

水分胁迫对不同种源蒙古莢光合特性与生长的影响

谢乾瑾, 夏新莉, 刘超, 尹伟伦*

(北京林业大学, 北京 100083)

摘要: 以6个种源的1年生蒙古莢为试验材料, 采用称量控水的方法, 根据种源地的情况设置充足水分、中度胁迫、重度胁迫3个水分梯度, 分别维持在田间持水量的80% 和 85%、45% 和 50%、15% 和 20% 开展水分胁迫试验。通过测定不同水分梯度、不同种源的光合生理与生长指标表明: 蒙古莢通过降低光合效率、蒸腾速率和最大光化学效率, 减缓生长和生物量积累, 提高水分利用效率和根冠比来适应水分胁迫。在水分胁迫下, 蒙古莢光合能力的下降是引起其生长减缓的重要原因。从蒙古莢光合能力与生长综合考虑, 内蒙古土默特左旗(NI)种源是在水分胁迫下表现最优良的种源。蒙古莢在光合活动中的气体交换, 水分、CO₂、光能利用效率, 光合色素及荧光特性的生理响应和生长差异, 反映了不同种源蒙古莢对不同水分环境表现出的生理适应策略。

关键词: 水分胁迫; 种源; 光合特性; 蒙古莢

中图分类号: S718.3

文献标识码: A

Effects of Water Stress on Photosynthetic and Growth Characteristics of Different *Caryopteris mongholica* Provenances

XIE Qian-jin, XIA Xin-li, LIU Chao, YIN Wei-lun

(Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Water stress experiments on six *Caryopteris mongholica* provenances were conducted under three intensities selected by the provenance environments: mild, moderate and severe, of which the soil moisture were 80% and 85%, 45% and 50% and 15% and 20% of the field capacity respectively. The study of the photosynthetic and growth indices versus stress intensities shows that *Caryopteris mongholica* strengthens its adaptation to water stress with the reduction of net photosynthetic rate, transpiration rate and maximum quantum efficiency of PS photochemistry, and the weakening of biomass accumulation and growth rate that are accompanied with a better water use efficiency and an increased Root/Shoot Ratio, and that the provenance of Inner Mongolia TUZUOQI (NI) is of the best physiological indices in water deficit. The differences in gas exchange, utilization efficiencies of water, CO₂ and light, physiological responses of chlorophyll and its fluorescence, and growth performance of different provenances are identical to the mechanism of physiological adaptation to water stress.

Key words: water stress; provenance; photosynthetic; *Caryopteris mongholica*

收稿日期: 2009-12-26

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03A01)、北京市教育委员会学科建设与研究生培养项目资助。

作者简介: 谢乾瑾(1985—), 女, 福建人, 硕士生。

* 通讯作者: 尹伟伦, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为植物抗旱抗盐机理, 林木生长发育调控及转基因育种。

蒙古莢 (*Caryopteris mongholica* Bunge), 属马鞭草科 (Verbenaceae), 落叶低矮灌木, 主要分布于降水稀少的干旱荒漠与半荒漠地区^[1-5]。蒙古莢不仅是干旱、半干旱地区的生态脆弱带防风固沙和水土保持的优良造林树种, 又是街道、公园、屋顶绿化美化香化的野生耐旱花灌木资源, 而且具有药用和芳香油提取等工业价值, 此外可用于营造薪炭林、饲料林, 是优良的“木本饲料”资源。至今蒙古莢的研究只局限在物种水平的生物学解剖结构与保护上^[6-8], 但对蒙古莢的抗逆生理的研究很少。本研究对 6 个蒙古莢种源进行控水试验, 以了解不同种源蒙古莢在水分胁迫下光合生理与生长的变化, 揭示水分变化对蒙古莢光合生理的影响以及不同种源间的差异, 探讨不同种源蒙古莢生长对水分胁迫的适应机制, 为蒙古莢的推广利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与水分处理

试验地为北京林业大学苗圃, 试验材料为 1 年生的蒙古莢播种苗, 种源来源见表 1。于 2009 年 4 月 13 日将种子直接播于培养钵内, 覆土厚度 0.5 ㎝。2009 年 5 月 25 日选用生长健壮、无病虫害, 同一种源长势基本一致的苗木为供试树种, 移栽在塑料盆内。塑料盆高 24 cm, 上下口直径分别为 23.3 cm、17 cm, 每盆栽 1 株, 培养基质为 1/3 沙 + 1/3 草炭土 + 1/3 土, 每盆约为 7 kg, 进行正常供水管理。6 月每周浇灌 1 次 Hoagland 营养液。8 月进入旺盛生长期时开始干旱胁迫试验。

