

# CO<sub>2</sub> 浓度和辐射强度变化对沙柳光合作用速率影响的模拟研究

郭建平, 高素华

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 沙柳是毛乌素沙地防护林的主要灌木树种, 模拟研究沙柳对 CO<sub>2</sub> 浓度和辐射强度的响应有利于准确有效地制定全球变化下的沙漠化防治和水土流失的战略对策。结果表明, 沙柳的光合作用速率对 CO<sub>2</sub> 浓度的响应表现为线性关系, 对辐射的响应表现为对数函数关系。沙柳光合作用速率有随辐射强度增加和/或 CO<sub>2</sub> 浓度的升高而增大的变化规律。CO<sub>2</sub> 浓度越高, 沙柳的光合作用速率对辐射的反应越明显。同样, 辐射越强, 沙柳的光合作用速率对 CO<sub>2</sub> 浓度的反应越敏感。在高辐射条件下增加大气中 CO<sub>2</sub> 的“施肥效应”比低辐射条件下要显著。土壤干旱对沙柳的光合和暗呼吸都有抑制作用, 使沙柳的生理过程受到影响, 从而使沙柳对 CO<sub>2</sub> 浓度和辐射的反应规律不如土壤水分适宜时显著。

**关键词:** 沙柳; CO<sub>2</sub> 浓度; 辐射强度; 生长模拟研究

## Growth chamber study on the impact of CO<sub>2</sub> concentration and radiant intensity on *Salix psammophila* photosynthetic rate

GUO Jian-Ping, GAO Su-Hua (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2): 181~185.

**Abstract:** CO<sub>2</sub> in the atmosphere is a necessary substance for plant photosynthesis, and solar radiation is a necessary energy for plant photosynthesis. CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere is increased by human activities, which results in changes in temperature, water and radiation. Studying the impact of changes in CO<sub>2</sub> concentration, soil water, radiation and other eco-environmental factors on plants has been one of the foci in global change studies. *S. psammophila* is one of the dominant shrubs in Mu Us sandland. The study on the response of *S. psammophila* photosynthetic rate to CO<sub>2</sub> concentration and radiation change can provide a basis for human intervention to renew and expand natural vegetation, conserve and improve an eco-environment, advance sustainable use of water resources and establish sand plant succession, renewal and sustainable development under global change.

The experiment was conducted in growth chambers; the *S. psammophila* seedlings, one year old, were cultivated in pots under 2 treatments of soil water content and 8 treatments of radiant intensities as well as eight to nine treatments of CO<sub>2</sub> concentrations. Photosynthetic rate was measured by using a Li-6400 portable photosynthesis system. The analysis shows that under constant radiation the response of *S. psammophila* photosynthetic rate to CO<sub>2</sub> concentration is a linear function, and under constant CO<sub>2</sub> concentration the response to radiation is a logarithm function, under different soil moistures. *S. psammophila* photosynthetic rate increases with radiant intensity and/or CO<sub>2</sub> enrichment. Under higher CO<sub>2</sub> concentration, the reaction of *S. psammophila* photosynthetic rate to radiation is more remarkable. Similarly, for more radiation, the reaction to CO<sub>2</sub> concentration is more sensitive. The “fertilization effect” of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment under strong radiation is therefore more remarkable than under weak radiation. Soil drought influences *S. psammophila* physiological processes in

基金项目: 国家重点基础发展规划研究资助项目 (G1999043407)

收稿日期: 2002-12-12; 修订日期: 2003-08-10

作者简介: 郭建平 (1963~), 男, 江苏人, 硕士, 副研究员, 主要从事农业气象灾害和全球变化研究。E-mail: gjp@cams.cma.gov.cn

Foundation item: The National Key Fundamental Study Project (Grant No. G1999043407)

Received date: 2002-12-12; Accepted date: 2003-08-10

Biography: 郭建平, Master, Associate professor, mainly engaged in the agrometeorological disaster and global change. E-mail: gjp@cams.cma.gov.cn

photosynthesis and dark respiration. Consequently, the response of *S. psammophila* to CO<sub>2</sub> and radiation under soil drought is not more remarkable than that under sufficient soil water.

