

鄂尔多斯高原 4 种主要沙生植物种子萌发与出苗 对水分和沙埋的响应

聂春雷 郑元润*

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

摘 要 羊柴 (*Hedysarum leave*)、柠条 (*Caragana korshinskii*)、籽蒿 (*Artemisia sphaerocephala*) 与油蒿 (*Artemisia ordosica*) 为鄂尔多斯高原广泛分布的植物种, 也是该地区飞播选用的主要植物种。由于飞播为鄂尔多斯高原植被恢复的重要手段, 而飞播后植物种子的出苗率与土壤水分及沙埋密切相关。因此, 上述植物种子萌发与出苗对水分和沙埋反应的研究对当地退化生态系统的恢复具有重要意义。通过温室控制实验, 对 4 种植物萌发特性及出苗与水分和沙埋深度的关系进行研究, 阐明了种子萌发最适合的水分条件和沙埋深度。结果表明, 4 种植物种子萌发与出苗最适宜的供水量都接近于当地种子萌发时期的平均降水量, 最适宜的沙埋深度为 0.5~1 cm, 过多的水分和过深的沙埋会降低种子萌发与出苗, 反映了 4 种植物对沙区环境的生态适应。4 种植物最适宜的供水量均为 123 ml, 羊柴、柠条、籽蒿和油蒿的最适沙埋深度分别为: 0.5、1.0、0.5 和 0.5 cm。根据实验结果及当地气候特点, 鄂尔多斯地区的飞播时间应由 6 月初提前至 5 月中下旬, 以提高飞播植物的出苗率。

关键词 鄂尔多斯高原 水分 沙埋 种子萌发 幼苗出土

EFFECTS OF WATER SUPPLY AND SAND BURIAL ON SEED GERMINATION AND SEEDLING EMERGENCE OF FOUR DOMINANT PSAMMOPHYTES IN THE ORDOS PLATEAU

NIE Chun-Lei and ZHENG Yuan-Run*

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract The Ordos Plateau of North China has experienced serious desertification. *Hedysarum leave*, *Caragana korshinskii*, *Artemisia sphaerocephala* and *A. ordosica* are four dominant psammophyte species that inhabit the Mu-U's Sandland, Ordos Plateau that are used in aerial seeding, a primary method for vegetation restoration in deserts and sand lands, in the Ordos Plateau. Seedling emergence is closely related to sand burial depth and water content of the soil but survival is low. In this paper, seed germination and seedling emergence characteristics of the four species in response to different levels of water availability and burial depth were studied and compared to determine the optimal time for aerial seeding to enhance seedling emergence and improve vegetation restoration efforts.

The experiment was conducted in a non-heated greenhouse at the Ordos Sandland and Grassland Ecological Station of the Chinese Academy of Sciences in the summer of 2003. All seeds used in the experiment were collected from their natural habitat near the ecological station. The seed mass (mean \pm SE) varied among species: *H. leave*, (11.70 \pm 0.9) mg; *C. korshinskii*, (34.15 \pm 2.2) mg; *A. sphaerocephala*, (0.67 \pm 0.12) mg; *A. ordosica*, (0.22 \pm 0.09) mg. Seed germination, tested under the same environmental conditions, also varied among species: *H. leave*, (65.6 \pm 4.8)%; *C. korshinskii*, (52 \pm 4.7)%; *A. sphaerocephala*, (94.4 \pm 1.6)%; *A. ordosica*, 95.2% \pm 0.8%. Each species was grown at seven sand burial depths (0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5 cm) under three water supply regimes (123, 185, 246 ml). The different water treatments corresponded to mean monthly precipitation levels of 50, 75, and 100 mm during growing season (from June to September). The average monthly precipitation in June in this area was about 50 mm. There were 21 treatments for each species with 5 replicates of each treatment. Each replicate consisted of 25 seeds planted in a plastic pot 5.6 cm in diameter and 11 cm in height with a drainage hole at the bottom of pot.

Seedling emergence was checked and recorded everyday and water was added every three days. The experiment was terminated after 30 days when the seedling emergence became almost steady. The number of seedlings that did not emerge was quantified. As the main purpose of this study was on seedling emergence, dormant and decomposed seeds were counted as non-germinated.

For each species, sand burial depth, water supply regime, and their interactions all had significant effects on the percentage and the rate of seedling emergence. All seeds lying on the soil surface did not germinate. The optimal burial depth for *H. leave*, *C. korshinskii*, *A. sphaerocephala* and *A. ordosica* was 0.5, 1, 0.5, and 0.5 cm, respectively. As the sand burial depth increased, the percentage and rate of seedling emergence decreased and the emergence time was delayed, but the percentage of seedlings that did not emerge was not affected. Seeds of *A. sphaerocephala* and *A. ordosica* could not emerge from burial depths greater than 1.5 cm, but seeds of *H. leave* and *C. korshinskii* were able to emerge from depths of 2–3 cm. This difference may be because of the greater mean seed mass of *H. leave* and *C. korshinskii*. The tolerance to sand burial depth was in the following order: *H. leave* > *C. korshinskii* > *A. ordosica* > *A. sphaerocephala*. The optimal water supply for all four species was 123 ml, which was close to the mean monthly precipitation of June (50 mm), the time when most seedling emergence occurs in the Ordos Plateau. As the amount of water increased, the percentage and rate of seedling emergence decreased and the emergence time delayed, but the percentage of seedlings that did not emerge was not affected. The maximum percentage (mean \pm SE) of seedling emergence of these four species was *H. leave*, 56.80% \pm 1.96%, *C. korshinskii*, 39.20% \pm 5.12%; *A. sphaerocephala*, 62.4% \pm 4.12%; and *A. ordosica*, 77.6% \pm 9.85%. Too much water and too deep of burial reduced the percentage of seedlings that emerged. This reflected the adaptation of the plants to the local climate and environment.

In the Ordos Plateau, aerial seeding is often conducted during early June. Based on our results, weather conditions are not suitable for seedling establishment during this time because wind speeds are low, and the seeds are not buried by the sand. Our results indicate that this may reduce the percentage of seedlings that emerge as all four species require sand burial. During middle and late May, the winds are stronger and the seeds have a greater chance of being buried at their optimal depth. Even though there is no precipitation or the seeds might be buried too deep, they can survive in the soil and emerge later under more favorable conditions. Therefore, it is suggested that the time of aerial seeding be advanced from early June to mid to late May in order to enhance the emergence of the seedlings.

