



引用格式: 蔡娟, 招礼军, 朱栗琼, 等. 海刀豆幼苗对水分胁迫的生长及生理响应[J]. 西北植物学报, 2024, 44(11): 1682-1691. [CAI J, ZHAO L J, ZHU L Q, et al. Growth and physiological responses of *Canavalia maritima* seedlings to water stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(11): 1682-1691.] DOI: 10.7606/j.issn.1000-4025.20240292

海刀豆幼苗对水分胁迫的生长及生理响应

蔡娟¹, 招礼军^{1*}, 朱栗琼^{1,2}, 金贻¹, 赵元圆¹

(1 广西大学 林学院, 广西森林生态与保育重点实验室, 国家林草局中南速生材繁育重点实验室, 南宁 530004; 2 广西农业职业技术大学, 南宁 530007)

摘要 【目的】探究海刀豆幼苗在水分胁迫下的生长及生理响应特征, 为其幼苗期的水分管理和优质滨海沙地植物的培育提供参考。【方法】以 1 年生海刀豆幼苗为试材, 通过盆栽控水试验模拟干旱(土壤相对含水量 20%、40%、60%)、适宜水分(80%, 对照)和水涝(100%)环境, 分析其生长及生理指标。【结果】在旱涝胁迫下, 海刀豆幼苗叶干重显著降低, 叶相对含水量显著升高; 苗高、叶面积在水涝下显著升高, 在较重于旱下显著降低; 总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径在干旱下升高, 水涝下降低。在旱涝胁迫下, 幼苗叶片丙二醛含量及 CAT 和 POD 活性显著升高, SOD 活性相对稳定, 可溶性蛋白含量减少, 可溶性糖和脯氨酸含量显著升高, 初始荧光显著升高, 最大荧光、最大光化学效率、最大量子产率显著降低; 叶绿素含量均在较重于旱下显著降低。【结论】海刀豆幼苗主要通过改变水分的积累和分配格局提高 CAT、POD 活性以及可溶性糖和脯氨酸含量减轻水分胁迫伤害, 表现出较强抗旱耐涝能力。

关键词 海刀豆; 水分胁迫; 生长; 生理指标

中图分类号 Q945.78 **文献标志码** A

Growth and physiological responses of *Canavalia maritima* seedlings to water stress

CAI Juan¹, ZHAO Lijun^{1*}, ZHU Liqiong^{1,2}, JIN Yun¹, ZHAO Yuanyuan¹

(1 Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Cultivation of Fast-Growing Timber in Central South China, College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2 Guangxi Vocational University of Agriculture, Nanning 530007, China)

Abstract [Objective] The study aims to explore the growth and physiological response of *Canavalia maritima* seedlings to water stress, and provide a reference for water management during the seedling stage and for the cultivation of high-quality plants in coastal sandy lands. [Methods] One-year-old *C. maritima* seedlings were subjected to simulated drought stress (soil relative water content at 20%, 40%, and 60%), suitable water condition (80%, control), and waterlogging (100%) with water control experiment in pots. Their growth and physiological indices were analyzed. [Results] Under both drought and waterlogging stress, leaf dry weight was decreased, while leaf relative water content was increased. Seedling height and leaf area were increased under waterlogging but decreased under severe drought stress. Total root length, total root surface area, total root volume, and mean root diameter were increased under drought

收稿日期: 2024-05-15; 修改稿收到日期: 2024-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(31260093, 31560061); 广西自然科学基金项目(2013GXNSFAA019057)

作者简介: 蔡娟(2001—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: c2529658095@163.com

* 通信作者: 招礼军, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事植物生理生态、森林生态、生态监测、生态修复研究。E-mail: zhlij-70@163.com

stress and decreased under waterlogging. The content of malondialdehyde and the activities of catalase (CAT) and peroxidase (POD) were increased, while the activity of superoxide dismutase (SOD) was relatively stable. Soluble protein content was decreased, whereas soluble sugar and proline contents were increased under water stress. The chlorophyll content was decreased under severe drought stress. Initial fluorescence was increased, while maximum fluorescence, maximum photochemical efficiency, and maximum quantum yield were decreased under water stress. [Conclusion] *C. maritima* seedlings demonstrate strong tolerance to drought and waterlogging stress by altering water accumulation and distribution patterns, increasing the activities of CAT and POD, and enhancing soluble sugar and proline contents.

