

沙埋与供水对毛乌素沙地两种重要沙生植物幼苗生长的影响

李文婷^{1,2}, 张超¹, 王飞¹, 郑明清¹, 郑元润^{1,*}, 张峰¹

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 沙埋与水分是影响毛乌素沙地植物存活、生长的关键因子。通过沙埋与供水的野外控制实验, 研究了毛乌素沙地重要物种柠条 (*Caragana korshinskii*) 与羊柴 (*Hedysarum laeve*) 幼苗存活及生长对沙埋和供水的反应。结果表明: 适量的沙埋 (0.25H—0.50H 沙埋, H 为苗高) 与供水 (柠条 50mm/月, 羊柴 75mm/月) 可以促进幼苗生长, 过量的沙埋与供水则会抑制生长甚至导致幼苗死亡。柠条幼苗在 50mm/月供水, 0.25H、0.50H 沙埋, 羊柴幼苗在 75mm/月供水, 0.25H、0.50H 沙埋下具有较高的相对生长速率和净同化速率; 幼苗在 1.0H 和 1.25H 沙埋下全部死亡。供水量较小、沙埋较浅时, 两种植物根冠比均较高; 当供水量最大时, 柠条幼苗根冠比在沙埋最深和没有沙埋时较大, 而羊柴幼苗根冠比仍在没有沙埋时最高。

关键词: 毛乌素沙地; 沙埋; 供水; 幼苗生长

Effects of sand burial and water supply on seedlings growth of two dominant psammophytes in Mu Us sandland

LI Wenting^{1,2}, ZHANG Chao¹, WANG Fei¹, ZHENG Mingqing¹, ZHENG Yuanrun^{1,*}, ZHANG Feng¹

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: Sand burial and water supply are the key ecological factors that affect plant survival and growth in Mu Us sandland. *Caragana korshinskii* and *Hedysarum laeve* are two dominant semi-shrub species distributed in this area. Experiments were conducted under controlled conditions to investigate the effects of sand burial and water supply on seedlings survival and growth of these two species. The results showed that appropriate sand burial (0.25H—0.50H burial, H is the height of seedling) and water supply (50 mm/month for *C. korshinskii*, 75 mm/month for *H. laeve*) could promote seedling growth of two species, whereas over sand burial could inhibit seedling growth, and even resulted in seedlings death. Seedlings of *C. Korshinskii* had a higher RGR and NAR under 50 mm water supply and 0.25H, 0.50H sand burial regimes, while *H. laeve* had higher RGR and NAR under 75 mm water supply and 0.25H, 0.50H sand burial regime. However, all seedlings died under 1.0 and 1.25H sand burial regimes. The ratio of root/shoot was high when water supply was low and sand burial was shallow for two species; when water supply was high, the ratio of root/shoot was high for *C. korshinskii* under the deepest and the shallowest sand burial regime, while it was high under the shallowest sand burial for *H. laeve*.

Key Words: Mu Us sandland; sand burial; water supply; seedlings growth

近年来, 土地荒漠化及其防治已成为各国政府及科学界广泛关注的社会与环境问题^[1]。毛乌素沙地是我国荒漠化比较严重的地区之一^[2], 荒漠化不仅长期制约着当地经济的发展, 同时也不同程度地影响着黄河

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30671724, 30570327); 林业科技支撑计划资助项目 (2006BAD26B0201-1)

收稿日期: 2009-01-09; **修订日期:** 2009-04-12

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

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势在必行^[3]。荒漠化防治最终体现为植被的有效恢复,幼苗能否成功定居、生长则在很大程度上决定着植被的恢复过程。

在沙生环境中,幼苗的生长受到多种因素的影响。在毛乌素沙地,干旱与沙埋为主要的影响因素。在强风作用下,裸露或植被覆盖稀少的沙丘可以在水平空间上较快地移动^[4],导致生长在沙丘顶部和背风坡的植物种子、幼苗或植株经常会受到部分或完全沙埋^[5],只有适应沙埋的物种才能在沙丘生境中存活下来^[6],不同程度的沙埋对植株影响也不相同。在干旱环境中,良好的水分条件有利于植物幼苗的生长和定居,降低其死亡率,但过高的水分则会抑制幼苗生长^[7]。因而,研究水分与沙埋对幼苗生长的影响具有重要的科学与实践意义^[8]。