Key words Ordos Plateau, Water supply, Sand burial, Germination, Seedling emergence

鄂尔多斯高原是我国荒漠化发生发展的中心地区之一(郑元润和张新时, 1998)。飞播是鄂尔多斯高原植被恢复的重要手段, 但此项技术仍存在一些问題, 如飞播后成苗率较低等(漆建忠, 1998)。飞播能否成功的关键是幼苗能否顺利出土与定居, 这一过程主要受控于温度、土壤湿度及种子埋藏深度等(Zheng *et al.*, 2003)。实验指出, 种子萌发与出土需要一定的沙埋, 但在不同的条件, 如土壤湿度共同作用下, 多深的埋藏深度才是合适的?

植物种子萌发与幼苗出土受许多因素影响, 其中温度、光照、土壤水分和种子埋藏深度为主要因素(Guterman, 1993)。沙漠植物种子在 10~40℃的条件下均能顺利萌发(Cluff *et al.*, 1983)。鄂尔多斯高原种子萌发的适宜温度基本位于此范围内。同时, 在沙埋的情况下, 种子萌发过程受光照的影响较少。因此, 本文主要探讨土壤水分和沙埋对种子萌

发与出苗的影响。沙埋是控制沙生植物分布及沙地植物群落建成的重要因子(Ranwell, 1958; van der Valk, 1974; Maun & Lapierre, 1986)。一方面, 一定深度的沙埋可以为种子萌发创造比较适宜的环境(包括温度和水分)(Harper & Benton, 1966); 另一方面, 过度的埋藏会造成氧气的缺乏或小范围的温度波动, 使种子难于萌发, 幼苗不能出土(van Assche & Vanlerberghe, 1989; Vleeshouwers, 1997)。研究表明, 在一定埋藏深度范围内, 种子萌发和幼苗出土达到最大(Maun & Lapierre, 1986; Huang & Guterman, 2000; Chen & Maun, 1999; Ren *et al.*, 2002)。在萌发之前, 种子的含水量必须达到一个确定的最小值, 它是物种特有的生物学特性(Baskin & Baskin, 1998)。此外, 由于种子的大小决定了它所含能量的多少, 种子大小的差异也会影响种子萌发和幼苗出土(Chen & Maun, 1999; Seiwa *et al.*, 2002)。

羊柴 (*Hedysarum leave*)、柠条 (*Caragana korshinskii*)、籽蒿 (*Artemisia sphaerocephala*) 和油蒿 (*Artemisia ordosica*) 是鄂尔多斯高原广泛分布的 4 种植物, 是该地区不同植被演替阶段的优势物种 (刘玉平, 1996), 同时亦是飞播使用的主要物种。由于其快速无性繁殖与生长的特性, 羊柴在沙化土地治理中得到广泛运用, 柠条为豆科植物, 在固沙的同时, 亦可通过固定空气中的氮素而提高土壤肥力。二者经过简单的发酵处理后都可以作为牲畜的优质补充饲料。油蒿为鄂尔多斯高原的优势植物种, 籽蒿为流沙向固定、半固定沙地演替过程中起关键作用的物种。因此, 本文以上述 4 种植物为研究对象。

关于土壤水分和沙埋对种子萌发和出苗影响的报道较多 (Harper & Benton, 1966; 温阳, 1992; 王宗灵等, 1998; Huang & Gutterman, 1998), 但对于鄂尔多斯高原上述 4 种植物种子萌发和幼苗出土对土壤水分及沙埋响应的综合比较研究较少。本文的目的即在于阐明这些植物种子萌发及出苗对土壤水分及沙埋协同作用的响应过程, 阐明不同物种最适宜的萌发及出土条件, 进而选择合适的飞播时间, 为改善飞播技术与优化人工草地建设技术提供必不可少的基础数据。

1 研究区自然概况

本项研究在位于鄂尔多斯高原的中国科学院植物研究所鄂尔多斯沙地草地生态研究站 (以下简称生态站) 进行, 生态站位于内蒙古伊克昭盟伊金霍洛旗 (39°29'37.6" N, 110°11'29.4" E), 年降雨量为 350 ~ 400 mm, 多集中于 7 ~ 9 月; 年均温度为 6 ~ 7 °C, 1 月平均温度为 -12 ~ -1 °C, 7 月平均温度为 21 ~ 22 °C; 无霜期为 130 ~ 150 d; 年日照时数为 2 800 ~ 3 100 h, 平均风速为 3 ~ 3.5 m·s⁻¹, 11 月到 5 月多为西北风, 最大风速达 20 m·s⁻¹ (张新时, 1994), 海拔 1 300 m。

2 实验材料与方法

2.1 种子萌发能力预实验

实验在生态站普通日光温室内进行, 环境因子不能自动控制, 实验期间平均昼夜气温分别为 (24.7 ± 0.3) °C、(21.0 ± 0.3) °C。在每个培养皿中放入两张滤纸, 将 25 粒种子均匀放置于滤纸上, 加适量蒸馏水, 使滤纸充分湿润, 每天检查种子发芽率, 并及时添加蒸馏水直到种子的发芽率达到稳定, 然后记录萌发结果。每种植物分别为 5 个重复。

2.2 供水量与沙埋深度对种子萌发及幼苗出土的影响

实验材料包括: 内径 5.6 cm, 高度 11 cm 的圆柱形塑料容器、沙土、蒸馏水和 10 ml 移液管。塑料容器底部开排水孔, 排水孔上方垫有细尼龙网防止细沙渗漏。

实验所需种子均于 2002 年采自生态站附近, 在自然条件下干燥并储藏。种子千粒重分别为: 羊柴, (11.70 ± 0.9) g; 柠条 (34.15 ± 2.2) g; 籽蒿 (0.67 ± 0.12) g; 油蒿 (0.22 ± 0.09) g。实验用沙土取自生态站附近, 过筛去除杂质后, 在 100 °C 条件下烘干 48 h, 杀死其中可能存在的种子。

