

文章编号:1001—7380(2021)05—0013—07

4种高山杜鹃容器苗对持续干旱胁迫和复水的生理响应研究

赵珍妮¹,童再康¹,赖江^{2*}

(1. 浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室,浙江 杭州 311300; 2. 建德市林业局,浙江 建德 311600)

摘要:为评价高山杜鹃品种的耐旱性及对干旱胁迫的生理响应,以乡土树种云锦杜鹃为参照,系统测定了莱姆、弗吉尼亚、惠特尼3个常绿高山杜鹃品种在持续干旱胁迫和复水条件下的光合参数、叶绿素荧光参数、渗透调节物质等生理生化指标。结果表明,随干旱胁迫加剧,4种高山杜鹃的光合参数、叶绿素荧光参数均呈下降趋势;4种高山杜鹃的叶片水势均呈下降趋势,云锦杜鹃叶片水势下降幅度最小;4种高山杜鹃的相对电导率、渗透调节物质含量及H₂O₂含量均有所增加,在严重干旱时达到最大值。重度干旱下弗吉尼亚受到不可逆转的损伤,复水10 d后,除弗吉尼亚全部枯死无法恢复外,云锦杜鹃、莱姆和惠特尼的各项指标均恢复并接近对照水平。经主成分分析,将14个生理生化指标简化为累计贡献率为88.67%的2个综合指标,综合评价得到耐旱性排序为云锦杜鹃>莱姆>惠特尼>弗吉尼亚。

关键词:高山杜鹃;容器苗;干旱胁迫;生理响应;主成分分析

中图分类号:Q945.78;S685.21

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2021.05.002

Physiological response of four azalea seedlings after drought stress and rewatering

Zhao Zhenni¹, Tong Zaikang¹, Lai Jiang^{2*}

(1. The State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Hangzhou 311300, China; 2. Forestry Bureau of Jiande City, Jiande 311600, China)

Abstract:To evaluate the drought tolerance of alpine azalea varieties and their physiological responses to drought stress, with the native tree species *Rhododendron fortunei* as a reference, the photosynthetic parameters, chlorophyll fluorescence parameters, and osmotic adjustment of three evergreen alpine *Rhododendron* varieties, including 'Halfdem lem', 'Virginia Richards' and 'Ann Rose Whitney', were systematically determined. The results showed that the photosynthetic and chlorophyll fluorescence parameters of all four alpine azalea tested tended to decrease as drought stress intensified; the leaf water potential of four alpine azalea tended to decrease, with the smallest decrease in leaf water potential of *R. fortunei*; The relative conductivity and osmotic adjustment substance content of four alpine azalea increased, reaching a maximum during severe drought. Except for 'Virginia Richards', irreversibly damaged, which could not recover, all indicators of the other three recovered and were close to control levels after ten days of re-watering. After Principal Component Analysis, the 14 physiological and biochemical indicators were simplified into 2 comprehensive indicators with a cumulative contribution rate of 88.67%. Their drought tolerance was presented by comprehensive evaluation in order as *R. fortunei* > 'Halfdem lem' > 'Ann Rose Whitney' > 'Virginia Richards'.

Key words:Alpine azalea; Container Seedling; Drought stress; Physiological response; Principal Component Analysis

高山杜鹃是杜鹃花属(*Rhododendron* L.)常绿杜鹃亚属(Subgenus *hymenanthes*)的一类具有特殊

收稿日期:2021-07-20;修回日期:2021-08-27

基金项目:浙江省农业新品种重大专项花卉育种专项“高山杜鹃良种选育与繁殖技术研究”(2021C02071-2)

作者简介:赵珍妮(1997-),女,浙江杭州人,在读研究生。主要从事林业良种工程研究。E-mail:854740553@qq.com

*通信作者:赖江(1982-),男,浙江建德人,工程师,硕士。主要从事森林培育研究。E-mail:21502041@qq.com

观赏价值的植物类群,原产于海拔 700 m 以上的中、高山地区,素有“花中皇后”之称^[1]。各类树种及品种色彩丰富、花姿艳丽、树形优美,与多数人审美及消费观相契合^[2],作为具有高观赏价值的品种类群,家庭园艺与园林绿化应用前景广阔。同时,高山杜鹃也是优良的山地水土保持树种,且可提取芳香油、杀虫剂、鞣质等工业原料^[3]。

