

网络出版时间:2020-07-08 09:35 DOI:10.13207/j.cnki.jnwf.2021.01.005

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20200707.1537.005.html

西藏 3 种沙棘属植物抗旱性比较研究

南吉斌^a,杨广环^b,吴天或^a,林 玲^a

(西藏农牧学院 a 资源与环境学院,b 植物科学学院,西藏 林芝 860000)

【摘 要】 【目的】研究干旱胁迫对西藏 3 种沙棘属植物光合荧光和生理生化特性的影响,为西藏干旱半干旱区造林树种的选择提供依据。【方法】以 2 年生云南沙棘(*Hippophae rhamnoides* subsp. *Yunnanensis*)、江孜沙棘(*H. gyantsensis*)和肋果沙棘(*H. neurocarpa*)苗木为材料,采用盆栽法,设持续干旱 0,10,20,30 d 处理,测定其光合荧光指标和生理生化指标,并对其抗旱性进行综合分析评价。【结果】随着干旱胁迫时间的增加,3 种沙棘属植物净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率、电子传递速率、实际光化学效率、有效光化学效率、叶片相对含水量、叶水势和 SPAD 值均呈不同程度的下降趋势,水分饱和亏缺、丙二醛、脯氨酸、过氧化物酶呈上升趋势;云南沙棘和肋果沙棘水分利用效率和羧化效率呈下降趋势,江孜沙棘水分利用效率和羧化效率分别呈倒“V”或“V”型变化;云南沙棘和肋果沙棘光化学猝灭系数呈下降趋势,江孜沙棘呈先下降后上升趋势;云南沙棘和江孜沙棘还原性糖含量呈倒“V”型变化,肋果沙棘呈下降趋势。采用隶属函数和主成分分析对 3 种沙棘属植物 18 个指标进行综合评价,评价结果表现一致。【结论】西藏 3 种沙棘属植物的抗旱能力依次表现为江孜沙棘>肋果沙棘>云南沙棘,江孜沙棘是西藏干旱半干旱地区造林的首选树种。

【关键词】 沙棘;抗旱性评价;西藏

【中图分类号】 S793.602 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2021)01-0037-11

Comparison of drought resistance of three *Hippophae* species in Tibet

NAN Jibin^a, YANG Guanghuan^b, WU Tianyu^a, LIN Ling^a

(a College of resources and environment, b Plant Sciences College, Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Nyingchi, Tibet 860000, China)

Abstract: 【Objective】 The effects of drought stress on photosynthetic fluorescence and physiological and biochemical characteristics of three *Hippophae* species in Tibet were studied to provide basis for selection of afforestation tree species in arid and semi-arid areas of Tibet. 【Method】 The 2-year-old seedlings of *Hippophae rhamnoides* subsp. *Yunnanensis*, *H. gyantsensis*, and *H. neurocarpa* were planted in pots with continuous droughts for 0, 10, 20, and 30 days. Changes in photosynthetic fluorescence and physiological and biochemical indexes were measured, and their drought resistance was comprehensively analyzed and evaluated. 【Result】 With the increase of drought stress time, photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, transpiration rate, electron transfer rate, actual photochemical efficiency, effective photochemical efficiency, relative water content, leaf water potential and SPAD value all decreased to varying degrees, while water saturation deficit, malondialdehyde, proline, and peroxidase increased. Water use efficiency and carboxylation efficiency of *H. rhamnoides* subsp. *Yunnanensis* and *H. neurocarpa* decreased, and those of *H. gyantsensis* showed inverted “V” and “V” type changes, respectively. Photochemi-

【收稿日期】 2019-12-31

【基金项目】 国家自然科学基金项目(31260049);西藏自治区高校青年教师创新支持计划项目(QC2015-40);“西藏高原林业生态工程重点实验室”建设项目(201210);西藏农牧学院研究生创新计划项目(YJS2019-01)

【作者简介】 南吉斌(1993—),男,甘肃清水人,在读硕士,主要从事森林培育及植被恢复研究。E-mail:1256394407@qq.com

【通信作者】 林 玲(1973—),女,四川宜宾人,教授,硕士,主要从事林学及保护生物学研究。E-mail:xizyz@126.com

cal quenching coefficients of *H. rhamnoides* subsp. *Yunnanensis* and *H. neurocarpa* decreased, while that of *H. gyantsensis* declined first before increasing. The content of reducing sugar of *H. rhamnoides* subsp. *Yunnanensis* and *H. gyantsensis* showed an inverted “V” shape, while that of *H. neurocarpa* showed a downward trend. The membership function and principal component analysis showed consistent results in evaluating the 18 indicators of three *Hippophae* species. 【Conclusion】 The drought resistance of three tested *Hippophae* species in Tibet was in the order of *H. gyantsensis* > *H. neurocarpa* > *H. rhamnoides* subsp. *Yunnanensis*, *H. gyantsensis* was the preferred tree species for afforestation in the arid and semi-arid areas of Tibet.

Key words: *Hippophae*; drought resistance evaluation; Tibet

水资源短缺是限制林木正常生长的重要因素之一,我国干旱半干旱地区主要分布于西部^[1],面积占全国总面积的 45%。西藏作为青藏高原的主体,其干旱、半干旱区面积较大,水土流失和植被退化严重^[2]。因此,研究乡土林木抗旱性,探索西藏地区林木抗旱机理,成为西藏干旱半干旱区造林工程首要解决的问题之一。

沙棘属(*Hippophae*)植物生长快,具有耐旱、耐寒、耐涝、耐薄瘠、固氮能力强等特点^[3],是西藏干旱半干旱地区造林及荒漠化防治的优选乡土树种之一^[4]。沙棘属植物为胡颓子科(Elaeagnaceae)落叶灌木或小乔木^[5],分布范围较广,西藏的沙棘属植物主要分布于横断山区和雅鲁藏布江大峡谷一带的河流沿岸、河滩及沟谷地带。西藏主要分布的沙棘属植物有 4 个种和 4 个亚种,常见的有云南沙棘(*Hippophae rhamnoides* subsp. *Yunnanensis*)、江孜沙棘(*H. gyantsensis*)和肋果沙棘(*H. neurocarpa*) 3 种^[6-7]。目前,有关沙棘属植物的研究主要集中在表型^[8-9]、引种^[10-11]、培育^[12-13]、造林^[14-15]和生理生化^[16-17]等方面,关于西藏 3 种沙棘属植物的综合抗旱性研究尚未见报道。本研究以西藏常见的 3 种沙棘属植物 2 年生幼苗为试验材料,通过按时间模拟不同地区的降雨变化,测定干旱条件下其光合荧光和生理生化指标,探讨干旱胁迫对 3 种沙棘属植物幼苗生长的影响,揭示 3 种沙棘属植物在干旱胁迫下的生长机制,以期为西藏干旱半干旱区造林树种的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验材料均为 2 年生实生幼苗。于 2019 年 6 月上旬选取长势良好、高度基本一致的云南沙棘、江孜沙棘和肋果沙棘 3 种沙棘属植物幼苗(其中云南沙棘平均苗高 52.98 cm,平均地径 5.06 mm;江

孜沙棘平均苗高 50.07 cm,平均地径 4.98 mm;肋果沙棘平均苗高 49.36 cm,平均地径 5.17 mm),种植在规格为 21 cm×21 cm 的营养钵中,营养基质以珍珠岩、腐殖质、黏土按 1:1:2 的体积比配置,上面覆盖细沙,每钵培育 3 株幼苗,每个种各培育 20 个营养钵,3 个树种共 60 盆,统一放入西藏农牧学院实验基地苗圃科研温室,并进行统一的水分和养分管理。

