodland. *J Desert Res* (中国沙漠), 1990, **10** (4): 18~24
- Gutterman Y. Seed germination in desert plants. Berlin, Germany: Springer, 1993. 145~230
- Ma CG (马常耕), Wang JH (王建华). Germination of *Picea* sp. and *Larix* sp. seeds in response to water stresses. *For Sci Res* (林业科学研究), 1994, **7** (7): 121~123

- 9 Zeng YJ (曾彦军), Wang YR (王彦荣), Sa R (萨仁), Tian XM (田雪梅). Response of seed germination of three xeromorphic shrubs to drought stress. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2002, **13** (8): 953~956
- 10 Zhao XS (赵小社), Bi YF (毕玉芬), Xu YF (许岳飞), Sun T (孙涛). Effect of different treatments on seed germination rate of three legume shrubs. *Grassland & Turf* (草原与草坪), 2006, **115** (2): 37~40
- 11 Bai CX (白春霞), Han JG (韩建国), Sun Y (孙彦), Qin GJ (秦歌菊). Study on the relationship between hard-seededness and seed vigor of *Indigofera amblyantha* and *Lepedeza bicolor*. *Acta Pratacult Sin* (草业学报), 2006, **15** (5): 82~88
- 12 Li ZF (李朝凤), Zhao XS (赵小社), Wang YP (王玉萍), Lu FQ (路飞奇). Study on characteristics of hard seeds and germination of *Indigofera Amblyantha* Craib. *Pratacult & Anim Husbandry* (草业与畜牧), 2007, **145** (12): 8~10
- 13 Xu L (徐亮), Bao WK (包维楷), Pang XY (庞学勇). Seed germination characteristics of *Cupressus chengiana* at different temperatures in Maerkang, Sichuan. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2005, **10** (6): 707~711
- 14 Yu SL (于淑兰), Pi S (皮苏). A study on biochemical test of seed viability for 23 kinds of tropical and subtropical tree species. *Seed* (种子), 1994, **74** (6): 2~7
- 15 Yu FY (喻方圆), Tang YF (唐燕飞). A study on viability fast testing of *Zenia insignis* Chun. seed using TTC. *Seed* (种子), 2004, **23** (7): 40~42
- 16 Zhu CH (朱翠华), Yu SL (于淑兰). Rapid viability testing (RVT) of the seeds of *Zoysia* grass. *Seed* (种子), 1999, **100** (1): 19~25
- 17 Michael BE, Kaufaman MR. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiol*, 1973, **51**: 914~916
- 18 Nuneza MR, Calvob L. Effect of high temperatures on seed germination of *Pinus sylvestris* and *Pinus halepensis*. *For Ecol Manage*, 2000, **131**: 183~190
- 19 Humara JM, Lopez M, Cassares A. Temperature and provenance as two factors affecting *Eucalyptus nitens* seed germination. *Forestry*, 2000, **73**: 87~90
- 20 McLarenl KP, McDonald MA. The effects of moisture and shade on seed germination and seedling survival in a tropical dry forest in Jamaica. *For Ecol Manage*, 2003, **183**: 61~75
- 21 Ma J (马骥), Li XR (李新荣), Li JZ (李俊祯), Zhang JG (张景光). Comparative study on microstructure features of seed from 6 species of rare and endangered plants in desert of China. *J Desert Res* (中国沙漠), 2005, **25** (2): 275~280
- 22 Wei H (魏虹), Lin K (林魁), Li FM (李凤民), Zhao SL (赵松岭), Zhang R (张荣), Yuan BZ (原保中). A study of the water compensatory effects on spring wheat in the semiarid regions. *J Lanzhou Univ Nat Sci Ed* (兰州大学学报自然科学版), 1995, **32** (3): 121~126
- 23 Guo XS (郭贤仕). Compensation effect of millet after drought. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1999, **10** (5): 563~566
- 24 Huang ZY, Zhang XS, Zheng GH, Gutterman Y. Influence of light, temperature, salinity and storage on seed germination of *Haloxylon ammodendron*. *J Arid Environ*, 2003, **55** (3): 453~464
- 25 Maria SO, Leticia PLG, Rosaura G, Edmundo GM. Germination of four species of the genus *Mimosa* (Leguminosae) in a semi-arid zone of Central Mexico. *J Arid Environ*, 2003, **55** (1): 75~92