**Key words:** *Salix psammophila*; CO<sub>2</sub> concentration; radiant intensity; growth chamber study

文章编号:1000-0933(2004)02-0181-05 中图分类号:Q945, Q948.1, S152.75, S154.4 文献标识码:A

人类活动加剧了温室气体,尤其是 CO<sub>2</sub> 的排放。据估计,大气中 CO<sub>2</sub> 浓度正以 1.5 μmol/(mol·a) 的速度增加,到 2100 年将升高到 700 μmol/mol<sup>[1]</sup>。气候变暖导致不同区域的蒸散量改变,影响水平衡,使季节性的降水格局发生变化<sup>[2~4]</sup>,从而引起不同地区的水资源变化<sup>[5]</sup>。而降水的变化并不意味着干旱化趋势的减缓,因为温度的增加将使潜在蒸发增加,从而使某些地区变得更加干燥。因此,随着社会和经济等方面的发展,对水资源的合理开发与利用日趋迫切<sup>[5,6]</sup>。据估计,在 21 世纪来临之际,世界上将有 1/4 以上人口将生活在严重缺水的地区。特别是对经济高速发展的我国,由于工业和农业用水的急剧增加,将导致地下水位的进一步下降,河流断流等现象,从而影响陆地生态系统及国民经济的可持续发展<sup>[7]</sup>。为此,研究 CO<sub>2</sub> 浓度、土壤水分、辐射等生态环境因子对植物的影响已成为全球变化研究的热点之一<sup>[8,9]</sup>。

Hamerlynck 等<sup>[10]</sup>研究了沙漠灌木(*Larrea tridentate*)幼苗在 3 个 CO<sub>2</sub> 浓度梯度、2 个水分处理条件下对不同高温时间长度的响应与适应机制。研究表明,对供水良好的幼苗,中午的水势无显著影响,但在干旱处理条件下的 CO<sub>2</sub> 浓度升高可提高因干旱胁迫所造成的水势降低,说明高 CO<sub>2</sub> 浓度具有缓解干旱胁迫的作用,有助于增强植物的抗旱性。一些研究指出,较低 CO<sub>2</sub> 浓度可促进植物地上部分的生长,而土壤水分胁迫则可促进地下部分的生长<sup>[11,12]</sup>,这与环境因子改变了植物的光合产物的分配有关<sup>[12,13]</sup>。干旱对物质分配的影响还因物种或品种的不同而不同<sup>[14~16]</sup>,而不同的生物量分配方式也与植物对水分的利用及适应干旱胁迫有关<sup>[17]</sup>。植物的根部对于土壤水分的利用是十分敏感和至关重要的<sup>[18]</sup>。因此,研究植物对全球环境变化的响应与适应机制是理解全球变化对陆地生态系统的影响以及制定适应和缓解全球变化不良影响对策的关键。

毛乌素沙地地处中国北部沙区系列的中部,是荒漠和草原的过渡带,在很大程度上反映了中国干旱、半干旱沙区人类活动与自然环境间的许多典型问题。水分是该区的主要限制因子。沙柳是该区的优势灌木之一。由于全球 CO<sub>2</sub> 浓度升高将导致气温升高和降水量变化,从而引起辐射和土壤相对湿度的变化。以往的研究大都集中在自然植被的分布特征,群落结构、生产力和光合作用方面<sup>[19]</sup>。关于大气中 CO<sub>2</sub> 浓度升高和土壤干旱化对半干旱沙漠地区灌木影响的研究主要集中在生物量和生长量方面<sup>[20~22]</sup>。在不同土壤相对湿度情况下沙柳光合作用速率对 CO<sub>2</sub> 浓度和辐射响应的研究至今还未见系统的报道。因此,本研究试图通过模拟试验,模拟在不同土壤相对湿度下沙柳的光合特性对 CO<sub>2</sub> 浓度和辐射的响应,从而可为恢复和营造该区的自然植被、保护和改善生态环境、促进水资源的可持续利用以及制定全球变化下沙地植物的演替更新和可持续发展提供基础依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

