

不同水分胁迫方式对沙地樟子松幼苗光合特性的影响

朱教君¹ 康宏樟^{1,2} 李智辉³

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所 2 中国科学院研究生院 3 沈阳农业大学林学院)

摘要:沙地樟子松引种栽培的成功已使该树种成为中国北方沙区人工造林的首选树种,但由于早期引种的沙地樟子松人工林出现了衰退现象,使得人们对在干旱、半干旱沙地进行大面积樟子松造林产生疑问.为进一步研究沙地樟子松人工林衰退问题,该文以2年生沙地樟子松幼苗为材料,采用盆栽控水和聚乙二醇(PEG)处理法对苗木进行水分胁迫试验,比较两种胁迫处理苗木的光合特性.结果表明,土壤水分胁迫与PEG模拟水分胁迫(处理1 h)对2年生樟子松幼苗光合生理特征及其水分利用效率影响基本一致;当土壤含水量为40%田间持水量时,沙地樟子松已表现出干旱胁迫,土壤含水量为20%田间持水量时胁迫达到最大.10%PEG处理对2年生樟子松幼苗光合生理指标影响与对照具有相同趋势,表明该处理未对苗木造成严重干旱胁迫.20%与30%PEG处理对樟子松幼苗光合指标影响的趋势相同,胁迫超过2 h后樟子松幼苗光合速率、气孔导度、蒸腾速率都降到较低值且相对稳定.土壤含水量为20%田间持水量的胁迫对樟子松幼苗的水分利用效率几乎没有影响,轻度(40%田间持水量)胁迫甚至增高了水分利用效率;PEG胁迫的前期(4 h之前),苗木的水分利用效率低于对照;在胁迫处理4 h后,20%与30%PEG处理的樟子松的水分利用效率均超过了对照.这表明樟子松在较低的土壤含水量下,具有忍耐、适应干旱胁迫的能力.另外,不同形式的强度胁迫处理(30%PEG和20%田间持水量)的各光合特征指标相对值之间没有差异,表明樟子松苗木在强度胁迫条件下各指标相对值已降至相当低的程度.3种PEG浓度(10%、20%、30%)干旱胁迫处理在2 h以内的各指标的相对值与3种土壤水分胁迫处理(40%、30%、20%田间持水量)基本一致,因此,可以认为2 h的PEG胁迫处理与土壤水分胁迫处理(7~10 d)具有相同的效果.

关键词:水分胁迫, 沙地, 樟子松, 光合作用, 聚乙二醇(PEG)

中图分类号:S791.253 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2006)02-0057-07

ZHU Jiao-jun¹; KANG Hong-zhang^{1,2}; LI Zhi-hui³. **Comparison of different types of drought stresses affecting photosynthesis of Mongolian pine seedlings on sandy soils.** *Journal of Beijing Forestry University* (2006)28(2) 57-63 [Ch, 23 ref.]

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 110016, Shenyang, P.R. China;

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 100039, Beijing, P.R. China;

3 Forestry College, Shenyang Agriculture University, 110161, Shenyang, P.R. China.

Mongolian pine (*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv.) is one of the most drought resistant tree species. It has been widely introduced on sandy soils in the northern region of China (north, northwest and northeast China) but a decline in forest growth and timber quality has occurred in the earliest Mongolian pine plantations on Keerqin sandy soils located at Zhanggutai, Liaoning Province. In order to study this decline problem, we carried out an experiment to examine the effects of the following two drought stresses: soil water (SW) stress and polyethylene glycol (PEG) stress, on photosynthesis of 2-year old Mongolian pine seedlings on sandy soils. As well, we tested the response of photosynthesis on different types of drought stresses. The results indicated no significant differences between the effects of SW and PEG stress, processed in 1 hr, on indices of instantaneous photosynthetic rates, stomatal conductance, transpiration rates and CO₂ concentration inside cells. When the soil water content was 40% of field water capacity, the seedlings started to become stressed and became heavily stressed at 20%. The cause of the stress was the change in stomatal conductance. The effects of PEG stress on photosynthetic indices showed the following characteristics: 1) a 10% PEG stress

收稿日期:2004-12-20

<http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(30371149)、中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX3-SW-418).