干旱是制约农林业发展的重要因素^[4-5],随着全球气候变化,我国杜鹃花主要分布区干旱的范围明显扩大、强度增强、持续时间增长、频率增多^[6-7]。高山杜鹃喜冷凉高湿环境,受其遗传因素制约,抗旱能力较差^[8-9]。在众多的非生物胁迫因子中,干旱是制约杜鹃花迁地保育与园林绿化应用的关键因子^[10]。目前,国内外学者多从外部形态、解剖结构^[11]、光合作用、抗氧化系统及渗透调节的响应^[12-13]和内源激素^[14]等方面探讨杜鹃花对干旱胁迫的响应机制。干旱胁迫对云锦杜鹃(*R. fortunei*)叶片形态、光合特性日变化、光温响应和水分利用效率的影响已有系统研究^[15-17],对高山杜鹃的研究主要集中在组织培养快繁体系、耐热性、栽培基质等方面,关于水分管理的研究较少,而有关品种间、引种与乡土树种的干旱与复水研究还未见报道。因此探究其持续干旱及复水的耐旱机制及耐旱性对高山杜鹃在南方引种栽培及抗旱性育种意义深远。

为探索高山杜鹃潜在栽培区域及种苗培育中水分控制,本文采用盆栽控水法,以云锦杜鹃(*R. fortunei*)为参照,测定了高山杜鹃莱姆(*R. Halfdem lem*)、惠特尼(*R. Ann Rose Whitney*)和弗吉尼亚(*R. Virginia Richards*)3个品种的光合参数、叶绿素荧光参数、渗透调节物质等耐旱性生理生化指标,评价其抗旱能力,以期为明确高山杜鹃栽培区及抗旱品种育种与园林应用提供理论基础。

1 材料及方法

1.1 供试材料

试验在浙江省杭州市临安区浙江农林大学实验基地(30°15' N, 119°43' E)进行,选取生长良好、长势一致的3年生高山杜鹃容器苗为试验材料,盆栽基质为泥炭:珍珠岩=2:1(容积比),置于60%遮荫条件下培养。试验期间基地实测气温见图1。

1.2 试验方法

2021年7月20日至8月20日将试验容器苗置大棚内进行自然干旱胁迫处理。试验设自然干旱

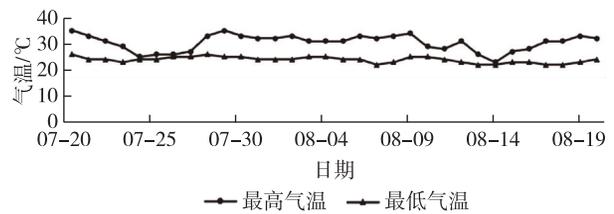


图1 试验期间栽培地大气温度变化

和对照(CK)共2个处理,9株重复。试验开始前先给苗木浇清水至土壤饱和,土壤含水量(SWC)为60%—65%,之后自然干旱组停止浇水,对照组正常供水。持续干旱第31天时,叶片出现严重萎蔫,然后浇水至土壤饱和,即行复水处理,随后正常养护,弗吉尼亚因复水后无法恢复而枯死,不再记录复水后数据。

持续干旱过程中,每天16:00用JK-100高周波土壤水分测定仪测定SWC。结合叶片萎蔫状态,分别在轻度干旱(第12天,SWC在44.46%—50.84%)、中度干旱(第20天,SWC在31.44%—36.28%)、重度干旱(第30天,SWC在15.12%—22.23%)和复水10d(第40天,SWC在60.7%—67.3%)采样,期间对照组隔日浇水使土壤含水量始终保持在(60±3)%。叶片采样时间为8:30,选择植株枝条顶端向下第3至第5个叶片用于光合参数、叶绿素荧光参数测定,后立即采集经液氮速冻后保存于-80℃冰箱,用于生理生化指标测定。

1.3 指标测定

光合参数的测定:用Li-6400便携式光合仪于9:00—11:00测定叶片光合参数,包括净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和胞间CO₂浓度(C_i),并计算植株单叶水分利用效率($WUE = P_n / T_r$)。PAR设定为800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,叶室相对湿度设定为70%,温度25℃,选择中上部成熟叶片为测定叶,测定5株,每株重复3次。

叶绿素荧光参数的测定:用便携式调制叶绿素荧光仪PAM-2500测定PSII最大光合效率(F_v/F_m)、PSII化学潜在活性(F_v/F_0)、PSII电子传递速率(ETR)和光化学淬灭(qP)等叶绿素荧光参数。

生理指标测定:叶片水势用METER-WP4C露点水势仪测定。质膜透性采样相对电导率法,脯氨酸含量、可溶性糖含量、H₂O₂含量采用南京建成生物有限公司的试剂盒测定。

1.4 数据分析

采用 Excel2016 和 SPSS26.0 进行数据统计和主成分分析。取 4 种高山杜鹃在重度干旱下各测定指标进行标准化,参照林海明等^[18]的方法,构建耐旱性主成分函数表达式,通过主成分降维获得综合评价方程,计算隶属函数值进行耐旱性综合评价。隶属函数值越大,耐旱性越强。

