

DOI: 10.5846/stxb201312032878

王慧慧, 王普昶, 赵钢, 孙秋, 龙忠富, 张瑜. 干旱胁迫下白刺花种子大小与萌发对策. 生态学报, 2016, 36(2): - .

Wang H H, Wang P C, Zhao G, Sun Q, Long Z F, Zhang Y. Seed size and germination strategy of *Sophora davidii* under drought stress. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): - .

干旱胁迫下白刺花种子大小与萌发对策

王慧慧¹, 王普昶^{2,*}, 赵 钢¹, 孙 秋³, 龙忠富², 张 瑜²

1 仲恺农业工程学院, 广州 510225

2 贵州省草业研究所, 贵阳 550006

3 贵州省现代农业发展研究所, 贵阳 550006

摘要: 种子大小与种子萌发及其与环境因子的关系是植物种子萌发对策研究中的重要科学问题之一。本文采用 PEG 模拟干旱法研究不同干旱胁迫强度(0、5%、10%、15%、20%)下, 白刺花(*Sophora davidii*)种子萌发进程、种子大小与种子萌发及种子命运的关系。结果如下: 不同干旱胁迫下, 白刺花种子具有相似的萌发进程, 但中度干旱处理(10% PEG)萌发率显著高于零干旱(0% PEG)和重度干旱处理($P < 0.05$), 重度干旱处理(20% PEG)种子萌发开始时间晚于零干旱和中度干旱处理; 种子大小与种子萌发开始时间的关系表现为零干旱处理下呈极显著负线性关系, 中度干旱处理(5% PEG、10% PEG)下无相关关系, 重度干旱处理(15% PEG、20% PEG)下呈负二次曲线关系; 种子大小对种子命运的影响表现为零干旱处理有利于大、小种子萌发和小种子休眠, 中度干旱处理(10% PEG)增加中等种子萌发、大种子休眠和小种子死亡风险, 重度干旱处理(15% PEG、20% PEG)增加大种子死亡风险、中等种子和小种子休眠。综合分析表明, 白刺花种子大小与萌发行为及种子命运的关系具有较强的环境依赖性, 即种子萌发行为表现为顺境下种子越大萌发越快, 逆境下小种子和大种子较中等种子萌发更快; 种子命运表现为顺境增加种子死亡的风险, 中度干扰有利于种子萌发, 逆境则有利于种子休眠。

关键词: 白刺花; 种子大小; 种子萌发对策; 干旱胁迫强度

Seed size and germination strategy of *Sophora davidii* under drought stress

WANG Huihui¹, WANG Puchang^{2,*}, ZHAO Gang¹, SUN Qiu³, LONG Zhongfu², ZHANG Yu²

1 Zhongkai University of agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China

2 Guizhou Institute of Prataculture, Guiyang 550006, China

3 Guizhou Institute of Integrated Agriculture Development, Guiyang 550006, China

Abstract: *Sophora davidii* is an important leguminous shrub that is widely used for revegetating areas experiencing karst rocky desertification in southwest China. Karst is a fragile environment that is very sensitive to environmental and climate change, and is often under considerable drought stress. Seed size is a prominent life history trait of plants. Experiments were conducted in the laboratory to evaluate the effect of osmotic potential and seed size on germination, dormancy and mortality. The effect of drought stress on seed germination was examined by using different concentrations of polyethylene glycol (0, 5%, 10%, 15%, and 20%) to provide designated osmotic potentials. The results showed that *S. davidii* seeds had a similar germination process under different degrees of drought stress. Seed germination percentage under moderate drought stress (10% PEG) was significantly higher than under non-stress and severe stress treatment ($P < 0.05$). The initiation of seed germination under severe drought stress (20% PEG) was slower than under non-stress and moderate stress. Seed size had a significant negative linear correlation with the initiation time for seed germination under non-stress treatment and a negative

基金项目: 国家自然科学基金(31260572, 71263012); 贵州省农业攻关(黔科合 NY 字[2010]3045 号)