本试验采用盆栽水分梯度法测定抗旱指标, 干旱胁迫处理以根际水分胁迫为主。根据种源地的情况和李玉俊对不同沙地含水量与蒙古莢生长关系的研究^[9], 试验设置对照充足水分处理 (CK)、中度水分胁迫 (T1) 和重度水分胁迫 (T2), 即土壤含水量分别控制在田间持水量 (23.17%) 的 80% 和 85% (CK)、45% 和 50% (T1)、15% 和 20% (T2)。2009 年 8 月 7 日正式进行抗旱试验, 到 10 月 11 日结束。为了防止雨水和处理外的其它水分影响, 试验地设置塑料遮雨棚, 晴天打开, 雨天关闭。用烘干和称质量相结合的方法控制土壤含水量, 每天下午 6:00 用量杯补充消耗的水分, 并记下消耗的水量, 测定土壤含水量使各处理稳定在设定土壤含水量范围之内。6 个种源蒙古莢的每个水分胁迫处理均为 6 盆, 共 108 盆, 采用随机区组试验设计。

表 1 试验材料及其来源

种源地	种源编号	纬度 (N)	经度 (E)	海拔 /m
甘肃民勤	GM	38.633°	103.083°	1 378
新疆吐鲁番	XT	40.850°	89.183°	- 95
内蒙古鄂尔多斯市鄂托克前旗陶利嘎查	NE	38.502°	106.617°	1 217
内蒙古呼和浩特市土默特左旗	NT	40.394°	111.923°	1 087
宁夏银川	NY	38.420°	106.172°	1 103
陕西省榆林	SY	38.172°	109.430°	1 110

1.2 测定指标与方法

使用 Li-6400 便携式光合作用测定系统, 选择晴天 9:00—11:00, 选取每个种源每个处理叶位和叶龄相对一致的叶片 (从植株顶部向下第 5 和 6 片叶) 进行测定。测定时设置一致的光合有效辐射 ($PAR, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 CO_2 流量、大气 CO_2 浓度 ($C_a, \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 等光合参数。测定指标为: 叶片的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (E)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、气孔导度 (G_s)。并利用公式计算气孔限制值 ($L_s = 1 - C_i/C_a$)^[10]、叶片瞬时水分利用效率 ($WUE = P_n/E$)^[11]、表观 CO_2 利用效率 ($CUE = P_n/C_i$)^[12]、表观光能利用效率 ($LUE = P_n/PAR$)^[13]。叶面积采用扫描仪法。采用 Dual-PAM-100 双通道叶绿素荧光仪 (Walz, German) 选取每个种源不同干旱处理下叶位和叶龄相对一致的叶片测定蒙古莢的荧光参数值。光合色素的测定采用 80% 丙酮提取, 比色法测定^[14]。每隔 9 天测定各项生理指标, 共进行连续 4 次测定, 每个处理随机选 3 个植株测定, 每个植株选取 3 片叶测定 3 个重复。生长指标在试验开始与结束测定。

1.3 数据分析

采用 SPSS(16.0) 软件的 two-way ANOVA、One-way ANOVA、Duncan 多重比较、LSD 多重比较进行数据统计分析。光合能力综合评价采用隶属函数法对测定的各指标进行综合评价^[15-17]。公式为: $U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, 式中 $U(X_{ij})$ 为测定指标的隶属函数值; X_{ij} 为蒙古莢 6 个种源各指标测定的平均值; X_{\min} 为各测定指标的最小值; X_{\max} 为各测定指标的最大值。

2 结果与分析

2.1 气体交换

水分胁迫、不同水分梯度与不同种源的交互作用对蒙古莢的 P_n 、 C_i 、 G_s 、 E 和 L_s 具有极显著影响, 不同种源的 C_i 、 G_s 、 E 、 L_s 存在显著差异, 种源对蒙古

莜 P_n 的影响不显著(表2)。由表3可知,在整体水平下蒙古莜的 P_n 、 C_i 、 G_s 和 E 均随着水分胁迫程度的加深呈降低趋势, L_s 随着水分胁迫程度的加深而增大,表明水分胁迫使蒙古莜的气孔阻力增加,胞间 CO_2 浓度和气孔导度降低,叶片气孔关闭,影响 CO_2 进入叶内,从而造成了净光合速率和蒸腾速率的下降。在整体水平下蒙古莜的 P_n 大小顺序为 $NT > GM > NY > SY > NE > XT$; NT 、 SY 种源具有最小的 C_i 、 G_s 、 E 和最大的 L_s , 而 XT 种源具有最大的 C_i 、 G_s 、 E 和最小的 L_s 。

