

DOI: 10.5846/stxb201406051157

赵哈林, 李瑾, 周瑞莲, 曲浩, 云建英, 潘成臣. 风沙流持续吹袭对樟子松幼树光合蒸腾作用的影响. 生态学报, 2015, 35(20): - .
Zhao H L, Li J, Zhou R L, Qu H, Yun J Y, Pan C C. Effects of sustained wind-sand flow on photosynthesis and transpiration rates of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* saplings. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): - .

风沙流持续吹袭对樟子松幼树光合蒸腾作用的影响

赵哈林^{1,*}, 李瑾¹, 周瑞莲², 曲浩¹, 云建英¹, 潘成臣¹

1 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

2 鲁东大学生命学院, 烟台 264025

摘要: 为了解风沙流持续吹袭对樟子松幼树光合蒸腾特征影响, 2013 年春季在内蒙古科尔沁沙地研究了 0 (CK)、6、9、12、15 和 18 m/s 等 6 个梯度风速处理 30 min 持续风沙流吹袭下樟子松幼树光合蒸腾速率和水分利用效率等指标的变化规律。结果表明: 随着风沙流吹袭强度的增加, 光合速率、气孔导度和水分利用效率的日变化规律发生了明显改变, 而蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度日变化曲线没有显著变化。和 CK 相比, 6 m/s 和 12 m/s 风沙流吹袭下其日均光合速率分别提高 13.8% 和 38.9%, 18 m/s 风沙流吹袭下则下降 18.9%; 6 m/s 和 15 m/s 风沙流吹袭下其日均蒸腾速率分别提高 16.9% 和 53.0%, 18 m/s 风沙流吹袭下其日均蒸腾速率降低 18.54%。和 CK 相比, 其日均胞间 CO₂ 浓度在 6—12 m/s 风沙流吹袭下没有显著变化, 15 m/s 和 18 m/s 风沙流吹袭下则分别提高 16.2% 和 3.3%。6 m/s 和 15 m/s 风沙流吹袭使其日均气孔导度较 CK 分别增加 26.6% 和 45.2%, 18 m/s 风沙流吹袭则使其降低 13.7%。6、9、12 和 18 m/s 风沙流吹袭使其日均水分利用效率分别较 CK 增加 7.3%、1.9%、18.2% 和 3.1%, 而 15 m/s 风沙流吹袭下其 WUE 下降 13.5%。

关键词: 樟子松幼树; 风沙流; 光合速率; 蒸腾速率; 水分利用效率

Effects of sustained wind-sand flow on photosynthesis and transpiration rates of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* saplings

ZHAO Halin^{1,*}, LI Jin¹, ZHOU Ruilian², QU Hao¹, YUN Jianying¹, PAN Chengchen

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, China

Abstract: To understand the effects of sustained wind-sand flow on the photosynthesis and transpiration rates of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* saplings, a field wind-sand flow experiment with a gradient of wind speed treatments (0 [CK], 6, 9, 12, 15, and 18 m/s) was conducted in the spring of 2013 in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia. The results showed that: (1) wind-sand flow over 9 m/s can significantly change daily photosynthesis rate patterns, (2) wind-sand flow over 12 m/s can significantly change daily patterns of stomatal conductance, (3) wind-sand flow of 15 m/s and 18 m/s can significantly change the daily WUE pattern, and (4) different strengths of wind-sand flows had a lesser effect on daily transpiration rates and intercellular CO₂ concentrations compared to photosynthesis rate. Compared to the CK, the daily maximum and average photosynthetic rates increased by 12.35% and 13.8%, and 18.33% and 38.9%, at the 6 m/s and 12 m/s treatments, respectively, and decreased by 17.9% and 18.9% at the 18 m/s treatments, respectively. The daily maximum and average transpiration rates increased by 51.9% and 16.9%, and 58.6% and 53.0%, at the 6 m/s and 15 m/s treatments, respectively, and decreased by 22.5% and 18.5% at the 18 m/s treatment, respectively. The daily maximum and average intercellular CO₂ concentrations did not significantly differ with the 6—12 m/s treatments, as compared to those

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31270752, 30972422)

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2015-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: resdiv@lzb.ac.cn

in the CK, but increased by 86.9% and 16.5%, and 44.5%, 3.28% with the 15 m/s and 18 m/s treatments, respectively. Compared to the CK, the daily maximum and average stomatal conductance increased by 14.1%, 26.6%, and 27.6%, 45.2%, at the 6 m/s and 15 m/s treatments, respectively, and decreased by 11.95% and 13.70% at the 18 m/s treatment, respectively. The daily average WUE increased by 7.33%, 1.93%, 18.15%, 3.09% at 6, 9, 12, and 18 m/s respectively, and decreased by 13.51% at 15 m/s.

