

文章编号: 1007-0435(2001)02-0121-07

# 模拟降水量对毛乌素沙柳幼苗蒸发蒸腾的潜在影响\*

肖春旺

(中国科学院植物研究所植被数量生态学开放研究实验室,北京 100093)

**摘要:** 选择毛乌素沙地优势灌木沙柳为对象,研究 157.5、315、472.5 和 630 mm 4 种人控年降水量,对沙柳幼苗蒸发蒸腾作用的影响。结果表明,沙柳蒸发蒸腾量随着降水量的增加而逐渐增大,从 157.5 mm 增至 630 mm,日蒸散量分别为 1.63、3.11、4.37 和 5.66 mm,其中沙地蒸发量占主要部分。少量降水时,幼苗蒸腾速率明显呈现“午睡”现象,而充足降水则能消除“午睡”现象。相关分析结果表明,环境因子,如沙地含水率、太阳有效辐射、大气温度和饱和水汽压差,以及植物因素,如叶面积指数、叶片温度和气孔导度等,均能显著影响沙柳的蒸腾作用。

**关键词:** 模拟降水量;毛乌素沙地;沙柳幼苗;蒸发蒸腾作用

**中图分类号:** S793 **文献标识码:** A

## Potential Effect of Simulated Precipitation Change on the Evapotranspiration of *Salix psammophylla* Seedlings in Maowusu Sandland

XIAO Chun-wang

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany CAS, Beijing 100093)

**Abstract:** Maowusu sandland is a typical dry and semi-dry sandland in China. Water is the most important limited factor there. It is greatly affected for distribution pattern of terrestrial ecosystem and natural environment with great global change, especially global precipitation change. The response of transpiration is investigated for seedlings of *S. psammophylla*, a dominant shrub in Maowusu sandland, to the global precipitation change by artificially controlling four water supply levels of 157.5 mm, 315 mm, 472.5 mm and 630 mm. The results show that evapotranspiration of *S. psammophylla* seedling increased with the increase in water supply in Maowusu sandland. The average daily evapotranspirations for four levels of water supply were 1.63 mm, 3.11 mm, 4.37 mm and 5.66 mm, respectively. And the evaporation contributed the main part in evapotranspiration. Transpiration rate of the seedlings showed strongly midday depression under low water supply, but not under full water supply. Correlation analysis showed that meteorological variables, such as containing water rate of sandland, photosynthetic available radiation, air temperature, saturated water vapour pressure difference, and physiological variables, such as leaf area index, leaf temperature, stomatal conductance, affected transpiration of *S. psammophylla* seedlings.

**Key word:** Simulated precipitation; Maowusu sandland; *S. psammophylla* seedlings; Evapotranspiration

自工业革命以来,由于人类活动日益加剧,使得大气中的温室气体大幅度上升,其中 CO<sub>2</sub> 浓度从原来的 280 μmol/mol 升高到现在的 360 μmol/mol,而造成全球性气候变化,而温度和降水等气候因

收稿日期:2000-09-21;修回日期:2001-01-13

基金项目:国家重点专项基础研究(G1999043407),中国科学院 95 重大项目 B(KZ951-B1-108)和国家自然科学基金委 95 重点项目(49835010)

在论文完成过程中,得到张新时导师,董鸣、周广胜、郑元润和蒋高明等博士以及内蒙古鄂尔多斯林业局同志的帮助,谨此致谢!

作者简介:肖春旺(1969-),男,云南景洪人,大学讲师,中国科学院植物研究所博士生,主要从事全球变化研究。主持贵州省自然科学基金一项,参加国家 973 计划、中国科学院和国家自然科学基金委资助项目多项。发表论文 20 余篇