第一作者:朱教君, 博士, 研究员. 主要研究方向: 森林生态与经营、防护林生态与管理. 电话: 024-83970342 Email: jiaozhu@iae.ac.cn

地址: 110016 中国科学院沈阳应用生态研究所.

had the same effect on treated seedlings as on seedlings of the control group and there was less stress on the 2-year old seedlings; 2) 20% and 30% PEG stresses had the same effect and the values of instantaneous photosynthetic rates, stomatal conductance, transpiration rates and CO₂ concentrations inside cells were very low and stable after a 2 hr stress period. At 20% field water capacity there was a slight SW stress effect on water use efficiency (WUE) of the seedlings; at 40% capacity, SW stress improved WUE. Under conditions of PEG stress, the WUE of stressed seedlings was lower than that of control seedlings within 4 hrs since the start of the stress. For the 20% and 30% PEG stresses, WUE was higher for treated seedlings than for the control after a 4 hr stress. These results show that Mongolian pine seedlings can endure and adapt to drought stresses under conditions of lower soil water content. Comparisons between PEG stresses at 10%, 20% and 30% within 2 hrs and SW stresses at 40%, 30% and 20% of field water capacity showed that the relative values of photosynthetic indices were very similar. Therefore, PEG stresses within 2 hrs had the same effect as SW stress within 7~8 days.

Key words drought stresses, sandy soil, Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*), photosynthesis, polyethylene glycol

樟子松 (*Pinus sylvestris* L. var. *mongolica* Litv.) 以其抗寒、抗旱、较速生的优良特性, 自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^[1-2]. 然而, 近十几年来, 最先引种的沙地樟子松人工林出现了枝叶变黄, 进而全树枯死的现象^[3]. 关于沙地樟子松人工林衰退机制的研究, 水分胁迫一直是关注的焦点之一^[1,4-5]. 已有的沙地樟子松水分生理的研究表明, 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)沙区人工栽培, 而且生长良好; 尤其是防护林体系建设适宜采用的一个理想造林树种^[5-10]. 但是, 当沙地樟子松受到水分胁迫时, 生长和代谢等会受到严重影响, 而且这些影响是多方面的, 其中, 对光合作用的影响尤为重要^[11-12]. 已有研究认为, 用聚乙二醇(PEG)溶液模拟植物受干旱胁迫很方便, 但用PEG作渗透调节剂模拟干旱胁迫也存在一些问题, 如不纯的PEG、含磷的PEG对植物都有毒害作用^[13]; 另外, PEG的副作用还表现在使植物对磷的吸收减少, 培养液中含氧量降低, 并且植物可能吸收了部分PEG^[14-15]. 相反, PEG中的杂质与毒性不会影响胁迫效果, 并通过随机标记的¹⁴C方法确定了PEG 1 000、4 000~20 000能模拟干旱逆境的原因是其可阻塞植物的输导组织. 目前大部分研究认为, PEG用于模拟土壤干旱、测定植物对水分亏缺的反应还是一种较为理想的渗透调节剂.

本文对沙地樟子松苗木受到不同形式水分胁迫下光合特性反应进行研究, 以期了解樟子松光合生理对土壤水分胁迫和PEG处理法对苗木进行水分胁迫的反应差别, 同时, 检验聚乙二醇(PEG)处理法对苗木进行水分胁迫引起樟子松光合生理的变化是否可以代表土壤水分胁迫引起樟子松光合生理的变化; 为进一步研究沙地樟子松人工林衰退产生的可能与水分相关机制提供方法与依据.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料选择辽宁省彰武县章古台镇(N42°39'42", E122°33'36", GPS, eTrex Summit)2年生樟子松苗木300株, 于2003年4月初运至沈阳农业大学植物园. 试验设于可开放式温室中, 无雨天气, 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2年生樟子松苗木移栽于直径20 cm、高22 cm的塑料盆中, 每盆定植2株, 在自然状态下生长3个月后(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 试验方法

1.2.1 控制土壤含水量的水分胁迫试验

选择2年生樟子松苗木, 设置4个水平, 每个水平重复6次(6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2~3 d浇1次透水). 田间持水量采用环刀法于试验地取样测得^[16]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控制, 即在对苗木停止供水后的第2 d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^[17], 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天平称量盆、苗木及土壤总重量(W_{tc}), 之后每天16:00称重(W_n), 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_m) 由式(1)确定.

$$W_m = W_{ic} - W_u \tag{1}$$

如果 $W_u = W_{ic}$, 则不必补水.
光合特性指标测定在控水后的 7~10 d 开始进行, 每个处理至少测量 1 周, 每次测定取瞬间值 10 次以上的平均值.

