

毛乌素沙地 4 种沙生植物种子萌发及出苗 对沙埋及单次供水的响应

郑明清^{1, 2}, 郑元润^{1, *}, 姜联合³

(1. 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;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院植物研究所, 北京 100093)

摘要: 飞播固沙作为一项快速而有效的现代化治沙措施, 已成为毛乌素沙地植被恢复与重建的重要手段。但此项技术仍存在一些问题, 如飞播后成苗率较低等。以毛乌素沙地优势植物柠条 (*Caragana korshinskii*)、羊柴 (*Hedysarum laeve*)、油蒿 (*Artemisia ordosica*) 与籽蒿 (*Artemisia sphaerocephala*) 为研究对象, 人工控制 7 个沙埋深度和 9 个水分梯度, 研究 4 种植物种子萌发和幼苗出土对沙埋和单次供水的响应, 阐明多大的单次降雨才能保证种子萌发与幼苗出土及出土幼苗的维持时间。结果表明, 对于柠条和羊柴质量相对较大的种子而言, 种子主要在供水量 10 ~ 20mm, 埋藏深度为 0.5 ~ 2cm 的条件下出苗, 但在埋藏深度为 5cm 时这两个物种仍有少量种子能够出苗; 而对于油蒿和籽蒿质量相对较小的种子而言, 种子主要在供水量 10 ~ 20mm, 埋藏深度为 0.5cm 时出苗, 当埋藏深度为 1.5cm 和 2cm 时不能顺利出苗。沙埋深度 0.5cm 条件下, 4 个物种具有最高的出苗率和出苗速率。在试验期内 (30d), 柠条、羊柴和油蒿出土幼苗分别在单次供水量为 5、7.5mm 和 7.5mm 时全部死亡, 在单次供水量高于 15mm 时 4 个种的出土幼苗死亡率大多低于 50%, 且随供水量的增加出土幼苗死亡率降低。结合毛乌素沙地降雨特点与本次实验结果, 0.5cm 的沙埋及 7.5mm 以上的单次降雨是上述 4 种植物自然条件下出苗较好的重要条件。

关键词: 毛乌素沙地; 飞播; 荒漠化; 沙埋; 单次供水; 种子萌发; 幼苗出土; 植被恢复

文章编号: 1000-0933(2006)08-2474-11 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Effects of one-time water supply and sand burial on seed germination and seedling emergence of four popular psammophyte in Mu Us sandy land

ZHENG Ming-Qing^{1, 2}, ZHENG Yuan-Run^{1, *}, JIANG Lian-He³ (1. Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2474 ~ 2484.

Abstract: The Ordos Plateau is one of the major areas of desertification in Northern China. Aerial seeding has long been regarded as a successful and quick measure for vegetation rehabilitation in deserts and sand lands, but seedling emergence is low for four of the dominant psammophyte species inhabiting in Mu Us sandy land including *Caragana korshinskii*, *Hedysarum laeve*, *Artemisia ordosica* and *Artemisia sphaerocephala*. Experiments were conducted under controlled conditions to study the effects of one-time water supply and sowing depth on seed germination and seedling emergence of these four species, in order to understand how much one-time precipitation can ensure seed germination, seedling emergence, and the survival of emerged seedling until next rainfall.

For each species, a set of experiments were conducted under the combination of one of seven depths of sand burial (0, 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5 cm) and an one-time continual water supply regime (2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30, 40 mm and 2.5 mm/3d).

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30570327); 中国科学院资源环境领域野外台站基金资助项目; 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

收稿日期: 2005-06-15; **修订日期:** 2005-11-12

作者简介: 郑明清 (1980 ~), 男, 广西人, 硕士生, 主要从事植物对沙生环境反应研究. E-mail: zhengmingq@ibcas.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenyr@ibcas.ac.cn

Foundation item: The project was supported by NSFC (No. 30570327), Field Station Foundation of CAS, Foundation of MEC.

Received date: 2005-06-15; **Accepted date:** 2005-11-12

Biography: ZHENG Ming-Qing, Master candidate, mainly engaged in plant responses to sandy environments. E-mail: zhengmingq@ibcas.ac.cn

Our results show that: (1) for two species (*Caragana korshinskii* and *Hedysarum laeve*), a relative large number of seeds emerged mostly at 0.5–2 cm sowing depth and under 10–20 mm one-time water supply regime, and a few seeds also emerged at 5 cm sowing depth; (2) for another two species (*Artemisia ordosica* and *Artemisia sphaerocephala*), seeds emerged well only at 0.5 cm sowing depth and under 10–20 mm one-time water supply regime, however, *Artemisia ordosica* and *Artemisia sphaerocephala* can not emerge at 1.5 and 2 cm burial depth, respectively. In general, a 0.5 cm sowing depth resulted in the highest seedling emergence and emergence rate. It was also found that after 30 days, all the emerged seedlings of *Caragana korshinskii*, *Hedysarum laeve* and *Artemisia ordosica* died under 5, 7.5 and 7.5 mm one-time water supply regime respectively, and the seedlings mortality of all four species was under 50% in most treatments when one-time water supply regime is higher than 10 mm. As water supply was increased, the mortality of emerged seedlings of these four species was decreased accordingly.

Based on our experiment results and precipitation characteristics of the Mu Us sandy land, 0.5 cm sowing depth and one-time water supply regime of more than 7.5 mm are the important conditions for seedling emergence and survival in field for all 4 species.

Key words: Mu Us sandy land; aerial seedling; desertification; sowing depth; one-time water supply regime; seed germination; seedling emergence

我国是世界上受荒漠化影响最严重的国家之一。全国沙漠、戈壁和沙漠化土地面积约为 $1.7 \times 10^6 \text{ km}^2$, 其中人类活动导致的现代沙漠化土地约 $3.9 \times 10^5 \text{ km}^2$ [1]。虽然经过近 50a 的努力, 目前我国荒漠化防治仍处于“局部治理, 整体恶化”的严峻局面 [2]。包括毛乌素沙地在内的鄂尔多斯高原是我国荒漠化发展的中心地区之一 [3]。沙漠和荒漠化不仅长期制约着地方经济的发展, 同时也不同程度地影响着黄河中下游等地区的生态环境。因此, 毛乌素沙地退化生态系统的恢复重建势在必行。

荒漠化防治最终体现为植被的有效恢复, 飞播作为一项快速而有效的现代化治沙措施, 已成为毛乌素沙地沙质荒漠化土地植被重建与逆转的重要手段 [4]。但此项技术仍存在问题, 如飞播后成苗率较低等 [5]。飞播能否成功的关键在于种子能否萌发及幼苗能否顺利出土与定居, 这一过程受诸多因素影响, 其中温度、土壤水分和种子埋藏深度为主要因素 [6,7]。据 Cluff [8] 报道, 沙生植物种子在 10~40℃ 的条件下均能顺利萌发。毛乌素沙地春末夏初种子萌发主要季节的温度基本在此范围以内, 因此, 如果种子能够适当沙埋, 这一时期温度不是本地区种子萌发的主要限制因子。而沙埋与土壤水分是本地区种子萌发最重要的生态因子和限制因子 [9,10]。在荒漠地区, 沙子运动是沙生环境的一个重要特征 [11]。水分不仅是植物体内重要的物质组成部分, 同时植物诸多生理过程均需要水分参与。种子在萌发之前, 其含水量必须达到一个确定的最小值, 这是物种特有的生物学特性 [11]。生长在沙丘上的植物、种子和幼苗经常会遭受不同程度的沙埋 [12,13]。沙埋可以为种子萌发创造适宜的环境 [14], 而过深的沙埋亦会抑制种子的萌发及幼苗出土 [15]。在沙丘植物群落中, 沙埋是控制沙生植物分布及其群落建成的重要因子 [16–18]。