表2 双因素方差分析中蒙古莜不同种源和水分梯度对其光合生理与生长指标影响的 F 值

指标	种源	水分梯度	水分梯度 × 种源
$P_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	2.40 ns	34.73*	3.19*
$C_i/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	8.81*	22.3*	2.52*
$G_s/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	3.87*	37.22*	2.37*
L_s	8.99*	22.17*	2.57*
$E/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	14.27*	60.26*	3.70*
$WUE/(\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1})$	14.40*	17.58*	1.83 ns
$CUE/(\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1})$	9.72*	11.04*	3.80*
$LUE/(\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1})$	2.40 ns	34.73*	3.19*
$chl a/b$	1.18 ns	2.23 ns	2.42*
Fv/Fm	30.220*	12.693*	1.514 ns
基径增长量/mm	19.906*	70.105*	3.626*
株高增长量/cm	13.370*	34.921*	2.576*
总生物量/g	26.460*	49.590*	4.859*
根冠比	10.176*	14.846*	0.730 ns

注: * : $p < 0.05$, ns: $p > 0.05$ 。

表3 6个种源和3个水分梯度蒙古莜光合生理指标的双因素方差分析中 Duncan 多重比较检验

指标	水分梯度			种源					
	CK	T1	T2	GM	XT	NE	NY	SY	NT
$P_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	20.203a	20.076a	10.988b	18.331ab	14.815b	15.911b	16.643b	16.487b	20.345a
$C_i/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	311a	277b	220c	292b	333a	283bc	250cd	224d	233d
$G_s/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	0.526a	0.393b	0.164c	0.442a	0.478a	0.318b	0.366ab	0.281b	0.283b
L_s	0.202c	0.291b	0.437a	0.250c	0.147d	0.275bc	0.359ab	0.425a	0.402a
$E/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	4.863a	3.830b	1.941c	4.347ab	5.098a	3.662bc	2.952cd	2.698d	2.513d
$WUE/(\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1})$	4.496b	6.005b	8.196a	5.003c	2.901d	4.908c	6.958b	8.518ab	9.104a
$CUE/(\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1})$	0.066a	0.075a	0.053b	0.063b	0.045c	0.059b	0.061b	0.069b	0.089a
$LUE/(\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1})$	13.468a	13.384a	7.325b	12.221ab	9.877b	10.607b	11.095b	10.991b	13.563a
$chl a/b$	3.894ab	3.950a	3.829b	3.877a	3.842b	3.871a	3.882a	4.014a	3.859a
Fv/Fm	0.835a	0.821a	0.794b	0.858a	0.781c	0.741d	0.829b	0.845ab	0.843ab
基径增长量/mm	1.923a	1.317b	0.854c	1.092c	0.944c	1.038c	1.804a	1.433b	1.876a
株高增长量/cm	12.906a	10.806b	7.600c	9.189c	6.789d	10.133c	10.767bc	12.422ab	13.322a
总生物量/g	11.743a	6.582b	3.315c	3.896c	3.066c	3.186c	13.104a	10.888ab	9.139b
根冠比	0.270b	0.341b	0.468a	0.379bc	0.473ab	0.503a	0.331c	0.193d	0.28cd

