

沙埋对樟子松幼树生长及光合水分代谢的影响*

赵哈林^{1**} 李瑾¹ 周瑞莲² 曲浩¹ 云建英¹ 潘成臣¹¹中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; ²鲁东大学生命科学学院, 烟台 264025)

摘要 为了解沙埋对樟子松幼树生长特性及光合水分代谢的影响, 2013年在内蒙古科尔沁沙地研究了不同沙埋深度下3年生樟子松幼树的存活率、株高、地上生物量等生长特性及光合速率、蒸腾速率等光合水分代谢特征的变化。结果表明: 樟子松幼树最大可耐受大于株高2 cm的沙埋, 沙埋超过该深度其幼树全部死亡; 低于株高以上2 cm的沙埋有利于促进樟子松幼树的株高生长, 但不利于其地上生物量的积累; 低于株高以上2 cm的沙埋可以导致樟子松幼树的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO₂浓度显著增加, 但以50%株高沙埋处理的光合速率、蒸腾速率、气孔导度增加幅度最大, 胞间CO₂浓度以株高以上2 cm沙埋处理的增加幅度最大; 沙埋并不造成樟子松幼树的水分胁迫, 但随着沙埋深度的增加其水分利用效率趋于下降, 并以株高以上2 cm沙埋处理的水分效率最低。樟子松幼树的高生长与其光合速率、蒸腾速率呈显著正相关, 光合蒸腾速率与气孔导度、胞间CO₂浓度呈显著正相关, 水分利用效率与植物含水量、蒸腾速率呈显著正相关, 地上生物量与光合效率、蒸腾速率的相关性未达到显著水平。

关键词 樟子松幼树; 沙埋; 株高; 地上生物量; 光合速率; 蒸腾速率

中图分类号 Q948.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)11-2973-07

Effects of sand burial on growth and photosynthesis and water metabolism of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* saplings. ZHAO Ha-lin^{1**}, LI Jin¹, ZHOU Rui-lian², QU Hao¹, YUN Jian-ying¹, PAN Cheng-chen¹ (¹*Cold and Arid Regions Environment and Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; ²*Faculty of Life Sciences, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(11): 2973-2979.

Abstract: In order to assess the effects of sand burial on growth properties and photosynthesis and water metabolism of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* saplings, the survival rate, plant height, aboveground biomass, photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and water use efficiency (WUE) of 3-year-old *P. sylvestris* var. *mongolica* saplings with different sand burial depths were measured in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia in the spring of 2013. The results showed that the maximum depth of the saplings to withstand sand burial should not exceed 2 cm above the plant height, and all saplings died when the sand burial depth was over 2 cm above the plant height. When the sand burial depth was below 2 cm above the plant height, sand burial promoted the height growth but did not benefit the biomass accumulation of the saplings, and significantly increased P_n , T_r , stomatal conductance (g_s), and intercellular CO₂ concentration (C_i), with a maximum increase of P_n , T_r , g_s , respectively when the sand burial depth was at 50% of the plant height. C_i was the maximum when the sand burial depth was 2 cm above the plant height. Although the sand burial did not result in the decrease of water content in the saplings, WUE of the saplings tended to decline with increase of the sand burial depth, with the lowest WUE when the sand burial depth was 2 cm above the plant height. There was a significant and positive correlation between sapling height and P_n , T_r , between P_n and g_s and C_i , and between WUE and plant water content and T_r . The correlation was not significant between the aboveground biomass and P_n and T_r .

* 国家自然科学基金项目(31270752, 30972422)资助。

** 通讯作者 E-mail: resdiv@lzb.ac.cn

收稿日期: 2014-04-22 接受日期: 2014-07-29

Key words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sapling; sand burial; plant height; aboveground biomass; photosynthetic rate; transpiration rate.

在我国北方沙漠地区,植物经常受到沙埋的危害(杨惠玲等,2007;何玉慧等,2008)。研究表明,沙埋可使植株光合面积降低,生长受到抑制,生产能力下降,甚至导致植物死亡,因而沙埋是沙漠或沙地中影响植物存活与生长的最重要因素之一(Benvenuti *et al.*, 2001;赵哈林,2013)。但是,由于不同植物耐受沙埋的能力有很大差异,遭受沙埋胁迫以后,一些耐沙埋的物种能够存活下来,而不耐沙埋的植物其密度下降,甚至消亡,从而使植被分布和植物群落组成发生改变,导致植被退化(李秋艳和赵文智,2006;赵哈林等,2010)。因此,近年来随着人们对生态环境保护的日益重视,沙埋对植物的影响及其适应研究越来越受到广泛关注。