本文选用毛乌素沙地中优势灌木沙柳为研究对象。沙柳是杨柳科柳属多年生落叶丛生中生灌木,高可达 2.0~4.0 m,单叶、叶条形、无毛,长 4~8 cm,边缘有锯齿,侧脉 20 对,柔荑花序无柄,花基部有长圆形的全缘小叶。沙柳抗逆性较强,不仅抗旱、寒、高温、风,而且耐沙埋,生长快且萌发力强,是干旱半干旱及沙漠地区优良的速生灌木,也是毛乌素沙地优势灌木。

### 1.2 试验环境

人工模拟试验在黑龙江农业科学院寒地生态实验室的人工气候室内进行。人工气候室是自然光玻璃室,每间面积 18 m<sup>2</sup>、空气湿度、温度可自动调控,并可以采用生理日光灯自动补光。

### 1.3 试验设计

沙柳苗木在内蒙古自治区毛乌素沙地于 2002 年 5 月 12 日取苗移栽于直径 33 cm,高 26 cm 的瓦盆中。每盆定植 5 株,在自然状态下生长。

于观测前 10 d 开始土壤水分处理,土壤水分分别占田间持水量的 65% (土壤相对湿度适宜) 和 35% (土壤有干旱)。

采用液态钢瓶 CO<sub>2</sub> 为气源与人工气候室内的自然空气混合,配比成浓度均匀的高 CO<sub>2</sub> 浓度空气。在土壤干旱时共设置 9 个 CO<sub>2</sub> 浓度处理,分别为 373、533、639、729、878、1034、1156、1337、1513 μmol/mol;在土壤水分适宜时共设置 8 个 CO<sub>2</sub> 浓度处理,分别为 378、518、639、695、830、1120、1314、1517 μmol/mol。

辐射强度采用 Li-6400 便携式光合作用系统自带光源控制,具有控制精度高,稳定性好的特点。试验共设置 8 个辐射强度处理,分别为 30、50、200、500、800、1000、1200、1400 μmol/(m<sup>2</sup>·s)。

光合作用速率的观测在 2002 年 9 月 5~7 日进行,观测设备为 Li-6400 便携式光合作用系统。为了避免不同叶片对辐射和 CO<sub>2</sub> 浓度反应的差异,观测取同一叶片中间的相同部位进行,每次测定 3 个重复。测量时的大气温度控制在 26.5 ± 0.5 °C。

## 2 结果分析

植物生物量的累积主要通过光合作用,光合作用速率的大小可直接反应植物生长量的大小变化。植物的光合作用速率主要与土壤相对湿度、大气温度、辐射和 CO<sub>2</sub> 浓度等环境因子有关。

2.1 光合作用速率对 CO<sub>2</sub> 浓度响应的模拟研究

通过试验资料表明,在不同的土壤相对湿度和辐射条件下,沙柳的光合作用速率对 CO<sub>2</sub> 浓度的响应呈线性关系,即:

$$y = a + bx_1$$
 (1)

式中,y 为沙柳的光合作用速率(μmolCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s)),x<sub>1</sub> 为 CO<sub>2</sub> 浓度(μmol/mol),a、b 为回归系数(表 1)。

表 1 沙柳光合作用速率对 CO<sub>2</sub> 浓度响应的拟合方程

辐射 Radiation (μmol/(m <sup>2</sup> ·s))	土壤相对湿度 35% Relative soil moisture			土壤相对湿度 65% Relative soil moisture		
	a	b	r	a	b	r
30	-4.7466	0.0040	0.7680	-2.6782	0.0016	0.6335
50	-10.7116	0.0151	0.9385	-6.5107	0.0101	0.9841
200	-9.3376	0.0200	0.9891	-6.9261	0.0199	0.9844
500	-9.6947	0.0254	0.9901	-3.8865	0.0246	0.9522
800	-7.8449	0.0260	0.9828	-4.9741	0.0297	0.9617
1000	-5.2241	0.0252	0.9816	-4.6486	0.0322	0.9733
1200	-5.8611	0.0271	0.9873	-3.4569	0.0322	0.9773
1400	-5.6420	0.0273	0.9889	-2.3485	0.0324	0.9916

