

水分胁迫对不同年龄沙地樟子松幼苗 存活与光合特性影响

朱教君^{1, 3}, 康宏樟^{1, 3}, 李智辉², 王国臣⁴, 张日升⁴

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 沈阳农业大学林学院, 沈阳 110161;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 4. 辽宁省固沙造林研究所, 阜新 123000)

摘要:樟子松以其抗寒、抗旱和速生性,自 20 世纪 50 年代在科尔沁沙地南缘人工引种用于固沙造林试验成功以来,已成为我国北方荒漠化地区防风固沙造林的首选树种。然而,进入 20 世纪 90 年代以来,早期引种的沙地樟子松人工林出现了衰退现象;虽然从理论上分析,原因可能有病虫害、地理位置、水分条件、营林技术等,但其中水分条件应该是沙地樟子松人工林提早衰退的最重要的原因之一。以 1~5 年生樟子松幼苗为材料,采用盆栽控水处理法对苗木进行水分胁迫试验,观测水分胁迫条件下樟子松苗木成活与光合特征及其水分利用效率的变化。结果表明,樟子松苗木成活的临界土壤含水率随苗龄的变化没有显著差异,1~5 年生苗木成活的临界土壤含水率均在 1.5%~1.8% 之间。4 种不同水分胁迫处理(对照、20%、30% 和 40% 田间持水量)对光合特性的影响为:轻度胁迫(40% 田间持水量)时对光合特性的各个指标影响不大;随胁迫程度加重,光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率逐渐降低;导致樟子松苗木光合速率降低的主要原因应是气孔因素,即在水分胁迫下,气孔的开张度减小,导致胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率下降,进而影响光合速率;另外,水作为光合作用的原料之一,当其供应不足时,也直接导致光合速率的降低。2 年生、4 年生的樟子松幼苗在相同的土壤干旱胁迫条件下,各生理指标比较接近,即生理指标与苗龄之间并没有表现出明显区别。樟子松苗木的水分利用效率在较重度胁迫(20% 田间持水量,3.5%)条件下没有降低,而在轻度胁迫条件下,水分利用效率有升高趋势;表明樟子松在较低的土壤含水量条件下,具有忍耐一定干旱胁迫的能力。综合研究表明:樟子松只有在极度水分胁迫时(土壤含水率接近成活的临界土壤含水率值;对于 1~5 年生苗木约为 1.7%)才会出现死亡,这对研究水分与樟子松人工林衰退关系具有参考价值。

关键词:水分胁迫;沙地;樟子松;存活;光合作用;水分利用率
文章编号:1000-0933(2005)10-2527-07 中图分类号:Q945.1,S718 文献标识码:A

Impact of water stress on survival and photosynthesis of Mongolian pine seedlings on sandy land

ZHU Jiao-Jun^{1,3}, KANG Hong-Zhang^{1,3}, LI Zhi-Hui², WANG Guo-Chen⁴, ZHANG Ri-Sheng⁴ (1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Forestry College, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China; 4. Institute of Sand Fixation and Silviculture, Liaoning Province, Fuxin 123000, China). *Acta Ecologica Sinica*. 2005, 25(10): 2527~2533.

Abstract: Mongolian pine (*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv.) is one of the key tree species in plantation establishment. Due to well adapted nature for drought condition, it has been broadly introduced on sandy land in “Three North” regions of China (north, northwest and northeast). Since environmental conditions of sandy land ecosystems are not very favorable for all

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-418);辽宁省自然科学基金资助项目(2002110016)
收稿日期:2004-07-02; **修订日期:**2005-01-20
作者简介:朱教君(1965~),男,博士,研究员,主要从事防护林生态与管理,森林生态与经营研究. E-mail: jiaojunzhu@iae.ac.cn, zrms29@yahoo.com

Foundation item: The Innovation Research Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX3-SW-418); Natural Science Foundation of Liaoning Province, China (No. 2002110016)

Received date: 2004-07-02; **Accepted date:** 2005-01-20

Biography: ZHU Jiao-Jun, Ph. D., Professor, mainly engaged in protective plantation ecology and management, forest ecology and management. E-mail: jiaojunzhu@iae.ac.cn, zrms29@yahoo.com

