

五种荒漠植物幼苗出土及生长对沙埋深度的响应

李秋艳, 赵文智

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 流域水文及应用生态实验室, 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域综合研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 研究了红砂、泡泡刺、花棒、白刺和沙拐枣 5 种荒漠优势植物的幼苗出土和生长对沙埋的响应, 判断了幼苗的生长特征能否预测植物的定植能力。进行了 0、1、2、3、5 cm 和 8 cm 等 6 个沙埋深度处理, 每个处理 5 个重复。结果表明: 每种植物的出苗率都随着沙埋深度的增加而降低, 而且遵循着指数方程关系。红砂种子的最佳沙埋深度应为 0~1 cm, 3 cm 已是出苗和存活的最大沙埋深度; 泡泡刺、花棒和白刺种子的最佳沙埋深度为 0~3 cm; 沙拐枣在 0~8 cm 各个深度都有出苗现象, 且出苗率没有显著差异, 但 8 cm 深度的出苗率只有 4%, 最佳沙埋深度约为 5 cm。幼苗的生长高度受沙埋深度的影响显著, 在同一时间, 幼苗的最大生长高度并不在 0 cm 表层, 但红砂幼苗除外。泡泡刺、花棒和白刺在 0~3 cm 的沙埋深度的幼苗生长高度大于 5~8 cm 沙埋深度的生长高度, 但沙拐枣幼苗在 5 cm 深度的生长高度最大。5 种荒漠植物幼苗的生物量受沙埋深度的影响不显著。在同一沙埋深度下, 红砂的绝对高度生长率明显低于其余 4 种植物, 沙拐枣的绝对高度生长率高于其余 4 种植物幼苗; 5 种植物的相对高度生长率对沙埋深度的响应并不敏感。绝对高度生长率与相对高度生长率并不能预示幼苗存活成功率。

关键词: 沙埋深度; 出苗; 高度生长率; 荒漠植物

文章编号: 1009-0933(2006)06-1802-07 中图分类号: Q142, Q948, S154.1 文献标识码: A

Seedling emergence and growth responses of five desert species to sand burial depth

LI Qiu-Yan, ZHAO Wen-Zhi (Laboratory of Basin Hydrology and Applied Ecology, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Chinese Ecosystem Network Research Linze Inland River Basin Comprehensive Research Station, Lanzhou 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1802~1808.

Abstract: The controlled experiment was conducted to test the seedling emergence and growth responses of five desert species to burial by sand, and to assess whether easily measured plant traits can be used to predict their probable success. Study species included 5 species of shrubs and sub-shrubs occurring frequently in arid region of northwest China. In the burial experiment, seedling emergence declined exponentially with sand burial depth. The optimal burial depth of *Reaumuria soongorica* is 0~1 cm, and the depth of 3 cm is the maximum depth to emerge. There were no significant difference in the emergence of *Calligonum mongolicum* at all sand burial depths, however, it is only 4% at the depth of 8 cm. So the optimal burial depth is observed 5 cm. The optimal burial depth of *Nitraria sphaerocarpa*, *Hedysarum scoparium* and *Nitraria tangutorum* was also in the range of a shallow burial depth, and the approximate depths of the three desert species were 0~3 cm. Seedling height was significantly affected by the sand burial depth. At the same period, the maximum height of most species were not in the surface, except *Reaumuria soongorica*, and the growth height of 0~3 cm was bigger than those in 5~8 cm for *Nitraria sphaerocarpa*, *Hedysarum scoparium* and *Nitraria tangutorum*, and the maximum height of *Calligonum mongolicum* was at the depth of 5 cm. However, the biomass of the five desert species had no significant correlations with the sand burial depth. At the same sand burial depth, larger-seeded species like *Calligonum mongolicum* had the larger absolute height growth rate, which may help to explain their prevalence in the desert. However, seedling relative height growth rate was not significantly affected by plant species and sand burial depth.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40571026); 中国科学院野外台站基金资助项目(2005410)

收稿日期: 2005-04-16; 修订日期: 2005-10-13

作者简介: 李秋艳(1978~), 女, 山东金乡人, 博士生, 主要从事生态水文学研究. E-mail: liqiuyan@lzb.ac.cn

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China(No. 40571026); the Foundation of Field Research Stations, Chinese Academy of Sciences (No. 2005410)

Received date: 2005-02-15; **Accepted date:** 2005-10-13

Biography: Li Qiu-Yan, Ph.D. candidate, mainly engaged in eco-hydrology in arid region. E-mail: liqiuyan@lzb.ac.cn <http://www.cnki.net>

Absolute and relative height growth rate alone do not necessarily predict seedling survival success. In a restoration context, desirable species that are vulnerable during emergence and establishment can be targeted, and plant species, seedling growth rate and sand burial depth are determinants of recruitment success for desert species.

