

亏缺灌溉对 4 种藁草属植物生长和光合特性的影响

杨学军, 武菊英^①, 滕文军, 袁小环, 晁公平

(北京草业与环境研究发展中心, 北京 100097)

摘要: 采用负水头灌溉盆栽装置, 对充分灌溉(对照)、中度亏缺灌溉和重度亏缺灌溉(土壤相对含水量分别为 65.63%~84.38%、26.04%~31.51% 和 6.63%~15.44%) 条件下涝峪藁草(*Carex giraldiana* Kük.)、矮丛藁草(*C. humilis* Leyss.)、披针叶藁草(*C. lanceolata* Boott) 和青绿藁草(*C. breviculmis* R. Br.) 的生长和光合特性的差异进行了研究。结果表明: 随土壤相对含水量的降低, 4 种植物地上和地下部分的生长量、根冠比、净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs) 和光能利用效率(SUE) 均逐渐降低, 胞间 CO₂ 浓度(Ci) 逐渐增加, 而水分利用效率(WUE) 总体上呈现波动的变化趋势。在中度亏缺灌溉条件下, 4 种植物地上和地下部分生长量均低于对照, 但叶片未枯黄; 而在重度亏缺灌溉条件下, 4 种植物地上和地下部分生长量均显著低于对照, 且部分叶片枯黄; 总体上看, 在亏缺灌溉条件下 4 种植物的根冠比均显著低于对照。在中度亏缺灌溉条件下, 4 种植物的 Pn、Tr、Gs 和 SUE 值均低于对照而 Ci 值均高于对照, 但总体上差异不显著; 仅青绿藁草的 WUE 值高于对照, 其他 3 种植物的 WUE 值均略低于对照。在重度亏缺灌溉条件下, 4 种植物的 Pn、Tr、Gs 和 SUE 值均显著低于对照, Ci 值均显著高于对照; 仅披针叶藁草的 WUE 值略低于对照, 其他 3 种植物的 WUE 值均高于对照。研究结果显示: 供试的 4 种藁草属植物均对亏缺灌溉有一定的耐性; 亏缺灌溉对 4 种植物地下部分生长的影响大于地上部分; 非气孔因素是导致其 Pn 降低的主要原因。

关键词: 亏缺灌溉; 藁草属; 生长指标; 光合特性; 水分利用效率; 非气孔因素

中图分类号: Q945.78; S688.401 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2013)02-0072-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2013.02.10

Effect of deficit irrigation on growth and photosynthetic characteristics of four species in *Carex* Linn. YANG Xuejun, WU Juying^①, TENG Wenjun, YUAN Xiaohuan, CHAO Gongping (Beijing Research and Development Center for Grass and Environment, Beijing 100097, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2013, 22(2): 72-77

Abstract: Using pot system with negative-pressure water supply, differences of growth and photosynthetic characteristics of *Carex giraldiana* Kük., *C. humilis* Leyss., *C. lanceolata* Boott and *C. breviculmis* R. Br. under sufficient irrigation (CK), moderate and heavy deficit irrigations (relative water content in soil 65.63%–84.38%, 26.04%–31.51% and 6.63%–15.44%, respectively) were studied. The results show that with decreasing of relative water content in soil, growth increment of above- and under-ground parts, root-shoot ratio, net photosynthetic rate (Pn), transpiration rate (Tr), stomatal conductance (Gs) and solar energy utilization efficiency (SUE) all decrease gradually, intercellular CO₂ concentration (Ci) increases gradually, while water utilization efficiency (WUE) generally appears a fluctuant change trend. Under moderate deficit irrigation condition, growth increment of above- and under-ground parts of four species is lower than that of the control, but leaves do not appear wilting and yellowing, while under heavy deficit irrigation condition, that is significantly lower than that of the control and some leaves become wilting and yellowing. Generally, root-shoot ratio of four species under deficit irrigation condition is significantly lower than that of the control. Under moderate deficit irrigation condition, values of Pn, Tr, Gs and SUE of four species all are lower while Ci value is higher than those