kind of vegetation development due to poor water holding capacity and less soil moisture level in the soil; such a problem as a rapid decline has occurred in the earliest Mongolian pine plantations on Keerqin sandy land located at Zhangwu county, Liaoning province, northeastern China. In order to examine the effects of water stress on survival and rate of photosynthesis for Mongolian pine seedlings, we established an experiment on sandy land. We measured the drought tolerance characteristics and the responses of water stress levels on the photosynthetic efficiency of Mongolian pine seedlings at different ages. Results indicated that the threshold value of soil water content for Mongolian pine seedling survival ranged from 1.5 to 1.8% (8.6 to 10.3% of the field capacity). However, these values were not significantly different among seedling ages. In the controlled environment study, there were three watering regimes which were watered at various levels of soil water content, i.e., 40, 30 and 20% field capacity, respectively. The instantaneous photosynthesis rate (IPR) in response to water stress showed that IPR decreased with increasing level of water stress. The stress of 40% field capacity did not influence IPR of the seedlings. The physiological variables of stomatal conductance, CO₂ concentration inside the cell and transpiration rate showed a same tendency to IPR under the water stress. These results may be explained by the changes in stomatal conductance induced by soil water depletion. In addition, as the material of photosynthesis, when water is not sufficient, IPR also decreased. Therefore, there were no significant differences on IPR and physiological variables between 2-year old seedlings and 4-year old seedlings under different water stress. However, the water-use efficiency (WUE) of seedlings was not substantially influenced under the stress of 40% field capacity, while increased under the water stresses of 30% and 20% field capacity, respectively. This result evidently indicated that Mongolian pine is a drought tolerance, hardy species in nature; as well as exhibited saving water-use strategy in a sandy land ecosystem.

Key words: water stress; sandy land; Mongolian pine/*Pinus sylvestris* var. *mongolica*; survival; photosynthesis; water use efficiency

樟子松(*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv.) 以其抗寒、抗旱、较速生的优良特性,自 1955 年在科尔沁沙地南缘(N42°39.7',E122°33.6')人工引种用于固沙造林试验成功以来,已成为我国北方荒漠化地区防风固沙造林的首选树种^[1]。我国三北 12 省区 300 多个县引种樟子松成功,造林面积逐年增加。然而,近十几年来最先引种的沙地樟子松人工林(科尔沁沙地南缘的辽宁省彰武县章古台)出现了叶枝变黄,进而全树枯死的现象;辽宁省 3.8×10⁵ hm² 沙地樟子松人工林已有 65.8%的林木受害。传统的樟子松造林选择只注重存活和生长指标,而对樟子松的抗性指标缺乏研究,导致沙地大规模造林缺乏合理配置,林分抗逆性及稳定性下降^[2]。引种的沙地樟子松人工林自第 1 代就出现了衰退现象,虽然从理论上分析,原因可能有病虫害、地理位置、水分条件、营林技术等^[2],但其中的水分条件应该是沙地樟子松人工林提早衰退的最重要的原因之一^[1,3]。

关于樟子松水分生理的研究较多^[4~9],主要结论认为,樟子松是一个耐干旱、耐贫瘠的强阳性树种,适于中国“三北”(东北、华北和西北)地区各类土壤(除重度盐碱土外)人工栽培,而且生长也良好^[10],尤其是防护林体系建设适宜采用的一个理想造林树种。一般认为,水分胁迫对树木生长和代谢的影响是多方面的,其中对光合作用的影响尤为重要。本文对沙地樟子松苗木受水分胁迫下的存活与光合作用反应特性进行研究,试图通过了解樟子松苗木成活对土壤含水量变化的反应及樟子松苗木的水分利用、消耗状况,找出引起沙地樟子松人工林衰退产生的可能与水分相关的机制,同时,为指导干旱地区樟子松人工林发展方向提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与环境

试验材料选自辽宁省阜新市彰武县章古台镇(N42°39.7',E122°33.6')1~5 年生樟子松苗木。这里是我国最早从原产地引种沙地樟子松造林区(沙地樟子松原产地:内蒙古自治区呼伦贝尔市红花尔基,N47°35'~48°36',E118°58'~120°32')。试材 1~5 年生樟子松苗木各 100~200 株于 2003 年 4 月 2 日从章古台起苗运至沈阳农业大学植物园(试验用土壤取自苗木产地)。

试验设于沈阳农业大学植物园内的可开放式温室,无雨时温室全部开放,温室条件与外界基本一致;当有雨时,将温室可控部分放下,使被试苗木不被雨浇。将 1~5 年生樟子松苗木分别移栽于直径 20cm、高 22cm (1~2 年生),直径 25cm、高 30cm (3 年生),直径 35cm、高 40cm (4~5 年生)的塑料盆中;1~3 年生每盆定植 2 株,4~5 年生每盆定植 1 株;在自然状态下生长 3 个月(苗木已恢复正常生长),将苗木转移至开放式温室,进行水分胁迫处理。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 水分胁迫对沙地樟子松幼苗存活影响 试验 2003 年 7 月 15 日至 9 月 16 日完成,试验之初选取生长相对一致的正常苗木为试验材料,各年龄组选取试验苗木 16 盆(1~3 年生每年龄组 32 株,4~5 年生每年龄组 16 株)。干旱胁迫处理前将苗木

