



## 干旱胁迫对荒漠植物梭梭幼苗保护酶活性和渗透调节物质的影响

汪媛艳 柴成武 纪永福 王方琳 赵鹏 付贵全 唐卫东 肖斌

### Effects of drought stress on protective enzyme activity and osmotic regulatory substances in desert plant *Haloxylon ammodendron* seedlings

WANG Yuanyan, CHAI Chengwu, JI Yongfu, WANG Fanglin, ZHAO Peng, FU Guiquan, TANG Weidong, XIAO Bin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0242>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 红砂幼苗叶片生理特性对干旱胁迫的响应

Effects of drought stress on leaf physiology of *Reaumuria soongorica* seedlings during the growing season

草业科学. 2023, 40(10): 2483 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0554>

#### 干旱胁迫下心叶驼绒藜生理响应特性

Physiological responses of *Krascheninnikovia ewersmannia* under drought stress

草业科学. 2023, 40(5): 1349 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0701>

#### 黑河流域典型下垫面土壤水分动态

Soil moisture in typical underlying surfaces of the Heihe river basin

草业科学. 2022, 39(12): 2475 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0230>

#### 红豆草幼苗叶片光合和叶绿素荧光对干旱胁迫的响应

Effects of drought stress on the leaf photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of sainfoin seedlings

草业科学. 2024, 41(5): 1161 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0086>

#### 干旱胁迫对甘草幼苗光合特性及根系吸水的影响

Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and root water absorption of *Glycyrrhiza uralensis*

草业科学. 2024, 41(2): 382 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0279>

#### 民勤荒漠梭梭茎干液流动态

Dynamic changes in the sap flow of *Haloxylon ammodendron* in the Minqin desert region

草业科学. 2023, 40(1): 169 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0730>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0242

汪媛艳, 柴成武, 纪永福, 王方琳, 赵鹏, 付贵全, 唐卫东, 肖斌. 干旱胁迫对荒漠植物梭梭幼苗保护酶活性和渗透调节物质的影响. 草业科学, 2025, 42(2): 288-294.

WANG Y Y, CHAI C W, JI Y F, WANG F L, ZHAO P, FU G Q, TANG W D, XIAO B. Effects of drought stress on protective enzyme activity and osmotic regulatory substances in desert plant *Haloxylon ammodendron* seedlings. Pratacultural Science, 2025, 42(2): 288-294.

## 干旱胁迫对荒漠植物梭梭幼苗保护酶活性和渗透调节物质的影响

汪媛艳, 柴成武, 纪永福, 王方琳, 赵鹏, 付贵全, 唐卫东, 肖斌

(甘肃省风沙灾害防治重点实验室 / 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家级野外站 / 甘肃省治沙研究所, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为探讨在土壤干旱逐渐加重过程中荒漠植物梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 幼苗各指标的响应机制, 利用盆栽试验测定人工浇水后自然干旱过程中梭梭幼苗叶片水分、保护酶活性和渗透调节物质的变化特征。结果表明: 1) 梭梭叶片相对含水量 (RWC) 随自然干旱天数增加而降低, 相对水分亏缺 (RWD) 呈波动式上升趋势。2) 持续干旱对梭梭细胞膜伤害较大, 叶片相对电导率 (REC) 逐渐增大, 但丙二醛 (MDA) 积累不明显。3) 幼苗可溶性糖 (SS)、可溶性蛋白 (SPC)、脯氨酸 (Pro) 含量及过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性对持续干旱的响应不一致, 植物主要依靠 POD、SOD、Pro 的协同作用来抵御土壤水分减少对其细胞造成的伤害。综上可知, 土壤自然干旱过程中, 梭梭幼苗通过累积渗透物质来维持细胞膨压、增加抗氧化酶活性以减轻或延缓细胞膜的伤害, 从而增强对土壤干旱的适应性, 以保证自身生理代谢活动的正常进行。

**关键词:** 自然干旱; 梭梭幼苗; 叶片水分; 保护酶活性; 渗透调节物质; 土壤水分; 响应机制

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2025)02-0288-07

### Effects of drought stress on protective enzyme activity and osmotic regulatory substances in desert plant *Haloxylon ammodendron* seedlings