收稿日期: 2013-12-03; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangpuchang@163.com

curve correlation for treatment under severe stress (15% PEG, 20% PEG), while there was no correlation for moderate drought stress (5% PEG, 10% PEG). The relationship between seed size and seed fate of *S. davidii* showed that non-stress conditions may be beneficial to germination for large or small seeds and dormancy for small seeds; moderate drought stress can drive medium sized seed germination, large seed dormancy and small seed mortality, and severe drought stress (15% PEG, 20% PEG) can lead to large sized seed mortality, and medium and small seed dormancy. Seed size, germination behavior and seed fate were heavily dependent on environmental factors. The germination strategy had a diverse pattern, with earlier germination of larger sized seeds in non-stress conditions, but larger and smaller seeds in adversity. The seed fate of *S. davidii* showed that seed mortality increased in non-stress conditions, seed germination was facilitated under moderate stress, and that seed dormancy was expedited in adversity. The information in this study may help land managers develop effective and sustainable revegetation management strategies.

Key Words: *Sophora davidii*; seed size; seed germination strategies; drought stress

种子对于植物种群结构与发展有着潜在的决定性作用^[1],而种子萌发行为作为一个复杂的生命现象,受到多种环境因素(温度、水分、光照、海拔等)的影响并且与其自身属性密切相关^[2-3]。种子大小变异性是植物在不同的环境中自然选择作用的结果^[4]。种子大小作为种子的一种重要属性是影响种子萌发行为的关键因子^[5-6],它关系到幼苗的建成、存活、竞争和个体未来的适合度^[7]。种子对后代的资源投入将会直接影响后代的适合度进而影响到种子的萌发行为^[4]。种子萌发行为对于维持植物种群特定的结构与种群构成有着重要作用,并与种子大小共同影响种群的发展(如定居、扩散等)^[8]。因此围绕种子萌发和种子大小为主的植物生活史特征研究一直是植物逆境适应对策研究的热点。

国内外许多学者开展了有关种子大小和种子萌发行为的研究,如 Rebecca 和 Catherine 研究了多年生沙生植物 *Ericameria nauseosa* 种子大小与种子萌发和幼苗存活的关系,认为大种子的萌发率和幼苗成活率较小种子高^[9];Lea 等研究发现 *Eritrichium nanum* 种子重量随海拔高度的增加而降低^[10];Juan 等的研究显示高温逆境下 *Cistus ladanifer* 种子大小与休眠无关,且小种子较大种子萌发更快^[11];Buhailiqiemu 等通过研究不同年际间异子蓬种子大小、萌发能力及结实格局的关系,认为年份和种子类型对种子大小和重量均有显著影响^[12];张蕾等研究了青藏高原东缘 31 种常见杂草种子萌发特性及其与种子大小的关系,发现高峰萌发率与种子大小呈显著负相关,萌发高峰时间与种子大小呈显著正相关,萌发率、萌发指数与种子大小呈较弱的负关联,萌发开始时间与种子大小呈较弱的正关联,萌发持续时间与种子大小几乎无相关关系^[6];王桔红等研究发现中生植物的种子大小对萌发能力有显著的影响,小种子的物种有较高的萌发率和较快的萌发速率,并且完成萌发所需要的时间较短,而旱生植物的种子萌发不受种子大小的影响^[2]。但是,目前的研究多数针对相同种群的不同单株间、不同生境下种群间,以及不同物种间种子大小与萌发行为展开研究,而关于环境因素和种子大小对种子萌发交互作用的影响少见报道。

中国西南喀斯特地区是全球喀斯特集中分布区面积最大、喀斯特发育最强烈的区域^[13-15]。由于受到不同程度的自然或人为因素的干扰与破坏,该区域生态系统岌岌可危,石漠化日趋严重^[16-18]。白刺花(*Sophora davidii*)为豆科槐属多年生灌木,是西南喀斯特地区广泛分布的乡土树种之一,由于其具有突出的耐干旱、耐贫瘠、耐火烧、耐践踏、耐刈割等生态特性^[19-21],而成为该区石漠化植被恢复常用的先锋物种。已有研究表明,成熟的白刺花表现出较强的抗旱性^[20-22],具有较高的结实率,但成活幼苗稀少,种群更新能力较低,种子萌发和幼苗生长成为限制种群更新与发展的重要阶段。因此,开展干旱环境下白刺花种子大小与萌发对策研究,对该物种种质资源的开发及石漠化地区植被恢复和重建具有重要理论和实践意义。基于此,本文从白刺花种子萌发对策角度探讨其与干旱胁迫和种子大小的关系,重点回答以下问题:1)白刺花种子萌发与干旱胁迫强度的关系;2)种子大小与种子萌发对策及种子命运的关系;3)干旱胁迫强度和种子大小与萌发的交互作用及萌发对策。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料于 2012 年秋在贵州关岭县城关镇附近山坡(北纬 26 °21 ',东经 105 °49 ',海拔 1382 m)采集,并于实验室自然风干,选取健康种子用于实验处理。为保证种子已经成熟,所有种子均在其自然脱落时进行采集。