收稿日期: 2012-09-20

基金项目: 北京市科技新星计划项目(2008B32)

作者简介: 杨学军(1974—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 助理研究员, 研究方向为园林植物育种和生理生态学。

^①通信作者 E-mail: wujuying1@263.net

of the control with no significant difference generally; and only WUE value of *C. breviculmis* is higher while that of other three species is slightly lower than that of the control. Under heavy deficit irrigation condition, values of Pn, Tr, Gs and SUE of four species all are significantly lower while Ci value is significantly higher than those of the control; and only WUE value of *C. lanceolata* is slightly lower while that of other three species is higher than that of the control. It is suggested that four species tested all have a certain resistance to deficit irrigation. Effect of deficit irrigation on above-ground part growth of four species is greater than on their under-ground part. And non stomatal factors are the main causes led to Pn decreasing.

Key words: deficit irrigation; *Carex* Linn.; growth index; photosynthetic characteristics; water utilization efficiency; non stomatal factor

藁草属(*Carex* Linn.)植物覆盖度好、根系发达、萌生力强、适应性强且分布广泛,可作为草坪地被植物在园林中广泛应用^[1]。目前在北京的园林绿化中应用较多的是涝峪藁草(*Carex giraldiana* Kük.)、矮丛藁草(*C. humilis* Leyss.)、披针叶藁草(*C. lanceolata* Boott)和青绿藁草(*C. breviculmis* R. Br.)。北京草业与环境研究发展中心于2004年至2005年开始进行藁草属植物引种选育工作,目前青绿藁草品种‘四季’、披针叶藁草品种‘秀发’已通过国家林业局新品种审定,矮丛藁草品种‘长青’已通过北京市品种审定。对干旱胁迫条件下园林植物和草坪草生长规律和光合特性的研究已有相关报道^[2-5],但目前尚未见涝峪藁草、青绿藁草、矮丛藁草和披针叶藁草的相关研究报道。

基于负压入渗原理的负水头供水装置可控制盆土的含水量^[6-7],因此,利用该装置控制浇水量是研究植物亏缺灌溉的有效方法。作者利用该装置对涝峪藁草、青绿藁草、矮丛藁草和披针叶藁草进行亏缺灌溉处理,研究水分胁迫条件下4种藁草属植物生长和光合特性指标的变化规律,以期为藁草属植物的应用和耐旱品种引选提供实验基础。

1 材料和方法

1.1 材料

供试涝峪藁草、青绿藁草、矮丛藁草和披针叶藁草种子于2009年1月上旬播种,90 d后选择分蘖数15~18、株高20~25 cm的小苗按照文献^[8]的方法上盆,上盆时间为3月30日,每盆种植3株,充足灌溉;花盆高30 cm、内径33 cm,每盆装12 L栽培基质[V(草炭):V(田园土):V(河沙)=1:1:1],基质容重 $1.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,田间持水量为体积分数24.18%。

1.2 方法

1.2.1 亏缺灌溉处理方法 采用负水头供水装置(北京农业信息技术中心生产)进行亏缺灌溉处理。该装置由控压管、供水管和花盆中的圆盘组成,控压管与供水管内径均为71 mm。控压管的液面高度 h 为供水吸力;水通过供水管和圆盘之间的出水管进入盆栽基质中,因为压强的原因控压管提供给储水管出水口的压力为负压,其大小为 h , h 越大作物吸水就越困难^[6-7],因而可通过设定控压管高度来控制盆栽土壤含水量。

亏缺灌溉处理设3个水平,用TZS-5X型土壤水分记录仪(河南兄弟仪器设备有限公司生产)每日监测栽培基质的相对含水量。CK(对照):控压管高度40 cm、负压4 kPa^[9],土壤相对含水量65.63%~84.38%;T1:控压管高度80 cm、负压8 kPa,土壤相对含水量26.04%~31.51%;T2:控压管高度120 cm、负压12 kPa,土壤相对含水量6.63%~15.44%^[8]。按照Hsiao^[10]关于中生植物水分梯度划分的标准,CK为充分灌溉,T1为中度亏缺灌溉,T2为重度亏缺灌溉。

