苦豆子和苦马豆种子萌发对干旱胁迫的响应特征

张 勇[1,2], 刘 义[3], 颜 霞[1,2], 鄂利锋[1,2], 王 进[1,2]

(1. 河西学院 农业与生物技术学院, 甘肃 张掖 734000; 2. 甘肃省高校河西走廊特色资源利用省级重点实验室, 甘肃 张掖 734000; 3. 张掖市甘州区兔儿坝天然植被管护站, 甘肃 张掖 734000)

摘 要: 以河西走廊中部荒漠边缘的苦豆子(*Sophora alopecuroides* L.)和苦马豆〔*Swainsonia salsula*(Pall.)DC.〕为材料,采用聚乙二醇 PEG-6000 模拟干旱条件,在 6 种渗透势(-0.03, -0.10, -0.24, -0.42, -0.65, -0.94 MPa)条件下对种子萌发和幼苗生长进行了研究。研究结果显示,随着干旱胁迫程度的加剧,两种植物种子吸胀速率、发芽率、发芽指数、生活力、苗高和根长、组织饱和含水量等指标均表现出明显降低的趋势,而幼苗干重、根干重和根冠比均呈先升后降的趋势。研究表明,苦豆子和苦马豆种子在适当的干旱胁迫下可以提高其幼苗的抗旱性,有利于培育壮苗。

关键词: 苦豆子; 苦马豆; 发芽率; 吸水率; 干旱胁迫

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2012)02-0109-05 **中图分类号:** S330.2, S342.1

Impact of Drought Stress on Germination of *Sophora Alopecuroides* and *Swainsonia Salsula* Seeds

ZHANG Yong[1,2], LIU Yi[3], YAN Xia[1,2], E Li-feng[1,2], WANG Jin[1,2]

(1. *College of Agricultural and Biological Technology, Hexi University, Zhangye, Gansu* 734000, *China*;
2. *Key Laboratory of Hexi Corridor Resources Utilization of Gansu Universities, Zhangye, Gansu* 734000, *China*;
3. *Tuerba Vegetation Stand Station in Ganzhou District of Zhangye, Zhangye, Gansu* 734000, *China*)

Abstract: The effects of drought stress, simulated using polyethylene glycol(PEG-6000) (-0.03, -0.10, -0.24, -0.42, -0.65, -0.94 MPa), were investigated on the germination of the seeds and the growth the seedlings of two plant species, *Sophora alopecuroides* L and *Swainsonia salsula* (Pall.) DC. which are dominant local species on the desert edge in the middle of Hexi Corridor. The results show that with increasing stress from PEG, water absorbing rate, germination percentage, germination index, vigorousness, seedling height, root length, and saturated water content of both species decreased, whereas dry weights of seedling and root, and crown-root ratio increased and then decreased. This indicates that appropriate drought stress might improve the drought resistance and then the quality of the seedlings. Possible causes for this adaptation to drought stress by the two species were explained and discussed.

Keywords: ***Sophora alopecuroides* L.; Swainsonia salsula(Pall.) DC.; germination rate; absorbing water rate; drought stress**

苦豆子(*Sophora alopecuroides* L.),豆科槐属多年生草本或半灌木植物,别名草本槐或苦豆根[1];苦马豆〔*Swainsonia salsula* (Pall.) DC.〕别名红花苦豆子等,豆科苦马豆属多年生草本或半灌木植物[2]。可作为绿肥、生态草和医药工业原料利用[3-7]。随土地荒漠化加剧,植被破坏和过度放牧,苦豆子和苦马豆野生资源量急剧下降[8-9],对其药用作用的开发和绿肥及荒漠饲料作物的开发,迫切需要苦豆子和苦马豆的人工栽培技术的建立。土壤干旱是影响种子吸胀及萌发的重要因素,本研究在 PEG(polyethylene glycol,聚乙二醇,分子量为 6 000)模拟干旱胁迫的条件下,探讨了通过硫酸破除硬实的荒漠植物种子萌发对干旱胁迫的响应特征,为进一步探讨苦豆子和苦马豆种子萌发适应干旱的机制及荒漠区人工种植提供