Key Words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* saplings, wind-sand flow, photosynthetic rate, transpiration rate, water use efficiency

风沙流是指含有沙粒的运动气流^[1]。当起沙风经过干燥疏松裸露沙质地表时,就会形成风沙流^[2]。由于风沙流所携带沙粒能够对植物造成磨蚀作用,导致其幼嫩表皮组织受损和细胞液外流而致植株死亡,因而在风沙流活动强烈地区除耐风沙的沙生植物外,大多数植物不能生长,使风沙区植物分布范围和多样性受到严重抑制^[3]。近年来,随着国际社会对沙区生态保护和植被恢复重建日益重视,有关风沙流对植物影响及其响应研究开始受到关注^[2,4]。

有关风和风沙流对植物影响及其响应研究已有一些报道。如沙漠环境中的植物群落结构和功能^[5]、物种多样性^[6]、种群适应性等^[7],这些研究主要是从群落和种群层面分析了植物与风沙环境的关系,没有把风和风沙流作为单一因子分离出来,因而无法确定风和风沙流对植物的具体作用。也有一些风吹对植物影响的研究报道,如风吹对植物生长节律^[8]、光合蒸腾特性^[9]影响及其逆境生理响应^[10]研究等,但过去大多数风吹试验都是采用人工晃动的模拟方法,模拟时间多在 30s 至 20min,而且只能模拟净风吹袭^[11]。近年来,随着野外便携式风洞的应用,真正的风吹试验才得以开展,但绝大多数风吹试验仍然只局限于净风试验^[9-10]。有关风沙流对植物生长影响及其生理响应研究,迄今还鲜有报道。在国内,仅见于云江等利用沙风洞开展过风沙流对几种植物生长影响以及生理生态响应研究^[2,12],但其研究只涉及几种灌木和草本植物,而且是低风速风沙流吹袭,有关不同风沙流对乔木生长影响及其生理响应特征和机制人们还知之甚少。

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^[13]。由于具有较强的耐寒、耐旱和耐瘠薄能力,又是常绿树种,自上个世纪 50 年代以来已在我国北方沙区广泛推广种植^[14]。但樟子松也有一个弱点,即其苗期不耐沙打沙埋,在裸露沙地直接造林存活率只有 10%左右^[15]。开展风沙流对樟子松幼树光合蒸腾特性影响研究,探讨其光合水分特性对风沙环境的适应机制,可为提高其大范围推广成效提供理论支撑。

1 研究方法

1.1 研究区自然概况

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′—42°57′N, 120°41′—120°45′E,海拔 340—370 m)。该区属温带半干旱大陆性气候,年均降水量 356.9 mm,年均蒸发量 1900 mm,年均气温 6.5℃,≥10℃年积温 3190℃,无霜期 151 d;年平均风速 3.4 m/s,年平均扬沙天气 20—30 d。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,樟子松作为人工林常绿树种在当地广泛种植。

1.2 试验设计

试验地设置于科尔沁沙地腹地的中国科学院奈曼沙漠化研究站野外风洞试验场内。试验材料选用长势良好,高矮基本一致的 3 龄樟子松幼树,在试验前一年秋季将其移栽至花盆中,通过适时适量浇水和冬季防冻等措施保证其安全越冬。试验前测定其株高、基干直径等生物学特征,然后选择株高无显著差异植株作为试验材料。试验设计为 0(CK)、6、9、12、15 和 18 m/s 等 6 个梯度风速处理,分别相当于 0、4、5、6、7、8 级风,其中

6 m/s 风速略高于当地起沙风,风沙流强度分别为 1.00、28.30、63.28、111.82 和 172.93 g cm⁻¹ min⁻¹。每个处理 6 个重复,每个重复为 1 株樟子松幼树。试验于 2013 年 5 月进行,测定日天气晴朗无风,日平均气温 28.3℃。为了保证土壤水分一致,风吹前夜等量浇水一次。风吹时间设定在清晨进行,光合测定前一小时结束。风吹设备为自制野外便携式沙风洞(专利号:ZL 2008 10182207X),每处理风吹持续时间均为 30 分钟。风吹后即时取样测定叶片相对含水量,并于当日清晨 6:00 开始利用 Li6400(LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA)在自然光下测定其光合蒸腾等特征,测定内容包括:光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、叶温等。每 2 小时测定一次,至下午 18:00 结束。测定时,每棵植株选测上部相邻 2 簇 4 个针叶,每次测定读取 5 个数据,最后计算平均值。由于所测针叶呈半椭圆形,且长度大于 Li6400 叶室长度,因而采用直接测定叶室内叶片两端直径后,利用弧面格式计算其叶面积。

1.3 数据分析方法

应用 SPSS13 软件进行数据的统计分析。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 不同处理光合速率日变化比较