柠条 (*Caragana korshinskii*)、羊柴 (*Hedysarum laeve*)、油蒿 (*Artemisia ordosica*) 与籽蒿 (*Artemisia sphaerocephala*) 作为毛乌素沙地广泛分布的 4 种植物, 是该地区不同植被演替阶段的优势物种 [19], 同时亦是飞播使用的主要物种。因此, 探讨这 4 种植物种子萌发与幼苗出土特性对沙埋及单次供水的响应对改善飞播技术具有重要意义。目前国际上关于沙埋对种子萌发和幼苗出土影响的报道多限于沙埋深度及种子本身质量和大小等方面。聂春雷和郑元润 [20] 对上述 4 种植物种子萌发和幼苗出土对沙埋及供水的响应进行了初步研究, 但供水设置为每 3d 一次的等阶供水, 尽管给出了初步的幼苗出土特性, 但等价降水在自然界是不存在的。荒漠气候条件多变, 何时降雨, 降雨量大小, 降雨间隔时间的长短等都是随机的。一次可导致种子萌发的降雨之后, 可能紧接着一段较长时间无降雨的干燥期, 这期间的干燥可能导致已萌发个体的全部死亡 [21]。因此, 本文的目的在于以毛乌素沙地荒漠化防治中采用的主要植物为研究对象, 探讨多深的沙埋及多少降雨对它们的萌发及出土最为适宜, 以及在一次降雨之后幼苗的存活时间等问题, 阐明不同植物种子萌发及出苗对单次降雨及沙埋协同作用的响应过程, 进而选择合适的飞播时间, 为改善飞播技术提供必要的基础数据。这对采

用合理的物种进行荒漠化防治,提高生态工程的稳定性及可持续性具有重要的理论与实际意义。

1 研究地区与方法

1.1 研究地区

研究地区位于毛乌素沙地中国科学院植物研究所鄂尔多斯沙地草地生态研究站试验地内,生态站位于内蒙古伊克昭盟伊金霍洛旗($39^{\circ}29'37.6''N$, $110^{\circ}11'29.4''E$),年降雨量为 350~400mm,降雨多集中在 7~9 月份,占全年的 60%~70%以上;年均温为 6~7℃,1 月份均温为 -12~1℃,7 月份均温为 21~22℃;其它条件详见文献^[9]。

1.2 研究方法

试验所需种子均于 2002 年 6~11 月种子成熟季节在生态站附近随机选取各个物种的自然种群,设置 4 个 2000 m² 的样地,直接从植株上采取,后在自然条件下干燥并去壳,在室温条件下储藏直至本试验开始。试验开始前进行种子萌发能力预实验测得各植物种子的发芽率分别为:柠条 $51.7\% \pm 4.5\%$ 、羊柴 $58.2\% \pm 6.3\%$ 、油蒿 $81.4\% \pm 3.6\%$ 、籽蒿 $76\% \pm 5.6\%$ 。该发芽率可认为是本试验所用各种子的最大发芽率。

试验用沙取自生态站附近,过筛去除杂质后,在 100℃ 条件下烘干 48 h,杀死其中可能存在的种子。试验用塑料圆柱形容容器内径 6.8cm,高 16cm,底部开排水孔,排水孔上方垫细尼龙网防止细沙渗漏。

沙埋深度包括 0、0.5、1、1.5、2、3cm 和 5cm 共 7 个处理。先将经处理过的沙子装入容器内至相应的深度,播种后覆沙至所需的沙埋深度,并使沙表面保持水平。每个处理设置 5 个重复,每个重复 25 粒种子。

5~7 三个月是研究区域内种子萌发和幼苗出土与生长最为关键的时期,根据 40a(1959~1999 年)毛乌素沙地上 3 个月的降雨资料(图 1),设计单次 2.5、5、7.5、10、15、20、30mm 和 40mm 降雨量的 8 个水分梯度,各个梯度的供水量分别为 9.1、18.2、27.2、36.3、54.5、72.6、109.0 ml 和 145.3 ml。试验包括 9 个处理:试验期内只供水一次(8 个水分梯度),每 3d 供水一次(降雨量 2.5mm,供水量 9.1ml/3d)。

试验于 2004 年种子萌发季节进行。所有处理均置于无热源大棚内,四周通风。试验期间,晴天时,掀开挂有防水布的顶层使所有处理曝露在自然环境中,雨天时,放下防水布以阻碍自然降雨,从而使大棚内除降雨外的其它因子尽量接近自然状况。

种子沙埋并供水后开始计时。每天观察出土幼苗并对其总数做详细记录,试验结束后(30d)将容器中的沙土全部倒出,仔细核对幼苗数量,记录已萌发但未出土的幼苗数量。本试验主要关注幼苗的出土情况,将休眠和已腐烂的种子均视为未萌发种子。

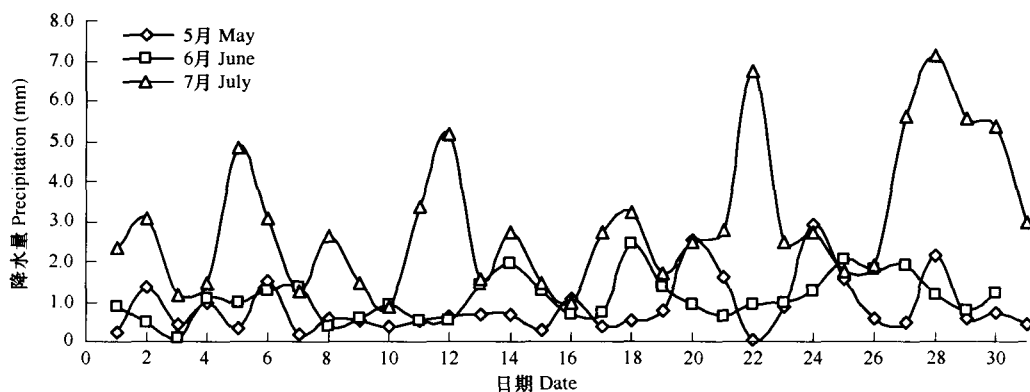


图 1 1959~1999 年毛乌素沙地 5~7 月份日平均降雨量

Fig.1 Daily mean precipitation in the Mu Us sandy land from 1959~1999 (mm)