1.2 种子大小的称量

将已处理好的白刺花种子混匀,用万分之一的电子天平称量单粒重,并进行编号。种子大小定义为胚与种皮的总重量。

1.3 萌发实验

将单粒称重编号的种子用 0.2% KMnO_4 消毒 10 min,然后用蒸馏水冲洗干净后备用。设置 0%、5%、10%、15%、10% 5 个不同的聚乙二醇(PEG-6000)浓度处理模拟干旱胁迫。各处理置 50 粒种子于发芽盒,4 个重复,以四层纱布为发芽床,分别加入适量 PEG 溶液,使纱布充分饱和,去除多余水分,,之后每两天换一次纱布,以保持种子湿润。萌发实验在 25 °C 恒温培养箱中进行,光周期为 10 h 光照,14 h 黑暗。实验开始后,每天观察记录不同编号种子的萌发情况,并移出萌发种子。以胚根露出种皮的 1/2 作为种子萌发的标准。当连续 10 d 没有萌发种子视为萌发结束。萌发实验持续 50 d。萌发结束后,用 1% TTC 处理未萌发的种子,24 h 后若胚被染成红色,则表明种子有活力,记为休眠种子。反之,记为死亡种子。

1.4 测量指标

种子千粒重:以 100 粒种子为单位称量,8 次重复,计算均值;

种子大小:试验所用种子进行单粒称重;

种子大小划分:小种子(< 均值-标准差)、中等种子(= 均值±标准差)和大种子(> 均值+标准差)^[11];

萌发率=萌发种子数/供试种子数×100%;

萌发开始时间:从播种到第一粒种子萌发所需的时间;

萌发持续时间:开始萌发到萌发结束所需的时间;

变异系数(coefficient of variation): $CV = (\text{标准偏差}/\text{平均值}) \times 100\%$ 。

1.4 数据统计和处理

对不同干旱胁迫强度下种子萌发参数进行单因素方差(ANOVA)分析,多重比较采用 LSD 检验, $P < 0.05$ 时表示处理间具有显著差异, $P < 0.01$ 时表示处理间具有极显著差异。并对各参数在干旱胁迫强度梯度上的变化趋势进行曲线拟合。使用 Excel 表格结合 SPSS13.0 软件对数据进行整理和统计分析。

2 结果与分析

2.1 白刺花种子大小特征

表 1 为各处理水平下供试白刺花种子的大小特征,可以看出,白刺花种子重量具有较大的变异性($CV = 26.594\%$),最小种子为 0.0031 g,最大种子 0.0214 g,最大种子与最小种子相差约 7 倍,而在不同处理间所选种子大小无显著差异($P > 0.05$)。

2.2 PEG 胁迫对白刺花种子萌发的影响

从图 1-A 可以看出,不同 PEG 胁迫处理下白刺花种子萌发动态过程大致相同,在 0% PEG、5% PEG、10% PEG 及 15% PEG 浓度处理下,种子萌发准备期为 3 d,于 4—9 d 达到最高萌发速率,随后萌发曲线平缓;而 20% PEG 浓度处理下,种子开始萌发时间推迟,于第 5 d 开始萌发,萌发速率在 6—12 d 达到最高。

白刺花种子最终萌发率随干旱胁迫的加剧呈先升高后降低的趋势(见图 1-B),在 0% PEG 浓度处理下白刺花种子萌发率为 39.50%,5% PEG 和 10% PEG 浓度下白刺花种子的萌发率分别为 42.00%和 45.00%,20%

PEG 浓度下,种子萌发率最低(35.50%)。其中,10% PEG 中度干旱处理的萌发率显著高于 0% PEG 和高浓度 PEG 胁迫处理($P<0.05$),20% PEG 处理显著低于其它处理($P<0.05$)。这说明中度 PEG 干旱处理有利于种子萌发,重度 PEG 干旱处理抑制了种子萌发。