收稿日期: 2011-03-09 **修回日期:** 2011-07-01
资助项目: 国家中医药管理局 2012 年中医药行业科研专项"甘肃省代表性区域中药资源保护利用"(201207002); 河西学院校长基金(XZ201001)
作者简介: 张勇(1964—),男(汉族),甘肃省民乐县人,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事植物分类学和植物生态学教学和科研工作。E-mail: zhangyong@hxu.edu.cn。
通信作者: 王进(1974—),男(汉族),甘肃省张掖市甘州区人,硕士,副教授,主要从事种子生物学教学和科研工作。E-mail: wangjin0810@163.com。

科学依据。

1 材料与方法

(1) 试验材料。于2008年8月在河西学院试验农场采集苦豆子4 000 g和苦马豆种子500 g。将苦豆子和苦马豆种子在水中(25 ℃)浸泡24 h,获取硬实种子[10],然后将苦豆子硬实种子用90% H_2SO_4 处理70 min,苦马豆硬实种子用90% H_2SO_4 处理35 min以破除硬实。

(2) 干旱胁迫条件。干旱胁迫条件采用不同浓度PEG-6000溶液模拟。PEG溶液浓度为5%,10%,15%,20%,25%和30%共6个梯度,根据Michel和Kaufmann[11]采用的PEG溶液浓度与渗透势的关系方程计算,6个PEG浓度在25 ℃时其渗透势依次为-0.03,-0.10,-0.24,-0.42,-0.65,-0.94 MPa,以蒸馏水处理作对照。

(3) 吸水试验。随机取处理后的苦豆子和苦马豆种子各5.000 g,放置在直径7 cm的培养皿内,用不同浓度PEG溶液及蒸馏水(15 ml)淹没种子后加盖,在25 ℃下培养,每处理做4次重复。为减少蒸发和种子吸水引起培养皿内水势的改变,3 h更换1次溶液,试验时间为48 h,每3 h测定一次吸水量。测定时将培养皿内的种子全部取出,用滤纸吸去种子表面黏附的溶液,快速称重。种子吸水率计算公式为:

$$W_r = (W - W_0) / W_0$$

式中:W_r——种子重量的增加率;W,W_0——分别代表种子吸水后和吸水前的重量[12-13]。

(4) 发芽试验。模拟干旱胁迫条件以15 ml的-0.03,-0.10,-0.24,-0.42,-0.65,-0.94 MPa的PEG溶液湿润芽床,以蒸馏水湿润发芽床做对照,共7个处理,每处理设4个重复,每重复50粒种子。发芽试验用破除硬实后的种子在人工气候箱内进行,采用25 ℃全光照Φ15 cm培养皿纸上(TP)发芽,发芽期间每日统计萌发数,每2 d更换一次PEG溶液处理的发芽床,以保持芽床水势恒定。记录种子起始萌发的天数,第10 d统计发芽率,计算萌发指数和活力指数。发芽率以正常幼苗占测试种子的百分率表示。

萌发指数计算公式: $GI = \sum G_t / D_t$

活力指数计算公式: $VI = GI \times S$

式中:G——发芽率;GI——萌发指数;G_t——逐日发芽数;D_t——相应的发芽天数;VI——活力指数;S——幼苗鲜重[12-14]。

此外,为了分析干旱胁迫条件对幼苗生长、物质分配及复水后萌发率影响,在发芽试验进行到第10 d,于每一培养皿中随机取30株正常幼苗,测量幼苗高度、初生根长度、次生根个数、幼苗鲜重、芽干重、根干重、芽相对含水量、根相对含水量[15]和根冠比;将没有萌发的种子清洗后用蒸馏水处理芽床做恢复发芽试验,第5 d统计恢复发芽率。

(5) 统计分析。以SPSS 10.0统计软件对数据进行统计分析,以单因素方差分析(One-way ANOVAs)和最小显著差法(LSD)在0.05概率水平确定各平均值间的差异显著性。分析结果以平均数±标准误表示。

2 结果分析

2.1 渗透胁迫对种子累计吸水率的影响

破除硬实的苦豆子和苦马豆种子累计吸水率随渗透胁迫程度的加剧呈降低趋势,从图1—2可以看出,苦豆子和苦马豆吸水速度均较快。苦豆子种子在对照,-0.03,-0.10 MPa的PEG溶液处理下,27 h达到最大吸水率,在-0.24,-0.42,-0.65,-0.94 MPa的PEG溶液处理下30 h达到最大吸水率;苦马豆种子在对照,-0.03 MPa的PEG溶液处理下27 h达到最大吸水率,在-0.10,-0.24,-0.42,-0.65,-0.94 MPa的PEG处理下,30 h达到最大吸水率。