充分浇水 3d 后,停止供水(初步估计土壤含水量),使其自然失水。

从自然干燥第 1 天起,每天 16:00 以后,使用天平(ES10K-1,沈阳天平仪器有限公司,量程 10000g,精确度 0.1g)称量盆栽幼苗及土壤重量,并粗略估算当天的土壤含水量。当土壤明显干旱、苗木叶色变浅(土壤含水量接近凋萎含水量时),视天气的阴晴对试验苗木进行复水,每隔 1~2d 复水 2~3 盆。苗木自复水后,不再进行称重观测,按正常苗木进行浇水管理。试验结束后,统计死亡株数,将所有试验苗木、盆及其内的土壤进行称重,精确计算试验开始后至复水时每天的土壤含水率(式 1)。

$$R_{si} = [(W_{ti} - W_p - W_{ws} - W_{ds}) / W_{ds}] \times 100\%$$

(1)

式中, R_{si} 为自然干燥第 i 天土壤含水率(%), W_{ti} 为每天称得的盆栽试验苗木、土壤与塑料盆的总重量(g), W_p 为塑料盆的重量(g), W_{ws} 为试验结束时苗木的湿重(g)(苗木在控水期间的生长没有考虑), W_{ds} 为试验结束盆中土壤的干重(g)。

1.2.2 水分胁迫对樟子松幼苗光合特性影响 选择 2 年生和 4 年生樟子松苗木,设置 4 个水平,每个水平重复 5 次(5 株苗木)进行土壤含水量控制。土壤含水量以田间持水量为基准,分别设置为田间持水量的 40%±2.5%、30%±2.5%、20%±2.5%和对照(每 2~3d 浇 1 次透水,含水量约在 15%左右)。田间持水量采用环刀法于试验地取样测得^[11]为 17.52%。因此,试验设定的 3 个土壤水分含量和 1 个对照分别为:6.57%~7.45%(7.00%)、4.82%~5.69%(5.26%)、3.24%~3.94%(3.50%)和对照(土壤含水量保持在 10.00%以上)。

土壤含水量采用天平称重法来控制,即在对苗木停止供水后的第 2 天起,每天 16:00 用管型取样器取苗木盆中的土壤测定含水量变化情况^[12],以确定停水后各处理达到试验设计要求的土壤含水量。取样时尽量靠近盆的中央区,每盆取样 3 个,测定土壤含水量并取其平均值;当土壤含水量达到设定值时,用 ES10K-1 天平称重量(W_{ic}),之后每天 16:00 称量盆、苗木及土壤总重量(W_{it}),由于苗木蒸腾、蒸发及土壤蒸发,使土壤含水量降低,因此,每天需对供试苗木盆中补充水分,补充水分量(W_{tm})由(2)式确定:

$$W_{tm} = W_{it} - W_{ic}$$

(2)

如果 $W_{it}=W_{ic}$,则不必补水。

光合特性指标测定在控水后的 7~10d 开始进行,采用 Li-6400P 便携式光合测定分析仪(USA,LI-COR),测定苗木在不同水分胁迫条件下的光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度等光合特性指标。测定于 2003 年 8 月中旬至 10 月中旬于室温下进行,测定时间为每天 10:30 开始至 12:00,试验期间温度 22~25℃,相对湿度为 75%~85%^[13,14]。

樟子松苗木叶面积采用排水体积法测定(3 式)^[15]:

$$A_L = 2L(1 + \pi/n) \sqrt{(nV/\pi L)}$$

(3)

式中, A_L 为叶面积(cm²), L 为针叶长度(cm), n 为每束针叶的根数,樟子松 $n=2$, V 为针叶体积(cm³)。

具体测定:从叶鞘基部切取针束试样,用松针将针叶束捆绑扎置入 10ml 的量筒中(量筒内预先注入 7ml 水),用移液管移出放进松针后增加的水量,使量筒中的水仍保持在 7ml,则移出的水量即为其排水体积, V 精确度至 0.01ml。