Key words: sand burial depth; seedling emergence; seedling height growth rate; desert species

风蚀和沙埋是我国草原、荒漠化草原地带沙地和荒漠、半荒漠地带沙漠最普遍的干扰因子^[1]。在风沙环境中, 沙埋和风蚀是种群演化的重要驱动力^[2]。沙埋是植被定植与生存的重要影响因子。有关沙埋对干旱区植物特别是生长在风沙环境中灌木的影响研究较多。例如, 砂生槐(*Sophora moorcroftiana*) 以其强的种子繁殖、根蘖繁殖以及沙埋情况下强的新枝萌发能力来适应沙地环境^[3, 4]; 在沙生怪柳(*Tamarix taklamakanensis*) 群落发展期, 沙埋促使灌丛茁壮生长^[5]; 适度沙埋可促进荒漠绿洲边缘区泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*) 种群的生长, 而沙埋深度超过 100cm 时, 又会对其生长有所抑制^[6]; 木岩黄芪(*Hedysarum fruticosum*) 以其强的根状茎繁殖方式适应沙地环境^[7]; 差不嘎蒿(*Artemisia halodendron*) 以其强的嫩枝繁殖适应沙地^[8]; 小黄柳(*Salix gordgevii*) 以其耐沙埋的方式来抵抗流沙环境^[9]; 沙蓬(*Agrophyllum squarrosum*) 以其对水分的高效利用在较短的雨季内完成其生活史以适应沙地环境^[10]。这些研究都是植物对沙埋干扰的响应。

植被能否在干旱风沙区生境上定植取决于它的幼苗出土和生长对沙埋的适应能力。种子萌发和幼苗出土对于植物群落的补员起着关键作用^[11, 12]。沙埋和风蚀是干旱区植物分布的两个重要的选择压力, 是影响种子萌发、幼苗出土和存活的关键因子^[13]。

对于沙生植物幼苗的研究, 在海滨和湖沼地区较多^[14~17], 有关干旱区的研究较少。1990 年, Sykes 和 Wilson 调查了 30 种沙埋植物发现随着深度增加, 存活率下降^[18]。Brown 研究了两种优势植物的幼苗的存活、生长状况^[19]。国内学者也开始了对沙生幼苗的研究, 如任 等对沙拐枣(*Calligonum mongolicum*) 属 7 种植物在沙埋情况下的萌发和出苗进行了研究^[20]; 张称意等研究了羊柴(*Hedysarum laeve*) 幼苗的存活生长状况^[2]。但有关沙埋深度与荒漠植物幼苗出土和生长的关系研究还较少。

红砂(*Reaumuria soongorica*)、泡泡刺、花棒(*Hedysarum scoparium*)、白刺(*Nitraria tangutorum*) 和沙拐枣广泛分布于荒漠绿洲边缘区, 耐干旱、抗风蚀、耐沙埋、具有防风固沙的效能^[6, 21~24], 在干旱区退化生态系统植被恢复过程中起着重要的作用。本文研究了上述 5 种荒漠植物幼苗出土与生长对沙埋的响应, 判断幼苗生长特征能否预测植物的定植能力。研究其幼苗出土与生长对沙埋的响应有助于理解它们的定居过程, 亦可提高使用它们进行生态恢复的成效。

1 方法

1.1 研究区概况

实验在中国生态系统研究网络临泽内陆河流域综合研究站进行, 地理坐标为 100°07' E, 39°21' N, 地处黑河流域中游, 巴丹吉林沙漠边缘。研究区属温带大陆性荒漠气候, 气候干燥, 降水少而集中, 年平均降水量 117.1mm; 蒸发量大, 年蒸发量 2337.6mm。光照充足, 热量丰富, 日照长, 辐射强、昼夜温差大。全年日照时间 3053.9h, 年总辐射量 $146.2 \times 4.16 \text{ kJ/cm}^2$; 年平均气温 7.6℃, $\geq 0^\circ\text{C}$ 活动积温 3544.6℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 活动积温 3092.4℃, 无霜期 152d。风大沙多, 风沙活动强烈, 年平均风速 3.2m/s, 大风日数($\geq 17\text{m/s}$ 的日数) 15d。土壤以灰棕漠土和风沙土为主, 其中灰棕漠土为地带性土壤。天然植被主要有红砂、泡泡刺、花棒、白刺、沙拐枣等灌木半灌木和碱蓬(*Suaeda glauca*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、雾冰黎(*Bassia dasyphylla*)、白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*) 等 1 年生草本植物。