2 结果与分析

2.1 持续干旱胁迫及复水对植物外部形态的影响

逆境下植物形态会有明显变化,叶片受损情况是评价植物抗逆性最直观的指标。据观察,4 种高山杜鹃品种容器苗在对照处理下叶片均生长正常。轻度干旱时,惠特尼与弗吉尼亚上部叶片出现下垂;中度干旱时,惠特尼与弗吉尼亚下部分老叶自然脱离,上层叶片下垂发黄,莱姆与云锦上部叶片出现下垂;重度干旱时,4 种高山杜鹃叶片均出现严重下垂情况,弗吉尼亚叶片出现变黄、卷曲;复水 10 d 后,弗吉尼亚全部枯死,惠特尼有 2 株枯死,云锦杜鹃与莱姆均恢复正常。

2.2 持续干旱胁迫及复水对光合作用的影响

由结果(见图 2)可见,干旱胁迫下,4 种高山杜鹃叶片的 P_n , T_r , G_s , C_i 均呈下降趋势,且随干旱加

剧,下降程度越高。复水 10 d 后除弗吉尼亚外均有不同程度的上升。品种间 C_i 对干旱响应的差异显著小于 P_n , T_r 和 G_s 的差异,且不同品种对干旱胁迫响应差异较大,云锦杜鹃在轻度干旱和中度干旱时均保持较高的 P_n , T_r 和 G_s , 重度干旱时大幅下降,而莱姆的 C_i 对干旱胁迫的响应显著大于其他 3 个品种。在重度干旱下,与 CK 对比,云锦杜鹃、莱姆、弗吉尼亚和惠特尼的 P_n 降幅 4 个品种分别为 66.21%, 89.33%, 92.37% 和 98.17%。品种的 WUE 变化趋势不同,莱姆和云锦杜鹃的 WUE 随持续干旱呈上升趋势,而弗吉尼亚和惠特尼则先升高后下降。总体趋势上看,干旱胁迫条件下莱姆的 WUE 均高于其余其他品种。

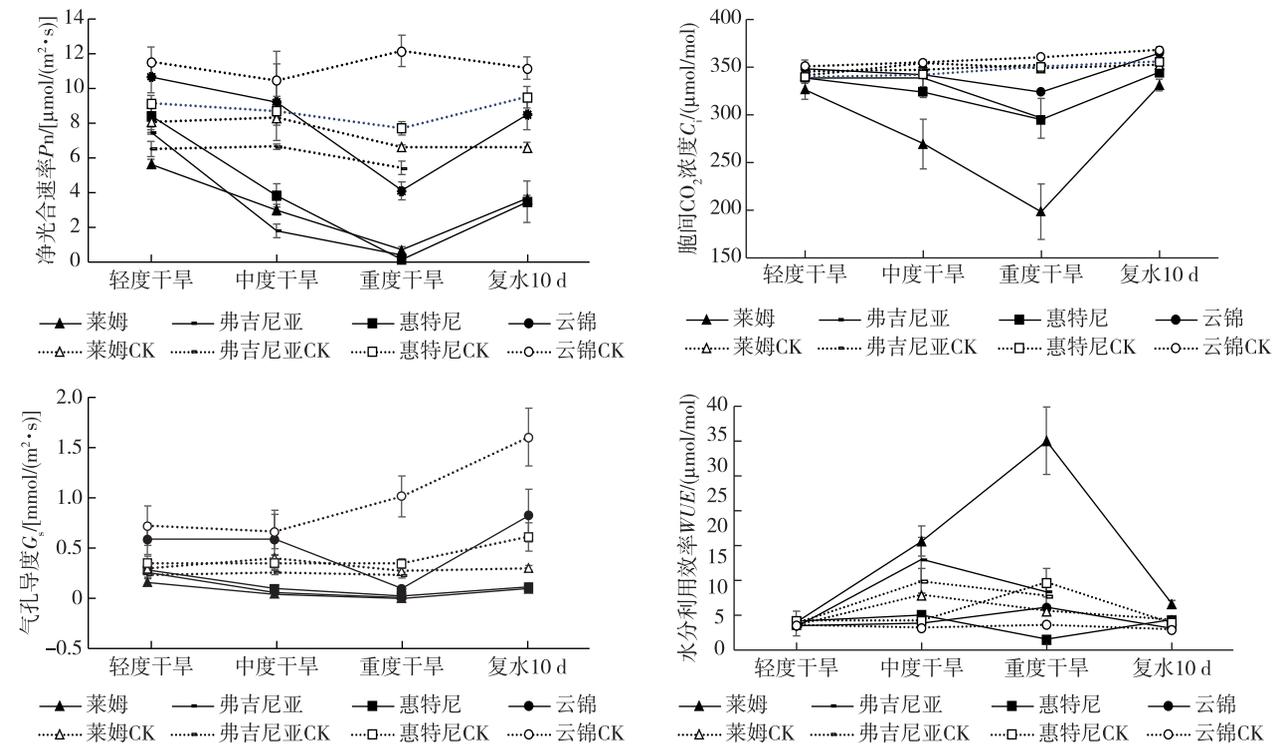
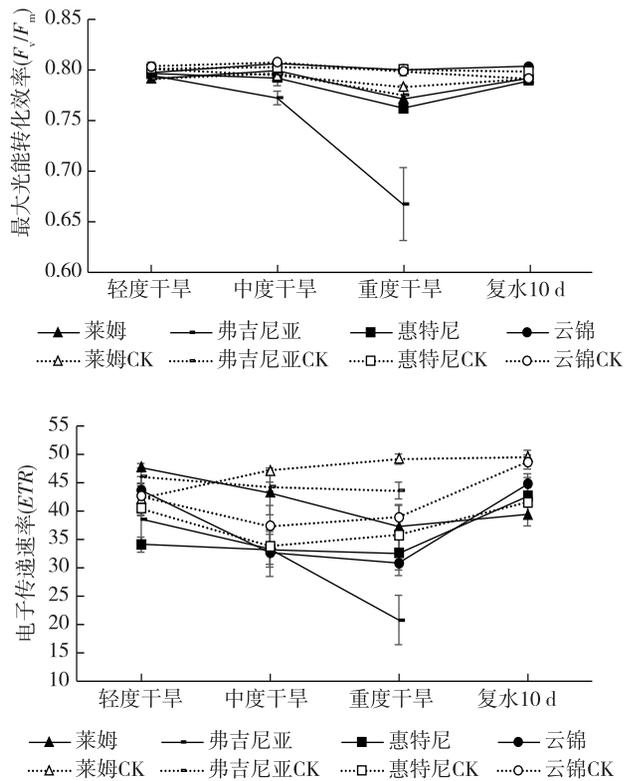