2 结果分析

2.1 干旱胁迫对樟子松幼苗存活影响

当土壤含水量减少到某一临界值时,樟子松苗木即会死亡,此时土壤的含水率对于沙地人工造林及树木能否成活、生长具有十分重要的参考价值。经一个生长季观测,土壤含水量随停止浇水日数的增加而逐渐降低。由于针叶树的死亡与否在停止浇水后的相当长一段时间内很难判断,因此,试验过程中,在复水前测定土壤含水量,复水后通过观察苗木的成活情况判断干旱胁迫对樟子松幼苗存活影响。不同复水日期土壤含水量与苗木成活试验结果如图 1。当土壤含水量低到一定程度后,即使再复水樟子松苗木也无法成活(图 1 空心点所指示的苗木)。各年龄死亡苗木的最高土壤含水量表明,樟子松苗木死亡的临界土壤含水率随苗木的年龄增加有逐渐减少的趋势,樟子松苗木死亡或成活的临界土壤含水率在 1.3%~1.8%之间,年龄越大,临界土壤含水率越低;1~5 年生樟子松苗木的死亡临界土壤含水率分别为 1.76%、1.64%、1.39%、1.38%和 1.29%(图 2)。

苗木死亡的临界土壤含水率随苗龄降低的主要原因是由于随年龄的增加,苗木木质化程度增高,抵抗干旱胁迫的能力增强^[16,17]。土壤含水量与苗木含水量的相互关系即可印证这一点(图 3);1 年生樟子松苗木的水分在自然状态下容易失掉,因而即使土壤含水量较高,苗木的含水量也不随之增加;随着苗龄的增加,苗木持水力逐渐增强^[4,18,19],苗木含水量随土壤含水量增加呈对数增加的趋势越稳定。另外,死亡苗木的最高含水量亦表现出 3~5 年生苗木低于 1~2 年苗木(图 4)。但各年龄苗木死亡的临界土壤含水率平均值经统计检验没有显著差异($p<0.05$)。

2.2 干旱胁迫对樟子松幼苗光合特性影响

2.2.1 干旱胁迫对光合速率的影响 随着土壤干旱胁迫的增加,樟子松幼苗的光合速率呈明显的稳定下降的趋势,2 年生、4 年生苗木几乎没有差别。从光合速率下降的速度看,当土壤含水量大于 30%田间持水量时,光合速率下降的幅度不大,而当土

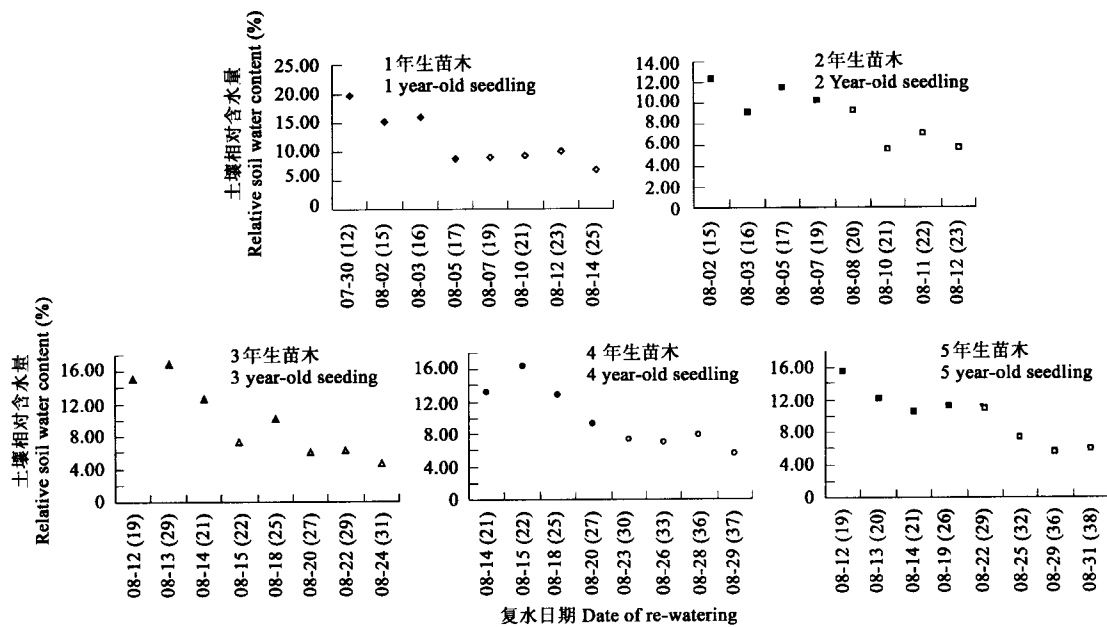


图 1 控水开始后第 1 次复水时土壤含水量

Fig. 1 Soil water content at the time of re-watering after stopping watering

仅列出苗木死亡前后时的土壤含水量 the figure showed the data obtained from the seedlings around before and after death, 横坐标括弧中数字为自停止浇水起的天数 data in the bracket of X-axis represents the days since stopping watering