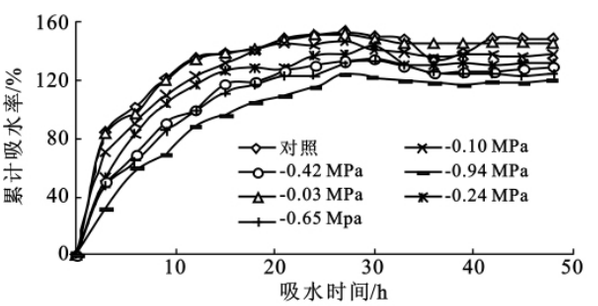


图1 苦豆子种子累计吸水率对不同模拟干旱胁迫的响应

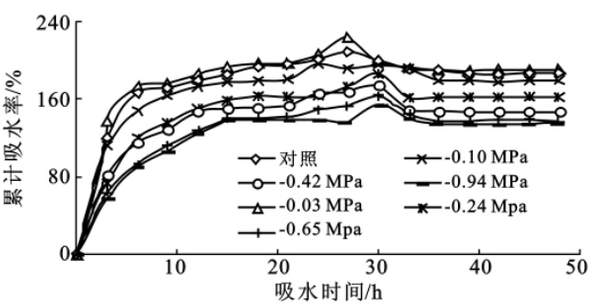


图2 苦马豆种子累计吸水率对不同模拟干旱胁迫的响应

2.2　渗透胁迫对种子萌发的影响

随着渗透胁迫的加剧,两种豆类种子发芽起始天数推迟,发芽率下降,发芽速度减慢,发芽时活力水平降低。由表 1 可见,在试验设置的干旱条件下,苦豆子种子在对照,-0.03,-0.10 MPa 的 PEG 溶液处理下,第 1 d 开始萌发,发芽率显著高于其它处理,在 -0.24,-0.42 MPa 的 PEG 处理下,第 2 d 开始萌发,在 -0.65 MPa 处理下,第 6 d 开始萌发,-0.94 MPa 处理不萌发; 苦马豆种子在对照,-0.03 MPa 的 PEG 溶液处理下,第 1 d 开始萌发,发芽率显著高于其它处理,在 -0.10 MPa 处理下,第 2 d 开始萌发,在 -0.24,-0.42,-0.65,-0.94 MPA 的处理下种子不萌发; 随着干旱的加剧和水势的降低,两种豆类种子发芽指数和活力指数显著减低,在对照,-0.03 MPa 的水势条件下,两种豆类发芽率无差异,在 -0.10— ~ -0.65 MPa 的水势下,苦豆子种子发芽率、发芽指数和活力指数显著高于苦马豆种子,苦豆子和苦马豆种子萌发的最低渗透势阈值分别为 -0.65 和 -0.10 MPa,苦马豆种子萌发对水势的变化反应敏感,苦豆子种子萌发对水势变化的反应较为迟钝。

表 1　苦豆子和苦马豆种子萌发对模拟干旱胁迫的响应

处理/	发芽起始天数/d		发芽率/%		发芽指数		活力指数	
MPa	苦豆子	苦马豆	苦豆子	苦马豆	苦豆子	苦马豆	苦豆子	苦马豆
对 照	1	1	97 ± 2.31^{Aa}	97 ± 2.31^{Aa}	93.00 ± 2.65^{Aa}	93.74 ± 2.73^{Aa}	13.24 ± 0.94^{Aa}	5.57 ± 0.21^{Aa}
-0.03	1	1	94 ± 0.00^{Aa}	97 ± 1.15^{Aa}	72.40 ± 0.95^{Bb}	87.34 ± 3.21^{Bb}	7.79 ± 0.05^{Bb}	5.04 ± 0.26^{Bb}
-0.10	1	2	95 ± 3.06^{Aa}	25 ± 5.03^{Bb}	42.93 ± 2.82^{Cc}	5.33 ± 0.81^{Cc}	3.79 ± 0.25^{Cc}	0.15 ± 0.02^{Cc}
-0.24	2	—	64 ± 4.00^{Bb}	0 ± 0.00^{Cc}	22.76 ± 3.83^{Dd}	0.00 ± 0.00^{Dd}	1.94 ± 0.33^{Dd}	0.00 ± 0.00^{Cc}
-0.42	2	—	48 ± 10.00^{Cc}	0 ± 0.00^{Cc}	10.51 ± 3.07^{Ee}	0.00 ± 0.00^{Dd}	0.76 ± 0.27^{Ee}	0.00 ± 0.00^{Cc}
-0.65	6	—	11 ± 4.16^{Dd}	0 ± 0.00^{Cc}	1.85 ± 0.94^{Ff}	0.00 ± 0.00^{Dd}	0.10 ± 0.05^{Ee}	0.00 ± 0.00^{Cc}
-0.94	—	—	0 ± 0.00^{Ee}	0 ± 0.00^{Cc}	0 ± 0.00^{Ff}	0.00 ± 0.00^{Dd}	0.00 ± 0.00^{Ee}	0.00 ± 0.00^{Cc}