图 2 持续干旱胁迫及复水对高山杜鹃叶片光合作用的影响

2.3 持续干旱胁迫及复水对叶绿素荧光参数的影响

试验结果(见图3)显示,在正常供水条件下,4个品种叶片的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 无显著差异,而干旱胁迫导致2者不同程度的降低,前期降幅平缓,后期降幅变大,弗吉尼亚在整个干旱过程中 F_v/F_m 、 F_v/F_o 始终低于其他品种,在重度干旱时降幅达到最大,



分别较对照下降 13.94% 和 41.88%。各品种的 ETR 随干旱程度加剧呈下降趋势,弗吉尼亚在重度干旱时大幅下降,较对照下降 52.41%。各品种干旱胁迫处理的 ETR 和 qP 均显著高于对照组,其中莱姆的 ETR 与 qP 一直高于其他品种,且其 qP 下降幅度较小,意味着其具有较强的耐旱性。

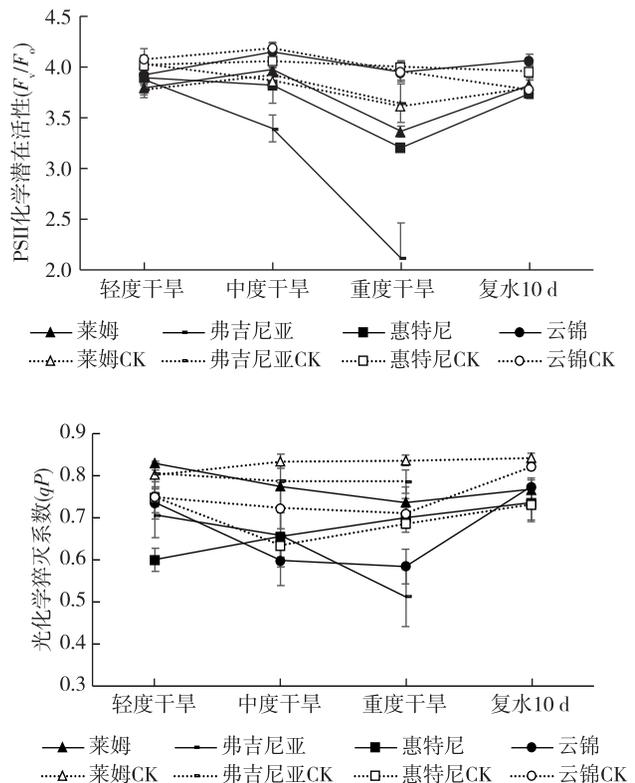


图3 持续干旱胁迫及复水对高山杜鹃叶片叶绿素荧光参数的影响

2.4 持续干旱胁迫及复水对叶片水势和相对电导率的影响

持续干旱胁迫及复水后叶片水势变化见图4。对照组在试验期间叶片水势变化幅度均较小。在持续干旱胁迫过程中,云锦杜鹃叶片水势差异不显著($P>0.05$),莱姆与惠特尼在轻度干旱和中度干旱时降幅较小,重度干旱时明显下降,而弗吉尼亚一直呈下降趋势,在重度干旱时莱姆、弗吉尼亚、惠特尼和云锦杜鹃的叶片水势分别较对照下降了 127.72%, 181.72%, 115.11% 和 49.41%。复水 10 d 后莱姆、惠特尼和云锦杜鹃的叶片水势均能迅速恢复。其中,云锦杜鹃叶片水势下降幅度最小,说明在干旱胁迫环境下,其能保持较高的水势,防止细胞失水,保持细胞内环境的稳定态。