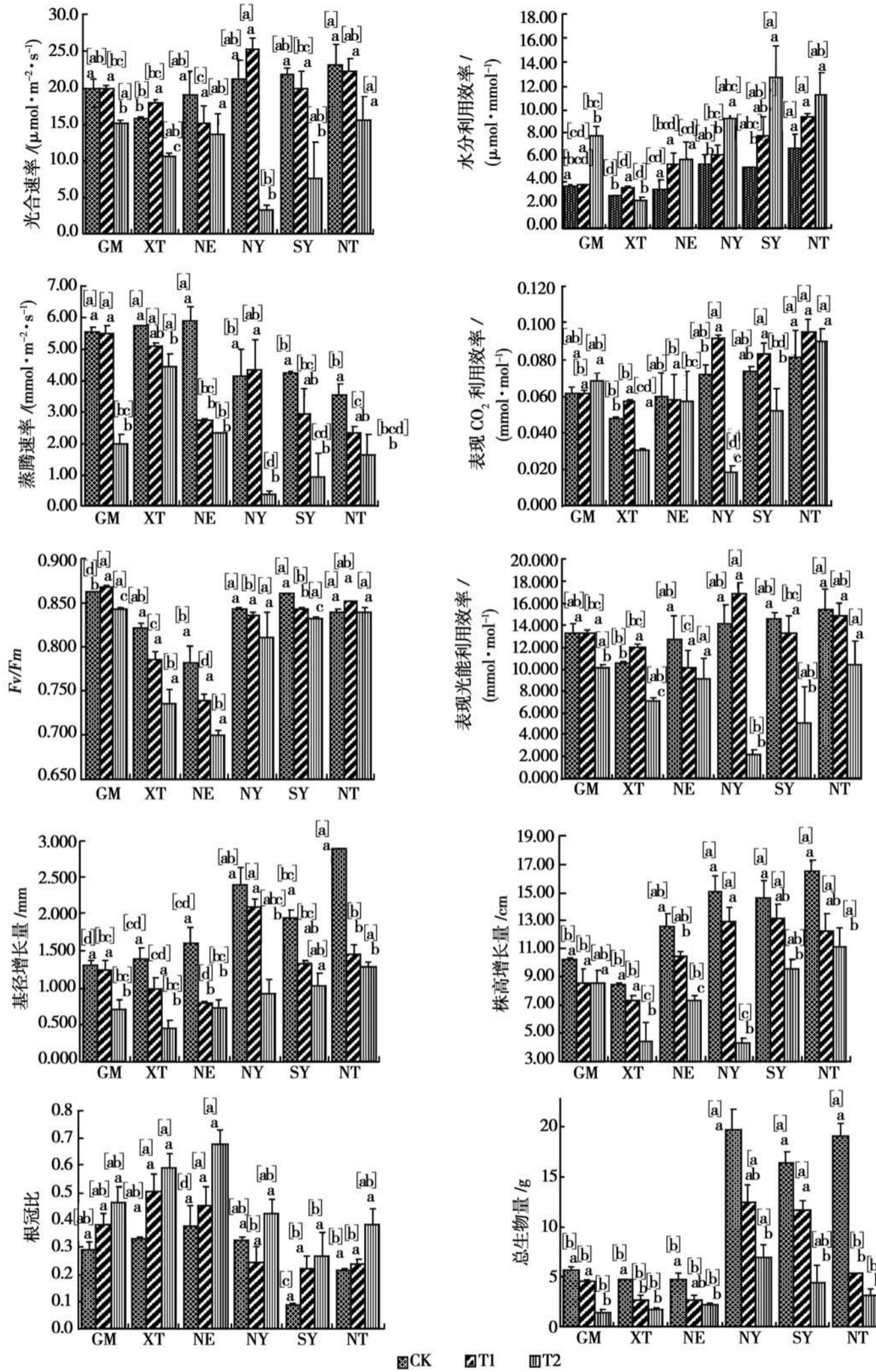
注:表中数据为平均值。不同字母的处理差异性显著 ($p < 0.05$)。

2.2 水分、 CO_2 、光能利用效率

水分胁迫对蒙古莜的瞬时水分利用效率 WUE 、表观 CO_2 利用效率 CUE 、表观光能利用效率 LUE 都

具有显著影响。不同种源的 WUE 、 CUE 具有显著差异,而 LUE 的差异不显著。不同水分梯度与不同种源的交互作用对蒙古莜的 CUE 、 LUE 造成极显著的影响,对 WUE 的影响不显著(表2)。随着水分胁迫

蒙古莜 6 个种源中只有 NE 、 NT 种源的 P_n 在不同水分梯度之间没有显著性差异(图1),说明 NE 、 NT 种源的光合碳同化过程对水分胁迫的反应较为稳定,其余种源则较为敏感。在充足水分下, NT 种源的 P_n 值最大, XT 种源的最小。在中度胁迫下, NY 种源的 P_n 值最大, NE 种源最小,与对照相比 NE 种源的降幅最大为 20.46%, GM 、 SY 、 NT 下降较小,均小于 10%,中度水分胁迫能提高 XT 、 NY 种源的光合效率。在重度胁迫下 6 个种源蒙古莜的 P_n 与对照相比下降幅度大小顺序依次为 NY (84.74%) > SY (65.22%) > NT (32.68%) > ND (31.98%) > NE (29.19%) > GM (23.81%)。只有 XT 、 NY 种源的 P_n 随水分胁迫程度的增加先升高后降低,说明适度的干旱反而能提高 XT 、 NY 种源的光合效率。6 个种源的 E 在不同水分梯度水平表现出了显著差异性,在充足水分下, NE 、 XT 种源的 E 最大, NT 种源的 E 最小;在中度胁迫下, NY 种源的 E 反而有略微提高,其余均降低;在重度胁迫下, XT 种源的 E 远大于其余种源, NY 种源的 E 最小。尽管 NY 种源在中度胁迫下 P_n 、 E 比对照增加,但在严重胁迫时急剧下降,表明 NY 种源的光合碳同化过程对水分胁迫的反应最敏感, P_n 最高值在中度胁迫水平,水分过多过少都会使其光合效率下降,并在重度胁迫时急剧降低蒸腾速率以防止水分过多的散失。



注: 通过单因素方差分析, 具有不同字母的差异性显著 ($P < 0.05$), 误差棒代表平均值的标准误差。误差棒上方的字母为对水分梯度的方差分析进行 Duncan 多重比较检验分组; 方括号内的字母为对种源的方差分析进行 Duncan 多重比较检验分组。