实验采用裂区设计,主区为灌溉水平、副区为4种藁草属植物,重复3盆;4月12日控压管均达到设定的控水高度,处理30 d后进行光合指标测定。

1.2.2 生长量测定 在上盆前每种植物各取6株,分别将地上部分和地下部分分开,干燥至恒质量^[11],用电子天平(Mettler Toledo公司生产,精度0.01 g)称取干质量(G_1);亏缺灌溉处理至9月6日后,每一处理每种植物再取6株,按同法分别称取地上部分和地下部分干质量(G_2);按照公式分别计算地上部分和地下部分的生长量(G): $G=G_2-G_1$ 。

1.2.3 光合特性指标测定 在5月12日至13日晴天的9:00至11:00,每处理分别选择生长势相对一

致的植株,选择第 1 片完全展开叶的中间部位,用 LI-6400 便携式光合分析仪(LI-COR 公司)测定净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)。设定光照强度为 $1\ 800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、大气压为 $(100\pm 1)\ \text{kPa}$ 、 CO_2 浓度为 $400\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、叶室温度为 $(30.0\pm 0.5)\ ^\circ\text{C}$,红蓝光源叶室,叶片在叶室内适应 10 min 后进行测定,各处理重复测定 6 株。同时,系统自动记录胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)、空气 CO_2 浓度、光合有效辐射(PAR)和气温等相关参数值^[8,12-13]。

按前述方法测定(P_n)和蒸腾速率(T_r),重复测定 9 株;根据系统自动记录的叶室内光合有效辐射(PAR)、参照公式“ $\text{SUE} = P_n/\text{PAR}$ ”和“ $\text{WUE} = P_n/T_r$ ”^[14]计算光能利用效率(SUE)和水分利用效率(WUE)。

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 制作图表,并用 Original 7.0 软件进行实验数据的方差分析。

2 结果和分析

2.1 亏缺灌溉对 4 种藁草属植物生长量的影响

在土壤水分胁迫条件下,植物通过调整生物量的分配降低逆境伤害以此适应环境胁迫^[8,15]。在亏缺灌溉条件下 4 种藁草属植物地上部分和地下部分生长量及根冠比见表 1。随土壤相对含水量的降低,4 种植物地上部分和地下部分的增长量以及根冠比均逐渐降低。

表 1 的结果表明:在中度亏缺灌溉(T1)条件下 4 种藁草属植物地上部分生长量较对照(充分灌溉)有所降低,但未出现叶片枯黄现象;在 4 种植物中,披针叶藁草地上部分生长量降幅最小(14.72%),另外 3 种植物地上部分生长量降幅差异不大,约为 30%~33%。在重度亏缺灌溉(T2)条件下,4 种植物地上部分生长量均显著低于对照,且部分叶片枯黄;在供试的 4 种植物中,涝峪藁草地上部分生长量的降幅最大(49.36%)、披针叶藁草的降幅最小(29.42%)。

亏缺灌溉对供试 4 种藁草属植物地下部分生长的影响大于地上部分。T1 处理组矮丛藁草、青绿藁草和披针叶藁草地下部分生长量均比对照低 50% 以上,涝峪藁草的降幅则为 25.17%;与对照相比,在 T2 处理组中,青绿藁草地下部分生长量降幅最大(达 82.53%),涝峪藁草的降幅也达到 67.91%。

由表 1 还可见:在亏缺灌溉条件下 4 种藁草属植物的根冠比也均低于对照,总体上差异达显著水平。其中,T1 处理组披针叶藁草的根冠比降幅最大、涝峪藁草的降幅最小;T2 处理组青绿藁草的根冠比降幅最大、涝峪藁草的降幅最小。