1.2 植物选择与种子收集

所选 5 种植物是荒漠中最常见的灌木或半灌木, 代表了不同种子重量的植物类型。2003 年秋季种子成熟时期, 在同一地点的不同母株上收集种子。采集后的种子处理干净, 风干后装入布袋置于实验室内自然冷藏。选取大而饱满的种子, 测量千粒重, 共 5 个重复。种子重量种间差异大, 种内差异小(表 1)。

表 1 5 种植物的种子重量

Table 1 Seed mass of the 5 desert species

植物种 Plant species	缩写 Abbreviation	所属科 Family	生活型 Life form	千粒重(±SE) 1000 seed mass (±SE) (g)
红砂 <i>Reaumuria soongorica</i>	R. s	柽柳科 <i>Tamaricaceae</i>	半灌木 <i>Sub-shrub</i>	5.91±0.62
泡泡刺 <i>Nitraria sphaerocarpa</i>	N. s	蒺藜科 <i>Zygophyllaceae</i>	灌木 <i>Shrub</i>	19.47±0.98
花棒 <i>Hedysarum scoparium</i>	H. s	豆科 <i>Leguminosae</i>	灌木 <i>Shrub</i>	25.84±1.51
白刺 <i>Nitraria tangutorum</i>	N. t	蒺藜科 <i>Zygophyllaceae</i>	灌木 <i>Shrub</i>	59.26±2.28
沙拐枣 <i>Calligonum mongolicum</i>	C. m	蓼科 <i>Polygonaceae</i>	灌木 <i>Shrub</i>	66.85±2.84

1.3 实验设计

2004 年 7 月, 于 25℃ 恒温清水中对种子浸泡 5~ 24h。花盆内装有在 105℃ 条件下烘干 24h 的沙土。用尼龙网铺在带有排水孔的花盆底部, 既可通气又可阻止沙土漏出。将种子均匀撒在花盆中(距边缘 1cm 处不撒种子), 设 0、1、2、3、5、8cm 6 个处理, 每个处理 5 个重复, 每个花盆内种植 25 粒种子。在种植 0cm 的表层的种子时, 尽量使重心之下部分位于沙土中, 重心之上部分露出表面。幼苗出土前, 每天浇水一次, 使土壤表面潮湿, 观测萌发、出苗。出苗后, 根据当地多年平均降水量情况, 设计 3d 浇水一次, 使得浇水期间土壤表面保持干燥, 记录幼苗生长状况。连续观测 2 个月, 温室内白天温度保持在 25℃ 以上, 夜间温度保持在 20℃ 左右。每天记录幼苗数量, 共 45d; 每 5d 记录一次幼苗高度, 共 11 次。实验终止时, 小心将幼苗取出, 并用清水冲洗干净, 在 70℃ 条件下烘干 48h 测量生物量。

1.4 数据处理方法

实验数据均采用 SPSS 软件进行统计与分析, 所有图均利用 EXCEL 软件完成。高度生长率分为绝对高度生长率和相对高度生长率。绝对高度生长率计算公式为: $AHGR = dH/dt$, (mm/d), 相对高度生长率按以下公式计算: $RHGR = (dH/dt)(1/H)$, (cm/(mm·d)); H 为时间 t 时的生长高度, t 为生长天数)。

2 结果

2.1 出苗率

沙埋深度显著影响着植物的出苗率 ($F = 9.08$, $df = 5$, $p = 0.001$)。每种植物的出苗率都随着沙埋深度的增加而降低(图 1), 而且遵循着指数方程关系: $E = ae^{-bx}$ (E 为出苗率, a 为截距, b 为出苗率的斜率, 而 x 代表沙埋深度)。红砂、泡泡刺、花棒、白刺和沙拐枣的指数方程分别为: $y = 64.291e^{-1.2489x}$ ($R^2 = 0.9093$, $p = 0.005$), $y = 78.281e^{-0.5844x}$ ($R^2 = 0.8402$, $p = 0.004$), $y = 114.96e^{-0.5622x}$ ($R^2 = 0.8957$, $p = 0.001$), $y = 34.575e^{-0.4213x}$ ($R^2 = 0.7641$, $p = 0.002$), $y = 35.392e^{-0.2146x}$ ($R^2 = 0.6476$, $p = 0.001$)。

红砂随着深度增加, 出苗率明显下降, 且只出现在 0~ 3cm 沙埋深度, 最高值出现在 0cm; 实验中发现出现在 3cm 深度只有 1 株红砂幼苗出土, 且生活了 4d 就死亡了。0cm 和 1cm 的深度的出苗率没有显著差别, 在 2cm 和 3cm 深度的出苗率, 有显著下降。说明红砂只能浅埋, 0~ 1cm 深度较合适, 而 3cm 已是出苗、存活的最大沙埋深度。