供水量分别为 123、185 和 246 ml 3 个等级, 分别模拟每月 50、75 和 100 mm 的降水量, 其中 50 mm 为上述植物种子主要萌发期 (5 月下旬至 6 月中上旬) 该地区的月平均降水量, 其它两种供水量分别在此基础上增加 50%、100%。实验期间每隔 3 d 加水 1 次, 共加水 10 次, 每次加水量为总水量的十分之一。

沙埋深度包括 7 个处理, 分别为 0、0.5、1、1.5、2、3 和 5 cm 7 个层次。实验开始前先在每个容器内距离容器上沿 0.5 cm 处标一刻度, 然后在容器内装上经过高温烘干的沙土, 使沙面保持水平。沙面与刻度的距离等于所需要的沙埋深度, 在沙面上将实验用的 25 粒种子摆放成等宽的 5 行 5 列, 再均匀铺撒沙子至该刻度处, 即得到所需要的沙埋深度, 每个处理包括 5 个重复。

每天观察出土的幼苗数, 对出土幼苗的总数做详细记录, 用当天的幼苗总数减去前一天的幼苗总数, 即可得到每天幼苗出土的数量。幼苗出土数量达到稳定后结束实验, 将实验容器中的沙土全部倒出, 仔细核对幼苗的数量, 并记录萌发但未出土的幼苗的数量。实验主要关注幼苗出土状况, 因此将休眠和已经腐烂的种子都视为未萌发的种子。

2.3 数据分析

本实验采用 4 个指标描述种子萌发的状况: 幼苗出土率 (以下简称出苗率)、未出土幼苗百分率、幼苗出土时间 (以下简称出苗时间) 和出苗速率。

出苗率, 即实验过程中露出沙面的幼苗的个数占实验使用种子的个数的百分率。

未出土幼苗百分率, 即实验过程中种子萌发但未出土的个数占实验使用种子个数的百分率。幼苗出土时间是指幼苗露出沙面时距实验开始时的天数, 实验开始时间从种子全部摆放完毕, 并完成第一

次加水算起。

出苗速率是描述幼苗出土快慢的指标,其计算公式为:

$$GR = \sum \frac{100G_i}{nt_i} \text{ (Rozema, 1975)}$$

其中 n 代表每个处理中使用的种子个数, G_i 代表 t_i ($t_i = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$) 天的出苗个数。出苗速率值越大,表示出苗速率越快。

在进行方差分析时,先对数据进行方差齐次性检验,必要时,对数据进行反正弦平方根转换。根据实验的要求分别进行单因素、双因素和三因素方差分析(ANOVA)。在满足方差齐性的情况下,采用 Tukey 检验进行多重比较;方差非齐的情况下,采用 Dunnett's T3 检验进行多重比较,确定哪些处理间的差异达到显著水平。由于埋藏深度为 0 cm 和 5 cm 的所有处理幼苗均未出土,因此,除未出土幼苗对供水量和沙埋深度的响应分析中包括埋藏深度 5 cm 的处理之外,所有方差分析和图中,均不包含这两个处理。

3 实验结果

3.1 预实验

各种植物种子的发芽率分别为:羊柴 65.6% ± 4.8%、柠条 52% ± 4.7%、籽蒿 94.4% ± 1.6%、油蒿 95.2% ± 0.8%。这些种子在预实验中的发芽率,可以认为是本实验所用各种子的最大发芽率。

3.2 沙埋和供水量对出苗的影响

3.2.1 沙埋和供水量对出苗率的影响

三因素方差分析结果显示:物种、供水量、沙埋深度、物种和沙埋深度的交互作用、供水量和沙埋深度的交互作用以及物种、供水量、沙埋深度三者的交互作用对出苗率的影响显著(表 1)。

对 4 个物种不同供水量、深度下的出苗率分别做 Tukey 检验,得到各物种在不同供水量、沙埋深度条件下出苗率的差异显著性情况如图 1。

从图 1(a)可见,羊柴种子在供水量 123 ml 条件下的出苗率,明显高于其它两种供水量($p < 0.05$)。当埋藏深度为 0.5 cm 时,出苗率达到最大值,其后出苗率随埋藏深度的增大而降低。埋藏深度 0.5 cm 和埋藏深度 3 cm 时,羊柴出苗率差异显著($p < 0.05$),其它埋藏深度下的出苗率无显著差异。当埋藏深度大于 3 cm 时,幼苗不能出土。

图 1(b)显示,沙埋深度为 1 cm 时,3 种供水量的柠条种子出苗率分别达到最大值,当沙埋深度大于 1 cm 后,出苗率随沙埋深度增加而降低。供水量为 123 ml 的条件下,埋藏深度小于 1 cm 时出苗率与埋藏深度正相关,埋藏深度大于 1 cm 时出苗率与埋藏深度负相关,埋藏深度小于 3 cm 下的出苗率与埋藏深度等于 3 cm 下的出苗率差异显著($p < 0.05$)。埋藏深度等于 1 cm 时出苗率达到最大值,表明供水量 123 ml、埋藏深度 1 cm 对于柠条种子出苗是最适宜的。

从图 1(c)可见,当供水量为 123 ml、沙埋深度为 0.5 cm 时,籽蒿出苗率达到最大值(64.2%)。埋藏深度为 0.5 cm 和 1 cm、供水量为 123 ml 时出苗率均显著高于其它两种供水量下的出苗率($p <$

表 1 物种、供水量和沙埋深度对出苗率影响的三因素方差分析

Table 1 Results of three-way ANOVA of final seedling emergence percentage of 4 species under different water supply and burial depth

偏差来源 Source	自由度 D_f	均方 Mean square	F 值 F-value	p 值 p-value
物种 Species	3	0.317	11.895	< 0.01
供水量 Water supply	2	0.990	37.201	< 0.01
深度 Depth	4	4.939	185.618	< 0.01
物种 × 供水量 Species × Water supply	6	0.075	2.841	0.11
物种 × 深度 Species × Depth	12	1.099	41.314	< 0.01
供水量 × 深度 Water supply × Depth	8	0.459	17.235	< 0.01
物种 × 供水量 × 深度 Species × Water supply × Depth	24	0.069	2.592	0.001
误差 Error	208	0.027		
总和 Total	260			