表 1 亏缺灌溉条件下 4 种藁草属植物生长量和根冠比的比较($\bar{X}\pm\text{SD}$)¹⁾

Table 1 Comparison of growth increment and root-shoot ratio of four species of *Carex* Linn. under deficit irrigation condition ($\bar{X}\pm\text{SD}$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	生长量/g Growth increment		根冠比 Root-shoot ratio
	地上部分 Above-ground part	地下部分 Under-ground part	
矮丛藁草 <i>C. humilis</i> Leyss.			
CK	0.33±0.01a	11.82±3.00a	36.31±8.72a
T1	0.23±0.02b	4.38±1.86b	18.87±3.21b
T2	0.16±0.04c	2.74±0.92b	16.79±4.82b
青绿藁草 <i>C. breviculmis</i> R. Br.			
CK	0.37±0.04a	32.07±2.89a	85.68±8.51a
T1	0.25±0.02b	14.52±5.96b	58.27±9.24b
T2	0.21±0.04b	5.59±1.71c	26.82±6.74c
披针叶藁草 <i>C. lanceolata</i> Boott			
CK	0.34±0.05a	17.29±3.21a	50.40±10.20a
T1	0.29±0.03a	6.27±0.92b	21.79±3.62b
T2	0.19±0.02b	3.55±0.85c	18.76±4.31b
涝峪藁草 <i>C. giraldiana</i> Kük.			
CK	0.77±0.32a	14.90±4.55a	19.35±4.12a
T1	0.51±0.19b	9.60±2.15a	18.82±1.28a
T2	0.29±0.08c	4.11±0.77b	14.17±2.17b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一种类不同处理组间差异显著($P=0.05$) Different small letters in the same column mean the significant difference among different treatments of same species ($P=0.05$).

²⁾ CK: 充分灌溉, 负压 4 kPa 且土壤相对含水量 65.63%~84.38% Sufficient irrigation, negative pressure 4 kPa and relative water content in soil 65.63%~84.38%; T1: 中度亏缺灌溉, 负压 8 kPa 且土壤相对含水量 26.04%~31.51% Moderate deficit irrigation, negative pressure 8 kPa and relative water content in soil 26.04%~31.51%; T2: 重度亏缺灌溉, 负压 12 kPa 且土壤相对含水量 6.63%~15.44% Heavy deficit irrigation, negative pressure 12 kPa and relative water content in soil 6.63%~15.44%.

2.2 亏缺灌溉对 4 种藁草属植物净光合速率和蒸腾速率的影响

在亏缺灌溉条件下 4 种藁草属植物叶片净光合速率(P_n)和蒸腾速率(T_r)的变化见图 1。随土壤相对含水量的降低,4 种植物叶片的 P_n 值和 T_r 值均逐渐降低。

由图 1 可以看出:在中度亏缺灌溉条件下,矮丛藁草、披针叶藁草和涝峪藁草的 P_n 值小于对照但差异未达显著水平,青绿藁草的 P_n 值则显著低于对照。在重度亏缺灌溉条件下,4 种植物的 P_n 值均显著低于

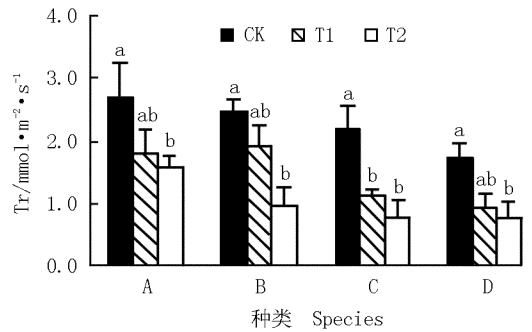
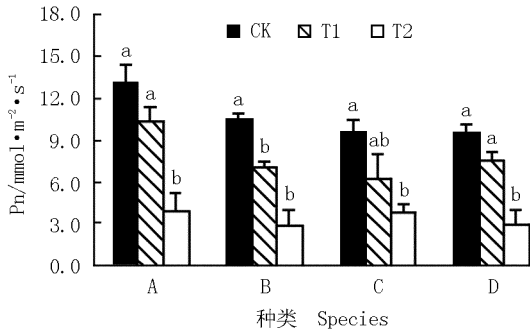
对照;其中,青绿藁草的 Pn 值降幅最大, Pn 值为 $2.97 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 仅为对照的 27.73%; 披针叶藁草的 Pn 值降幅最小, 其 Pn 值为对照的 40.50%。