素的全球变化,必然影响到现存陆地生态系统分布格局和导致自然环境的变化<sup>[1~6]</sup>。毛乌素沙地处在我国北部沙区中部,总面积 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。它的发展、历史变迁及现实状况,很大程度反映半干旱、干旱沙区存在的人类活动与自然环境间相互关系中的许多典型问题,其中水分是最大的限制因子<sup>[7,8]</sup>。当前沙漠化严重,蒸发强烈,自然条件十分恶劣,极易受到全球降水变化的影响。毛乌素沙区生态系统以灌木为主,其中沙柳(*Sabix psammophylla*)是优势灌木<sup>[9]</sup>,在植被中占有重要地位。可作为天然防护林,对稳定沙区生态环境具有重要意义。本文以沙柳为对象,设计4种人控降水量,研究沙柳蒸腾作用对不同降水量的反应。为该地区沙—植物—大气连续体(SPAC)的水分循环理论,为保护沙区自然环境,防止沙漠化提供实验依据和部分参数。

## 1 材料和方法

### 1.1 自然概况

试验区设在中国科学院植物研究所内蒙古伊克昭盟鄂尔多斯沙地草地生态研究定位站(新站),地处 $39^{\circ}29.66' \text{ N}$ , $110^{\circ}11.47' \text{ E}$ ,海拔1295 m。年均气温 $6.0 \sim 8.5 \text{ C}$ ,最冷月(1月)、最热月(7月)为 $-10 \text{ C}$ 和 $22 \text{ C}$ ,年均降水量358.3 mm,主要集中于6~9月。属荒漠—草原、草原—森林过渡地带。土壤以淡栗钙土和沙性淡栗钙土为主。详见张新时<sup>[7]</sup>和陈仲新等<sup>[10]</sup>。沙柳是毛乌素沙地优势灌木种,具有良好的防风固沙性能,可作为防护林的重要组成部分。

### 1.2 供试材料

一年生沙柳幼苗取自生态站附近沙丘。1999年5月3日选生长良好、大小一致的80株幼苗,随机分成4组,每组20株,分别植入4个水泥沙池(高67 cm、宽1.5 m、长2 m)(下设出水管道)。另设4个沙池对照区。水泥池顶部挂有防水布阻隔自然降水,四周通风,接近自然状况。4月27日各水泥池装入60 cm深的沙土。

### 1.3 实验处理

设4种水分处理,每次降水分别为4.5、9、13.5和18 mm,总降水量为157.5、315、472.5和

630 mm。实验期105 d(5月24日~9月5日)。5月24日下午5~6时,第1次降水,以后每隔2天降1次,共35次。天晴时将防水布打开,阴天和夜晚遮盖,以防天然降水。生长期进行除草和防治病虫害等田间管理。

### 1.4 测试方法

**1.4.1 沙池贮水量测定** 各沙池沿对角线成S型取7个沙柱,自上而下按15 cm分成4层,共计28个沙样,用烘干法测含水率,取平均值乘以沙池干沙重即为沙池贮水量。

**1.4.2 蓄水变化量** 计算两个时段沙池蓄水量之差求出,可为正,也可为负。

**1.4.3 流出沙池水量** 每次降水后,打开沙池水管阀门,测试流出水量后,合计而得。

**1.4.4 沙池蒸腾量** 利用本试验的水分平衡公式

$$P = E + T + F + A \quad (1)$$

式中P为人控降水量,E为沙池蒸发量,T为植物蒸腾量,F为流出水量,A为沙池蓄水变化量。

根据已知的人控降水量P,沙池蓄水变化量A和流出水量F,计算沙地蒸发量,进而得出植物蒸腾量。

**1.4.5 叶面积测定** 在各降水处理中随机选取10株幼苗作为观测株,测试幼苗大于1 cm的叶片长,记录叶片数。叶面积测定是随机在非观测株选取大小不等的70片叶,通过美国CI-203型面积仪测得叶片面积和叶长,再求出 $Y(\text{叶面积}) = 0.4686X(\text{叶长}) - 0.3181$ ( $R = 0.912, N = 70$ )的线性方程。利用线性方程求出全部叶面积,再除以水泥池面积求得叶面积指数。