柠条(*Caragana korshinskii*)是毛乌素沙地固定和半固定沙丘植物群落的重要物种,对沙地环境有很强的适应能力,是一个较好的固沙物种,在沙地植被恢复工程中常作为主要物种进行大面积种植^[9]。羊柴(*Hedysarum laeve*)分布于流动半流动、半固定以及固定沙地,也具有较强的固沙作用^[10]。但目前关于沙埋与供水对这两个物种生长协同作用影响的研究很少,影响了植被恢复工程中针对这两个物种进行适宜环境条件选择的准确性。本文目的在于阐明以下问题:(1)不同深度沙埋、供水量如何影响幼苗的存活和生长?(2)两种植物幼苗在不同沙埋和供水条件下的生长格局是否发生变化?(3)多深的沙埋及多大的供水量有利于这两种植物幼苗的生长?上述问题的深入研究对于采用合理的方法在毛乌素沙地进行荒漠化防治具有重要的理论与实际意义。

1 材料和方法

1.1 研究地点

研究地点位于中国科学院植物研究所鄂尔多斯沙地草地生态研究站,该站位于内蒙古伊金霍洛旗(39°29'37.6"N,110°11'29.4"E)。该区属温带极端大陆性气候,降水少,干旱多风,蒸发强烈,日照充足。年降水量约350—400mm,多集中在7—9月份;年均温约6—7℃,1月份均温为-12—1℃,7月份均温为21—22℃;年日照时数为2800—3100h^[8]。

1.2 研究方法

于2006年6—11月在生态站附近随机选取2个物种的自然种群分别采集种子,在室温条件下储藏在布袋中。2007年5月初,在每个容器内播种5粒种子,覆沙厚度为0.5cm,浇水。幼苗出土后每个容器仅保留一株健壮幼苗,生长6周后,两个物种分别选取大小一致和生长良好的幼苗960株供实验用。根据处理的不同,实验容器随机放置在深67cm,边长为1m的不同正方形水泥沙池中,沙池上修建铁架,四周通风。实验期间,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,放下防水布以阻隔自然降雨,从而使实验区内除自然降雨外的其它因子尽量接近自然状况。实验期间经常除草和防除病虫害。

实验用沙取自生态站附近,过筛去除杂质后,在100℃条件下烘干48h,杀死其中可能存在的种子。实验用塑料圆柱形容器内径16cm,高16cm,底部有排水孔。

沙埋深度包括6个处理,分别为:0、0.25H、0.5H、0.75H、1.0H、1.25H(H为苗高),每个处理包括8个重复。

6—9月份是研究区域内植物幼苗生长最为关键的时期,根据40a来(1959—1999年)毛乌素沙地上述4个月的降雨资料,以75mm/月为基准点,设计2.5mm/3d、5mm/3d、7.5mm/3d和10mm/3d共4个供水梯度。实验进行50d。

实验开始前随机选取两个物种各10株幼苗作为对照并进行一些参数的测定,用水洗去每个容器中的沙子,取出其中的幼苗,测量幼苗的高度,然后将幼苗分为根、茎、叶3部分,在80℃下干燥48h。用电子天平测量幼苗各部分的干重。用扫描仪测量单株叶面积。

幼苗沙埋并供水后开始计时,在第10、20、30、40、50天分别收获两个物种的植株,并采用上述方法对植株的参数进行测定。

1.3 统计分析

采用相对生长速率(Relative growth rate, *RGR*)、净同化速率(Net assimilation rate, *NAR*)和根冠比(Root/Shoot, *R/S*) 3 个指标描述植株生长状况:

$R/S = \text{根生物量} / \text{地上部分生物量}$

$$NAR = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{S} \frac{dW}{dt} dt = \frac{(w_2 - w_1)(\ln s_2 - \ln s_1)}{(s_2 - s_1)(t_2 - t_1)} \quad (1)$$

$$RGR = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{w_1}^{w_2} d(\ln w) = \frac{\ln w_2 - \ln w_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中, w_1 和 s_1 分别为前一次收获时的生物量和总叶面积, w_2 和 s_2 分别为下一次收获时的生物量和总叶面积。

在进行方差分析时, 先对数据进行方差齐次性检验, 方差不齐时进行对数变换保证方差齐性, 再根据实验设计进行 4 因素方差分析。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, 均采用 SPSS13.0 软件进行。由于沙埋深度为 1.0H 和 1.25H 的所有处理中 2 个物种幼苗均未重新长出沙面, 因而所有分析中均不包含这 2 个处理。

2 结果

4 因素方差分析表明物种、沙埋时间、沙埋深度与供水量及其大部分交互作用均显著影响了幼苗的 *RGR*、*NAR* 和根冠比 ($P < 0.05$)。

2.1 沙埋和供水对幼苗 *RGR* 的影响

随沙埋时间的延长, 在 25mm 的供水量及所有沙埋深度下柠条幼苗 *RGR* 都呈下降趋势, 而在 50、75 和 100mm 供水量及大部分沙埋深度条件下则呈现先降低后升高的趋势。50mm 供水量及各沙埋深度和 100mm 供水量及 0.75H 沙埋深度条件下幼苗的 *RGR* 大约在 40d 后开始上升, 75mm 供水量 0H 和 0.75H 沙埋条件下幼苗的 *RGR* 则大约在 30d 后开始上升。0.25H 沙埋条件下 *RGR* 较高(图 1)。