1.2 试验方法

采用盆栽模拟干旱胁迫试验,于 2019 年 6 月中旬在西藏农牧学院实验基地苗圃科研温室中进行。试验共设计 4 个干旱胁迫梯度处理,分别为干旱 0 d (CK)和持续干旱 10,20,30 d 处理。按单因素完全随机区组设计(不同处理为因素,种为区组),每个处理 5 个营养钵。试验开始前 2 d 将各盆栽幼苗浇水至土壤含水量达饱和状态,开始胁迫时,首先对 30 d 干旱处理不再浇水,让其持续干旱;10 d 之后对 20 d 干旱处理不再浇水,20 d 之后对 10 d 干旱处理不再浇水。而 CK 组一直正常浇水,保持土壤含水量为田间持水量的 65%。试验到 7 月中旬结束。

1.3 指标测定

1.3.1 光和指标测定 干旱胁迫结束后,用美国 Li-Cor 公司生产的 LI-6400 便携式光合仪标准叶室于 09:00—11:00 测定光合指标,测定前设定光合有效辐射(photosynthetically active radiation, PAR)为 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,流速为 500 mol/s,叶温为 20 $^{\circ}\text{C}$, CO_2 浓度为 400 $\mu\text{mol}/\text{mol}$,测定的指标有净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i),并计算水分利用效率(water use efficiency, WUE)和羧化效率(carboxylation efficiency, CE): $\text{WUE}=P_n/T_r$, $\text{CE}=P_n/C_i$ 。每个处理选择生长健壮良好的 3 株幼苗,每个幼苗测定 3 片叶子,结果取平均值。

1.3.2 叶绿素荧光参数测定 叶绿素荧光参数测

定于 2019 年 7 月中下旬上午 10:00 进行,用 LI-6400-40 便携式光合仪荧光叶室测定。每个种选取生长一致的 3 株实生苗,每株测量 3 片功能叶,每片叶子测定 3 次,结果取平均值。测定前进行暗适应 30 min,测定暗反应下最小初始荧光(F_0)和最大荧光(F_m),并计算暗适应下光系统Ⅱ(PSⅡ)最大光化学效率(F_v/F_m)和 PSⅡ潜在活性(F_v/F_0)。然后,打开活化光($1\ 000\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)进行充分诱导(30 min),测定光照条件下光系统Ⅱ(PSⅡ)光合电子传递速率(electron transfer rate,ETR)、有效光化学效率(F_v'/F_m')、实际光化学效率($Y_{\text{PSⅡ}}$)和光化学猝灭系数(q^p)。

1.3.3 生理指标测定 (1)叶片相对含水量。摘取供试植物中上部叶片 15 片,立刻称量鲜质量,然后将叶片放入水中,于暗处放置 24 h 后取出,用纸巾擦干叶片表面水分,称量其质量;然后再放入水中 1 h,取出,擦干称质量,直至植物叶片质量保持不变即为其饱和质量,最后在干燥烘箱中于 105 ℃杀青 10 min,80 ℃恒温下烘 48 h,称干质量。计算叶片相对含水量和水分饱和亏缺,其计算公式为:

相对含水量(RWC)=(叶鲜质量-叶干质量)/(叶饱和质量-叶干质量)×100%;

水分饱和亏缺(WSD)=100%-相对含水量^[18]。

(2)叶水势(WP)。采用 WP4C 露点水势仪进行测定。于干旱胁迫结束后第 2 天早上,选取生长部位相同、长势基本一致的叶片测定叶水势。每个处理测定 10 片叶,重复 3 次。

(3)SPAD 值。采用日本生产的 SPAD-520 型叶绿素仪进行测定。随机选择健康良好无病虫害的叶片,每个叶片测量 3 个点取平均数,重复 3 次。

1.3.4 生化指标测定 脯氨酸(Pro)含量采用酸性茚三酮法^[19]测定,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TAB)比色法^[20]测定,过氧化物酶(POD)活

性采用愈创木酚法^[21]测定,还原性糖(RS)含量采用蒽酮比色法^[22]测定。

1.4 数据统计与处理

1.4.1 数据处理 利用 Excel 2010 进行数据整理,用 R 语言和 Origin 2017 作图,利用 SPSS 20.0 软件进行 one-way 方差分析,用 Duncan's 法进行多重比较。

1.4.2 隶属函数综合评价 为了消除树种之间的差异,采用隶属函数法对综合指标值进行标准化处理^[23]。若指标与抗旱性呈正相关,计算公式为:

$$X(u)=(x-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})。$$

若指标与抗旱性呈负相关,计算公式为:

$$X(u)=1-(x-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})。$$

式中: $X(u)$ 为抗旱性隶属函数值; x 为植物某一指标的实测值, $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为所有植物品种中某一指标的最小值和最大值。

先求出 3 种沙棘属植物在各干旱处理梯度下的抗旱性隶属函数值,然后对每一指标在不同干旱胁迫梯度下的隶属函数值求平均值,隶属函数值越大,则表明抗旱性越强。

1.4.3 主成分分析 利用数学降维思想,将原来多个变量转化为相互独立的少数变量,按照方差大小进行排序,再根据方差累积贡献率(>85%)来确定主成分,以方差累积贡献率最大的为第一主成分,以此类推,有多少个变量就有多少个主成分。最后计算综合得分情况,得分越高,则表明该种植物的抗旱性越强,反之越差^[24]。

2 结果与分析

2.1 3 种沙棘属植物在各干旱胁迫梯度下的生长状况

3 种沙棘属植物在各干旱胁迫梯度下的生长状况见表 1。

表 1 3 种沙棘属植物在干旱胁迫下的生长状况
Table 1 Growth status of three *Hipopophae* plants under drought stress

种名 Species	生长状况 Growth status			
	0(CK)	10 d	20 d	30 d
江孜沙棘 <i>H. gyantsensis</i>	植株生长良好 Plants grow well	植株生长正常 Plants grow normally	植株基部叶片开始变色 Plant base leaves open discoloration	植株基部叶片变黄,部分叶片开始脱落 The leaves of plant base turn yellow, partial leaves start to fall off
云南沙棘 <i>H. rhamnoides</i> sub- sp. <i>Yunnanensis</i>	植株生长良好 Plants grow well	底部叶片开始变黄,有少许脱落 The bottom leaves begin to turn yellow, slightly fall off	将近 1/4 的叶片脱落,出现死亡植株 Nearly 1/4 of the leaves fall off, emerged dead plants	叶片变色,大部分叶片脱落,部分植株死亡 Leaves change color, most leaves shedd, some plants die
肋果沙棘 <i>H. neurocarpa</i>	植株生长良好 Plants grow well	基部叶片变色,无脱落 Discoloration of basal leaves without flaking	部分叶片变黄,出现脱落 Some leaves turn yellow and fall off	开始出现死亡植株 Dead plants begin to appear

由表 1 可知,在相同干旱胁迫梯度下,江孜沙棘的生长状况优于云南沙棘和肋果沙棘;在干旱胁迫结束时,以江孜沙棘生长状况最为良好。

2.2 干旱胁迫对 3 种沙棘属植物光合指标的影响

图 1 显示,随着干旱胁迫时间的延长,3 种沙棘属植物净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 (C_i) 浓度、蒸腾速率(T_r)和羧化效率(CE)的变化总

体均呈下降趋势。由图 1-a 可知,在干旱胁迫处理期间,江孜沙棘 P_n 最大,云南沙棘最小。与 CK 组相比,干旱 30 d 时,江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的 P_n 分别下降了 73.60%,88.23%和 85.04%;说明随着干旱胁迫时间的增加,江孜沙棘的 P_n 较云南沙棘和肋果沙棘下降慢。