表 1 白刺花种子大小描述统计特征

Table 1 Statistical parameters of individual seed weight

试验种子 Experiment seed	种子重量平均值 Mean/g	最小值 Min/g	最大值 Max/g	标准差 SD/g	变异系数 CV/%
0% 聚乙二醇 0% polyethylene glycol (PEG)	0.0118a	0.0055	0.0201	0.0028	23.729
5% 聚乙二醇 5% polyethylene glycol (PEG)	0.0119a	0.0031	0.0214	0.0031	26.050
10% 聚乙二醇 10% polyethylene glycol (PEG)	0.0117a	0.0053	0.0201	0.0027	23.077
15% 聚乙二醇 15% polyethylene glycol (PEG)	0.0119a	0.0051	0.0207	0.0029	24.370
20% 聚乙二醇 20% polyethylene glycol (PEG)	0.0122a	0.0054	0.0209	0.0031	25.410
所有供试种子 All seeds	0.0119	0.0031	0.0214	0.0032	26.594

注:Mean 为单粒种子平均重量 Mean weight of individual seed, Min 为最小值 Minimum, Max 为最大值 Maximum, SD 为标准差 Standard deviation, CV 为变异系数 Coefficient of variation。

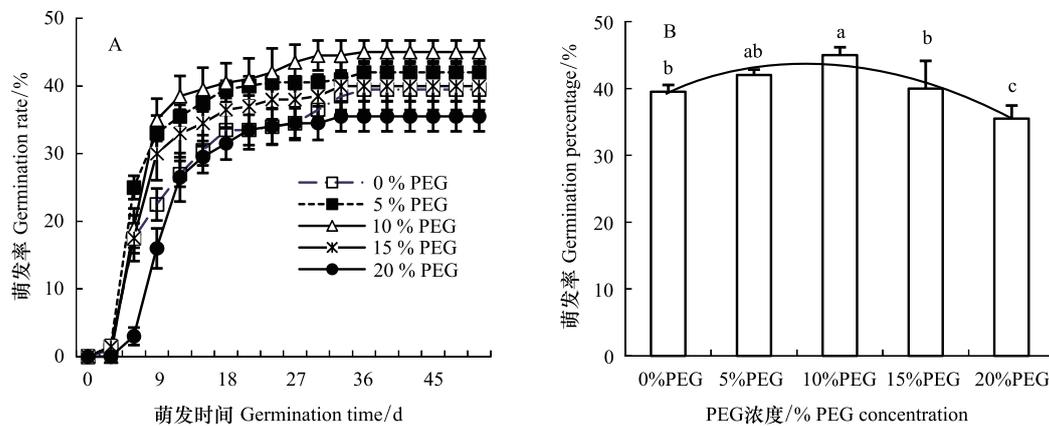


图 1 不同 PEG 浓度胁迫下白刺花种子的萌发进程和萌发率

Fig. 1 Germination process and germination rate of *Sophora davidii* under different PEG treatments

2.3 PEG 胁迫下种子大小与种子萌发相关性

干旱胁迫强度和种子大小对种子萌发的交互作用一直是植物种子萌发对策研究的热点问题。对不同 PEG 干旱胁迫强度下种子萌发开始时间 y 和种子大小 x 之间的相关关系进行曲线估计,得到回归方程(见图 2)。零干旱处理下(0% PEG,图 2-A),白刺花种子大小与种子萌发开始时间呈极显著负线性关系($P<0.001$),即零干旱处理条件下白刺花种子越大萌发越快;在轻中度干旱胁迫下(5% PEG 和 10% PEG,图 2-B 和图 2-C),白刺花种子大小与种子萌发开始时间无明显相关关系,即轻中度干旱胁迫下,白刺花种子开始萌发时间具有随机性;在较重干旱胁迫及重度干旱胁迫下(15% PEG 和 20% PEG,图 2-D 和图 2-E),白刺花种子大小与种子萌发开始时间则表现为负二次曲线关系,即重度干旱逆境下小种子和大气种子较中等大小种子更易萌发。