从图 1 可以看出,非风吹 CK 的樟子松幼树光合日变化曲线为双峰曲线,其中两个峰值分别是上午 8:00 (25.1 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) 和下午 16:00 (18.3 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹)。6 m/s 处理光合日进程曲线仍然为双峰曲线,但下午峰值已变为 14:00,且两个峰值分别较 CK 增加 12.35% 和 15.85%。从 9 m/s 处理到 18 m/s 处理,樟子松幼树的日光合曲线逐步变为单峰曲线,各处理峰值均出现在上午 8:00,但各峰值较对照有较大变化。其中,除 12 m/s 处理较 CK 增加 18.33% 外,9 m/s、15 m/s 和 18 m/s 处理分别较 CK 下降 4.38%、15.54% 和 17.93%。

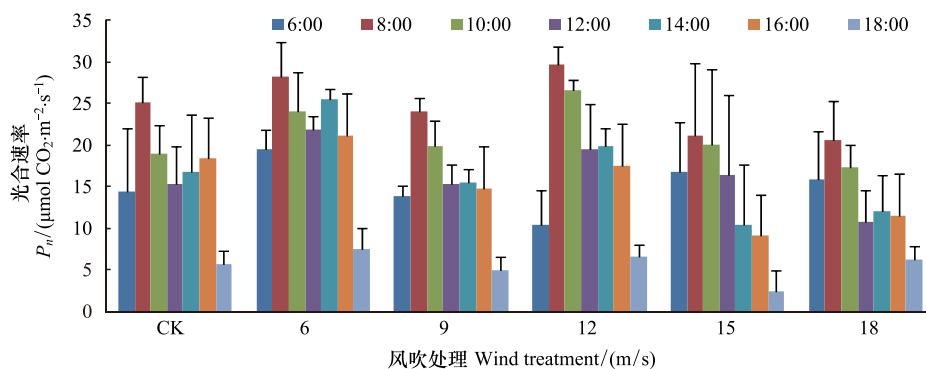


图 1 不同风吹处理下樟子松幼树光合速率日变化

Fig.1 Daily changes of photosynthetic rate at the different treatments

2.2 不同处理蒸腾速率日变化比较

非风吹 CK 的樟子松幼树蒸腾日变化曲线也为双峰曲线(图 2), 2 个峰值分别出现在上午 8:00 (6.92 mmol H₂O m⁻² s⁻²) 和下午 16:00 (7.92 mmol H₂O m⁻² s⁻²)。从 6 m/s 处理到 18 m/s 处理,除 15 m/s 处理曲线的双峰不十分明显外,其他处理均为明显的双峰曲线,其中 9 m/s 和 12 m/s 处理下午峰值出现时间和 CK 一样,均在下午 16:00,而 6、15 和 18 m/s 下午峰值出现时间均在 14:00。和 CK 相比,从 6 m/s 到 18 m/s 各处理上午蒸腾速率的峰值分别增加了 5.92%、-6.21%、16.62%、38.15% 和 -11.27%,下午的峰值分别增加了 51.89%、-7.58%、-7.45%、58.58% 和 -27.40%。

2.3 不同处理气孔导度日变化比较

从图 3 可以看出,6 m/s 至 15 m/s 的气孔导度日变化曲线和非风吹 CK 相同,从清晨到下午均表现为先下降再升高再下降变化趋势,而 18 m/s 处理气孔导度日变化曲线表现为一直下降趋势。其中,6 m/s 和 9 m/s 处

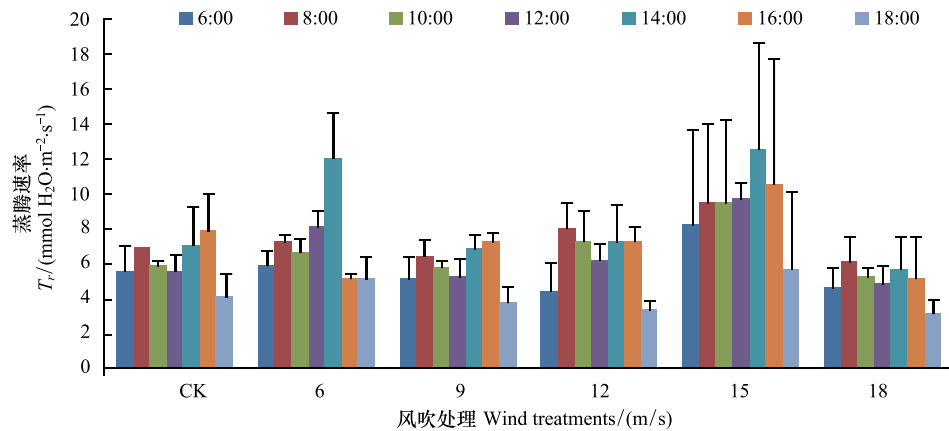


图2 不同风吹处理下樟子松幼树蒸腾速率日变化

Fig.2 Daily changes of transpiration rate at the different treatments

理与非风吹 CK 一样,气孔导度最大值均出现在清晨 6:00 时(0.38 和 $0.33 \text{ molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$),最小值出现在中午 12:00 时(0.22 和 $0.14 \text{ molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$),而 12 m/s 和 15 m/s 处理最大值均出现在上午 10:00 时(0.37 和 $0.43 \text{ molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$),最小值均出现在下午 18:00 时(0.14 和 $0.25 \text{ molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)。 18 m/s 处理最大最小值分别出现在清晨 6:00 时和下午 18:00 时(0.30 和 $0.13 \text{ molH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)。

