

DOI:10.11686/cyxb2024230

http://cyxb.magtech.com.cn

郑玉琪, 严佳玥, 李博元, 等. 新疆针茅传播体形态及埋深对种子萌发出苗的影响. 草业学报, 2025, 34(5): 64—73.

ZHENG Yu-qi, YAN Jia-yue, LI Bo-yuan, et al. Dispersal unit morphology, and effects of burial depth on seed germination and emergence of *Stipa sareptana*. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(5): 64—73.

新疆针茅传播体形态及埋深对种子萌发出苗的影响

郑玉琪, 严佳玥, 李博元, 魏岩*

(新疆农业大学草业学院, 新疆草地资源与生态自治区重点实验室, 西部干旱区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:新疆针茅为禾本科多年生草本植物, 是新疆荒漠草地广泛分布的重要建群种与优势种。以新疆针茅为研究对象, 研究传播体形态、芒的功能及种子萌发出苗特性, 分析传播体各部分形态与埋深之间的关系, 比较不同埋深对种子萌发与幼苗出土的影响。结果表明: 1) 新疆针茅的传播体由外稃、内稃和颖果组成。外稃基部尖锐被毛具有锚固性, 外稃伸长形成芒, 芒有两回膝曲, 芒的长度是种子长的15倍。2) 芒具有吸湿性, 芒吸湿带动传播体发生自埋现象, 且自埋深度为(4.10±0.53) cm。3) 埋深对新疆针茅种子萌发率、出苗率均有极显著影响($P<0.01$)。种子能在深度0~12 cm的埋深中萌发, <6 cm的埋深中出苗。在1~2 cm的浅层埋深时种子萌发率和出苗率最高, 埋深深度超过2 cm之后, 种子萌发率和出苗率与埋深深度呈负相关。4) 埋深对新疆针茅幼苗生长以及生物量的分配均有极显著影响($P<0.01$)。新疆针茅幼苗在埋深情况下, 幼苗会分配较多的生物量向上运输, 优先用于芽部分的生长, 其生物量分配模式的改变是新疆针茅对埋深环境的重要应对策略。新疆针茅独特的传播体结构不仅增强了种子入土的安全性, 也极大地提升了种子萌发成功率与幼苗建立能力, 为新疆针茅种群的更新与繁衍奠定了坚实基础。

关键词: 新疆针茅; 传播体; 芒; 吸湿性; 种子萌发; 幼苗出土

Dispersal unit morphology, and effects of burial depth on seed germination and emergence of *Stipa sareptana*

ZHENG Yu-qi, YAN Jia-yue, LI Bo-yuan, WEI Yan*

College of Forestry and Prataculture, Xinjiang Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Xinjiang Autonomous Region, Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Ministry of Education in Arid Areas of Western China, Urumqi 830052, China

Abstract: *Stipa sareptana*, a perennial herb of the Poaceae, is an important community constructive and dominant species widely distributed in desert grassland of Xinjiang. This research studied the morphology of the dispersal unit, the function of the awn and the germination and emergence characteristics of *S. sareptana* seeds. The relationship between the morphology of each part of the dispersal unit and the buried depth was analyzed, and the effects of different burial depths on seed germination and seedling emergence were compared. The results show that: 1) The dispersal unit is composed of lemma, palea and caryopsis. The base of the lemma is sharp and hairy with an anchoring capability. The lemma elongates to form an awn, and the elongated body of the awn is typically doubly bent. The length of the awn is 15 times than that of the seed. 2) The awn is hygroscopic, and the hygroscopic awn

收稿日期: 2024-06-17; 改回日期: 2024-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(31560113)资助。

作者简介: 郑玉琪(1998—), 女, 山东泰安人, 在读硕士。E-mail: 13659965758@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: weiyuan1966@163.com

drives a self-burial phenomenon of the dispersal unit. The burial depth achieved is (4.10 ± 0.53) cm. 3) Burial depth had a very significant effect on the seed germination percentage and seedling emergence percentage of *S. sareptana* seeds ($P < 0.01$). The seeds germinated in the depth range of 0–12 cm, and emerged from depths < 6 cm. The seed germination percentage and seedling emergence percentage were highest when the burial depth was 1–2 cm. When the burial depth exceeded 2 cm, the seed germination percentage and seedling emergence percentage were negatively correlated with the burial depth. 4) The burial depth had a significant effect on the growth and biomass allocation of *S. sareptana* seedlings ($P < 0.01$). When the buried depth increases, *S. sareptana* seedlings allocate more biomass to upward growth, thus promoting the growth of shoots above ground. The plasticity of biomass distribution is an important mechanism for *S. sareptana* to adjust to variation in burial depth. The unique dispersal unit structure of *S. sareptana* not only enhances the survival of seeds entering the soil, but also greatly improves the success rate of seed germination and subsequent seedling establishment. These seed properties are highly advantageous to the renewal and reproduction of *S. sareptana* populations.

Key words: *Stipa sareptana*; dispersal unit; awn; hygroscopic; seed germination; seedling emergence

种子承载着植物种群延续和维持生物多样性的关键角色。种子形态结构特征对植物的生存与繁殖起到了决定性作用。种子的大小、形状及种皮特性不仅反映了植物适应特定生态环境的演化成果,也直接影响种子的传播方式和萌发条件^[1–3]。

种子是传播体的具体实例,传播体是植物所有与繁殖有关的器官总称,其形态特征主要包括形状、颜色、附属物及多态性等,研究植物传播体特性和分布特征对植物定植和群落更新具有重要意义^[4]。禾本科植物的果实为颖果,颖果在形态上呈现出多样的特征,包括圆柱形、披针形、椭圆柱形、纺锤形等,且在附属结构上如微毛、刺毛、大毛和苞片等也展现出丰富的多态性。传播体的差异不仅影响了禾本科植物种子的扩散行为,还显著作用于种子的萌发特性,为禾本科植物的生存和繁衍提供了多元化的可能性。野生小麦(*Triticum aestivum*)芒随着湿度的变化而弯曲运动,这种吸湿运动能推动种子入土自埋^[5]。针茅属植物的颖果果皮与种皮愈合,外有外种皮包裹,在外稃顶部结合向上延伸成芒,其性状稳定,是针茅属分类的主要性状依据,其芒一回或两回膝曲,芒柱扭转,有研究发现,针茅属传播体的芒具有湿度驱动的运动学^[6],芒有吸湿性,利用空气湿度驱动种子向土壤深入,提高种子萌发与幼苗存活率^[7],也是环境能量传导的一种方法。长芒草(*Stipa bungeana*)传播体具有螺旋状的长芒,在土壤湿度变化的驱动下,其伸缩将有利于种子往土壤深层迁移,从而保证了种子能在土壤深层萌发^[8]。