图 1 不同水分梯度及种源的生理生长指标差异性的单因素方差分析结果

程度的加重, WUE 增大, 与适宜水分下的 WUE 相比, 中度胁迫提高了 33.56%, 重度胁迫提高了 82.30%; LUE 逐渐降低; CUE 先升高后降低。 WUE 、 CUE 、 LUE 最大的是 NT 种源, 最低的是 XT 种

源 (表 3), 说明 NT 种源固定单位数量的 CO_2 所需水量最少, 节水能力最强, 积累有机物的能力强, 耐旱生产力最高。上述结果表明: 水分、 CO_2 、光能利用效率随水分变化的格局存在显著差异, 不同种源的

蒙古莜具有相适应的水分、CO₂、光能利用效率。

NE、NT种源的 *WUE*、*CUE*、*LUE* 在不同水分梯度之间均没有显著性差异(图1),说明 NE、NT种源的水分、CO₂、光能利用率对水分胁迫的反应比其它种源稳定。在充足水分与中度胁迫下, NT、SY、NY 3个种源的水分、CO₂、光能利用效率总体水平高于 GM、NE、XT种源。在重度胁迫下, NT、SY、NY 3个种源的 *WUE* 仍高于后3个种源,但处于较高水平的 *CUE*、*LUE* 的种源变成了 NT、GM、NE种源, *CUE*、*LUE* 与 *Pn* 的变化趋势一致。

2.3 光合色素与荧光特性

蒙古莜的最大光化学效率 *Fv/Fm* 在不同水分梯度间与不同种源间差异显著,但 *chl a/b* 差异不显著。不同水分梯度与不同种源的交互作用对蒙古莜的 *chl a/b* 造成显著的影响,但对 *Fv/Fm* 的影响不显著(表2)。蒙古莜的 *chl a/b* 随着水分胁迫程度的加深先增加后减少,在整体水平下最大的是 SY种源,最小的是 XT种源。蒙古莜的 *Fv/Fm* 随着水分胁迫程度的加深呈降低趋势,在整体水平下最大的是 GM种源,最小的是 NE种源(表3)。

蒙古莜6个种源中只有 GM种源的 *Fv/Fm* 在不同水分梯度之间都表现出显著差异性(图1),说明 GM种源的最大光化学效率对水分胁迫的反应比其余种源更为敏感。重度水分胁迫使 GM种源的 *Fv/Fm* 显著小于对照,说明 GM种源电子传递活性受到严重抑制,但活性仍大于其它种源,水分胁迫并没有改变蒙古莜6个种源电子传递活性大小顺序。

2.4 生长特性

蒙古莜的基径增长量、株高增长量、总生物量、根冠比在不同种源间与不同水分梯度下具有显著差异,不同水分梯度与不同种源的交互作用对蒙古莜的根冠比没有显著影响(表2)。在整体水平下蒙古莜的基径增长量、株高增长量、总生物量随着水分胁迫程度的加深呈降低趋势,根冠比随着水分胁迫程度的加深而增大,说明水分胁迫对蒙古莜地上生物量的抑制作用大于地下生物量。NT、NY、SY 3个种源的基径与株高增长量均大于 GM、NE、XT种源,总生物量最大的是 NY种源,最小的是 XT种源,说明 XT种源生长受到的抑制最严重。根冠比最大的是 NE、XT种源,最小的是 SY种源(表3)。

蒙古莜6个种源的基径增长量、总生物量均在水分胁迫下显著降低(图1)。只有 GM种源的株高增长量在不同水分梯度间没有显著差异性,说明

GM种源的株高增长量对水分胁迫的反应比其余种源更为稳定。NY种源的株高增长量在水分重度胁迫下变化最大,说明 NY种源的高生长对水分胁迫的反应最敏感。6个种源的根冠比在水分胁迫下没有显著变化。

3 讨论

(1) 植物光合作用的限制可分为气孔因素和非气孔因素,前者由于气孔导度下降导致 CO₂ 进入叶片受阻,后者因为光合细胞机构和功能受到了损害而导致的 *Pn* 下降^[18-19]。气孔的开放程度直接关系到植物与外界的气体交换状况,并受很多环境条件的影响,其中就包括植物周围的水分状况。Farquhar等^[18,20-21]指出如果 *Gs* 和 *Ci* 下降, *Ls* 增加,则说明 *Pn* 下降是由气孔限制因素引起的;而非气孔因素引起的 *Pn* 的下降则伴随着 *Ci* 的提高。本研究的 *Pn*、*Gs*、*E*、*Ci* 随胁迫程度的增加而显著下降,同时 *Ls* 显著增加,说明蒙古莜光合速率的下降主要是由干旱诱导的气孔限制因素引起的。