关于沙埋对植物的影响,以及植物对沙埋的适应,目前已有一些研究报道。从已有文献看,相关研究主要集中于沙埋对植物种子萌发和幼苗出土的影响,如沙埋对差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)、东北木蓼(*Atraphaxis manshurica*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、山竹子(*Hedysarum f. ruticosum*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、羊草(*Leymus chinensis*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)等植物种子萌发和幼苗出土的影响(朱雅娟等,2005;赵丽娅等,2006;马红媛等,2007;杨慧玲等,2007)。关于沙埋对植物形态、生长和无性繁殖的影响或响应也有一些研究报道,但其数量不多,如沙埋对沙柳(*Salix psammophila*)形态特征的影响、对沙茅草(*Elymus farctus*)和沙拂子茅(*Calamovilfa longifolia*)生长的影响,对砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)、无芒雀麦等繁殖特性的影响等(Harris & Davy,1987;Maun, 1996;赵文智和刘志民,2002;米志英等,2005;刘凤红等,2006)。另外,还有沙埋对植物解剖特性、幼苗气体交换、植物生物量及其养分分配影响等方面的研究报道(Harris & Davy,1988;Shi *et al.*,2004;徐斌等,2005),但这类研究还属个别现象。而迄今为止,有关沙漠植物对沙埋的光合水分代谢及其逆境生理响应的研究还很少见有报道。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)又名海拉尔松和蒙古赤松,天然分布于呼伦贝尔沙地及大兴安岭西侧山地(赵兴梁和李万英,1961)。由于具有较强的耐寒、耐旱和耐瘠薄特点,又是常绿树种,

自20世纪50年代以来已在我国北方沙区广泛引种和推广种植,为我国沙漠化防治和改善沙区生态环境起到了巨大作用(李宏印和刘明国,2003;焦树仁,2010),因而其研究正日益受到重视。有关樟子松的研究已有大量文献报道,主要包括樟子松的生物学特性(赵兴梁和李万英,1961),育苗、栽培、管理、病虫害防治等技术研究(焦树仁,2010),樟子松林衰退演替机制研究(朱教君等,2005),樟子松林土壤养分、水分、光照的空间异质性研究(郑鑫,2011),樟子松生长规律及其与环境因子关系的研究(于海燕和张明铁,2009),樟子松的逆境生理生态研究(白玉娥等,1999)等。通过这些研究,确定了早期引种栽培的樟子松成林衰退成因,阐明了樟子松林的密度和分布格局对土壤水分、养分、光照等空间异质性的影响,揭示了樟子松生长节律、树高、基径、寿命变化及其与气候、土壤、水分等环境条件的关系,探讨了干旱、盐分胁迫下樟子松光合代谢、水分代谢、SOD活性和MDA含量、脯氨酸含量、脱落酸等生理生态适应特征和机制等(赵兴梁和李万英,1961;白玉娥等,1999;李宏印和刘明国,2003;朱教君等,2005;于海燕和张明铁,2009;焦树仁,2010;郑鑫,2011)。但迄今为止,有关沙埋对樟子松幼树生长特性及光合水分代谢特征的影响还知之甚少。

本文通过不同深度的沙埋试验,研究沙埋对樟子松幼树生长特性及其光合水分代谢的影响,分析樟子松幼树耐受沙埋的能力,探讨沙埋对樟子松幼树生长特性影响及其机制,以期揭示樟子松幼树沙埋情况下受损过程及其适应机制。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古通辽市奈曼旗境内,地处科尔沁沙地腹地(42°55'N—42°57'N,120°41'E—120°45'E,海拔340~370m)。该区属温带半干旱大陆性气候,年均降水量356.9mm,年均蒸发量1900mm,年均气温6.5℃,≥10℃年积温3190℃,无霜期151d;年平均风速3.4m·s⁻¹,年平均扬沙天气20~30d。地貌以高低起伏的沙丘地和平缓草甸或农田交错分布为特征,土壤多为风沙土或沙质草甸土。研究区天然植物群落以中旱生植物为主,主要

植物种有沙米、大果虫实 (*Corispermum marocarpum*)、猪毛菜 (*Salsola collina*)、差巴嘎蒿、小叶锦鸡儿等,樟子松作为常绿树种在当地广泛种植(刘新民等,1996)。