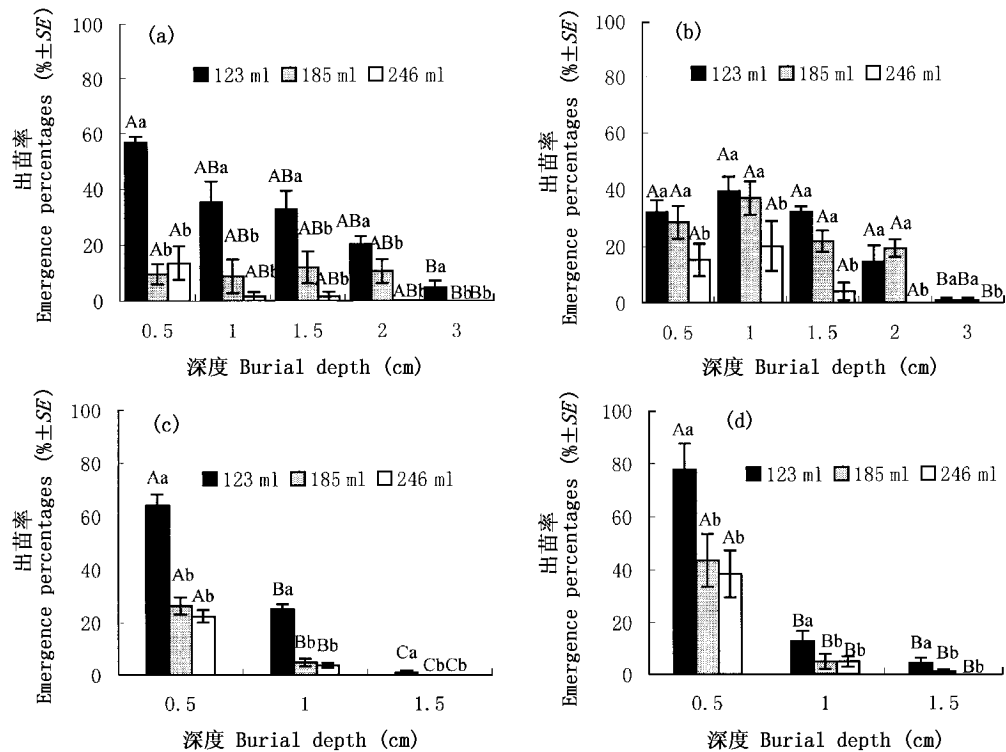


图1 羊柴(a)、柠条(b)、籽蒿(c)、油蒿(d)种子在不同沙埋深度和水分条件下的出苗率
Fig.1 Mean percent emergence of seedlings of *Hedysarum leave* (a), *Caragana korshinskii* (b), *Artemisia sphaerocephala*, (c), *Artemisia ordosica* (d) from different burial depth and water supply

根据 Tukey 检验,同一供水量,不同深度处理下,不同大写字母标记的值之间差异达到显著水平 ($p < 0.05$) Values with different capital letters among each depth under same water supply are significantly different ($p < 0.05$) 同一深度,不同供水量之间,不同小写字母表示的值之间差异达到显著水平 ($p < 0.05$) Values with different small letters among each water supply under same depth are significantly different ($p < 0.05$) (Tukey test) 没有幼苗长出的处理未被显示 Values without seedling emergence were not shown

0.05)。埋藏深度为 1.5 cm 时只有供水量为 123 ml 处理的少量幼苗能够出土,埋藏深度大于 1.5 cm 时,幼苗不能出土。随埋藏深度增加,出苗率均有下降趋势,3 种供水量条件下,埋藏深度 0.5 cm 与 1 cm 的出苗率均存在显著差异 ($p < 0.05$)。

图 1 (d)表明,油蒿种子的出苗率在埋藏深度大于 0.5 cm 时急剧下降。埋藏深度 0.5 cm 时出苗率明显大于埋藏深度 1 cm 和 1.5 cm 时的出苗率 ($p < 0.05$)。埋藏深度 0.5 cm 和 1 cm 时,供水量 123 ml 的出苗率与供水量 246 ml 时的出苗率差异显著 ($p < 0.05$)。

3.2.2 未出土幼苗百分率与水分和沙埋的关系

三因素方差分析结果显示,物种、沙埋深度、物种与沙埋深度的交互作用、供水量和沙埋深度的交互作用以及物种、供水量和沙埋深度三者的交互作用对未出土幼苗占种子总数百分率的作用都达到了显著水平 (表 2)。

表 3 给出各物种在不同供水量、沙埋深度条件下未出土幼苗百分率之间的差异显著性。羊柴未出土幼苗数量在供水量 123 ml 条件下,埋藏深度 0.5、1、1.5 cm 和埋藏深度 2 cm、埋藏深度 3、5 cm 的值之间差异显著 ($p < 0.05$);供水量 185 ml 条件下,埋藏深度 0.5、1、1.5、2 cm 与埋藏深度 3、5 cm 的值之间差异显著 ($p < 0.05$);供水量 246 ml 条件下,埋藏深度 0.5、1 cm 与埋藏深度 5 cm 的值差异显著 ($p < 0.05$)。在各供水量水平下,随埋藏深度增加,未出土幼苗百分率呈显著增加趋势。

柠条未出土幼苗百分率在供水量 123 ml 条件下,埋藏深度 0.5、1 cm 和埋藏深度 5 cm 两种情况下差异显著 ($p < 0.05$);在供水量 246 ml 条件下,埋藏深度 0.5、1 cm 和埋藏深度 2、3、5 cm 的值差异显著 ($p < 0.05$);而在供水量 185 ml 条件下,各埋藏深度的值均无显著差异。但仍表现出随埋藏深度增加,未出土幼苗百分率增加的趋势。

表 2 物种、供水量和沙埋深度对未出土幼苗百分率影响的三因素方差分析

Table 2 Results of three-way ANOVA of percentages of germinated seeds without emergence of 4 species under different water supply and burial depth				
偏差来源 Source	自由度 D_f	均方 Mean square	F 值 F -value	p 值 p -value
物种 Species	3	0.126	37.555	< 0.01
供水量 Water supply	2	0.014	0.994	0.372
深度 Depth	4	0.612	42.516	< 0.01
物种 × 供水量 Species × Water supply	6	0.030	2.119	0.052
物种 × 深度 Species × Depth	12	0.062	4.337	< 0.01
供水量 × 深度 Water supply × Burial depth	8	0.070	4.865	< 0.01
物种 × 供水量 × 深度 Species × Water supply × Depth	24	0.029	2.048	< 0.01
误差 Error	232	0.014		
总和 Total	290			