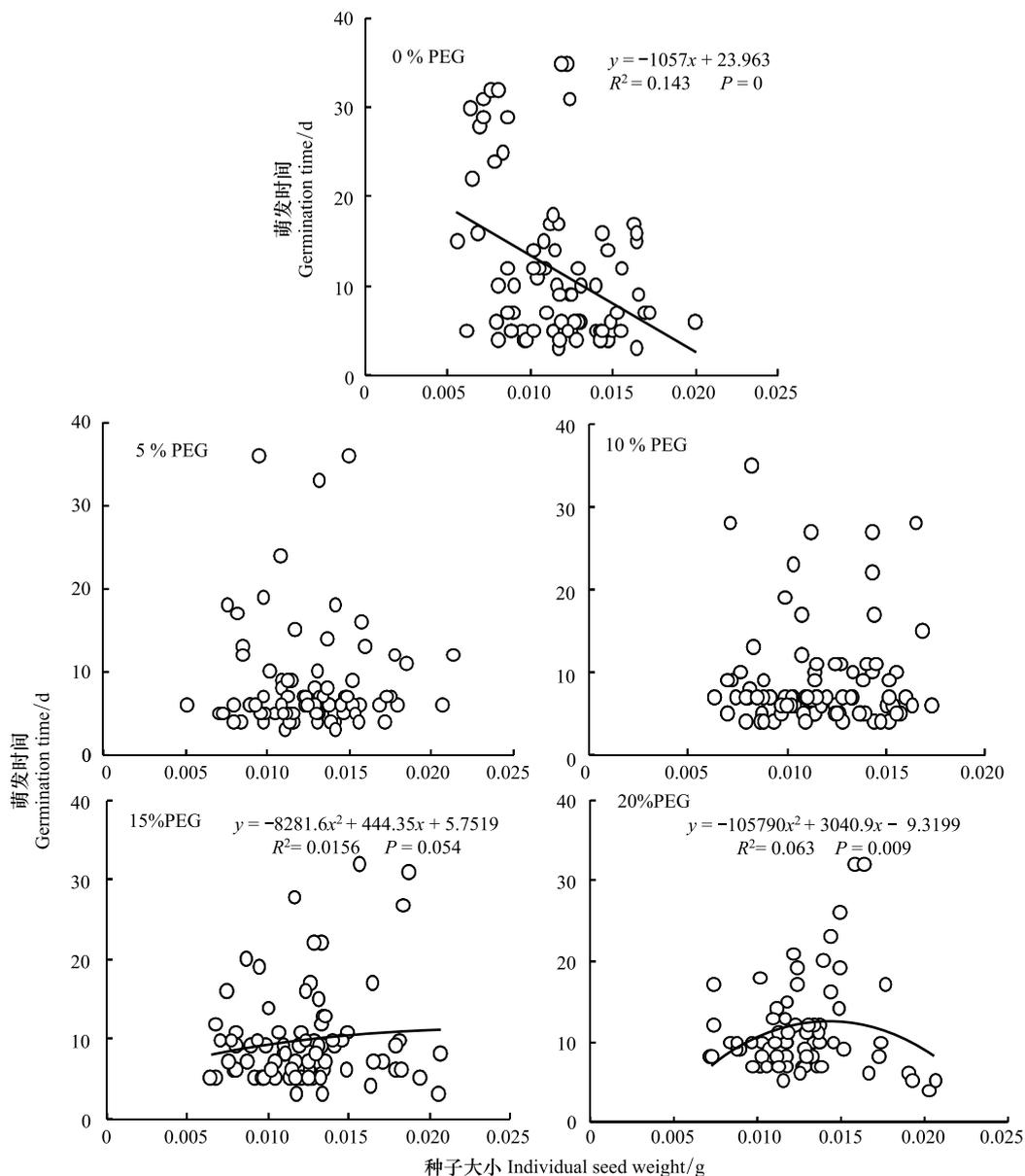


图 2 不同 PEG 浓度胁迫下白刺花种子大小与种子萌发开始时间相关性

Fig. 2 Relationships between seed mass and initial germination time of *Sophora davidii* under different PEG treatments

2.4 PEG 胁迫下种子大小与种子命运

不同干旱胁迫下白刺花种子大小与种子命运有重大影响(见图 3)。不同干旱胁迫下白刺花种子萌发、休眠、死亡均是中等种子占绝对比例(见图 3-A)。白刺花大种子萌发、休眠、死亡比例最高分别为 0% PEG、10% PEG 和 15% PEG 处理,即顺境会增加大种子萌发,中度干扰有利于大种子休眠,逆境则增加大种子死亡风险。中等种子萌发、休眠、死亡比例最高分别为 5% PEG、15% PEG 和 5% PEG,即轻度干扰会增加中等种子萌发和死亡风险,重度干扰有利于中等种子休眠;小种子萌发、休眠、死亡比例最高分别为 0% PEG、0% PEG 和 5% PEG;即顺境会增加小种子萌发和休眠,轻度干扰增加小种子死亡风险,逆境则有利于小种子休眠。