Key words *Canavalia maritima*; water stress; growth; physiological indicators

水分是植物生长的关键环境因素之一,影响着植物的生长发育和生理代谢^[1]。水分胁迫是指环境中水分不足(干旱胁迫)和水分过多(涝渍胁迫)。其中,涝渍胁迫根据地面积水程度可分为水涝胁迫和水渍胁迫,地面有积水,或淹没植物全部或部分的称为水涝胁迫;土壤中水分含量达到饱和但无积水的称为水渍胁迫^[2]。干旱胁迫不仅会影响植物茎叶和根系的正常生长,还可能会干扰植物抗氧化酶系统运行,刺激渗透调节物质生成,并通过改变叶绿素含量影响光合作用等^[3]。涝渍胁迫会导致植物根系的氧气供应不足,削弱根系活力,抑制光合作用,最终导致叶片黄化,甚至全株死亡^[4]。植物通常通过自我生长生理调节来适应水分胁迫环境,如改变水分的积累和分配格局,增强抗氧化酶活性,提高渗透调节物质含量等^[5-6]。

滨海沙地位于海陆交界区域,生态环境脆弱。其土壤孔隙度大、渗透性强,保水保肥能力较差,并且频繁发生海岸侵蚀现象。这些因素使得生长在此区域的植物容易面临水分胁迫^[7]。海刀豆(*Canavalia maritima*)是豆科(Leguminosae)刀豆属草质藤本植物,在中国东南部至南部的热带海岸广泛分布,常见于海边沙滩上,是典型的滨海沙地植物,容易受到干旱胁迫和水涝胁迫。海刀豆喜光、不耐阴,能耐沙埋、高温、贫瘠和盐碱环境。其藤蔓生长迅速,叶片覆盖广泛,具有绿化、生态修复和缓解海岸侵蚀等功能^[8]。目前,海刀豆的研究主要集中在抗逆生理生化特征^[9]、营养成分^[10]、对热带珊瑚岛环境的生态适应性^[11]、景观应用^[12]、药理药效^[13]等方面,鲜见其对水分胁迫的生长及生理响应的报道。因此,本研究以1年生海刀豆幼苗为试验材料,通过盆栽试验设置5个水分处理组,采用称重法进行控水,测定水分胁迫下海刀豆幼苗的生长及生理指标,分析其变化特征,探讨海刀豆幼苗对水分胁迫的生长及生理响应特征,为海刀豆幼苗期的水分管理和优质滨海沙地植物的培育提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为长势相近(叶片数量为2,平均苗高10 cm)的1年生海刀豆幼苗,由广西红树林研究中心提供。

1.2 试验设计

试验在广西大学林学院遮雨棚内进行。于2021年7月初,将海刀豆幼苗栽植到规格为20 cm×20 cm(口径×高)的塑料花盆中,每盆底部放置塑料托盘,每盆种植1株,盆内装3.5 kg河沙。缓苗1月后,于2021年8月初开始水分处理,设置5个不同土壤相对含水量(土壤实际含水量与田间持水量之比)的处理组,分别为20%(SW₂₀)、40%(SW₄₀)、60%(SW₆₀)、80%(CK)、100%(SW₁₀₀),每组12盆。其中,以土壤相对含水量为80%的处理组作为对照组,低于80%的处理组为干旱胁迫组,高于80%的处理组为水涝胁迫组。每盆隔天18:30进行称重控水,使各处理组的土壤相对含水量维持在设定值。胁迫处理后的第28天,从每个处理中选取6株长势相近的海刀豆幼苗用于测定生长指标;分别于胁迫处理后的第7,14,21,28天,剪取海刀豆幼苗的新鲜叶片于-80℃冰箱中保存,用于测定生理指标。

1.3 测定指标与方法

用毫米刻度尺测定海刀豆幼苗的苗高(从植株基部至主茎顶部的距离)。用扫描仪和ImageJ软件测定叶面积^[14]。首先测定叶鲜重,再将叶片在纯水中浸泡24 h测定叶饱和鲜重,最后将其放置在70℃烘箱中烘48 h测定叶干重;据此计算出叶相对含水量[(叶鲜重-叶干重)/(叶饱和鲜重-叶干重)×100%]^[15]。用根系分析系统(Win-RHIZO 5.0)扫描分析根系样品,测算出总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径。