干旱胁迫对4个品种的相对电导率有显著影响

(见图4)。相对电导率随干旱胁迫程度的加重逐渐升高,在重度干旱胁迫下达最大值,与CK对比,莱姆、弗吉尼亚、惠特尼和云锦杜鹃分别增加 25.99%, 29.88%, 54.40% 和 27.02%。

2.5 持续干旱胁迫及复水对渗透调节物质含量和 H_2O_2 含量的影响

与对照相比,在干旱胁迫过程中各品种叶片的脯氨酸、可溶性糖和 H_2O_2 含量均高于对照(见图5),且有明显的增加过程,复水后呈下降趋势。从品种比较看,弗吉尼亚叶片的Pro含量、可溶性糖含量及 H_2O_2 含量在干旱过程中持续升高,莱姆、惠特尼在前期有较明显上升,随后变化趋势转为平缓,复水后含量又明显下降。而云锦杜鹃叶片比较特殊,在持续干旱过程中3种物质含量变化最小,略有缓慢上升,复水后略有下降。

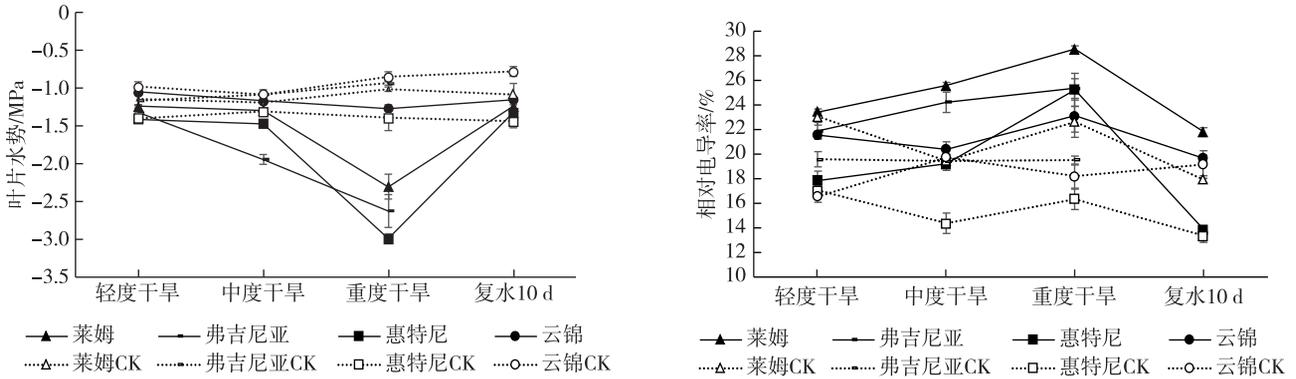


图 4 持续干旱胁迫及复水对高山杜鹃叶片水势和相对电导率的影响

2.6 高山杜鹃品种耐旱性的综合评价

主成分与各指标间的载荷系数反映了该指标对主成分负荷的相对大小和作用方向,载荷系数越大,关系越密切(见表 1)。测定的 14 个生理生化指标可简化为累计贡献率为 88.67% 的 2 个综合指标,主成分 1 中除 C_i 、 WUE 、 qP 和 ETR 外,其余 10 个指标的载荷系数均较高;主成分 2 综合了植株的叶绿素荧光参数、 C_i 、 WUE 及 REC 。用这 2 个综合指标可反映 14 项测定指标的绝大部分信息,可用于综合评价高山杜鹃品种的耐旱性强弱。