表 3 不同供水量不同埋藏深度下 4 种植物未出土幼苗百分率(±标准误差)

Table 3 Percentage of germinated seeds without emergence under different water supply and burial depth (± SE)							
种名 Species	供水量 Water supply (ml)	埋藏深度 Burial depth (cm)					
		0.5	1	1.5	2	3	5
羊柴 <i>Hedysarum leave</i>	123	0.8±0.8 ^a	2.4±2.4 ^a	3.2±3.2 ^a	14.4±3.2 ^b	25.6±6 ^c	25.6±5.2 ^c
	185	8.8±2.9 ^a	3.2±1.5 ^a	7.2±1.5 ^a	2.4±1 ^a	22.4±2.7 ^b	24±2.2 ^b
	246	3.2±1.5 ^a	4.8±1.5 ^a	9.6±5.5 ^{ab}	8±2.5 ^{ab}	6.4±2.7 ^{ab}	24.8±4.6 ^b
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	123	0.8±0.8 ^a	0.8±0.8 ^a	1.6±1 ^{ab}	2.4±1.6 ^{ab}	6.4±2.7 ^{ab}	8.8±2.9 ^b
	185	0 ^a	0 ^a	0.8±0.8 ^a	0 ^a	3.2±2 ^a	4±2.5 ^a
	246	0 ^a	0 ^a	2.4±1 ^{ab}	4.8±1.5 ^b	4±1.3 ^b	4.2±1.5 ^b
籽蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	123	0 ^a	0 ^a	0 ^a	2.4±1 ^b	0 ^a	3.8±2.3 ^b
	185	0 ^a	0 ^a	0 ^a	0 ^a	4±1.3 ^b	3.6±4.3 ^b
	246	0.8±0.8 ^a	0 ^a	0 ^a	0.8±0.8 ^a	1.6±1.6 ^a	1.4±3.5 ^a
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	123	1.6±1 ^a	4±3.1 ^a	1.6±1 ^a	5.6±2 ^a	4±1.3 ^a	2.8±0.9 ^a
	185	2.4±2.4 ^a	5.6±2.7 ^a	3.2±2.3 ^a	0.8±0.8 ^a	0.8±0.8 ^a	1.6±0.2 ^a
	246	4±1.3 ^a	0.8±0.8 ^{ab}	0 ^b	0.8±0.8 ^{ab}	0.8±0.8 ^{ab}	3.2±0.8 ^{ab}

同种植物,同一供水量,不同沙埋深度处理下,不同字母标记的值之间差异显著 ($p < 0.05$) Values of one species followed by different letters among each burial depth under same water supply are significantly different ($p < 0.05$) (Tukey test)

籽蒿未出土幼苗百分率在供水量 123 ml 条件下,埋藏深度 2 和 5 cm 的值与其它埋藏深度下的值差异显著 ($p < 0.05$);供水量 185 ml 条件下,埋藏深度 3 和 5 cm 处理的值与其它处理的值差异显著 ($p < 0.05$);供水量 246 ml 条件下,各处理的值均无显著差异。但亦表现出随埋藏深度增加,未出土幼苗百分率增加的趋势。

油蒿未出土幼苗百分率在供水量 123 和 185 ml 条件下,各埋藏深度未出土幼苗百分率的值差异均不显著。只有在供水量 246 ml 条件下,沙埋深度为 0.5 与 1.5 cm 处理的值差异显著 ($p < 0.05$)。

3.2.3 出苗时间对供水量和沙埋的响应

Dunnnett’s T3 多重比较结果(表 4)显示羊柴、柠条、籽蒿和油蒿种子在不同供水量和沙埋深度条件下出苗时间的差异情况。

表 4 显示,羊柴在相同供水量条件下,不同埋藏深度的出苗时间无显著差异,在埋藏深度为 0.5、1 和 3 cm 时,供水量 123 ml 与供水量 185、246 ml,种

子出苗时间的差异达到显著水平 ($p < 0.05$)。而埋藏深度 1.5 和 2 cm 时,3 种供水量的种子出苗时间相互之间的差异均达到显著水平 ($p < 0.05$)。较低供水水平下的出苗时间快于较高供水水平。

柠条在 3 种供水量条件下,埋藏深度为 0.5、1 和 1.5 cm 时的出苗时间与埋藏深度为 2、3 cm 时的出苗时间差异显著 ($p < 0.05$),同时埋藏深度为 2 和 3 cm 时的出苗时间亦存在显著差异 ($p < 0.05$)。埋藏越深出苗时间越晚。同一埋藏深度不同供水量下出苗时间无显著差异。

籽蒿在供水量为 123 和 185 ml 时,不同埋藏深度下的出苗时间均存在显著差异 ($p < 0.05$),埋藏越深,出苗越慢,0.5 cm 为最适埋深。供水量为 246 ml 时,不同埋藏深度下籽蒿出苗时间无显著差异。埋藏深度为 0.5 cm 时,3 种不同供水量下籽蒿出苗时间存在显著差异 ($p < 0.05$),埋藏深度为 1 和 1.5 cm 时,不同供水量下籽蒿出苗时间无显著差异。

油蒿种子在相同供水量、不同埋藏深度条件下

表 4 不同供水量不同埋藏深度下 4 种植物出苗时间的 Dunnett's T3 检验结果
Table 4 Result of Dunnett's T3 test about seedling emergence time under different water supply and burial depth ($\pm SE$)