蒸腾速率与气孔特性紧密相连,反映植株的水分损耗。蒙古莜各种源的 *E* 与 *Gs* 大小顺序排列一致,而与 *Ls* 大小排列顺序相反,表明气孔开放程度和气孔适应性显著影响蒸腾速率。气孔导度的降低,既是单位叶面积的气孔数降低的结果,也是气孔开张程度降低的结果^[22]。气孔导度的降低可以减少蒸腾,减少水分丢失^[23]。气孔的这种调节作用可以使植物提高水分利用效率,使其趋于最大化和最优化。

(2) *WUE* 反映植物 CO₂ 同化作用和水消耗的关系^[24],土壤水分胁迫程度的加重使蒸腾速率下降的幅度大于净光合速率,从而使得蒙古莜的瞬时水分利用效率随着胁迫程度的增加呈现上升趋势,水分胁迫下植物 *WUE* 越大表明其抗旱能力越强,因而对干旱胁迫的适应能力也越强^[25]。*CUE*、*LUE* 不仅反映植物对 CO₂、光能的利用效率,而且指示 *Pn*,因而其在每个水分梯度间的变化趋势与 *Pn* 基本一致。

(3) 中度水分胁迫下叶绿素 a、b 与适宜水分条件相比均降低(数据未列出),叶绿素 a 与 b 均受到了伤害,而 *chl a/b* 在中度胁迫下增加(表3),由此判断中度胁迫对蒙古莜叶绿素 b 的伤害程度大于叶绿素 a,这可能是中度胁迫使叶绿素 a 降解速度变缓或者是在叶绿素合成过程中,叶绿素 a 转化到叶绿素 b 的过程受阻,使叶绿素 b 含量下降,从而使 *chl a/b* 增

加^[26-27]。重度胁迫下 *chl a/b* 下降到最低, 主要原因可能是干旱胁迫使叶绿体片层中的 *chl a/b-Pro* 复合体合成受到抑制^[28], 或者与水分胁迫诱导叶绿体发生膜质过氧化而产生的破坏作用有关^[29-30]。

在整体水平下蒙古莜的最大光化学效率 Fv/Fm 随着水分胁迫程度的加深呈降低趋势, Fv/Fm 反映了 PS 反应中心内原初光能转化效率^[31-32], 说明 Fv/Fm 的降低可以用来评价蒙古莜光合作用受抑制的程度, 其值越大说明电子传递活性越高, 其中 GM 种源电子传递活性最大且对水分胁迫的反应最敏感。光化学淬灭和非光化学淬灭两个过程都是能量耗散的过程, 在逆境中对光合系统有保护作用^[33]。在整体水平下蒙古莜的光化学淬灭系数 qL 、非光化学淬灭系数 NPQ 在不同种源间差异显著, 而对水分胁迫的反应并没有显著变化(数据未列出), 说明 qL 、 NPQ 较为保守, 不适合快速判定蒙古莜受水分胁迫的程度, 但可作为筛选蒙古莜各种源能量耗散能力强弱的指标。水分胁迫对 PS 的相对电子传递速率 $ETR(I)$ 、实际光化学效率 $Y(II)$ 、光保护指标 $Y(ND)$ 、光损伤指标 $Y(NA)$ 没有显著影响(数据未

列出), 说明蒙古莜 PS 的各项指标在水分胁迫下较稳定。

(4) 生长特征是代谢过程在形态上的综合表现, 并受水分因子的直接影响^[17]。水分胁迫使蒙古莜的生长受到抑制, 基径与株高的生长减缓, 总生物量的积累受到抑制, 主要原因可能是由于水分胁迫导致蒙古莜的光合速率降低, 从而抑制生长。根冠比的变化是衡量生物量分配比例受水分胁迫影响程度的重要指标^[34]。一般根与冠的大小和功能是平衡的, 但环境改变时平衡即被打破^[35]。多数研究结果表明, 旱长根水长冠^[36-37], 植物通过增加地下生物量分配提高根冠比来适应土壤干旱^[38]。水分胁迫使蒙古莜的根冠比增大, 说明蒙古莜将更多的资源分配到根系生长, 以吸收更多的水和营养, 从而提高了其抗旱性^[22, 39-41]。根据隶属函数法综合分析的光合能力(表4)与蒙古莜高度、基径增长相一致, NT 种源光合能力在水分胁迫下处于较高水平且能较好地生长, 说明 NT 种源同化器官数量最多, 同时同化器官工作效率高。

表4 6个种源蒙古莜光合能力的综合评价

种源	P_n	E	WUE	CUE	LUE	Fv/Fm	综合评价	排序
GM	0.551 7	0.603 9	0.311 2	0.476 2	0.551 8	0.607 1	0.517 0	5
XT	0.507 5	0.621 7	0.496 1	0.516 1	0.507 6	0.632 0	0.546 8	4
NE	0.557 8	0.303 3	0.568 4	0.564 5	0.557 7	0.360 7	0.485 4	6
NY	0.563 1	0.458 0	0.430 4	0.597 6	0.563 3	0.765 6	0.563 0	3
SY	0.684 5	0.610 1	0.322 6	0.655 7	0.684 3	0.466 7	0.570 7	2
NT	0.615 3	0.512 7	0.473 2	0.666 7	0.615 3	0.550 0	0.572 2	1