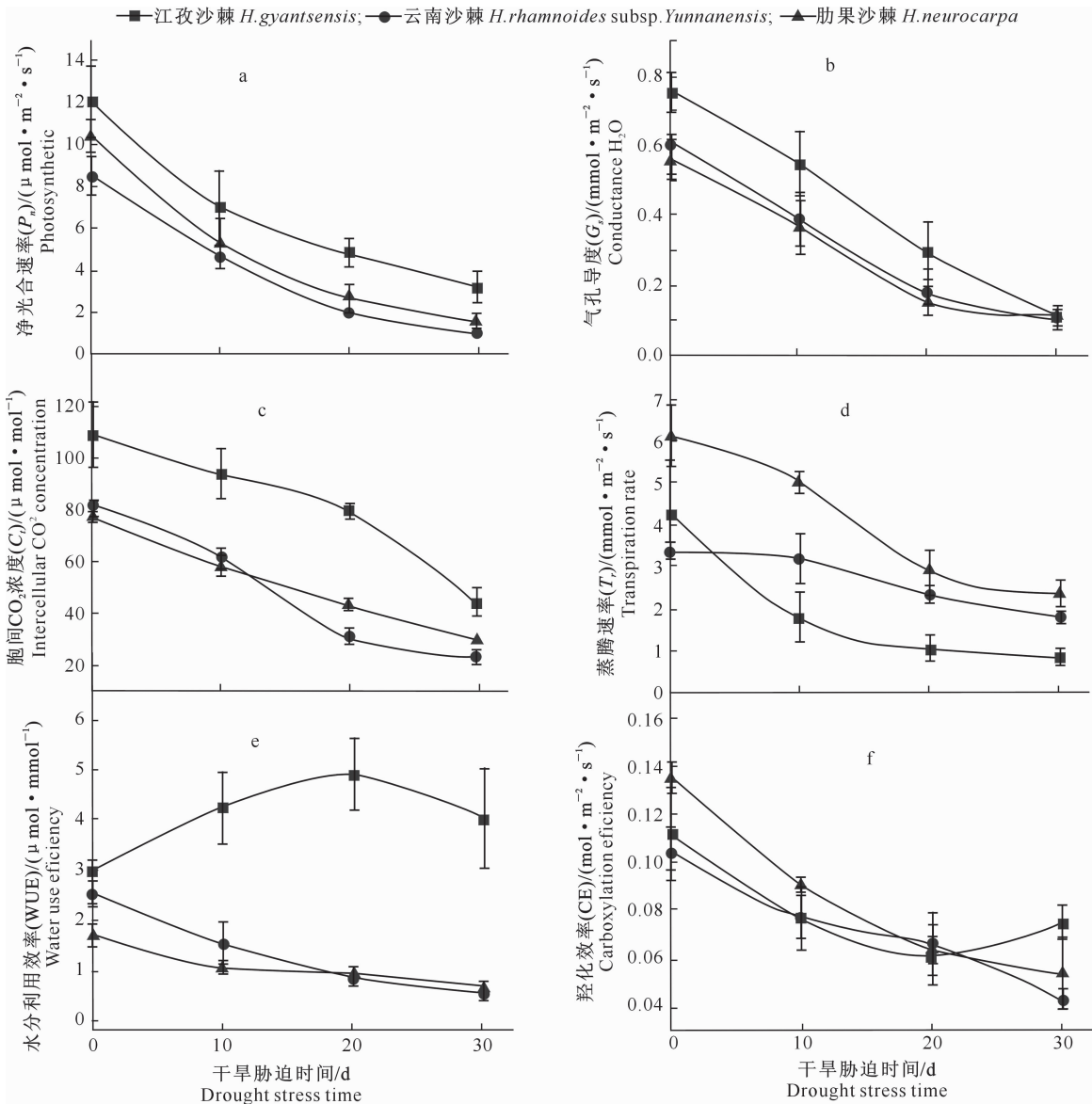


图 1 干旱胁迫对 3 种沙棘属植物光合参数的影响

Fig. 1 Effects of drought stress on photosynthetic parameters of three *Hippophae* species

由图 1-b 可明显看出,随着干旱胁迫时间的增加,江孜沙棘 G_s 的下降幅度大于云南沙棘和肋果沙棘。与干旱 0 d 相比,干旱胁迫结束时,江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的 G_s 分别下降了 85.21%,82.64%和 79.03%。由图 1-c 可以看出,整个干旱胁迫期间,江孜沙棘的 C_i 大于云南沙棘和肋果沙

棘。由图 1-d 可见,与干旱 0 d 相比,在干旱胁迫结束时,江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的 T_r 分别下降了 80.80%,46.60%和 61.66%。由图 1-e 可见,干旱胁迫下 3 种沙棘属植物的水分利用效率(WUE)有明显差异,江孜沙棘总体大于云南沙棘和肋果沙棘。在干旱胁迫的 0~20 d,江孜沙棘的

WUE 几乎呈直线上升趋势,在干旱胁迫 20~30 d 时,其 WUE 才呈下降趋势;云南沙棘和肋果沙棘的 WUE 在整个干旱胁迫期间均呈下降趋势,且云南沙棘的下降幅度大于肋果沙棘。由图 1-f 可知,在干旱胁迫的 0~20 d,3 种沙棘属植物江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的羧化效率(CE)均呈下降趋势,其中肋果沙棘的下降幅度大于云南沙棘和江孜沙棘;在干旱胁迫的 20~30 d,江孜沙棘的 CE 又开始呈上升趋势,而云南沙棘和肋果沙棘仍呈下降趋势,其中云南沙棘的下降幅度大于肋果沙棘。

2.3 干旱胁迫对 3 种沙棘属植物叶绿素荧光参数的影响

由图 2 可以看出,随着干旱胁迫时间的增加,3 种沙棘属植物电子传递速率(ETR)、实际光化学效率(Y_{PSII})、有效光化学效率(F_v'/F_m')均呈下降趋势,而光化学猝灭系数(q^p)的表现并不相同。由图 2-a 可见,与干旱 0 d 相比,干旱胁迫结束时江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的 ETR 分别降低了

28.91%,52.62%和 49.60%,其中以江孜沙棘的下降幅度最小。由图 2-b 可知,江孜沙棘的 Y_{PSII} 均高于云南沙棘和肋果沙棘。在整个干旱胁迫期间,江孜沙棘、云南沙棘、肋果沙棘的 Y_{PSII} 分别为 0.177~0.358,0.118~0.328 和 0.110~0.290。由图 2-c 可见,整个干旱胁迫期间,江孜沙棘有效光化学效率(F_v'/F_m')总体最大,与干旱 0 d 相比,干旱胁迫结束时,江孜沙棘、云南沙棘、肋果沙棘的 F_v'/F_m' 分别下降了 27.13%,36.82%和 45.24%,说明干旱胁迫对江孜沙棘的 F_v'/F_m' 影响较小,对肋果沙棘的 F_v'/F_m' 影响最大。由图 2-d 可知,云南沙棘和肋果沙棘光化学猝灭系数(q^p)随干旱胁迫处理时间的增加呈逐渐降低趋势,而江孜沙棘的 q^p 则呈先下降后上升趋势。三者相比,江孜沙棘 q^p 的变动幅度最小。与干旱 0 d 相比,干旱胁迫结束时,江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的 q^p 分别下降了 25.40%,38.71%和 42.32%。