种名 Species	供水量 Water supply (ml)	埋藏深度 Burial depth (cm)				
		0.5	1	1.5	2	3
羊柴 <i>Hedysarum leave</i>	123	7.2 ± 0.2 ^{Aa}	8.8 ± 0.5 ^{Aa}	8.8 ± 0.4 ^{Aa}	11.6 ± 0.7 ^{Aa}	12.6 ± 0.9 ^{Aa}
	185	24.6 ± 3.8 ^{Ab}	24.8 ± 3.6 ^{Ab}	18.4 ± 4.5 ^{Ab}	19 ± 3.8 ^{Ab}	26.2 ± 3.8 ^{Ab}
	246	20.6 ± 5 ^{Ab}	29.6 ± 0.4 ^{Ab}	29.2 ± 0.8 ^{Ac}	29.4 ± 0.6 ^{Ac}	29.8 ± 0.2 ^{Ab}
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	123	4.4 ± 0.2 ^{Aa}	6.6 ± 0.4 ^{Aa}	6.4 ± 0.4 ^{Aa}	15.8 ± 3.6 ^{Ba}	27.8 ± 2.2 ^{Ca}
	185	5 ± 1 ^{Aa}	6.2 ± 0.2 ^{Aa}	7.6 ± 0.2 ^{Aa}	18.4 ± 0.5 ^{Ba}	26.2 ± 3.8 ^{Ca}
	246	7 ± 4.8 ^{Aa}	8.2 ± 0.8 ^{Aa}	8.8 ± 0.2 ^{Aa}	19.2 ± 3.8 ^{Ba}	29.8 ± 0.2 ^{Ca}
籽蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	123	7.4 ± 0.6 ^{Aa}	19.2 ± 4.6 ^{Ba}	26 ± 4 ^{Ca}		
	185	16 ± 5.7 ^{Ab}	20 ± 3.9 ^{Ba}	30 ^{Ca}		
	246	26.2 ± 3.8 ^{Ac}	23.6 ± 4.1 ^{Aa}	30 ^{Aa}		
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	123	6 ± 0.5 ^{Aa}	12.4 ± 4.4 ^{Ba}	18.4 ± 4.8 ^{Ca}		
	185	5.4 ± 0.2 ^{Aa}	18 ± 4.9 ^{Ba}	26.6 ± 3.4 ^{Ca}		
	246	7.2 ± 0.2 ^{Aa}	19.8 ± 4.2 ^{Ba}	30 ^{Ca}		

相同物种和供水量,不同沙埋深度处理下,不同大写字母标记的值之间差异显著 ($p < 0.05$); 同一深度内,不同供水量之间,不同小写字母标记的值之间差异显著 ($p < 0.05$) Values of one species with different capital letters among each burial depth under same water supply are significantly different ($p < 0.05$); Values with different small letters among each water supply under same burial depth are significantly different ($p < 0.05$) 由于籽蒿和油蒿的种子在埋藏深度为 2 和 3 cm 时均没有幼苗长出,上述条件下两种植物种子的出苗时间空缺 Values that the burial depths are 2 and 3 cm were not displayed, because there is no seedling of *A. sphaerocephala* (Fig.1c) and *A. ordosica* (Fig.1d) emerged under these conditions

表 5 不同物种、供水量和沙埋深度对出苗速率影响的三因素方差分析
Table 5 Results of three-way ANOVA of seedling emergence rate of 4 species under different water supply and burial depth

偏差来源 Source	自由度 D_f	均方 Mean square	F 值 F -value	p 值 p -value
物种 Species	3	0.386	30.054	< 0.01
供水量 Water supply	2	0.800	62.216	< 0.01
深度 Depth	4	1.493	116.161	< 0.01
物种 × 供水量 Species × Water supply	6	0.066	5.140	< 0.01
物种 × 深度 Species × Depth	12	0.227	22.347	< 0.01
供水量 × 深度 Water supply × Burial depth	8	0.181	14.077	0.001
物种 × 供水量 × 深度 Species × Water supply × Depth	24	0.050	3.859	0.001
误差 Error	240	0.013		
总和 Total	300			

的出苗时间之间的差异显著 ($p < 0.05$),埋藏越深,出苗越慢,0.5 cm 为最适埋深。相同埋藏深度、不同供水量条件下的出苗时间差异均未达到显著水平。

3.2.4 出苗速率对供水量和沙埋的响应

三因素方差分析结果显示:物种、供水量、沙埋深度、物种与供水量的交互作用,物种和沙埋深度的交互作用,供水量和沙埋深度的交互作用以及物种、供水量、沙埋深度三者的交互作用对出苗速率的影响均存在显著差异(表 5)。

表 6 显示,羊柴种子的出苗速率,以埋藏深度条件衡量,可分为 3 个类型:埋藏深度为 0.5 cm 时的出苗速率大于埋藏深度 1、1.5、2 和 3 cm 时的出苗速率,且差异显著 ($p < 0.05$);埋藏深度为 1 和 1.5

cm 时的出苗速率大于埋藏深度 3 cm 时的出苗速率,差异显著 ($p < 0.05$)。以供水量条件衡量,可以分为两个类型:供水量 123 ml 条件下各埋藏深度种子出苗速率明显大于供水量 185、246 ml 时的出苗速率($p < 0.05$),供水量 185 和 246 ml 两种条件下出苗速率无显著差异。

柠条种子的出苗速率,以埋藏深度条件衡量,可分为 3 个类型:埋藏深度为 0.5、1 cm 时出苗速率显著大于埋藏深度 2、3 cm 时的出苗速率 ($p < 0.05$);埋藏深度为 1.5、2 cm 时的出苗速率显著大于埋藏深度 3 cm 时的出苗速率 ($p < 0.05$)。以供水量条件衡量,可以分为两个层次:供水量为 123 和 185 ml 时的出苗速率明显大于供水量 246 ml 时的出苗速率 ($p < 0.05$)。前两个供水量条件下的出苗速率无

显著差异。

籽蒿种子在埋藏深度为 0.5 cm 时的出苗速率大于埋藏深度为 1 和 1.5 cm 时的出苗速率,且差异显著 ($p < 0.05$)。埋藏深度大于 1.5 cm 时,不再有幼苗长出。供水量为 123 ml 时的出苗速率大于供水量为 185 和 246 ml 时的出苗速率,差异显著 ($p < 0.05$)。

油蒿种子在埋藏深度为 0.5 cm 时的出苗速率明显大于埋藏深度为 1 和 1.5 cm 时的出苗速率 ($p < 0.05$)。当埋藏深度大于 1.5 cm 时,不再有幼苗长出。油蒿种子在相同埋藏深度、不同供水量条件下的出苗速率无显著差异。

上述 4 种植物在较高供水水平下的萌发速率均有不同程度的降低。

表 6 不同供水量不同埋藏深度下 4 种植物出苗速率多重比较
Table 6 Comparison of seedling emergence rate under different water supply and barial depth