在相同供水条件下 0.25H 沙埋深度下羊柴幼苗的 *RGR* 大多高于其他条件下幼苗的 *RGR*, 而 0.75H 沙埋条件下的 *RGR* 最低。在各供水量和沙埋深度条件下, 随沙埋时间的延长, *RGR* 大体呈现出先降低后上升的趋势。25mm 供水量, 0.25H、0.50H 和 0.75H 沙埋深度条件下及 50mm 供水量、0H 沙埋, 75mm 供水量、0.25H 沙埋条件下幼苗的 *RGR* 大约在 20d 后开始上升; 25mm 供水量、0H 沙埋, 50mm 供水量、0.50H 和 0.75H 沙埋, 75mm 供水量、0.50H 和 0.75H 沙埋, 100mm 供水量、0.75H 沙埋条件下幼苗的 *RGR* 大约 30d 后开始上升(图 1)。

2.2 沙埋和供水对幼苗 *NAR* 的影响

在所有供水量条件下, 柠条幼苗较高的 *NAR* 值大多出现在 0.25H 沙埋深度, 较低的 *NAR* 出现在 0.75H 沙埋深度。当供水量为 25mm 时, 0.25H 和 0.75H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 都呈下降趋势, 0H 和 0.50H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 在 0—30d 时下降、30—40d 时上升、40—50d 时呈下降趋势; 当供水量为 50mm 时, 各沙埋深度条件下幼苗的 *NAR* 在 40d 后开始呈上升趋势; 当供水量为 75mm 时, 0.25H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 一直呈下降趋势, 0H、0.50H 和 0.75H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 在 30d 时开始呈上升趋势; 当供水量为 100mm 时, 0.75H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 在 30d 时开始呈上升趋势, 其他沙埋深度条件下的一直都呈下降趋势(图 2)。

对羊柴幼苗而言, 较高的 *NAR* 值也大多出现在 0.25H 沙埋深度, 较低的 *NAR* 值大多出现在 0.75H。当供水量为 25mm 时, 0.25H、0.50H 和 0.75H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 在 20d 后开始上升, 0H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 在 30d 后开始上升, 0.25H 和 0.50H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 在 30d 后开始下降, 0H 和 0.75H 下幼苗的 *NAR* 在 40d 后开始下降; 当供水量为 50mm 时, 0H 和 0.25H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 在 40d 后开始上升, 0.50H 和 0.75H 下幼苗的在 30d 后开始上升、40d 后开始下降; 当供水量为 75mm 时, 0H、0.25H 和 0.75H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 在 40d 后开始上升, 0.50H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 在 30d 后上升、40d 后下降; 当供水量为 100mm 时, 0H 沙埋条件下幼苗的 *NAR* 一直呈下降趋势, 0.25H 和 0.50H 沙埋条件下幼苗 *NAR* 在大约