1.2 试验设计

试验地设置于中国科学院奈曼沙漠化研究站的水分平衡场内。试验材料为长势良好,高矮基本一致的3年生樟子松幼树,在试验前一年将其移栽至直径30 cm,深35 cm的无底花盆中,通过适时适量浇水和冬季防冻等措施保证其安全越冬。参考他人沙埋研究报告(杨慧玲等,2007;何玉慧等,2008),试验设计为CK、A、B、C、D、E、F、G、H、I和J等11个不同深度沙埋处理,其沙埋深度分别为株高的0%、25%、50%、75%、100%和株高以上2、4、6、8、10、15 cm。试验采用区组排列,每个处理6个重复,每个重复为1棵樟子松幼树。沙埋试验于2013年春季樟子松顶芽萌长初期进行。沙埋时,按照试验设计,下挖不同深度,然后将栽有幼苗的无底花盆放入,保持枝条延展保持原状,再用沙子小心埋到适当高度,使埋后沙面与地面平齐。沙子均来自于当地的流动沙丘。

1.3 测定内容与与方法

在沙埋前和沙埋后第14天、47天,分别测定其存活率(以顶芽是否能顶土而出为标准)、株高、长势、顶芽长等指标。沙埋第14天测定其光合水分代谢特征,第47天测定其地上生物量。第47天测定存活率时,除A至E处理顶芽伸出地面的处理外,其他处理(F至J处理)植株叶片几乎全部腐烂,因此以下只展示沙埋后顶芽出土存活的沙埋处理数据(CK至E处理)。为了定量评价沙埋对其长势(生长状况)的影响,根据叶色和落叶量的差异将其长势划分为长势好(叶色葱绿,无落叶)、长势中(叶色绿,有少量落叶)、长势差(叶色发黄,有较多落叶)3个等级,并采取直接赋值法分别赋予其权值为3、2、1,通过观测各个处理的植物长势并赋值后分析其长势差异。光合水分代谢测定,采用便携式光合分析系统(LI-6400, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA),于9:00—11:00连续测定植物的叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(g_s)、蒸腾速率(T_s)。测定时,选取植株上部叶片,每棵植株测定4个叶片,每片叶子读取仪器稳定后的5个数据,最后计算平均值。由于所测樟子松针叶叶片呈扁平状,且长度大于LI-6400叶室长度,因而通过直接测定叶片两端宽度后,按照

梯形面积计算方法计算其叶面积。

1.4 数据处理

应用SPSS 13.0软件进行数据统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,用Pearson相关系数评价不同因子间的相互关系。

2 结果和分析

2.1 不同沙埋处理下樟子松幼苗的存活率和长势

从图1A可以看出,从沙埋A到D处理,樟子松幼苗存活率没有变化,和CK处理一样所有幼树全部存活。E处理的存活率明显下降,从F到J处理,顶芽全部未出土。从图1B可以看出,从CK到C处理樟子松幼树长势权值均为2.7,说明从A到C处理其幼苗长势和CK一样均为良好,而从D处理其长势权值开始明显下降($P < 0.05$),至E处理时其权值降至2.0,说明其长势一般(中等),从F到J处理因其顶芽未出土而无法观测其长势。

2.2 不同沙埋处理下樟子松幼苗的株高和地上生物量

从图2A可以看出,从A到D处理的植物株高和顶芽长度均较非沙埋处理CK明显增加($P < 0.05$)。其中,株高以A处理增加幅度最大(22.6%),E处理增加幅度最小(6.2%);顶芽长度

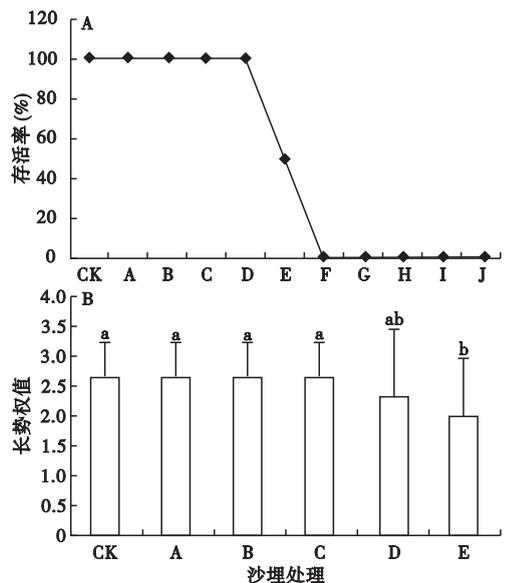


图1 不同沙埋处理下樟子松幼树的存活率(A)和长势(B)
Fig.1 Survival rate (A) and growth status (B) in different sand burial treatments