参照高俊凤^[16]的方法测定海刀豆幼苗叶片的

生理指标,即采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量,紫外分光光度法测定过氧化氢酶(CAT)活性,愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,氮蓝四唑还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白(SP)含量,蒽酮-乙酸乙酯法测定可溶性糖含量(SS),水合茚三酮法测定脯氨酸(Pro)含量。采用乙醇浸提法^[17]测定叶绿素 a 和叶绿素 b 含量,并计算出叶绿素含量以及叶绿素 a/b 值。

在各胁迫阶段,于晴天上午 8:30—10:30 将海刀豆幼苗叶片暗适应 25 min 后,使用 Dual-PAM-100 叶绿素荧光仪(WALZ, Germany)测定初始荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、最大光化学效率(F_v/F_o)、最大量子产率(F_v/F_m)。测定试验各指标时均重复 6 次。

1.4 数据处理

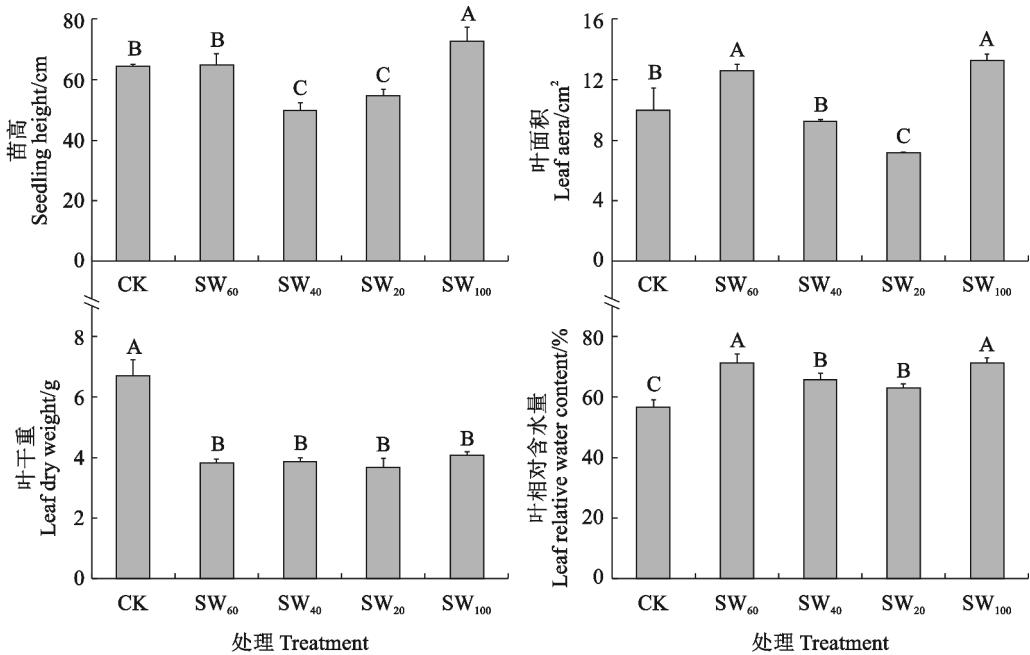
用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件对数据进行处理与统计分析,通过单因素 ANOVA 检验和 LSD 多重比较法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$),并用 Origin 2021 软件作图。图中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 水分胁迫对海刀豆幼苗生长指标的影响

海刀豆幼苗的苗高、叶面积在 SW_{40} 、 SW_{20} 干旱处理下均比对照(CK)显著降低,在 SW_{60} 、 SW_{100} 处理下均高于 CK,并均以 SW_{100} 处理最高, SW_{100} 处理相较于 CK 分别显著增加 12.95%、32.63%;在干旱胁迫和水涝胁迫处理下幼苗叶干重均比 CK 显著降低,而其叶片相对含水量均比 CK 显著升高,其中 SW_{100} 处理叶干重降幅为 39.16%,叶片相对含水量升幅为 26.01%(图 1)。

同时,海刀豆幼苗总根长在 SW_{60} 处理下显著高于 CK,在 SW_{40} 、 SW_{20} 处理下均无显著变化,在 SW_{100} 处理下显著降低;总根表面积、总根体积在 SW_{60} 、 SW_{40} 处理下及根平均直径在 SW_{60} 处理下均显著高于 CK,3 个指标在其余处理下均与 CK 无显著差异。其中,总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径均在 SW_{60} 处理时达到最高值,相较于 CK 分别显著增加 11.84%、84.98%、77.61%、26.92%,除总根体积外均在 SW_{100} 处理时降至最低值(图 2)。



CK、 SW_{20} 、 SW_{40} 、 SW_{60} 、 SW_{100} 分别表示土壤相对含水量 80%、20%、40%、60%、100% 的水分处理;不同大写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 水分胁迫下海刀豆幼苗的生长指标

CK, SW_{20} , SW_{40} , SW_{60} , and SW_{100} represent treatments with 80%, 20%, 40%, 60%, and 100% of soil relative water content, respectively. Different uppercase letters represent significant difference among treatments at 0.05 level ($P<0.05$). The same as below.