泡泡刺在 0~ 3cm 沙埋深度的出苗率无显著差别, 而在 5~ 8cm 深度显著下降, 说明泡泡刺的较高出苗率出现在 0~ 3cm。

花棒在 0~ 5cm 沙埋深度的出苗率无显著差别, 而在 8cm 深度的出苗率与 5cm 的出苗率存在显著差别, 说明花棒种子种植在 5cm 之内较为合适。

白刺在 0~ 3cm 沙埋深度的出苗率无显著差别, 而在 5cm 深度显著下降, 8cm 已无出苗现象, 说明白刺的较高出苗率出现在 0~ 3cm。

沙拐枣在 0~ 8cm 各个深度都有出苗现象, 且出苗率没有显著差异, 说明沙拐枣的生态适应性较强, 埋深范围较广。但最高出苗率仅为 29.6%, 而 8cm 深度的出苗率仅达到 4%, 所以沙拐枣种子应种植在 5cm 深度之内。

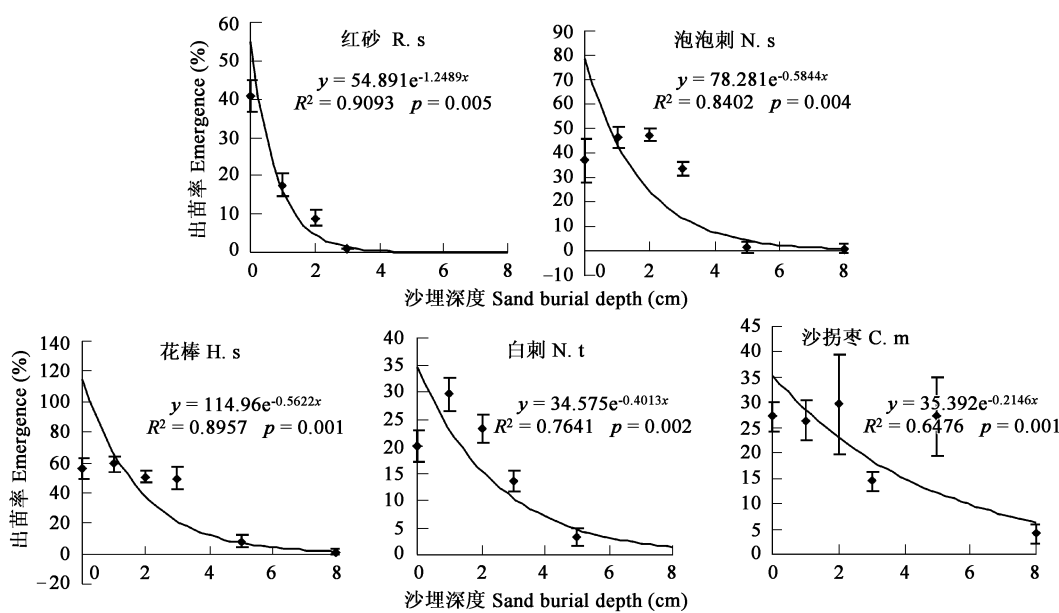


图 1 5 种荒漠植物的出苗率与沙埋深度的指数回归方程

Fig. 1 Seedling emergence of study species as functions of seed burial depth (mean±SE). Curves are fitted to species with significant negative exponential functions between mean emergence and burial depth

2.2 生长高度

幼苗生长高度受沙埋深度的影响显著 ($F=10.97$, $df=5$, $p=0.0003$)。沙拐枣幼苗在调查的后期, 高度有下降趋势, 这是因为幼苗顶端受到了虫害。

在同一时间, 幼苗的最大生长高度并不在 0cm 表层, 但红砂幼苗除外。可能是因为温室里自然条件比较适合红砂幼苗的生长, 但野外环境中, 红砂幼苗很难能够抵制 0cm 表层的干旱和风蚀而健壮生长。泡泡刺、花棒和白刺在 0~ 3cm 的沙埋深度的幼苗生长高度大于 5~ 8cm 沙埋深度的生长高度, 但沙拐枣幼苗在 5cm 深度的生长高度最大, 说明了沙拐枣种子适宜 5cm 沙埋深度(图 2)。