由图1还可见:在中度亏缺灌溉条件下,4种植物的 Tr 值均低于对照但仅披针叶藁草的 Tr 值与对照有显著差异。在重度亏缺灌溉条件下,4种植物叶片的 Tr 值均显著低于对照,其中,披针叶藁草的 Tr 值降幅最大,其 Tr 值为 $0.77 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 仅为对照的

35.53%;按 Tr 值降幅由大到小4种植物依次排序为披针叶藁草、青绿藁草、涝峪藁草、矮丛藁草。

2.3 亏缺灌溉对4种藁草属植物气孔导度和胞间 CO₂浓度的影响

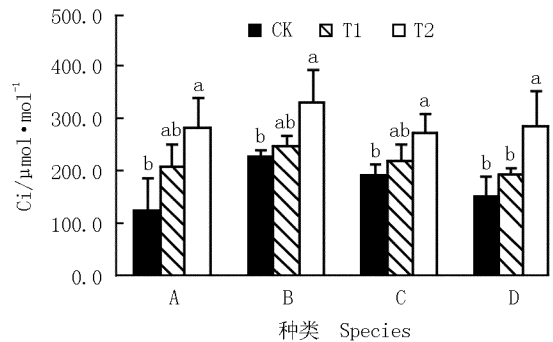
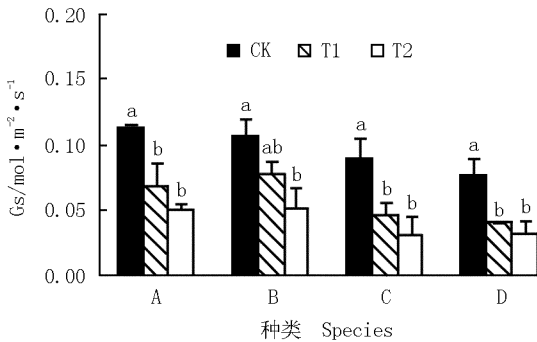
在亏缺灌溉条件下4种藁草属植物叶片气孔导度(Gs)和胞间 CO₂浓度(Ci)的变化见图2。随土壤相对含水量的降低,4种植物的 Gs 值逐渐降低而 Ci 值逐渐增加。



CK: 充分灌溉, 负压 4 kPa 且土壤相对含水量 65.63% ~ 84.38% Sufficient irrigation, negative pressure 4 kPa and relative water content in soil 65.63%~84.38%; T1: 中度亏缺灌溉, 负压 8 kPa 且土壤相对含水量 26.04% ~ 31.51% Moderate deficit irrigation, negative pressure 8 kPa and relative water content in soil 26.04%~31.51%; T2: 重度亏缺灌溉, 负压 12 kPa 且土壤相对含水量 6.63% ~ 15.44% Heavy deficit irrigation, negative pressure 12 kPa and relative water content in soil 6.63%~15.44%.

A: 矮丛藁草 *Carex humilis* Leyss.; B: 青绿藁草 *C. breviculmis* R. Br.; C: 披针叶藁草 *C. lanceolata* Boott; D: 涝峪藁草 *C. girdaliana* Kük. 图中不同的小写字母表示同一种类不同处理间差异显著 ($P=0.05$) Different small letters mean the significant difference among different treatments of same species ($P=0.05$).

图1 亏缺灌溉条件下4种藁草属植物叶片净光合速率(Pn)和蒸腾速率(Tr)的变化
Fig. 1 Change of net photosynthetic rate (Pn) and transpiration rate (Tr) in leaf of four species of *Carex* Linn. under deficit irrigation condition



CK: 充分灌溉, 负压 4 kPa 且土壤相对含水量 65.63% ~ 84.38% Sufficient irrigation, negative pressure 4 kPa and relative water content in soil 65.63%~84.38%; T1: 中度亏缺灌溉, 负压 8 kPa 且土壤相对含水量 26.04% ~ 31.51% Moderate deficit irrigation, negative pressure 8 kPa and relative water content in soil 26.04%~31.51%; T2: 重度亏缺灌溉, 负压 12 kPa 且土壤相对含水量 6.63% ~ 15.44% Heavy deficit irrigation, negative pressure 12 kPa and relative water content in soil 6.63%~15.44%.