CK、A、B、C、D、E、F、G、H、I和J分别表示沙埋深度为株高的0%、25%、50%、75%、100%和株高以上2、4、6、8、10、15 cm,不同字母表示处理间同一指标在 $P < 0.05$ 水平上差异显著,下同。

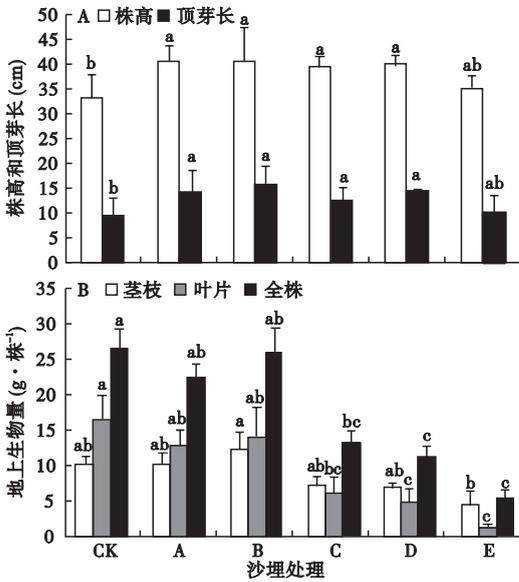


图2 不同沙埋处理下樟子松幼树的株高、顶芽长(A)和地上生物量(B)

Fig.2 Plant height and bud length (A) and above-ground biomass (B) in different sand burial treatments

以B处理增加幅度最大(54.7%),E处理增加幅度最小(6.3%)。从图2B可以看出,各沙埋处理的茎枝生物量与CK虽有差异,但并未达到显著水平($P > 0.05$);各沙埋处理的叶片生物量和地上总生物量较CK均有所下降,但只有C、D和E处理与CK的差异达到了显著水平($P < 0.05$)。其中,和CK相比,E处理的茎枝生物量、叶片生物量和地上总生物量分别下降了58.04%、93.77%和80.31%。

2.3 不同沙埋处理下樟子松的光合速率和蒸腾速率

从图3可以看出,从CK到E处理,其光合速率和蒸腾速率均呈现先增加后下降再略有回升的变化趋势,各处理光合速率和蒸腾速率均高于非沙埋CK,其中A、C、D、E处理光合速率与CK的差异未达到显著水平,B、C、D、E处理的蒸腾速率与CK的差异显著($P < 0.05$)。其中,以B处理光合速率和蒸腾速率增加幅度最大,分别为113.1%和247.6%。光合速率增加幅度以D处理最小(36.2%),蒸腾速率以A处理增加幅度最小(93.0%)。

2.4 不同沙埋处理下樟子松的气孔导度和胞间CO₂浓度

不同沙埋处理下,樟子松幼树叶片的的气孔导度和胞间CO₂浓度差别很大(图4)。其中,从A到E

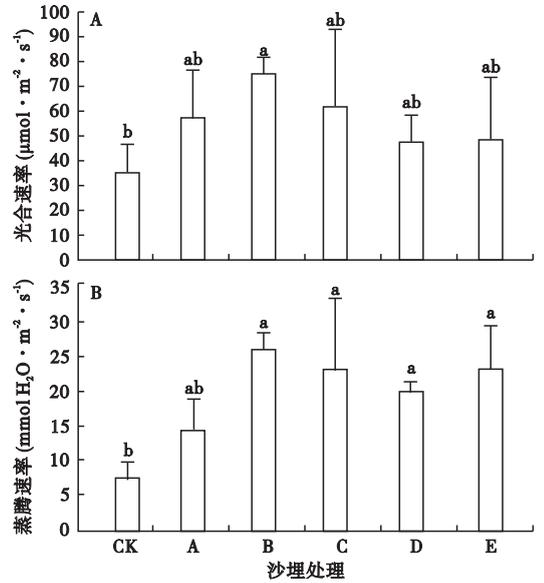


图3 不同沙埋处理下樟子松幼树光合速率(A)和蒸腾速率(B)

Fig.3 Photosynthetic rate (A) and transpiration rate (B) in different sand burial treatments