1.3 统计分析

采用 5 个指标描述种子萌发与幼苗出土状况:幼苗出土率(以下简称出苗率)、未出土幼苗百分率、出苗速率、死亡率和死亡速率。

出苗率,即试验过程中露出沙面的幼苗个数占试验使用种子个数的百分率。
未出土幼苗百分率即试验过程中种子萌发但未出土的个数占试验使用种子个数的百分率。
出苗速率^[22]是描述幼苗出土快慢的指标,其计算公式为:

出苗速率 = $\sum \frac{100 G_i}{nt_i}$,

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

死亡速率的计算公式与出苗速率的计算公式相同,但采用 t_i ($t_i = 0, 1, 2, 3 \cdots, \infty$) 天的死亡个数来进行相应的计算。

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。根据试验设计进行单因素、双因素和三因素方差分析(ANOVA)。采用 Tukey 检验进行多重比较,确定哪些处理间的差异达到显著水平。所有的统计分析,包括方差齐次性检验,均采用 SPSS10.0 软件进行^[23]。

2 结果

对出苗率、未出土幼苗百分率和出苗速率等数据进行三因素方差分析,结果表明:不同物种、供水量、沙埋深度、物种和供水量的交互作用、物种和深度的交互作用、供水量和深度的交互作用、物种和供水量及沙埋深度三者的交互作用等对出苗率、未出土幼苗百分率和出苗速率的影响均极其显著(表 1)。

表 1 物种、供水量和沙埋深度对 4 种植物出苗特性影响的三因素方差分析

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

偏差来源 Source	自由度 Df	出苗率 Emergence		未出苗率 No-emergence		出苗速率 Emergence rate	
		F 值 F-value	p 值 p-value	F 值 F-value	p 值 p-value	F 值 F-value	p 值 p-value
物种 Species(S)	3	75.08	< 0.001	111.36	< 0.001	51.00	< 0.001
供水量 Water supply(W)	8	35.24	< 0.001	10.73	< 0.001	26.94	< 0.001
深度 Depth(D)	5	140.42	< 0.001	32.16	< 0.001	137.55	< 0.001
物种 × 供水量 S × W	24	9.32	< 0.001	6.79	< 0.001	5.63	< 0.001
物种 × 深度 S × D	15	24.32	< 0.001	6.31	< 0.001	25.35	< 0.001
供水量 × 深度 W × D	40	5.27	< 0.001	3.61	< 0.001	5.19	< 0.001
物种 × 供水量 × 深度 S × W × D	120	2.75	< 0.001	2.55	< 0.001	2.73	< 0.001
误差 Error	864						
总和 Total	1080						

2.1 供水量和沙埋深度对出苗率的影响

由表 1 可见,4 种不同物种的出苗率差异显著。4 个物种在较深的沙埋条件下出苗率较低,在 10 ~ 20mm 供水量时出苗率较高,出苗率随着沙埋深度和供水量的不同而变化。沙埋深度为 0cm 的所有处理中 4 个物种均未出苗,因而方差分析和图中,均不包含这个处理。4 个物种按照出苗率对沙埋深度和供水量交互作用响应的不同可以分为两类。

柠条和羊柴为一类(图 2)。对柠条而言,当供水量为 10mm 时,在各个沙埋深度的出苗率为最大值(3cm 除外);供水量为 2.5mm 时出苗率很低,二者与其他供水量条件下的出苗率差异显著($p < 0.001$)。供水量为 7.5、15mm 和 20mm 时的出苗率亦较高,但与其他不同供水量之间无显著差异。沙埋深度为 0.5、1cm 和 1.5cm 时种子的出苗率显著高于其它沙埋深度下的出苗率($p < 0.001$)。其中以 0.5cm 为最高($42.4\% \pm 4.1\%$, 10mm 供水量),但三者间差异不显著。总体趋势为出苗率随沙埋深度的增加而降低,在供水量为 7.5 ~ 20mm,沙埋深度为 0.5 ~ 1cm 时,出苗较为适宜。

对羊柴而言,当供水量为 10mm 时,在各个沙埋深度的出苗率为最大值(1.5cm 除外),与其他供水量条件下的出苗率差异显著($p < 0.001$)。供水量为 2.5mm 时,羊柴均不能出苗。15、20mm 和 2.5mm/3d 供水量条件下的出苗率亦显著高于其余供水量条件下的出苗率。在沙埋深度为 0.5、1、1.5cm 和 2cm 时羊柴种子的出苗

率均较高,其中在 0.5cm 深度时种子出苗率最高($44.0\% \pm 5.2\%$, 10mm 供水量),与其他沙埋深度下的出苗率差异显著。总体趋势为出苗率与沙埋深度呈负相关,供水量为 7.5~20mm,沙埋深度为 0.5~2cm 时为羊柴种子较为适宜的出苗条件。

油蒿和籽蒿属于另一类型(图 2)。在这一类型内,沙埋深度为 0.5cm 时两物种均具有最高的出苗率,沙埋深度为 1cm 时出苗率急剧下降,大于 1.5cm 时出苗很少或不能出苗。供水量在 5mm 范围以内时物种出苗很少或不能出苗。

但即使是同一类型,二者的表现也不尽相同。对油蒿而言,在 2.5mm 供水量时油蒿种子不能出苗。供水量为 15mm 和 20mm 时的油蒿种子出苗率显著高于供水量为 5mm 和 7.5mm 时的出苗率($p < 0.001$),与其他供水量下的出苗率无显著差异。供水量 15mm 和 20mm 时,沙埋深度为 0.5cm 时油蒿的平均出苗率为 62.8%,1cm 时平均出苗率为 1.6%,2cm 时出苗率为 0。对籽蒿而言,供水量为 2.5mm 和 5mm 时籽蒿种子不能出苗。供水量为 2.5mm/3d 时籽蒿具有最高出苗率(36%)。不同供水量之间的出苗率无显著差异($p < 0.05$)。沙埋深度为 0.5cm,供水量 15 和 20mm 时籽蒿的平均出苗率超过 18.4%,1cm 时平均出苗率为 2.8%,2cm 时平均出苗率为 0。

2.2 供水量和沙埋深度对未出土幼苗百分率的影响

4 个物种在较深的沙埋时未出土幼苗百分率较高,并随沙埋深度和供水量的不同而变化。柠条和羊柴种子在沙埋深度为 3cm、5cm 时未出土幼苗百分率显著高于其它埋藏深度的未出土幼苗百分率,沙埋深度为 2cm 时的未出土幼苗百分率显著高于 0.5cm 时的未出土幼苗百分率($p < 0.001$)。供水量为 2.5、5mm、2.5mm/3d 时柠条种子的未出土幼苗百分率显著高于供水量为 7.5、20、30、40mm 时的未出土幼苗百分率,供水量为 5mm 时羊柴种子的未出土幼苗百分率显著高于其它所有供水量的未出土幼苗百分率。其余供水量条件下,羊柴未出土幼苗百分率无显著差异。

油蒿种子在 2cm、5cm 埋藏深度的未出土幼苗百分率显著高于 0.5cm 埋深的未出土幼苗百分率($p < 0.001$),与其它埋藏深度下的未出土幼苗百分率无显著差异。2.5mm 供水量时油蒿种子不能顺利萌发。15mm 供水量时的未出土幼苗百分率显著高于 2.5mm/3d 和 40mm 供水量的未出土幼苗百分率,其它供水量下油蒿种子的未出土幼苗百分率无显著差异。