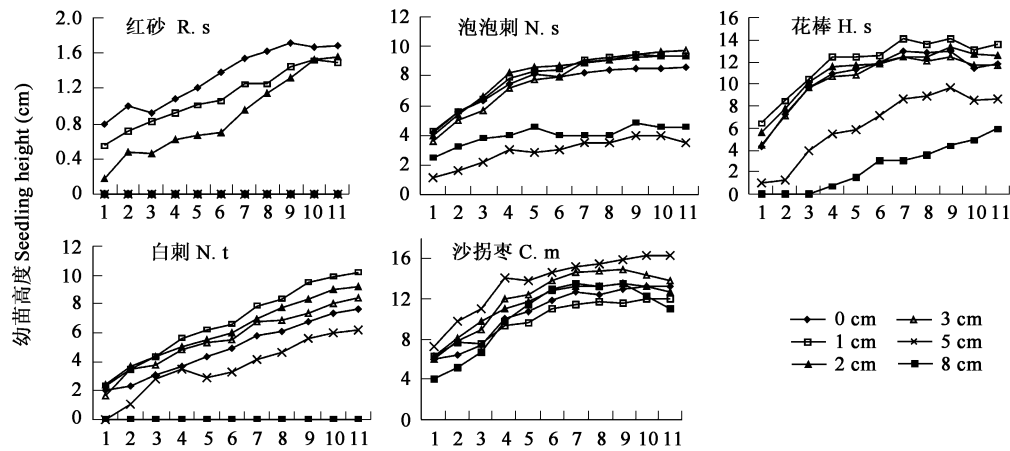


图 2 同一时期 5 种荒漠植物幼苗在不同沙埋深度下的生长高度

Fig. 2 Seedling height growth of 5 desert species at different sand burial depths over the same period
x 轴坐标代表记录次数 n (每 5 天记录 1 次) x axis represented recording times at 5_d interval

2.3 生物量

5 种荒漠植物幼苗的生物量受沙埋深度的影响不显著 ($F=2.44$, $df=5$, $p=0.070$)。

红砂的生物量最大值出现在 1cm 的沙埋深度,但因为红砂可出土的最大沙埋深度也较小,所以一旦出苗、生长,幼苗的生物量并不随沙埋深度而显著变化。

泡泡刺、花棒、白刺的生物量最大值出现在 2cm 的沙埋深度,沙拐枣生物量随深度增加而增加,但从回归关系图可得出,到达一定深度后生物量也会达到最大值(图 3)。

2.4 高度生长率

绝对高度生长率受植物种和沙埋深度的影响显著 ($F = 22.97, df = 4, p = 0.0003; F = 10.13, df = 5, p = 0.0006$)。对于每个沙埋深度,红砂的绝对高度生长率明显低于其余 4 种植物,沙拐枣的绝对高度生长率都高于其余 4 种植物幼苗。除沙拐枣幼苗外,0~3cm 沙埋深度的绝对高度生长率都大于 5~8cm 沙埋深度的绝对高度生长率(图 4a)。

植物种和沙埋深度对幼苗相对高度生长率的影响不显著 ($F = 1.56, df = 4, p = 0.224; F = 0.89, df = 5, p = 0.504$)。但对于红砂幼苗来说,2cm 沙埋深度下的相对高度生长率明显高于 0、1cm 的相对高度生长率,说明 2cm 沙埋深度更适宜红砂幼苗的生长。花棒在 5cm 深度时的相对高度生长率明显高于其它深度的相对高度生长率,可能是一异常现象,并不是沙埋深度的影响(图 4b)。

3 讨论

3.1 沙埋深度与幼苗出土

小生境内的异质性一直被认为保持物种多样性的重要因素^[25]。本文研究了沙埋深度如何影响不同植物幼苗的补员可能性,估计沙埋因素在植物幼苗时期的重要影响。在沙地生境中,大部分散布的种子会受到沙埋影响,而沙埋深度和出苗率之间的关系是定量化研究沙埋影响的有力证据^[26]。

沙埋对幼苗出土既有促进作用,也有抑制作用。抑制作用在于因为缺乏适宜的氧气、光和温度,沙埋深度过大会阻碍种子的萌发;即使种子萌发了,即将出土的幼苗还要有忍耐黑暗和越过阻力的能力^[27]。幼苗在沙埋条件下能否存活与在黑暗中的存活能力有关^[18]。但种子萌发后必须要漏出地面。一般认为,沙埋对小种子植物的影响较大。因为保持在种子内的仅有的能量要用来完成这些活动。如果这些能量不能满足胚轴到达地面,那么幼苗还未抵达地面,就死亡了,即一定沙埋深度下种子可以萌发但不能出苗。很多研究表明沙埋延迟并降低大部分幼苗出土率^[20, 28]。