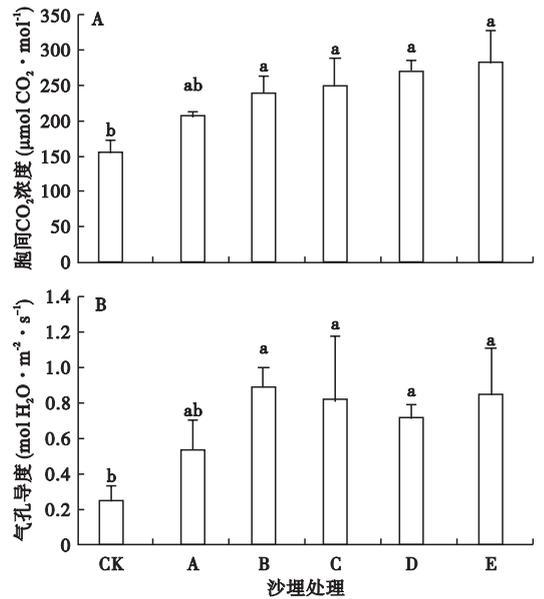


图4 不同沙埋处理下樟子松幼树胞间CO₂浓度(A)和气孔导度(B)

Fig.4 Stomatal conductance (A) and intercellular CO₂ concentration (B) in different sand burial treatments

处理,其胞间CO₂浓度呈增加趋势,B至E处理均显著高于非沙埋的CK($P < 0.05$)。气孔导度则是从A到B处理大幅度增加,而后波动式下降,但B至E处理也都显著高于非沙埋CK处理($P < 0.05$)。其中,胞间CO₂浓度以E处理最大,为283.27 $\text{mmol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$,较CK增加了81.5%;气孔导度以B处

表 1 不同沙埋处理各因子之间相关性

Table 1 Correlation analysis among different factors in different sand burial treatments

| 项目 | 株高 | 茎生物量 | 叶生物量 | 总生物量 | 光合速率 | 蒸腾速率 | 水分利用效率 | 茎含水量 | 叶含水量 |
|--------|----------|----------|----------|--------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 株高 | 1 | | | | | | | | |
| 茎生物量 | 0.542 * | 1 | | | | | | | |
| 叶生物量 | 0.377 | 0.799 ** | 1 | | | | | | |
| 总生物量 | 0.456 | 0.912 ** | 0.975 ** | 1 | | | | | |
| 光合速率 | 0.606 ** | 0.369 | 0.096 | 0.201 | 1 | | | | |
| 蒸腾速率 | 0.541 * | 0.240 | -0.130 | 0.000 | 0.869 ** | 1 | | | |
| 水分利用效率 | 0.624 ** | 0.119 | -0.215 | -0.102 | 0.233 | 0.533 * | 1 | | |
| 茎含水量 | 0.915 ** | 0.497 * | 0.286 | 0.378 | 0.548 * | 0.496 * | 0.656 ** | 1 | |
| 叶含水量 | 0.513 * | 0.494 * | 0.207 | 0.322 | 0.289 | 0.235 | 0.415 | 0.707 ** | 1 |
| 总含水量 | 0.786 ** | 0.527 ** | 0.261 | 0.372 | 0.460 | 0.407 | 0.593 ** | 0.936 ** | 0.911 ** |

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。

理值最大为 $0.908 \text{ mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 较 CK 增加了 254.4%。

2.5 不同沙埋处理下樟子松幼苗的含水量及水分利用效率

不同沙埋处理下, 植物含水量也发生了明显变化(图 5A)。其中, 从 A 到 E 处理植物茎枝含水量均高于非沙埋 CK 处理, 但各处理间差异未达到显著水平($P > 0.05$)。叶片和全株含水量均以 E 处理最高, D 处理最低, 其中 D 处理与 CK 差异达到显著水平($P < 0.05$)。各处理的水分利用效率变化趋势与植物体水分含量不同(图 5B), 从 A 到 E 处理是随着沙埋深度增加而显著下降($P < 0.05$), 其中 E 处理的水分利用效率仅为 CK 的 45.4%。

2.6 不同沙埋处理下各因子之间相关性

为了解不同沙埋处理下各因子之间的关系, 分析了部分因子的相关性(表 1)。结果表明, 沙埋处理下, 樟子松幼树株高变化与其茎、叶生物量、总生物量、光合速率、蒸腾速率、水分利用效率、植株含水量呈显著正相关, 总生物量与植株茎、叶含水量呈显著正相关, 光合速率与蒸腾速率、茎生物量呈显著正相关, 蒸腾速率与茎含水量、水分利用效率呈正相关, 水分利用效率与其植株总含水量呈显著正相关, 植株总含水量与其茎叶含水量呈显著正相关($P < 0.05$), 其他因子之间的相关性未达到显著水平($P > 0.05$)。

