

# 干旱胁迫和 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下白羊草的光合特征\*

张昌胜<sup>1</sup> 刘国彬<sup>2</sup> 薛 蕙<sup>1,2\*\*</sup> 冀智清<sup>1</sup> 张 超<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup> 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘 要** 采用盆栽控制试验,研究了黄土丘陵区乡土种白羊草在不同水分水平(80% FC 和 40% FC)和 CO<sub>2</sub> 浓度(375 和 750 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>) 处理下的光合生理变化特征. 结果表明: 干旱胁迫使白羊草的最大净光合速率( $P_{n\max}$ )、表观量子效率(AQE)、气孔导度( $g_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、潜在光化学效率( $F_v/F_o$ )和光合色素含量降低,丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)含量升高. 水分充足条件下,与正常大气 CO<sub>2</sub> 浓度相比,大气 CO<sub>2</sub> 浓度倍增下白羊草的  $P_{n\max}$ 、MDA 和 Pro 含量无显著差异. 干旱胁迫下,CO<sub>2</sub> 浓度升高提高了白羊草的最大荧光( $F_m$ )、 $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_o$ 、叶绿素含量和 AQE,  $P_{n\max}$  比正常 CO<sub>2</sub> 浓度下高 23.3%, 差异达到显著水平,而 MDA 和 Pro 含量均显著降低. CO<sub>2</sub> 浓度升高对干旱胁迫引起的白羊草光合能力下降有一定的补偿作用,减轻了干旱胁迫对白羊草的伤害.

**关键词** 干旱 CO<sub>2</sub> 浓度升高 光合特征 白羊草

文章编号 1001-9332(2012)11-3009-07 中图分类号 Q945.11; S543.9 文献标识码 A

**Photosynthetic characteristics of *Bothriochloa ischaemum* under drought stress and elevated CO<sub>2</sub> concentration.** ZHANG Chang-sheng<sup>1</sup>, LIU Guo-bin<sup>2</sup>, XUE Sha<sup>1,2</sup>, JI Zhi-qing<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>2</sup> (<sup>1</sup>State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, Shaanxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2012 23(11): 3009-3015.

**Abstract:** A pot experiment was conducted to study the variations of the photo-physiological characteristics of native bluestem (*Bothriochloa ischaemum*) in loess hilly-gully region under different soil moisture condition (80% and 40% field capacity) and different atmospheric CO<sub>2</sub> concentration (375 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> and 750 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>). The results showed that drought stress decreased the maximum photosynthetic rate ( $P_{n\max}$ ), apparent quantum efficiency (AQE), stomatal conductance ( $g_s$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), maximum photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ), potential photochemical efficiency ( $F_v/F_o$ ), and photosynthetic pigments contents, and increased the malondialdehyde (MDA) and proline (Pro) contents. Under sufficient moisture condition, elevated CO<sub>2</sub> concentration didn't change the  $P_{n\max}$  and the MDA and Pro contents significantly; under drought stress, elevated CO<sub>2</sub> improved the maximal fluorescence ( $F_m$ ),  $F_v/F_m$ ,  $F_v/F_o$ , photosynthetic pigments contents, and AQE, and the  $P_{n\max}$  under elevated CO<sub>2</sub> was increased significantly by 23.3%, and the MDA and Pro contents were decreased significantly, as compared with those under ambient CO<sub>2</sub> concentration. All the results suggested that elevated CO<sub>2</sub> concentration had definite compensation effect on the photosynthetic reduction of *B. ischaemum* induced by drought stress, and alleviated the damage of drought stress on *B. ischaemum*.

**Key words:** drought; elevated CO<sub>2</sub> concentration; photosynthetic characteristics; *Bothriochloa ischaemum*.

\* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05060300)和西北农林科技大学2009年基本科研业务费青年项目(QN2009080)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: xuesha100@163.com

2012-03-01 收稿 2012-08-15 接受.

大气二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度不断上升被认为是全球气候变化的主要驱动力之一<sup>[1]</sup>.已有研究表明,CO<sub>2</sub>浓度已经从工业革命时期的280 μmol·mol<sup>-1</sup>增加到现在的372 μmol·mol<sup>-1</sup>,预计到21世纪末会增加到700 μmol·mol<sup>-1</sup><sup>[2-3]</sup>.CO<sub>2</sub>浓度增加导致的全球变暖将会对全球生态环境和气候变化造成深远的影响<sup>[4]</sup>.在全球变暖的趋势下,我国西部地区,特别是较为干旱的黄土高原的降雨量可能会明显减少,而土壤水分蒸发量将提高,导致这些区域更加干旱<sup>[5]</sup>.