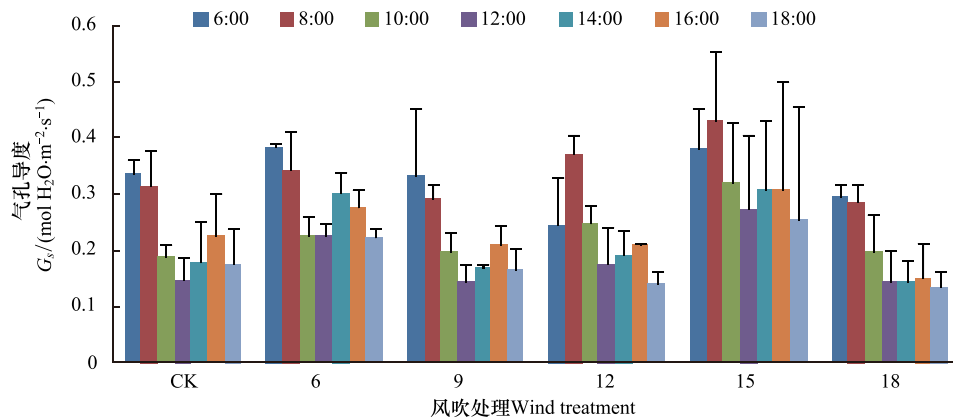


图3 不同沙埋处理下樟子松幼树气孔导度日变化

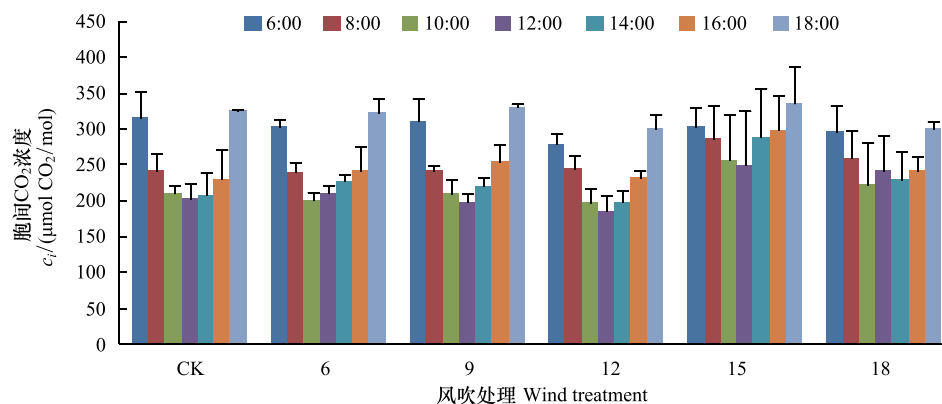
Fig.3 Daily changes of stomatal conductance at the different treatments

2.4 不同处理胞间 CO_2 浓度的日变化

和非风吹 CK 一样,从 6 m/s 到 15 m/s 处理的胞间 CO_2 浓度日变化曲线均为 V 字形,而 18 m/s 处理的胞间 CO_2 浓度日变化曲线为不明显的 W 形(图 4)。其中,CK 的胞间 CO_2 浓度最小值出现在中午 12:00 时,为 $203.13 \mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1}$,9、12 和 15 m/s 处理的胞间 CO_2 浓度最小值也出现在 12:00 时,分别为 198.39 、 186.53 和 $248.87 \mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1}$,较 CK 分别增加 -2.33% 、 -8.17% 和 22.52% 。 6 m/s 处理的胞间 CO_2 浓度最小值出现在上午 10:00 时,为 $201.45 \mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1}$,较 CK 下降 0.83% 。 18 m/s 处理的两个最小值分别出现在上午 10:00 时和下午 14:00 时,为 221.73 和 $230.91 \mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1}$,分别叫 CK 增加 9.16 和 13.67% 。

2.5 不同处理水分利用效率(WUE)的比较

从图 5 可以看出,和非风吹 CK 一样, 6 m/s 处理、 9 m/s 处理的 WUE 日变化曲线均是先增加后下降,最大值均出现在上午 08:00 时,分别 3.62 、 3.85 和 $3.74 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ 。 12 m/s 处理的 WUE 日变化曲线也是先增加后下降,但最大值出现在上午 10:00 时,为 $2.75 \mu\text{mol}/\text{mmol}$,较 CK 下降 24.03% 。 15 m/s 和 18 m/s 处理的 WUE