3 讨论

在沙漠或风沙活动强烈的地区, 植物的耐沙埋能力是不同的(赵哈林, 2013)。有研究表明, 非沙生植物的耐沙埋能力较弱, 沙生植物耐沙埋能力明显强于非沙生植物(Benvenuti *et al.*, 2001; 赵哈林等, 2014)。例如, 当沙埋深度为株高 66% 时, 非沙生植物砂生槐幼苗存活率明显下降且生长受到抑制, 当沙埋深度增至株高 100% 时, 其幼苗全部死亡(赵文智和刘志民, 2002), 非沙生植物无芒雀麦、柠条(*Caragana korshinskii*) 也有类似现象(聂春雷和郑元润, 2005; 杨慧玲等, 2007; 李文婷等, 2010), 但沙生植物差巴嘎蒿幼苗却能耐受 200% 株高左右的沙埋(赵哈林等, 2014)。研究表明, 樟子松幼树在沙埋深度为其株高 100% 时长势减弱, 但未出现死亡植株, 当沙埋深度为其株高以上 2 cm 时存活率下降, 超过 2 cm 则所有植株顶芽均未能顶破表土而腐烂, 这说明其幼树能够耐受的沙埋深度不能超过株高以上 2 cm, 其最大耐沙埋能力介于沙生植物和非

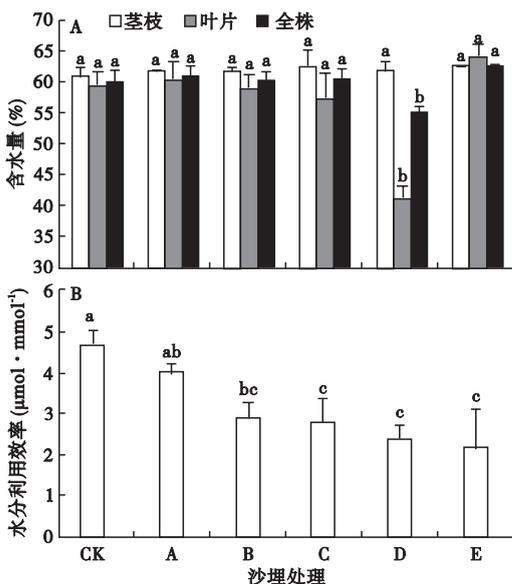


图 5 不同沙埋处理下的植物含水量 (A) 和水分利用效率 (B)

Fig. 5 Plant water contents (A) and water use efficiency (B) in different sand burial treatments

沙生植物之间。此外,沙埋深度为株高 25% ~ 100% 时,樟子松幼树株高和当年顶芽长度均显著高于 CK,说明一定程度的沙埋能够促进樟子松幼树的高生长。这和人前人有关沙埋对无芒雀麦(杨慧玲等,2007)、柠条(聂春雷和郑元润,2005)株高影响的研究结果一致。但是,各沙埋深度下樟子松幼树的地上生物量除 50% 沙埋的茎枝生物量外,其他深度沙埋下的叶片生物量和全株生物量均显著下降,说明沙埋对樟子松幼树生物量积累有明显危害。这和其他人对柠条(聂春雷和郑元润,2005)、无芒雀麦(杨慧玲等,2007)有关沙埋对生物量影响的研究结果相反。这说明,受到沙埋胁迫后樟子松幼树只是为了适应沙埋胁迫而将更多物质能量转移至高生长,以避免被流沙埋没,而体内物质的积累速度不但没有增加反而下降(赵哈林,2013)。