由表 1 可见,在 2 种土壤相对湿度和 8 个辐射强度下,沙柳光合作用速率随 CO<sub>2</sub> 浓度呈明显的线性关系,所有的拟合方程都通过 0.01 的显著性水平检验。

回归系数 a 的理论意义是表示当大气中 CO<sub>2</sub> 浓度为 0 时沙柳的光合作用速率(负值表示呼吸作用大于光合作用),当然,在现实中,这种情况不会发生。由表 1 结果可知,在较低的辐射强度(30μmol/(m<sup>2</sup>·s))下,a 值较大。而当辐射强度超过 50 μmol/(m<sup>2</sup>·s)时,回归系数 a 基本是随辐射强度增强而增大的趋势,说明在相同的土壤相对湿度和 CO<sub>2</sub> 水平下,辐射强度增加能促进沙柳光合作用速率增大。此外,也表现出了土壤相对湿度越小 a 值变小的变化趋势,这说明了土壤水分对沙柳的光合作用有抑制作用。而回归系数 b 说明沙柳光合作用速率随 CO<sub>2</sub> 浓度变化的变化速率,b 值越大,说明沙柳光合作用速率对 CO<sub>2</sub> 浓度变化的反应越敏感。由表可以看出,b 值的基本变化趋势都是随辐射强度增大而增大。由此说明了在较强的辐射下,增加大气中 CO<sub>2</sub> 的“施肥效应”比低辐射条件下要显著。同时可以看出,在土壤相对湿度适宜时 a、b 的变化规律要比在土壤有干旱胁迫时明显得多,这说明了土壤干旱可能使沙柳的生理过程受到影响。

2.2 光合作用速率对辐射强度响应的模拟研究

通过试验资料表明,在不同的土壤相对湿度和 CO<sub>2</sub> 浓度条件下,沙柳的光合作用速率对辐射的响应呈对数关系,即:

$$y = a + b\ln(x_2)$$
 (2)

式中,y 为沙柳的光合作用速率(μmolCO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s)),x<sub>2</sub> 为辐射强度(mmol/(m<sup>2</sup>·s)),a、b 为回归系数(表 2)。

表 2 沙柳光合作用速率对辐射强度响应的拟合方程

CO <sub>2</sub> 浓度 CO <sub>2</sub> concentration (μmol/mol)	土壤相对湿度 35% Relative soil moisture			CO <sub>2</sub> 浓度 CO <sub>2</sub> concentration (μmol/mol)	土壤相对湿度 65% Relative soil moisture		
	a	b	r		a	b	r
373	-6.8094	1.4205	0.8971	378	-11.3313	2.2315	0.8444
533	-17.7599	3.5585	0.9584	518	-19.4923	4.7233	0.9883
639	-13.0225	3.1245	0.9894	639	-19.0133	4.8175	0.9878
729	-20.3072	4.7616	0.9954	695	-25.8091	6.7907	0.9912
878	-22.7020	6.0893	0.9906	830	-25.9945	7.3408	0.9967
1034	-18.7216	5.7606	0.9977	1120	-28.2843	8.1322	0.9918
1156	-22.7931	6.9239	0.9951	1314	-36.7097	10.7360	0.9966
1337	-18.9308	6.6465	0.9816	1517	-39.7644	11.9791	0.9923
1513	-21.1714	7.9134	0.9755				