**1.4.6 蒸腾速率以及影响因子测定** 1999年7月23日,各降水处理随机选3~5株上位成熟完好叶片5~6片进行以下光合生理测定。采用LCA4型便携式 $\text{CO}_2$ 分析仪测定幼苗蒸腾速率( $E, \text{ mmol H}_2\text{O} / \text{ m}^2 \cdot \text{ s}$ ),气孔导度( $g_s, \text{ mmol} / \text{ m}^2 \cdot \text{ s}$ ),叶片温度( $T_l, \text{ C}$ ),及其光合有效辐射( $\text{PAR}, \mu\text{mol photons} / \text{ m}^2 \cdot \text{ s}$ ),大气 $\text{CO}_2$ 浓度( $\text{CO}_2, \mu\text{mol} / \text{ mol}$ ),温度( $T_a, \text{ C}$ ),饱和水汽压差( $\Delta e_w, \text{ mbar}$ )。

### 1.5 数据分析

利用SPSS统计系统进行相关分析<sup>[11]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 蒸发蒸腾季节变化和日变化

2.1.1 从图1可见,不同降水量,沙柳幼苗蒸腾和沙地蒸发量总体季节变化大体一致,在实验前15天(5月下旬至6月上旬),幼苗蒸腾量和沙地蒸发量逐渐增大,至7月中旬前达最大值,之后逐渐降低。4种降水量的幼苗蒸腾和沙地蒸发曲线呈峰型。随着降水量的增加,幼苗蒸腾和沙地蒸发呈增大趋势。从降水量157.5 mm增至630 mm,日蒸腾量分别为0.45、0.65、0.89和1.29 mm,沙地蒸发量为1.18、2.46、3.58和4.37 mm,日蒸散量为1.63、3.11、4.37和5.66 mm。在蒸散所消耗的水中,裸露沙地的蒸发量占主要部分,降水630 mm为77.13%,降水472.5 mm为80.07%,降水315 mm为79.14%,降水157.5 mm为72.41%。可见毛乌素沙柳幼苗沙地蒸散作用的主体是沙地蒸发。

2.1.2 不同降水量,沙柳蒸腾速率(E)日变化具有明显差异(图2)。随着降水量的增大,E也逐渐增大,且E日变化曲线从弱双峰型转变为正单峰型,其中降水157.5 mm处理的幼苗E值最低,在10时和14时各有1个弱峰,且前峰小于后峰,在13时有个弱谷,有明显的“午睡”现象,表明幼苗受到明显水分胁迫。而增加降水量,则能有效消除“午睡”现象。另外,315、472.5和630 mm 3种降水量,幼苗的E日变化曲线十分相似,几乎从6时一直上升到14时,之后下降。

### 2.2 影响沙柳幼苗沙地蒸发蒸腾的环境因子

#### 2.2.1 沙地含水率对蒸发蒸腾的影响

植物蒸发蒸腾与土壤水分状况有着密切联系<sup>[12]</sup>。从图3可见,不同降水量的沙柳沙地含水率季节变化很大,随着降水量的增加,沙地含水率逐渐增大。从图4可见,不同降水量的沙地含水率与沙地日蒸发量呈显著线性正相关,表明随着降水量的增加,沙地含水率逐渐增加,而沙地含水率的增大,显著有利于沙地蒸发。但是,不同降水量的沙地含水率与幼苗日蒸腾量和沙地蒸散量几乎没有线性关系。因为在实验开始时,沙柳幼苗较小,生长慢,蒸腾能力弱,而此时的沙地含水率较高。随着幼苗的逐渐生长,蒸腾变大,蒸发则因气温升高而加剧,导致沙地

含水率逐渐下降。在实验结束时,因气温下降,沙地蒸发变弱,幼苗生长缓慢,蒸腾相对较弱,沙地含水率呈增高趋势。而沙地日蒸散量与含水率不呈线性相关,主要是因为沙地日蒸散量受幼苗蒸腾作用的