在干旱地区,埋深为种子萌发提供条件,如温度、湿度以及土壤透气性^[9–10]。研究指出,埋藏深度与种子萌发及幼苗出土之间存在直接联系^[3],并且不同物种的适宜埋深存在显著差异。如羊草(*Leymus chinensis*)种子在埋深 1~2 cm 处有最佳的萌发率^[11–12];埋深对苜蓿(*Medicago sativa*)的根长存在显著影响,埋深 1~2 cm 根长度及重量均显著高于其他埋深处理^[13]。Lloret 等^[14]发现大多数荒漠植物种子的适宜埋深为 0~2 cm,当埋深超过 4~6 cm 时,种子的出苗率会显著下降,甚至部分植物种子无法成功出苗^[15–16]。因此,适合植物种子萌发的埋深显得尤为重要。

新疆针茅(*Stipa sareptana*)是禾本科针茅属多年生植物,具有重要的生态价值和饲用价值,对于维持草原生态平衡和促进畜牧业发展具有重要意义。作为新疆荒漠草地重要的建群种与优势种,在自然环境中,新疆针茅传播体的芒是否具有吸湿性运动? 自埋性如何? 适合新疆针茅的埋深是怎样的? 本研究以新疆针茅为对象,通过研究传播体形态特征、芒的吸湿与种子自埋、不同埋深种子萌发与出苗,旨在探明新疆针茅芒的功能及埋深对种子萌发的影响,结果可为深入理解该植物种的生态适应机制提供科学依据,同时对新疆荒漠退化草地的恢复与保护具有重要的实践意义。

1 材料与方法

1.1 生境概况与种子采集

新疆针茅种子采集于准噶尔盆地南缘乌鲁木齐荒漠(43°44' N, 87°27' E)自然种群中。生境地是典型的中温带大陆干旱气候区,年平均降水量不足200 mm,夏季炎热,冬季寒冷。

2022年7月采集新成熟的新疆针茅种子,将采集的新疆针茅种子在室内晾干,晾干的种子放置在常温通风良好的实验室内贮藏。

1.2 新疆针茅传播体形态特征

随机选取50个形态完整的传播体,在体视显微镜(Nikon SMZ1000,日本)下观察传播体各部分形态并测量种子长、宽,芒长以及芒拐点处的角度。使用1/10000电子天平(Sartorius BSA124S,北京)测量种子千粒重。

1.3 芒的吸湿性运动及种子自埋特征

芒的吸湿性运动及种子自埋试验均在室内环境(气温15~25℃,相对湿度15%~33%)中进行。随机选取15个形态完整的传播体,将传播体的芒完全浸湿,使得芒形成一条直线,每个传播体之间间隔20 cm平铺在土壤表面后,开始计时,观察并记录芒的形态变化及种子的位置。

试验使用直径为28 cm,高16.5 cm的花盆,盆中土壤压实。随机选取50个形态完整的传播体,将传播体的外稃基部垂直插入土壤3 mm,每个传播体间隔5 cm,每盆放置5个传播体,设置10个重复,每天早上向芒喷水雾16 mL,试验持续20 d。试验结束后,用记号笔标记芒与土壤表面接触的位置,用游标卡尺测量外稃基部至标记处,即种子自埋深度。

1.4 种子萌发过程及幼苗的形态

2023年8月,试验使用直径为20 cm,高20 cm的花盆,试验前在花盆底部垫2层纱网,将花卉土与蛭石以2:1的比例混合,填入花盆中压实,充分浇水后均匀放入成熟饱满的种子,再铺上2 cm厚的湿润混合土。每盆放置50粒种子,设置4个重复,试验地点位于乌鲁木齐室外环境中(图1),试验进行15 d,播种后每天浇水保持土壤湿润。

从播种后第3天开始,每隔3 d清洗一盆花盆中的内容物,并回收所有的种子和幼苗。随机选取20株幼苗,对根、第一节间、胚芽鞘和芽等部位进行测量,观察记录种子萌发与幼苗出苗的过程。

1.5 种子埋深萌发试验与测定

试验使用直径为20 cm,高20 cm的花盆,试验前在花盆底部垫2层纱网,将花卉土与蛭石以2:1的比例混合,放入花盆内事先标记好的6 cm深处压实,充分浇水后将成熟饱满的种子均匀地放在土壤表层,在种子上分别覆盖0、1、2、4、6、8、10、12 cm厚的湿润混合土,每盆放置50粒种子,每个处理设置4个重复,共8个处理。试验期间,花盆每天浇水保持土壤水分。

试验地点位于乌鲁木齐室外环境(图1),于2023年8月开始试验,试验进行26 d,期间每天统计出苗数,幼苗出苗以突破地表为准,种子萌发数则是在试验结束以后进行统计,以胚根萌出2 mm作为萌发标准。试验结束时,利用筛子清理花盆中的内容物,分别统计未萌发种子、未出土苗以及出土苗的数量,并用游标卡尺测量幼苗的根、第一节间、胚芽鞘和芽的长度。