不同干旱胁迫下白刺花总体种子萌发、休眠和死亡比例变化较大(见图 3-B)。不同 PEG 胁迫下白刺花种子萌发率顺序为 10% PEG > 5% PEG > 15% PEG > 0% PEG > 20% PEG;种子休眠率顺序为 20% PEG > 15% PEG > 0% PEG > 10% PEG > 5% PEG;种子死亡率顺序为 5% PEG > 0% PEG > 15% PEG > 20% PEG

> 10% PEG;可以看出,白刺花种子命运表现为中度干旱胁迫萌发率较高,重度干旱休眠比例较高,零干旱和轻度干旱处理种子死亡较高。这说明顺境会增加种子死亡风险,中度干扰有利于种子萌发,逆境则有利于种子休眠。

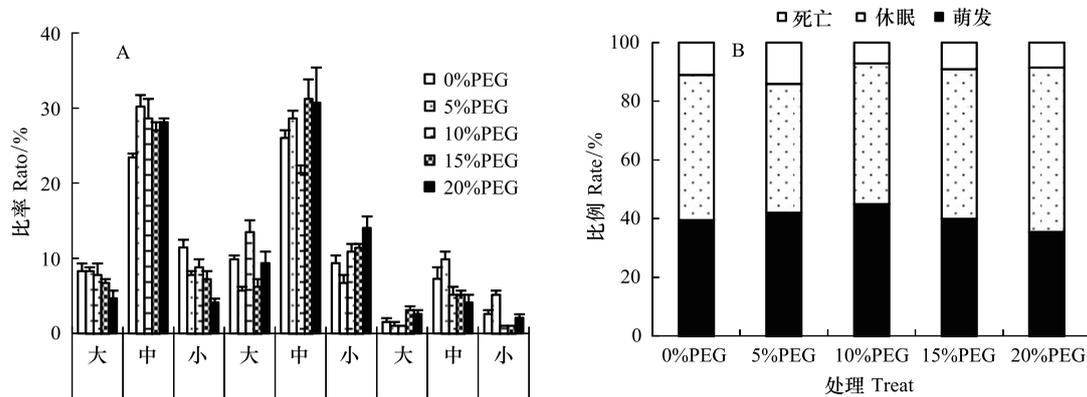


图3 不同 PEG 浓度胁迫下白刺花种子大小与种子命运

Fig. 3 Seed mass and seed fate of *Sophora davidii* under different PEG treatments

3 讨论与结论

在石漠化环境中,干旱是影响种子萌发和幼苗生长的关键因素之一,植物遭受干旱胁迫时,会造成植物细胞膨压丧失,使植物生长发育受到抑制,甚至死亡^[23]。在干旱胁迫下,种子吸水 and 萌发的正常进行对幼苗生存和生长有重要意义。本实验发现,中轻度的干旱胁迫对白刺花种子萌发具有促进作用,这与吕美婷等对不同强度干旱胁迫对红砂种子萌发的影响的研究及秦文静对4种豆科牧草种子萌发对干旱胁迫的响应研究报告一致^[24-25]。适度干旱胁迫下,植物会通过脯氨酸和可溶性糖等渗透调节物质的改变来维持一定的细胞膨压,保证种子萌发生理过程能够顺利进行^[26-27]。本实验还发现仅在重度干旱处理下,白刺花萌发开始时间推迟,并导致萌发率降低。这说明白刺花种子对干旱具有较强的适应能力,是白刺花在长期进化中形成了与石漠化环境相适应的萌发对策。