1.2.2 化学处理方式产生的水分胁迫试验

选取定植 3 个月后 2 年生樟子松苗木, 将苗木清洗后, 在 1/2 Hoagland 营养液中过渡 24 h 后, 选用 PEG 6 000[聚乙二醇, $HO(CH_2CH_2O)_nH$, 分子量为 6 000](沈阳市化学试剂三厂)作为渗透剂对苗木根际进行胁迫处理^[12]. PEG 浓度设 4 个处理: 0(以蒸馏水为对照)、10%、20%、30%(重量与体积之比), 根据 Michael 等^[14]的经验公式计算相当于 0、-0.3、-0.9 和 -2.0 MPa 的水势, 用露点水势仪(Wescor, Inc., USA)进行校正, 4 个处理水势值由高到低分别为 -0.02、-0.20、-0.75 和 -1.53 MPa; 每个处理重复 3 次(每次 2 株, 计 6 株). 在处理后的 5、60 min 及每隔 60 min 进行植株的光合特性指标测定, 每次测定取瞬间值 10 次以上的平均值.

1.2.3 光合特性指标测定

樟子松幼苗经不同程度水分胁迫一定时间后, 采用 Li-6400P 便携式光合测定系统分析仪(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 CO_2 浓度等光合特性指标. 测定于 2003 年 9 月中旬-10 月中旬进行. 对于土壤水分胁迫的苗木, 测定时间为每天 10:30-12:00, 试验期间相对湿度为 75%~85%, 自然光照条件, 温度为 24~29℃. 对于 PEG 胁迫的苗木, 在与土壤水分胁迫近似的环境条件下自 PEG 处理后连续观测^[18].

由于 Li-6400P 光合测定系统测定光合特性指标需要精确的叶面积计算, 因此, 本文对樟子松苗木叶面积采用排水体积法测定^[19], 见式(2).

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

式中, A 为叶面积(cm^2), L 为针叶长度(cm), n 为每束针叶的根数, V 为针叶体积(cm^3).

具体测定: 从松枝条的叶鞘基部切取针束试样, 用松针将针叶束捆扎置入 10 mL 的量筒中(量筒内预先注入 7 mL 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 7 mL, 则移出的水量即为其排水体积, V 精确度至 0.01 mL.

2 结果与分析

2.1 土壤水分胁迫对樟子松幼苗光合特性影响

不同土壤水分胁迫处理使 2 年生樟子松幼苗的

光合速率均呈明显的下降趋势. 与对照比, 当土壤含水量为 40% 田间持水量时, 光合速率下降 19.5%; 当土壤含水量为 30% 田间持水量时, 下降 30.1%; 而当土壤含水量为 20% 田间持水量时, 下降幅度达 75.4%(图 1A). 结果表明, 当土壤含水量为 40% 田间持水量时, 干旱胁迫就已发生, 随土壤含水量的下降, 干旱胁迫逐渐加重, 但由 40% 到 30% 干旱胁迫处理的降低幅度不大(为 13.2%), 而由 30% 到 20% 干旱胁迫处理的降低幅度较大(为 64.5%); 光合速率在 20% 干旱胁迫处理与其他几组处理之间具有显著差异($p < 0.01$), 但对照、40% 和 30% 干旱胁迫处理之间差异不显著. 因此, 可以认为, 当土壤含水量为 20% 田间持水量时, 樟子松幼苗已经受到严重胁迫.

在土壤水分胁迫作用下, 樟子松苗木的气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度也随之下降, 表现出与光合速率相同的趋势. 当土壤含水量从对照(接近饱和)降至田间持水量的 40% 时, 气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度的下降幅度较小, 平均分别下降 22.7%、19.0% 和 7.0%; 当土壤含水量由田间持水量的 40% 降至 30% 时, 平均分别下降 21.5%、13.0% 和 5.8%; 但当壤含水量从田间持水量的 30% 降至 20% 时, 则分别下降 64.3%、62.5% 和 28.4%(图 1B、C、D). 与光合速率相似, 气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度在 20% 干旱胁迫处理与其他几组处理之间具有显著差异($p < 0.01$), 但对照、40% 和 30% 干旱胁迫处理之间差异不显著.

一般认为, 气孔导度是表征植物叶片气孔与外界进行气体交换的畅通程度, 气孔导度的变化对植物体水分及 CO_2 状况产生直接影响^[20]. 上述试验结果表明, 在土壤水分胁迫条件下, 气孔导度减小, CO_2 进入叶片细胞内的阻力增加, 同时气孔阻力的增加也减少叶片水分散失, 因此, 导致蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度的下降, 最后表现为光合速率的下降. 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.

水分利用效率是表征植物水分消耗与物质积累关系的综合指标, 一般采用 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^[21-22]. 本文以光合速率与蒸腾速率之比作为樟子松水分利用效率指标. 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 2), 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.