A: 矮丛藁草 *Carex humilis* Leyss.; B: 青绿藁草 *C. breviculmis* R. Br.; C: 披针叶藁草 *C. lanceolata* Boott; D: 涝峪藁草 *C. girdaliana* Kük. 图中不同的小写字母表示同一种类不同处理间差异显著 ($P=0.05$) Different small letters mean the significant difference among different treatments of same species ($P=0.05$).

图2 亏缺灌溉条件下4种藁草属植物叶片气孔导度(Gs)和胞间 CO₂浓度(Ci)的变化
Fig. 2 Change of stomatal conductance (Gs) and intercellular CO₂ concentration (Ci) in leaf of four species of *Carex* Linn. under deficit irrigation condition

气孔导度是反映气孔阻力的一个参数,由图2可以看出:在中度亏缺灌溉条件下,4种植物的Gs值均低于对照,其中,矮丛藁草、披针叶藁草和涝峪藁草的Gs值与对照有显著差异;在重度亏缺灌溉条件下,4种植物的Gs值均显著低于对照。

在中度亏缺灌溉条件下,4种植物的Ci值均高于对照但差异未达显著水平;而在重度亏缺灌溉条件下4种植物的Ci值均显著高于对照。在重度亏缺灌溉条件下,4种植物叶片的Ci值高于对照,而Pn值显著下降,表明其Pn的主要限制因素是非气孔因素。

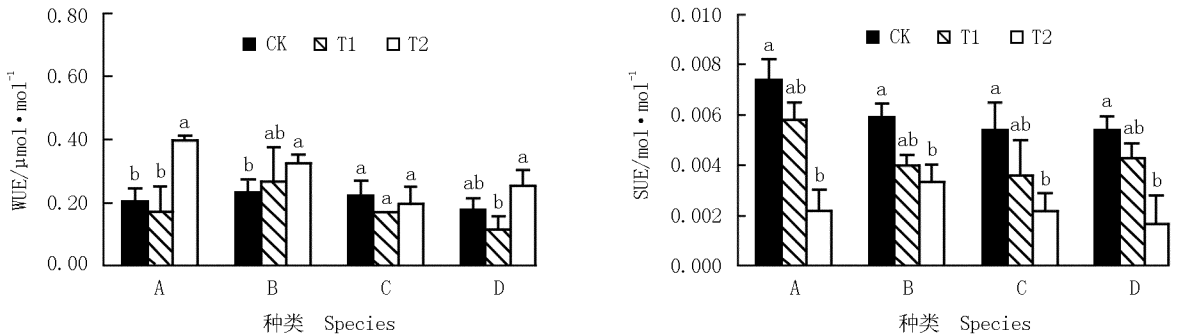
2.4 亏缺灌溉对4种藁草属植物水分利用效率和光能利用效率的影响

在亏缺灌溉条件下供试4种藁草属植物叶片水分利用效率(WUE)和光能利用效率(SUE)的变化见

图3。

从图3可以看出:在中度亏缺灌溉条件下,4种植物中仅青绿藁草的WUE值高于对照,其他3种植物的WUE值均略低于对照。在重度亏缺灌溉条件下,披针叶藁草的WUE值略低于对照且差异不显著,其他3种植物的WUE值均高于对照,这一现象与重度亏缺灌溉条件下地上部生长量及蒸腾速率降幅较大有关。

光能利用效率能体现植物对光强变化的响应。在中度亏缺灌溉条件下,4种植物的SUE值均低于对照但差异均不显著。而在重度亏缺灌溉条件下,4种植物的SUE值均显著低于对照;其中,矮丛藁草的SUE值仅为对照的29.73%,而青绿藁草的SUE值降幅最小,为对照的56.17%。