种名 Species	供水量 Water supply (ml)	埋藏深度 Burial depth (cm)				
		0.5	1	1.5	2	3
羊柴 <i>Hedysarum leave</i>	123	6.34 ^{Aa}	3.16 ^{Ba}	2.87 ^{Ba}	1.16B ^{Ca}	1.33 ^{Ca}
	185	3.55 ^{Ab}	2.26 ^{Bb}	1.92 ^{Bb}	0.41B ^{Cb}	0.66 ^{Cb}
	246	2.09 ^{Ab}	1.06 ^{Bb}	1.06 ^{Bb}	0.52B ^{Cb}	0.66 ^{Cb}
柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	123	5.31 ^{Aa}	5.06A ^{Ba}	4.02B ^{Ca}	1.01C ^{Da}	0.04 ^{Da}
	185	4.95 ^{Aa}	3.38A ^{Ba}	2.58B ^{Ca}	2.31C ^{Da}	0.07 ^{Da}
	246	2.43 ^{Ab}	2.37A ^{Bb}	0.44B ^{Cb}	0C ^{Dh}	0 ^{Dh}
籽蒿 <i>Artemisia sphaerocephala</i>	123	6.79 ^{Aa}	0.7 ^{Ba}	0.08 ^{Ba}		
	185	0.92 ^{Ab}	0.08 ^{Bb}	0 ^{Bb}		
	246	0.13 ^{Ab}	0.02 ^{Bb}	0 ^{Bb}		
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	123	8.56 ^{Aa}	1.10 ^{Ba}	0.36 ^{Ba}		
	185	10.48 ^{Aa}	0.45 ^{Ba}	0.06 ^{Ba}		
	246	2.71 ^{Aa}	0.51 ^{Ba}	0 ^{Ba}		

同一物种,相同供水量,不同埋藏深度处理下,不同大写字母标记的值差异显著 ($p < 0.05$);同一埋藏深度,不同供水量下,不同小写字母表示的值差异显著 ($p < 0.05$) Values of one species with different capital letters among each burial depth under same water supply are significantly different ($p < 0.05$); Values with different small letters among each water supply under same burial depth are significantly different ($p < 0.05$) 籽蒿和油蒿的种子在埋藏深度为 2 和 3 cm 时均无幼苗长出,上述条件下两种植物种子的出苗速率为 0 Values that the burial depths were 2 and 3 cm were not displayed, because there is no seedling of *Artemisia sphaerocephala* (Fig.1c) and *A. ordosica* (Fig.1d) emerged under these conditions

4 讨 论

不同植物种子由于大小、结构和生物学特性的不同,幼苗出土所需条件也不相同。了解种子的萌发及出苗特性可以创造其所需要的环境条件,从而获得更高的出苗率。

4.1 种子大小对种子萌发与出苗率的影响

由于种子质量较大,柠条和羊柴的种子对于沙埋的适应显然要高于籽蒿和油蒿,这与前人的研究结果类似。种子质量越大,越能从更深的埋藏深度中出苗,这对于同种植物种子还是不同种类种子都成立 (van der Valk, 1974; Yanful & Maun, 1996; Chen & Maun, 1999; Seiwa *et al.*, 2002; Ren *et al.*, 2002)。4 种植物的种子千粒重大小依次为:柠条、羊柴、籽蒿和油蒿。虽然这些种子都能在实验设计的沙埋深度范围 (0~5 cm)内萌发,但从幼苗出土的深度来看,油蒿和籽蒿均不能从大于 1.5 cm 的沙层下出土,而柠条和羊柴则均可以从 2~3 cm 厚的

沙层下出苗。羊柴种子埋藏深度大于 2 cm 的出苗率为 0.8%,出苗率与未出土幼苗百分率之和为 25.5%;柠条种子埋藏深度大于 2 cm 时出苗率为 0.27%,出苗率与未出土幼苗百分率之和为 7.9%。可见,羊柴种子在此范围内比柠条种子更适应沙埋,这说明种子萌发及幼苗出土又不仅仅受种子大小这一因素的影响,物种本身的生物学特性亦有重要影响。埋藏深度大于 2 cm 时,油蒿及籽蒿的出苗率均为 0,未出土幼苗百分率亦较低。4 种植物种子耐沙埋的顺序为:羊柴>柠条>籽蒿>油蒿。

4.2 供水量对 4 种植物种子出苗率的影响

不同供水量对 4 种植物的影响基本相同,在实验供水范围内 (123, 185 和 246 ml),随供水量增加,种子出苗率降低,未出土幼苗百分率变化不明显,出苗时间延长,出苗速率降低。

4 种植物在 3 种不同供水量条件下,出苗率差异显著 ($p < 0.05$);未出土幼苗百分率无显著差异。

不同植物出苗率对供水量的响应有所不同:羊

柴、籽蒿、油蒿均为供水量 123 ml 下的出苗率与供水量 185 和 246 ml 下的出苗率差异显著 ($p < 0.05$), 而供水量 185 和 246 ml 下的出苗率无显著差异。柠条种子却是前两个供水量条件下的出苗率差异不显著, 而与 246 ml 条件下的出苗率差异显著 ($p < 0.05$)。

4.3 沙埋对 4 种植物出苗率的影响

随埋藏深度增加, 4 种植物出苗率降低, 出苗时间延长; 0 和 5 cm 埋藏深度下 4 种植物均没有幼苗长出, 在沙埋深度为 0.5 cm 的处理中, 除柠条外, 其它 3 种植物的出苗率均达到了最大值 (图 1), 4 种植物最佳的埋藏深度都在 0.5 ~ 1 cm 之间。对于两种蒿属植物, 当沙埋深度大于 1.5 cm 时, 没有幼苗长出。我们认为主要是由于蒿属种子相对较小, 种子所含能量较少, 不足以维持幼苗穿过 1.5 cm 的沙层。这可以由沙埋深度为 5 cm 时仍有油蒿种子萌发而未能穿过沙层得到证实。

结合水分和沙埋两个因素, 4 种植物达到最佳出苗率的供水量均为 123 ml, 而埋藏深度则分别为: 羊柴, 0.5 cm; 柠条, 1 cm; 籽蒿, 0.5 cm; 油蒿, 0.5 cm, 在生产实践中应尽可能满足上述条件, 以提高种子的出苗率。