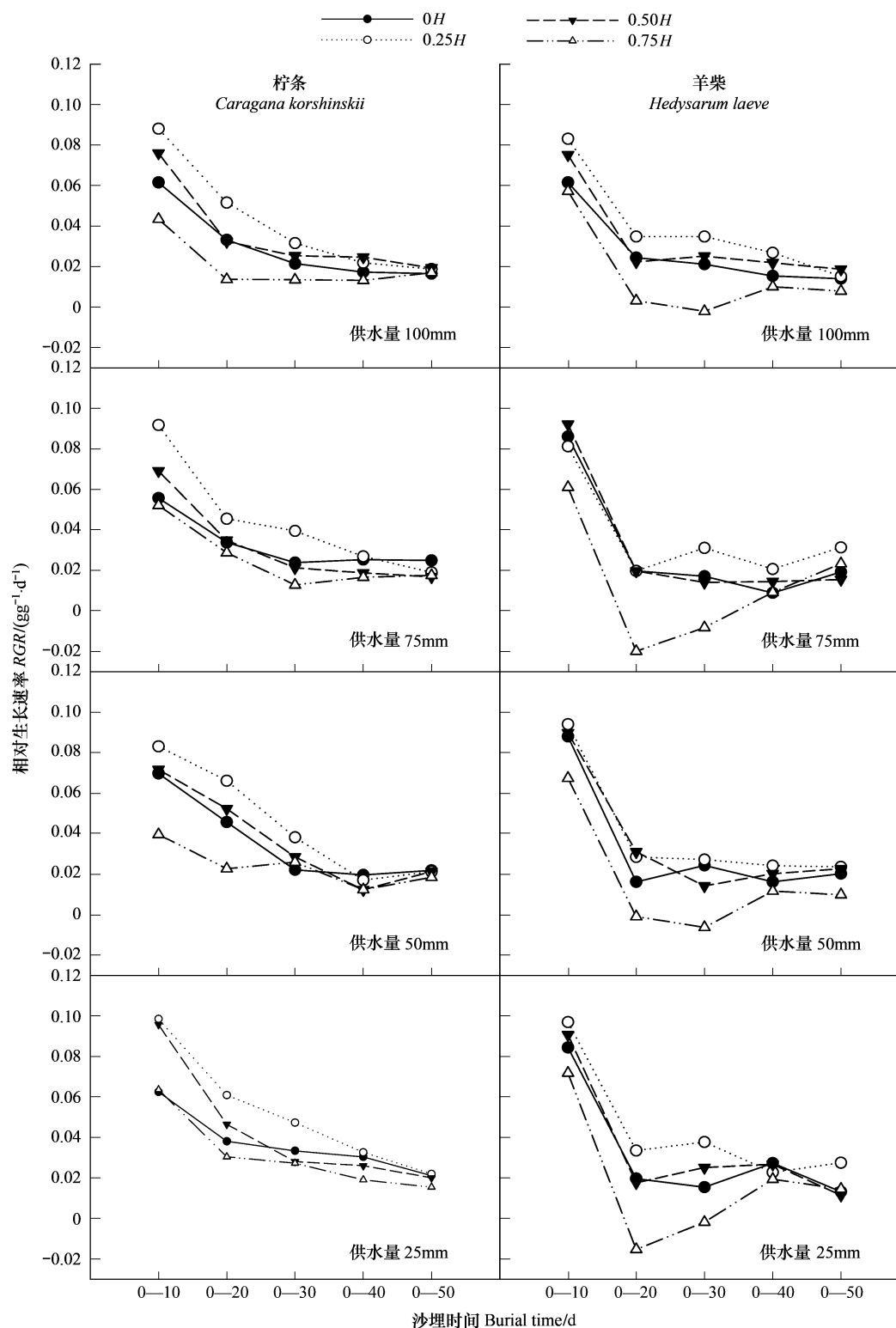


图1 柠条和羊柴幼苗在不同水分和沙埋条件下的相对生长速率

Fig. 1 Mean relative growth rates of *C. korshinskii* and *H. laeve* seedlings under different water supply and sand burial regimes