光合作用是植物生长和产量形成的重要基础,而大气CO<sub>2</sub>浓度和土壤水分是光合作用的原料,其含量的大小影响着植物的光合生理生化过程<sup>[6]</sup>.有研究表明,CO<sub>2</sub>浓度升高对植物光合作用和产量有促进作用,特别是对C<sub>3</sub>植物的作用更为明显<sup>[7]</sup>.

白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)是多年生禾本科孔颖草属C<sub>4</sub>植物,具有繁殖能力快、再生能力强和耐践踏等优点,是区域适应性较强的天然优质牧草<sup>[8]</sup>.在陕北黄土丘陵区山地和川地,白羊草具有较高的生产力<sup>[9]</sup>,其网状发达根系可以减轻降雨对地面的冲刷,起到保土蓄水的作用,是黄土高原退化草地恢复与碳储存的重要植物之一<sup>[10]</sup>.目前关于白羊草的研究大多集中在光合生理、苗期生长与水分利用、人工草地生产力和不同水肥处理下光合生理生态特征等方面<sup>[11-13]</sup>,CO<sub>2</sub>浓度及土壤水分胁迫对白羊草的影响研究尚未见报道.本研究分析了CO<sub>2</sub>浓度升高和干旱胁迫下白羊草的光合响应特征,旨在为研究全球气候变化背景下植物的生理生化响应提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设计

试验于2010年11月在中国科学院水土保持研究所进行,采用人工气候室(AGC-D003N逆境型)控制CO<sub>2</sub>浓度、温度、湿度和光照强度等环境因子.采用自制圆桶盆栽控制试验,圆桶规格为20 cm×15 cm(长×内径)PVC管,底部密封,装土时桶底铺碎石,在碎石上放置一根高出桶面2 cm、内径为2 cm的PVC管作为灌水管,再铺滤纸(防止土壤渗入石缝中),每桶装入相同风干土3.5 kg.

白羊草种子为黄土高原天然草种,于2010年11月10日播种.种子发芽后,每盆保留7株长势相近的苗,并于2010年11月25日将盆移入人工气候室中.试验设2个CO<sub>2</sub>浓度处理:正常CO<sub>2</sub>浓度

(375 μmol·mol<sup>-1</sup>, Nc)和倍增CO<sub>2</sub>浓度(750 μmol·mol<sup>-1</sup>, Hc);2个水分处理:水分胁迫(40%~45%饱和田间持水量,即40%FC, Lw)与供水充足(80%~90%饱和田间持水量,即80%FC, Hw),每种处理设定5个重复.采用2个人工气候室,CO<sub>2</sub>浓度分别设定为750和375 μmol·mol<sup>-1</sup>,用钢瓶装CO<sub>2</sub>作为外部CO<sub>2</sub>供应源.两个气候室设定温度均为恒温(27±1)℃、湿度为(45±3)%、光照强度为7:30—11:30为1组灯(280 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>),11:30—14:30为2组灯(560 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>),14:30—18:00为1组灯,18:00至次日7:30无灯光.利用电脑系统控制所有设定参数.盆栽土壤含水量采用称量法控制,每天16:00进行水量控制,所用水为纯净水.

### 1.2 研究方法

**1.2.1 光合响应曲线测定和模型** 2011年3月14—16日(白羊草开花前期)采用Licor-6400便携式光合仪于9:30—11:30随机选取每个处理中的3盆进行测定,测定时选择最近展开的叶片.用Li-6400自带红蓝光源(Li-6400-02B-LED)模拟光强梯度2000、1800、1600、1400、1200、1000、800、600、400、300、250、200、160、120、80、40和0 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>共17个,设定改变光照强度后,最小稳定时间为60 s,重复测定3次.

有研究表明,符合白羊草光响应曲线的最佳模型为非直角双曲线模型<sup>[14]</sup>,其表达式为:

$$\theta P - P(aPAR + P_{\max}) aPAR P_{\max} = 0$$

当 $\theta \neq 0$ 时,由 $P_n = P - R_d$ ,非直角双曲线方程变为:

$$P_n = [aPAR + P_{\max} - \sqrt{(aPAR + P_{\max})^2 - 4\theta aPAR P_{\max}}] / 2\theta - R_d$$

式中: $P$ 为总光合速率(μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>); $\theta$ 为光合曲线弯曲程度的凸度; $P_n$ 为净光合速率; $a$ (AQE)为表观量子效率(μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>); $P_{n\max}$ 为最大光合速率(μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>); $PAR$ 为光合有效辐射(μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>); $R_d$ 为暗呼吸速率(μmol CO<sub>2</sub>·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>).

采用Photosynthesis Work Bench程序软件测定光合曲线参数.