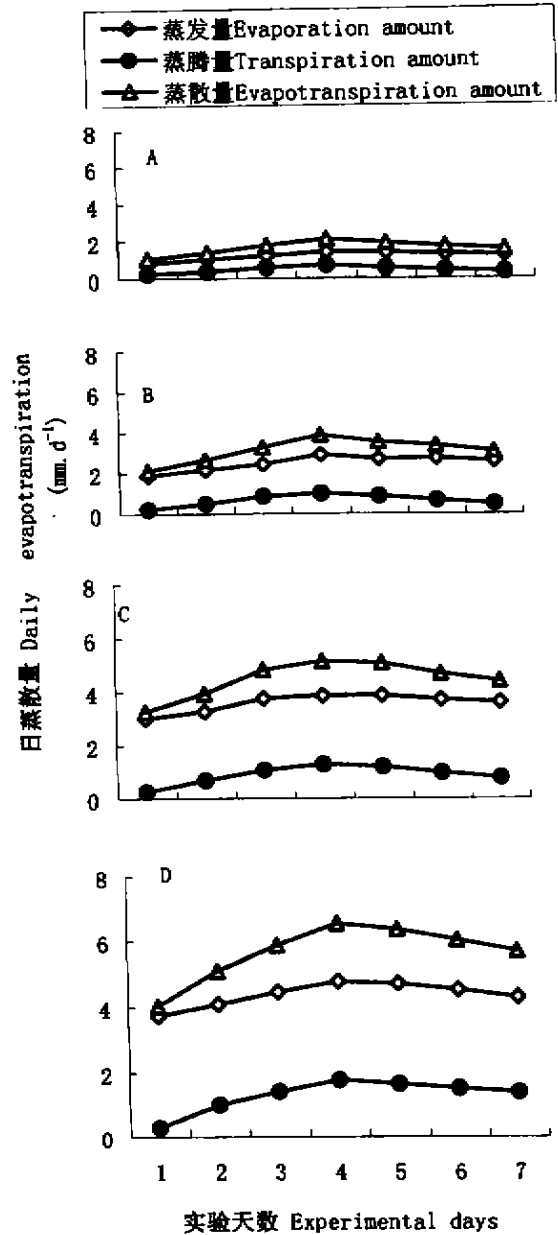


图1 降水后沙柳蒸发蒸腾量季节动态(1999年5~9月)  
A、B、C和D图分别代表157.5、315、472.5和630 mm降水量  
Fig. 1 The seasonal dynamics of evapotranspiration water of *S. psammophylla* under different supply from May to Sept., 1999. A, B, C and D figures represent the 157.5 mm, 315 mm, 472.5 mm and 630 mm water supply treatments, respectively

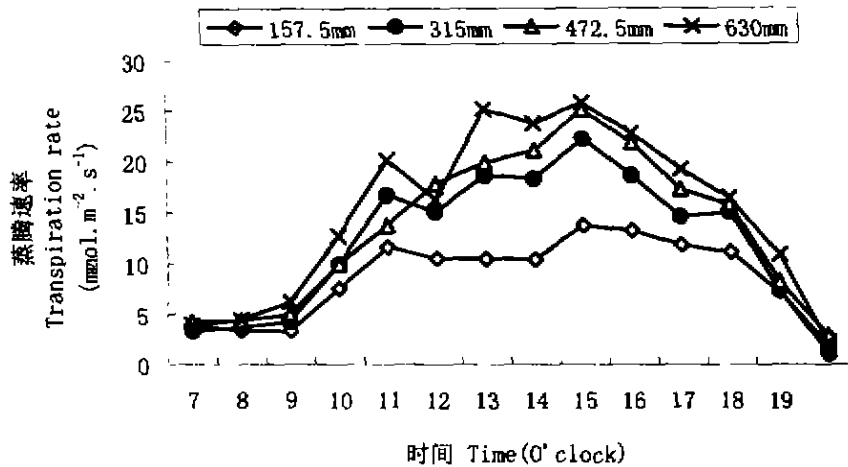


图2 降水后沙柳幼苗蒸腾速率日变化(1999年7月31日)

Fig. 2 Diurnal changes of transpiration rate of *S. psammophylla* seedling under different water supply in Maowusu on 31 July, 1999