万方数据

由表 2 可知,在不同土壤相对湿度和 CO<sub>2</sub> 浓度下,沙柳光合作用速率随辐射强度呈明显的对数关系,所有的拟合方程都通

过 0.01 的显著性水平检验。

回归系数  $a$  表明当辐射强度为 0 时沙柳的暗呼吸作用。 $a$  值越小,暗呼吸越强。由表 2 可见在土壤相对湿度适宜时, $a$  值的变化趋势大致是随  $\text{CO}_2$  浓度的增加而减小。这表明  $\text{CO}_2$  浓度升高,沙柳的暗呼吸增大,在高  $\text{CO}_2$  浓度下沙柳的呼吸消耗要比低  $\text{CO}_2$  浓度下的大。此外,在土壤相对湿度较大时, $a$  值较小,说明土壤干旱对沙柳的暗呼吸也有抑制作用。 $b$  值表明在该  $\text{CO}_2$  浓度下,沙柳光合作用对辐射强度的响应, $b$  值越大,表明沙柳随辐射强度变化的响应越快,即增加相同的辐射量使光合作用的增加越快。表 2 结果表明,在土壤相对湿度适宜时, $b$  值随  $\text{CO}_2$  浓度的增加而显著增大,这充分表明  $\text{CO}_2$  浓度越高,沙柳的光合作用速率对辐射的反应越明显,仅是数值上有差异。也就是说,大气  $\text{CO}_2$  浓度越高,沙柳的光合作用速率随辐射增大的变化速率越大。当发生土壤干旱胁迫时, $a$ 、 $b$  值随  $\text{CO}_2$  浓度升高的变化虽有波动,但仍表现出较明显的变化趋势,即  $a$  随  $\text{CO}_2$  浓度升高而减小, $b$  随  $\text{CO}_2$  浓度升高而增加。

3 结论和讨论

通过模拟试验表明,沙柳光合作用速率随辐射强度增加和/或随  $\text{CO}_2$  浓度的升高而增大的变化规律。 $\text{CO}_2$  浓度越高,沙柳的光合作用速率对辐射的反应越明显。同样,辐射越强,沙柳的光合作用速率对  $\text{CO}_2$  浓度的反应也越敏感。土壤干旱对沙柳的光合和暗呼吸都有抑制作用。但干旱可能使沙柳的生理过程受到影响,从而使沙柳对  $\text{CO}_2$  浓度和辐射的响应规律不如土壤水分适宜时显著。同时,明显地看出,在高辐射条件下增加大气中  $\text{CO}_2$  的“施肥效应”比低辐射条件下要显著。

全球变化的主要内涵是大气中  $\text{CO}_2$  浓度升高和大气温度升高,而对于大气降水和辐射的模拟结果,不同的气候模式得出的结论有较大的差异,且都具有明显的区域性,也就是说不同地区的变化趋势不同。但温度升高和大气辐射的增强必将导致土壤蒸发和植物蒸腾作用的加强,从而导致干旱化趋势的加剧。因此,对于全球变化来说,虽然  $\text{CO}_2$  浓度的升高有利于沙柳光合作用速率的提高,但增温和辐射的增加导致了水分损耗增加,这在一定程度上加剧了土壤干旱化趋势。因此,对沙柳光合作用的影响可能是不利的,至少不会象曾经估计的那么显著<sup>[20]</sup>。

References:

[1] Watson R T, Rhode H, Oescheger H, *et al.* Greenhouse gases and aerosols. In: Houghton, J. T., G. I. Jenkins & J. J. Ephraums. eds. *Climate change: IPCC Scientific Assessment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 1~40.

[2] Webb W L, Lauenroth W K, Szarek S R, *et al.* Primary production and abiotic controls in forests, grasslands, and desert ecosystems in the united States. *Ecology*, 1983, **64**:134~151.

[3] Sala O E, Parton W J, Joyce L A, *et al.* Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1988, **69**:40~65.

[4] O'connor T G, Haines L M, Snyman H A. Influence of precipitation and species composition on phytomass of a semi-arid Africa grassland. *Journal of Ecology*, 2001, **89**:850~860.

[5] Wallace J S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, **82**:105~119.

[6] Zhou G S. Adaptation and Adjustment Mechanism of Terrestrial Ecosystems to Aridification. In: Zhou Guangsheng ed. *China NECT and Global Change—Aridification, Human Activities and Ecosystem*. Beijing: China Meteorological Press, 2002. 3~8.

[7] Yu J J, Ren H Z. Analysis of food production and water supply in the Northern China. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(4):360~365.

[8] Jiang G M, Zhu G J. Effects of natural high temperature and irradiation on photosynthesis and related parameters in three arid sandy shrub species. *Acta Phytoecologica Scinica*, 2001, **25**(5):525~531.

[9] Knapp A K & Smith M D. Variation among biomes in temproal dynamics of abovegroung primary production. *Nature*, 2001, **291**:481~484.