WANG Yuanyan, CHAI Chengwu, JI Yongfu, WANG Fanglin, ZHAO Peng, FU Guiquan, TANG Weidong, XIAO Bin  
(State Key Laboratory of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating / Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem / Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** We investigated the response mechanisms of different indicators during the gradual aggravation of soil drought using pot experiments and determined the changes in the water content, protective enzyme activity, and osmosis-regulating substances in the leaves of desert plant *Haloxylon ammodendron* seedlings during natural drought after artificial watering. The results demonstrated the following: 1) The relative water content (RWC) of *H. ammodendron* leaves decreased with an increase in the number of natural drought days, whereas the relative water deficit (RWD) displayed a fluctuating upward trend. 2) Continuous drought significantly damaged the cell membrane of *H. ammodendron* leaves, and the relative electrical conductivity (REC) of the leaves gradually increased. However, the accumulation of malondialdehyde (MDA) was insignificant. 3) The contents of soluble sugar (SS), soluble protein (SPC), proline (Pro), and activity of peroxidase (POD), catalase (CAT), and superoxide dismutase (SOD) displayed different responses to persistent drought. The plants were largely

收稿日期: 2023-04-30 接受日期: 2023-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U23A2061); 甘肃省林业和草原科技创新项目 (LCCX202404); 中国工程院战略研究与咨询项目 (2024-DFZD-32); 国家自然科学基金地区基金项目 (32060246)

第一作者: 汪媛艳 (1985-), 女, 甘肃武威人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 82254128@qq.com

通信作者: 柴成武 (1980-), 男, 甘肃会宁人, 研究员, 硕士, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: chengwuchai@163.com

dependent on the synergistic effect of POD, SOD, and Pro to resist cellular damage caused by reduced soil moisture content. Altogether, the findings revealed the relationship between drought resistance physiological indicators of *H. ammodendron* leaves and soil moisture, providing a physiological and ecological basis for species selection in arid desert areas.

**Keywords:** natural drought; *Haloxylon ammodendron* seedling; leaf moisture; protective enzyme activity; osmotic regulatory substance; soil moisture; response mechanism

**Corresponding author:** CHAI Chengwu E-mail: [chengwuchai@163.com](mailto:chengwuchai@163.com)

荒漠化地区降水量少、分布不均匀,植物可利用的水分非常少,加之近年来全球变暖导致干旱、高温等现象的发生频率增加,干旱对荒漠化地区植物个体生长、发育的影响愈发明显<sup>[1]</sup>。干旱情况下土壤水分严重亏缺,尤其是荒漠化地区由于高温等蒸发强烈,因此土壤有效含水量非常低,进而直接或间接导致荒漠地区植物的光合作用效率低,植物细胞代谢发生紊乱并产生一系列生理生化反应,对植物的正常发育造成严重影响<sup>[2]</sup>。荒漠植物为了适应这种生存环境,经过长期的自然选择和协同进化,在生理生化、形态结构等方面形成了很多对水分亏缺的响应机制和适应策略,以在严酷的自然条件下维持正常生长。鉴于气候干旱、水分亏缺对荒漠植物生长的严重制约开展荒漠植物在干旱胁迫下的控制试验,掌握干旱胁迫下植物叶片水分含量及酶活性、渗透调节物质等生理生化指标的响应特征,对全面掌握荒漠植物的抗旱机制,筛选和培养优良抗旱植物,促进生态环境建设可持续发展具有重要意义。

梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 是我国西北干旱荒漠区广泛分布的耐旱先锋植物,在生态保护和防风固沙方面起到极其重要的作用。目前关于干旱胁迫下梭梭生理生化方面的研究已有报道,杨司睿等<sup>[3]</sup>研究表明,干旱胁迫下梭梭采用升高叶片内脱落酸 (abscisic acid, ABA) 含量的方式,减少水分散失的同时使自身生长速度减缓,以提高在逆境中的生存能力;也有研究<sup>[4-6]</sup>通过测定不同干旱条件下梭梭的光能利用效率、气孔大小等生理指标,指出植物主要是通过关闭部分气孔来避免出现光抑制,进而提高光能利用率;赵长明等<sup>[7]</sup>对典型荒漠植物梭梭、白刺 (*Nitraria spinosa*) 的叶绿素荧光参数和气体交换特征的日变化过程开展研究,结果表明白刺的叶绿素荧光参数和气体交换特征为其适应荒漠地区的环境提供了更好的条件。已有研究对开展干旱胁迫

条件下梭梭的生理生化指标研究提供了良好的基础,但对土壤自然干旱过程中梭梭叶片水分特征、抗氧化酶活性及渗透调节物质变化特征的综合研究不够深入。此外,干旱胁迫下,梭梭生理生化指标的变化过程、对土壤水分的响应机制等问题尚不清楚。