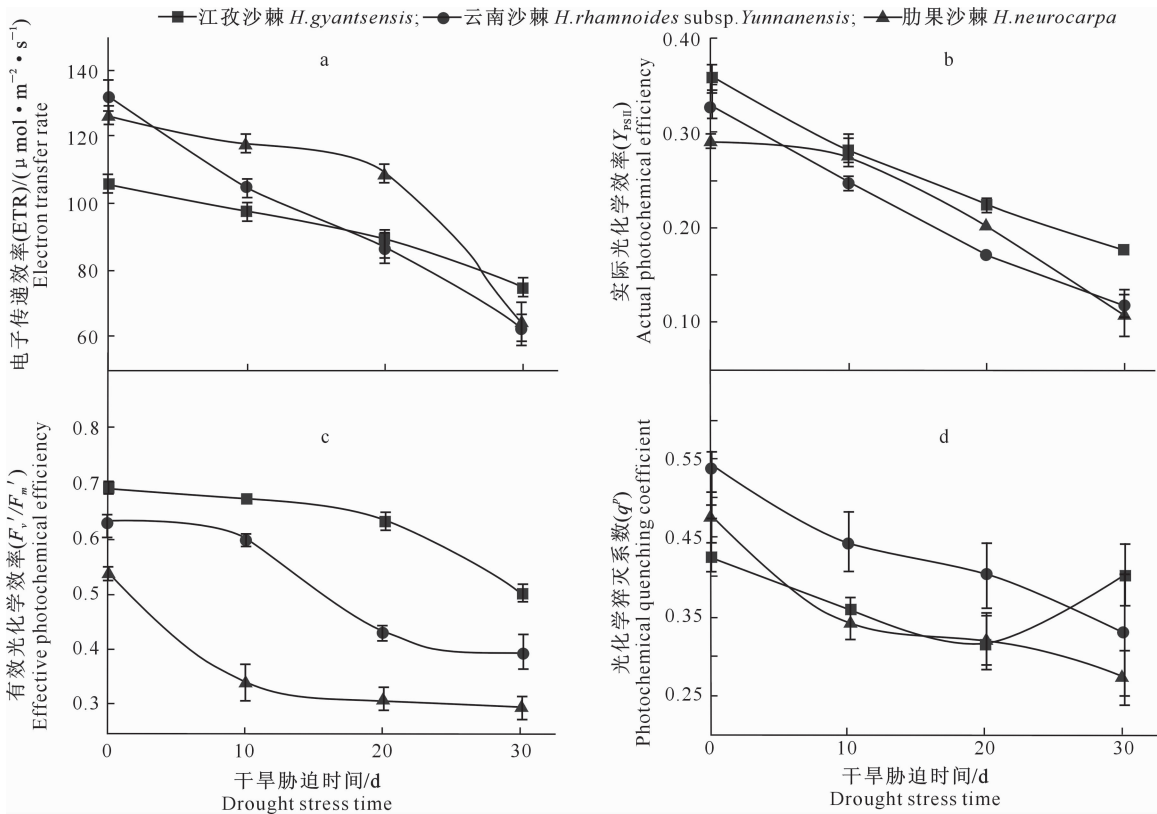


图 2 干旱胁迫对 3 种沙棘属植物叶绿素荧光参数的影响

Fig. 2 Effect of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters of three *Hippophae* plants

2.4 干旱胁迫对 3 种沙棘属植物生理指标的影响

由表 2 可知,随着干旱胁迫时间的增加,3 种沙棘属植物叶片相对含水量(RWC)、叶水势(WP)、SPAD 值均呈下降趋势,而水分饱和和亏缺值(WSD)

均呈上升趋势。与 CK 相比,干旱胁迫结束时,江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的 RWC 分别下降了 8.91%,19.13%和 22.84%,WSD 分别上升了 27.24%,52.88%和 80.88%。在干旱胁迫期间,江

孜沙棘 WP 最高, 肋果沙棘次之, 云南沙棘最小; 与 CK 组相比, 干旱胁迫结束时江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的 WP 分别下降了 93. 12%, 91. 61% 和 94. 62%。3 种沙棘属植物的 SPAD 值在各干旱胁迫梯度下均差异显著($P<0.05$), 江孜沙棘、云南沙棘、肋果沙棘的 SPAD 值在干旱胁迫处理期间分别为 38. 007~54. 347, 29. 423~72. 897, 33. 157~68. 529, 其中以江孜沙棘 SPAD 值的变动幅度最小。

表 2 干旱胁迫对 3 种沙棘属植物生理指标的影响

Table 2 Effects of drought stress on physiological indexes of three <i>Hippophae</i> plants					
种名 Species	干旱胁迫时间/d Drought stress time	叶片相对含水量(RWC)/% Relative water content	水分饱和和亏缺值(WSD)/% Water saturation deficit	叶水势(WP) Water potential	SPAD
江孜沙棘 <i>H. gyantsensis</i>	0(CK)	75. 474±0. 730 a	24. 526±0. 730 c	-0. 317±0. 076 a	54. 347±1. 019 a
	10	73. 584±2. 270 ab	26. 416±2. 270 b	-1. 360±0. 310 b	45. 743±2. 230 b
	20	70. 343±2. 564 b	29. 657±2. 561 ba	-3. 347±0. 375 c	41. 613±0. 439 c
	30	68. 750±3. 756 c	31. 250±3. 756 a	-4. 607±0. 350 d	38. 007±1. 543 d
云南沙棘 <i>H. rhamnoides</i> subsp. <i>Yunnanensis</i>	0(CK)	73. 435±0. 598 a	26. 565±0. 598 c	-0. 580±0. 036 a	72. 897±1. 559 a
	10	71. 654±0. 658 a	28. 346±0. 658 c	-2. 337±0. 355 b	50. 273±2. 517 b
	20	65. 235±1. 011 b	34. 765±1. 011 b	-4. 870±0. 183 c	37. 257±1. 321 c
	30	59. 388±2. 082 c	40. 612±2. 082 a	-6. 913±0. 348 d	29. 423±1. 874 d
肋果沙棘 <i>H. neurocarpa</i>	0(CK)	79. 299±0. 571 a	20. 701±0. 571 d	-0. 327±0. 085 a	68. 529±1. 178 a
	10	75. 440±1. 169 b	24. 560±1. 169 c	-1. 990±0. 629 b	46. 823±2. 971 b
	20	70. 335±0. 999 c	29. 665±0. 999 b	-4. 683±0. 392 c	37. 380±1. 091 c
	30	62. 556±1. 467 d	37. 444±1. 467 a	-6. 080±0. 034 d	33. 157±1. 788 d

注: 同列数据后标不同小写字母表示同种植物不同处理间在 5% 水平上差异显著。下表同。
Note: Different letters indicate significant difference among treatments at the 5% level. The same below.

2.5 干旱胁迫对 3 种沙棘属植物生化指标的影响

由表 3 可知, 随着干旱胁迫时间的增加, 3 种沙棘属植物脯氨酸(Pro)、丙二醛(MDA)含量及过氧化物酶(POD)活性的变化趋势表现一致, 总体均呈上升趋势, 而还原性糖(Rs)含量随干旱胁迫的进行变化不尽相同, 其中江孜沙棘和云南沙棘呈先上升后下降趋势, 肋果沙棘呈减小趋势。云南沙棘和肋果沙棘的 Pro 含量在各干旱胁迫处理间差异显著($P<0.05$); 干旱胁迫结束时, 江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的 Pro 含量分别是 CK 的 2. 46, 5. 01 和 4. 11 倍。与 CK 相比, 干旱胁迫结束时, 江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的 MDA 含量分别增加

104. 48%, 145. 41% 和 54. 74%。3 种沙棘属植物的 POD 活性在各干旱胁迫处理间均存在显著差异($P<0.05$), 整个干旱胁迫处理期间以云南沙棘的 POD 活性最高, 江孜沙棘的 POD 最小; 与 CK 相比, 干旱 30 d 时江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的 POD 活性分别增加了 358. 05%, 349. 87% 和 780. 40%。3 种沙棘属植物的 Rs 含量在各干旱胁迫处理间变化较大, 整个干旱胁迫期间, 江孜沙棘、云南沙棘、肋果沙棘的 Rs 含量为 5. 894~11. 893, 1. 907~10. 448 和 4. 358~14. 383 mg/g。相对而言, 江孜沙棘 Rs 含量的变动范围小于云南沙棘和肋果沙棘。