2.2 PEG 胁迫对樟子松幼苗光合特性影响

PEG 胁迫处理的最初 5 min, 樟子松幼苗的光

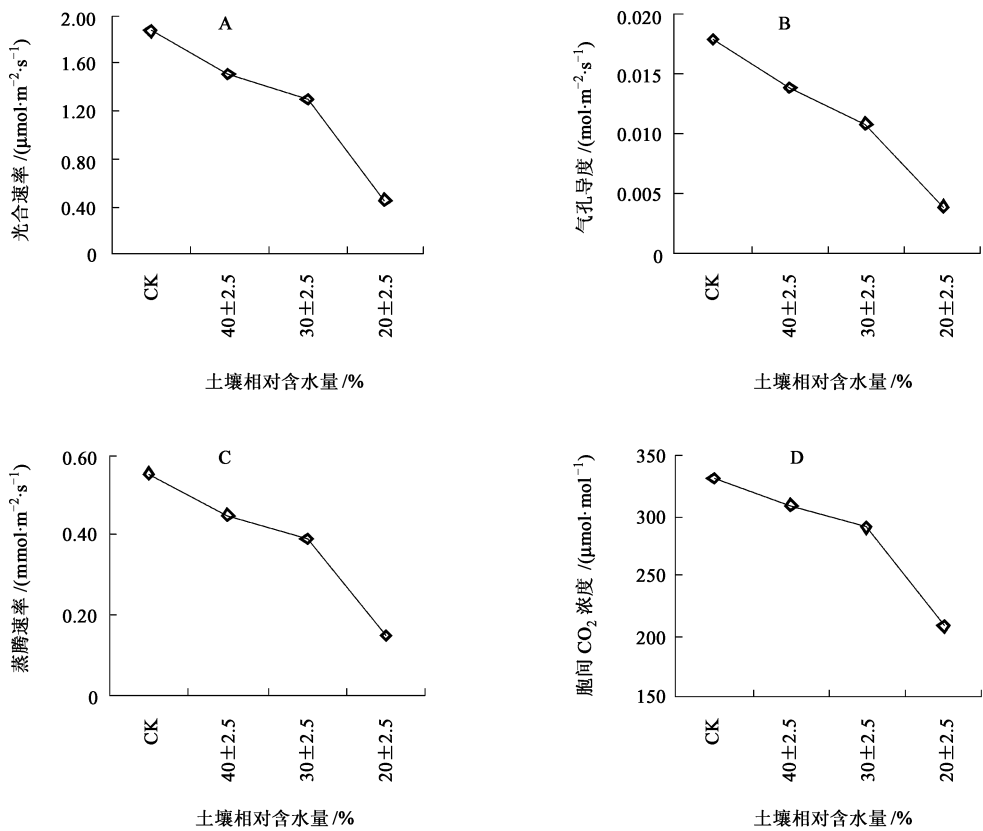


图 1 2 年生樟子松幼苗的光合特性对土壤干旱胁迫响应
FIGURE 1 Response of photosynthesis of 2-year old Mongolian pine seedlings to soil drought stresses

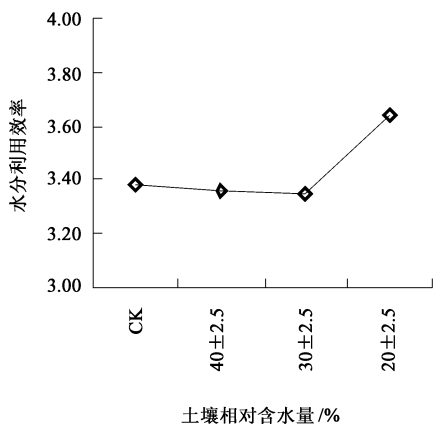


图 2 2 年生樟子松幼苗的水分利用效率对土壤干旱胁迫的响应
FIGURE 2 Response of water use efficiency of 2-year old Mongolian pine seedlings to soil drought stresses

合速率均高于对照(图 3A), 之后, 光合速率下降, 但不同强度的胁迫处理表现有所差异. 低强度胁迫(10%)下光合速率的变化与对照基本一致, 呈波形变化(图 3A). 中强度和强度胁迫处理(20%、30%)对光合速率的影响趋势一致, 即开始时光合速率下降, 至 2 h 后, 光合速率值较低, 且趋于稳定(20%、30%胁迫处理 2 h 后分别稳定在 0.55 和 $0.33 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$).