促进作用在于沙埋减少了幼苗暴露于空气的机会。幼苗上面的沙土成为覆盖物,维持了较高的土壤湿度,使植物快速生长,而且,沙埋可以保护种子和幼苗不被极端的低温或高温和地表动物的损坏。一定的沙埋深度可以提高种子萌发、幼苗出土和存活能力,从而躲避了被掠夺现象的发生。所以幼苗出土和生长需要一个合适的沙埋深度,即最佳沙埋深度。如果出苗、生长和存活能力最强而未被损坏的深度认为是最佳沙埋深

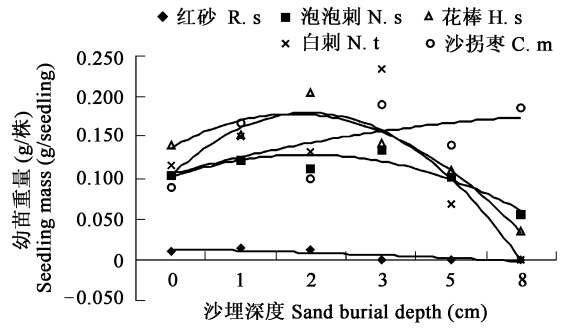


图 3 不同沙埋深度下 5 种荒漠植物幼苗的重量

Fig. 3 Total seedling mass at harvest for 5 desert species at different sand burial depths

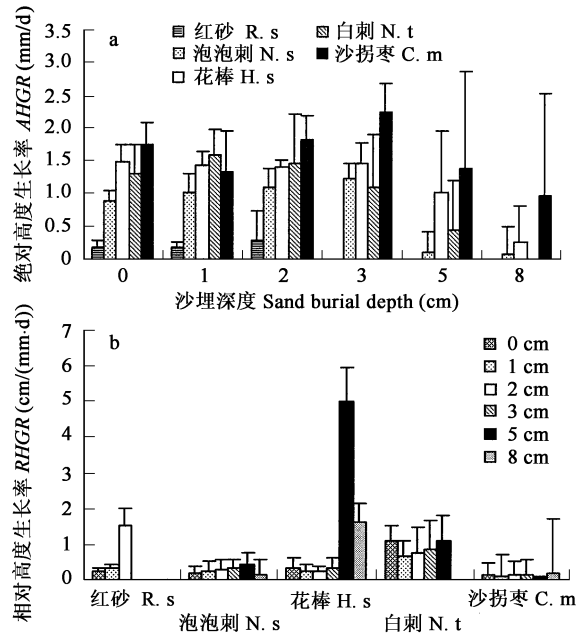


图 4 不同沙埋深度下 5 种荒漠植物幼苗的高度生长率, (a) 绝对高度生长率; (b) 相对高度生长率

Fig. 4 Seedling growth rates of 5 desert species at the different sand burial depths. (a) absolute height growth rate (AHGR), (b) relative height growth rate (RHGR)

度^[29]。那么本实验中红砂种子的最佳沙埋深度应为0~1cm, 泡泡刺、花棒和白刺种子的最佳沙埋深度为0~3cm, 沙拐枣种子的最佳沙埋深度为5cm。

3.2 生长率与幼苗定植

一旦出苗后, 幼苗的定植成功率与植物特征有关, 如种子大小、相对生长率和形态可塑性, 依赖于它们的生长能力^[30]。相对存活能力可通过绝对和相对生长率及根长来判断。高的生长率可以帮助幼苗达到冠层或植被高度。本文采用了绝对和相对高度生长率来描述幼苗的生长能力。相对高度生长率是幼苗初始高度与绝对高度生长率的函数。若在适宜的环境, 并给予充足的生长时间, 现在个体较大但相对生长率小的植物可被相对生长率大而现在个体较小的植物赶上。如实验中, 红砂在0cm 表层的生长高度最大, 但在2cm 沙埋深度下的相对高度生长率最大, 所以如果时间充足, 2cm 深度下的幼苗就能够超过0cm 表层的幼苗高度。自然环境中的相对生长率与植物潜在的最大相对生长率和生长条件有关。即相对高度生长率依赖于物种和其生长条件。本实验幼苗生长条件可认为是相同的, 所以相对高度生长率应取决于植物种, 但发现植物种或种子重量与相对高度生长率之间无显著关系。

大种子植物一般有较强的绝对生长率, 能够生长出较长而粗壮的根深入沙土中, 进而躲避表面的干旱威胁。小种子植物尽管绝对生长率较小, 但其也尽力快速生长以逃脱死亡危险。实验中发现, 花棒和沙拐枣有高的绝对高度生长率, 但其幼苗生长阶段需要的水量较多; 泡泡刺和白刺也有较高的绝对生长率, 但其易受损坏; 红砂幼苗虽然有较低的绝对高度生长率, 但其在戈壁区广泛存在。所以绝对高度生长率与相对高度生长率并不能预测幼苗的存活能力。小种子植物永远不会被大种子植物占据, 但它有着较低的补员机会。