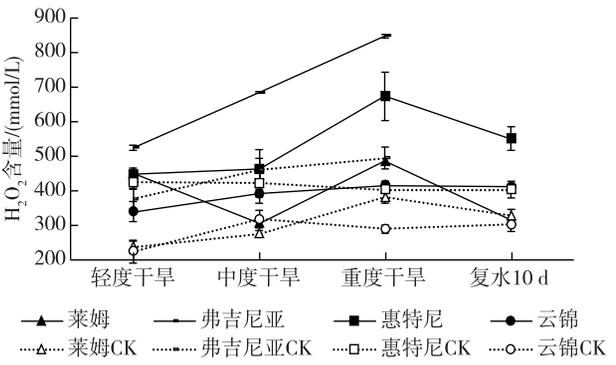
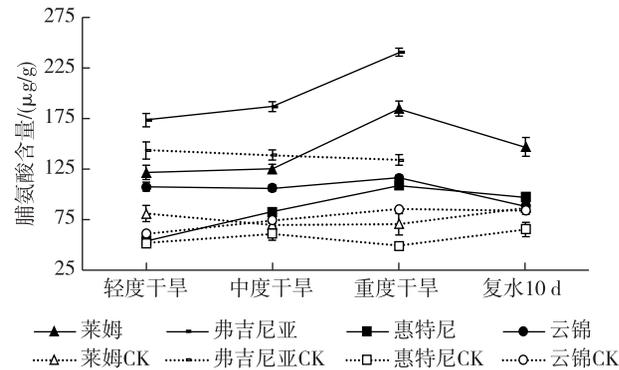
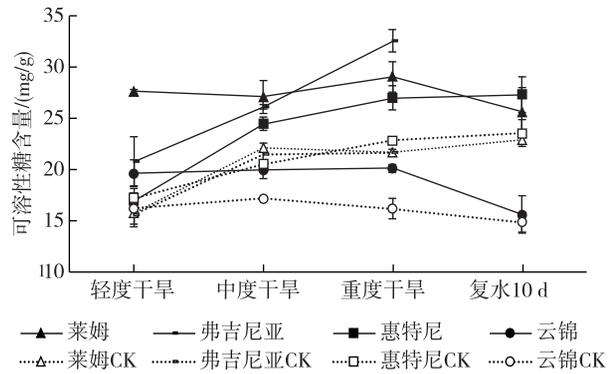


图 5 持续干旱胁迫及复水对高山杜鹃叶片渗透调节物质和 H_2O_2 含量的影响

用 2 个综合变量 Z_1, Z_2 代替 14 个指标观测值,根据表 1 中各耐旱指标的主成分载荷系数及第 1 和第 2 主成分对应的特征值,计算特征向量,作为各指标权重,得到 2 个主成分的表达式(其中 X_1-X_{14} 均为标准化后的变量):

$$Z_1 = 0.329X_1 + 0.338X_2 + 0.343X_3 + 0.161X_4 - 0.099X_5 + 0.005X_6 + 0.123X_7 + 0.293X_8 + 0.318X_9 + 0.293X_{10} - 0.231X_{11} - 0.283X_{12} - 0.36X_{13} - 0.277X_{14}$$

$$Z_2 = -0.08X_1 - 0.138X_2 - 0.144X_3 - 0.394X_4 + 0.354X_5 + 0.425X_6 + 0.424X_7 + 0.259X_8 + 0.217X_9 - 0.019$$

$$X_{10} + 0.346X_{11} - 0.266X_{12} - 0.015X_{13} - 0.095X_{14}$$

凭借单一的 Z_1 或 Z_2 无法对高山杜鹃耐旱性做出综合评价,故以选取 2 个主成分的贡献率 α_1 和 α_2 为权重,构建耐旱性综合评价方程: $F = \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2$, 即 $F = 0.54961Z_1 + 0.33711Z_2$ 。

由表 2 可知,云锦杜鹃作为本地区中高海拔区域的乡土树种,其耐旱性优于引进的 3 个观赏品种,列第 1,且综合评价 F 值(1.87)远高于其他 3 个品种。莱姆列第 2,弗吉尼亚表现最差,经重度干旱后已无法恢复而全部枯死。从 3 个引进的优异观赏品种比较看,莱姆具有较强的叶片保水性、光合调节

能力及渗透调节能力,在中国南方中高海拔高温高湿地区应用具有较大的潜力。

表 1 干旱胁迫下 4 种高山杜鹃各类指标的主成分分析

主成分	主成分 1	主成分 2
蒸腾速率 T_r	0.91	-0.174
净光合速率 P_n	0.936	-0.3
气孔导度 G_s	0.95	-0.313
胞间 CO_2 浓度 C_i	0.447	-0.854
水分利用效率 WUE	-0.275	0.768
光化学猝灭系数 qP	0.013	0.923
电子传递速率 ETR	0.34	0.921
最大光能转化效率 F_v/F_m	0.812	0.562
PSII 化学潜在活性 F_v/F_o	0.88	0.471
叶片水势 ψ_w	0.811	-0.041
相对电导率 REC	-0.639	0.751
H_2O_2 含量	-0.785	-0.578
可溶性糖含量 SSC	-0.997	-0.033
脯氨酸含量 PRO	-0.766	-0.207
特征值	7.695	4.719
贡献率/%	54.961	33.711
累计贡献率/%	54.961	88.672

表 2 4 种高山杜鹃耐旱性的综合评价 F 值及排名

品种	Z_1	排名	Z_2	排名	F	综合排名
莱姆	-1.01	3	2.9	1	0.42	2
弗吉尼亚	-2.65	4	-2.27	4	-2.22	4
惠特尼	-0.22	2	0.16	2	-0.07	3
云锦杜鹃	3.88	1	-0.79	3	1.87	1