图4 不同沙埋处理下樟子松幼树胞间 CO_2 浓度日变化Fig.4 Daily changes of intercellular CO_2 concentration at the different treatments

日变化曲线均为单调下降曲线,即以清晨 6:00 时最大,分别为 2.90 和 3.52 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$,分别低于 CK 处理 19.89%和 2.76%。然后趋于下降,其中 15m/s 处理在中午 12:00 时前下降幅度较小,12:00 后下降幅度急剧增大,而 18m/s 处理在上午 10:00 后即大幅度下降。

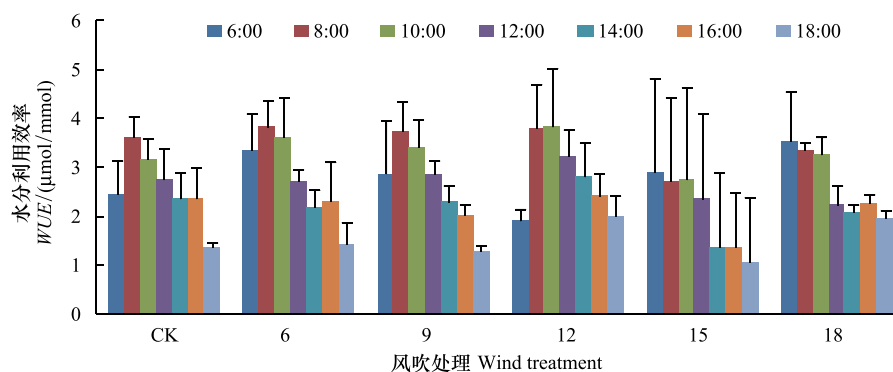


图5 不同沙埋处理下樟子松幼树水分利用效率日变化

Fig.5 Daily changes of WUE at the different treatments

2.6 不同处理光合水分指标日均值的比较

从图 6 可以看出,随着风吹强度增加,叶片温度趋于下降,18m/s 处理的叶片温度较 CK 下降 0.73°C ,但各处理间差异并不显著 ($P>0.05$)。在风沙流胁迫下,6m/s 和 12m/s 处理的日均光合速率较对照增高 29.02%和 13.89%,而 9、15 和 18m/s 处理分别较对照下降了 5.38%、15.64%和 17.41%。风沙流胁迫下,6、12 和 15m/s 处理的日均蒸腾速率较 CK 分别增加 17.07%、2.11%和 53.01%,而 9 和 18m/s 蒸腾速率较 CK 下降 5.37%和 18.53%,但只有 15 和 18m/s 处理与 CK 的差异达到了显著水平 ($P<0.05$)。

风沙流胁迫下,除 12ms 处理胞间 CO_2 浓度较 CK 有所下降外,其他风吹处理的胞间 CO_2 浓度均较 CK 有所增加,其中以 15ms 处理增加幅度最大为 16.24%,并且在 12 和 15m/s 处理间的差异达到显著水平 ($P<0.05$)。日均气孔导度的变化和蒸腾速率相似,也是 6、12 和 15m/s 处理的高于 CK,9 和 18m/s 处理的低于 CK,但只有 15 和 18m/s 处理与 CK 之间的差异达到了显著水平 ($P<0.05$)。日均水分利用效率只有 15m/s 处理低于 CK,6、9、12 和 18m/s 处理的日均水平利用效率分别较 CK 提高 7.72%、2.32%、10.04%和 3.09%,但各处理间的差异均未达到显著水平 ($P>0.05$)。