20d 后开始上升、40d 后下降,0.75H 沙埋条件下幼苗的 RGR 在大约 30d 后上升、40d 后下降(图 2)。

2.3 沙埋和供水对幼苗根冠比的影响

对柠条幼苗而言,沙埋 50d 后,25mm 供水量下幼苗的根冠比依次是 $0H > 0.25H > 0.50H > 0.75H$;50mm

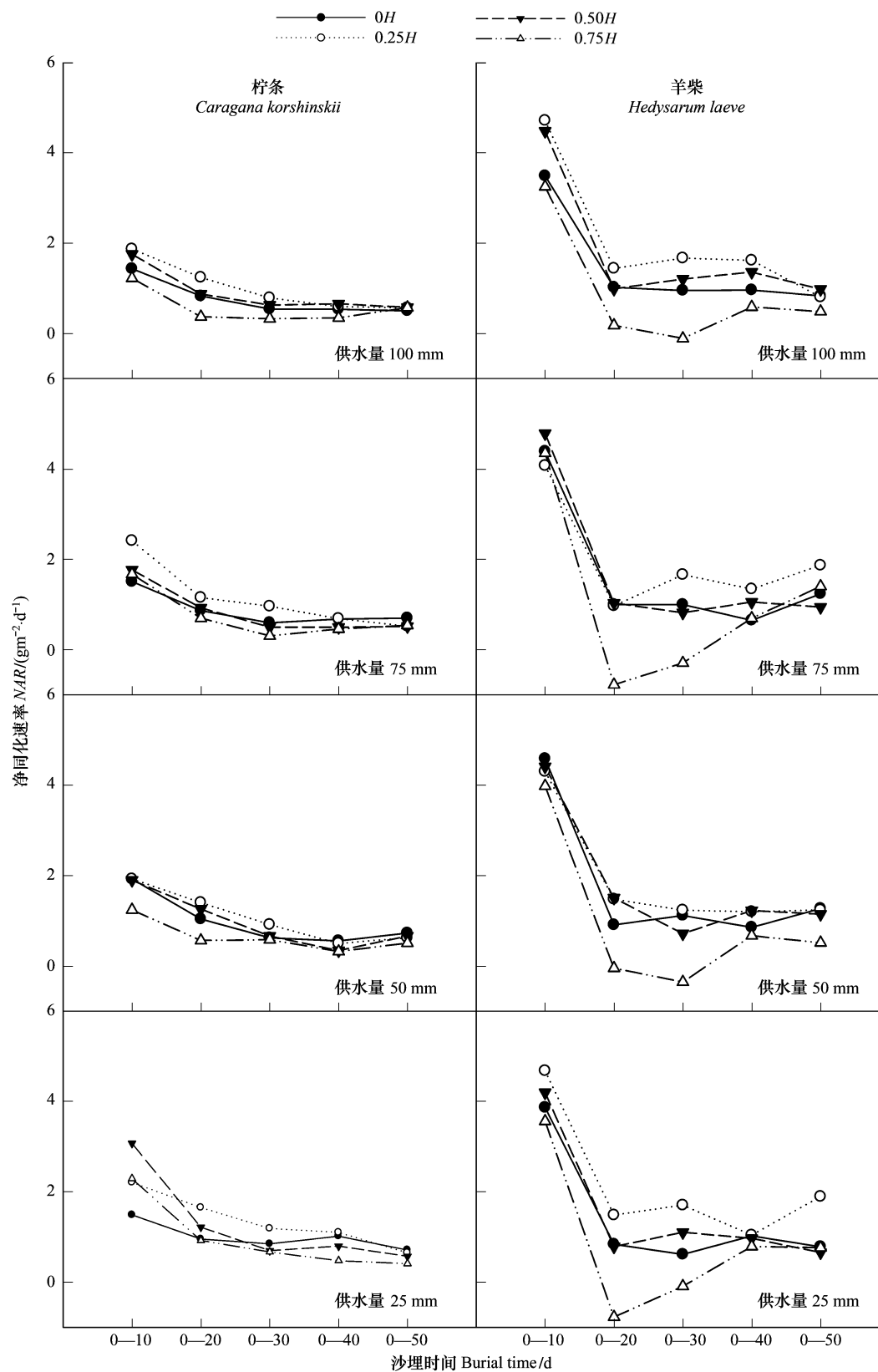


图2 柠条和羊柴幼苗在不同水分和沙埋条件下的净同化速率

Fig. 2 Net assimilation rates of *C. korshinskii* and *H. laeve* seedlings under different water supply and sand burial regimes

供水量下则是 $0H > 0.50H > 0.25H > 0.75H$; 75mm 供水量下是 $0.50H > 0.75H > 0H > 0.25H$; 100mm 供水量下