Fig. 1 Growth indicators of *C. maritima* seedlings under water stress

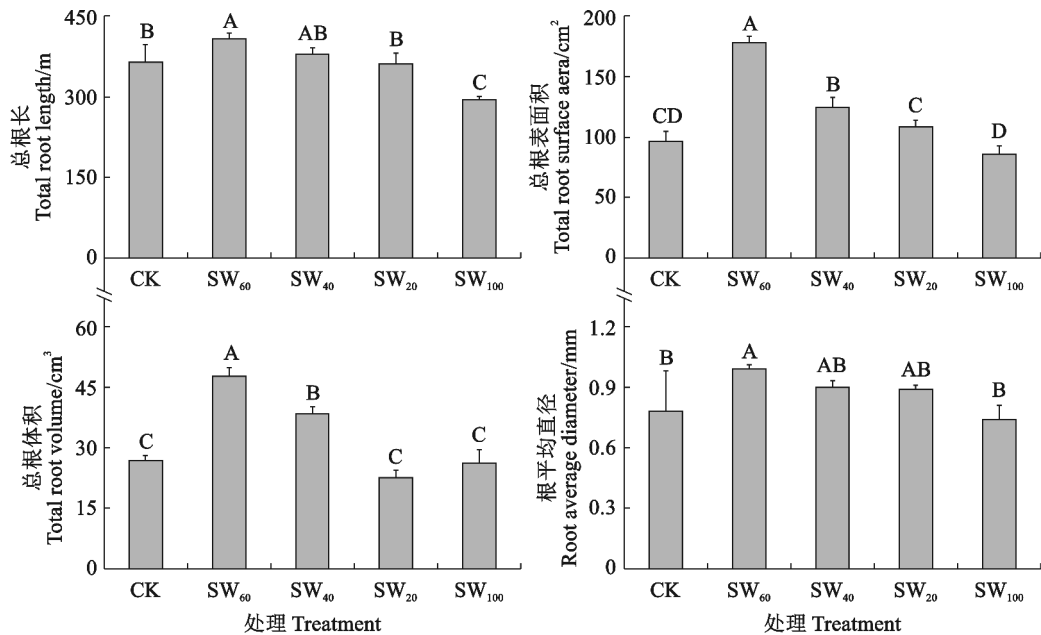


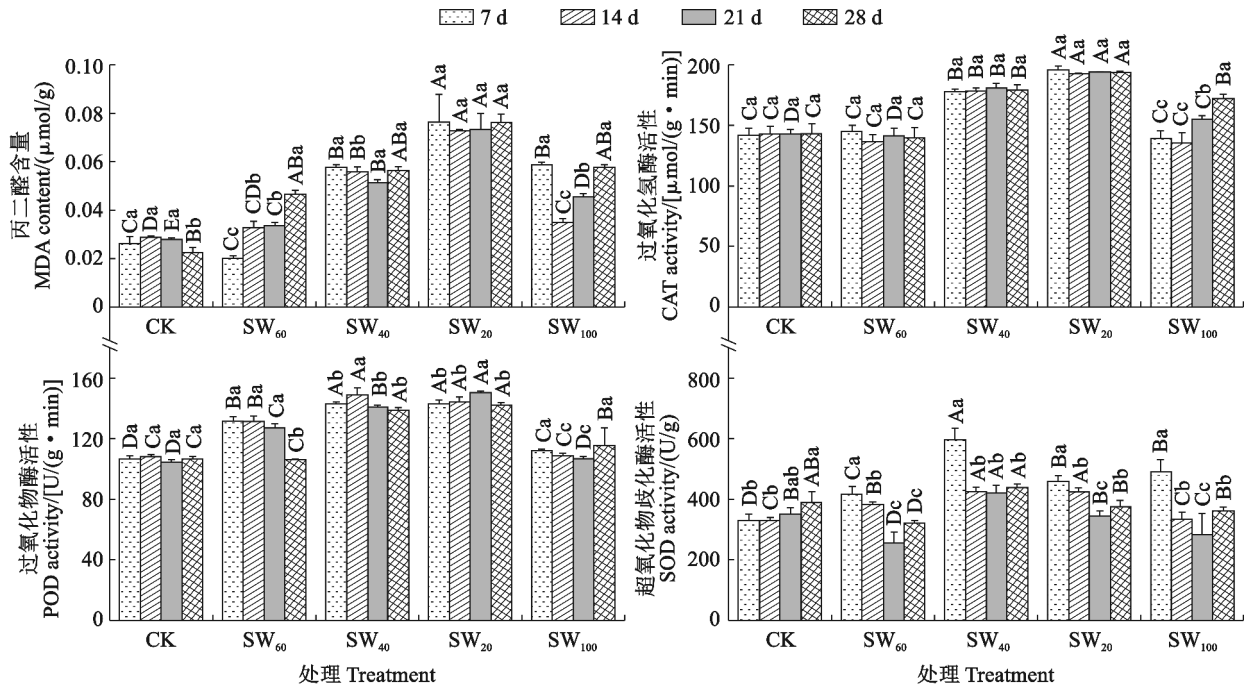
图2 水分胁迫下海刀豆幼苗根系的生长指标

Fig. 2 Growth indicators of *C. maritima* root systems under water stress

2.2 水分胁迫对海刀豆幼苗叶片丙二醛含量和抗氧化酶活性的影响

海刀豆幼苗叶片 MDA 含量和 CAT、POD、SOD 活性在不同水分处理间均存在差异(图 3)。其中,在相同处理时间下,干旱和水涝胁迫幼苗叶片 MDA 含

量大多高于相应 CK,且大多达到显著水平,并有随着干旱胁迫程度增加而升高;在相同水分处理下,各处理叶片 MDA 含量随处理时间的变化趋势不尽相同,SW₂₀ 处理无显著变化,SW₄₀、SW₁₀₀ 处理先降后升,SW₆₀ 处理逐渐升高,CK 组先升后降。



同期不同大写字母表示各处理组间差异显著,同一处理组内不同小写字母表示胁迫期间差异显著($P<0.05$)。下同。

图3 水分胁迫下海刀豆幼苗叶片的丙二醛含量和抗氧化酶活性

Different uppercase letters within same time indicate significant differences among treatment groups at 0.05 level, and different lowercase letters within the same group indicate significant differences among stress time at 0.05 level ($P<0.05$). The same as below.