3 讨论

研究表明,非风吹樟子松幼树光合速率日变化为双峰曲线,峰值分别出现在上午 8:00 时和下午 16:00

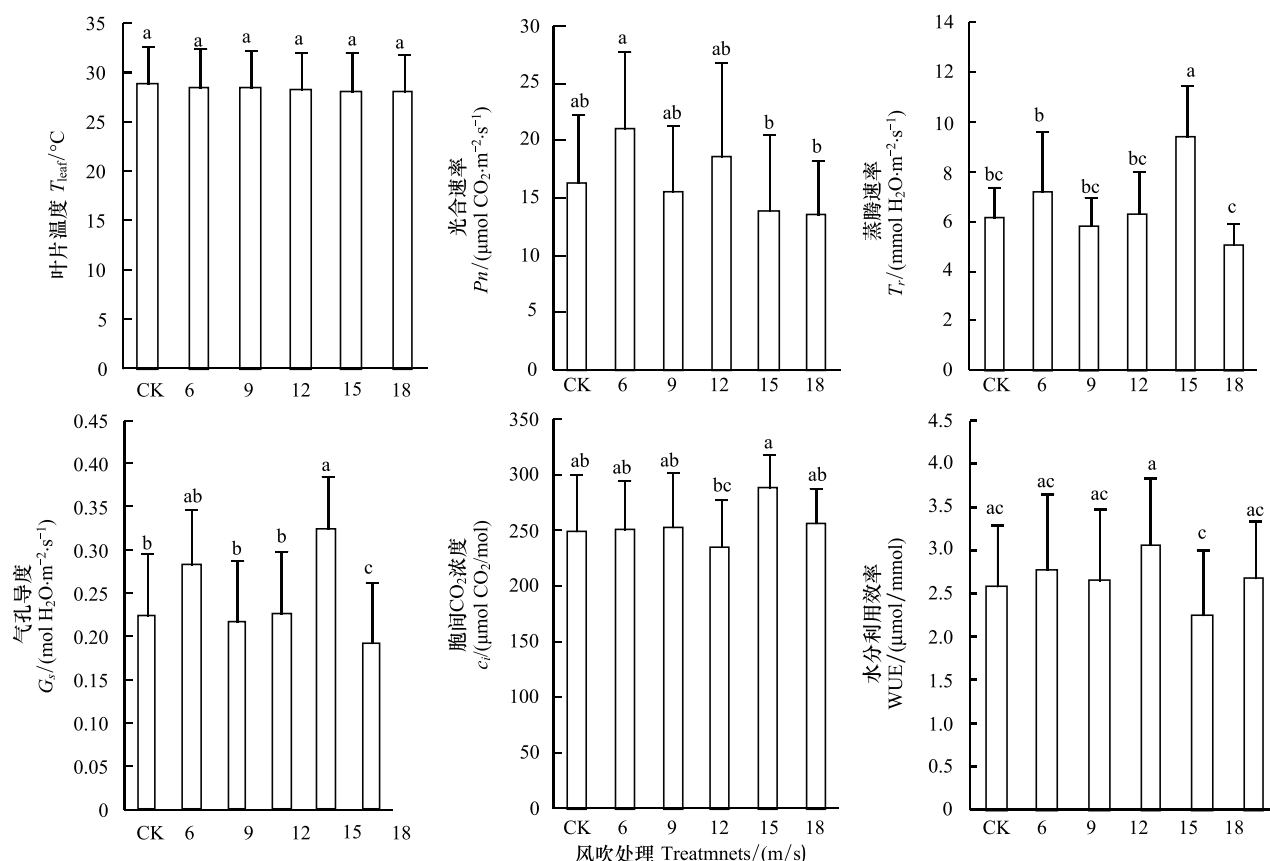


图6 不同处理间日均光合水分代谢指标比较

Fig.6 Comparison of the average daily value of different properties among different treatments

时,并且第2个峰值显著低于第一峰值,这和吴春荣等^[16]所研究的4龄樟子松幼树光合速率日变化规律一致。在6m/s风沙流吹袭下,其光合速率日变化仍然为双峰曲线,但第2峰值出现时间提前到下午14:00时。当风速大于6m/s以后,各处理光合速率日变化转变为单峰曲线,第2峰消失,这和孙存华等人^[17]对于干旱胁迫下藜光合日变化研究结果一致。另外,其光合速率日最大值和日均值是6m/s和12m/s处理显著大于CK,15m/s和18m/s处理又显著小于CK,而9m/s处理与CK差异不显著,这和赵哈林等^[9]有关净风吹袭下小叶锦鸡儿光合响应的研究结果一致。这一方面说明,6m/s低风速风沙流吹袭对樟子松幼树光合速率日进程影响较小,没有明显改变其日变化曲线,而强风沙流吹袭对其光合速率日进程影响较大,不仅导致其日变化规律明显改变,而且使“午休”消失;另一方面说明,6m/s和12m/s风速风沙流吹袭可以提高其光合速率,而强风沙流吹袭则会显著降低其光合作用。光合作用是植物将 CO_2 和 H_2O 转化为有机物的过程,强风沙流吹袭所导致的光合速率下降意味着其生产能力的降低或生长可能受到抑制^[9,18]。光合午休是植物因高温、低湿引起午间光和作用速率下降的现象,反映着环境胁迫下气孔对于光合蒸腾情况的调节行为,风沙流吹袭下其光合午休现象的消失,既可能源于风沙流强度吹袭导致其叶面温度降低,影响到其对气温变化的响应,也可能源于强风吹袭下其非气孔因素抑制了其光合速率第2峰值的出现。