**1.2.2 叶绿素荧光参数测定** 2011年3月17日采用Imaging-PAM(WALZ,德国)测定叶绿素荧光参数.经过暗适应一个晚上后,每种处理选取测过光合或最近展开的叶片,于7:00—10:00测定.测定参

数: 初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )、最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、潜在光化学效率( $F_v/F_0$ , 其中  $F_v = F_m - F_0$ )。3 月 19 日采集测量过及相同部位的叶片, 迅速投入液氮中带回实验室存放于  $-40\text{ }^\circ\text{C}$  冰箱中, 用于其他指标测定。

**1.2.3 光合色素、丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)测定** 光合色素采用乙醇(浓度 95%)提取比色法测定<sup>[15]</sup>。采用磺基水杨酸提取和酸性茚三酮染色比色法测定游离 Pro 含量; 采用硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量<sup>[16]</sup>。

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 12.0 软件进行数据分析和作图, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 法比较数据间的差异显著性水平( $\alpha = 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分和 CO<sub>2</sub> 浓度处理下白羊草的光响应曲线变化

由图 1 可以看出, 光强为  $300 \sim 2000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  范围内, 干旱胁迫条件下, CO<sub>2</sub> 浓度倍增处理白羊草的最大净光合速率( $P_{n\text{max}}$ )变化幅度大于水

分充足条件。干旱胁迫使白羊草的  $P_{n\text{max}}$  降低了 31.2%, 表观量子效率(AQE)显著下降, 暗呼吸速率( $R_d$ )有下降趋势; 水分充足条件下, CO<sub>2</sub> 浓度倍增使白羊草的  $P_{n\text{max}}$  提高了 5.8%, 而干旱胁迫条件下的相应处理则提高了 23.3%, 达到显著水平( $P < 0.05$ ) (表 1)。CO<sub>2</sub> 浓度倍增对白羊草的 AQE 无显著影响, 对  $R_d$  有增加的趋势; 而光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)在不同处理下均无显著差异。

干旱胁迫降低了白羊草的  $g_s$  和  $T_r$ , 对  $C_i$  无显著影响。干旱和水分充足条件下, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对  $C_i$  均无明显影响, 对  $g_s$  和  $T_r$  有提高作用。

### 2.2 不同水分和 CO<sub>2</sub> 浓度处理下白羊草叶片的荧光参数特征

在干旱或水分充足条件下, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度倍增均显著提高了白羊草叶片的最大荧光( $F_m$ ), 而对初始荧光( $F_0$ )无显著影响(表 2); 大气 CO<sub>2</sub> 浓度正常或倍增条件下, 干旱胁迫均使叶片  $F_m$  显著降低。水分充足条件下, CO<sub>2</sub> 浓度倍增对最大光化学效率( $F_v/F_m$ )和潜在光化学效率( $F_v/F_0$ )均无显著影响, 但在干旱胁迫时 CO<sub>2</sub> 浓度倍增显著提高  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_0$  ( $P < 0.05$ )。