壤含水量小于 30%田间持水量时, 光合速率下降的很快(图 5a)。这一结果表明, 土壤含水量大于 30%田间持水量(土壤含水量约 5%)时, 对于樟子松苗木尚未达到严重干旱胁迫水平。许多树种在受到轻度水分胁迫时, 一般不影响光合速率, 适度的干旱对光合有一定促进作用; 但随着干旱胁迫的加重, 树木叶水势下降并达到一定数值时光合速率迅速下降, 不同树种光合作用开始下降时的叶水势阈值不同^[20]。

2.2.2 干旱胁迫对气孔导度的影响 气孔是植物叶片与外界进行气体交换的门户, 气孔导度的变化对植物水分状况及 CO₂ 同化有着重要影响, 气孔导度增大, 蒸腾快, 反之, 蒸腾减弱。随叶片水分散失和水势的下降, 气孔导度减小, CO₂ 进入叶片细胞内的阻力增加, 从而导致光合速率下降; 同时气孔阻力的增加也减少叶片水分散失, 在一定程度上阻碍水分亏缺的发展, 减轻干旱胁迫对光合器官的伤害^[21]。试验结果表明, 在水分胁迫下, 苗木气孔导度随之下降。但胁迫强度不同, 气孔导度下降幅度不同。如 2 年生樟子松幼苗土壤含水量从对照(接近 10%以上)降至 40%田间持水量时, 下降的幅度较小, 平均下降了 17.4%, 当土壤含水量下降为 20%时, 气孔导度大幅度下降, 下降了 78.1%(图 5b)。

2.2.3 干旱胁迫对胞间 CO₂ 浓度的影响 2 年生、4 年生樟子松幼苗的胞间 CO₂ 浓度在不同土壤含水量条件下呈下降的趋势。在土壤相对含水量(以田间持水量为参照)为 30%以上时, 胞间 CO₂ 浓度下降的幅度并不是很大, 而当土壤相对含水量降到 30%以下时, 樟子松幼苗的胞间 CO₂ 浓度下降速度加快。这种变化趋势和光合速率的变化趋势相似, 而且和光合速率的变化基本平行(图 5c)。由此可知, 在土壤干旱胁迫条件下, 樟子松的气孔关闭, 造成了进入气孔内的 CO₂ 减少, 同时减弱了叶子的蒸腾作用; 进一步影响了光合作用以及苗木的其他的生理活动, 即樟子松的光合速率下降主要是气孔限制的过程^[22]。

2.2.4 干旱胁迫对蒸腾速率的影响 蒸腾速率的变化在干旱胁迫下, 亦呈现出与光合速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度相似的变化趋势(图 5d)。2 年生和 4 年生樟子松幼苗的蒸腾速率在土壤干旱条件下呈明显的稳定下降趋势; 但是在变化速度上有所不同, 即在土壤相对含水量为 30%以上时, 蒸腾速率下降的幅度较小, 之后蒸腾速率下降速度较大。

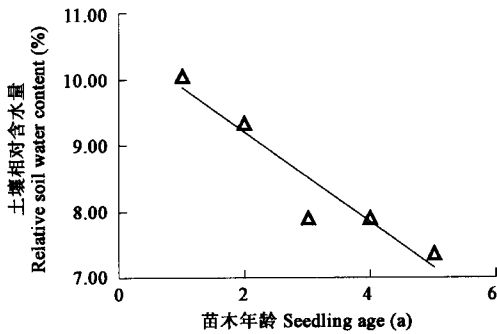


图 2 死亡苗木的最高土壤含水率

Fig. 2 The maximum values of soil water content among the died seedlings

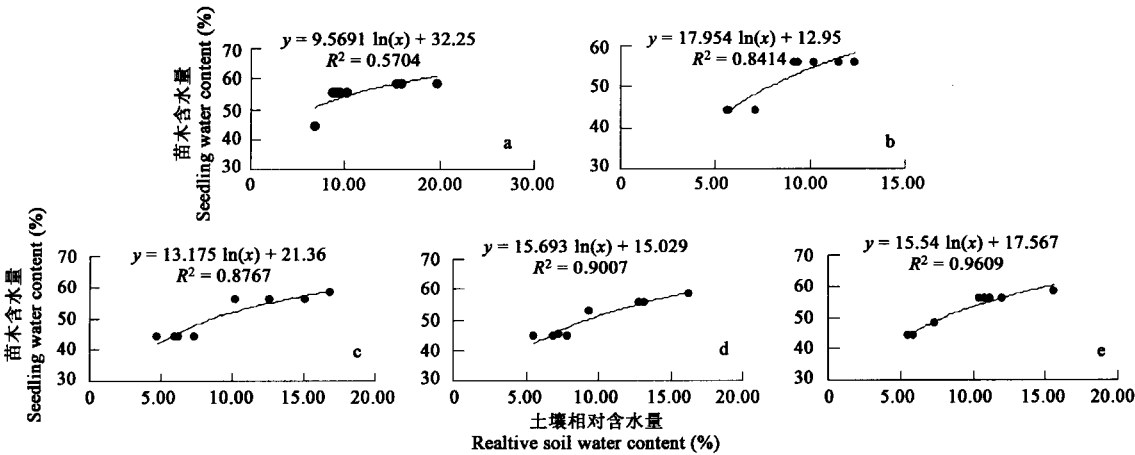


图 3 苗木复水时土壤含水量与苗木含水量的关系

Fig. 3 Relationship between soil water content and seedling water content at the time of re-watering