因此,本研究参考吴芹等<sup>[8]</sup>研究方法,以盆栽梭梭苗为试验材料,开展土壤自然干旱处理试验,在多级自然干旱梯度条件下,测定梭梭在土壤自然干旱过程中生理指标的变化特征,以期揭示其生理生化指标对土壤水分的响应过程,为掌握荒漠植物的抗旱机制和种质创新提供生理学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料及设计

试验于 2020 年 5 月—8 月在甘肃省治沙研究所荒漠化与风沙灾害防治国家重点实验室培育基地的苗圃地开展。以民勤地区的梭梭为研究对象,5 月底选择大小基本一致、生长良好的二年生实生苗 60 株,移栽至花盆,为尽可能还原植物自然条件下的土壤环境,选择民勤治沙综合试验站梭梭实生苗生长地区的纯沙土为栽培基质,移栽后第 1 次充分浇透水,后期采取常规管理。沙土理化性质为全钾含量 2.18%,全磷含量 0.028%,全氮含量 0.009%,全盐含量 1.003%,有机质占含量 0.314%;土壤中黏粒占 1.639%,粉粒占 4.239%,细砂粒占 45.849%,粗砂粒占 48.271%<sup>[9]</sup>。苗木经过 2 个月的适应期,于 7 月 31 日将所有花盆移入遮雨棚中,遮雨棚高 2.5 m,上部覆盖透明聚乙烯材料,刚移入后浇一次透水,然后选择 30 盆开始断水,进行干旱控水试验,另外 30 盆作为对照 (CK) 正常浇水管理。此外,选取长势相近的 5 盆苗木挂标记牌,埋设 EM50 水分探头每隔 1 h 测定土壤温度及土壤含水率 (体积含水率)。试验共进行 30 d (30 d 后植物叶片干枯),每隔

6 d 于 08:00—09:00 用软毛刷和洗耳球冲刷叶片表面灰尘后进行植物叶片取样, 取样后立即带回实验室, 包入锡箔纸并做好标记后用液氮速冻, 之后放入  $-80^{\circ}\text{C}$  冰箱保存, 备于含水量、电导率测定和其他生理指标分析。

## 1.2 测定项目与方法

植物叶片相对含水量 (relative water content, RWC)、相对水分亏缺 (relative water deficit, RWD) 指标采用常规烘干法测定<sup>[10]</sup>。

$RWC = (\text{叶鲜重} - \text{叶干重}) / (\text{叶饱和重} - \text{叶干重}) \times 100\%$ ;

$RWD = (\text{叶饱和重} - \text{叶鲜重}) / (\text{叶饱和重} - \text{叶干重}) \times 100\%$ 。

过氧化氢酶 (catalase, CAT) 活性采用高锰酸钾滴定法测定, 过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性采用愈创木酚法测定, 超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 活性采用氮蓝四措光还原法测定<sup>[11]</sup>; 相对电导率 (relative conductivity, REC) 采用 CD400 电导率仪测定, 可溶性糖 (soluble sugar, SS) 含量采用蒽酮比色法测定, 丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量采用硫代巴比妥酸法测定, 脯氨酸 (proline, Pro) 含量采用茚三酮染色法测定, 可溶性蛋白 (soluble protein, SP) 含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定<sup>[10]</sup>。

## 1.3 数据处理

采用 SPSS 19.0 软件进行实验数据处理、ANOVA 单因素 (one-way ANOVA) 方差分析、Duncan 多重比较 ( $\alpha = 0.05$ ) 及作图, 数据用平均值  $\pm$  标准误表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 试验期间土壤含水率变化特征

CK 处理期间土壤含水率稳定, 而干旱处理期间土壤含水率变化很大, 主要表现为随着处理天数的增加而逐渐降低, 尤其是在处理 0~18 d 降低幅度较大, 处理 24~30 d 仍在下降, 但降幅较小, 逐渐趋于平稳; 与 0 d 相比, 处理 30 d 时土壤含水率降低幅度达 83.55% (表 1)。

### 2.2 自然干旱对梭梭叶片水分的影响

RWC 随干旱天数增加而逐渐降低 (图 1), 除 0 d

表 1 土壤含水率变化过程  
Table 1 Changes in soil moisture

组别 Group	试验天数 Number of days experiment conducted/d					
	0	6	12	18	24	30
对照组(CK) Control group	19.68	18.95	19.95	19.49	18.77	19.51
干旱组 Drought group	19.33	15.25	8.04	5.05	3.49	3.18