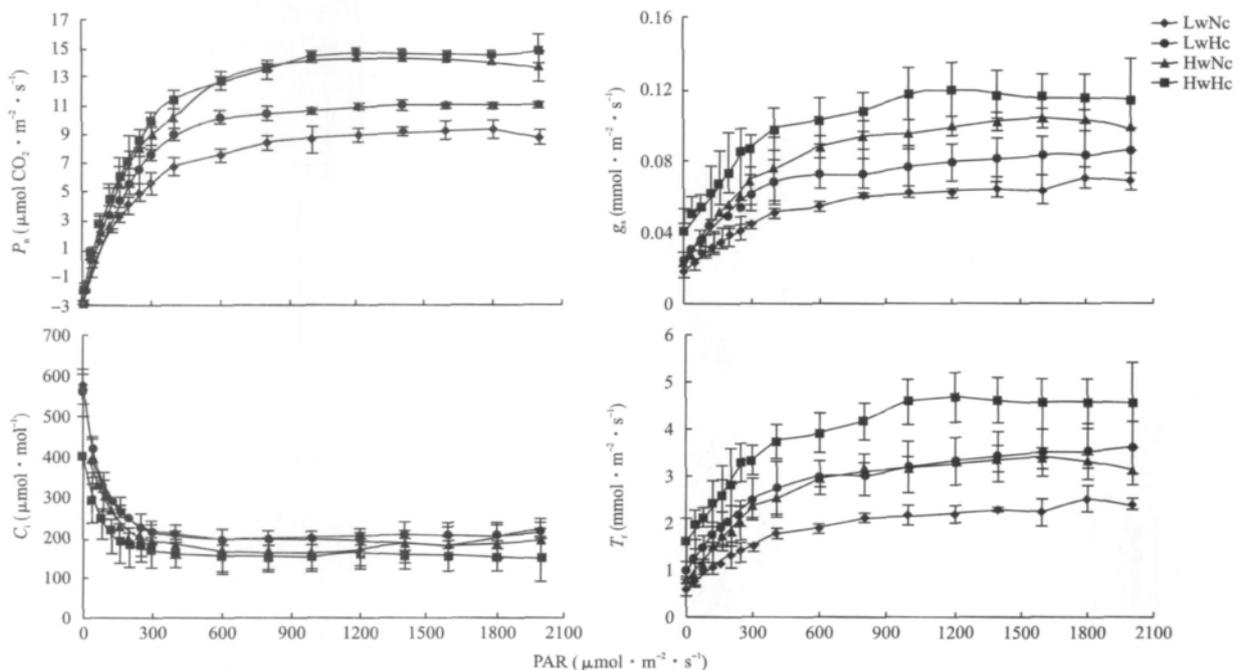


图 1 不同水分和 CO<sub>2</sub> 浓度处理下白羊草的光响应曲线、气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率的变化

**Fig. 1** Change characteristics of the light response curves of photosynthesis ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $g_s$ ), intercellular CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ), and transpiration rate ( $T_r$ ) to photosynthetically available radiation (PAR) of the leaves in *Bothriochloa ischaemum* under different water and CO<sub>2</sub> concentration treatments.

Lw: 40% ~ 45% FC; Hw: 80% ~ 90% FC; Nc:  $375\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}\ \text{CO}_2$ ; Hc:  $750\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}\ \text{CO}_2$ . 下同 The same below.

表 1 不同水分和 CO<sub>2</sub> 浓度处理下白羊草的光响应曲线参数Table 1 Light response curves of photosynthesis parameters of *Bothriochloa ischaemum* under different water and CO<sub>2</sub> concentration treatments (mean±SE)

处理 Treatment	最大净光合速率 $P_{n\max}$ ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	表观量子效率 AQE ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	暗呼吸速率 $R_d$ ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	光饱和点 LSP ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	光补偿点 LCP ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
LwNc	10.74±0.73c	0.039±0.01b	1.74±0.36b	784±98a	45±12a
LwHc	13.24±0.48b	0.055±0.01ba	2.41±0.39ba	705±25a	47±15a
HwNc	16.31±0.54a	0.057±0.01a	2.08±0.24ba	893±155a	37±10a
HwHc	17.22±0.08a	0.070±0.01a	2.81±0.67a	829±50a	40±8a

Lw: 40%~45% FC; Hw: 80%~90% FC; Nc: 375  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  CO<sub>2</sub>; Hc: 750  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  CO<sub>2</sub>. 同列不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters in the same column represented significant difference at 0.05 level among different treatments. 下同 The same below.

表 2 不同水分和 CO<sub>2</sub> 浓度处理下白羊草叶片的叶绿素荧光参数Table 2 Chlorophyll fluorescence kinetic parameters of *Bothriochloa ischaemum* under different water and CO<sub>2</sub> concentration treatments (mean±SE)

处理 Treatment	最大荧光 $F_m$	初始荧光 $F_o$	最大光化学效率 $F_v/F_m$	潜在光化学效率 $F_v/F_o$
LwNc	0.275±0.035c	0.089±0.019a	0.679±0.029b	2.133±0.291c
LwHc	0.362±0.004b	0.092±0.006a	0.744±0.013a	2.920±0.193b
HwNc	0.353±0.004b	0.077±0.009a	0.783±0.023a	3.634±0.513a
HwHc	0.408±0.013a	0.097±0.007a	0.762±0.011a	3.214±0.185ba

### 2.3 不同水分和 CO<sub>2</sub> 浓度处理下白羊草叶片光合色素含量的变化

水分充足条件下,CO<sub>2</sub> 浓度倍增显著增加了白羊草叶片的叶绿素总量、叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量(图 2)。干旱胁迫时,这些光合色素含量均显著降低,此时 CO<sub>2</sub> 浓度倍增除了对类胡萝卜素无显著影响外,其他光合色素含量均显著提高。

### 2.4 不同水分和 CO<sub>2</sub> 浓度处理下白羊草叶片丙二醛和脯氨酸含量的变化

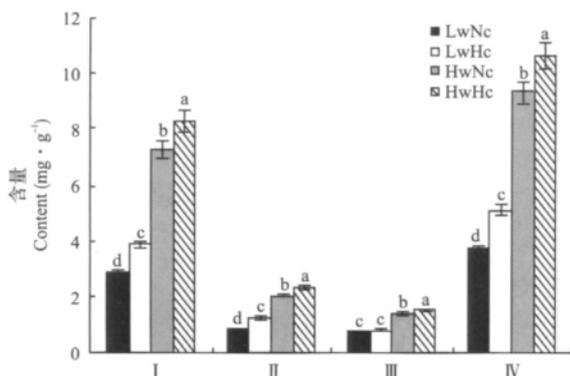


图 2 不同水分及 CO<sub>2</sub> 浓度处理下白羊草叶片叶绿素 a ( I )、叶绿素 b ( II )、类胡萝卜素 ( III ) 和叶绿素总含量 ( IV )  
Fig. 2 Chlorophyll a ( I ), chlorophyll b ( II ), carotenoid ( III ) and chlorophyll content ( IV ) of the leaves in *Bothriochloa ischaemum* under different water and CO<sub>2</sub> concentration treatments.