总之, 柠条、羊柴、籽蒿和油蒿虽有不同的萌发特性, 但它们对水分的需求大致相同, 当地的平均降水量能够满足其萌发的需要。降水的持续性对种子萌发亦很重要, 每次降水之间间隔越大, 由此造成休眠的种子的比例也越大 (王宗灵等, 1998)。

4.4 对生态恢复工程的启示

羊柴、柠条、籽蒿、油蒿 4 种植物的种子萌发都需要一定的沙埋条件, 最佳沙埋深度在 0.5 cm 左右。而鄂尔多斯高原植物飞播通常在六月上旬进行, 此时, 该区一般风力较小, 而且没有连续性的降雨, 白天蒸发量大, 地表温度较高。种子如果缺乏合适的沙层埋藏, 或者由于沙子表面干燥而不能萌发; 或者遇到一次较大的降雨, 种子萌发, 继而长出幼苗, 但由于沙地表面迅速变干, 导致种子和幼苗由于高温和曝晒而死亡, 这是导致飞播出苗率较低的重要原因 (温阳, 1992)。基于此, 建议将鄂尔多斯地区的飞播工作提前到五月中下旬。这一时期, 该地区大风天气仍较多, 飞播后的植物种子有较大的机会被风沙掩埋, 这样即使没有足够的降水使种子萌发, 这些被埋藏的种子也可以作为种子库, 到 6 月中下旬降雨逐渐增多时萌发, 以提高种子的出苗率, 有效提高飞播工作成效。

参 考 文 献

- Baskin CC, Baskin JM (1998). *Seeds Ecology, Biogeography and Evolution of Dormancy and Germination*. Academic Press, San Diego, 70 – 71.
- Chen H, Maun MA (1999). Effects of sand burial depth on seed germination and seedling emergence of *Cirsium pitcheri*. *Plant Ecology*, 140, 53 – 60.
- Cluff GJ, Evans RA, Young JA (1983). Desert salt grass seed germination and seedbed ecology. *Journal of Range Management*, 36, 419 – 422.
- Guterman Y (1993). *Seed Germination of Desert Plants*. Springer-Verlag, Berlin.
- Harper JL, Benton RA (1966). The behaviour of seeds in soil. The germination of seeds on the surface of a water supplying substrate. *Journal of Ecology*, 54, 151 – 156.
- Huang ZY, Guterman Y (1998). *Artemisia monosperma* achene germination in sand: effects of sand depth, sand/water content, cyanobacterial sand crust and temperature. *Journal of Arid Environments*, 38, 27 – 43.
- Huang ZY, Guterman Y (2000). Comparison of germination strategies of *Artemisia ordosica* with its two congeners from deserts of China and Israel. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 42, 71 – 80.
- Liu YP (刘玉平) (1996). Air seeding vegetation succession in Maowusu sandyland. *Grassland of China* (中国草地), 19, 24 – 27. (in Chinese with English abstract)
- Maun MA, Lapiere J (1986). Effects of burial by sand on seed germination and seedling emergence of four dune species. *American Journal of Botany*, 73, 450 – 455.
- Qi JZ (漆建忠) (1998). *Aerial Sowing for Sand Control in China* (中国飞播治沙), Science Press, Beijing, 216.
- Ranwell D (1958). Movement of vegetated sand dunes at Newborough Warren, Anglesey. *Journal of Ecology*, 46, 83 – 100.
- Ren J, Tao L, Liu XM (2002). Effect of sand burial depth on seed germination and seedling emergence of *Calligonum* L. species. *Journal of Arid Environments*, 51, 603 – 611.
- Rozema J (1975). The influence of salinity, inundation and temperature on germination of some halophytes and non-halophytes. *Oecologia Plantarum*, 10, 341 – 353.
- Seiwa K, Watanabe A, Saitoh T, Kanno H, Akasaka S (2002). Effects of burying depth and seed size on seedling establishment of Japanese chestnuts, *Castanea crenata*. *Forest Ecology and Management*, 164, 149 – 156.
- van Assche JA, Vanlerberghe VA (1989). The role of temperature on dormancy cycle of seeds of *Rumex obtusifolia* L. *Functional Ecology*, 3, 107 – 115.
- van der Valk AG (1974). Environmental factors controlling the distribution of forbs on coastal foredunes in Cape Hatteras National Seashore. *Canadian Journal of Botany*, 52, 1057 – 1073.
- Vlesshouwers LM (1997). Modeling the effect of temperature, soil penetration resistance, burial depth and seed weight on pre-emergence growth of weeds. *Annals of Botany*, 79, 553 – 563.
- Wang ZL (王宗灵), Xu YQ (徐雨清), Wang G (王刚) (1998). Germination strategies of annual sandy plants under limited precipitation. *Journal of Lanzhou University* (Natural Science Edition) (兰州大学学报) (自然科学版), 34, 98 – 103. (in

Chinese with English abstract)

Wen Y (温阳) (1992). A study on the effect of rainfall on aerial seeding. In: Wang JX (王家祥) ed. *Collected Papers of the Maowusu Sands Exploitation and Control Research Centre* (毛乌素沙地开发整治研究中心研究文集). Inner Mongolia University Press, Hohhot, 43 – 46. (in Chinese)

Yanful M, Maun MA (1996). Effects of burial of seeds and seedlings from different seed sizes on the emergence and growth of *Strophostyles helvola*. *Canadian Journal of Botany*, 74, 1322 – 1330.

Zhang XS (张新时) (1994). The construction principle and optimal model of the grassland and ecological background of Maowusu sandy land. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 18, 1 – 16. (in Chinese with English abstract)

Zheng YR, Xie ZX, Gao Y, Shimizu H, Jiang LH, Yu Y (2003). Ecological restoration in northern China: germination characteristics of 9 key species in relation to air seeding. *Belgian Journal of Botany*, 136, 129 – 138.

Zheng YR (郑元润), Zhang XS (张新时) (1998). The diagnosis and optimal design of high efficient ecological economy system in Maowusu sandy land. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 22, 262 – 268. (in Chinese with English abstract)

责任编辑：董 鸣 责任编辑：姜联合