外, 其他处理天数时干旱组均显著低于 CK 组 ( $P < 0.05$ ); 干旱处理组, 处理 0~30 d RWC 降低幅度约为 26%, 其中处理 0~6 d, RWC 降低趋势较为明显, 处理 12~24 d 变化较为稳定, 30 d 时降至最低, 为 40.37%。自然干旱过程中, 梭梭叶片 RWD 随干旱天数增加而缓慢增大, 除 0 d 外, 其他处理天数时

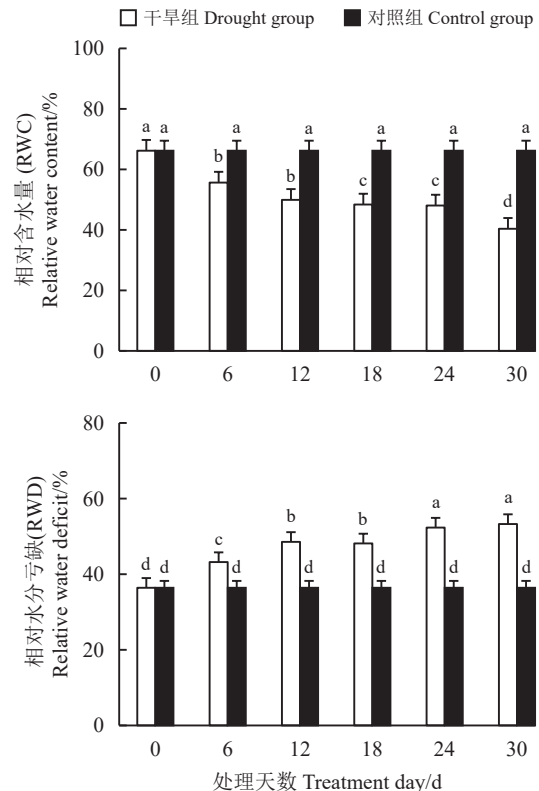


图 1 梭梭叶片相对水分亏缺和相对含水量在自然干旱过程中的变化

Figure 1 Changes in the leaf relative water content and leaf relative water deficit in *Haloxylon ammodendron* during natural drought

不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 下同。

Different letters indicate significant difference at the 0.05 level. This is applicable for the following figures and tables as well.

干旱组均显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3 自然干旱对梭梭幼苗保护酶活性的影响

自然干旱过程中梭梭氧化酶系统变化情况如图 2 所示, 控水初期, CAT 变化较为稳定, 处理 0~12 d 干旱组与 CK 组间均无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 随着土壤水分的持续降低, 处理 18~30 d 干旱组均显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 处理 18 d 时已经上升至较高水平, 说明此时已经对植物细胞造成了损伤; POD 随处理天数增加呈缓慢升高的趋势, 除 0 d 外, 其他处理天数干旱组均显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ );

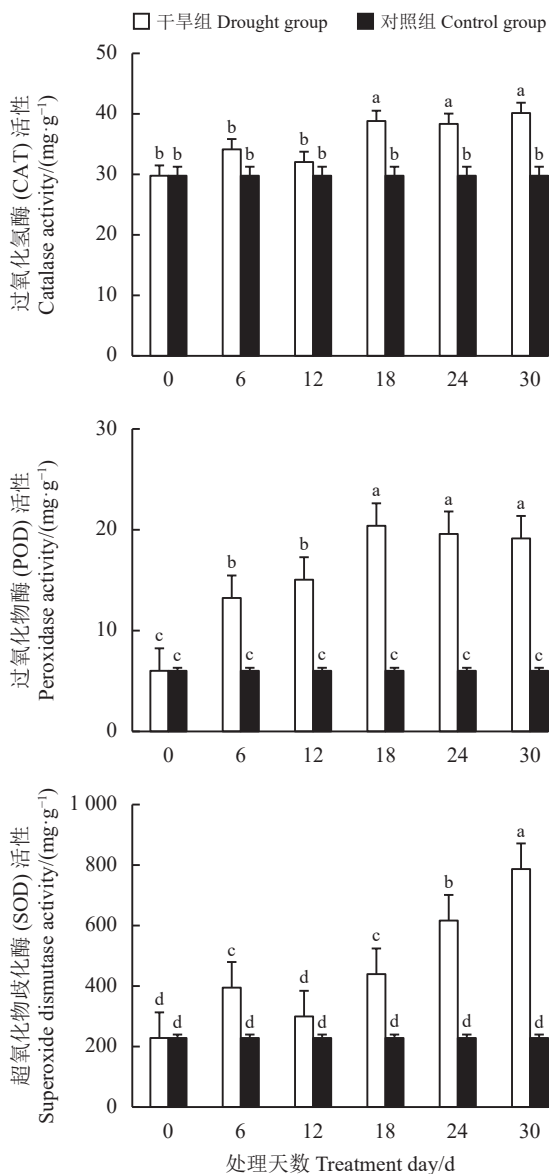


图 2 自然干旱过程中梭梭的抗氧化酶活性变化特征  
Figure 2 Changes in the antioxidant activity of enzymes of *Haloxylon ammodendron* during natural drought

SOD 随处理天数增加而波动式升高, 30 d 时达到峰值, 除 0 d 处理外, 6~30 d 干旱组均显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ )。

### 2.4 对细胞质膜透性和丙二醛含量的影响

梭梭 REC 随干旱天数增加而逐渐升高 (图 3), 30 d 时达到峰值, 处理 6~18 d 变化稳定, 各处理天数间差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 处理 24~30 d 干旱组均显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 30 d 时急剧增大, 说明持续土壤水分降低已对梭梭细胞膜造成很大伤害; MDA 含量对土壤水分变化较为敏感, 自然干旱处理期间梭梭 MDA 含量呈波动式升高趋势, 处理 6 d 时干旱组显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 处理 12 d 时干旱组与 CK 组间差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 这可能是植物体逐渐适应土壤干旱的阶段, 之后随着土壤水分持续降低, 梭梭 MDA 含量迅速升高, 干旱组均显著高于 CK 组 ( $P < 0.05$ ), 说明持续土壤水分降低造成梭梭 MDA 大量积累, 已经对植物细胞造成损伤。

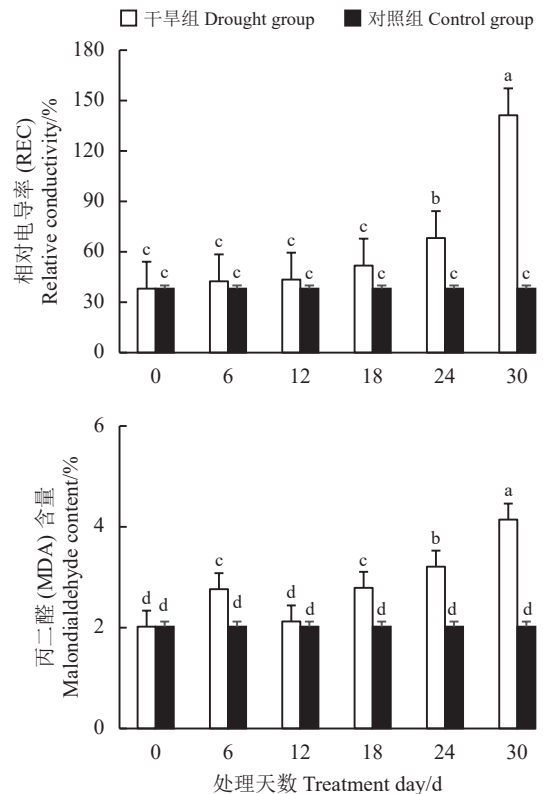


图 3 自然干旱过程中梭梭叶片相对电导率和丙二醛变化特征

Figure 3 Changes in the relative conductivity and malondialdehyde in the leaves of *Haloxylon ammodendron* during drought stress

## 2.5 对细胞渗透调节物质的影响

梭梭 SS 含量随自然干旱处理天数增加而逐渐升高, 12 d 时显著增加, 12~30 d 间均与 CK 组存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 30 d 时达到峰值 (图 4)。自然干旱期间 SP 含量变化趋势较为平缓, 30 d 时急剧增加, 0~24 d 之间以及与 CK 组间均差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 说明植物细胞中 SPC 对土壤干旱的敏感性较差。Pro 含量随干旱天数增加呈先升高后降低的趋势, 24 d 时 Pro 含量达到峰值, 处理 6~30 d 与 CK 组间均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