表 3 干旱胁迫对 3 种沙棘属植物生化指标的影响

Table 3 Effects of drought stress on biochemical indexes of three <i>Hippophae</i> plants					
种名 Species	干旱胁迫时间/d Drought stress time	脯氨酸/(mg · g ⁻¹) Proline	丙二醛/(μmol · g ⁻¹) Malondialdehyde	POD 活性/(μg · g ⁻¹ · min ⁻¹) POD activity	还原性糖/(mg · g ⁻¹) Reducing sugar
江孜沙棘 <i>H. gyantsensis</i>	0(CK)	5. 333±1. 281 b	10. 568±1. 610 c	9. 699±1. 993 d	5. 894±0. 771 c
	10	7. 389±1. 056 b	16. 033±1. 074 b	15. 008±1. 476 c	8. 135±0. 483 b
	20	11. 111±1. 445 a	20. 132±0. 940 a	25. 046±1. 692 b	11. 893±0. 454 a
	30	13. 111±2. 404 a	21. 609±1. 183 a	44. 426±2. 572 a	6. 143±1. 042 c
云南沙棘 <i>H. rhamnoides</i> subsp. <i>Yunnanensis</i>	0(CK)	4. 222±0. 222 d	11. 863±1. 523 d	16. 961±1. 334 d	4. 582±1. 256 b
	10	12. 611±2. 593 c	19. 341±0. 683 c	26. 599±2. 317 c	10. 448±0. 735 a
	20	17. 039±1. 103 b	24. 006±0. 901 b	42. 450±2. 615 b	2. 958±0. 639 c
	30	21. 166±1. 306 a	29. 113±2. 534 a	76. 303±2. 901 a	1. 907±0. 097 c
肋果沙棘 <i>H. neurocarpa</i>	0(CK)	4. 889±0. 012 d	13. 154±0. 855 b	17. 049±1. 416 d	14. 383±0. 941 a
	10	10. 056±1. 278 c	15. 544±0. 839 b	23. 433±2. 774 c	11. 178±0. 764 b
	20	16. 444±1. 202 b	19. 857±0. 831 a	36. 173±1. 494 b	7. 363±0. 773 c
	30	20. 111±1. 202 a	20. 354±2. 777 a	47. 806±1. 922 a	4. 358±1. 343 d

2.6 3 种沙棘属植物苗期抗旱性的隶属函数评价

林木苗期抗旱性受多个因素的影响,而单一指标无法准确全面反映植物的抗旱能力,因此采用隶属函数对 3 种沙棘属植物的光合指标(P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 等)、生理生化指标(叶片相对含水量、叶水势、脯氨酸等)

酸等)等 18 个指标进行苗期抗旱性综合评价,结果见表 4。由表 4 可以看出,江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的隶属函数平均值分别为 0.562,0.392 和 0.436。由此可知,3 种沙棘属植物抗旱性强弱表现为江孜沙棘>肋果沙棘>云南沙棘。

表 4 基于隶属函数的 3 种沙棘属植物苗期抗旱性综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation on drought resistance of three *Hippophae* plants at seedling stage based on membership function

指标 Index	隶属函数值 Membership value			指标 Index	隶属函数值 Membership value		
	江孜沙棘 <i>H. gyantsensis</i>	云南沙棘 <i>H. rhamnoides</i> subsp. <i>Yunnanensis</i>	肋果沙棘 <i>H. neurocarpa</i>		江孜沙棘 <i>H. gyantsensis</i>	云南沙棘 <i>H. rhamnoides</i> subsp. <i>Yunnanensis</i>	肋果沙棘 <i>H. neurocarpa</i>
P_n	1.000	0.000	0.323	RWC	0.714	0.000	0.834
G_s	0.888	0.135	0.251	WSD	0.164	0.751	0.166
C_i	1.000	0.058	0.130	WP	1.000	0.000	0.451
T_r	1.000	0.197	0.011	SPAD	0.500	0.500	0.367
WUE	0.078	0.444	1.000	Pro	0.250	0.750	0.720
CE	0.306	0.250	0.733	MDA	0.085	0.875	0.250
Y_{PSII}	0.997	0.172	0.321	POD	0.000	0.997	0.618
ETR	0.280	0.340	0.714	Rs	0.533	0.190	0.768
F_v'/F_m'	0.993	0.558	0.000	平均值 Average value	0.562	0.392	0.436
q^p	0.327	0.843	0.201	排名 Ranking	1	3	2

2.7 3 种沙棘属植物苗期抗旱性的主成分分析及评价

采用最大方差旋转法对 3 种沙棘属植物光合、

生理生化共 18 个指标($X_1 \sim X_{18}$)进行主成分分析,探寻影响沙棘属植物抗旱性的关键指标,得到主成分特征值、方差贡献率和累积贡献率见表 5。

表 5 3 种沙棘属植物 18 个指标的主成分分析得分矩阵

Table 5 Principal component analysis score matrix of 18 indicators of three *Hippophae* plants

指标 Index	主成分 Component			指标 Index	主成分 Component		
	1	2	3		1	2	3
$P_n(X_1)$	0.719	0.499	0.386	WSD(X_{12})	-0.528	-0.792	-0.253
$G_s(X_2)$	0.737	0.429	0.415	WP(X_{13})	0.698	0.599	0.376
$C_i(X_3)$	0.490	0.496	0.677	SPAD(X_{14})	0.864	0.391	0.149
$T_r(X_4)$	-0.043	0.143	0.950	Pro(X_{15})	-0.684	-0.531	-0.476
WUE(X_5)	0.584	0.626	-0.453	MDA(X_{16})	-0.654	-0.609	-0.269
CE(X_6)	0.782	0.546	0.071	POD(X_{17})	-0.502	-0.679	-0.444
$Y_{PSII}(X_7)$	0.709	0.530	0.399	Rs(X_{18})	-0.022	0.889	0.136
ETR(X_8)	0.695	0.612	-0.011	特征值 Eigenvalue	7.159	5.726	3.570
$F_v'/F_m'(X_9)$	0.468	0.080	0.835	贡献率/% Contribution rate	39.770	31.812	19.835
$q^p(X_{10})$	0.872	-0.074	0.125	累积贡献率/% Cumulative contribution rate	39.770	71.582	91.417
RWC(X_{11})	0.528	0.792	0.253				

由表 5 可知,以特征值>1 提取 4 个主成分,其中 3 个主成分的方差贡献率分别为 39.770%,31.812%和 19.835%,方差累积贡献率达到 91.417%,说明这 3 个主成分包含了 3 种沙棘属植物 18 个指标的大部分信息,可将原来的 18 个指标转换为 3 个相互独立的综合指标,用于沙棘属植物抗旱性的综合评价。第 1 主成分中 P_n 、 G_s 、CE、 Y_{PSII} 、ETR、 q^p 、WP、SPAD 值的载荷值较高,说明在第 1 主成分中 P_n 、 G_s 、CE 等 8 个指标为主要因子;

第 2 主成分中 WUE、RWC、Rs 的载荷值较高,说明第 2 主成分中 WUE、RWC、Rs 为主要因子;第 3 主成分中 C_i 、 T_r 、 F_v'/F_m' 的载荷值较高,说明第 3 主成分中 C_i 、 T_r 、 F_v'/F_m' 为主要因子。