目前,多数学者认为种子大小和萌发行为的关系与生境有关,并随着外界环境条件的改变而发生变化。种子萌发行为是植物生活史的重要特征,是种子固有属性(种子大小、种子形态)与多种环境因素(光、温度、水分、可利用的营养、扩散和捕食)共同作用的结果^[2]。种子大小对萌发的影响程度随植物的生境而异,当种子遇到环境中的各种萌发暗示后会快速萌发,如水分是影响种子萌发的首要因子,只有当种子得到充足的水分,吸胀吸水到一定程度才能启动种子萌发,而大多数旱生植物长期生活在干旱生境中,或一些硬实种子,由于水分限制而不能萌发或萌发时间漫长。这些都是植物为适应不同的生存环境而形成的萌发对策^[2]。本研究中,白刺花种子萌发率中等,萌发持续时间长而分散,属于稳定型萌发对策。同时白刺花种子对水分胁迫的萌发对策表现为:随干旱胁迫的加剧,从顺境种子越大萌发越快到逆境小种子和大种子较中等种子萌发更早的转变。这种萌发对策表明白刺花种子大小和萌发对环境具较强的依赖性,通过调整萌发行为,将风险分散,有利于该物种存活。在长期适应石漠化地区间歇性干旱频发,种子生活史所需水分难以保证的不利环境中,白刺花能通过缓萌的方式来抵御环境的不稳定性,减少种子萌发和幼苗建植过程中因水分缺失导致的死亡风险,有利于种群更新和繁衍。

种子大小是植物生活史的关键特征之一,是其对后代资源投入权衡的结果,与种子数量、种子传播和扩散、种子休眠及幼苗竞争能力密切相关^[1],因此对种子大小及其萌发对策的研究具有重要的生态意义。有关种子大小对种子萌发行为的影响,因植物不同而有差异,一些研究认为大种子比小种子具有更高的萌发率,如瓜拉那的种子^[28],有些研究却认为小种子较大种子具有较高的萌发优势,如唇形科植物和一些中生植物

等^[2, 29]而固沙禾草沙鞭及一些常见的木本植物的种子大小则对萌发没有显著影响,或仅在萌发率和萌发开始时间上有差异^[5, 30]。本研究中白刺花种子大小与种子萌发率及萌发开始时间因环境不同而不同。可见,不同植物由于种类,个体规模,扩散方式,群体大小,种子组分,生长环境及生态位的不同,在长期的自然选择过程中演化形成了各自不同的种子萌发对策,以保证物种的长期繁衍。