籽蒿种子在 1.5、2cm 和 3cm 埋藏深度的未出土幼苗百分率显著高于 0.5cm 和 1cm 埋深的未出土幼苗百分率。2.5mm 供水量条件下籽蒿种子不能顺利萌发。2.5mm/3d 供水量的未出土幼苗百分率显著高于 5、10、15mm 和 40mm 供水量的未出土幼苗百分率,与其它不同供水量下籽蒿的未出土幼苗百分率无显著差异。

2.3 出苗速率对供水量和沙埋的响应

柠条出苗速率随供水量的增加而增加,达到最大值后又随供水量的增加而降低。其中 10mm 供水量时出苗最快($p < 0.001$);在相同供水量条件下,埋藏深度 0.5、1、1.5、2cm 时出苗速率显著高于 3cm、5cm 时的出苗速率($p < 0.001$)。

羊柴出苗速率对供水量的反应与柠条类似。在 10、15mm 和 20mm 时较高,在 5、7.5mm、2.5mm/3d、30mm 和 40mm 时较低,其中 10mm 供水量时羊柴出苗最快($p < 0.001$)。埋藏深度为 0.5cm 与 1、1.5cm 与 2cm、3cm 与 5cm 三者之间出苗速率差异显著,且随着埋藏深度的增加出苗速率降低。

在供水量相同,埋藏深度 0.5cm 时油蒿的出苗速率显著高于其它所有埋藏深度的出苗速率($p < 0.001$)。当沙埋深度为 0.5cm 时,15mm 供水量时的出苗速率显著高于 2.5、5mm 和 2.5mm/3d 供水量的出苗速率,其它供水量间的出苗速率无显著差异($p < 0.05$)。

籽蒿种子,在相同沙埋条件下,10、20mm、2.5mm/3d 供水量的出苗速率显著快于 2.5、5、7.5mm 供水量的出苗速率。在相同供水量条件下,埋藏深度为 0.5、1cm 及 ≥ 1.5 cm 时,出苗速率差异显著,随着埋藏深度的增加出苗速率降低($p < 0.001$)。

在供水量相同,埋藏深度 0.5cm 时油蒿的出苗速率显著高于其它所有埋藏深度的出苗速率($p < 0.001$)。

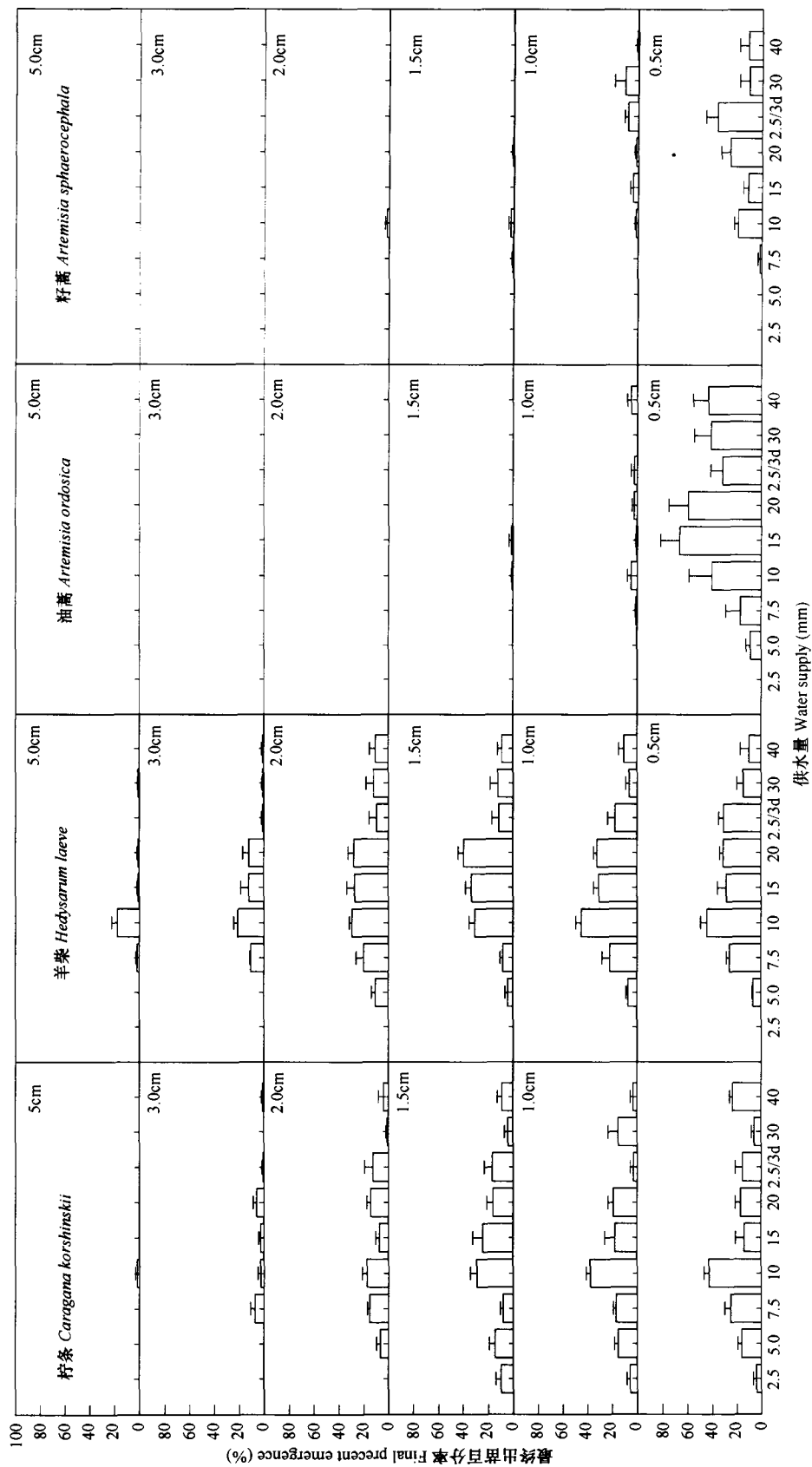


图 2 柠条、羊柴、油蒿及籽蒿种子在不同沙埋深度和水分条件下的出苗率
Fig. 2 Final percent emergence of seedlings of *Caragana korshinskii*, *Hedysarum laeve*, *Artemisia ordosica*, *Artemisia sphaerocephala* from different burial depth and water supply