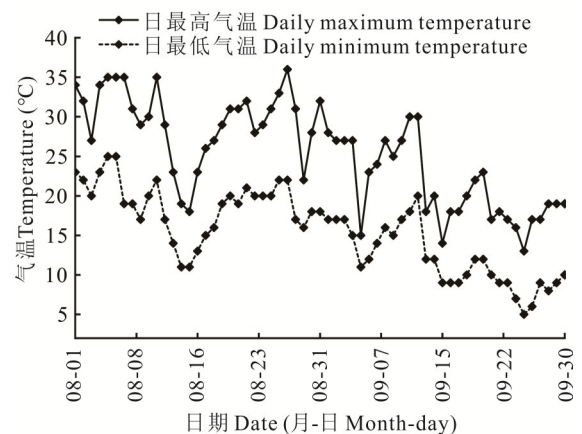


图1 2023年乌鲁木齐8-9月日最高和日最低气温

Fig. 1 The maximum and minimum daily temperature in Urumqi from August to September in 2023

$$\text{萌发率}(\%) = (\text{萌发种子数} / \text{供试种子数}) \times 100$$

$$\text{出苗率}(\%) = (\text{芽露出土壤表面苗数} / \text{供试种子数}) \times 100$$

1.6 数据统计与分析

使用Microsoft Excel软件统计试验数据,使用SPSS 26.0软件,对新疆针茅传播体的长度、宽度、质量进行数据分析,得出平均值与标准误差;对不同埋深下种子萌发率、出苗率以及幼苗根、第一节间、胚芽鞘和芽的长度,先进行方差齐性检验($P>0.05$ 满足方差齐性),再对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA),采用LSD法检验差异显著性,采用Origin 2021软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 传播体的形态特征

新疆针茅传播体由外稃、内稃和颖果组成(图2A)。颖果(本研究称为种子)呈黑褐色圆柱形,由外稃和内稃包裹,外稃基部尖锐呈针状,布满密毛且毛朝向芒的方向生长(图2F);种子长为 $8\sim 10$ mm,平均值为 (9.2 ± 0.01) mm;种子宽为 $0.8\sim 1.5$ mm,平均值为 (1.0 ± 0.02) mm(图3A);新疆针茅种子千粒重为 (3.32 ± 0.03) g。

包裹种子外稃伸长形成芒,芒长为 (136.6 ± 4.5) mm(图3B),芒是弯曲的,可分为3段(S_1 , S_2 和 S_3),由两个弯曲拐点(K_1 和 K_2)分隔。 S_1 (图2D)和 S_2 段(图2E)扭曲、坚硬具微毛,有时第二个扭曲拐点(K_2)不太明显,两个弯曲拐点处的角度 K_1 (图2B)和 K_2 (图2C)分别为 $(140.83\pm 2.48)^\circ$ 和 $(148.85\pm 2.17)^\circ$ (图3C)。与 S_1 和 S_2 段不同, S_3 段具有细微毛(图2G),柔韧且较细较轻。

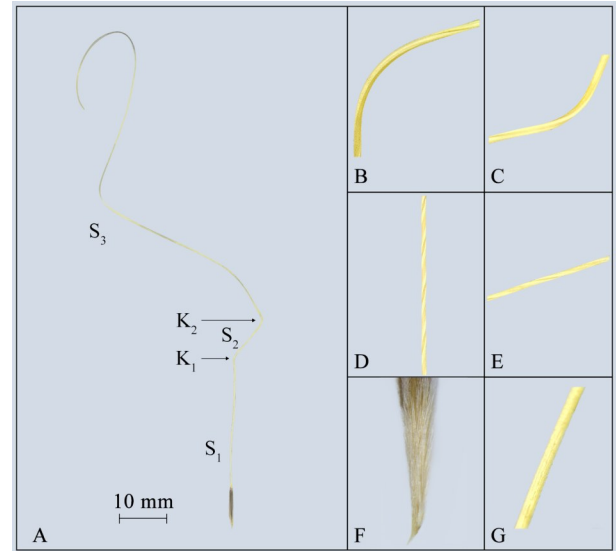


图2 新疆针茅传播体形态结构

Fig. 2 Morphological structure of dispersal unit of *S. sareptana*
A: 传播体 Dispersal unit; B: 芒 K_1 点 Awn K_1 ; C: 芒 K_2 点 Awn K_2 ; D: 芒 S_1 段 Awn S_1 ; E: 芒 S_2 段 Awn S_2 ; F: 外稃基部 Base of seed appearance; G: 芒 S_3 段 Awn S_3 .

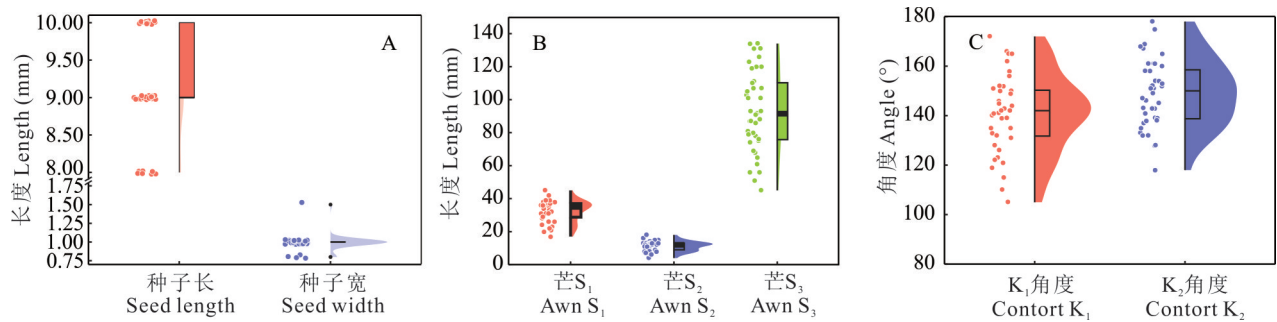


图3 新疆针茅传播体各部分形态特征

Fig. 3 Morphological characteristics of all parts of *S. sareptana*

2.2 芒的吸湿性运动及种子自埋特征

湿度的变化对新疆针茅芒有影响(图4)。在潮湿状态下,芒是舒展开的,且与土壤表面平行(图4a),随着湿度减少,芒失水扭转卷曲,2 min后出现 K_1 拐点(图4b),芒继续扭转卷曲,2 min后出现 K_2 拐点(图4c),随着芒的吸湿运动使得种子在土壤表面移动翻转,30 min后出现种子被土壤间隙阻隔(图4d),钻入土壤中。

新疆针茅传播体垂直插入土壤中,芒自然弯曲,通过给芒喷水雾,芒随着湿度增加,吸湿后顺时针扭转展开,待湿度减少,芒开始干燥逆时针扭转卷曲,经过20 d反复吸湿干燥,芒的吸湿扭转带动种子向土壤深处埋藏,深度为 (4.10 ± 0.53) cm。