CK: 充分灌溉, 负压4 kPa且土壤相对含水量65.63%~84.38% Sufficient irrigation, negative pressure 4 kPa and relative water content in soil 65.63%~84.38%; T1: 中度亏缺灌溉, 负压8 kPa且土壤相对含水量26.04%~31.51% Moderate deficit irrigation, negative pressure 8 kPa and relative water content in soil 26.04%~31.51%; T2: 重度亏缺灌溉, 负压12 kPa且土壤相对含水量6.63%~15.44% Heavy deficit irrigation, negative pressure 12 kPa and relative water content in soil 6.63%~15.44%.

A: 矮丛藁草 *Carex humilis* Leyss.; B: 青绿藁草 *C. breviculmis* R. Br.; C: 披针叶藁草 *C. lanceolata* Boott; D: 涝峪藁草 *C. giraldiana* Kük. 图中不同的小写字母表示同一种类不同处理间差异显著 ($P=0.05$) Different small letters mean the significant difference among different treatments of same species ($P=0.05$).

图3 亏缺灌溉条件下4种藁草属植物水分利用效率(WUE)和光能利用效率(SUE)的变化
Fig. 3 Change of water utilization efficiency (WUE) and solar energy utilization efficiency (SUE) in leaf of four species of *Carex* Linn. under deficit irrigation condition

3 讨论和结论

中国北方地区干旱缺水,而城市园林绿化大多用自来水灌溉,使有限的水资源更加紧张,也导致位于城市绿地一些特殊逆境中的园林植物常处于水分亏缺状态,因而,研究缺水状态下园林植物的生长和光合特性对指导园林灌溉具有实际应用意义。

在土壤干旱条件下,植物生长受抑制,其地上和

地下部分生长量减小。本研究结果表明:在中度亏缺灌溉条件下,4种藁草属植物均能正常生长,且地上部分生长量的降幅较小,其中矮丛藁草和披针叶藁草与对照的差异未达显著水平;净光合速率的降幅也较小,除青绿藁草外,其他3种植物与对照的差异均未达到显著水平;水分利用效率和光能利用效率略有降低,表明供试的4种植物均较耐中度干旱,在园林中可采用适当亏缺灌溉的方式供水,以实现节约用水的目的。在自然干旱条件下,植物根系发达而深扎、根

冠比增大^[15];而在本研究中由于采用盆栽实验,植物根系生长空间有限,地下部分生长受抑制的程度大于地上部分,导致其根冠比降低。在重度亏缺灌溉条件下,4种藁草属植物地上和地下部分生长量较对照显著下降,但仅有少量叶片枯黄和叶缘变黄,表明4种植物在重度干旱条件下均能存活,可应用于一些较为干旱的园林环境中;在重度亏缺灌溉条件下,4种植物的根冠比、净光合速率、蒸腾速率和光能利用效率较对照显著降低,而水分利用效率显著上升,这一现象与栾金花^[3]获得的干旱胁迫下毛藁草(*Carex lasiocarpa* Ehrhart)光合特性的变化规律基本一致。

在干旱胁迫条件下植物净光合速率(Pn)的降幅较大^[16],可通过关闭气孔等调节功能降低蒸腾速率(Tr),从而维持体内水分平衡,保持细胞所必须的最低膨压。如果Pn的降低是由气孔限制因素造成的,则在恢复灌溉后Pn和Tr均会显著增加;而如果Pn的降低是非气孔限制因素导致的,则一般是由叶肉细胞光合活性下降造成的,恢复灌溉后Pn和Tr也不会增加。对此,Farquhar等^[17]提出的判定标准为:胞间CO₂浓度降低且气孔导度也降低,表明Pn的变化主要与气孔限制因素有关;而胞间CO₂浓度增高且气孔导度降低,则表明Pn的变化主要与非气孔限制因素有关。本研究结果表明:在中度亏缺灌溉条件下,Pn的降低主要是由气孔限制因素导致的;而在重度亏缺灌溉条件下4种植物叶片的气孔导度显著下降,胞间CO₂浓度与对照差异不显著,但Pn值显著低于对照,表明Pn降低的主因是非气孔限制因素,可能是由于叶肉细胞光合活性的下降造成的^[18-19]。宋家壮等^[20]对水分胁迫条件下藁草(*Phalaris arundinacea* Linn.)光合特性的研究也得出了类似的结果。