a; 1 年生 1-year seedling; b; 2 年生 2-year seedling; c; 3 年生 3-year seedling; d; 4 年生 4-year seedling; e; 5 年生 5-year seedling

2.2.5 干旱胁迫对水分利用效率的影响 植物水分利用效率是衡量植物水分消耗与物质生产之间关系的重要综合性指标,其计算方法包括 CO_2 交换速率与蒸腾速率之比、干物质积累量与蒸腾失水量之比以及干物质积累量与蒸散失水量之比等^[20,23]。樟子松幼苗在土壤相对含水量从对照降低到 30% 左右时,苗木的水分利用效率几乎没有变化;当土壤的相对含水量进一步下降到 20% 左右时,水分利用效率有所上升(图 5e),这表明樟子松在受到土壤水分胁迫时,具有相当的抵抗干旱的能力。

3 结论与讨论

土壤控水试验结果表明,土壤含水量随停止浇水日数的增加而逐渐降低,当土壤含水量低到一定程度后,即使再复水樟子松苗木也无法成活,1~5 年生樟子松苗木的死亡临界土壤含水率分别为 1.76%、1.64%、1.39%、1.38% 和 1.29% (相当于田间持水量的 10.0%, 9.4%, 7.9%, 7.9%, 7.4%),随着苗龄增加,苗木持水力增强;但各年龄苗木死亡的临界土壤含水率平均值却没有显著差异($p < 0.05$)。因此根据已有研究结果^[24]可以推断 >5 年生樟子松死亡的临界土壤含水率应约在 1.5% 左右。

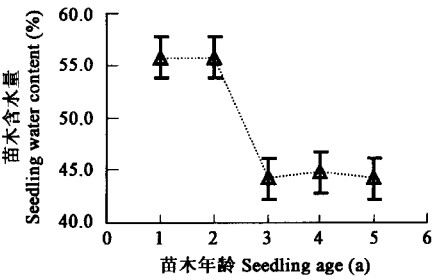


图 4 死亡苗木的最高含水率

Fig. 4 The maximum values of seedling water content among the died seedlings

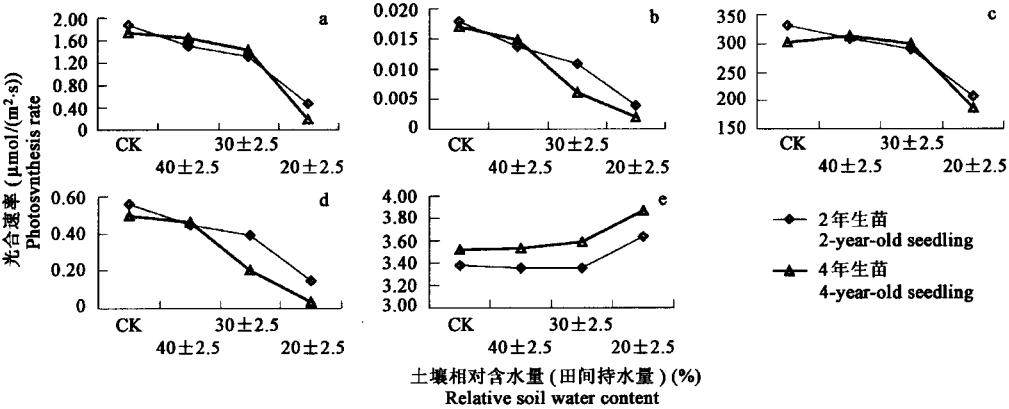


图 5 2 年生、4 年生樟子松幼苗的光合特性对干旱胁迫的响应

Fig. 5 Response of Mongolian pine seedlings to water stresses

a; 光合速率 Net photosynthesis rate; b; 气孔导度 Stomatal conductance; c; 胞间 CO_2 浓度 CO_2 concentration inside the cell; d; 蒸腾速率 Transpiration rate; e; 水分利用效率 Water-use efficiency