2.3 新疆针茅种子萌发过程及幼苗形态

新疆针茅幼苗由根、第一节间、胚芽鞘、芽4个部分组成(图5)。新疆针茅萌发形态如图5所示,播种后第3天,种子开始萌发,出现胚芽鞘和胚根(图5a);播种后第6天第一株幼苗出土,幼苗出现芽(图5b),播种后第9~15天,幼苗的芽和根不断伸长,且第一节间和胚芽鞘长度相对稳定,分别为0.2、2.0 cm左右(表1)。根与芽长度随着播种时间的增加而增长,但第一节间与胚芽鞘随着播种时间的增加并无明显变化。

2.4 埋深对新疆针茅种子萌发与出苗的影响

埋深对新疆针茅种子的萌发率、出苗率均有不同程度的影响(图6)。所有处理的种子均萌发,萌发率随着埋藏深度的增加,呈先上升后下降的趋势。在0~4 cm埋深内,种子出苗率随埋藏深度的增加,呈先上升后下降的趋势,其中1和2 cm埋深下的种子出苗率(78%、64%)较高,≥6 cm埋深下的种子没有出苗。比较不同埋深情况下的新疆针茅萌发率和出苗率发现,在0~2 cm埋深中,种子萌发率等于出苗率;在4 cm埋深下种子萌发率大于出苗率,分别为44%和32%;在≥6 cm埋藏深度时,种子仍有萌发,但未能出土。

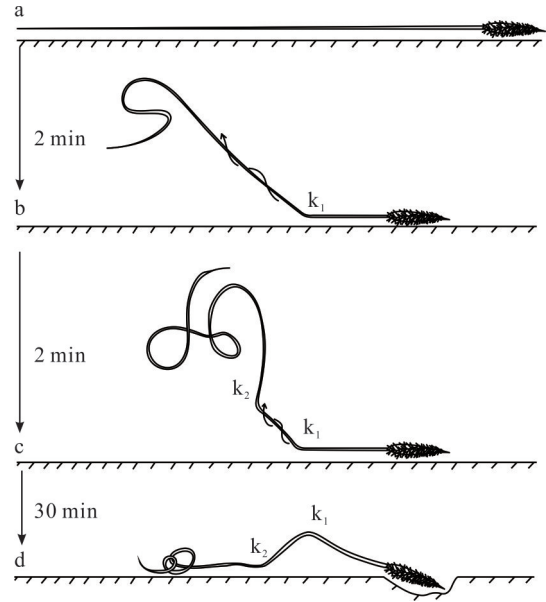


图4 新疆针茅吸湿性芒运动

Fig. 4 The hygroscopic awn movements

a: 潮湿状态 Humid state; b~c: 干燥变干 The awn dries up; d: 开始埋入土壤 Diaspore starts burying itself into the soil.

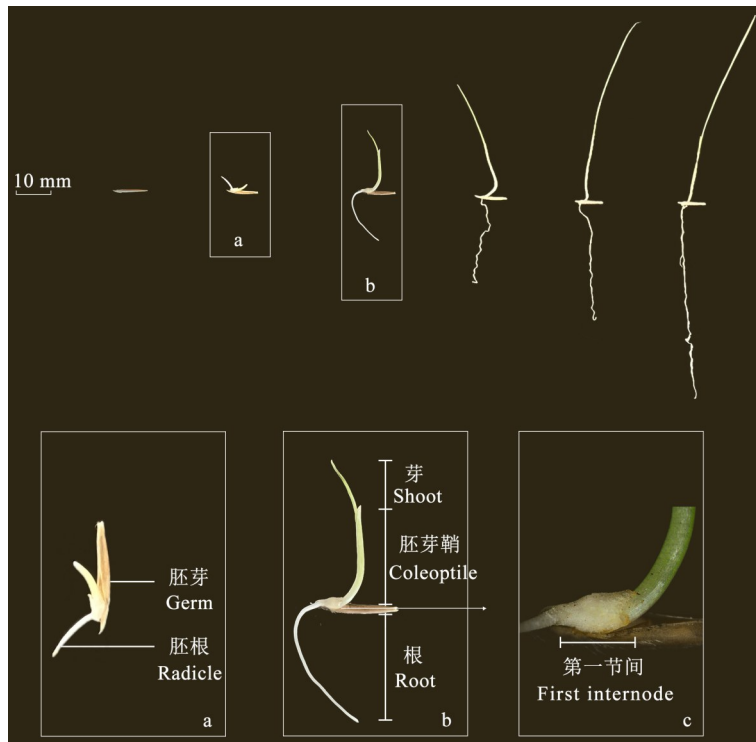


图5 同一埋深下新疆针茅的萌发过程

Fig. 5 The germination process of *S. sareptana* under the same buried depth

a: 播种后第3天萌发形态 Germination morphology 3 days after planting; b: 播种后第6天萌发形态 Germination morphology 6 days after planting; c: 第一节间 First internode.

表 1 新疆针茅幼苗不同部位的生长及形态

Table 1 Growth and morphology of different parts of the seedlings of *S. sareptana*

播种后天数 Days after sowing (d)	幼苗不同部位长度 The length of each part of the seedling (cm)			
	根 Root	第一节间 First internode	胚芽鞘 Coleoptile	芽 Shoot
3	0.91±0.21c	0.11±0.08b	0.30±0.14c	0
6	1.63±0.15bc	0.16±0.06a	1.28±0.31b	0.29±0.26d
9	2.06±0.34b	0.18±0.07a	1.96±0.22a	0.65±0.48c
12	2.24±0.33b	0.20±0.05a	2.05±0.12a	1.02±0.33b
15	3.77±0.19a	0.20±0.04a	2.02±0.21a	1.61±0.13a