3.3 应用

在实际的植被恢复中, 不仅要考虑种子萌发和幼苗定植状况, 还要注意种子散布方式、植物的生长和繁殖能力。但是, 在幼苗出土和定植时期, 植物的生长特征可作为判断的依据。总起来说, 在植被恢复中, 那些出苗率高、生长较快的物种可供选择。

4 结论

(1) 每种植物的出苗率都随着沙埋深度的增加而降低, 而且遵循着指数方程关系。红砂种子只能浅埋, 最佳沙埋深度应为0~1cm, 而3cm 已是出苗、存活的最大沙埋深度。泡泡刺、白刺的高出苗率出现在0~3cm, 而在5~8cm 深度显著下降, 白刺在8cm 已无出苗现象。花棒种子种植3cm 之内较为合适。沙拐枣在0~8cm 各个深度都有出苗现象, 且出苗率没有显著差异, 但8cm 深度的出苗率只有4%, 最佳沙埋深度约为5cm。

(2) 幼苗生长高度受沙埋深度的影响显著, 在同一时间, 幼苗的最大生长高度并不在0cm 表层, 但红砂幼苗除外。泡泡刺、花棒和白刺在0~3cm 沙埋深度的幼苗生长高度大于5~8cm 沙埋深度的生长高度, 但沙拐枣幼苗在5cm 深度的生长高度最大。5种荒漠植物幼苗的生物量受沙埋深度的影响不显著。在同一沙埋深度下, 红砂幼苗的绝对高度生长率明显低于其余4种植物, 沙拐枣幼苗的绝对高度生长率高于其余4种植物幼苗; 5种植物的相对高度生长率对沙埋深度的响应并不敏感。

(3) 绝对高度生长率与相对高度生长率并不能预示幼苗存活能力。

References:

- [1] Liu Y X. Phytoreclamation of sand dunes in the northwest, north, and northeast of China. *Journal of Desert Research*, 1988, 8(4): 11~17.
- [2] 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.
- [3] Zhao W Z. A preliminary study on the arenaceous adaptability of *Sophora moorcroftiana*. *Acta Phytoecologica Sinica*, 1998, 22(4): 379~384.
- [4] Zhao W Z, Liu Z M. Responses of growth and reproduction of *Sophora moorcroftiana* to altitude and sand-burying in Tibet. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 134~138.
- [5] He X D, Gao Y B, Ren A Z. Role of wind-sand disturbance in the formation and development of *Tamarix taklamakanensis* community. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(11): 1285~1290.
- [6] Li Q Y, Zhao W Z, Li Q S, *et al.* Responses of *Nitraria sphaerocarpa* Maxim. population to disturbance of blown sand in the edge of desert oasis. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2484~2491.