3 结论与讨论

干旱胁迫严重影响植物生长与代谢,尤其影响光合作用。Farquhar 等提出^[19],当叶片的胞间 CO_2 浓度和气孔导度变化趋势均为下降时,则净光合速率下降为气孔限制所致。本研究结果表明干旱胁迫下 3 个高山杜鹃品种的 P_n 、 G_s 和 C_i 均下降,说明气孔限制因素是导致其光合速率下降的主要原因。干旱胁迫下气孔导度降低有利于减少水分蒸发,各品种气孔开放程度持续降低,蒸腾速率也随之降低,在干旱胁迫对花叶鹅掌柴 (*Schefflera odorata* cv. *Variegata*)、白蟾 (*Gardenia jasminoides* var. *fortuniana*) 等 6 种园林灌木的光合生理影响研究中也得到了验证^[20]。水分利用效率是净光合速率与蒸腾速率的比值,随干旱程度的不断加剧,降低光合速率的同时更大程度地降低叶片的蒸腾速率是致使

水分利用效率升高的主要原因。

叶绿素荧光参数能反映叶片对光能的利用情况^[21]。 F_v/F_m 和 F_v/F_o 可用作判断光合系统是否受损。本研究中 F_v/F_m 和 F_v/F_o 在胁迫过程中呈现下降趋势,说明各品种均受到光抑制从而使光合系统活性降低,复水 10 d 后云锦杜鹃、莱姆和惠特尼能快速恢复趋近对照,说明这 3 种高山杜鹃具有较强的耐旱性。该结果与侧柏 [*Platycladus orientalis* (L.) Franco]^[22]、文冠果 (*Xanthoceras sorbifolia*)^[23] 等植物对干旱胁迫的响应结果相一致。受干旱胁迫时 PSII 能通过调节 ETR 和 qP 来减少过剩光能对光合系统的伤害。在试验过程中,各品种的 ETR 和 qP 均出现了不同程度的下降,表明干旱胁迫使其光能转化和利用效率均受抑制^[21]。复水后除弗吉尼亚外均能恢复至接近对照,表明干旱胁迫还未对云锦杜鹃、莱姆和惠特尼的光合细胞造成不可逆转的损伤,云锦杜鹃的降幅远小于其他 3 个品种,表明云锦杜鹃具有更强的耐旱性,能有效保持 PSII 功能的相对完整,减轻干旱所造成的光合伤害。

水势是表示植物水分亏损或水分状况的重要指标^[24]。本研究中随干旱胁迫的不断加剧,叶片水势下降,但复水后水势有所增加。重度干旱时,云锦杜鹃的叶片水势相对于对照下降幅度最小,说明其能更好地自我调节,维持较高的水势,稳定细胞内部环境。叶片相对电导率随干旱胁迫加剧均有不同程度提高,说明干旱胁迫已造成叶片质膜透性增大,细胞膜功能减弱、下降。这与易家宁等^[25]关于紫苏 [*Perilla frutescens* (L.) Britt] 的研究结果一致。可见,通过测定干旱胁迫条件下的叶片水势,一定程度上可判断该品种的耐旱性。

当植物受干旱胁迫时,脯氨酸和可溶性糖作为重要的渗透调节物质会在体内快速积累,防止细胞脱水^[26-27]。本研究结果与柯世省等^[15]与黄承玲等^[13]对高山杜鹃的研究结果一致。植物受干旱胁迫时会使活性氧的产生和清除失衡,导致 H_2O_2 含量的在体内积累,由此,4 种高山杜鹃在干旱胁迫处理后, H_2O_2 含量均有不同幅度增加。

植物的耐旱性是一个综合性生理过程,虽然干旱胁迫程度是最为重要的因子,但既与品种自身遗传有关,也与植株的生理状态有关^[28]。本试验涉及的耐旱评价单项指标较多,单一指标难以对高山杜鹃耐旱性进行客观评价。若直接利用隶属函数评价具有局限性,而通过观测指标的主成分分析组建

综合指标用于品种抗逆性评价具有科学性与可操作性,可将原本多个指标在保证耐旱性评价准确度前提下简化为少数彼此独立的综合指标,从而减少工作量。本文采用植株的光合特性、叶绿素荧光参数及有机渗透调节物质等指标综合评价其耐旱性,利用主成分分析和隶属函数相结合的方法揭示了植物抗逆性的相关指标与抗逆性的关系,并对4个参试品种的耐旱性进行了排序。相较而言,乡土树种云锦杜鹃的耐旱性最强,引进的3个观赏品种中,莱姆的耐旱性最好,惠特尼次之,弗吉尼亚的耐旱性最差,该结果与试验过程中的植株性状表现基本一致,结果比较可靠。