同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$)。

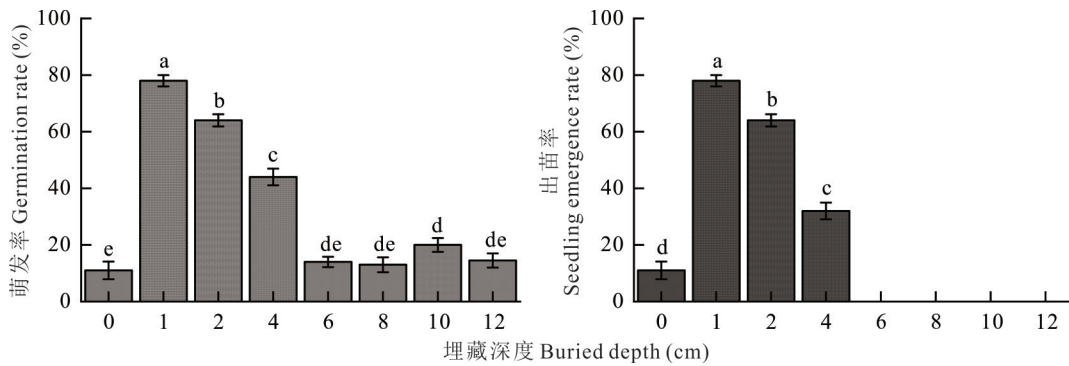


图 6 不同埋深对新疆针茅种子萌发率与出苗率的影响

Fig. 6 Effect of different burial depth on seeds germination rate and seedling emergence rate of *S. sareptana*

不同字母表示在不同埋深处理间存在极显著差异 ($P < 0.01$)。Different letters indicate extremely significant differences among different depths ($P < 0.01$); 下同 The same below.

埋深对新疆针茅累计出苗率也有影响,6、8、10、12 cm 埋深的种子在整个试验期末观察到出苗情况,在其他不同埋深(0~4 cm)下种子出苗时间也存在差异。在 1 和 2 cm 埋深下的种子出苗时间较早,均在播种后第 6 天第一株幼苗出土;其中埋深 1 cm 处理下累计出苗率最高,且曲线最陡,其他埋深种子累计出苗曲线均较为平缓(图 7)。

2.5 埋深对新疆针茅幼苗生长的影响

不同埋深对新疆针茅幼苗生长情况有所影响(图 8)。随着埋深的增加,根长呈先上升后下降的趋势,在 2 cm 埋深下出土苗根长明显大于其他埋深,未出土苗的根长明显小于出土苗的根长;不同埋深对新疆针茅第一节间影响不显著,长度波动较小;埋藏深度与出土苗胚芽鞘长度呈正相关,出土苗胚芽鞘长度随埋深的增加而增加,并且不同埋深间差异极显著 ($P < 0.01$),最大值出现在埋深 4 cm 处理下,为 2.5 cm;未出土苗随着埋深的增加胚芽鞘长度减小,在 ≥ 6 cm 时,胚芽鞘达到 1.2 cm 就停止生长;出土苗芽长在埋深 2 cm 时最长,并随着埋深增加而减小。

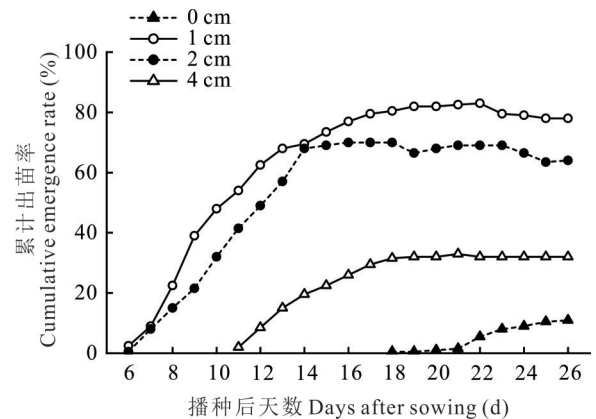


图 7 不同埋深对新疆针茅种子累计出苗率的影响

Fig. 7 Effect of different burial depths on the cumulative emergence rate of seeds of *S. sareptana*

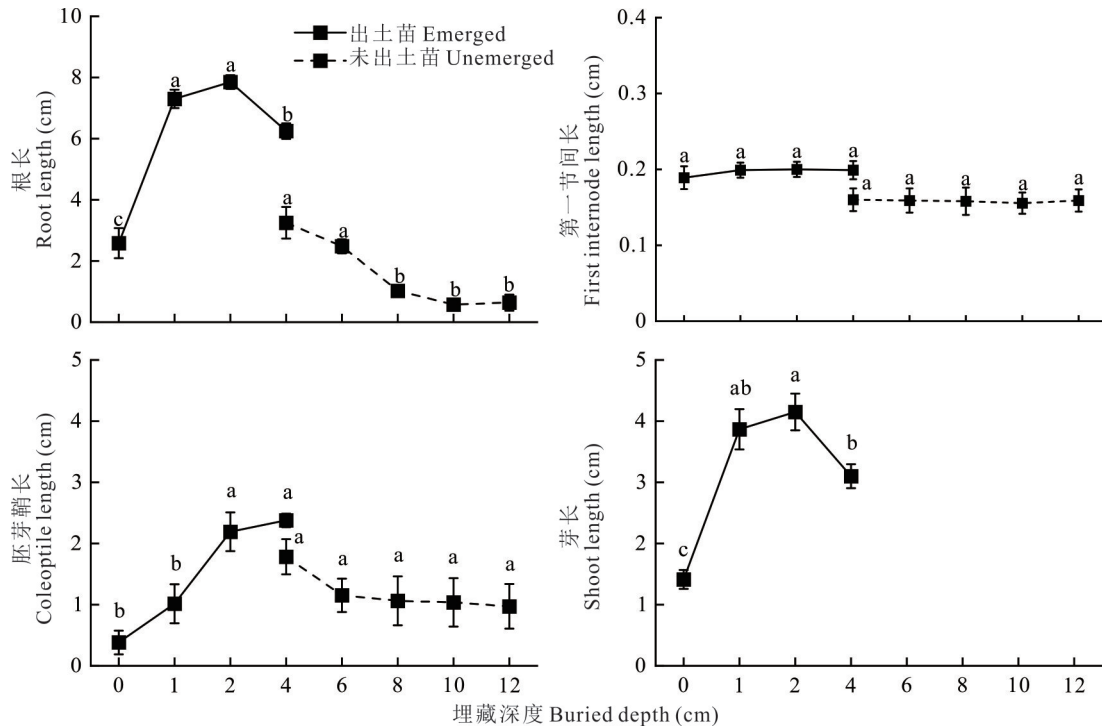


图8 不同埋深对新疆针茅幼苗根、第一节间、胚芽鞘、芽长度的影响

Fig. 8 Effects of different burial depths on roots, first internode, coleoptile and shoot length of *S. sareptana*