干旱胁迫使白羊草丙二醛 (MDA) 含量显著升高,CO<sub>2</sub> 浓度升高则使之下降,但不同水分条件下的下降幅度不同。水分充足时,CO<sub>2</sub> 浓度倍增使白羊草 MDA 下降了 11.0%,但干旱胁迫条件下其降幅为 18.0%,差异性达到显著水平。脯氨酸 (Pro) 的变化与 MDA 一致,水分充足条件下,CO<sub>2</sub> 浓度倍增使 Pro 下降 7.0%,而干旱胁迫时则下降 14.7%,达到显著差异水平(图 3)。

### 2.5 水分和 CO<sub>2</sub> 浓度的双因素方差分析

双因素方差分析结果(表 3)表明,干旱胁迫对白羊草叶片的  $P_{n\max}$ 、光合色素含量、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_o$ 、MDA 和 Pro 含量的影响差异均达极显著水平。CO<sub>2</sub> 浓度对  $P_{n\max}$ 、光合色素含量、 $F_m$  和 Pro 含量有极显著影响,对 MDA 含量有显著影响,但对  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  无明显影响。水分与 CO<sub>2</sub> 浓度的协同关

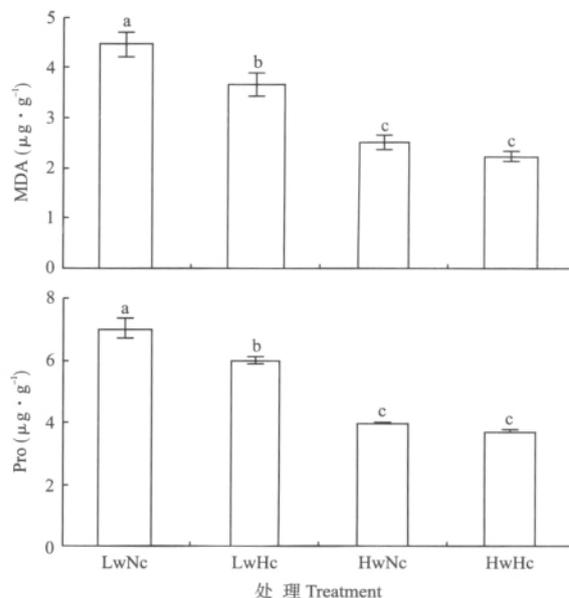


图 3 不同水分及 CO<sub>2</sub> 浓度处理下白羊草叶片的丙二醛和脯氨酸含量

Fig. 3 Contents of malondialdehyde (MDA) and proline (Pro) of the leaves in *Bothriochloa ischaemum* under different water and CO<sub>2</sub> concentration treatments.

表 3 水分和 CO<sub>2</sub> 浓度处理对白羊草的双因素方差分析结果Table 3 Result of univariate analysis for the effect of water and CO<sub>2</sub> concentration to *Bothriochloa ischaemum*

处理 Treatment	$P_{n\max}$		光合色素 Photosynthetic pigments		$F_m$		$F_v/F_m$		$F_v/F_o$		MDA		Pro	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
水分 Water (W)	182.25	<0.01	1253.64	<0.01	31.50	<0.01	26.89	<0.01	23.06	<0.01	244.96	<0.01	658.47	<0.01
CO <sub>2</sub> 浓度 CO <sub>2</sub> concentration	23.89	<0.01	63.63	<0.01	40.15	<0.01	3.71	0.09	0.96	0.36	25.39	<0.05	40.23	<0.01
W×CO <sub>2</sub>	4.89	<0.05	0.02	0.89	1.93	0.20	13.36	<0.01	10.41	<0.05	5.66	<0.05	13.33	<0.01

系表现为:对光合色素含量和  $F_m$  无显著的交互作用,而对  $P_{n\max}$ 、 $F_v/F_o$  和 MDA 含量有显著的交互作用,对  $F_v/F_m$  和 Pro 含量的交互影响达到极显著水平。