用 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 等 3 个主成分代替原来的 18 个指标,根据表 5 计算特征向量值,并作为各主成分因子的系数,得出各主成分的线性组合(其中 $X_1 \sim X_{18}$ 为表 5 中各指标标准化后的变量)为:

$$Z_1=0.269X_1+0.275X_2+0.183X_3-0.016X_4+$$

$0.218X_5 + 0.292X_6 + 0.265X_7 + 0.26X_8 + 0.175X_9 + 0.326X_{10} + 0.197X_{11} - 0.197X_{12} + 0.261X_{13} + 0.323X_{14} - 0.256X_{15} - 0.244X_{16} - 0.187X_{17} - 0.008X_{18}$;

$Z_2 = 0.209X_1 + 0.118X_2 + 0.207X_3 + 0.06X_4 - 0.262X_5 + 0.228X_6 + 0.221X_7 + 0.256X_8 + 0.033X_9 - 0.031X_{10} + 0.331X_{11} - 0.331X_{12} + 0.250X_{13} + 0.163X_{14} - 0.222X_{15} - 0.254X_{16} - 0.284X_{17} + 0.371X_{18}$;

$Z_3 = 0.204X_1 + 0.220X_2 + 0.358X_3 + 0.503X_4 - 0.239X_5 + 0.038X_6 + 0.211X_7 - 0.006X_8 + 0.442X_9 + 0.066X_{10} + 0.134X_{11} - 0.134X_{12} + 0.199X_{13} + 0.079X_{14} - 0.252X_{15} - 0.142X_{16} -$

$0.235X_{17} + 0.072X_{18}$ 。

以选取的 3 个主成分的贡献率(α_1 、 α_2 、 α_3)作为权重,构建综合评价方程为: $F=\alpha_1Z_1+\alpha_2Z_2+\alpha_3Z_3$,即 $F=0.397\ 70Z_1+0.318\ 12\ Z_2+0.198\ 35\ Z_3$,由此计算综合评价值 F 。

根据上述公式计算不同干旱胁迫梯度条件(0(CK),10,20,30 d)下 3 种沙棘属植物的综合评价值,得到其平均值见表 6。由表 6 可以看出,江孜沙棘综合评价值最高(0.985),肋果沙棘次之(−0.437),云南沙棘最低(−0.548),表明 3 种沙棘属植物抗旱能力的强弱顺序依次为:江孜沙棘>肋果沙棘>云南沙棘。

表 6 3 种沙棘属植物抗旱性评价的综合评价值及排名

Table 6 Comprehensive evaluation value and rankings of drought resistance of three *Hippophae* plants

种名 Species	主成分 1 Component 1		主成分 2 Component 2		主成分 3 Component 3		综合评价值 Comprehensive evaluation value	综合排名 Comprehensive ranking
	得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking	得分 Score	排名 Ranking		
江孜沙棘 <i>H. gyantsensis</i>	0.768	1	0.874	1	2.023	1	0.985	1
云南沙棘 <i>H. rhamnoides</i> subsp. <i>Yunnanensis</i>	−0.431	3	−0.517	3	−1.068	3	−0.548	3
肋果沙棘 <i>H. neurocarpa</i>	−0.337	2	−0.357	2	−0.955	2	−0.437	2

3 讨论与结论

光合作用是研究植物有机物积累的基础,光合速率是植物生长状况和抗逆性的评价指标之一,干旱胁迫下植物光合速率下降的主要原因是植物因干旱造成损伤所致^[25]。本研究表明,随着干旱胁迫处理时间的增加,3 种沙棘属植物的 P_n 、 G_s 、 C_i 、 T_r 总体均呈下降趋势,这与赵瑜琦等^[26]的研究结果一致。有研究表明,干旱胁迫条件下,植物光合作用受到抑制有气孔和非气孔两种因素,而 C_i 由下降转变为上升是非气孔因素所致^[27-28]。本研究中,3 种沙棘属植物 P_n 、 C_i 在干旱胁迫条件下均表现出降低趋势,说明在干旱胁迫下 3 种沙棘属植物光合作用下降的主要原因是气孔因素作用的结果。各干旱胁迫处理期间,3 种沙棘属植物 P_n 大小依次表现为江孜沙棘>肋果沙棘>云南沙棘,干旱胁迫结束后,江孜沙棘 P_n 下降幅度最小,说明干旱胁迫对江孜沙棘光合作用的影响较小;随着干旱胁迫处理时间的增加,江孜沙棘 G_s 、 T_r 的下降幅度均大于云南沙棘和肋果沙棘,说明江孜沙棘关闭气孔,减少水分散失的自我保护能力强于云南沙棘和肋果沙棘。干旱胁迫条件下,江孜沙棘水分利用效率(WUE)总体大于云南沙

棘和肋果沙棘,说明 3 种沙棘属植物如果通过光合作用产生相同的干物质时,江孜沙棘消耗的水分较少,节水能力强于云南沙棘和江孜沙棘。

植物叶绿素荧光技术可快速、灵敏地反映逆境中植物光合作用的变化,是研究植物光合作用的探针^[29-32]。本研究中,3 种沙棘属植物光合电子传递速率(ETR)、 Y_{PSII} 、 F_v'/F_m' 均随干旱胁迫时间的增加呈下降趋势,说明干旱胁迫处理降低了光系统Ⅱ(PSⅡ)中的电子产量和电子传递速率,抑制了电子的活性,从而导致 3 种沙棘属植物光合效率降低;随干旱胁迫时间的增加,江孜沙棘 ETR、 F_v'/F_m' 下降幅度最小,说明江孜沙棘 PSⅡ 抵御干旱胁迫的能力强于云南沙棘和肋果沙棘。随干旱胁迫时间的增加,3 种沙棘属植物 q^p 变化差异较大,云南沙棘和肋果沙棘 q^p 随干旱胁迫时间的增加呈降低趋势,江孜沙棘则呈先下降后上升趋势,其中江孜沙棘变动幅度小于云南沙棘和肋果沙棘,说明随着干旱胁迫时间的增加,江孜沙棘吸收的光能用于化学反应的份额相对较为稳定。

植物叶片含水量(RWC)、水分饱和亏缺值(WSD)是植物抗旱能力评价的重要指标^[33]。有研究表明,植物叶片的 RWC 越高、WSD 越低,说明植

物抗旱性越强,反之越弱^[34]。本研究中,随着干旱胁迫时间的增加,3 种沙棘属植物的 RWC 均呈下降趋势,而 WSD 呈上升趋势;干旱胁迫处理结束时,江孜沙棘 RWC 的下降幅度和 WSD 的上升幅度最小,肋果沙棘 RWC 的下降幅度和 WSD 的上升幅度最大,说明 3 种沙棘属植物中,江孜沙棘叶片的保水能力最强,肋果沙棘失水最严重。水势(WP)是植物水分亏缺状况的一个重要衡量指标^[35]。本研究中,3 种沙棘属植物的水势均随干旱胁迫处理时间的增加呈下降趋势,说明在干旱胁迫逆境中,3 种沙棘属植物均可通过降低叶片水势来调节体内的水分梯度,从而增强吸水能力,这是植物适应干旱环境的一种自我调节^[36]。整个干旱胁迫期间,江孜沙棘 WP 最高,云南沙棘最小;干旱胁迫结束时,肋果沙棘 WP 下降幅度最大,说明肋果沙棘在干旱环境中叶片失水较多,保水能力最差。SPAD 值是植物叶绿素含量的直接体现,可反映植物的生长状况和光合能力,随着干旱胁迫程度的增加,不同植物的叶绿素变化存在差异^[37]。在本研究中,3 种沙棘属植物的 SPAD 值均随着干旱胁迫时间的增加呈下降趋势,说明在干旱胁迫条件下,3 种植物叶绿素合成受阻,降解加快,导致 SPAD 值下降。在整个干旱胁迫期间,江孜沙棘 SPAD 值的变化幅度最小,说明 3 种沙棘属植物中,干旱胁迫对江孜沙棘叶片叶绿素代谢的影响较小。