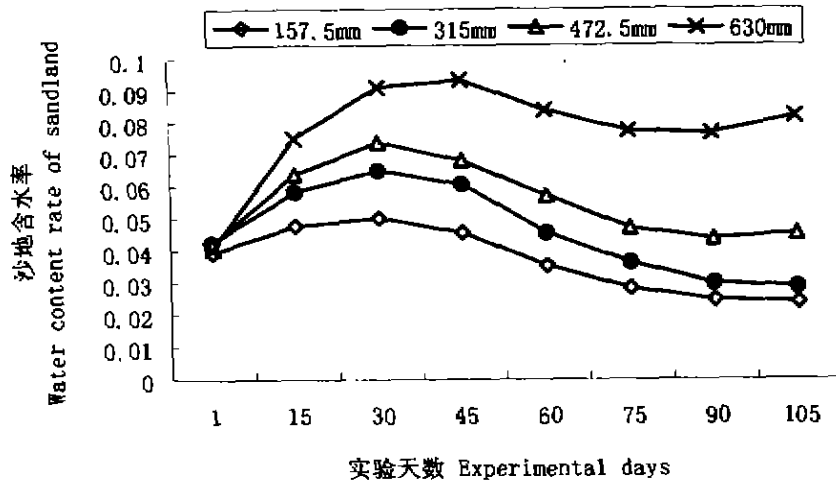


图3 降水后沙地含水率季节变化(1999年5~9月)

Fig. 3 Seasonal changes of containing water rate of sandland under different water supply from May to Sept. 1999

影响。尽管不同降水量沙地含水率与幼苗日蒸腾量不呈线性相关,然而,将4种降水量沙地含水率与幼苗日蒸腾量的散点作为整体处理,它们之间具有显著的回归直线关系( $F=10.83 > F_{0.01}(1,26)=7.72$ ,  $P < 0.01$ ,  $R=0.54$ )。该结果表明,沙地含水率的高低对沙柳蒸腾量的影响显著。

### 2.2.2 环境因子对沙柳幼苗蒸腾速率的影响

太阳有效辐射,大气温度,大气 $CO_2$ 浓度和饱和水汽压差等大气因子对沙柳蒸腾作用均有很大的影响作用,这方面已有大量报道研究<sup>[3-15]</sup>。太阳有效辐射,大气温度和饱和水汽压差均对不同降水量

的沙柳幼苗蒸腾速率影响较大,其中太阳有效辐射与沙柳幼苗蒸腾速率的联系最为密切,大气温度次之,饱和水汽压差再次,而大气 $CO_2$ 浓度与沙柳幼苗蒸腾速率相关性较小(表1)。

### 2.3 影响沙柳蒸腾的植物因素

2.3.1 植物蒸腾作用受外界环境的影响是复杂的,同时,植物本身诸多特征,如叶面积、叶表面结构、叶片气孔导度和叶温等变量同样影响着植物的蒸腾作用。因为蒸腾主要是通过叶表面消耗水汽,因此蒸腾与叶面积指数之间应呈一定相关性。4种降水量的