### 3 讨 论

#### 3.1 白羊草对不同水分和 CO<sub>2</sub> 浓度的光响应

有研究表明,在充足水分条件下,CO<sub>2</sub> 浓度倍增对提高 C<sub>4</sub> 植物的净光合速率无明显的作用<sup>[17-18]</sup>,但在频繁和严酷的干旱条件下,C<sub>4</sub> 植物对高 CO<sub>2</sub> 浓度响应比 C<sub>3</sub> 植物有优势,CO<sub>2</sub> 浓度升高可以缓解干旱对 C<sub>4</sub> 植物的不利影响<sup>[19]</sup>,并且在干旱胁迫越严重时表现得更加明显。本研究中,干旱胁迫时 CO<sub>2</sub> 浓度升高使白羊草叶片  $P_{n\max}$  的增幅(23.3%)比水分充足时(5.8%)高出 17.5%;双因素方差分析结果表明,水分和 CO<sub>2</sub> 浓度存在交互作用,干旱胁迫下 CO<sub>2</sub> 浓度升高促进了白羊草光合作用,减小了干旱对白羊草的伤害。其主要原因可能是,在水分充足时,CO<sub>2</sub> 浓度倍增提高了叶绿素含量、 $g_s$  和  $T_r$ ,其叶片以磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)为光合作用底物,具有较低的 CO<sub>2</sub> 饱和点和较高的 CO<sub>2</sub> 作用<sup>[20]</sup>,所以 CO<sub>2</sub> 浓度倍增对光合速率提高无明显作用。而在干旱条件下,CO<sub>2</sub> 浓度倍增提高了  $g_s$ ,有利于 CO<sub>2</sub> 流通,植物光合色素含量和 AQE 显著提高,进而增强叶绿体对光能的吸收和激发能在光系统 PS I 和 PS II 的分配调节能力,有利于植物捕获更多光能进行光合作用<sup>[21]</sup>,植物叶片对弱光利用效率的提高,可以更好地维持光合机构的正常运转<sup>[22]</sup>。因此干旱胁迫下 CO<sub>2</sub> 浓度倍增比水分充足条件下对白羊草的“施肥效应”更加明显。目前关于 CO<sub>2</sub> 浓度增加对植物暗呼吸研究还没有定论,Bunce<sup>[23]</sup>认为 CO<sub>2</sub> 浓度增加提高了植物的暗呼吸速率,但张小全等<sup>[24]</sup>的结论则相反,而 Ryle 和 Stanley<sup>[25]</sup>的研究表明没有显著的影响。本研究表明,CO<sub>2</sub> 浓度增加对  $R_d$  有提高趋势,但不显著,可能是因为光合作用的

提高增加了植物碳水化合物的合成,呼吸速率增大可为植物物质运输提供更多的能量<sup>[23]</sup>。

#### 3.2 不同水分和 CO<sub>2</sub> 浓度处理下白羊草荧光参数的变化

叶绿素荧光是利用叶绿素 a 作为天然探针,研究植物光合生理状况对环境因子响应的新型活体测定诊断技术,被称为探测植物光合生理与逆境胁迫关系的理想技术<sup>[26]</sup>。干旱胁迫使白羊草  $F_m$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  显著降低,表明 PSII 受到不同程度的破坏<sup>[27]</sup>,抑制了叶绿素的合成,加速了叶绿素的分解,使光合色素含量降低<sup>[28]</sup>;但当 CO<sub>2</sub> 浓度升高时, $F_m$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  均显著增大,说明干旱条件下 CO<sub>2</sub> 浓度倍增能有效地提高光合系统的光化学活性,有利于白羊草的光合作用<sup>[29]</sup>。经双因素方差分析发现,干旱胁迫对  $F_m$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  影响显著,而 CO<sub>2</sub> 浓度倍增对  $F_m$  影响显著,对  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  等参数均无显著影响;当干旱胁迫与 CO<sub>2</sub> 浓度倍增共同作用时,对  $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  影响显著,对  $F_m$  无显著影响,表明干旱胁迫与 CO<sub>2</sub> 浓度倍增对叶绿素荧光具有明显的交互作用。

#### 3.3 不同处理下白羊草 MDA 和 Pro 的积累

MDA 是逆境过程中膜脂氧化的最终产物,可作为反映干旱胁迫对植物伤害的重要参数。在植物细胞遭受干旱胁迫时,细胞膜发生氧化分解,MDA 大量积累,其含量越高表明植物抗旱能力越差<sup>[30]</sup>。本研究中,CO<sub>2</sub> 浓度倍增对白羊草 MDA 和 Pro 含量的影响因水分而异。干旱胁迫下,MDA 的降低幅度比水分充足下高出 7.0%,说明在低水分条件下 CO<sub>2</sub> 浓度倍增对提高白羊草抗旱能力的作用大于高水分条件下。Pro 是植物在干旱胁迫下的有效渗透物质,具有增强细胞持水、调节渗透压、稳定大分子结构等功能<sup>[31]</sup>。当植物受到干旱胁迫时,植物体内的 Pro 含量会积累。但在干旱胁迫下是否可用 Pro 作为抗旱指标仍然存在争议<sup>[32-34]</sup>。本研究发现,干旱条件下 CO<sub>2</sub> 浓度倍增对 Pro 的下降幅度高于水分

充足条件下. 方差分析也表明, 无论是干旱胁迫与 CO<sub>2</sub> 浓度倍增单独作用还是交互作用, 均对 MDA 和 Pro 产生影响, 由于 Pro 和 MDA 的变化趋势一致, 因此 Pro 可作为反映白羊草干旱胁迫损伤程度<sup>[35]</sup> 或抗旱指标之一.