丙二醛(MDA)是反映植物细胞膜脂氧化的重要指标^[38]。本研究发现,随着干旱胁迫时间的增加,3 种沙棘属植物叶片的 MDA 均呈增加趋势,说明干旱胁迫可加剧 3 种沙棘属植物膜脂的氧化作用,从而使植物细胞透性增大。在干旱胁迫结束时,云南沙棘 MDA 上升幅度最高,肋果沙棘最小,说明肋果沙棘细胞受伤程度最轻,云南沙棘最严重。渗透调节是植物适应干旱胁迫环境的一种重要机制,而脯氨酸(Pro)是渗透调节物质之一,其在干旱胁迫条件下呈上升趋势。有研究表明,在干旱胁迫条件下,Pro 变化幅度越小的植物耐旱性越强^[39]。本研究表明,3 种沙棘属植物的 Pro 随干旱胁迫时间的增加均呈上升趋势;干旱胁迫结束时,江孜沙棘、云南沙棘和肋果沙棘的 Pro 含量分别是 CK 的 2.46、5.01 和 4.11 倍,说明在整个干旱胁迫期间,江孜沙棘 Pro 变化幅度最小,耐旱性最强。过氧化物酶(POD)是植物细胞膜脂过氧化防御系统中的保护酶之一,干旱胁迫会导致植物细胞 POD 活性升高^[40]。本研究中,3 种沙棘属植物的 POD 活性在各干旱胁迫

处理间均存在显著差异($P < 0.05$),且均随干旱胁迫时间的增加呈上升趋势;整个干旱胁迫期间,云南沙棘 POD 活性最高,江孜沙棘最小,干旱胁迫结束时,肋果沙棘 POD 活性上升幅度最大,说明相比较而言,3 种沙棘属植物中,肋果沙棘植物叶片细胞在干旱胁迫下积累的过氧化类物质较多,受到的胁迫程度较大,抗旱性较弱。3 种沙棘属植物还原性糖(Rs)含量的变化在干旱胁迫条件下存在差异,随着干旱胁迫时间的增加,肋果沙棘还原性糖含量呈下降趋势,江孜沙棘和云南沙棘则呈先上升后下降趋势,造成江孜沙棘和云南沙棘 Rs 升高的主要原因,是其在干旱胁迫条件下光合作用受到抑制,使 Rs 不能被正常利用,从而造成 Rs 的积累。

综上所述,西藏常见植物的抗旱性研究是个极其复杂的过程,单从一个或几个指标无法准确评价 3 种沙棘属植物抗旱性的强弱,所以采用隶属函数和主成分分析对 18 个指标进行综合评价。本研究表明,采用隶属函数和主成分分析对西藏 3 种沙棘属植物抗旱性进行综合评价,结果表现一致,其抗旱能力依次为江孜沙棘>肋果沙棘>云南沙棘,说明 3 种沙棘属植物中,江孜沙棘抗旱性最强,是西藏干旱半干旱地区造林的首选树种。

[参考文献]

- [1] Hu B, Wang Y S, Liu G R. Properties of solar radiation over Chinese arid and semi-arid areas [J]. Atmospheric Environment, 2009, 2(3): 183-187.
- [2] 白冰, 张强, 陈旭辉, 等. 中国西北干旱半干旱区气溶胶分类及特征 [J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 105-110.
Bai B, Zhang Q, Chen X H, et al. Classification and characteristics of aerosols in arid and semi-arid regions of northwestern China [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(5): 105-110.
- [3] 孙妙, 杨周婷, 张存莉, 等. 中国沙棘种子的水引发技术及其抗性生理效应 [J]. 林业科学, 2014, 50(12): 32-39.
Sun M, Yang Z T, Zhang C L, et al. Hydro-Priming technique and its resistance physiology effect for sea buckthorn seed [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(12): 32-39.
- [4] Eva V, Katerina S, Martina M, et al. Comparison of selected aroma compounds in cultivars of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) [J]. Chemical Papers, 2015, 69(6): 881-888.
- [5] 南吉斌, 陈柏舟, 林玲, 等. 青藏高原沙棘属植物种实表型多样性和发芽特性研究 [J]. 种子, 2019, 38(1): 25-30.
Nan J B, Chen B Z, Lin L, et al. *Hippophae* belongs to the Tibetan-Plateau three planting species of real phenotypic differences and germination characteristics research [J]. Seed, 2019, 38(1): 25-30.
- [6] 陈学林, 马瑞君, 孙坤, 等. 中国沙棘属种质资源及其生境类型的研究 [J]. 西北植物学报, 2003, 23(3): 451-455.

- Chen X L, Ma R J, Sun K, et al. Germplasm resources and habitat types of seabuckthorn in China [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(3): 451-455.
- [7] 陈 维. 青藏高原沙棘属植物资源与品质评价 [D]. 成都: 四川大学, 2007.
- Chen C. Resources and quality evaluation of genus *Hippophae* on Qinghai-Tibet Plateau [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.
- [8] 段爱国, 张建国, 罗红梅, 等. 中国沙棘(♀)×蒙古沙棘(♂)杂种 F₁ 重要选种性状表型多样性与选优研究 [J]. 林业科学研究, 2012, 25(1): 30-35.
- Duan A G, Zhang J G, Luo H M, et al. Phenotypic diversity of hybrids progenies of seabuckthorn and selection of superior genotypes [J]. Forest Research, 2012, 25(1): 30-35.
- [9] 纪署光. 引进大果沙棘新品种实生子代性状分离及优良单株选育 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- Ji S G. Phenotypic variation and selection of introduced large fruit seabuckthorn's real off spring groups [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [10] 安雄韬. 不同品种大果沙棘在山西不同地区引种试验 [J]. 山西林业科技, 2017, 46(1): 33-34, 47.
- An X T. Introduction test on different large berry seabuckthorn varieties in different areas of Shanxi province [J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2017, 46(1): 33-34, 47.
- [11] 吴雨蹊. 俄罗斯沙棘良种在东北黑土区引种试验 [J]. 黑龙江农业科学, 2018, 39(3): 69-72.
- Wu Y X. Introduction wxperiment of *Hippophae rhamnoides* L. improved species from Russian in the black soil areas of northeast China [J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2018, 39(3): 69-72.
- [12] 麦拉苏. 沙棘的培育与开发价值分析 [J]. 现代园艺, 2017, 13(4): 33-34.
- Mai L S. Value analysis of cultivation and development of *Hippophae* [J]. Xiandai Horticulture, 2017, 13(4): 33-34.
- [13] 盛渊明. 林区沙棘林改造培育技术探讨 [J]. 农业与技术, 2018, 38(16): 191.
- Sheng Y M. Discussion on reconstruction and cultivation techniques of *Hippophae* forest in forest area [J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(16): 191.
- [14] 秦 景. 黄土高寒区主要造林树种抗旱耐盐生理及耗水特性 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- Qin J. Drought and salt resistant physiological and water consumption characteristics of main plantation tree species in hight-cold region of Loess Plateau [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [15] 管 颖. 北方地区不同立地条件下沙棘造林效果比较 [J]. 防护林科技, 2019, 36(1): 46-47, 89.
- Guan Y. Comparison of afforestation effect of *Hippophae* under different site conditions in northern China [J]. Protection Forest Science and Technology, 2019, 36(1): 46-47, 89.
- [16] 高国日. 沙棘对于旱胁迫和复水响应的生理及分子机制 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
- Gao G R. The Physiological and molecular mechanisms of seabuckthorn(*Hippophae rhamnoides*) in response to drought stress and rewatering [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2018.
- [17] 吴 芹, 牟淑梅, 李雪蕾, 等. 沙棘耐干旱胁迫的生理生化响应研究 [J]. 山东建筑大学学报, 2015, 30(3): 231-235.
- Wu Q M, Su S M, Li X L, et al. Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in *Hippophae rhamnoides* Linn [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2015, 30(3): 231-335.
- [18] 朱永群, 彭丹丹, 彭 燕, 等. 苏丹草及高丹草幼苗对干旱胁迫的生理响应与抗旱性比较 [J]. 草业科学, 2019, 36(5): 1361-1370.
- Zhu Y Q, Peng D D, Peng Y, et al. Physiological response and comparison of *Sorghum sudanense* and *S. bicolor*×*S. sudanense* seedlings under drought stress [J]. Pratacultural Science, 2019, 36(5): 1361-1370.
- [19] 骆丹丹, 白小明, 孙艳敏, 等. 甘肃野生马蔺(*Iris lacteal* var. *chinensis*)对干旱胁迫的生理响应及抗旱性 [J]. 中国沙漠, 2019, 39(5): 210-221.
- Luo D D, Bai X M, Sun Y M, et al. Response of physiological characteristics evaluation of drought tolerance for 10 wild *Iris lacteal* var. *chinensis* from Gansu, China [J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(5): 210-221.
- [20] 贾晓艳, 赵永锋, 王亚卿, 等. 基于生理生化指标的玉米杂交种苗期抗旱性评价 [J]. 种子, 2019, 38(8): 31-33, 38.
- Jia X Y, Zhao Y F, Wang Y Q, et al. Drought resistance evaluation of maize hybrids at seedling stage based on physiological and biochemical indexes [J]. Seed, 2019, 38(8): 31-33, 38.
- [21] 李 艳, 王 庆, 刘国宇, 等. 4 种地被植物干旱胁迫下的生理响应及抗旱性评价 [J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(6): 9-15.
- Li Y, Wang Q, Liu G Y, et al. Response of four ground cover plants stress and the comprehensive evaluation on drought resistance capacit [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(6): 9-15.
- [22] 李文英. 干旱胁迫对百合生长及生理生化的影响 [D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2018.
- Li W Y. Effects of drought stress on growth and physiology biochemistryof lily [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2018.
- [23] 赵国栋, 赵同生, 李春敏, 等. 11 个苹果野生砧木品种低温处理抗性指标的综合评价 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 145-151.
- Zhao G D, Zhao T S, Li C M, et al. Comprehensive evaluation on cold resistance eleven wild apple rootstocks [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 145-151.
- [24] 赵 阳, 赵曼利, 焦润安, 等. 陇南油橄榄主栽品种对干旱胁迫的生理响应及抗性综合评价 [J]. 热带作物学报, 2017, 38(9): 1620-1627.
- Zhao Y, Zhao M L, Jiao R A, et al. The physiological response