一般认为,气孔导度是影响植物光合速率的主要因素之一^[18, 21, 22],本次试验结果表明,在土壤干旱胁迫条件下,樟子松的光合速率逐渐降低,其它指标如蒸腾速率、气孔导度以及胞间 CO₂ 浓度均表现出与光合速率相似的趋势。这是因为在水分胁迫条件下,气孔的导度减小,导致胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率下降,进而影响光合速率;另外,水作为光合作用的原料之一,当其供应不足时,也直接导致光合速率的降低。当水分胁迫在 30% 田间持水量以上时,樟子松水分利用效率有所升高,这表明樟子松在较低的土壤含水量条件下,具有忍耐干旱胁迫的能力。试验结果还证明了 2 年生和 4 年生的樟子松幼苗在相同的土壤干旱胁迫条件下,各生理指标比较接近,即生理指标与苗龄之间并没有体现出明显区别或有规律性的变化。综上试验结果,由于樟子松水分利用效率受水分胁迫的影响变化较小,因此,只有在极度水分胁迫时(土壤含水率接近成活的临界土壤含水率值;对于 1~5 生苗木平均约为 1.7%)才会出现死亡。根据以往研究观测结果^[25, 26],沙地樟子松人工林土壤含水量(0~50cm,林龄约 30a,密度约 2000 株/hm²)在 5~9 月份大多数时间内均高于本次试验苗木死亡时土壤含水量临界值,即目前沙地樟子松林地的水分含量不会直接导致樟子松死亡;但 5~9 月份沙地樟子松人工林土壤含水量在绝大部分时间却低于本次试验樟子松苗木光合受到严重胁迫时的土壤含水量^[25];因此,仅从土壤水分角度推断,沙地樟子松衰退可能是由于土壤水分亏缺,导致光合等生理变化而产生的。这对进一步研究水分与沙地樟子松人工林衰退关系具有参考价值。

References:

- [1] Zhu J J, Fan Z P, Zeng D H, *et al.* Comparison of stand structure and growth between plantation and natural forests of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land. *Journal Forestry Research*, 2003, **14**: 103~111.
- [2] Jiao S R. Report on the causes of the early decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* shelterbelt and its preventative and control measures in Zhanggutai of Liaoning Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, **37**: 131~138.
- [3] Zeng D H, Jiang F Q, Fan Z P, *et al.* Study on the stability of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) plantation in sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, **7**: 337~343.
- [4] Chang X L, Zhao W Z. Study on moisture physiology of *Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv. and *Populus simonii* Carr. and water condition of woodland. *Journal of Desert Research*, 1990, **10**: 18~24.
- [5] Mu T M, Chu G J, Liu T Y. Silvicultural techniques for preventing physiological droughtness of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Scientia Silvae Sinicae*, 1990, **26**: 294~300.
- [6] Meng G, Ao T C, Zhang L, *et al.* Analysis on drought resistance of Mongolian-Scotch pine on sandy land. *Journal of Northeast Forestry University*, 1991, **19**: 11~16.
- [7] Zhao Y S, Jiao Z J, Wang W Z. Transpiration intensity of Mongolian-Scotch pine plantation. *Journal of Northeast Forestry University*, 1991, **19**: 113~118.
- [8] Zhu M Y, Tian Y L, Guo L S. Variation of drought-enduring characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* under different climatic moisture. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, **7**: 250~254.
- [9] Wang L C, Han S J, Huang M R. The ABA Chang and Physiological Responses of *Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv. to water shortage. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, **29**: 40~43.
- [10] Kang H Z, Zhu J J, Li Z H, *et al.* Natural distribution of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land and its cultivation as an exotic species. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, **23**: 89~94.
- [11] Wei M R. Method for measuring soil physical properties using one-time sampling soil. *Journal of Liaoning Forestry Science and Technology*, 1990, **49** (1): 56~57.
- [12] Fan W G, Liu G Q, He S T, *et al.* Physiological response to soil drought stress in *Rosa roxburghii*. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, **35**: 1243~1248.
- [13] Chen Y, Xie Y F, Shen H J. Physiological response to the different levels of water stress in seedlings of *Ginkgo biloba*. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2002, **26**: 55~58.
- [14] Jin S, Zhou X F, Fan J. Modeling daily photosynthesis of nine major tree species in northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2003, **184**: 125~140.
- [15] Johnson. A rapid technique for estimating total surface area of pine needles. *Forest Science*, 1984, **30**: 913~921.
- [16] Jobidon R, Charette L, Bernier P Y. Initial size and competing vegetation effects on water stress and growth of *Picea mariana* seedlings planted in three different environments. *Forest Ecology and Management*, 1998, **103**: 293~305.
- [17] Wang J R, Hawkins C D B, Letchford T. Photosynthesis, water and nitrogen use efficiencies of four paper birch (*Betula papyrifera*) populations grown under different soil moisture and nutrient regimes. *Forest Ecology and Management*, 1998, **112**: 233~244.
- [18] Chen K R and Wang Y Y. A study on physiological characteristics of drought resistance of *Pinus caribaea*. *Journal of Southwest Forestry*

College, 1997, **17**: 9~15.