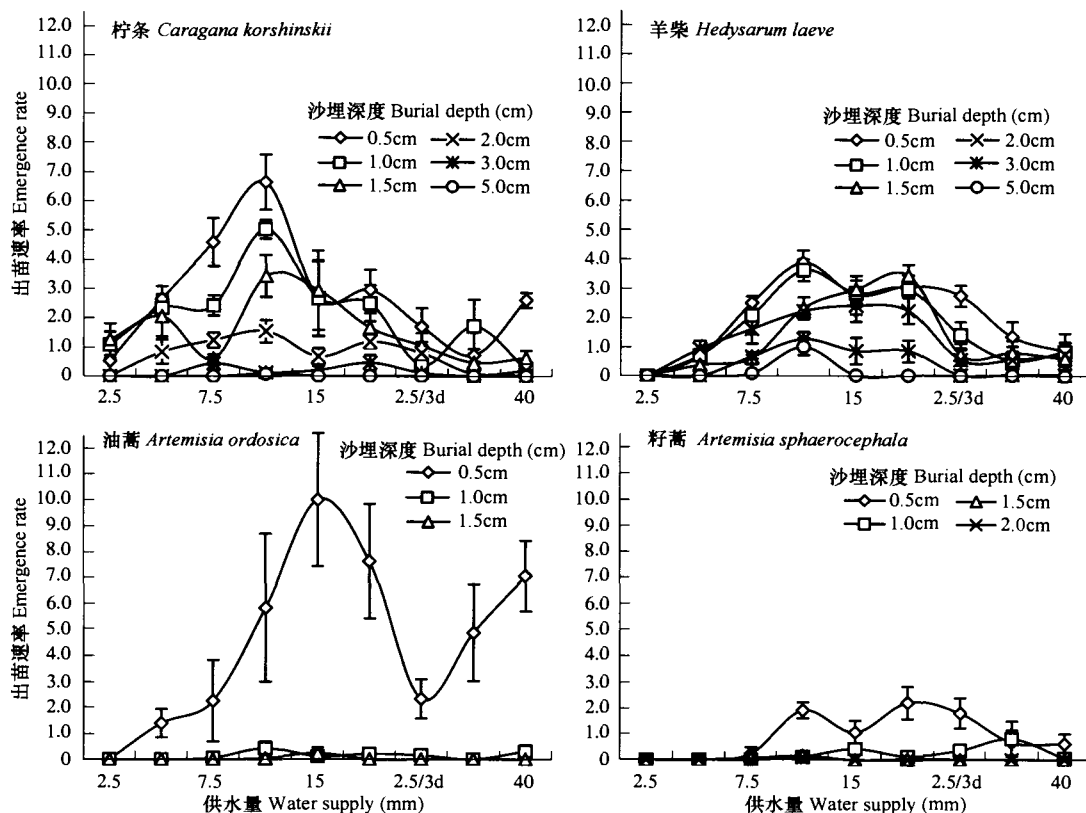


图3 柠条、羊柴、油蒿和籽蒿种子在不同沙埋深度和水分条件下的出苗速率

Fig. 3 Emergence rate of seedlings of *Caragana korshinskii*, *Hedysarum laeve*, *Artemisia ordosica*, *Artemisia sphaerocephala* from different burial depth and water supply

当沙埋深度为 0.5cm 时, 15mm 供水量时的出苗速率显著高于 2.5、5mm 和 2.5mm/3d 供水量的出苗速率, 其它供水量间的出苗速率无显著差异 ($p < 0.05$)。

籽蒿种子, 在相同沙埋条件下, 10、20mm、2.5mm/3d 供水量的出苗速率显著快于 2.5、5、7.5mm 供水量的出苗速率。在相同供水量条件下, 埋藏深度为 0.5、1 及 ≥ 1.5 cm 时, 出苗速率差异显著, 随着埋藏深度的增加出苗速率降低 ($p < 0.001$)。

2.4 死亡率对供水量和沙埋的响应

由表 2 可见: 对柠条而言, 供水量 ≤ 5 mm 时出土幼苗在试验期内全部死亡, 供水量为 7.5 ~ 10mm 时出土幼苗死亡率较高 ($> 50\%$), 供水量高于 15mm 时出土幼苗的死亡率趋于降低 ($< 50\%$)。连续性供水 (2.5mm/3d) 时出土幼苗的死亡率最低。随着沙埋深度的增加, 出土幼苗死亡率有降低趋势。

对羊柴而言, 供水量 ≤ 7.5 mm 时出土幼苗在试验期内全部死亡, 供水量为 10mm 和 15mm 时出土幼苗的死亡率高达 70% 以上, 供水量 ≥ 20 mm 以上时出土幼苗的死亡率趋于降低 ($< 50\%$)。不同供水量 (20、30mm 和 2.5mm/3d) 之间出土幼苗死亡率差异不显著 ($p < 0.05$)。随着沙埋深度的增加, 出土幼苗死亡率有降低趋势。

对油蒿而言, 沙埋深度为 0.5cm, 供水量 ≤ 7.5 mm 时出土幼苗在试验期内全部死亡, 供水量为 10mm 和 15mm 时幼苗的死亡率高达 80% 以上, 供水量高于 20mm 时幼苗的死亡率趋于降低 ($< 50\%$), 且随供水量的增加而降低。但连续供水 (2.5mm/3d) 时幼苗的死亡率相对 20mm 以上供水量下幼苗的死亡率为高。

对籽蒿而言, 沙埋深度为 0.5cm, 供水量为 10 ~ 20mm 时出土幼苗死亡率均较低 ($< 50\%$), 且随供水量的增加而降低。但连续性供水 (2.5mm/3d) 幼苗的死亡率均较其它供水量的死亡率要低。

2.5 死亡速率对供水量和沙埋的响应

由表 3 可见:对柠条而言,供水量 $\leq 10\text{mm}$ 时,出土苗木的死亡速率均较高,供水量为 15mm 以上时苗木的死亡速率明显降低。随着沙埋深度的增加,苗木死亡速率有降低趋势。

表 2 物种、供水量和沙埋深度对幼苗死亡率的影响

Table 2 Result of seedlings mortality of 4 species under different water supply and burial depth										
种名 Species	沙埋深度 Depth (cm)	供水量 Water supply (mm)								
		2.5	5	7.5	10	15	20	2.5/3d	30	40
柠条 <i>C. korshinskii</i>	0.5	100	100	100	100	55.66 $\pm$ 29.4	39.0 $\pm$ 17.2	60.4 $\pm$ 15.7	50.0 $\pm$ 28.9	33.8 $\pm$ 10.5
	1	100	100	100	100	51.1 $\pm$ 24.8	36.7 $\pm$ 10.0		11.1 $\pm$ 11.0	
	1.5	100	100	45.0 $\pm$ 22.9	100	40.6 $\pm$ 19.0	22.5 $\pm$ 19.5	3.1 $\pm$ 3.1		45.8 $\pm$ 20.9
	2		100	50.0 $\pm$ 20.9	94.3 $\pm$ 5.8	22.2 $\pm$ 11.0	30.0 $\pm$ 9.7	11.1 $\pm$ 11.0		
	3			40.0 $\pm$ 24.5			0			
	5									
羊柴 <i>H. laevis</i>	0.5		100	100	100	95.5 $\pm$ 2.8	41.7 $\pm$ 16.2	26.4 $\pm$ 7.2	25.0 $\pm$ 25.0	
	1		100	100	97.5 $\pm$ 2.5	79.0 $\pm$ 5.8	35.4 $\pm$ 7.6	48.4 $\pm$ 11.9	66.7 $\pm$ 19.3	0
	1.5		100	100	72.5 $\pm$ 11.5	72.5 $\pm$ 11.3	19.6 $\pm$ 6.5	32.4 $\pm$ 16.9	5.6 $\pm$ 5.6	50.0 $\pm$ 22.8
	2		100	100	95.6 $\pm$ 4.4	74.7 $\pm$ 13.9	6.4 $\pm$ 4.4	19.4 $\pm$ 10.0	53.7 $\pm$ 21.6	34.5 $\pm$ 20.0
	3			100	81.0 $\pm$ 9.3	54.2 $\pm$ 29.2	9.8 $\pm$ 6.1			
	5				65.0 $\pm$ 18.7					
油蒿 <i>A. ordosica</i>	0.5		100	100	97.9 $\pm$ 2.1	81.2 $\pm$ 4.5	18.5 $\pm$ 6.2	56.4 $\pm$ 18.5	15.6 $\pm$ 9.5	8.5 $\pm$ 4.0
	1									50.0 $\pm$ 28.9
	1.5									
	2									
	3									
	5									
籽蒿 <i>A. sphaerocephala</i>	0.5				48.8 $\pm$ 14.1	35.4 $\pm$ 22.2	5.0 $\pm$ 5.0	3.3 $\pm$ 3.3		
	1					88.9 $\pm$ 11.1		8.3 $\pm$ 8.3		
	1.5									
	2									
	3									
	5									