- and comprehensive evaluation of drought hardiness under drought stress of Longnan olive main varieties [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(9): 1620-1627.
- [25] 任红旭,陈 雄,孙国钧,等. 抗旱性不同的小麦幼苗对水分和 NaCl 胁迫的反应 [J]. 应用生态学报, 2000, 11(5): 718-722.
Ren H X, Chen X, Sun G J, et al. Response of wheat seedlings with different drought resistance to water deficiency and NaCl stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(5): 718-722.
- [26] 赵瑜琦,高苗琴,李 涛,等. 干旱胁迫对群众杨光合特性与器官干物质分配的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1-7.
Zhao Y Q, Gao M Q, Li T, et al. Effects of water stress on leaf gas exchange and biomass allocation of *Populus* × *Popularis* ‘35-44’ cuttings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1-7.
- [27] Miyashita K, Tanakamaru S, Maitani T, et al. Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance in kidney bean following drought stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, 53(2): 205-214.
- [28] Lawlor D W, Tezara W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes [J]. Annals of Botany, 2009, 103(2): 561-579.
- [29] Wen X G, Gong H, Lu C G. Heat stress induces an inhibition of excitation energy transfer from phycobilisomes to photosystem II but not to photosystem I in a cyanobacterium *Spirulina platensis* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2005, 43(4): 389-395.
- [30] Mishra K B, Iannaccone R, Petrozza A, et al. Engineered drought tolerance in tomato plants is reflected in chlorophyll fluorescence emission [J]. Plant Science, 2011, 182: 79-86.
- [31] 王德福,段洪浪,黄国敏,等. 高温和干旱胁迫对西红柿幼苗生长、养分含量及元素利用效率的影响 [J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3199-3209.
Wang D F, Duan H L, Huang G M, et al. Effects of high temperature and drought stress on growth, nutrient content, and nutrient use efficiency of tomato seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3199-3209.
- [32] 金明月,姜 峰,金光泽,等. 不同年龄白桦比叶面积的生长阶段变异及冠层差异 [J]. 林业科学, 2018, 54(9): 18-26.
Jin M Y, Jiang F, Jin G Z, et al. Variations of specific leaf area in different periods and canopy positions of *Betula platyphylla* at different ages [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(9): 18-26.
- [33] 曾凡江,张希明,李小明. 怪柳的水分生理特性研究进展 [J]. 应用生态学报, 2002, 31(5): 611-614.
Zeng F J, Zhang X M, Li X M. A review on the water physiological characteristics of *Tamarix* and its prospect [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 31(5): 611-614.
- [34] 黎修东,骆华容,莫惠芝,等. 不同水分条件下 3 种苔藓植物的生理响应 [J]. 江西农业学报, 2018, 30(4): 39-43.
Li X D, Luo H R, Mo H Z, et al. Physiological responses of three species of bryophytes to different moisture conditions [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(4): 39-43.
- [35] 单长卷,梁宗锁. 土壤干旱对刺槐幼苗水分生理特征的影响 [J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2006, 37(4): 598-602.
Shan C J, Liang Z S. Study on water physiological characteristics of black locust seedling under soil drought condition [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2006(4): 598-602.
- [36] 司建华,冯 起,张小由. 极端干旱区胡杨水势及影响因子研究 [J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 505-510.
Si J H, Feng Q, Zhang X Y. Leaf water potential of *Populus euphratica* and influencing factors in extreme arid area [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(4): 505-510.
- [37] 董 明,苏德荣,刘泽良,等. 干旱胁迫对阿诺红鞑艮忍冬生理指标的影响 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(4): 8-13.
Dong M, Su D R, Liu Z L, et al. Effects of drought stress on physiological indexes of *Lonicera tatarica* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(4): 8-13.
- [38] 李 玲,徐志防,韦 霄,等. 金钟藤和葛藤在干旱与复水条件下的生理比较 [J]. 广西植物, 2008, 34(6): 806-810.
Li L, Xu Z F, Wei X, et al. Physiological comparison of *Merremia boissiana* and *Pueraria lobata* under drought and rehydration conditions [J]. Guihaia, 2008, 34(6): 806-810.
- [39] 李 君,周守标,王春景,等. 野生和栽培马蹄金抗旱性比较及其抗旱机制初探 [J]. 植物生态学报, 2007, 53(3): 521-527.
Li J, Zhou S B, Wang C J, et al. Comparison study of drought tolerance and tolerance mechanisms in wild and cultivated *Dichondra repens* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 53(3): 521-527.
- [40] 覃 鹏,刘叶菊,刘飞虎. 干旱处理对烟草叶片 SOD 和 POD 活性的影响 [J]. 中国烟草科学, 2005, 27(2): 28-30.
Qin P, Liu Y J, Liu F H. Effects of drought stress on SOD and POD activities in tobacco leaves [J]. Chinese Tobacco Science, 2005, 27(2): 28-30.