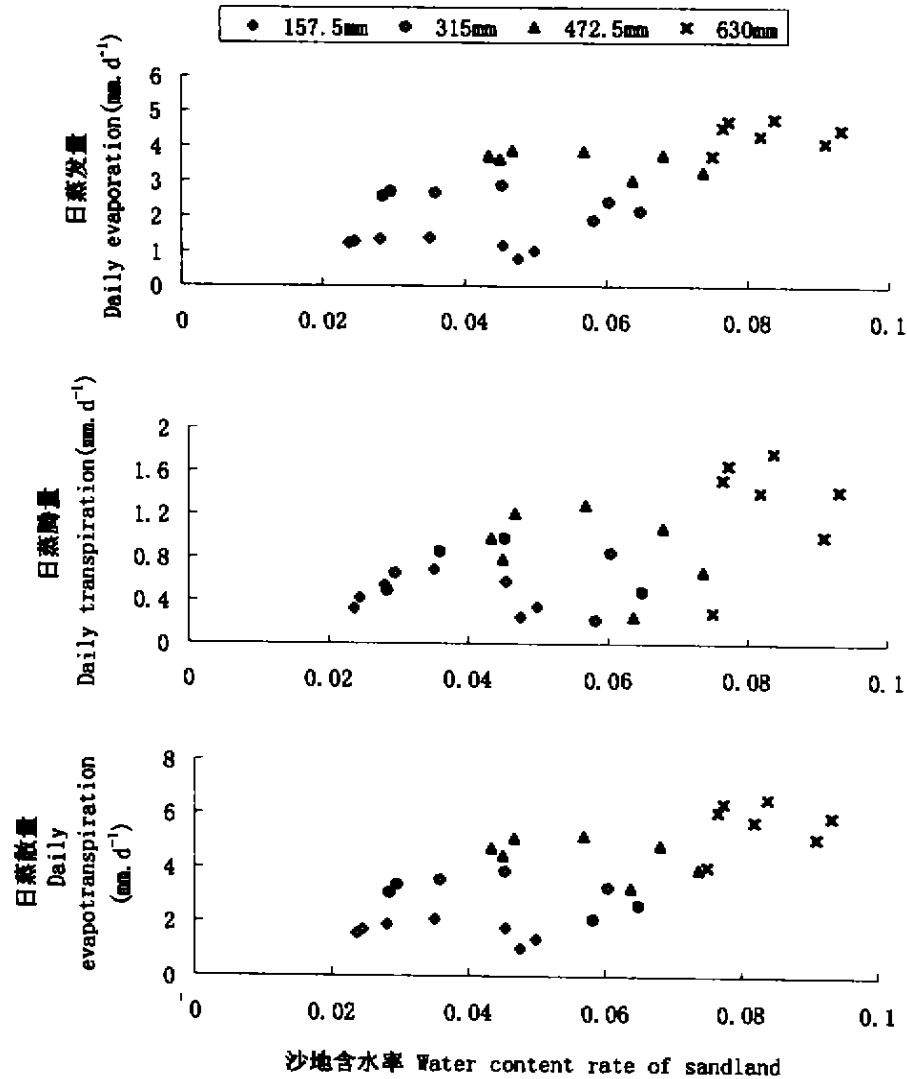


图 4 沙柳幼苗日蒸发蒸腾量与沙地含水率的关系

Fig. 4 Relationship between daily evapotranspiration of *S. Psammophylla* seedlings and containing water rate of sandland

表 1 沙柳幼苗蒸腾速率与环境因子相关系数

Table 1 Correlation coefficients between meteorological variables and transpiration rate of *S. psammophylla* seedlings

降水处理(mm) Water supply treatment(mm)	因素 Factor			
	光合有效辐射 PAR	大气温度 <i>T<sub>a</sub></i>	大气 CO <sub>2</sub> 浓度 <i>C<sub>a</sub></i>	饱和水汽压差 <i>Δe<sub>w</sub></i>
157.5	0.931**	0.922**	-0.573	0.849**
315.0	0.955**	0.922**	-0.492	0.833**
472.5	0.910**	0.932**	-0.523	0.879**
630.0	0.937**	0.928**	-0.463	0.836**

显著水平 Significant level: \*P<0.05, \*\*<0.01

幼苗日蒸腾量与叶面积指数的关系非常相近。日蒸腾量开始时随着叶面积指数的增加而增大,呈明显的线性相关,之后则随着叶面积的增大而减少,且随着降水量的增加,减少幅度逐渐下降。其原因是实验开始时(5月下旬~6月上旬),幼苗生长较弱,叶面积指数较小,蒸腾能力相对较小。6月中旬~8月初,随着幼苗迅速长大,叶面积指数显著增大,进而使蒸腾量升高。8月初以后,虽然叶面积仍在生长,但叶

片相互遮蔽加强,且大量叶片逐渐衰老,加之实验后期气温下降,使得幼苗日蒸腾下降,这与 Singh 等<sup>[16]</sup>和郑海雷等<sup>[17]</sup>研究结果较一致(见图5)。尽管不同降水量的叶面积指数与日蒸腾量不呈线性相关,然而,将叶面积指数与日蒸腾量的散点作为整体处理,它们之间具有显著的回归直线关系( $F = 12.61 > F_{0.01(1,26)} = 7.72, P < 0.01, R = 0.57$ )。结果表明,幼苗叶面积指数显著影响幼苗的蒸腾。