Fig. 3 The content of MDA and antioxidant enzyme activity in the leaves of *C. maritima* seedlings under water stress

同时,幼苗叶片 CAT 活性在 SW₆₀ 处理下与同期 CK 无显著差异,在各期 SW₄₀ 和 SW₂₀ 处理,以及 SW₁₀₀ 处理 21,28 d 时均显著高于 CK,并均以 SW₂₀ 处理最高,相较于 CK 平均增加了 36.08%;在相同水分处理下,SW₁₀₀ 处理 CAT 活性随处理时间延长而显著提高,而其余水分处理均无显著变化。幼苗叶片 POD 活性在各干旱胁迫处理下多显著高于同期 CK,SW₂₀ 处理相较于 CK 平均显著增加了 36.37%,SW₁₀₀ 处理在 7,28 d 时也显著高于同期 CK;在相同水分处理下,除 CK 外,各水分处理叶片 POD 活性随处理时间延长均发生显著变化,但变化趋势不同。各干旱胁迫处理幼苗 SOD 活性在 7,14 d 时均显著高于 CK,在干旱胁迫 21,28 d 时,SW₄₀ 处理仍高于 CK,SW₂₀ 处理与 CK 相近,SW₆₀ 处理则显著低于 CK,而 SW₁₀₀ 仅处理 7,21 d 时与 CK 差异显著;随胁迫时间延长,CK 组 SOD 活性逐渐增加,且在胁迫 28 d 时增幅显著,其余各处理组 SOD 活性均呈先降后升趋势,且均在胁迫 7 d 时显著高于其余时间。