PEG 胁迫处理对樟子松幼苗的气孔导度和蒸腾

速率的影响与对光合速率的影响具有相同的趋势(图 3B、C). 中强度和强度胁迫处理对气孔导度、蒸腾速率的影响从胁迫一开始即表现出下降的趋势, 2 h 以后气孔导度和蒸腾速率值较低, 且趋于相对稳定.

PEG 胁迫处理对胞间 CO_2 浓度的影响与以上光合生理指标有所不同. 樟子松苗木在受到胁迫后, 胞间 CO_2 浓度有所下降, 这可能与气孔导度下降直接相关; 但胁迫时间在 4 h 后, 各胁迫处理胞间 CO_2 浓度均表现上升趋势(图 3D), 这可能是由于干旱胁迫导致光合速率下降, 从而形成了细胞间 CO_2 的积累.

图 4 为 PEG 胁迫处理下樟子松苗木的水分利用率, 从中可以看出, 由 PEG 模拟干旱胁迫的前期, 樟子松幼苗的水分利用效率低于对照的水平; 在胁迫处理 4 h 后, 20%和 30%的 PEG 胁迫处理的樟子松苗木水分利用效率均超过了对照的水平. 分析其原因可能有如下的两个方面: 一是经过几个小时的胁迫之后, 樟子松幼苗对胁迫有了一定的适应, 可能对干旱胁迫产生了相当的抵抗能力, 因而其水分利用效率升高; 二是因为在较严重水分胁迫条件下, 植物的呼吸作用先升后降而表现出水分利用效率的升高^[23].

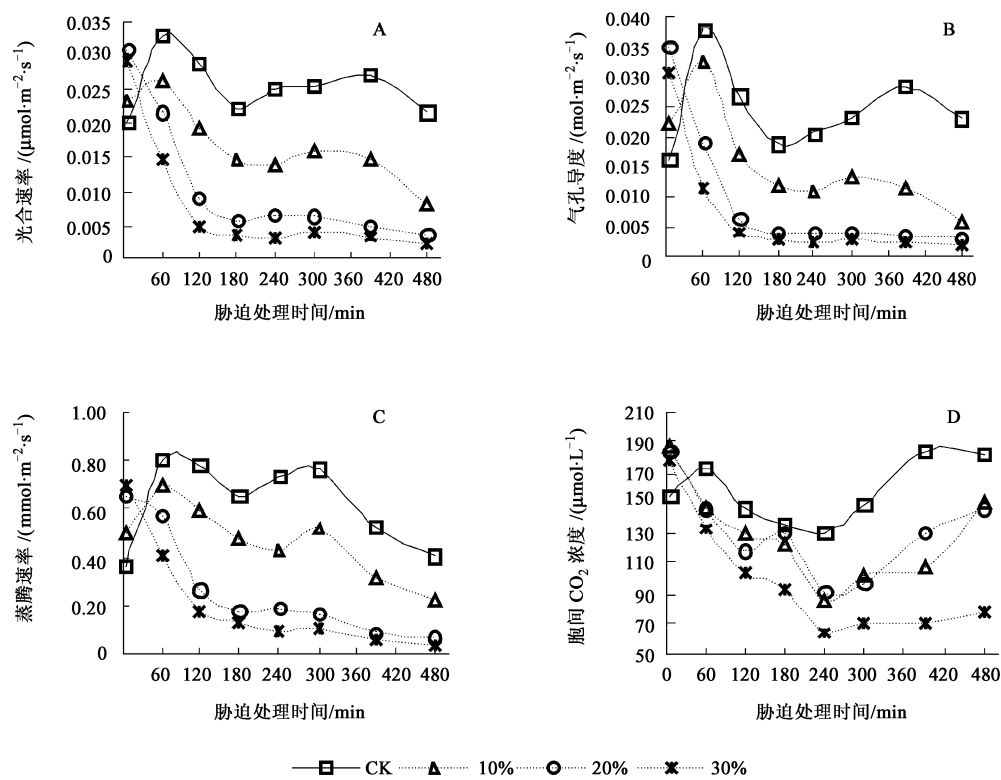


图 3 2 年生樟子松幼苗的光合特性对 PEG 干旱胁迫响应
FIGURE 3 Response of photosynthesis of 2-year old Mongolian pine seedlings to PEG drought stresses

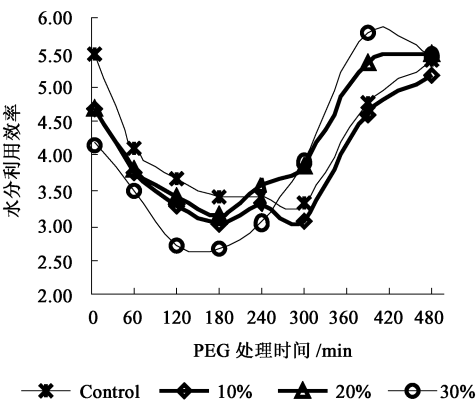


图 4 2 年生樟子松幼苗的水分利用效率对 PEG 胁迫响应
FIGURE 4 Response of water use efficiency of 2-year old Mongolian pine seedlings to PEG drought stresses