[10] Hamerlynck E P, Huxman T E, Loik M E, *et al.* Effects extrme high temperature, drought and elevated  $\text{CO}_2$  on photosynthesis of the Mojave Desert evergreen sgurb, *Larrea tridentate*. *Plant Ecology*, 2000, **148**:183~193.

[11] Ericsson T, Rytter L & Vapaavuori E. Physiology of carbon allocation in tree. *Biomass and Bioenergy*, 1996, **11**:115~127.

[12] Arndt S K, & Wanek W. Use of decreasing foliar carbon isotope discrimination during water limitation as a carbon tracer to study whole plant carbon allocation. *Plant, Cell and Environment*, 2002, **25**:609~616.

[13] Luxmore R J. A soure-sink framework for coupling, carbon, and nutrient dynamics of vegetation. *Tree Physiology*, 1991, **9**:267~280.

[14] Ranney T G, Whitlow T H & Bassuk N L. Response of five temperature deciduous species to water stress. *Tree Physiology*, 1990, **6**:439~448.

[15] Le Roux D, Stock W D, Bond W J, *et al.* Dry mass allocation, water use efficiency and  $\delta^{13}\text{C}$  on clones of *Eucalyptus grandis*, *E. grandis*

×*camaldulensis* and *E. grandis*×*nitens* grown under two irrigation regimes. *Tree Physiology*, 1996, **16**:497~502.

[16] Tschaplinski T J, Tuskan G A, Gebre M,*et al.* Drought resistance of two hybrid populus colnes grown in a large-scale plantation. *Tree Physiology*, 1998, **18**:653~658.

[17] Schwinning S & Ehleringer J R. Water use trade-offs and optimal adaptation to pulse-driven arid ecosys tems. *Journal of Ecology*, 2001, **89**:464~480.

[18] Kolb K J & Sperry J S. Transport constraints on water use by great basin shurb, *Artamisia tridentate*. *Plant, Cell and Environment*, 1999, **22**:925~935.

[19] Huang Z Y, Dong X J, Jiang G M,*et al.* A preliminary study on the daily change of *Salix Psammophila* Photosynthesis and transpiration. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2002,**22**(4):121~127.

[20] Gao S H, Guo J P. Responses of Some Dominant Species in Maowusu Sandland under High CO<sub>2</sub> Concentration to Drought stress. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002,**16**(6):116~118.

[21] Guo J P, Gao S H, Wang L M,*et al.* Response of *Hedysarum mongolicum* Turce. to high CO<sub>2</sub> concentration and soil drought stress. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2002,**11**(1):14~16.

[22] Guo J P, Gao S H, Wang L M,*et al.* Experimental Study on Impact of High CO<sub>2</sub> Concentration and Soil Drought Stress on Caragana intermedia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002,**16**(1):23~25.

参考文献:

[ 6 ] 周广胜. 生态系统对于旱化的适应与调控机制. 见:周广胜主编. 中国东北样带(NECT)与全球变化——干旱化、人类活动与生态系统. 北京: 气象出版社,2002. 3~8.

[ 7 ] 于静洁,任鸿遵. 华北地区粮食生产与水供应情势分析. 自然资源学报,2001,**16**(4):360~365.

[ 8 ] 蒋高明,朱桂杰. 高温强光环境条件下 3 种沙地灌木的光合生理特点. 植物生态学报,2001,**25**(5): 525~531.

[19] 黄振英,董学军. 沙柳光合作用和蒸腾作用日动态变化的初步研究. 西北植物学报,2002,**22**(4): 121~127.

[20] 高素华,郭建平. 毛乌素沙地优势种在高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下对土壤干旱胁迫的响应. 水土保持学报,2002, **16**(6):116~118.

[21] 郭建平,高素华,王连敏,等. 杨柴对高 CO<sub>2</sub> 和土壤干旱胁迫的响应. 植物资源与环境学报, 2002,**11**(1): 14~16.

[22] 郭建平,高素华. 高 CO<sub>2</sub> 浓度和土壤干旱胁迫对柠条影响的试验研究. 水土保持学报, 2002, **16**(1):23~26.