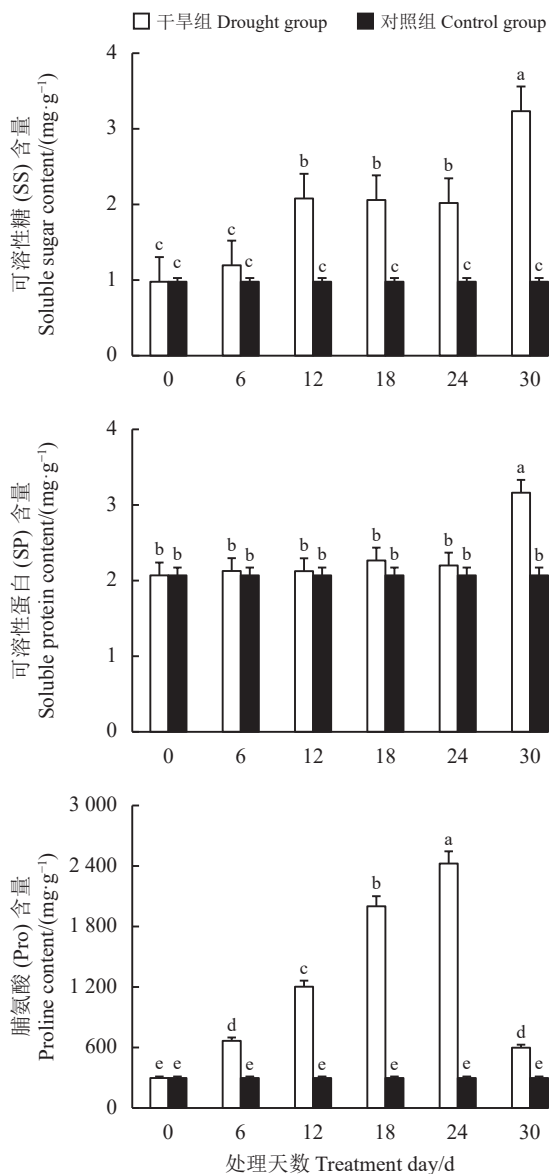


图 4 自然干旱过程中梭梭叶片渗透调节物质变化

Figure 4 Changes in osmotic adjustment substances in the leaves of *Haloxylon ammodendron* during drought stress

## 3 讨论

非生物因素胁迫对植物生长发育产生极大地抑制并显著影响其生理过程, 叶片的水分含量变化是植物在受到胁迫时的最初最直接的体现<sup>[11]</sup>。研究认为, 植物叶片的 RWD 和 RWC 是植物体内生理功能旺盛的重要特征, RWD 和 RWC 的值越大, 说明植物对干旱的适应能力越强<sup>[12]</sup>。本研究中梭梭叶片 RWC 随土壤水分减少而持续降低, 控水 0~24 d 时变化较为稳定, 30 d 时显著降低, 说明干旱处理初期梭梭具有较高的水分利用效率, 在土壤含水率较低的情况下植物体仍然能够调节自身体内的水分平衡。

逆境胁迫下植物体内会产生并积累有伤害性的氧自由基 (reactive oxygen species, ROS), 导致膜脂过氧化, 而 CAT、POD 和 SOD 等抗氧化酶体系具有清除活性氧自由基的作用, SOD 可通过歧化作用清除  $O^{2-}$ , 将其转化为  $H_2O_2$  和  $O_2$ , 减轻植物体的受伤程度<sup>[13]</sup>; 但歧化作用产生的  $H_2O_2$  在植物体内积累之后会形成引起膜脂过氧化的  $\cdot OH$ , 而 CAT 和 POD 均有清除  $H_2O_2$  的能力, POD 对  $H_2O_2$  有较高的亲和力, 具有参与叶绿素的降解并引发膜脂过氧化的作用<sup>[14]</sup>, 以上物质在维持植物体内自由基代谢平衡及提高植物对逆境的耐受力方面至关重要。自然干旱过程中, 梭梭 CAT、SOD 均处于逐渐升高的状态, 说明植物体具有主动进行生理调节以适应干旱胁迫的特点; 干旱处理 30 d 时 CAT、SOD 两种酶含量均达到峰值, 说明此时植物体内这两种酶都具有较高的生理活性, 这充分体现了抗氧化酶活性减轻植物细胞伤害的适应性反应; 干旱处理 18 d 时 POD 达到峰值, 说明土壤水分降低后期 CAT、SOD 发挥了更大的作用, 而 POD 在干旱处理早期发挥的作用较大。