是 $0.75H > 0H > 0.50H > 0.25H$ (图 3)。

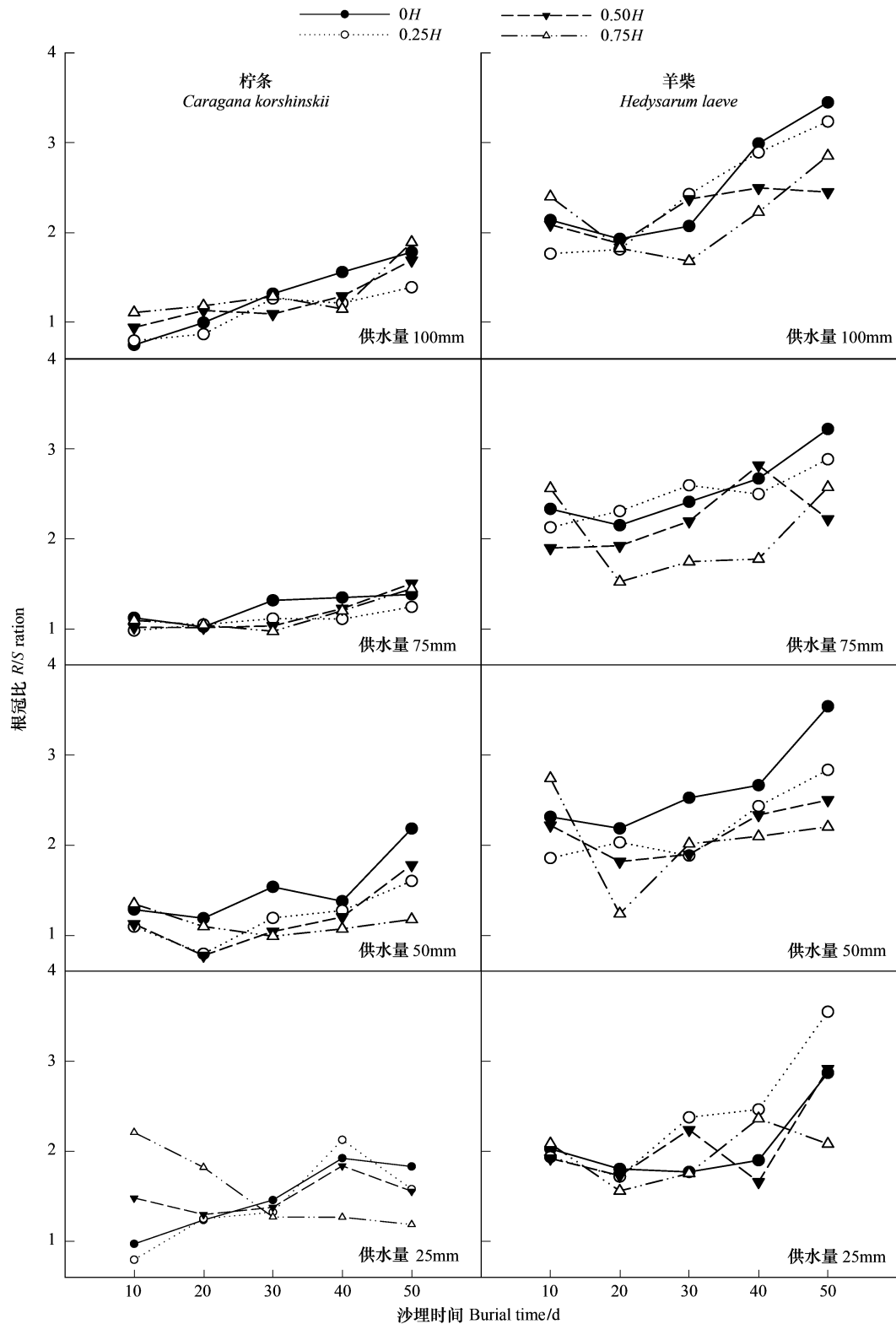


图 3 柠条和羊柴幼苗在不同水分和沙埋条件下的根冠比

Fig. 3 Root/Shoot of *C. korshinskii* and *H. laeve* seedlings under different water supply and sand burial regimes

对羊柴幼苗而言,沙埋 50d 后,25mm 供水量下幼苗的根冠比依次是 $0.25H > 0.50H > 0H > 0.75H$;50mm 供水量下则是 $0H > 0.25H > 0.50H > 0.75H$;75mm 供水量下是 $0H > 0.25H > 0.75H > 0.50H$;100mm 供水量下

是 $0H > 0.25H > 0.75H > 0.50H$ (图 3)。

3 讨论

3.1 部分沙埋促进植物幼苗生长

在沙丘生境中,植物幼苗经常会遭受不同程度的沙埋。沙埋可以通过改变植物周围的生物与非生物环境条件,如湿度、温度、光合有效辐射等,从而对植物幼苗的存活、生长及沙埋后再出土等过程产生一系列影响。适当的沙埋可以为幼苗生长提供一个较适宜的温度和水分等环境条件促进其生长,但过深的沙埋会造成氧气缺乏或土壤机械阻力的增大从而抑制幼苗生长,严重时会导致幼苗死亡。如 1—2cm 的深埋更适宜于羊草幼苗的生长,而 0 或 3cm 则不利于其生长^[11]。本次实验也得出了类似的结论:在 0.25H 和 0.50H 沙埋条件下,柠条和羊柴幼苗具有较高的 *RGR* 和 *NAR*,并大体呈现出先降低后升高的趋势。这是由于在遭受沙埋后,幼苗的最初反应是其生长和活力暂停或延缓,临时性的光合作用和碳水化合物合成延迟,为了从沙埋中存活下来,它们要适应一定的时间才能适应沙埋所带来的不利影响,最终恢复生长。同时,此时的沙埋深度能保持根系周围的土壤水分,减少表面蒸发,从而使幼苗周围的微环境得到改善而促进了幼苗的生长。在 0.75H 沙埋条件下幼苗的 *RGR* 和 *NAR* 大多低于其他条件则是因为此时的沙埋深度可能使一些茎叶得不到足够的光照而无法进行光合作用或根际的通透性太差等已对幼苗的生长产生了抑制。其次,随着沙埋程度的增加,两种植物幼苗恢复生长的时间也在增加,这可能与植物体内储藏的营养物质和能量的释放有关。植物对沙埋的干扰有一定的忍耐限度,当沙埋不超过其忍耐限度时可以促进该植物生长,但随着沙埋深度的增加,这种正效应开始下降变为负效应。本试验中在沙埋深度为 1.0H 和 1.25H 时,绝大多数的柠条和羊柴幼苗因不能长出沙面而死亡,这是沙丘生境中沙生植物遭受沙埋后产生响应的普遍现象^[12-13]。根据上述结果,在毛乌素沙地使用柠条和羊柴进行生态恢复时,应对苗木进行苗高 0.25—0.50H 的沙埋,这将有利于幼苗度过缓苗期,尽快恢复较快生长,加快植被恢复进程。