一些学者认为,种子大小直接影响了植物的生存合适度,大种子具有较强的竞争能力和抵御风险能力,而小种子质量低,死亡风险较高^[1]。也有学者认为小种子不仅具有传播扩散上的优势,而且具有逃避被捕食的优势;与大种子相比,在生活史初期小种子具有更大的生存合适度^[4]。本研究发现,白刺花种子命运更多的表现为对环境的依赖性,顺境有利于大、小种子萌发和小种子休眠,中度干扰有利于中等种子萌发、大种子休眠,增加小种子死亡风险,逆境会增加大种子死亡风险、中等种子和小种子休眠。对大多学者来说,种子大小和存活的关系与植物自身属性及环境的关系尚未有定论,因此关于白刺花对石漠化干旱环境的适应对策,尚需从种子和幼苗阶段进行系统的深入研究和探讨。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 王桔红, 崔现亮, 陈学林, 杜国祯. 中、旱生植物萌发特性及其与种子大小关系的比较. 植物生态学报, 2007, 31(6): 1037-1045.
- [3] 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.
- [4] 武高林, 杜国祯, 尚占环. 种子大小及其命运对植被更新贡献研究进展. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1969-1972.
- [5] 王桔红, 杜国祯, 崔现亮, 郑秀芳, 齐威. 青藏高原东缘 61 种常见木本植物种子萌发特性及其与生活史的关联. 植物生态学报, 2009, 33(1): 171-179.
- [6] 张蕾, 张春辉, 吕俊平, 王晨阳, 张莹莹, 卜海燕, 杜国祯. 青藏高原东缘 31 种常见杂草种子萌发特性及其与种子大小的关系. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2115-2121.
- [7] 崔现亮, 王桔红, 齐威, 郑秀芳. 青藏高原东缘灌木种子的萌发特性. 生态学报, 2008, 28(11): 5294-5302.
- [8] 张世挺, 杜国祯, 陈家宽. 种子大小变异的进化生态学研究现状与展望. 生态学报, 2003, 23(2): 353-365.
- [9] Benard R B, Toft C A. Fine-scale spatial heterogeneity and seed size determine early seedling survival in a desert perennial shrub (*Ericameria nauseosa*; Asteraceae). *Plant Ecology*, 2008, 194(2): 195-205.
- [10] Wirth L R, Graf R, Gugerli F, Landergott U, Holderegger R. Between-year variation in seed weights across altitudes in the high-alpine plant *Eritrichium nanum*. *Plant Ecology*, 2010, 207(2): 227-231.
- [11] Delgado J A, Serrano J M, López F, Acosta F J. Seed size and seed germination in the Mediterranean fire-prone shrub *Cistus ladanifer*. *Plant Ecology*, 2008, 197(2): 269-276.
- [12] 布海丽且姆·阿卜杜热合曼, 严成, 刘艳芳, 魏岩. 不同年际间异子蓬种子大小、萌发能力及结实格局. 生态学杂志, 2012, 31(4): 844-849.
- [13] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特土壤-植被系统生源要素循环. 北京: 科学出版社, 2009.
- [14] 王应芬, 王普昶, 吴佳海, 莫本田, 杨晓慧, 黎俊. 石漠化功能灌木群自组织更新与石漠化治理. 仲恺农业工程学院学报, 2012, 25(4): 26-30.
- [15] 刘长成, 刘玉国, 郭柯. 四种不同生活型植物幼苗对喀斯特生境干旱的生理生态适应性. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1070-1082.
- [16] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 刘璐, 杜虎, 鹿士杨, 殷庆仓. 喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子. 生态学报, 2010, 30(24): 6787-6797.
- [17] Huang Q H, Cai Y L. Assessment of karst rocky desertification using the radial basis function network model and GIS technique: a case study of Guizhou Province, China. *Environmental Geology*, 2006, 49(8): 1173-1179.
- [18] Li Y B, Shao J A, Yang H, Bai X Y. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. *Environmental Geology*, 2009, 57(3): 621-627.
- [19] 李芳兰, 包维楷, 吴宁. 白刺花幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应. 生态学报, 2009, 29(10): 5406-5416.
- [20] 王海珍, 梁宗锁, 郝文芳, 韩路. 白刺花(*Sophora alicifolia*)适应土壤干旱的生理生态机制. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 106-110.
- [21] 王红梅, 包维楷, 李芳兰. 不同干旱胁迫强度下白刺花幼苗叶片的生理生化反应. 应用与环境生物学报, 2008, 14(6): 757-762.
- [22] 吴福忠, 包维楷, 吴宁. 外源施 N 对干旱河谷白刺花(*Sophora davidii*)幼苗生长, 生物量及 C、N、P 积累与分配的影响. 生态学报, 2008,

28(8): 3817-3825.

- [23] 宋丽华, 刘雯雯, 陈淑芬. PEG 处理对臭椿种子萌发的影响. 农业科学研究, 2005, 26(4): 25-29.
- [24] 吕美婷, 杨九艳, 杨明, 张作如, 马晓. 不同强度干旱胁迫对红砂种子萌发的影响. 中国草地学报, 2010, 32(6): 58-63.
- [25] 秦文静, 梁宗锁. 四种豆科牧草萌发期对干旱胁迫的响应及抗旱性评价. 草业学报, 2010, 19(4): 61-70.
- [26] 张中峰, 尤业明, 黄玉清, 李先琨, 张金池, 张德楠, 何成新. 模拟喀斯特生境条件下干旱胁迫对青冈栎苗木的影响. 生态学报, 2012, 32(20): 6318-6325.
- [27] 麦苗苗, 石大兴, 王米力, 李伟. PEG 处理对连香树种子萌发与芽苗生长的影响. 林业科学, 2009, 45(10): 94-99.
- [28] 成焱, 崔现亮, 周开元, 罗燕江. 萌发前处理和种子大小对瓜拉那(*Paullinia cupana* var. *sorbilis*) 种子萌发的影响. 生态科学, 2010, 29(5): 422-426.
- [29] 王晨阳, 张春辉, 刘文, 张蕾, 吕俊平, 张莹莹, 杜国祯. 青藏高原东缘唇形科植物种子大小对萌发的影响研究. 草地学报, 2011, 19(4): 601-606.
- [30] 朱雅娟, 董鸣, 黄振英. 沙埋和种子大小对固沙禾草沙鞭的种子萌发与幼苗出土的影响. 植物生态学报, 2005, 29(5): 730-739.