研究表明,樟子松幼树的光合水分代谢对沙埋反应强烈。其中,部分沙埋和浅层全埋(株高以上 2 cm),其光合速率、蒸腾速率和气孔导度均明显增加,并以 50% 沙埋光合速率、蒸腾速率、气孔导度增加幅度最大。这说明,一定程度的沙埋可以增加樟子松幼树叶片气孔的开张程度,促进其光合水分代谢速率,其胞间 CO_2 浓度随沙埋深度增加而增加也证实了这一点。但是,随沙埋深度增加其水分利用效率持续下降,说明沙埋对蒸腾速率的影响要大于光合速率,导致植物水分利用效率降低。这些结果与植物受到干旱、盐碱、高温胁迫后的光合水分代谢响应有很大不同。例如,干旱胁迫下,梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)均表现出光合速率(P_n)下降现象,光系统 II 光化学效率降低,表现为光抑制(苏培玺和严巧娣,2006),而臭柏(*Sabina vulgar*)在干旱胁迫下气孔迅速地关闭,蒸腾速率降低(温国胜等,2003)。盐碱胁迫下,羊草光合速率和蒸腾速率均有所下降,水分利用效率则有所升高(黄立华等,2009)。高温胁迫下,胡杨(*Populus euphratica*)光合速率和气孔导度明显减少,但胞间 CO_2 浓度并未随着净光合速率和气孔导度的下降而减少(陈亚鹏等,2009)。它们之间之所以存在显著差异,一方面可能是受到的胁迫形式有很大差别,干旱、盐碱、高温环境条件下,植物通常受到的是水分胁迫,水分亏缺导致植物光合速率和蒸腾速率下降,植物不得不在低水分供给情况下进行光合作用,因而提高了水分利用效率(温国胜等,2003;苏培玺和严巧娣,2006;陈亚鹏等,2009;

黄立华等,2009),而沙埋通常可以增加植物根系层土壤含水量,因而不会导致植物水分亏缺(Maun & Lapierre 1984;王进等,2012)。本研究中,各沙埋处理下樟子松幼树茎叶含水量没有明显变化证实了这一点;另一方面沙埋可以缩短叶片与沙面的距离,甚至直接接触沙面,由于沙面温度很高,近距离接触会引起植物叶片温度升高,导致植物蒸腾速率增加幅度大于光合速率增加幅度,水分利用效率降低(赵哈林,2013;赵哈林等,2014)。

相关分析表明,沙埋胁迫下,樟子松幼树株高的变化明显受制于茎枝生物量、光合蒸腾速率、植物含水量的变化,茎枝生物量的增长,植物体内含水量的增加,以及光合蒸腾速率的加剧,均对其高生长有利。研究还表明,气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率的增加均有利于植物的光合作用,而气孔导度的开闭程度、胞间 CO_2 浓度的多少和光合作用强弱,也直接影响蒸腾速率的快慢(陈亚鹏等,2009;黄立华等,2009)。较多的植物含水量、较大的气孔导度和较强的蒸腾速率均有利于增加植物的水分利用效率(温国胜等,2003;苏培玺和严巧娣,2006)。这说明,沙埋胁迫下,植物不得不通过加快顶芽生长而提高植株高度,以避免被沙埋没(赵哈林,2013)。虽然,沙埋胁迫下光合速率增加,但蒸腾速率增加更快,从而降低了水分利用效率,也降低了干物质积累速率。

4 结 论

通过以上分析和讨论,得到几点结论:1)樟子松幼树耐受沙埋的能力为其株高以上 2 cm,沙埋超过该深度其幼苗全部死亡;低于株高 2 cm 的沙埋有利于促进樟子松幼树的高生长,但不利于其地上生物量的积累;2)沙埋可以导致樟子松幼树的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度显著增加,其中以 50% 沙埋的光合速率、蒸腾速率、气孔导度的增加幅度最大,以株高以上 2 cm 沙埋胞间 CO_2 浓度增加的幅度最大;3)沙埋并不造成樟子松幼树水分胁迫,但随着沙埋深度的增加植物水分利用效率趋于下降,沙埋胁迫下植物蒸腾速率增加幅度大于光合速率增加幅度是导致其水分利用效率下降的主要原因;4)其幼树高生长明显与其光合速率、蒸腾速率正相关,光合蒸腾速率与气孔导度、胞间 CO_2 浓度呈正相关关系,水分利用效率与植物含水量、蒸腾速率呈显著正相关关系。