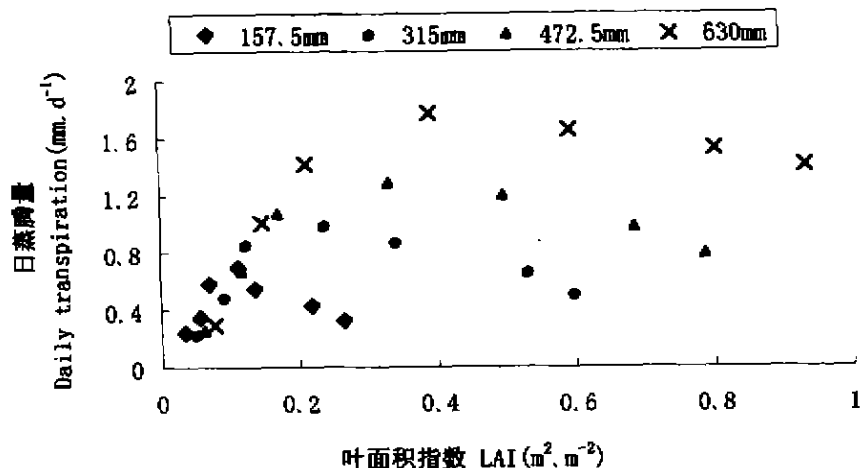


图5 沙柳幼苗日蒸腾量与叶面积指数相关性

Fig. 5 Relationship between daily transpiration and leaf area index(LAI) of *S. psammophylla* seedlings growing in the different water supply

表2 沙柳幼苗蒸腾速率与生理变量相关系数

Table 2 Correlation coefficients between physiological variables and transpiration rate of *S. psammophylla* seedlings

降水处理(mm) Water supply treatment (mm)	因素 Factor	
	气孔导度 <i>g<sub>s</sub></i>	叶片温度 <i>T<sub>l</sub></i>
157.5	0.529*	0.876**
315.0	0.790**	0.790**
472.5	0.695*	0.809**
630.0	0.737**	0.679**

显著水平 Significant level: \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$

2.3.2 除叶面积指数外,蒸腾作用仍受叶片气孔导度的影响,主要是通过气孔进行的,气孔阻力是影响蒸腾的主要阻力。环境条件适宜,则气孔打开,气孔阻力减小,有利于蒸腾作用,相反如水分胁迫,植物叶片保卫细胞的膨压下降,促使气孔关闭,导度下降,气孔阻力增高,则影响蒸腾<sup>[12]</sup>。不同降水量,沙柳幼苗蒸腾与气孔导度,呈显著相关,表明气孔导度随着降水量的变化而变化,以此影响着蒸腾速率。同

时,沙柳叶片温度与蒸腾速率相关显著(表2)。

### 3 结论

3.1 毛乌素沙柳幼苗日蒸发蒸腾量随着降水量的增加而增大。在157.5 mm降水量,沙柳蒸腾速率有明显“午睡”现象,而增加降水则能有效消除“午睡”现象。

3.2 在环境因子中,沙地含水率显著影响沙地蒸发量。同时,沙地含水率,太阳有效辐射,大气温度和饱和水汽压差显著影响沙柳幼苗蒸腾作用。

3.3 在植物因素中,叶面积指数、叶片温度和气孔导度均显著影响沙柳蒸腾作用。

### 参考文献

- [1] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J T. Intergovernmental panel on climate change. climate change: The IPCC Scientific Assessment [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