对羊柴而言,供水量 $\leq 15\text{mm}$ 时,出土幼苗的死亡速率均很高,供水量为 20mm 以上时,幼苗的死亡速率明显降低。随着沙埋深度的增加,苗木死亡速率有降低趋势。

对油蒿而言,沙埋深度为 0.5cm ,供水量分别为 ≤ 7.5 、 10mm 和 15mm 、 $\geq 20\text{mm}$ 以上时,幼苗死亡率差异显著。但连续性供水($2.5\text{mm}/3\text{d}$)时幼苗的死亡速率相对供水量为 20mm 以上时幼苗的死亡速率要高。

对籽蒿而言,沙埋深度为 0.5cm 时, $10\sim 20\text{mm}$ 供水量范围内幼苗死亡速率均较低,且随供水量的增加而降低。在相同沙埋深度时连续性供水($2.5\text{mm}/3\text{d}$)幼苗的死亡速率均较其它供水量的处理低。

3 讨论

一般来说,由于过度的光照、温度波动和供水后种子干燥等原因,曝露在沙层表面的种子具有非常低的萌发率。但最可能的原因是曝露在沙层表面的种子所承受的蒸发压力。在本次试验当中,发现有少数的种子,特别是油蒿和籽蒿种子,在沙层表面萌发并顺利出苗,这可能是因为种子吸收水分后瘦果的粘液物质固定在沙表面上所致^[24]。也可能是由于供水时使少数种子部分被沙子覆盖从而导致沙表面的种子萌发而出苗^[18]。除了以上原因外,播在沙子表层的种子几乎不能萌发及出苗。对柠条和羊柴来说,供水后种子的干燥是它们不能萌发及出苗的主要原因;而对油蒿和籽蒿来说,过度的光照则是另一个不利因素^[7]。

沙埋是对种子萌发和幼苗出土最重要的一个影响因子。种子遭受沙埋后的命运有 4 种:(1)种子萌发成为幼苗且顺利出土;(2)种子萌发但幼苗不能出土,幼苗因为微生物的活动而在土壤中腐烂;(3)种子没有萌发且被其他生物(例如啮齿类动物和真菌)破坏;(4)种子进入强迫休眠或诱导休眠,成为种子库的一部分^[13]。由于沙埋对植物生长的物理环境造成了一系列变化,包括湿度、温度、土壤通透性以及植物-土壤微环境

等^[13,25],因而对幼苗出土造成影响。室内试验^[26]和室外试验^[20,27]结果均证明上述4种植物幼苗成功出土均需要一定程度的沙埋,本次试验也得出了相同的结论,柠条和羊柴种子主要从0.5~2cm埋藏深度之间萌发及出土;油蒿和籽蒿种子主要在0.5cm处萌发及出土。这个结论与文献报道^[20]是一致的。黄振英和Guterman^[28]亦报道,当沙埋深度超过2cm时上述2种蒿属植物不能出苗。由上述4个不同物种对沙埋的响应可见,柠条和羊柴比油蒿和籽蒿更适应沙埋环境,因为它们可以在更深的埋藏深度下出苗。柠条和羊柴种子在0.5、1.5和2cm埋藏深度时出苗速率较快,而油蒿和籽蒿种子则在埋藏深度为0.5cm处出现最大值。Zhang和Maun^[28]的沙埋试验也得出了类似的结论,即在较浅的埋藏深度时出苗较快,随着沙埋深度的增加出苗延迟。

表2 物种、供水量和沙埋深度对幼苗死亡速率的影响

Table 2 Result of mortality rate of seedlings of 4 species under different water supply and burial depth

种名 Species	沙埋深度 Depth(cm)	供水量 Water supply(mm)								
		2.5	5	7.5	10	15	20	2.5/3d	30	40
柠条 <i>C. korshinskii</i>	0.5	4.19 ± 0.02	4.45 ± 0.09	4.61 ± 0.04	4.19 ± 0.07	2.23 ± 1.13	1.73 ± 0.78	2.51 ± 0.73	1.76 ± 1.01	1.22 ± 0.38
	1	4.31 ± 0.13	4.61 ± 0.18	4.75 ± 0.07	4.31 ± 0.04	2.35 ± 0.87	1.67 ± 0.44		0.39 ± 0.39	
	1.5	4.16 ± 0.03	4.80 ± 0.06	2.02 ± 1.05	4.07 ± 0.15	1.73 ± 0.83	1.00 ± 0.89	0.14 ± 0.14		1.69 ± 0.74
	2		4.97 ± 0.40	2.36 ± 0.99	3.72 ± 0.23	1.27 ± 0.64	1.52 ± 0.53	0.48 ± 0.48		
	3			1.54 ± 0.94			0			
	5									
羊柴 <i>H. laevis</i>	0.5		5.28 ± 0.24	4.91 ± 0.06	4.39 ± 0.02	4.48 ± 0.28	1.62 ± 0.60	0.97 ± 0.30	1.67 ± 1.67	
	1		5.06 ± 0.06	4.84 ± 0.03	3.99 ± 0.17	3.66 ± 0.23	1.40 ± 0.29	1.87 ± 0.44	3.97 ± 1.58	0
	1.5		4.92 ± 0.08	4.83 ± 0.21	2.67 ± 0.40	3.30 ± 0.55	0.80 ± 0.27	1.17 ± 0.63	0.25 ± 0.25	2.44 ± 1.18
	2		4.88 ± 0.13	4.69 ± 0.05	3.84 ± 0.23	3.54 ± 0.80	0.25 ± 0.16	0.72 ± 0.36	2.77 ± 1.62	1.86 ± 1.07
	3			4.83 ± 0.07	3.17 ± 0.43	2.32 ± 1.26	0.36 ± 0.21			
	5				2.25 ± 0.63					
油蒿 <i>A. ordosica</i>	0.5		9.17 ± 0.08	8.68 ± 0.46	4.41 ± 0.09	4.43 ± 0.22	0.89 ± 0.31	2.96 ± 1.13	0.71 ± 0.43	0.41 ± 0.21
	1									
	1.5									
	2									
	3									
	5									
籽蒿 <i>A. sphaerocephala</i>	0.5				2.24 ± 0.74	2.08 ± 1.30	0.29 ± 0.29	0.14 ± 0.14		
	1					4.73 ± 0.57		0.35 ± 0.35		
	1.5									
	2									
	3									
	5									