细胞膜是防止细胞外物质自由进入细胞的屏障, 能保证细胞内环境的相对稳定<sup>[15]</sup>, 通过 REC 和 MDA 的变化可了解逆境条件下植物细胞膜的破坏程度及对逆境反应能力的强弱<sup>[16]</sup>。REC 是反映植物细胞膜状况的一个重要生理指标, 植物的膜蛋白在逆境条件下易受损伤, 膜蛋白受损后会引引起胞液外渗, 进而导致电导率增大。本研究中梭梭 REC 随干旱天数增加而缓慢升高, 0~24 d 变化幅度最小, 表明植物 REC 对较高的土壤含水率敏感性较差, 干

早 30 d 时剧烈升高, 此时其细胞膜已经受到了极大的损伤。干旱过程中 MDA 含量总体呈波动式升高趋势, 处理 12 d 时变化幅度较小, 这可能是植物体逐渐适应土壤干旱的阶段, 由于梭梭体内的某些保护酶活性增强, 对其生理机能起到暂时性的调节与修复作用, 从而减小对其细胞膜完整性的破坏, 在土壤干旱过程中表现出较强的耐受性, 处理后 MDA 大量积累, 对植物细胞已造成损伤。

渗透调节也是植物适应干旱环境的一种重要生理机制, 即植物体通过 SS、SP 及 Pro 的积累降低细胞原生质的渗透势, 促使细胞从外界吸收水分, 使植物体保持一定的含水量和膨压, 减轻逆境胁迫对自身的伤害, 增强其抗旱能力<sup>[13, 17]</sup>。本研究中梭梭具有通过渗透调节适应和抵御逆境胁迫的能力, 干旱 0~24 d 时 SS 和 SP 变化较为稳定, 30 d 时大量积累, 说明梭梭体内这两种渗透调节物质对干旱的敏感性较差; 干旱处理 12~18 d 时大量积累, 说明

在抵御干旱逆境时, 梭梭体内 Pro 比 SS 和 SP 发挥着更大的渗透调节作用, 同时也说明 Pro 可能是梭梭应对干旱逆境的主导性渗透调节物质; 这与吴芹等在沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) 和油松 (*Pinus tabulaeformis*)<sup>[8]</sup> 以及黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum*)、柠条 (*Caragana korshinskii*) 和花棒 (*Hedysarum scoparium*) 中<sup>[18]</sup> 的研究结果一致。

#### 4 结论

本研究结果表明在土壤自然干旱过程中, 荒漠植物梭梭的幼苗主要通过叶片累积渗透物质的方式来维持细胞膨压、增加抗氧化酶活性, 进而减轻或延缓细胞膜的伤害, 增强对土壤干旱的适应能力, 保证自身生理代谢活动的正常进行。但在具体的野外造林过程中, 应将造林地的地形地貌特点、土壤盐碱性以及其他生理指标等 (如水分生理、光合作用、光系统 II 荧光参数等) 进行综合考虑。

#### 参考文献 References:

- [1] BAKER N R, ROSENQVIST E. Application of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: An examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(403): 1607-1621.
- [2] CATTIVELLI L, RIZZA F, BADECK F W. Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Research*, 2008, 105(1/2): 1-14.
- [3] 杨司睿, 范井伟, 孙永强, 李从娟, 徐新文, 范敬龙, 王世杰, 张恒, 翟志忠. 罗布泊腹地人工植被梭梭的光学特性及其对干旱胁迫的响应. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 379-386.  
YANG S R, FAN J W, SUN Y Q, LI C J, XU X W, FAN J L, WANG S J, ZHANG H, ZHAI Z Z. Photosynthetic characteristics and response of *Haloxyylon ammodendron* to drought stress in hinterland of the Lop Nur. *Arid Zone Research*, 2018, 35(2): 379-386.
- [4] 苏培玺, 严巧娣. C<sub>4</sub> 荒漠植物梭梭和沙拐枣在不同水分条件下的光合作用特征. *生态学报*, 2006, 26(1): 75-82.  
SU P X, YAN Q D. Photosynthetic characteristics of C<sub>4</sub> desert plants *Haloxyylon ammodendron* and *Calligonum mongolicum* under different water conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(1): 75-82.
- [5] 吉小敏, 宁虎森, 梁继业, 高明月, 李磊. 不同水分条件下梭梭和多花怪柳苗期光合特性及抗旱性比较. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 399-406.  
JI X M, NING H S, LIANG J Y, GAO M Y, LI L. Comparison of photosynthetic characteristics and drought resistance of *Haloxyylon ammodendron* and *Tamarix multiflorum* seedlings under different water conditions. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(2): 399-406.
- [6] 鞠强, 贡璐, 杨金龙, 潘晓玲. 梭梭光合生理生态过程与干旱环境的相互关系. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(4): 201-204.  
JU Q, GONG L, YANG J L, PAN X L. The relationship between the photosynthetic physiological and ecological processes of *Haloxyylon ammodendron* and the drought environment. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(4): 201-204.
- [7] 赵长明, 魏小平, 尉秋实, 邓建明, 程栋梁, 王根轩. 民勤绿洲荒漠过渡带植物白刺和梭梭光合特性. *生态学报*, 2005, 25(8): 1908-1913.  
ZHAO C M, WEI X P, YU Q S, DENG J M, CHENG D L, WANG G X. Photosynthetic characteristics of plant species *Nitraria*