2.3 土壤水分胁迫与 PEG 胁迫对 2 年生樟子松幼苗光合特性影响比较

由于 PEG 胁迫与土壤水分胁迫处理不是同时进行, 因此, 采用光合特性指标的相对值对 2 年生樟子松幼苗光合特性的反应进行比较. 光合特性指标的相对值的计算方法:

$$P_{ri} = P_i / P_{ick} \quad (3)$$

式中, P_{ri} 为第 i 个光合特性指标的相对值, P_i 为干旱胁迫条件下第 i 个光合特性指标的实测值, P_{ick} 为对照条件下第 i 个光合特性指标的实测值, i 代表光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度.

从图 5 可以看出, PEG 胁迫处理之初(处理后第 5 min 观测值), 光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度的相对值表现出相似的趋势, 即各指标的相对值均高于对照和土壤水分胁迫的观测结果. 3 种 PEG 浓度(10%、20%、30%)胁迫处理在 1 h 后的各指标的相对值与 3 种土壤水分胁迫处理(40%、30%、20%田间持水量)基本一致, 可以认为 1 h 的 PEG 胁迫处理与土壤水分胁迫处理(7~10 d)具有相同的效果, 尤其是气孔导度和胞间 CO_2 浓度的相对值, 两种胁迫方式几乎一致. PEG 胁迫处理在 2~8 h 间, 3 种浓度处理的各指标相对值趋于一致, 均低于 3 种土壤水分胁迫处理的各指标相对值; 这一试验结果说明, 不同浓度 PEG 胁迫的樟子松苗木, 在经过一段长时间后(2 h)基本适应了 PEG 胁迫条件. 另外, 强度胁迫处理(30%PEG 和 20%田间持水量)的各指标相对值在两种胁迫方式之间没有显著差异(除 PEG 胁迫处理 1 h 之前外), 这表明樟子松苗木在强度胁迫(30%PEG 和 20%田间持水量)条件下各指标相对值已降至相当低的程度.

从水分利用效率的相对值看, 只有强度胁迫条件下(30%PEG 和 20%田间持水量), 樟子松苗木水分利用率有所提高; 另外, PEG 模拟干旱胁迫处理 5 h 以后, 樟子松幼苗的水分利用效率也有所提高. 这一现象表明樟子松对干旱胁迫具有一定的抵抗力.

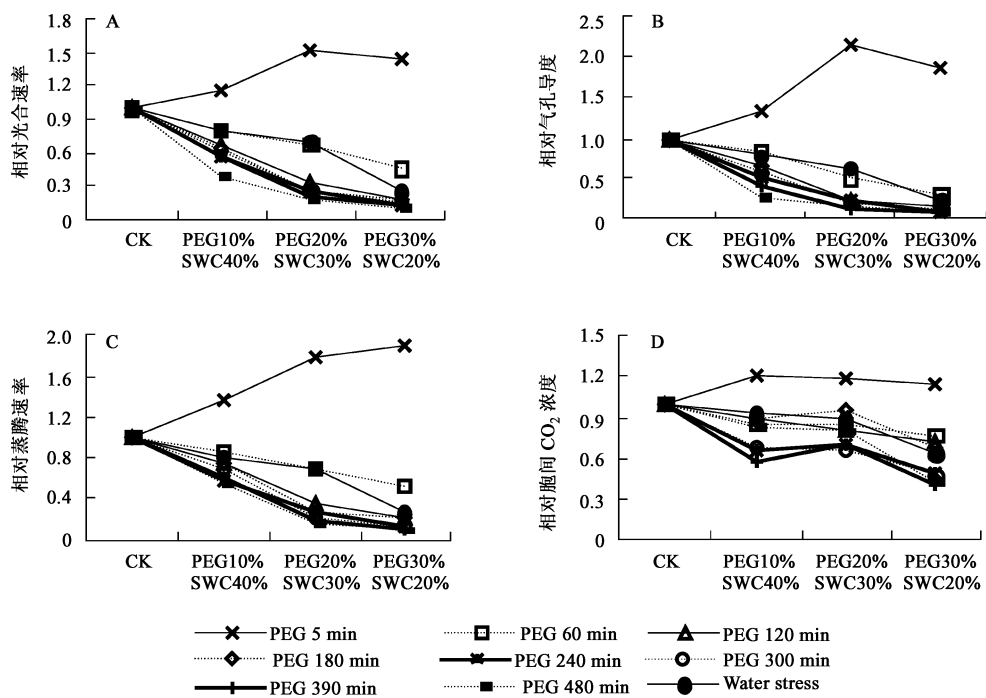


图 5 不同胁迫方式对 2 年生樟子松幼苗的光合特性影响比较

FIGURE 5 Comparison of photosynthesis indices between two types of stresses (PEG and soil water deficit) of 2-year old Mongolian pine seedlings