总之, 蒙古莜 P_n 、 LUE 的差异是由不同程度干旱处理作用的结果; 蒙古莜 E 、 CUE 、*chl a/b* 及生长特性的差异是由种源和水分胁迫共同作用的结果。水分胁迫对蒙古莜的光合效率、蒸腾速率、瞬时水分利用效率、表观 CO_2 利用效率、表观光能利用效率、最大光化学效率具有显著影响, 这些指标可以用来判定蒙古莜受水分胁迫的程度。随着水分胁迫程度的增加, 蒙古莜的光合效率、蒸腾速率、表观光能利用效率、最大光化学效率降低, 瞬时水分利用效率增加, 表观 CO_2 利用效率先增加后减少。蒙古莜的蒸腾速率、瞬时水分利用效率、表观 CO_2 利用效率、光合色素、最大光化学效率在不同种源间存在显著差异。不同种源的光合生理与生长对不同水分胁迫表现出不同的生理适应, 且随水分的变化存在差异。内蒙古土默特左旗(NT)和内蒙古鄂托克前旗(NE)

种源的光合效率和瞬时水分利用效率、表观 CO_2 利用效率、表观光能利用效率对水分胁迫的反应较稳定, 甘肃民勤(GM)种源的高生长对水分胁迫的反应最稳定, 宁夏银川(NY)种源的光合效率和高生长对水分胁迫的反应最敏感, 甘肃民勤(GM)和陕西榆林(SY)种源电子传递活性对水分胁迫的反应较敏感。蒙古莜通过降低光合效率、蒸腾速率和最大光化学效率, 减缓生长和生物量积累, 提高水分利用效率和根冠比来适应水分胁迫。在水分胁迫下, 蒙古莜光合能力的下降是引起其生长减缓的重要原因。从蒙古莜光合能力与生长综合考虑, 内蒙古土默特左旗(NT)种源是在水分胁迫下表现最优良的种源。

参考文献:

- [1] 马毓泉. 内蒙古植物志: 第五卷[M]. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1980: 162 - 164