3.2 适宜的降雨促进植物幼苗的存活和生长

由于幼苗对环境因素的变化非常敏感,幼苗早期的生长受到水分可利用性的影响很大。一般幼苗株高生长随土壤含水量的增加而增加,而当土壤含水量增加到一定程度后生长量缓慢增长。如羊柴幼苗定居的湿沙层土壤含水量不低于 3%,其幼苗生物量在土壤含水量 3%—12% 范围内,随含水量的升高而增加,在 12%—20% 的范围之内没有差别^[14]。本研究也得出了类似的结果:经过 50d 沙埋后,柠条幼苗在 50mm 供水量时具有较高的 *RGR* 和 *NAR*,而羊柴幼苗则在 75mm 供水量时具有较高的 *RGR* 和 *NAR*,100mm 供水量时两种植株幼苗的 *RGR* 和 *NAR* 都最低。即随着供水量的增加,土壤含水量增加,柠条和羊柴幼苗的 *RGR* 和 *NAR* 都得到了显著提高,但在过多的给水条件下生长又受到抑制。显然,水分过高不适于这两种植物幼苗的生长,这可能是过高的土壤含水量削弱了土壤里的氧气可利用性而抑制了植物生长。同时也可看出柠条幼苗要比羊柴幼苗更能够适应相对干旱的环境。

毛乌素沙地的年均降水量为 358.5mm,多集中在 7—9 月份,而且多属暴雨集中在几次降落,降雨分配很不均匀。本次研究结果表明维持柠条和羊柴幼苗较好生长所需的供水频率高于自然条件下的降雨频率,所以需要适量的人工补水以保证幼苗的良好生长。其次,在降雨分配较为均匀的情况下,每月 50、75mm 的降水分别有利于柠条和羊柴的生长,但在自然状况下,降雨频率存在较大变异性,再加上干旱、半干旱区蒸发较快,要维持这两个物种的快速生长需要比在实验状况下更多的水分,在进行植被恢复时要根据降雨状况与这两个物种较好生长时的需水量适时补水。

3.3 沙埋对根系生物量分配的影响

当植物受到环境条件的胁迫时一般会调整其物质分配来尽量减少环境条件对生长发育造成的影响。一些研究表明,当某些环境因子成为影响植物生长发育的限制性因素时,例如养分胁迫、光照胁迫、水分胁迫以及沙埋造成的光合面积的降低等,植物为了保证其正常的生长不受制约,会调整物质分配比例,改变根冠比以及各部分物质分配的比例^[15]。遭遇沙埋时,一些沙生植物增加根冠比以促进快速生长^[16-17]。本项研究中,供

水量较小(25mm/月)、沙埋较浅时(0H—0.25H),两种植物根冠比均较高,这是由于此时根系所处位置土层较为干燥,幼苗需要增加根系生物量投入,获取更多的水分。当供水量最大时,沙埋最深和没有沙埋时柠条幼苗根冠比较大,这可能是由于埋藏较深,水分供给较多时柠条根系受到过多水分的胁迫,影响呼吸作用的进行,为增大氧气吸收面积而增加根系的投入^[18];由于羊柴蒸腾作用较高,不会受到水分过多的影响^[18]。尽管供水充足,但埋藏较浅时由于快速蒸发,土壤干燥较快,因而根系生物量分配仍然较高。毛乌素沙地降雨量较少,综合考虑,合适的沙埋(0.25H—0.50H)将有利于土壤水分的保持及根系的发育,有利于幼苗的定居,在植被恢复时应为幼苗创造类似的条件。

4 结论

沙埋和供水均对这两种植物幼苗的生长造成显著影响。部分沙埋(0.25H—0.50H 沙埋)可以促进幼苗生长,完全沙埋则导致幼苗死亡。适量的供水(柠条 50mm/月和羊柴 75mm/月)可以促进幼苗生长,过量供水则会起抑制作用。柠条幼苗比羊柴幼苗更能忍受水分缺乏。在毛乌素沙地采用这两种植物进行植被恢复时,应根据当地的降雨条件,考虑本文的实验结果为苗木提供合适的沙埋与供水条件。

References:

- [1] Wang T. The status of aeolian desertification and its control in China. *Chinese Journal of Nature*, 2007, 29(4):204-211.
- [2] Guo J, Wang T, Xue X, Yang X C. The status and distribution of desertification in Maowusu Sandy Land. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(3):198-199, 203.
- [3] Zheng Y R. The exploration about new approach of controlling desertification efficiently and continuously. *Forest Science & Technology Management*, 1998, 2: 20-23.
- [4] Danin A. *Plants of deserts dunes*. New York: Springer-Verlag, 1996: 3-19.
- [5] Maun M A. Adaptation of plants to burial in coastal sand dunes. *Canadian Journal of Botany*, 1998, 76: 713-738.
- [6] Martinez M L, Maun M A. Responses of dune mosses to experimental burial by sand under natural and greenhouse conditions. *Plant Ecology*, 1999, 145(2): 209-219.
- [7] Liu J, Shi F L, Tian Q S, Jiao Y L. Responses of seed germination and seedling emergence of *Bromus irtutensis* Kom. to water stress. *Inner Mongolia Prataculture*, 2008, 20(3):43-44, 50.
- [8] Zhang X S. The construction principle and optimal model of the grassland and ecological background of MuUs sandy land. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(1):1-16.
- [9] Liu H J, Guo K. The impacts of sand burial on seedling development of *Caragana intermedia*. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2550-2555.
- [10] Wang B, Ding G D, Ma S L, Gu X H. Growth condition and its sand-fixing effects of artificial cultivated *Hedysarum laeve* in Maowusu Sandy land. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(2): 11-12.
- [11] Ma H Y, Liang Z W, Yan C, Chen Y, Huang L H. Effects of sand-burial depth on *Leymus chinensis* seedlings emergence and growth. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12):2003-2007.
- [12] He Y H, Zhao H L, Zhao X Y, Liu X P. Effects of different sand burial depths on growth and biomass allocation in *Caragana microphylla* seedlings. *Arid Land Geography*, 2008, 31(5):701-706.
- [13] Maun M A. The effects of burial by sand on survival and growth of *Calamovilfa longifolia*. *Ecoscience*, 1996, 3(1): 93-100.
- [14] Zhang C Y, Yu F H, Dong M. Effects of sand burial on the survival, growth, and biomass allocation in semi-shrub *Hedysarum laeve* seedlings. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(3): 337-343.
- [15] Li Q Y, Fang H Y. Effects of sand burial depth on seedling emergence and growth of *Reaumuria soongorica*. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(1):30-33.
- [16] Seliskar D M. The effect of accelerated sand accretion on growth, carbohydrate reserves, and ethylene production in *Ammophila breviligulata* (Poaceae). *American Journal of Botany*, 1994, 81(5): 536-541.
- [17] Dalling J W, Hubbell S P. Seed size, growth rate and gap microsite conditions as determinants of recruitment success for pioneer species. *Journal of Ecology*, 2002, 90(3): 557-568.
- [18] Zheng Y R, Rimmington G M, Xie Z, Zhang L, An P, Zhou G, Li X, Yu Y, Chen L, Shimizu H. Responses to air temperature and soil moisture of growth of four dominant species on sand dunes of central Inner Mongolia. *Journal of Plant Research*, 2008, 121(5): 473-482.

参考文献:

- [1] 王涛. 我国沙漠化现状及其防治的战略与途径. *自然杂志*, 2007, 29(4): 204-211.
- [2] 郭坚,王涛,薛娟,杨续超. 毛乌素沙地荒漠化现状及分布特征. *水土保持研究*, 2006, 13(3):198-199, 203.
- [3] 郑元润. 高效持续防治荒漠化新途径初探. *林业科技管理*, 1998, 2: 20-23.
- [7] 刘娟,石凤翎,田青松,焦玉龙. 沙地雀麦种子萌发及幼苗生长对水分的响应. *内蒙古草原*, 2008, 20(3):43-44, 50.
- [8] 张新时. 毛乌素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.
- [9] 刘海江,郭柯. 沙埋对中间锦鸡儿幼苗生长发育的影响. *生态学报*, 2005, 25(10): 2550-2555.
- [10] 王博,丁国栋,马士龙,顾小华. 毛乌素沙地人工种植羊柴生长状况及其对流沙的固定效果. *水土保持研究*, 2007, 14(2): 11-12.
- [11] 马红媛,梁正伟,闫超,陈渊,黄立华. 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] 何玉惠,赵哈林,赵学勇,刘新平. 沙埋对小叶锦鸡儿幼苗生长和生物量分配的影响. *干旱区地理*, 2008, 31(5):701-706.
- [15] 李秋艳,方海燕. 沙埋对红砂幼苗出土和生长的影响. *水土保持通报*, 2008, 28(1):30-33.