3 讨论

3.1 新疆针茅传播体形态及芒的功能

种子形态作为繁殖对策的关键指标,一直是植物生态学和恢复生态学重要的研究对象。种子形态特征与种子生产、种子传播、种子萌发、幼苗存活等植物生命周期活动关系密切^[17]。种子形状影响传播方式和在土壤中的定位,且影响植株的分布和生长效率。例如,圆形或扁平形状的种子可能更适合特定类型的机械播种,从而提高播种效率。一些禾本科有扭曲的附属物,种子成熟下落时影响种子在土壤的锚定,同时吸湿性芒能够随着空气和土壤湿度的变化而循环运动,从而增加种子自埋能力,帮助种子进入最佳土壤深度^[18-19],促进发芽。种子的形态特征很大程度上提高了种子在异质环境的适应能力,这些特征在植物生命周期中发挥重要作用^[20]。

本研究发现,新疆针茅种子由内稃和外稃包裹,共同组成了传播体。其中,外稃基部是硬而尖的针状,便于种子更好入土,且布满反方向毛,这决定了种子具有锚定性。外稃伸长形成的芒分为3个部分,具有不同的形态和功能, S_1 和 S_2 段扭曲、坚硬具微毛,提供机械支撑;近端段(S_1)携带种子,通过扭转和解开扭转来响应湿度,提供将种子推入土壤所需的力,将种子埋进土壤;中间段(S_2)也可以扭转和解开扭转,从而提供额外的推力。重要的是, S_2 提供了有效埋深所需的稳健性,在土壤中以一定角度定位种子,确保有效的土壤穴洞,使 S_3 围绕其轴旋转;与 S_1 和 S_2 段不同,远端段(S_3)具有细小毛,柔韧且较细较轻,没有明显的扭曲,在埋深中没有主要作用,而是有助于种子传播。新疆针茅的种子锚定、芒吸湿性扭转,印证了Ghermandi^[19]提出的“轴效应”,因此,新疆针茅种子具有相同的轴效应。

基于芒3个部分的不同功能,通过芒的吸湿运动诱导了种子自埋。Peart^[21]称这种自埋现象为“钻孔效应”。在本研究中,新疆针茅在干燥状态下,芒是扭曲的, S_1 和 S_2 段很短。随着湿度的增加,部分 S_1 和 S_2 展开,围绕中间部分 S_2 顺时针旋转,将种子推入土壤。当湿度降低时, S_1 和 S_2 段扭曲和收缩,绕着 S_2 逆时针扭曲。由于种子外稃被毛引导种子向下运动,且阻止种子向上运动,种子部分仍埋在土壤中。湿度的反复变化导致这一运动的重复,每一次重复都会使种子埋得更深。种子轴与 S_1 段(近似于共线)和土壤表面之间的角度在此过程中交替变化,随着时间的推移,不仅导致种子钻孔,而且使种子相对于土壤表面保持直立。

从“轴效应”和“钻孔效应”可以说明,新疆针茅的种子形状与附属物在幼苗建立方面具有竞争优势。使得种子可以找到一个“安全的地点”^[22]进行萌发,并深层锚固,待种子钻入土壤中,种子和芒体之间在关节处折断,使种子与土壤更好地接触,发芽速度更快。

3.2 埋深影响新疆针茅种子萌发与出苗

埋深是调节种子萌发和幼苗出土的重要因素^[23]。种子在不同深度的土壤中,萌发和出苗均受到温度、水分和氧气含量等多种因素的影响^[24],呈明显的差异性。有研究表明,适度的埋深可以促进种子的萌发^[25],而出苗率则随着埋深的增加先上升后下降,呈抛物线的变化趋势^[26]。

本研究中,位于土壤表层的新疆针茅种子萌发率较差,这可能是由于水分蒸发过快、光照过强以及温度极端波动等多种不利因素的综合影响^[27]。即便种子能在表层萌发,其幼苗的建立率也往往较低。一旦种子萌发,根系需要迅速深入土壤以完成幼苗建立的过程^[28]。然而,新疆针茅种子在0~12 cm的埋深内,均能够萌发,出苗率也随埋深的增加先上升后下降。并且在1和2 cm的埋深下,种子的出苗率显著高于地表和其他深度,这一规律与羊草^[11-12]、沙生针茅(*Stipa glareosa*)^[29]等多种禾本科植物的埋深出苗规律相吻合,也与Forcella等^[26]的研究结论相一致。这一现象可能是因为,在干旱区域,较浅的埋深可以为种子提供一个相对稳定的环境,缓解因温度变化剧烈、水分流失过快等因素对种子萌发造成的限制^[30-31]。因此,浅层埋深为种子的萌发和幼苗的成功定居提供了有利条件^[32]。

同时本研究表明,新疆针茅种子在不同埋深下,出苗率小于或等于其萌发率。在4~12 cm的埋深内,部分种子虽然成功萌发,但幼苗未能突破地表,这些未出土的幼苗颜色偏淡黄,胚芽纤细,通常在3~4周后便在土壤中腐化。这一现象与沙生冰草(*Agropyron psammophilum*)种子的出苗规律相吻合^[33]。当种子被深埋于土壤中时,高湿度、低温度以及不良的气体交换环境,特别是高二氧化碳含量,都对种子发芽构成阻碍^[34-35]。此外,种子出苗的成功与否不仅受埋深影响,还与种子内部储存的营养物质紧密相关。埋深较深的种子若能量储备不足,即便萌发也可能无法成功出苗。同时,深层土壤的压力也可能阻碍萌发的幼苗顺利破土而出^[36]。因此,新疆针茅种子的出苗过程是一个受多种因素共同影响的复杂过程,既需要适宜的埋深条件,也依赖于种子自身充足的能量储备来应对深层土壤的压力和环境挑战。