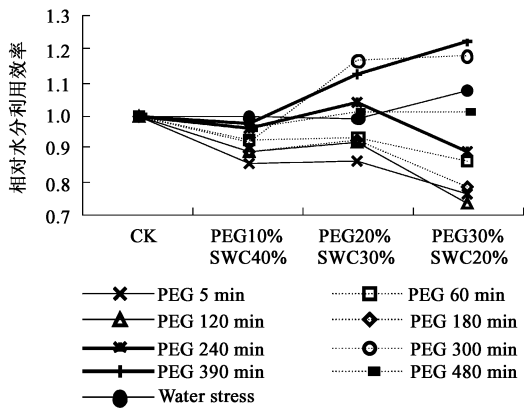


图 6 不同胁迫方式对 2 年生樟子松幼苗的相对水分利用效率

FIGURE 6 Relative water use efficiency of 2-year old Mongolian pine seedling under conditions of PEG and soil drought stresses

3 结论与讨论

当土壤含水量为 40%田间持水量时,沙地樟子松幼苗干旱胁迫就已发生,随土壤含水量的下降,干旱胁迫逐渐加重,直到土壤含水量为 20%田间持水量时,光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度的下降幅度达到最大.产生这种现象的主要原因是由气孔导度的变化而引起的,即干旱胁迫下,气孔导度减小,CO₂ 进入叶片细胞内的阻力增加、叶片水分散失减少,导致胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率下降,从而表现为光合速率的下降.

低强度 PEG 胁迫(10%)下樟子松幼苗光合特征指标的变化与对照基本一致,中强度和强度胁迫

处理(20%、30%)对光合速率的影响趋势一致,并且在胁迫处理 2 h 后,光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度等各光合特征指标稳定于一值.

PEG 胁迫处理对胞间 CO₂ 浓度的影响与光合速率、气孔导度、蒸腾速率等指标有所不同,即樟子松苗木在受到 PEG 胁迫后,由于气孔导度的下降,最初胞间 CO₂ 浓度也有所下降;当胁迫时间超过 4 h 后,各胁迫处理胞间 CO₂ 浓度均表现上升趋势,这可能是由于干旱胁迫导致光合速率下降,从而形成了细胞间 CO₂ 的积累;或是由于环境 CO₂ 浓度升高所致.

土壤水分胁迫对樟子松幼苗的水分利用效率几乎没有影响,20%田间持水量胁迫甚至增高了水分利用效率;PEG 模拟干旱胁迫的前期(4 h 之前),樟子松幼苗的水分利用效率低于对照;在胁迫处理 4 h 后,中、强度 PEG 胁迫(20%和 30%)处理下的樟子松的水分利用效率均超过了对照;这表明樟子松在较低的土壤含水量条件下,具有忍耐、适应干旱胁迫的能力.

3 种 PEG 浓度(10%、20%、30%)胁迫处理在 1 h 后的各指标的相对值与 3 种土壤水分胁迫处理(40%、30%、20%田间持水量)基本一致,因此,可以认为 1 h 的 PEG 胁迫处理与土壤水分胁迫处理(7~10 d)具有相同的效果. PEG 胁迫处理在 2~8 h 间,3 种浓度处理的各光合特征指标相对值趋于一

致,均低于 3 种土壤水分胁迫处理的各指标相对值,即表明不同浓度 PEG 胁迫的樟子松苗,在经过一段长时间后(2 h)基本适应了 PEG 胁迫条件.另外,不同形式的强度胁迫处理(30%PEG 和 20%田间持水量)的各光合特征指标相对值之间没有显著差异,表明樟子松苗木在强度胁迫(30%PEG 和 20%田间持水量)条件下各指标相对值已几乎降至最低程度.

参 考 文 献

[1] 姜凤岐,朱教君,曾德慧,等. 防护林经营学[M]. 北京:中国林业出版社,2003; 171-183.
JIANG F Q, ZHU J J, ZENG D H, et al. Management for protective plantations [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2003; 171-183.