- [2] Houghton J T, Callender B A, Varney S K. Intergovernmental panel on climate change. Climate Change. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [3] Houghton J T, Meira Filho L G, Bruce J, Hoesung L, Callender B A, Haites E, Harries N, Maskell K. Intergovernmental panel on climate change. climate change, radiative forcing of climate change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [4] Graham R W, Erism E C. Effects of global climate change on the pattern of terrestrial biological communities [J]. Trends Ecol. Evolut., 1990, 5: 289~292
- [5] Tyree M T, Alexander J D. Plant water relations and the effects of elevated CO<sub>2</sub>: A review and research [J]. Vegetatio, 1993, 104/105: 47~62
- [6] Dahlman R C. CO<sub>2</sub> and plants: Revisited [J]. Vegetatio, 1993, 104/105: 339~355
- [7] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式 [J]. 植物生态学报, 1994, 18: 1~16
- [8] 姚洪林, 魏成泰, 廖茂彩. 内蒙古毛乌素沙地开发整治研究中心概况. 王家祥主编: 毛乌素沙地开发整治研究中心研究文集(第1集) [M]. 呼和浩特: 内蒙古出版社, 1992. 1~7
- [9] 董学军, 张新时, 杨宝珍. 依据野外的蒸腾速率对几种沙地灌木水分平衡的初步依据 [J]. 植物生态学报, 1997, 21: 208~225
- [10] 陈仲新, 谢海生. 内蒙古毛乌素沙地主要景观生态类型灌丛生物多样性初步研究 [J]. 生态学报, 1994, 14: 345~354
- [11] 卢纹岱, 朱一力, 沙捷, 朱红兵. SPSS for windows 从入门到精通 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1997, 318~351
- [12] O. L. 朗格, L. 卡彭, E. D. 舒尔策. 水分与植物生活——问题与研究现状 [M]. 樊梦康等译. 北京: 科学出版社, 1985, 40~87
- [13] 沈允钢, 王天铎. 光合作用——从机理到农业 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978, 70~90
- [14] Löscher R, Tenhunen J D. Stomatal responses to humidity-phenomenon and mechanism [A]. In: Jarvis PG, Mansfield TA (eds.). Stomatal Physiology [C]. Cambridge University Press, 1981, 137~161
- [15] Mansfield T A, Kavian W J. Stomata and stomatal mechanism. In: Paleg LG, Aspinall D (eds.). The physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants [M]. New York, London, Toronto, San Francisco, Academic Press Sydney, 1981, 315~346
- [16] Singh K P, Singh P, Sharma H C. Diurnal patterns of photosynthesis, evapotranspiration and water use efficiency in Mustard at different growth phases under field conditions [J]. Photosynthetica, 1986, 20: 117~123
- [17] 郑海雷, 黄子琛. 绿洲生态条件下春小麦蒸发蒸腾特征及其影响因素 [J]. 植物生态学报, 1994, 18: 362~371

(上接 120 页)

的活性有机质、含水量、全氮和全磷含量的高低和土壤总孔隙度的大小。

3.2 土壤微生物生物量和呼吸速率在 8 种环境中各不相同, 相关分析结果表明, 土壤活性有机质、全磷、温度和 pH 是限制微生物生物量和微生物呼吸速率大小的最重要因素。

3.3 模糊分析表明, 虎尾草群落 (sp<sub>7</sub>), 杂草群落 (sp<sub>2</sub>) 与羊草群落 (sp<sub>4</sub>) 中的微生物数量、生物量和呼吸速率最相似, 在未来的演替过程中最易形成羊草群落中的土壤微生物特征。碱茅群 (sp<sub>3</sub>) 和碱蓬群落 (sp<sub>6</sub>) 与羊草群落 (sp<sub>4</sub>) 土壤微生物的相似程度较小。隐子草 (sp<sub>1</sub>), 拂子茅 (sp<sub>5</sub>) 和芦苇群落 (sp<sub>8</sub>) 与羊草群落 (sp<sub>4</sub>) 土壤微生物的相似程度居中。同时也间接地说明植物群落的演替关系对土壤微生物总体生长和代谢有较大的影响。

## 参考文献

- [1] 李建东, 刘建新. 吉林省长岭种马场附近草原的类型、动态及其生态分布规律 [J]. 吉林农业科学, 1981, 3: 79~85
- [2] 内蒙古大学生物系. 植物生态学实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1986, 69, 125
- [3] 中国科学院土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法 [M]. 北京: 科学出版社, 1985, 44, 85
- [4] 许光辉, 郑洪元, 张德生. 土壤微生物分析方法手册 [M]. 北京: 农业出版社, 1986, 226, 233
- [5] 廖仰南. 草原土壤微生物生物量的测定方法 [A]. 草原生态系统研究 [C], 1988, (2), 233~237
- [6] 中国土壤学会农业专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1983, 102, 166
- [7] 张贤珍. BASIC 语言农业数据统计计算程序 [M]. 北京: 农业出版社, 1990, 493, 496
- [8] 袁嘉祖. 两个生态环境相似性计算方法的探讨 [J]. 生态学杂志, 1987, 6(6): 55~56