#### 参考文献

- [1] Sun G-C (孙谷畴), Zhao P (赵平), Rao X-Q (饶兴权), et al. Effects of nitrate application on alleviating photosynthesis restriction of *Cinnamomum burmannii* leaves under elevated CO<sub>2</sub> concentration and enhanced temperature. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2005, **16**(8): 1399-1404 (in Chinese)
- [2] Fangmeier A, Chrost B, Hogy P, et al. CO<sub>2</sub> enrichment enhances flag leaf senescence in barley due to greater grain nitrogen sink capacity. *Environmental and Experimental Botany*, 2000, **44**: 151-164
- [3] Long SP, Ainsworth EA, Rogers A, et al. Rising atmospheric carbon dioxide: Plants face the future. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, **55**: 591-628
- [4] Genthon G, Barnola JM, Raynaud D, et al. Vostok ice core: Climate response to CO<sub>2</sub> and orbit forcing changes over the last climatic cycle. *Nature*, 1987, **329**: 414-418
- [5] Wang J (王静), Fang F (方锋), Wei Y-M (尉元明). Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations on plants. *Agricultural Research in the Arid Areas (干旱地区农业研究)*, 2005, **23**(4): 229-233 (in Chinese)
- [6] Zhou Y-M (周玉梅), Han S-J (韩士杰), Zhang J-H (张军辉), et al. The effect of elevated CO<sub>2</sub> concentration on net photosynthesis and water use efficiency of leaves of *Fraxinus mandshurica* seedling. *Journal of Northeast Forest University (东北林业大学学报)*, 2001, **29**(6): 29-31 (in Chinese)
- [7] Drake BG, Gonzalez-Meler MA, Long SP. More efficient plants: A consequence of rising atmospheric CO<sub>2</sub>. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1997, **48**: 609-639
- [8] Xu L-R (徐朗然), Zhang J-M (张继敏), Ding S-Y (丁士友). Characteristic on the steppe of *Bothriochloa ischaemum* in Loess Plateau and its geographical significance. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica (西北植物学报)*, 1997, **17**(1): 88-93 (in Chinese)
- [9] Xu B-C (徐炳成), Shan L (山仑), Li F-M (李凤民). Comparison of ecophysiological characteristics of seven plant species in semiarid loess hilly-gully region. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2007, **18**(5): 990-997 (in Chinese)
- [10] Cheng J (程杰), Hu T-M (呼天明), Cheng J-M (程积民). Responses of distribution of *Bothriochloa ischaemum* community to hydrothermal gradient in Loess Plateau. *Acta Agrestia Sinica (草地学报)*, 2010, **18**(2): 167-171 (in Chinese)
- [11] Xu B-C (徐炳成), Shan L (山仑), Huang Z-B (黄占斌), et al. Aboveground productivity and soil water characteristics of cultivated Old World bluestem grassland in semi-arid loess hilly-gully areas on the Loess Plateau. *Pratacultural Science (草地科学)*, 2003, **25**(1): 1-4 (in Chinese)
- [12] Huang F-H (黄锋华), Dong K-H (董宽虎). Study on nutrients of dominant species of forage and dynamics of the rumen degradability in old world bluestem shrub rangeland. *Chinese Journal of Grassland (中国草地学报)*, 2006, **28**(6): 18-22 (in Chinese)
- [13] Xu W-Z (徐伟洲), Xu B-C (徐炳成), Duan D-P (段东平), et al. Study on the photosynthetic characteristics of *Bothriochloa ischaemum* under different water and nutrient conditions. I. Diurnal variation of photosynthesis. *Acta Agrestia Sinica (草地学报)*, 2010, **18**(5): 629-635 (in Chinese)
- [14] Xu W-Z (徐伟洲), Xu B-C (徐炳成), Duan D-P (段东平), et al. Study on the photosynthetic characteristics of *Bothriochloa ischaemum* under different water and nutrient conditions. II. Light-response curve. *Acta Agrestia Sinica (草地学报)*, 2010, **18**(6): 773-779 (in Chinese)
- [15] Sartory DR, Grobbelaar JU. Extraction of chlorophyll a from freshwater phytoplankton for spectrophotometric analysis. *Hydrobiologia*, 1984, **114**: 177-187
- [16] Zhang Z-A (张志安), Zhang M-S (张美善), Wei R-H (尉荣海). Guidance of Plant Physiology Experiments. Beijing: China Agricultural Technology Press, 2004: 138-141 (in Chinese)
- [17] Wong SC. Elevated atmospheric partial pressure of CO<sub>2</sub> and plant growth. I. Interactions of nitrogen nutrition and photosynthetic capacity in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants. *Oecologia*, 1979, **44**: 68-74
- [18] Tissue DT, Griffin KL, Thomas RB, et al. Effects of low and elevated CO<sub>2</sub> and C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> annuals. II. Photosynthesis and leaf biochemistry. *Oecologia*, 1995, **101**: 21-28
- [19] Ward JK, Tissue DT, Thomas RB, et al. Comparative responses of model C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants to drought in low and elevated CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology*, 1999, **5**: 857-867
- [20] Wu M (吴梅), Zhang B-J (张边江), Chen Q-Z (陈全战), et al. Research progress on introducing efficient photosynthetic C<sub>4</sub> genes into C<sub>3</sub> plant. *Chinese Agricultural Science Bulletin (中国农学通报)*, 2010, **26**(3): 68-71 (in Chinese)
- [21] Lu CM, Zhang QD, Feng LJ, et al. Effect of doubled CO<sub>2</sub> concentration on the content of photosynthetic pigments and PS II functions of jointing and grouting in *Setaria italica*. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1997, **39**: 874-878
- [22] Walker MD. Community Baseline Measurements for ITEX Studies. Copenhagen: Danish Polar Centre, 1996: 39-41
- [23] Bunce JA. Short and long-term inhibition of respiratory carbon dioxide efflux by elevated carbon dioxide. *Annals of Botany*, 1990, **65**: 637-642