参考文献

- 白玉娥,郭连生,田有亮. 1999. 土壤养分对樟子松和云杉耐旱生理指标影响的研究. 内蒙古林学院学报, **21**(3): 6-10.
- 陈亚鹏,陈亚宁,李卫红,等. 2009. 干旱环境下高温对胡杨光合作用的影响. 中国沙漠, **29**(3): 474-479.
- 何玉惠,赵哈林,赵学勇,等. 2008. 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, **31**(5): 701-706.
- 黄立华,梁正伟,马红媛. 2009. 苏打盐碱胁迫对羊草光合、蒸腾速率及水分利用效率的影响. 草业学报, **18**(5): 25-30.
- 焦树仁. 2010. 樟子松沙地造林技术综述. 防护林科技, (6): 52-54.
- 李宏印,刘明国. 2003. 樟子松人工固沙林发展现状. 辽宁林业科技, (5): 35-39.
- 李秋艳,赵文智. 2006. 五种荒漠植物幼苗出土及生长对沙埋深度的响应. 生态学报, **26**(6): 1802-1809.
- 李文婷,张超,王飞,等. 2010. 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. 生态学报, **30**(5): 1192-1199.
- 刘凤红,叶学华,于飞海,等. 2006. 毛乌素沙地游击型克隆半灌木羊柴对局部沙埋的反应. 植物生态学报, **30**(2): 278-285.
- 刘新民,赵哈林,赵爱芬. 1996. 科尔沁沙地风沙环境与植被. 北京: 科学出版社.
- 马红媛,梁正伟,闫超,等. 2007. 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, **26**(12): 2003-2007.
- 米志英,周丹丹,吴亚东. 2005. 风蚀沙埋对沙柳形态特征的影响. 内蒙古林业科技, (1): 9-13.
- 聂春雷,郑元润. 2005. 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对响应. 植物生态学报, **29**(1): 32-41.
- 苏培玺,严巧娣. 2006. C4荒漠植物梭梭和沙拐枣在不同水分条件下的光合作用特征. 生态学报, **26**(1): 75-82.
- 王进,周瑞莲,赵哈林,等. 2012. 海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策. 生态学报, **32**(14): 4291-4299.
- 温国胜,张国盛,张明如,等. 2003. 干旱胁迫条件下臭柏的气孔蒸腾与角质层蒸腾. 浙江林学院学报, **20**(3): 268-272.
- 徐斌,刘杏娥,孙主义,等. 2005. 长江滩地沙埋杨树木材解剖性质及其变异的研究. 林业科学研究, **18**(6): 738-742.
- 杨慧玲,曹志平,董鸣,等. 2007. 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, **18**(11): 2438-2443.
- 于海燕,张明铁. 2009. 不同小生境下樟子松、油松生长状况的研究. 现代农业科技, (10): 12-14.
- 赵哈林,何玉惠,岳广阳,等. 2010. 风吹沙埋对沙地植物幼苗生长和光合蒸腾特性的影响及响应机制. 生态学杂志, **29**(3): 413-419.
- 赵哈林,曲浩,周瑞莲,等. 2014. 沙埋对两种灌木生长影响及其生理响应差异. 草业学报, **23**(1): 185-191.
- 赵哈林. 2013. 沙漠生态学. 北京: 科学出版社.
- 赵丽娅,赵锦慧,李锋瑞. 2006. 沙埋对几种沙生植物种子萌发和幼苗的影响. 湖北大学学报: 自然科学版, **28**(2): 192-196.
- 赵文智,刘志民. 2002. 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, **22**(1): 134-139.
- 赵兴梁,李万英. 1961. 樟子松. 北京: 农业出版社.
- 郑鑫. 2011. 不同类型樟子松林分土壤养分空间变异性的初步研究. 防护林科技, (5): 33-35.
- 朱教君,曾德慧,康宏樟. 2005. 沙地樟子松人工林衰退机制. 北京: 中国林业出版社.
- 朱雅娟,董鸣,黄振英. 2005. 沙埋和种子大小对固沙禾草沙鞭的种子萌发与幼苗出土的影响. 植物生态学报, **29**(5): 730-739.
- Benvenuti S, Macchia M, Miele S. 2001. Light, temperature and burial depth effects on *Rumex obtusifolius* seed germination and emergence. *Weed Research*, **41**: 177-186.
- Harris D, Davy AJ. 1988. Carbon and nutrient allocation in *Elymus farctus* seedlings after burial with sand. *Annals of Botany*, **61**: 147-157.
- Harris D, Davy AJ. 1987. Seedling growth in *Elymus farctus* after episodes of burial with sand. *Annals of Botany*, **60**: 587-593.
- Maun MA, Lapierre J. 1984. The effects of burial by sand on *Ammophila breviligulata*. *Journal of Ecology*, **72**: 827-839.
- Maun MA. 1996. The effects of burial by sand on survival and growth of *Calamovilfa longifolia*. *Ecoscience*, **3**: 93-100.
- Shi L, Zhang ZJ, Zhang CY. 2004. Effects of sand burial on survival, growth, gas exchange and biomass allocation of *Ulmus pumila* seedlings in the Hunshandak Sandland, China. *Annals of Botany*, **94**: 553-560.

作者简介 赵哈林,男,1954年生,研究员,博导,主要从事荒漠生态学研究。E-mail: resdiv@lzb.ac.cn
责任编辑 张敏