参考文献:

- [1] 兰 熙,张乐华,张金政,等.杜鹃花属植物育种研究进展[J].园艺学报,2012,39(9):1829-1838.
- [2] 陈 婷,李世峰,瞿素萍,等.18个高山杜鹃品种在滇中地区的生长适应性[J].西南农业学报,2019,32(3):609-614.
- [3] 李丹丹,李晓花,张乐华.杜鹃花属植物干旱胁迫研究进展[J/OL].广西植物:1-14 [2021-10-11]. <https://kns-cnki-net.webvpn.zafu.edu.cn/kcms/detail/45.1134.Q.20201013.1405.002.html>
- [4] CRAMER G R, URANO K, DELROT S, et al. Effects of abiotic stress on plants: a systems biology perspective [J]. BMC Plant Biology, 2011, 11(1):163.
- [5] 张 珏,黄瑞芳,韩杰峰,乔木柳4个无性系耐旱性的初步研究[J].江苏林业科技,2020,47(6):47-49.
- [6] CHAVES M M, PEREIRA J S, MAROCO J, et al. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth[J]. Annals of Botany, 2002, 89(7):907-916.
- [7] 马鹏里,韩兰英,张旭东,等.气候变暖背景下中国干旱变化的区域特征[J].中国沙漠,2019,39(6):209-215.
- [8] MAYR S, BEIKIRCHER B, OBKIRCHER M A, et al. Hydraulic plasticity and limitations of alpine *Rhododendron* species [J]. Oecologia, 2010, 164(2):321-330.
- [9] 党宏忠,周泽福,赵雨森.祁连山水源区主要树种耐旱性研究[J].应用生态学报,2015,16(12):2241-2247.
- [10] 王 华,张石虎,龚雪梅,等.不同水分条件下杜鹃花转录因子的转录组分析[J].热带亚热带植物学报,2018,26(5):515-522.
- [11] NILSEN E T, JOHNSON C, TAYLOR M K. Are idioblasts related to drought resistance in *Rhododendron* section *Schistanthe*? [J]. Journal of the American Rhododendron Society, 2014, 96:73-79.
- [12] CAI Y F, WANG J H, ZHANG L, et al. Physiological and transcriptomic analysis highlight key metabolic pathways in relation to drought tolerance in *Rhododendron delavayi* [J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2019, 25(4):991-1008.
- [13] 黄承玲,陈 训,高贵龙.3种高山杜鹃对持续干旱的生理响应及抗旱性评价[J].林业科学,2011,47(6):48-55.
- [14] 陈荣建,熊 丹,欧 静,等.持续干旱下杜鹃花类菌根真菌对桃叶杜鹃内源激素的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2018,40(3):26-33.
- [15] 柯世省,杨敏文.水分胁迫对云锦杜鹃光合特性日变化的影响[J].福建林业科技,2007,34(3):10-14.
- [16] 柯世省,杨敏文.水分胁迫对云锦杜鹃光合生理和光温响应的响应[J].园艺学报,2007,34(4):959-964.
- [17] 柯世省.土壤干旱胁迫对云锦杜鹃水分利用效率的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2007,35(2):150-153.
- [18] 林海明,张文霖.主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件——兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷[J].统计研究,2005(3):65-69.
- [19] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1982, 33(3):317-345.
- [20] 吴雪仪,陈红跃,黄永芳,等.干旱胁迫对6种园林灌木光合生理特性的影响[J].江苏农业科学,2019,47(22):142-147.
- [21] 李 素,万 林,李心昊,等.3种类型油菜对干旱胁迫的生理响应[J].中国油料作物学报,2020,42(4):563-572.
- [22] 张玉玉,王进鑫,马 戊,等.土壤干旱及复水对侧柏叶绿素荧光参数的影响[J].水土保持研究,2021,28(2):242-247,255.
- [23] 谢志玉,张文辉.干旱和复水对文冠果生长及生理生态特性的影响[J].应用生态学报,2018,29(6):1759-1767.
- [24] 杨明凤,王金梅,吉春容,等.干旱胁迫对棉花生长发育和光合荧光参数的影响[J].中国农学通报,2021,37(13):22-28.
- [25] 易家宁,王康才,张琪琦,等.干旱胁迫对紫苏生长及品质的影响[J].核农学报,2020,34(6):1320-1326.
- [26] 吴强盛,夏仁学,张琼华.果树对水分胁迫反应研究进展[J].亚热带植物科学,2003,32(2):72-76.
- [27] 洪 震,刘术新,洪琮浩,等.5种造林树种对干旱胁迫的抗性应答[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(2):111-119.
- [28] 全 倩,施 明,贺建勋,等.5种葡萄砧木耐旱性评价及鉴定指标的筛选[J].核农学报,2018,32(9):1814-1820.