- [7] Liu Z M. Relationship between receneration characteristics and arenaceous adaptability of *Halysarum fruticosum* VAR. *Lignosum*. *Acta Phytocologica et Geobotanica*, 1992, 16(2): 136~ 142.
- [8] Li J. Approach to some basic problems of reproduction of *Artemisia halodendron*. *Journal of Desert Research*, 1994, 14(3): 56~ 61.
- [9] Liu S E. *Corpus of Liu S E*. Beijing: Science Press, 1985. 136~ 138.
- [10] Li S G, Chang X L, Zhao X Y. Study of *Agriophyllum squarrosum* — pioneering plant on shifting sand. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1992, 6(4): 63~ 68.
- [11] Rees M. Seed dormancy. In: Crawley M J ed. *Plant Ecology*. Oxford: Blackwell Science. 1997. 214~ 238.
- [12] White T A, Campbell B D, Kemp P D. Laboratory screening of the juvenile responses of grassland species to warm temperature pulses and water deficits to predict invasiveness. *Functional Ecology*, 2001, 45: 103~ 112.
- [13] Maun M A. Population biology of *Ammophila* on Lake Huron sand dunes I. Habitat, growth form, reproduction and establishment. *Canad. J. Bot.*, 1985, 63: 113~ 114.
- [14] Chen H, Maun M A. Effects of sand burial depth on seed germination and seedling emergence of *Cirsium pücheri*. *Plant Ecology*, 1999, 140: 53~ 60.
- [15] Maun M A. Adaptation of plants to burial in coastal sand dunes. *Can. J. Bot.*, 1997, 76: 713~ 738.
- [16] Zhang J, Maun M A. Effects of sand burial on seed germination, seedling emergence, survival, and growth of *Agropyron psammophilum*. *Can. J. Bot.*, 1990, 68: 304~ 310.
- [17] Maun M A, Lapiere J. effects of burial by sand on seed germination and seedling emergence of four dune species. *Amer. J. Bot.*, 1986, 73: 450~ 455.
- [18] Sykes M T, Wilson J B. An experimental investigation into the response of New Zealand sand dune species to different depths of burial by sand. *Acta Bot. Neerl*, 1990, 39: 171~ 181.
- [19] Brown J F. Effects of experimental burial on survival, growth, and resource allocation of three species of dune plants. *J Ecol*, 1997, 85: 151~ 158.
- [20] Ren J, Tao L, Liu X M. Effects of sand burial depth on seed germination and seedling emergence of *Calligonum* L. Species. *Journal of Arid Environments*, 2002, 51(4): 601~ 609.
- [21] Liu J Q, Qiu M X, Pu J C, *et al.* The typical extreme xerophyte — *Raumuria songarica* in the desert of China. *Acta Botanica Sinica*, 1982, 24(5): 485 ~ 488.
- [22] Liu Y J, Liu M Y, Zhang L, *et al.* Studies on the function of *Halysarum scoparium* belt sand-barriers on mobile sand dune. *Soil and Water Conservation in China*, 1997, 4: 23~ 25.
- [23] Jia B Q, Cai T J, Gao Z H, *et al.* Biomass forest models of *Nitraria tangutorum* shrub in sand dune. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, 16(1): 96~ 99.
- [24] Ma R J, Wu S M, Wang F C. Studies on anatomy and desert adaptability of stem secondary xylem in 6 species of *Calligonum*. *Acta Botanica Sinica*, 1994, 36(supplement): 55~ 60.
- [25] 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: 557~ 568.
- [26] Campbell D R, Rochefort L. Germination and seedling growth of bog plants in relation to the recolonization of milled peatlands. *Plant Ecology*, 2003, 169: 71~ 84.
- [27] Sykes M T, Wilson J B. Dark tolerance in plants of dunes. *Functional Ecology*, 1990, 4: 799~ 805.
- [28] Seiwa K, Watanabe A, Saitoh T, *et al.* Effects of burying depth and seed size on seedling establishment of Japanese chestnuts, *Castanea crenata*. *Forest Ecology and Management*, 2002, 164: 149~ 156.
- [29] Vander Wall S B. A model of caching depth: implications for scatter hoarders plant dispersal. *Am. Nat.*, 1993, 141: 217~ 232.
- [30] 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: 277~ 286.

参考文献:

- [1] 刘 心. 我国三北地区的植物固沙. *中国沙漠*, 1988, 8(4): 11~ 17.
- [3] 赵文智. 砂生槐沙生适应性初步研究. *植物生态学报*, 1998, 22(4): 379~ 384.
- [4] 赵文智, 刘志民. 西藏特有灌木砂生槐繁殖生长对海拔和沙埋的响应. *生态学报*, 2002, 22(1): 134~ 138.
- [6] 李秋艳, 赵文智, 李启森, 等. 荒漠绿洲边缘区泡泡刺种群对风沙干扰的响应. *生态学报*, 2004, 24(11): 2484~ 2491.
- [7] 刘志民. 木岩黄芪的繁殖特点及其与沙生适应性的关系. *植物生态学与地植物学学报*, 1992, 16(2): 136~ 142.
- [8] 李进. 关于差把嘎蒿繁殖的若干问题的探讨. *中国沙漠*, 1994, 14(3): 56~ 61.
- [9] 刘慎谔. 刘慎谔文集. 北京: 科学出版社, 1985. 136~ 138.
- [10] 李胜功, 常学礼, 赵学勇. 沙蓬——流动沙丘先锋植物研究. *干旱区资源与环境*, 1992, 6(4): 63~ 68.
- [21] 刘家琼, 邱明新, 蒲锦春, 等. 我国荒漠典型超旱生植物——红砂. *植物学报*, 1982, 24(5): 485~ 488.
- [22] 刘艳军, 刘明义, 张力, 等. 花棒带状沙障防风固沙试验研究. *中国水土保持*, 1997, 4: 23~ 25.
- [23] 贾宝全, 慈龙骏, 蔡体久, 等. 绿洲荒漠交错带土壤水分变化特征初步研究. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 203~ 208.
- [24] 马瑞君, 吴树明, 王凤春. 6种沙拐枣属植物茎次生木质部的解剖及其对沙生环境的适应. *植物学报*, 1994, 36(增刊): 55~ 60.