研究表明,风沙流吹袭对樟子松幼树胞间 CO_2 浓度日进程影响较小,没有改变其日变化规律,但6—12m/s风沙流吹袭导致其日均胞间 CO_2 浓度降低,15m/s和18m/s风沙流吹袭有利于提高其日均胞间 CO_2 浓度。已有研究表明,胞间 CO_2 浓度的变化方向是确定光合速率变化的主要原因和是否为气孔因素的重要判断依据^[19]。由于 CO_2 是光合作用碳同化的底物, CO_2 浓度升高通常会导致光合速率增加^[18,20]。但在风沙流胁迫下,光合速率与胞间 CO_2 浓度呈现相反的变化规律。据陈根云等^[18]研究,这种负相关并不意味着胞间 CO_2 浓

度的降低有利于光合作用的增加,其光合速率的增强可能是叶肉光合活性增大的结果。而曹更生和宋纯鹏^[20]认为,在同样的气孔导度下,光合作用增强则会导致气孔内腔中的 CO_2 浓度会下降,反之则胞间 CO_2 浓度上升。在 15 和 18m/s 处理下,其光合速率小于 CK,而胞间 CO_2 浓度高于 CK,可能是其光合作用减弱导致胞间 CO_2 有所积累的结果。

研究表明,风沙流吹袭对樟子松幼树蒸腾速率日变化进程影响也比较小,风沙流吹袭并未导致其蒸腾日变化曲线发生改变,但 15m/s 及其以下风吹能够提高其日均蒸腾速率,而 18ms 大风则对其日均蒸腾速率产生抑制作用,这和 Griddings^[21]对其他植物的研究结果一致。气孔导度对不同风沙流强度吹袭的响应和蒸腾速率基本一致,即大多数处理的气孔导度日变化曲线和蒸腾速率日变化曲线一样也为双峰曲线,其日平均气孔导度也是 15m/s 及其以下风吹下增高,18m/s 大风吹袭下降低。气孔是 CO_2 进入植物体、水蒸汽逸出植物体的通道,气孔的开闭程度对蒸腾作用、光合作用具有重要的调控作用,关系到植物的水分消耗和产量形成^[22-23]。气孔导度的日变化曲线与蒸腾速率日变化曲线相似都为双峰曲线,15m/s 及其以下风速吹袭下其蒸腾速率与气孔导度同步增加,而 18m/s 风速下其蒸腾速率与气孔导度同步下降,这些都说明风沙流吹袭下其蒸腾速率的变化均为气孔因素调节^[21,24],而光合速率日变化曲线为单峰曲线,说明除了气孔调节外,还存在非气孔因素在起作用。另外,光合作用和蒸腾速率对风沙流吹袭强度变化响应的趋势不同,但都属于非线性响应,一方面可能是由于风沙流强度不同,植物叶片受到胁迫程度不同,低风速下其叶片可能未受到损伤,或损伤较轻,植物光合、蒸腾、气孔导度受影响均比较小,表现出对环境胁迫反应较小或出现适应性增高,而强风沙流吹袭下其叶面机械损伤严重,气孔关闭,叶绿体的分解和叶绿素含量减少,这些都会导致其光合、蒸腾作用减弱^[2,12];另一方面蒸腾速率仅受到气孔开闭程度的调节,随风沙流增强气孔导度的非线性响应导致其蒸腾速率非线性响应,而风沙流吹袭下其光合速率的变化除了气孔调节外,可能还受到非气孔因素制约,从而出现了光合速率变化与蒸腾速率变化不一样的非线性响应^[18,20]。

植物水分利用效率是评价植物生长适宜程度的综合生理生态指标,它实质上反映了植物耗水与其干物质生产之间的关系^[16,25]。研究表明,6—12m/s 风沙流吹袭没有改变樟子松幼树 WUE 日变化规律,而 15m/s 和 18m/s 强风吹袭对樟子松幼树 WUE 日变化规律有着显著影响,导致其日变化规律由单峰曲线变为直线下降形。另外,12m/s 及其以下风沙流吹袭可以提高樟子松幼树的 WUE,而 15ms 和 18ms 强风沙流吹袭则会显著降低其 WUE。在我国干旱半干旱地区,水分是植物生产力的主要限制因子,在有限的水资源条件下,频繁发生的大风天气,将会导致植物光合能力下降,耗水量增加,降低植物的水分利用效率,从而增加水分限制作用,降低植物的生产力^[26-27]。

4 结论

通过以上对研究结果的分析和讨论,得到以下结论:1) 风沙流对樟子松幼树蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度日变化进程影响较小,没有明显改变其日变化规律,而其光合速率、气孔导度和水分利用效率的日变化曲线分别在 9、12 和 15m/s 以及以上风沙流吹袭下发生明显改变;2) 低风速风沙流吹袭可以提高樟子松幼树日均光合速率和蒸腾速率,而强风沙流吹袭导致其光合速率和蒸腾速率显著降低;;3) 低风速 9—12m/s 风沙流吹袭使气孔导度增加,强风沙流吹袭可导致其气孔导度大幅度下降,而对于胞间 CO_2 浓度则相反;4) 除 15m/s 风沙流吹袭外,其他处理的日均水分利用效率均较 CK 有所增高;4) 气孔调节是风沙流吹袭下其蒸腾速率变化的主要因素,而光合速率的变化除气孔调节外,还受制于非气孔因素。