- [2] 裴 鉴, 陈守良. 中国植物志: 第 65 卷第一分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1982: 1 - 208
- [3] 吴征镒. 中国种子植物属的分布区类型 [J]. 云南植物研究, 1991, 增刊: 33
- [4] 刘 嫒. 中国沙漠植物志: 第三卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 90 - 92
- [5] 赵一之. 蒙古莠的植物区系地理分布研究 [J]. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 1995, 26 (2): 195 - 197
- [6] 任常胜, 乔俊缠, 朱庆玲. 蒙古莠的形态组织鉴定 [J]. 中药材, 1996, 19 (3): 343 - 344
- [7] 张源润, 董仁才, 麦 硕, 等. 耐旱灌木蒙古莠花的资源及保护利用 [J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13 (1): 91 - 94
- [8] 王晓江, 李爱平, 宁明世, 等. 生态灌木蒙古莠的生物生态学特性及其经济价值评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20 (2): 191 - 194
- [9] 李玉俊, 李新荣, 杨喜林. 芳香植物——蒙古莠的生态生理特性及其栽培技术 [J]. 中国沙漠, 1991, 11 (3): 50 - 56
- [10] Terry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis [M] // Govindjee. Photosynthesis: Vol . New York: Academic Press, 1982: 263 - 343
- [11] Nijs I, Ferris R, Blum H. Stomatal regulation in a changing climate: A field study using free air temperature increase (FATI) and free air CO₂ enrichment (FACE) [J]. Plant, Cell and Environment, 1997, 20: 1041 - 1050
- [12] 何维明, 马风云. 水分梯度对沙地柏幼苗荧光特征与气体交换的影响 [J]. 植物生态学报, 2000, 24 (5): 630 - 634
- [13] Long S P, Baker N R, Raines C A. Analyzing the responses of photosynthetic CO₂ assimilation to long - term elevation of atmospheric CO₂ concentration [J]. Vegetation, 1993, 104: 33 - 45
- [14] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134 - 200
- [15] 薛慧卿, 孙兰珍, 甘信民. 花生品种抗旱性综合评价及其抗旱机理的数量分析 [J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17 (1): 83 - 87
- [16] 徐利霞, 杨水平, 姚小华. 石漠化地区 3 个树种幼苗在水分胁迫下的光合特性与抗旱性关系 [J]. 林业科学研究, 2006, 19 (6): 785 - 790
- [17] 李 磊, 贾志清, 宁虎森, 等. 水分胁迫下 2 种沙枣的抗旱性比较 [J]. 林业科学研究, 2009, 22 (3): 335 - 342
- [18] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annu Rev Plant Physiol, 1982, 33: 317 - 345
- [19] Neumann P M. Salinity resistance and plant growth revisited plant [J]. Cell and En Neumann viron, 1997, 20: 1193 - 1198
- [20] Zhenzhu Xu, Guangsheng Zhou. Responses of leaf stomatal density to water status and its relationship with photosynthesis in a grass [J]. Journal of Experimental Botany, 2008, 59 (12): 3317 - 3325
- [21] 马 飞, 姬明飞, 陈立同, 等. 油松幼苗对干旱胁迫的生理生态响应 [J]. 西北植物学报, 2009, 29 (3): 548 - 554
- [22] 龚吉蕊, 黄永梅, 葛之葳, 等. 4 种杂交杨对土壤水分变化的生态学响应 [J]. 植物生态学报, 2009, 33 (2): 387 - 396
- [23] Torrecillas A, Guillaume C, Alarcon J J. Water stress of two tomato species under water stress and recovery [J]. Plant Science, 1995, 105: 169 - 176
- [24] 李清河, 张景波, 李慧卿, 等. 不同种源白刺幼苗生理生长对水分梯度的响应差异 [J]. 林业科学, 2008, 44 (1): 52 - 56
- [25] 刘海燕, 李吉越, 赵 燕, 等. 干旱胁迫对 5 个种源沙柳气体交换及水分利用效率的影响 [J]. 干旱区研究, 2007, 24 (6): 815 - 820
- [26] 樊卫国, 刘国琴, 何嵩涛, 等. 刺梨对土壤干旱胁迫的生理响应 [J]. 中国农业科学, 2002 (10): 1243 - 1248
- [27] 詹妍妮, 郁松林, 陈培琴. 果树水分胁迫反应研究进展 [J]. 中国农学通报, 2006 (4): 239 - 242
- [28] Alberte R S, Thomber J P. Water stress effects on the content and organization of chlorophyll in mesophyll and bundle sheath chloroplasts of maize [J]. Plant Physiol, 1977, 58: 351 - 353
- [29] 蒋明义, 杨文英, 徐 江, 等. 渗透胁迫下水稻幼苗中叶绿素降解的活性氧损伤作用 [J]. 植物学报, 1994, 36 (4): 289 - 295
- [30] 许丽颖, 郝玉苹, 王 刚, 等. 水分胁迫对紫叶李叶片色素含量与 PAL 活性的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 2007, 29 (2): 168 - 172
- [31] Abdallah O, Gert S, Reto J S. Drought stress effects on photosystem content and photosystem thermotolerance analyzed using chl a fluorescence kinetics in barley varieties differing in their drought tolerance [J]. Physiologia Plantarum, 2009, 137: 188 - 199
- [32] 李雪芹, 徐礼根, 金松恒, 等. 4 种草坪草荧光特性的比较 [J]. 园艺学报, 2006, 33 (1): 164 - 167
- [33] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo [J]. Annu Rev Plant Biol, 2008, 59: 89 - 113
- [34] 苏 丹, 孙国峰, 张金政, 等. 水分胁迫对费菜和长药八宝生长及生物量分配的影响 [J]. 园艺学报, 2007, 34 (5): 1317 - 1320
- [35] 郝树荣, 郭相平, 王为木, 等. 水稻分蘖期水分胁迫及复水对根系生长的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25 (1): 149 - 152
- [36] Pallardy S G, Rhoads J L. Morphological adaptations to drought in seedling of deciduous angiosperms [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23: 1766 - 1774
- [37] Singh B, Singh D. Biomass partitioning and gas exchange in *Dalbergia sissoo* seedling under water stress [J]. Photosynthetica, 2003, 41: 407 - 414
- [38] 李树华, 许 兴, 米海莉, 等. 水分胁迫对牛心朴子植物生长及渗透调节物质积累的影响 [J]. 西北植物学报, 2003, 23 (4): 592 - 596
- [39] Esch A, Mengel K. Combined effects of acid mist and frost drought on the water status of young spruce trees (*Picea abies*) [J]. Envir and Expr Bot, 1998, 39 (1): 57 - 65
- [40] 肖春旺, 周广胜, 马风云. 施水量变化对毛乌素沙地优势植物形态与生长的影响 [J]. 植物生态学报, 2002, 26 (1): 69 - 76
- [41] 朱选伟, 黄振英, 张淑敏, 等. 浑善达克沙地冰草种子萌发、出苗和幼苗生长对土壤水分的反应 [J]. 生态学报, 2005, 25 (2): 364 - 370