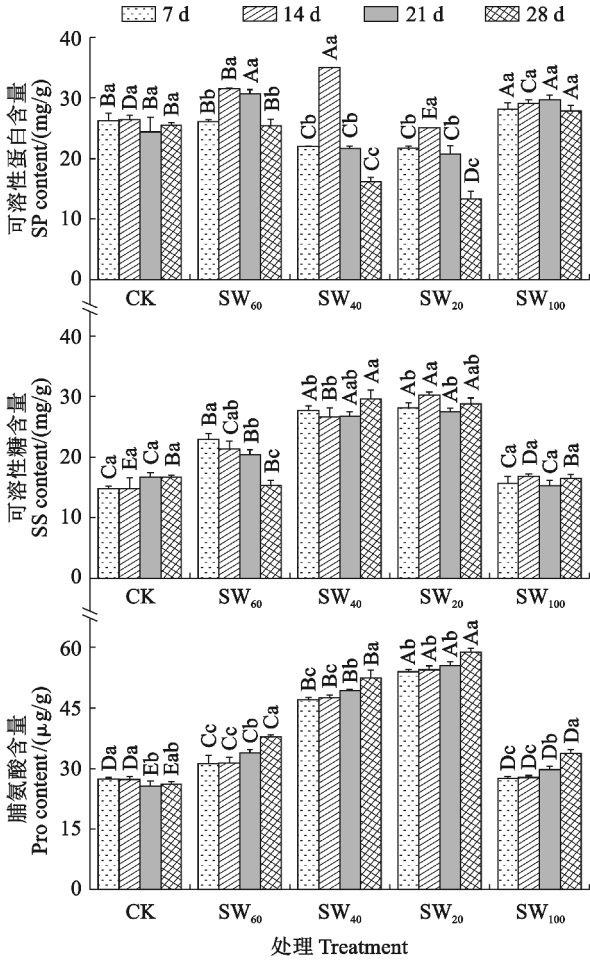


图4 水分胁迫下海刀豆幼苗叶片的渗透调节物质含量
Fig.4 The content of osmotic regulation substances in the leaves of *C. maritima* seedlings under water stress

2.3 水分胁迫对海刀豆幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

海刀豆幼苗叶片的 SP、SS 和 Pro 含量在不同水分处理间均存在显著差异(图 4)。其中,幼苗叶片 SP 含量除 SW₆₀、SW₄₀ 处理个别时间外在干旱胁迫下均低于 CK,并整体上随干旱胁迫强度增加而降低,在 SW₂₀ 时相较于 CK 平均显著降低了 21.05%,而在水涝胁迫下均显著高于同期 CK;在相同水分处理下,SP 含量整体上随着胁迫时间的延长先升高后降低,且多在胁迫 14 d 时达到最高值。幼苗叶片 SS 和 Pro 含量在不同程度干旱胁迫下大多显著高于同期 CK,且随干旱胁迫程度增强而显著增加,均在 SW₂₀ 处理时达到最高值,此时相较于 CK 分别平均增加了 82.1%和 109.6%,水涝处理 SS 含量均与同期 CK 无显著差异,其 Pro 含量也仅在 21 d 和 28 d 显著高于 CK;SS 和 Pro 含量整体上受胁迫时长影响不显著,但同一水分处理下均在胁迫 28 d 时达到最高值。

2.4 水分胁迫对海刀豆幼苗叶片叶绿素含量的影响

在相同处理时间下,各水分处理间海刀豆幼苗叶片叶绿素(a+b)、叶绿素 a 和叶绿素 b 含量多存在显著差异,但在不同时间点表现不尽一致;各叶绿素含量在胁迫 7,14,21 d 时均以 SW₄₀ 处理最高,在 28 d 时以 SW₁₀₀ 处理最高,并多在 SW₂₀ 处理时降至最低值,相较于 CK 分别平均降低了 17.48%、8.7%和 29.6%(图 5)。

其中,与 CK 相比,叶绿素(a+b)含量在 7 d 时,SW₄₀ 处理显著增加,SW₆₀ 处理显著降低,其余处理稍有增加;在 14 d 时,SW₄₀ 处理稍有降低,其余处理均显著降低;在 21 d 时,SW₄₀ 处理显著升高,SW₆₀ 处理稍有增加,SW₂₀ 和 SW₁₀₀ 处理显著降低;在 28 d 时,SW₆₀ 和 SW₁₀₀ 处理显著升高,SW₂₀ 处理稍有增加,SW₄₀ 处理显著降低。