3.3 埋深影响新疆针茅幼苗生长

埋深作为影响种子出苗率的关键因素,同时也影响着幼苗的生长和生物量的分配模式^[11,37]。不同的埋深会直接导致幼苗根茎分配模式的差异^[38]。据研究表明,为确保地下埋深的幼苗能够成功破土而出,进行正常的光合作用,随着埋深的递增,幼苗分配给茎的比例会相应增大^[39]。本研究中,新疆针茅出土幼苗的根和芽的长度随埋深的增加先增加后减小,然而胚芽鞘长度却随埋深的增加而增长。表明新疆针茅种子内储存的营养和能量有限,当萌发后幼苗面临更深的埋藏环境时,会优先保障芽的生长,促使生物量向上运输。一旦埋深超过一定限度,幼根和幼苗的生长均会受到不利影响。同时本研究发现,当埋深 ≥ 6 cm时,尽管埋深增加,新疆针茅胚芽鞘并无显著变化,且根长小于胚芽鞘长。这可能是由于新疆针茅种子在生长过程中,将更多的生物量从根转移到芽。当植物遭遇不利环境时,会通过调整各器官的物质分配来确保正常发育,该结果与李阳等^[13]、杨慧玲等^[36]和李波等^[40]的研究结果一致,这是植物体应对埋深的一种生态适应^[41]。因此,新疆针茅在种子的能量投资上同样存在着权衡与抉择,即随着埋深的增加,新疆针茅倾向于将更多生物量投入到芽的生长。

4 结论

新疆针茅的传播体外稃基部具有锚定作用,芒的吸湿运动诱导种子自埋,帮助种子进入最佳土壤深度。浅层埋深有助于新疆针茅萌发和出苗,最佳埋深深度为1~2 cm,且随着埋深程度的增加,新疆针茅将更多生物量投到芽。新疆针茅独特的传播体,促进种子锚定入土,提高了萌发成苗的机会,为种群的生存和繁衍提供了保证。

参考文献 References:

- [1] Pearson T R H, Burslem D F R P, Mullins C E, *et al.* Germination ecology of neotropical pioneers: Interacting effects of

- environmental conditions and seed size. *Ecology*, 2002, 83(10): 2798–2807.
- [2] Tekrony D M, Shande T, Rucker M, *et al.* Effect of seed shape on corn germination and vigour during warehouse and controlled environmental storage. *Seed Science and Technology*, 2005, 33(1): 185–197.
- [3] Baskin C C. *Seeds: Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. San Diego: Academic Press, 1998.
- [4] Zheng Y R, Sun R, Chen Y X, *et al.* Spatial pattern of plant propagules along mountain river: A case of Dicun Stream, the source of Jiulong River. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(10): 3050–3059.
郑雅容, 孙荣, 陈雅贤, 等. 典型山地河流植物繁殖体特征——以九龙江源头溪流地村溪为例. *生态学杂志*, 2021, 40(10): 3050–3059.
- [5] Elbaum R, Zaltzman L, Burgert I, *et al.* The role of wheat awns in the seed dispersal unit. *Science*, 2007, 316(5826): 884–886.
- [6] Yanez A, Desta I, Commins P, *et al.* Morphokinematics of the hygroactuation of feather grass awns. *Advanced Biosystems*, 2018, 2(7): 1800007.
- [7] Stamp N E. Production and effect of seed size in a grassland annual (*Erodium brachycarpum*, Geraniaceae). *American Journal of Botany*, 1990, 77(7): 874–882.
- [8] Zhou Z Q, Li T S, Wu Y P, *et al.* A study of optimum germination conditions of *Stipa bungeana* seeds. *Pratacultural Science*, 2013, 30(2): 218–222.
周芝琴, 李廷山, 武艳培, 等. 长芒草种子适宜萌发条件. *草业科学*, 2013, 30(2): 218–222.
- [9] Maun M A. Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. *Canadian Journal of Botany*, 1998, 76(5): 713–738.
- [10] Xiong Y Q, Zhao C Y, Zhao X J. Effects of burial depth and planting density on seedling emergence and growth of *Ambrosia artemisiifolia* of different seed sizes. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(24): 9621–9629.
熊韞琦, 赵彩云, 赵相健. 埋深和播种密度对豚草种子出苗及幼苗生长的影响. *生态学报*, 2021, 41(24): 9621–9629.
- [11] Ma H Y, Liang Z W, Yan C, *et al.* Effects of sand-burial depth on *Leymus chinensis* seedlings emergence and growth. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2003–2007.
马红媛, 梁正伟, 闫超, 等. 四种沙埋深度对羊草种子出苗和幼苗生长的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2003–2007.
- [12] Yan C, Liang Z W, Ma H Y, *et al.* Effects of sowing depth on seed germination and seedling growth of *Leymus chinensis*. *Chinese Journal of Grassland*, 2007, 29(5): 31–35.
闫超, 梁正伟, 马红媛, 等. 不同播种深度对羊草出苗率和幼苗生长的影响. *中国草地学报*, 2007, 29(5): 31–35.
- [13] Li Y, Qi W W, Li S Y, *et al.* Seed germination and seedling growth of *Medicago sativa* in response to the variations of temperature, light, and burial depth. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(2): 332–339.
李阳, 亓雯雯, 李绍阳, 等. 苜蓿种子萌发和幼苗生长对温度、光照和埋深的响应. *生态学杂志*, 2021, 40(2): 332–339.
- [14] Lloret F, Casanovas C, Peñuelas J. Seedling survival of Mediterranean shrubland species in relation to root: shoot ratio, seed size and water and nitrogen use. *Functional Ecology*, 1999, 13(2): 210–216.
- [15] Hofmann M, Isselstein J. Effects of drought and competition by a ryegrass sward on the seedling growth of a range of grassland species. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2004, 190(4): 277–286.
- [16] Amini R, Hasanfard A, Ahmadian N, *et al.* Effect of environmental, seed burial depth, and straw mulch on germination and seedling emergence in *Cichorium glandulosum*. *Weed Science*, 2024, 72(2): 164–171.
- [17] Yang J J, Wan J J, Narkes W, *et al.* Seed morphology and effect of sheep rumen digestion on germinability of 28 grass of Tianshan. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2015, 24(2): 104–115.
杨洁晶, 万娟娟, 娜丽克斯, 等. 28种植物种子形态学性状及其萌发对绵羊瘤胃消化的反应. *草业学报*, 2015, 24(2): 104–115.
- [18] Peart M H. Further experiments on the biological significance of the seed-dispersal units in grasses. *The Journal of Ecology*, 1981, 69(2): 425–436.
- [19] Ghermandi L. The effect of the awn on the burial and germination of *Stipa speciosa* (Poaceae). *Acta Oecologica*, 1995, 16(6): 719–728.
- [20] Zhang J N, Liu K. Mechanisms for plants detecting the optimum time and place to germinate. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2014, 23(1): 328–338.
张佳宁, 刘坤. 植物调节萌发时间和萌发地点的机制. *草业学报*, 2014, 23(1): 328–338.
- [21] Peart M H. Experiments on the biological significance of the morphology of seed-dispersal units in grasses. *The Journal of Ecology*, 1979, 67: 843–863.