在重度亏缺灌溉条件下,供试4种植物的水分利用效率显著提高、光能利用效率显著下降,与地上部分生长受抑制、蒸腾速率大幅降低有关。与宋家壮等^[20]对藁草的研究结果基本一致,但葛晋纲等^[21]对钝叶草[*Stenotaphrum secundatum* (Walter) Kuntze]和高羊茅(*Festuca pratensis* Hudson)的研究则得出了“经干旱胁迫后水分利用效率显著下降”的结论,可能与不同植物种类对干旱胁迫适应性的差异有关。

参考文献:

[1] 马万里,韩烈保,罗菊春. 草坪植物的新资源——藁草属植物[J]. 草业科学, 2001, 18(2): 43-45.

- [2] MATA C G, LAMATTINA L. Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress[J]. *Plant Physiology*, 2001, 126: 1196-1204.
- [3] 栾金花. 干旱胁迫下三江平原湿地毛藁草光合作用日变化特性研究[J]. *湿地科学*, 2008, 6(2): 223-226.
- [4] 刘金荣,杜建雄,谢晓蓉. 干热胁迫和复水对草坪草光合生理生态特性的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(5): 2694-2699.
- [5] 陈进勇,李炜民,徐琳. 干旱条件下冷季型草光合蒸腾特性的研究[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(8): 1638-1643.
- [6] 解迎春,薛绪掌,王国栋. 负水头供水条件下土壤水分一维入渗规律的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(5): 119-122.
- [7] 李邵,薛绪掌,郭文善,等. 负水头灌溉系统供水规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(5): 55-58.
- [8] 杨学军,武菊英,滕文军,等. 负水头亏缺灌溉下4种藁草耗水量及抗旱性研究[J]. *草地学报*, 2011, 19(4): 607-611.
- [9] 邹朝望,薛绪掌,张仁铎,等. 负水头灌溉原理与装置[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 17-22.
- [10] HSIAO T C. Plant responses to water stress[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1973, 24: 519-570.
- [11] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2002: 1-2.
- [12] 阮成江,李代琼. 半干旱黄土丘陵区沙棘的光合特性及其影响因子[J]. *植物资源与环境学报*, 2000, 9(1): 16-21.
- [13] 于晓霞,阮成江. 曼陀罗光合特性研究[J]. *植物资源与环境学报*, 2011, 20(1): 40-43.
- [14] 罗树伟,郭春会,张国庆,等. 沙地植物长柄扁桃光合特性研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(1): 125-132.
- [15] 宇万太,于永强. 植物地下生物量研究进展[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 927-932.
- [16] 许大全,沈允刚. 植物光合效率的日变化[J]. *植物生理学报*, 1997, 23(4): 410-416.
- [17] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [18] RHODENBAUGH E J, PALLARDY S G. Water stress, photosynthesis and early growth patterns of cuttings of three *Populus* clones[J]. *Tree Physiology*, 1993, 13(3): 213-226.
- [19] 尤毅,孙映波,吕复兵. 干旱胁迫对文心兰生长及光合特性的影响[J]. *热带作物学报*, 2011, 32(7): 1245-1248.
- [20] 宋家壮,李萍萍,付为国. 不同土壤水分对藁草光合生理特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(1): 289-291.
- [21] 葛晋纲,蔡庆生,周兴元,等. 土壤干旱胁迫对2种不同类型草坪草光合特性和水分利用率的影响[J]. *草业科学*, 2005, 22(4): 103-106.

(责任编辑:张明霞,惠红)