注: 同列中不同大写字母表示在 0.01 水平差异显著,不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

2.3　干旱胁迫对幼苗生长的影响

从幼苗生长情况来看,H_2SO_4 处理的苦豆子硬实种子在对照处理下萌发,幼苗生长健壮,子叶发灰暗绿,心叶抽出,羽状复叶可见; 在 -0.03 MPa PEG 溶液处理下,幼苗生长健壮,心叶叶柄抽出但羽状复叶不展开,种皮全部脱离子叶; -0.10 MPa PEG 处理下,幼苗鲜绿,40% 种皮脱离子叶,心叶小但可见,其余种皮紧裹子叶; -0.24,-0.42 MPa 和 -0.65MPa PEG 溶液处理下,种皮紧裹子叶,幼苗生长较小; H_2SO_4 处理的苦马豆硬实种子在对照处理下萌发,幼苗鲜绿,子叶平展,心叶可见但不展开,-0.03 MPa PEG 溶液处理下,子叶平展,心叶小但可见,幼苗鲜绿,-0.10 MPa PEG 处理下,萌发的幼苗 50% 初生根缺失,60% 幼苗种皮紧裹子叶,40% 幼苗种皮脱离子叶呈锐角展开。

由表 2 可见,,随模拟干旱胁迫的加剧,苦豆子幼苗的苗高、根长、次生根个数和幼苗鲜重降低,-0.03 MPa PEG 溶液处理,促进了的苦马豆苗高、根长、次生根个数的增加,-0.10 MPa PEG 处理显著下降。

表 2　苦豆子和苦马豆幼苗生长对模拟干旱胁迫的响应

植物种	测定项目	对 照	-0.03 MPa	-0.10 MPa	-0.24 MPa	-0.42 MPa	-0.65 MPa	-0.94 MPa
苦豆子	初生芽/cm	2.81 ± 0.09^{Aa}	2.19 ± 0.05^{Bb}	1.38 ± 0.23^{Cc}	1.30 ± 0.11^{Cc}	0.91 ± 0.05^{Dd}	0.79 ± 0.02^{Dd}	0.00 ± 0.00^{Ee}
	根长/cm	5.01 ± 0.03^{Aa}	4.79 ± 0.11^{Aa}	3.36 ± 0.12^{Bb}	2.92 ± 0.36^{Cc}	0.64 ± 0.15^{Dd}	0.62 ± 0.11^{Dd}	0.00 ± 0.00^{Ee}
	次生根个数	6.65 ± 0.69^{Aa}	5.05 ± 0.09^{Bb}	2.72 ± 0.52^{Cc}	1.47 ± 0.11^{Dd}	0.12 ± 0.12^{Ee}	0.00 ± 0.00^{Ee}	0.00 ± 0.00^{Ee}
	幼苗鲜重(g/10 株)	1.42 ± 0.11^{Aa}	1.08 ± 0.09^{Bb}	0.88 ± 0.06^{Cc}	0.85 ± 0.07^{Cc}	0.67 ± 0.06^{Dd}	0.55 ± 0.05^{Ee}	0.00 ± 0.00^{Ff}
苦马豆	初生芽/cm	3.09 ± 0.05^{Aa}	2.39 ± 0.12^{Bb}	1.39 ± 0.12^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Dd}	0.00 ± 0.00^{Dd}	0.00 ± 0.00^{Dd}	0.00 ± 0.00^{Dd}
	根长/cm	3.44 ± 0.18^{Aa}	3.66 ± 0.41^{Aa}	0.68 ± 0.38^{Bb}	0.00 ± 0.00^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Cc}
	次生根个数	1.80 ± 0.40^{Bb}	2.23 ± 0.21^{Aa}	0.00 ± 0.00^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Cc}
	幼苗鲜重(g/10 株)	0.59 ± 0.04^{Aa}	0.58 ± 0.04^{Aa}	0.33 ± 0.02^{Bb}	0.00 ± 0.00^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Cc}	0.00 ± 0.00^{Cc}