在较深的埋藏深度时种子不能出苗或者出苗延迟原因是:首先,种子萌发后,幼苗能否出土取决于种子的胚乳或子叶中所含的能量以及沙埋的深度^[11,29]。研究表明,在一定埋藏深度范围内(0~6 cm)许多植物幼苗具有最大出苗率和出苗速率,并且随着埋藏深度的增加而下降。当沙埋深度大于6cm时幼苗不能出土^[18,27,30,31]。其次,土壤因沙埋而变得紧实,根际周围的土壤总孔隙度降低,土壤容重增加。这增加了植物顶端分生组织的生长阻力,阻碍茎向上生长,使幼苗出土延迟,或导致不能出苗。在本次试验中,上述4个物种在较深的埋藏深度(3cm、5cm)时的未出土幼苗百分率显著高于浅层沙埋(0.5cm)时的未出土幼苗百分率。另外,种子的休眠亦是一个重要因素。在较深的沙埋时由于过高的土壤湿度、低温、土壤通气状况不佳和较高的CO₂水平等原因使一部分种子延长了休眠^[14]。从生态学上来说,较深的埋藏深度时种子保持较长的休眠是有利的,因为种子将以休眠的状态保存于土壤种子库中^[13]。尤其是在沙生环境中,当风吹走了表层沙子,减少了种子的埋藏深度,遇到合适的环境条件,种子就可能萌发及出土。

水分条件是制约毛乌素沙地生态系统恢复重建的主要因子。不同的水分条件直接影响着上述物种种子

的萌发及出土。本次试验表明,在单次 10~20mm 供水量时上述 4 种植物种子具有高的出苗率,出苗率随着沙埋深度和供水量组合处理的不同而变化。羊柴、油蒿和籽蒿种子在供水量为 2.5mm 时不能萌发,柠条在 2.5mm 供水量时仍然能够少量出苗,表明其种子要比其它 3 个物种更加适应干旱生境。试验期内(30d)柠条、羊柴、油蒿和籽蒿幼苗分别在单次供水量为 5、7.5mm 和 7.5mm 时全部死亡。总的来说,供水量过少会延迟上述 4 个物种的出苗,且导致较高的死亡率和死亡速率。当供水量过多时会导致沙层中的含水量过高而将沙砾间的空气排出,植物只能利用溶解在水中的氧气。氧气的扩散速度亦会降低。由于供氧不足从而导致根系缺乏 ATP 以及积累有毒物质而很快腐烂,并最终引起植物死亡。缺氧和湿度过大还会增加土壤病原微生物数量,减少共生菌根真菌,也不利于植物种子的萌发及生长。尤其是柠条和羊柴种子,在 30mm 和 40mm 供水量时,没有萌发的绝大部分种子均因腐烂而最终死亡了。另一方面,降雨量多少和降雨时间间隔综合影响种子的萌发及出土,每次降水之间间隔越大,由此造成休眠种子的比例也越大^[21]。因为休眠造成一部分种子推迟萌发,可以避免由于缺少后继降雨而导致的灭绝性死亡,增加幼苗繁殖成功率^[32]。实验表明:在实验开始的第 10 天,4 个物种在各个沙埋和水分条件下出土幼苗的死亡率均为 0;第 20 天,柠条出土幼苗在 0.5cm 埋藏深度 2.5、5mm 和 7.5mm 供水量时的死亡率均低于 11%,在 30、40mm 和 2.5mm/3d 供水量条件下各个埋藏深度出土幼苗的死亡率均为 0;羊柴在 0.5cm 和 1cm 埋藏深度 5mm 供水量时,第 20 天出土幼苗均全部死亡,在 7.5、10mm 和 15mm 供水量时,第 20 天各个埋藏深度的出土幼苗死亡率均在 37% 以内;油蒿在 0.5cm 埋藏深度及 5mm 和 7.5mm 供水量时,第 20 天出土幼苗全部死亡,其它供水量时的出土幼苗死亡率均低于 22%;籽蒿出土幼苗第 20 天的死亡率和总死亡率无显著差异。由图 1 可见,在 5~7 月份这 3 个月中,毛乌素沙地降雨间隔一般在 10d 之内,且在野外条件下,沙层的湿度较本试验中的要高,一般来说,沙层中含有 1%~3% 的水分,春季雨后沙层含水量可达 5%~15%^[10]。因此,自然条件下上述 4 种物种能够在更少的降雨条件下出苗。实验表明,当埋藏深度合适时,10mm 的单次降雨对种子萌发及幼苗出土较为理想,出土后的幼苗亦能维持至下次降雨来临。7.5mm 的单次降雨亦能保证种子正常萌发,因此,建议将单次 7.5mm 以上的降雨作为自然条件下保证飞播成功的必要雨量。

此外,种子的萌发还与种子本身的质量有关。种子的质量越大,其胚乳或子叶中所含的能量就越多,种子越能从更深的埋藏深度中顺利出苗,这对于同种植物种子还是不同种类种子都是成立的^[17,30,31,33,34]。本次试验所采用的 4 种植物种子千粒重分别为:柠条, (34.15 ± 2.2) g;羊柴, (11.70 ± 0.9) g;籽蒿, (0.67 ± 0.12) g;油蒿, (0.22 ± 0.09) g。试验结果显示,柠条和羊柴种子在埋藏深度为 5cm 时仍有少部分种子能够顺利出苗,油蒿和籽蒿种子分别在埋藏深度为 1.5cm 和 2cm 时已经不能顺利出苗。表明种子质量较大的柠条和羊柴相对于质量较小的籽蒿和油蒿更适应沙生环境,能从更深的埋藏深度中顺利出苗,这一结论与前人的研究结果类似。

鄂尔多斯地区的飞播通常在 6 月上旬进行,此时该地区一般风力较小,且没有连续性的降雨,白天蒸发量大,地表温度高。种子缺乏合适的沙层埋藏,或出苗后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主要原因^[26]。建议鄂尔多斯地区的飞播工作提前到 5 月下旬。因为该地区的盛行风始于 3 月份而在 5 月底或 6 月初结束,自然风是使种子得到覆盖的主要因素,5 月下旬飞播后植物种子能够获得较为合适的沙层埋藏。这样即使没有足够的降雨使种子萌发,这些被埋藏的种子也可以成为种子库的一部分,到 6 月中下旬降雨逐渐增多时萌发,以提高种子的出苗成功率,从而提高飞播工作的成效。

References:

- [1] Wang T, Zhu Z D, Wu W. Sandy desertification in the north China. *Science in China (Series D)*, 2002, 45 (Supp.): 23~24.
- [2] Wang T. Study on sandy desertification in China 2. Contents of desertification research. *Journal of Desert Research*, 2003, 23:477~482.
- [3] Zheng Y R, Zhang X S. The diagnosis and optimal design of high efficient ecological economy system in Maowusu sandy land. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22: 262~268.
- [4] Shen W S. Vegetation development and effect evaluation after air-seeding on Mu Us sandy land. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(2): 143~148.