[2] 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 [J]. *Journal of Forestry Research*, 2003, 14(2); 103-111.

[3] 康宏樟,朱教君,李智辉,等. 沙地樟子松天然分布与引种栽培[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5); 134-139.
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 [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5); 134-139.

[4] 曾德慧,姜凤岐,范志平,等. 樟子松人工固沙林稳定性的研究[J]. 应用生态学报, 1996, 7(4); 337-343.
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 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(4); 337-343.

[5] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施[J]. 林业科学, 2001, 37(2); 131-138.
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 [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(2); 131-138.

[6] 焦树仁. 章古台固沙林生态系统的结构与功能[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1989; 1-9.
JIAO S R. Structures and functions of sand-fixation forest ecosystem in Zhanggutai [M]. Shenyang: Liaoning Science & Technology Press, 1989; 1-9.

[7] 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[J]. 中国沙漠, 1990, 10(4); 18-24.
CHANG X L, ZHAO W Z. Study on moisture physiology of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv. and *Populus simonii* Carr. and water condition of woodland [J]. *Journal of Desert Research*, 1990, 10(4); 18-24.

[8] 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[J]. 林业科学, 1990, 26(4); 294-300.
MU T M, CHU G J, LIU T Y. Silvicultural techniques for preventing physiological droughtness of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1990, 26(4); 294-300.

[9] 孟根,敖同成,张林,等. 沙地樟子松抗旱能力的分析[J]. 东北林业大学学报, 1991, 19(2); 11-16.
MENG G, AO T C, ZHANG L, et al. Analysis on drought resistance of Mongolian-Scotch pine on sandy land [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1991, 19(2); 11-16.

[10] 赵雨森,焦振家,王文章. 樟子松蒸腾强度的研究[J]. 东北林业大学学报, 1991, 19(5); 113-118.
ZHAO Y S, JIAO Z J, WANG W Z. Transpiration intensity of Mongolian-Scotch pine plantation [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1991, 19(5); 113-118.

[11] 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[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3); 250-254.
ZHU M Y, TIAN Y L, GUO L S. Variation of drought-enduring characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* under different climatic moisture [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(3); 250-254.

[12] 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[J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(1); 40-43.
WANG L C, HAN S J, HUANG M R. The ABA change and physiological responses of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to water shortage [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, 29(1); 40-43.

[13] LAWOR D W. Absorption of polyethylene glycol by plants and their effects on plant growth [J]. *New Physiology*, 1970, 9; 501-513.

[14] MICHAEL B E, KAUFAMAN M R. The osmotic potential of polythelene glycol, 6000 [J]. *Plant Physiology*, 1973, 51; 914-916.

[15] STEUTER A A, MOZAFAR A. Water potential of aqueous polyethylene glycol [J]. *Plant Physiology*, 1981, 67; 64-67.

[16] 卫茂荣. 一次取样连续测定土壤物理性质的方法[J]. 辽宁林业科技, 1990, 49(1); 56-57.
WEI M R. Method for measuring soil physical properties using one-time sampling soil [J]. *Journal of Liaoning Forestry Science and Technology*, 1990, 49(1); 56-57.

[17] 樊卫国,刘国琴,何篙涛,等. 刺犁对土壤干旱胁迫的生理响应[J]. 中国农业科学, 2002, 35(10); 1 243-1 248.
FAN W G, LIU G Q, HE S T, et al. Physiological response to soil drought stress in *Rosa roxburghii* [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(10); 1 243-1 248.

[18] JIN S, ZHOU X F, FAN J. Modeling daily photosynthesis of nine major tree species in northeast China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 184; 125-140.

[19] JOHNSON J D. A rapid technique for estimating total surface area of pine needles [J]. *Forest Science*, 1984, 30; 913-921.

[20] 马钦彦,蔺琛,韩海荣,等. 山西太岳山核桃楸光合特性的研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(1); 14-18.
MA Q Y, LIN C, HAN H R, et al. Photosynthesis characteristics of *Juglans mandshurica* Maxim in Taiyue Mountain region, Shanxi Province [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, 25(1); 14-18.

[21] 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 [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 112; 233-244.

[22] CREGG B M, ZHANG J W. Physiology and morphology of *Pinus sylvestris* from diverse sources under cyclic drought stress [J]. *Forest Ecology and Management*, 2001, 154; 131-139.

[23] LI C Y, WANG K Y. Differences in drought responses of three contrasting *Eucalyptus microtheca* F. Muell. populations [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 179; 377-385.