注: 同一列参数(平均值 ± SE)间,标注的字母不同者在 0.05 水平差异显著($p < 0.05$, $n = 4$)。下同。

2.4　模拟干旱胁迫对两种豆类幼苗饱和含水量、恢复率和物质分配的影响

随模拟干旱胁迫的加剧,幼苗的干重增加,子叶养分转化率降低,幼苗饱和含水量降低,在 -0.03

MPa 的 PEG 溶液处理下，苦豆子和苦马豆幼苗根干重和根冠比增加，之后随模拟干旱胁迫的加剧幼苗根干重和根冠比降低；吸胀的苦马豆受到干旱胁迫后复水不再萌发，受到 -0.42，-0.65，-0.94 MPa PEG 溶液胁迫的苦豆子吸胀种子复水后的萌发率随胁迫加剧显著提高（表3）。

表3 不同干旱胁迫条件下苦豆子和苦马豆物质分配、幼苗饱和含水量和恢复率

植物种	测定项目	对照	-0.03 MPa	-0.10 MPa	-0.24 MPa	-0.42 MPa	-0.65 MPa	-0.94 MPa
苦豆子	饱和含水量/%	92.77 ± 5.71^{Aa}	89.23 ± 0.99^{Aab}	84.19 ± 2.51^{ABbc}	77.78 ± 6.41^{BCc}	70.07 ± 7.54^{CDd}	63.89 ± 9.15^{Dd}	0.00 ± 0.00^{Ee}
	恢复率/%	0 ± 0.00^{Dd}	0 ± 0.00^{Dd}	0 ± 0.00^{Dd}	0 ± 0.00^{Dd}	15 ± 8.33^{Cc}	38 ± 5.23^{Bb}	46 ± 6.11^{Aa}
	幼苗干重/(g/10株)	0.0975 ± 0.0016^{Bc}	0.1046 ± 0.0041^{Bbc}	0.1275 ± 0.0127^{Bb}	0.1927 ± 0.0147^{Aa}	0.2146 ± 0.149^{Aa}	0.2011 ± 0.0278^{Aa}	0 ± 0^{Cd}
	根干重/(g/10株)	0.0262 ± 0.0005^{Bb}	0.0364 ± 0.0021^{Aa}	0.0243 ± 0.0020^{Bb}	0.0264 ± 0.0058^{Bb}	0.0113 ± 0.0016^{Cc}	0.0079 ± 0.0027^{Cc}	0 ± 0^{Dd}
	根冠比	0.2683 ± 0.0028^{Bb}	0.3483 ± 0.0069^{Aa}	0.1905 ± 0.0095^{Cc}	0.1368 ± 0.0296^{Dd}	0.0528 ± 0.0082^{Ee}	0.0407 ± 0.0089^{Ee}	0 ± 0^{Ff}
苦马豆	饱和含水量/%	92.69 ± 1.55^{Aa}	88.23 ± 1.3^{Bb}	81.94 ± 4.3^{Cc}	0 ± 0^{Dd}	0 ± 0^{Dd}	0 ± 0^{Dd}	0 ± 0^{Dd}
	恢复率/%	0 ± 0^{Aa}	0 ± 0^{Aa}	0 ± 0^{Aa}	0 ± 0^{Aa}	0 ± 0^{Aa}	0 ± 0^{Aa}	0 ± 0^{Aa}
	幼苗干重/(g/10株)	0.0383 ± 0.0068^{Bb}	0.0551 ± 0.0023^{Aa}	0.0566 ± 0.0050^{Aa}	0 ± 0^{Cc}	0 ± 0^{Cc}	0 ± 0^{Cc}	0 ± 0^{Cc}
	根干重/(g/10株)	0.0063 ± 0.0008^{Bb}	0.0137 ± 0.0017^{Aa}	0.0027 ± 0.0006^{Cc}	0 ± 0^{Dd}	0 ± 0^{Dd}	0 ± 0^{Dd}	0 ± 0^{Dd}
	根冠比	0.1652 ± 0.0194^{Bb}	0.2771 ± 0.0271^{Aa}	0.0697 ± 0.0153^{Cc}	0 ± 0^{Dd}	0 ± 0^{Dd}	0 ± 0^{Dd}	0 ± 0^{Dd}