- [24] Zhang X-Q (张小全), Xu D-Y (徐德应), Zhao M-S (赵茂盛), *et al.* The response of 17-year-old Chinese fir shoots to elevated CO<sub>2</sub>. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2000, **20**(3): 390-396 (in Chinese)
- [25] Ryle GJA, Stanley J. Effect of elevated CO<sub>2</sub> on stomatal size and distribution in perennial ryegrass. *Annals of Botany*, 1992, **70**: 213-220
- [26] Krause GH, Weis E. Chlorophyll fluorescence as a tool in plant physiology. *Photosynthesis Research*, 1984, **5**: 139-157
- [27] Wang J-C (王建程), Yan C-R (严昌荣), Bu Y-S (卜玉山). Effects of vary soil moisture and fertility on chlorophyll fluorescence characteristics in maize. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2005, **26**(2): 95-98 (in Chinese)
- [28] Dai W-R (代微然), Ren J (任健), Mo J-G (莫继光). Effects of drought stress on features of chlorophyll fluorescence of *Eremochloa ophiuroides*. *Grassland and Turf* (草原与草坪), 2010, **30**(5): 1-5 (in Chinese)
- [29] Zhang Q-D (张其德), Lu C-M (卢从明), Liu L-N (刘丽娜). Effects of doubled CO<sub>2</sub> on contents of photosynthetic and on kinetic parameters of fluorescence induction in different genotypes of soybean. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), 1997, **39**(10): 946-950 (in Chinese)
- [30] Yan M-L (严美玲), Li X-D (李向东), Lin Y-J (林英杰), *et al.* Effects of drought during seedling stage on physiological traits, yield and quality of different peanut cultivars. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(1): 113-119 (in Chinese)
- [31] Liang J, Zhang J, Wong MH. Stomatal conductance in relation to xylem sap ABA concentration in two tropical trees, *Acacia confusa* and *Litsea glutinosa*. *Plant Cell and Environment*, 1996, **19**: 93-100
- [32] Hanson AD, Neison CF, Pedersen AR, *et al.* Capacity for proline accumulation during water stress in barley and its implication for breeding for drought resistance. *Crop Science*, 1979, **19**: 489-493
- [33] Singh TN, Aspnall D, Paleg LG. Proline accumulation and varietal adaptability to drought in barley, a potential metabolic measure of drought resistance. *Nature*, 1972, **236**: 188-190
- [34] Liu E-E (刘娥娥), Zong H (宗会), Guo Z-F (郭振飞), *et al.* Effects of drought, salt and chilling stresses on proline accumulation in shoot of rice seedlings. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2000, **8**(3): 235-238 (in Chinese)
- [35] Cakmak I, Horst WJ. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxide activities in root tips of soybean. *Physiologia Plantarum*, 1991, **83**: 463-468

---

作者简介 张昌胜,男,1985年生,硕士研究生.主要从事流域生态及植物生理生态研究. E-mail: jsx1333@163.com

责任编辑 李凤琴

---