- tangutorum* Bobrov and *Haloxylon ammodendron* in the transitional zone of Minqin oasis and desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1908-1913.
- [8] 吴芹, 张光灿, 裴斌, 方立东. 3个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应. *生态学报*, 2013, 33(12): 3648-3656.  
WU Q, ZHANG G C, PEI B, FANG L D. Physiological and biochemical responses of three tree species to different degrees of soil drought. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(12): 3648-3656.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1999.  
BAO S D. Soil Agrochemical Analysis. Beijing: China Agricultural Publishing House, 1999.
- [10] 李合生. 植物生理学及生物化学实验原理与技术. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
LI H S. Plant Physiology and Experimental Principles and Techniques of Biochemistry. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [11] PALLARDY S G. Physiology of Woody Plants. 3rd ed. New York: Elsevier Inc., 2008.
- [12] 方向文, 李凤民, 张海娜, 蒋志荣. 树锦鸡儿、柠条锦鸡儿、小叶锦鸡儿和鹰嘴豆干旱适应能力比较. *生态学报*, 2011, 31(9): 2437-2443.  
FANG X W, LI F M, ZHANG H N, JIANG Z R. The comparison of drought resistance between *Caragana* species (*Caragana arborescens*, *C. korshinskii*, *C. microphylla*) and two chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(9): 2437-2443.
- [13] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 吴芹, 徐志强, 徐萍. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响. *生态学报*, 2013, 33(5): 1386-1396.  
PEI B, ZHANG G C, ZHANG S Y, WU Q, XU Z Q, XU P. Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1386-1396.
- [14] 董伊晨, 刘悦秋. 土壤水分对异株荨麻 (*Urtica dioica*) 保护酶和渗透调节物质的影响及其与叶片光合和生物量的相关性. *生态学报*, 2009, 29(6): 2845-2851.  
DONG Y C, LIU Y Q. Effects of soil moisture on protective enzymes and osmotic regulators in *Urtica dioica* and their correlation with leaf photosynthesis and biomass. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 2845-2851.
- [15] 张金政, 张起源, 孙国峰, 何卿, 李晓东, 刘洪章. 干旱胁迫及复水对玉簪生长和光合作用的影响. *草业学报*, 2014, 23(1): 167-176.  
ZHANG J Z, ZHANG Q Y, SUN G F, HE Q, LI X D, LIU H Z. Effects of drought stress and re-watering on growth and photosynthesis of *Hosta plantaginea*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(1): 167-176.
- [16] 孙天国, 沙伟, 刘岩. 复合重金属胁迫对两种藓类植物生理特性的影响. *生态学报*, 2010, 30(9): 2332-2339.  
SUN T G, SHA W, LIU Y. Effects of combined heavy metal stress on physiological characteristics of two species of mosses. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9): 2332-2339.
- [17] 谭炯锐, 查同刚, 张泽宇, 张晓霞, 滕红梅, 李成奇, 王玲丽, 赵莉丽, 王奥, 姚紫懿. 利用叶片结构、生理及转录组分析雾冰藜干旱胁迫响应机制. *草业科学*, 2023, 40(11): 2902-2916.  
TAN J R, ZHA T G, ZHANG Z Y, ZHANG X X, TENG H M, LI C Q, WANG L L, ZHAO L L, WANG A, YAO Z Y. Drought stress response of *Bassia dasyphylla* determined by leaf structure, physiology, and transcriptome analyses. *Pratacultural Science*, 2023, 40(11): 2902-2916.
- [18] 丁龙, 赵慧敏, 曾文静, 李晴, 汪洋, 王四清. 五种西北旱区植物对干旱胁迫的生理响应. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1455-1463.  
DING L, ZHAO H M, ZENG W J, LI Q, WANG Y, WANG S Q. Physiological responses of five plants in northwest China arid area under drought stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5): 1455-1463.

(责任编辑 魏晓燕)