3 讨论

3.1 种子吸胀和萌发对干旱胁迫的响应特征及其生态学涵义

不同类型的豆科植物种子，在吸胀和萌发时对水势的要求不同，萌发期间吸水速度不同，一般认为抗旱类型的植物种子吸水速度快，而敏感类型的种子吸水速度慢[15-16]。本实验结果显示，苦马豆种子吸水速度快，苦豆子种子吸水速度相对较慢，表明苦马豆种子萌发较苦豆子种子更为抗旱。在轻度胁迫下（苦马豆 -0.03 MPa，苦豆子 -0.10 MPa），与对照相比两种植物种子萌发率无显著差异；在更低的水势条件下，种子吸水率、萌发率、萌发速度和活力水平显著下降。苦豆子和苦马豆种子萌发的最低渗透势阈值分别为 -0.65 和 -0.10 MPa，与其它豆科植物种子柠条（*Caragana Korshinskii*，最低渗透势阈值为 -2.1 MPa）和花棒（*Hedysarum scoparium* F.，最低渗透势阈值为 -1.8 MPa）相比，萌发时对干旱胁迫均为敏感。有学者认为，限制水分条件下萌发缓慢、萌发率低的特性是干旱沙漠区植物保证幼苗存活的策略之一[17]。因此，供试的两种植物种子萌发对干旱胁迫的响应特征对种的延续具有重要生态学意义。然而，在人工直播栽培苦豆子和苦马豆时，必须保证土壤墒情和较高水势，以促使种子充分吸胀，保证良好的田间出苗率。

3.2 幼苗生长对干旱胁迫的响应特征及其对苗期管理的启示

苦豆子种子萌发时苗高、根长、次生根个数和幼苗生长量随干旱胁迫加剧而降低，表明即使轻度干旱胁迫对苦豆子幼苗生长就均具有限制性影响，而苦马豆种子萌发时苗高、根长、次生根个数在轻度胁迫下有所增加，以后随干旱胁迫加剧而降低。在干旱胁迫下，初生芽比根长的生长受干旱胁迫影响更大，这与曾彦军等[18-19]对红砂、霸王种子的研究结果相一致。因此，在人工直播栽培苦豆子时，应注意幼苗期的土壤水分管理，以确保幼苗健壮生长，防止因干旱导致幼苗生长不良或闪苗；在直播栽培苦马豆时，应注意幼苗期的适当干旱，以促进幼苗的根长和次生根发育，确保壮苗。

3.3 幼苗饱和含水量、萌发恢复率和物质分配对干旱胁迫的响应特征

本试验结果显示，随干旱胁迫加剧，苦豆子和苦马豆幼苗子叶养分转化率降低，幼苗饱和含水量降低。苦豆子种子随干旱胁迫加剧未能萌发的种子经复水后萌发率较高，这从另一方面反应苦豆子种子萌发适应干旱环境的对策。受到干旱胁迫的苦马豆经复水后不再萌发，这一特性对苦马豆种群的自然扩繁很不利，这也是苦马豆种群易被演替的原因。

在水分胁迫下，萌发种子通常会自动调节根冠比，使有限的营养物质和水分优先满足根部生长。随着干旱的加剧，初生芽干重增加；根干重在轻度胁迫下增加，重度胁迫下降低；根冠比随胁迫的加剧先升后降；表明两种植物幼苗对于外界干旱胁迫首先采取增加胚根/胚芽比的措施来适应环境。该结果与刘长利等[20]对甘草的研究相一致，并显示出植物幼苗生长对干旱的适应性反应。但胁迫时间长或干旱很严重时，幼苗发育受到抑制甚至不能成苗。因此，在幼苗发育期给予适当干旱条件提高幼苗根冠比，也是可

采取的农艺措施。

[参 考 文 献]

[1] 杨家新,喻志芳. 苦豆子的研究进展 [J]. 天津药学, 1998, 10(1):43-45.

[2] 陈耀祖. 苦马豆化学成分的研究 [J]. 西北药学杂志, 1987,2(3):15-16.

[3] 李爱华,孙兆军. 苦豆子资源开发现状及前景初探 [J]. 宁夏大学学报,2001,25(4):354-356.

[4] 邹恒琴,徐峰,张忠义,等. 一种具有前景的抗癌药苦马豆素的研究进展 [J]. 中草药,1997,28(7):437.