- [22] Harper J L. Population biology of plants. London: Academic Press, 1977.
- [23] Ren J, Tao L, Liu X M. Effect of sand burial depth on seed germination and seedling emergence of *Calligonum* L. species. Journal of Arid Environments, 2002, 51(4): 603–611.
- [24] Zhao J Z, Kong D S, Wang L, *et al.* Effects of low temperature stratification on emergence of *Lycium ruthenicum* under drought at different sowing depths. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(12): 56–66.
赵晶忠, 孔东升, 王立, 等. 低温层积处理对干旱和深埋胁迫下黑果枸杞出苗的影响研究. 草业学报, 2017, 26(12): 56–66.
- [25] Bai M J. Ecological characteristics of seed germination and seedling emergence of ten desert plant species. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
白梦杰. 十种荒漠植物种子萌发与出苗的生态特性研究. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [26] Forcella F, Benech A R L, Sanchez R, *et al.* Modeling seedling emergence. Field Crops Research, 2000, 67(2): 123–139.
- [27] Maun M A, Riach S. Morphology of caryopses, seedlings and seedling emergence of the grass *Calamovilfa longifolia* from various depths in sand. Oecologia, 1981, 49(1): 137–142.
- [28] Sheldon J C. The behaviour of seeds in soil: III. The influence of seed morphology and behaviour of seedlings on the establishment of plants from surface lying seeds. Journal of Ecology, 1974, 62(1): 47–66.
- [29] Guo C X, Yao T, Li F M, *et al.* Effect of five different treatments on seed germination of *Stipa glareosa*. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(6): 87–93.
郭春秀, 姚拓, 李发明, 等. 5种处理方法对沙生针茅种子萌发影响的研究. 草地学报, 2016, 24(6): 87–93.
- [30] Wang J J, Yu L, Zhu G, *et al.* Effect of environmental factors on seed germination of *Limonium aureum*. Pratacultural Science, 2018, 35(7): 1661–1669.
王靖靖, 余玲, 朱恭, 等. 几种环境因子对黄花矾松种子萌发的影响. 草业科学, 2018, 35(7): 1661–1669.
- [31] Tang L, Li C, Luo K, *et al.* Effects of environmental factors on seed germination of *Vicia villosa* Roth var. *glabresens* Koch. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(9): 71–77.
唐丽, 李淳, 骆凯, 等. 几种环境因子对光叶紫花苕种子萌发的影响. 中国草地学报, 2021, 43(9): 71–77.
- [32] Huang Z Y, Dong M, Zhang S M. Strategies of seed germination on sand dune and seedling desiccation tolerance, of *Psammochloa villosa* (Poaceae). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(2): 298–303.
黄振英, 董鸣, 张淑敏. 沙鞭(禾本科)种子在沙丘上的萌发策略及幼苗的耐干燥特性. 生态学报, 2005, 25(2): 298–303.
- [33] Zhang J H, Maun M A. Effects of sand burial on seed germination, seedling emergence, survival, and growth of *Agropyron psammophilum*. Canadian Journal of Botany, 1990, 68(2): 304–310.
- [34] Gutterman Y. Seed germination in desert plants. Endeavour, 2014, 19(1): 47.
- [35] Keeley J E, Fotheringham C J. Trace gas emission and smoke-induced seed germination. Science, 1997, 276(5316): 1248–1250.
- [36] Yang H L, Cao Z P, Dong M, *et al.* Effects of sand burying on caryopsis germination and seedling growth of *Bromus inermis* Leyss. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2438–2443.
杨慧玲, 曹志平, 董鸣, 等. 沙埋对无芒雀麦种子萌发和幼苗生长的影响. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2438–2443.
- [37] Maqbool M M, Naz S, Ahmad T, *et al.* The impact of seed burial depths and post-emergence herbicides on seedling emergence and biomass production of wild oat (*Avena fatua* L.): Implications for management. PLoS One, 2020, 15(10): e0240944.
- [38] Yue Y H, Jin G L, Han W Q, *et al.* Effect of burial depth on seed germination and seedling growth of *Achnatherum inebrians*. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(2): 8–13.
岳永寰, 靳瑰丽, 韩万强, 等. 埋藏深度对醉马草种子萌发与幼苗生长的影响. 中国草地学报, 2020, 42(2): 8–13.
- [39] Wang W J, He D H, Tang X Q, *et al.* Effect of different temperature and sand burial depths on seed germination and seedling growth of *Sophora moorcroftiana*. Journal of Desert Research, 2011, 31(6): 1437–1442.
王文娟, 贺达汉, 唐小琴, 等. 不同温度和沙埋深度对砂生槐种子萌发及幼苗生长的影响. 中国沙漠, 2011, 31(6): 1437–1442.
- [40] Li B, Fang Z J, Zhang Y J, *et al.* Comprehensive analysis of mixed soda saline-alkali resistance of germplasm resources of Longmu alfalfa. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(1): 141–147.
李波, 方志坚, 张英俊, 等. 龙牧苜蓿种质资源耐混合苏打盐碱能力综合分析. 草地学报, 2019, 27(1): 141–147.
- [41] Chen W, Wang J H, Zhang Y, *et al.* Effects of sand burial on seed germination and seedling growth of *Hedysarum scoparium*. Ecological Science, 2011, 30(1): 26–31.
陈文, 王桔红, 张勇, 等. 沙埋对花棒种子萌发和幼苗生长的影响. 生态科学, 2011, 30(1): 26–31.