[19] Li C Y and Wang K Y. Differences in drought responses of three contrasting *Eucalyptus microtheca* F. Muell. Populations. *Forest Ecology and Management*, 2003, **179**: 377~385.

[20] Cregg B M and Zhang J W. Physiology and morphology of *Pinus sylvestris* from diverse sources under cyclic drought stress. *Forest Ecology and Management*, 2001, **154**: 131~139.

[21] Guan Y X, Dai J Y, Lin Y. The photosynthetic stomatal and nonstomatal limitation of plant leaves under water stress. *Plant Physiology Communications*, 1995, **31**: 293~297.

[22] Xu D Q. Discussion on the photosynthetic stomatal and nonstomatal limitation. *Plant Physiology Communications*, 1997, **33**: 241~244.

[23] Abrahamson D A, Dougherty P M, Zarnoch S J. Hydrological components of a young loblolly pine plantation on a sandy soil with estimates of water use and loss. *Water Resources Research*, 1998, **34**: 3503~3513.

[24] Jiao S R. *Structures and functions of sand-fixation forest ecosystem in Zhanggutai*. Shenyang: Liaoning Science & Technology Press, 1989.

[25] Bai X F, Wang G C, Zhang R S, *et al.* Soil water dynamics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy lands in Zhanggutai areas. *Journal of Liaoning Forestry Science & Technology*, 2004, **29**(2): 11~13.

[26] Yang W B, Yang M, Ren J M. A preliminary study on water balance of soil under artificial forest and reasonable density of coniferous wood. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1992, **6**(4): 47~54.

参考文献:

[2] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰退的原因与防治措施. 林业科学, 2001, **37**: 131~138.

[3] 曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 等. 樟子松人工固沙林稳定性的研究. 应用生态学报, 1996, **7**: 337~343.

[4] 常学礼, 赵文智. 樟子松、小叶杨水分生理及林地水分状况的研究. 中国沙漠, 1990, **10**: 18~24.

[5] 穆天民, 初国君, 刘庭跃. 预防樟子松生理干旱造林技术的研究. 林业科学, 1990, **26**: 294~300.

[6] 孟根, 敖同成, 张林, 等. 沙地樟子松抗旱能力的分析. 东北林业大学学报, 1991, **19**: 11~16.

[7] 赵雨森, 焦振家, 王文章. 樟子松蒸腾强度的研究. 东北林业大学学报, 1991, **19**: 113~118.

[8] 朱美云, 田有亮, 郭连生. 不同气候湿度下樟子松耐旱生理特征的变化. 应用生态学报, 1996, **7**: 250~254.

[9] 王立臣, 韩士杰, 黄明茹. 干旱胁迫下沙地樟子松脱落酸变化及生理响应. 东北林业大学学报, 2001, **29**: 40~43.

[10] 康宏樟, 朱教君, 李智辉, 等. 沙地樟子松天然分布与引种栽培. 生态学杂志, 2004, **23**: 89~94.

[11] 卫茂荣. 一次取样连续测定土壤物理性质的方法. 辽宁林业科技, 1990, **49** (1): 56~57.

[12] 樊卫国, 刘国琴, 何蒿涛, 等. 刺梨对土壤干旱胁迫的生理响应. 中国农业科学, 2002, **35**: 1243~1248.

[13] 陈颖, 谢寅峰, 沈急娟. 银杏幼苗对水分胁迫的生理响应. 南京林业大学学报(自然科学版), 2002, **26**: 55~58.

[18] 陈坤荣, 王永义. 加勒比松耐旱性生理特征研究. 西南林学院学报, 1997, **17**(4): 9~15.

[21] 关义新, 戴俊英, 林艳. 水分胁迫下植物叶片光合的气孔和非气孔限制. 植物生理学通讯, 1995, **31**: 293~297.

[22] 许大全. 光合作用中气孔限制分析中的一些问题. 植物生理学通讯, 1997, **33**: 241~244.

[24] 焦树仁. 章古台固沙林生态系统的结构与功能. 辽宁科学技术出版社. 1989.

[25] 白雪峰, 王国晨, 张日升, 等. 章古台沙地樟子松人工林土壤水分动态研究. 沈阳: 辽宁林业科技, 2004, **29**(2): 11~13.

[26] 杨文斌, 杨明, 任建民. 樟子松等人工林土壤水分收支状况及其合理密度的初步研究. 干旱区资源与环境, 1992, **6**(4): 47~54.