参考文献 (References):

- [1] Kadib A A A. Function for Sand Movement by Wind. ASTTA, 1965.
- [2] 于云江,辛越勇,刘家琼,于志勇. 风和风沙流对不同固沙植物生理状况的影响. 植物学报, 1998, 40(10):962-968.
- [3] Whitehead F H. Experimental studies on the effect of wind on plant growth and development; *Helianthus annuus*. New Phytologist, 1962, 61(1): 59-62.

- [4] 于云江, 史培军, 贺丽萍, 刘家琼. 风沙流对植物生长影响的研究. 地球科学进展, 2002, 17(2):262-267.
- [5] Li F R, Zhang H, Zhang T H, Shirato Y. Variations of sand transportation rates in sandy grasslands along a desertification gradient in northern China. Catena, 2003, 53(3):255-272.
- [6] Paul P H, Rebecca P L. Simpson variable vegetation cover and episodic sand movement on longitudinal desert sand dunes. Geomorphology, 2006, 81(3/4):276-291.
- [7] Monier M, Abd E G, Wafaa M A. Soil-vegetation relationships in a coastal desert plain of southern Sinai, Egypt. Journal of Arid Environments, 2003, 55(4):607-628.
- [8] Liu Y, Schieving F, Stuefer J F, Anten N P R. The effects of mechanical stress and spectral shading on the growth and allocation of ten genotypes of a stoloniferous plant. Annals of Botany, 2007, 99(1):121-130.
- [9] 赵哈林, 何玉慧, 岳广阳, 周瑞莲. 风吹、沙埋对沙地植物幼苗生长和光合蒸腾特性的影响. 生态学杂志, 2010, 29(3):413-419.
- [10] 曲浩, 赵学勇, 岳广阳, 王少昆. 科尔沁沙地几种常见植物对风胁迫的生理响应. 中国沙漠, 2009, 29(4):668-673.
- [11] 王艳红, 何维明, 于飞海, 江洪, 余树全, 董鸣. 植物响应对风致机械刺激研究进展. 生态学报, 2010, 30(3):794-800.
- [12] 于云江, 史培军, 鲁春霞, 刘家琼. 不同风沙条件对几种植物生态生理特征的影响. 植物生态学报, 2003, 27(1):53-58.
- [13] 赵兴梁, 李万英. 樟子松. 北京:农业出版社, 1963.
- [14] 李宏印, 刘明国. 樟子松人工固沙林发展现状. 辽宁林业科技, 2003, (5):35-39.
- [15] 焦树仁. 樟子松沙地造林技术综述. 防护林科技, 2010, (6):52-54.
- [16] 吴春荣, 金红喜, 严子柱, 满多清, 马全林, 安富博. 樟子松在西北干旱沙区的光合日变化特征. 干旱区资源与环境, 2003, 17(6):144-146.
- [17] 孙存华, 李扬, 金慧丽, 王东升, 徐新娜, 陈香玲, 张亚红. 开花期藜的光合特性研究. 安徽农业科学, 2008, 36(12):4839-4840, 5232-5232.
- [18] 陈根云, 陈娟, 许大全. 关于净光合速率和胞间 CO_2 浓度关系的思考. 植物生理学通讯, 2010, 46(1):64-66.
- [19] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33:317-345.
- [20] 朱教君, 康宏樟, 李智辉, 王国臣, 张日升. 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. 生态学报, 2005, 25(10):2527-2533.
- [21] Griddings L A. Transpiration of *Silphium laciniatum*. Plant World, 1914, 35:937-942.
- [22] Russell G, Grace J. The effect of wind on grasses v: Leaf extension, diffusive conductance, and photosynthesis in the wind tunnel. Journal of Experimental Botany, 1978, 29(5):1249-1258.
- [23] Telewski F W, Jaffe M J. Thigmomorphogenesis: Field and laboratory studies of *Abies fraseri* in response to wind or mechanical perturbation. Physiologia Plantarum, 1986, 66(2):211-218.
- [24] Mitchell C A. Recent advances in plant response to mechanical stress: Theory and application. Hortscience, 1996, 31(1):31-35.
- [25] Ennos A R. Wind as an ecological factor. Trends in Ecology & Evolution, 1997, 12(3):108-111.
- [26] Grace J, Malcolm D C, Bradbury I K. The effect of wind and humidity on leaf diffusive resistance in *Sitka spruce* seedlings. Journal of Applied Ecology, 1975, 12(3):931-940.
- [27] Grace J. Plant Response to Wind. London:Academic Press, 1977.