[5] 胡小文,武艳培,王彦荣. 苦豆子种子休眠的形成及其解剖结构变化 [J]. 西北植物学报, 2009,29(1):16-21.

[6] 王进,王泽基,陈叶,等. 苦豆子种子萌发特性研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2007,25(5):202-206.

[7] 王建宇. 宁夏中部干旱带药用植物区系特点及开发利用 [J]. 干旱地区农业研究, 2005,23(1):204-207.

[8] 杨辉,华鹏,黄培祐. 苦豆子种子特性与种群扩展关系的研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2006(1):198-201.

[9] 王进,韩多宏,陈叶,等. 环境因子对苦豆子种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 草地学报, 2007,15(3):259-262.

[10] 尹燕枰,董学会. 种子学实验技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997:87-96.

[11] Michel B E, Kaufmann M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000 [J]. Plant Physiology, 1973, 51(5):914-916.

[12] 韩建国. 实用牧草种子学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社,1997:87-92.

[13] 颜启传. 种子检验原理与技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001:50-80.

[14] 国际种子检验协会. 种苗评定与种子活力测定方法手册 [S]. 徐本美,韩建国,译. 北京: 北京农业大学出版社, 1993:53-56.

[15] 杨鹏辉,李贵全,郭丽,等. 干旱胁迫对不同抗旱大豆品种华架期质摸透性的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2003,31(3):23-26.

[16] 曾彦军,王彦荣,萨仁,等. 几种旱生灌木种子萌发对干旱胁迫的响应 [J]. 应用生态学报, 2002,13(8):953-956.

[17] Zeng Yanjun, Wang Yanrong, Zhang Jianming. Is reduced seed germination due to water limitation a special survival strategy used by xerophytes in arid dunes? [J]. Journal of Arid Environments, 2010,74(4):508-511.

[18] 曾彦军,王彦荣,保平,等. 几种生态因子对红砂和霸王种子萌发与幼苗生长的影响 [J]. 草业学报, 2005,14(5): 24-31.

[19] 曾彦军,王彦荣,庄光辉,等. 红砂和霸王种子萌发对干旱与播深条件的响应 [J]. 生态学报, 2008,24(8):1629-1634.

[20] 刘长利,王文全,魏胜利. 干旱胁迫对甘草种子吸胀萌发的影响 [J]. 中草药, 2004,12(35):1403-1405.

(上接第 108 页)

[7] Zhang Yucundong, Liu Shirong, Ma Jiangming. Water-holding capacity of ground covers and soils in alpine and sub-alpine shrubs in western Sichuan, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006,26(9):2775-2782.

[8] 莫菲,于澎涛,季冬,等. 贡嘎山暗针叶林枯落物截留特征研究 [J]. 中国水土保持科学, 2007,5(2):86-90.

[9] Yoshinobu S, Tomomi K, Atsushi K, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers-the effects of rainfall conditions and leaf shapes [J]. Hydrological Processes, 2004,18(6):3007-3018.

[10] 赵鸿雁,吴钦孝,从怀军. 黄土高原人工油松林枯枝落叶截留动态研究 [J]. 自然资源学报, 2001,16(4):381-385.

[11] 陈丽华,余新晓,张东升,等. 贡嘎山冷杉林区苔藓层截持降水过程研究 [J]. 北京林业大学学报, 2002,24(4):60-63.

[12] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬. 黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究 [J]. 林业科学,2003, 39(1):168-172.

[13] 莫菲,于澎涛,王彦辉,等. 六盘山华北落叶松林和红桦林枯落物持水特征及其截持降雨过程 [J]. 生态学报,2009,29(6):2868-2876.

[14] 赵玉涛,余新晓,张志强,等. 长江上游亚高山峨眉冷杉林枯落物层界面水分传输规律研究 [J]. 水土保持学报, 2002,16(3):118-121.

[15] 高志勤,傅懋毅. 毛竹林等不同森林类型枯落物水文特性的研究 [J]. 林业科学研究,2005,18(3):274-279.

[16] 施爽,郭继勋. 松嫩草原三种主要植物群落枯落物层生态水文功能 [J]. 应用生态学报,2007,18(8):1722-1726.

[17] 吴钦孝. 森林保持水土机理及功能调控技术 [M]. 北京: 科学出版社,2005:54-66.

[18] 胡淑萍,余新晓,岳永杰. 北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究 [J]. 水土保持学报,2008,22(1):146-150.