- [5] Qi J Z. Aerial sowing for Sand Control in China. Beijing: Science Press, 1998. 216.
- [6] Gutterman Y. Seed germination in desert plants. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 20 ~ 21.
- [7] Zheng Y R, Xie Z X, Gao Y, *et al.* Ecological restoration in northern china: germination characteristics of 9 key species in relation to air seeding. *Belgian Journal of Botany*, 2003, 136(2): 129 ~ 138.
- [8] Cluff G J, Evans R A, Young J A. Desert salt grass seed germination and seedbed ecology. *Journal of Range Management*, 1983, 3(6): 419 ~ 422.
- [9] Zhang X S. The construction principle and optimal model of the grassland and ecological background of Mu Us sandy land. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18: 1 ~ 16.
- [10] Zheng Y R, Xie Z X, Gao Y, *et al.* Germination responses of *Caragana korshinskii* Kom. to light, temperature and water stress. *Ecological Research*, 2004, 19(5): 553 ~ 558.
- [11] Baskin C C, Baskin J M. Seeds Ecology, Biogeography and Evolution of dormancy and germination. San Diego: Academic press, 1998. 70 ~ 71.
- [12] Maun M A. Seed germination and seedling establishment of *Calamovilfa longifolia* on lake huron sand dunes. *Canadian Journal of Botany*, 1981, 59: 460 ~ 469.
- [13] Maun M A. Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. *Canadian Journal of Botany*, 1998, 76: 713 ~ 738.
- [14] Harper J L, Obeid M. Influence of seed size and depth of sowing on the establishment and growth of varieties of fiber and oils seed flax. *Crop Sciences*, 1967, 7: 527 ~ 532.
- [15] Vleshouwers L M. Modeling the effect of temperature, soil penetration resistance, burial depth and seed weight on pre-emergence growth of weeds. *Annals of Botany*, 1997, 79: 553 ~ 563.
- [16] Ranwell D. Movement of vegetated sand dunes at Newborough Warren, Anglesey. *Journal of Ecology*, 1958, 46: 83 ~ 100.
- [17] Van der Valk. Environmental factors controlling the distribution of forbs on coastal foredunes in Cape Hatteras National Seashore. *Canadian Journal of Botany*, 1974, 52: 1057 ~ 1073.
- [18] Maun M A, Lapierre J. Effects of burial by sand on seed germination and seedling emergence of four dune species. *American Journal of Botany*, 1986, 73(3): 450 ~ 455.
- [19] Liu Y P. Air seeding vegetation succession in Mu Us sandy land. *Grassland of China*, 1996, 19: 24 ~ 27.
- [20] Nie C L, Zheng Y R. Effects of water supply and sand burial on seed germination and seedling emergence of four popular psammophyte in Ordos plateau. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(1): 32 ~ 41.
- [21] Wang Z L, Xu Y Q, Wang G. Germination Strategies of Annual sandy plants under limited precipitation. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 1998, 34: 98 ~ 103.
- [22] Rozema J. The influence of salinity, inundation and temperature on germination of some halophytes and non-halophytes. *Oecologia Plantarum*, 1975, 10: 341 ~ 353.
- [23] SPSS. SPSS 10.0 for windows. SPSS Inc. USA., 2000.
- [24] Zheng Y R, Xie Z X, Yu Y, *et al.* Effects of sand burial and water supplying regime on seedling emergence of six species in sandy land. *Annals of Botany*, 95(7): 1237 ~ 1245.
- [25] Maun M A. Adaptations enhancing survival and establishment of seedlings on coastal dune systems. *Vegetatio*, 1994, 111: 59 ~ 70.
- [26] Zhang J, Maun M A. Effects of sand burial on seed germination, seedling emergence, survival, and growth of *Agropyron psammophilum*. *Canadian Journal of Botany*, 1990, 68: 304 ~ 310.
- [27] Wen Y. A study on the effect of rainfall on aerial seeding. In: Wang J X ed. *Collected Papers of the Mu Us sandy lands Exploitation and Control Research Centre*. Hohhot: Inner Mongolia University Press, 1992. 43 ~ 46.
- [28] Huang Z Y, Gutterman Y. Comparison of germination strategies of *Artemisia ordosica* with its two congeners from Deserts of China and Israel. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42: 71 ~ 80.
- [29] Zhang J, Maun M A. Seed mass and seedling size relationship in *Calamovilfa longifolia*. *Canadian Journal of Botany*, 1993, 71: 551 ~ 557.
- [30] Chen H, Maun M A. Effects of sand burial depth on seed germination and seedling emergence of *Cirsium picheri*. *Plant Ecology*, 1999, 140: 53 ~ 60.
- [31] 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: 603 ~ 611.
- [32] Gutterman Y. Strategies of seed dispersal and germination in plant inhabiting desert. *The Botanical Review*, 1994, 60: 373 ~ 425.
- [33] Yanful M, Maun M A. Effects of burial of seeds and seedlings from different seed sizes on the emergence and growth of *Strophostyles helvola*. *Canadian Journal of Botany*, 1996, 74: 1322 ~ 1330.
- [34] Seiwa K, Watanabe A, Saitoh T, *et al.* Effects of burying depth and seed size on seedling establishment of Japanese chestnuts, *Castanea crenata*. *Forest Ecological Management*, 2002, 164: 149 ~ 156.

参考文献:

- [2] 王涛. 我国沙漠化研究的若干问题 2. 沙漠化的研究内容. *中国沙漠*, 2003, 23: 477 ~ 482.
- [3] 郑元润, 张新时. 毛乌素沙地高效生态经济复合系统诊断与优化设计. *植物生态学报*, 1998, 22: 262 ~ 268.
- [4] 沈渭寿. 毛乌素沙地飞播植被现状与评价. *中国沙漠*, 1998, 18(2): 143 ~ 148.
- [5] 漆建忠. *中国飞播治沙*. 北京: 科学出版社, 1998.
- [9] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设原则与优化模式. *植物生态学报*, 1994, 18(1): 1 ~ 16.
- [19] 刘玉平. 毛乌素沙地飞播植被演替研究. *中国草地*, 1996, 19: 24 ~ 27.
- [20] 聂春雷, 郑元润. 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. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 32 ~ 41.
- [21] 王宗灵, 徐雨清, 王刚. 沙区有限降水制约下一年生植物种子萌发与生存对策研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1998, 34: 98 ~ 103.
- [27] 温阳. 降雨对飞播成效的影响. 见: 王家祥主编. *毛乌素沙地开发整治研究中心研究文集(第 1 集)*. 呼和浩特: 内蒙古出版社, 1994. 43 ~ 47.