在相同水分处理下,叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素(a+b)含量均在胁迫 14 d 时达到最高值,后均随胁迫时间延长而降低,在 SW₂₀ 和 SW₁₀₀ 处理 28 d 时有所回升,且处理时间之间均存在显著差异。各水分处理间幼苗叶片叶绿素 a/b 在相同处理时间下多存在显著差异,在 7,14,21,28 d 时均以 SW₁₀₀ 处理最高,并显著高于 CK;在相同水分处理下,除 SW₁₀₀ 处理外,其余各处理叶绿素 a/b 值均在 14 d 时降至最低。叶绿素 a/b 值一直保持在 2.0 左右。

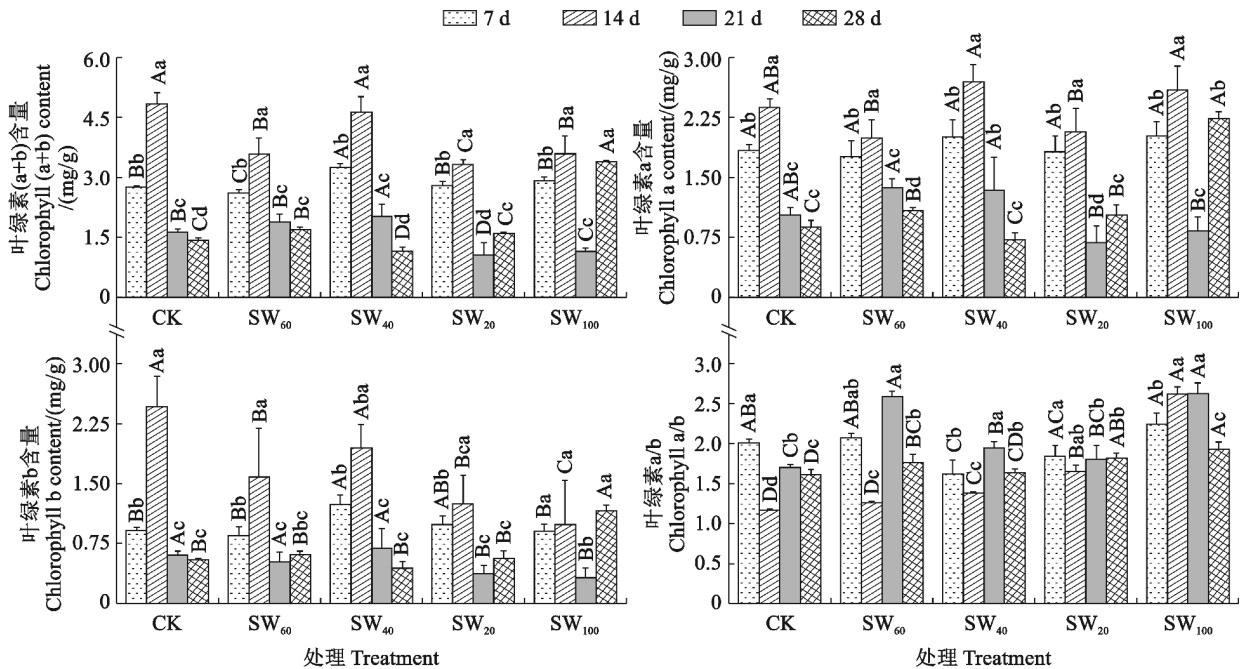


图 5 水分胁迫下海刀豆幼苗叶片的叶绿素含量及其比值

Fig. 5 The chlorophyll content and their ratio in the leaves of *C. maritima* seedlings under water stress

2.5 水分胁迫对海刀豆幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

在不同水分处理下,海刀豆幼苗叶片的初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、最大光化学效率(F_v/F_0)和最大量子产率(F_v/F_m)均存在差异(图 6)。其中, F_0 和 F_m 整体上随土壤相对含水量增加而先升后降,在 SW₄₀ 处理时达到最高值,在 SW₁₀₀ 处理时降至最低值,均与 CK 差异显著。

在胁迫 7, 28 d 时, F_v/F_0 和 F_v/F_m 均在 SW₁₀₀ 处理下达到最高值,但与 CK 无显著差异;在胁迫 14, 21 d 时, F_v/F_0 和 F_v/F_m 均在 SW₄₀ 处理下降至最低值,并显著低于 CK; F_v/F_m 一直保持在 0.75~0.85 之间。在相同水分处理下,海刀豆幼苗叶片 F_0 随处理时间发生显著变化,并呈先升高后降低趋势,而 F_m 、 F_v/F_0 和 F_v/F_m 均呈先降后升的变化趋势。

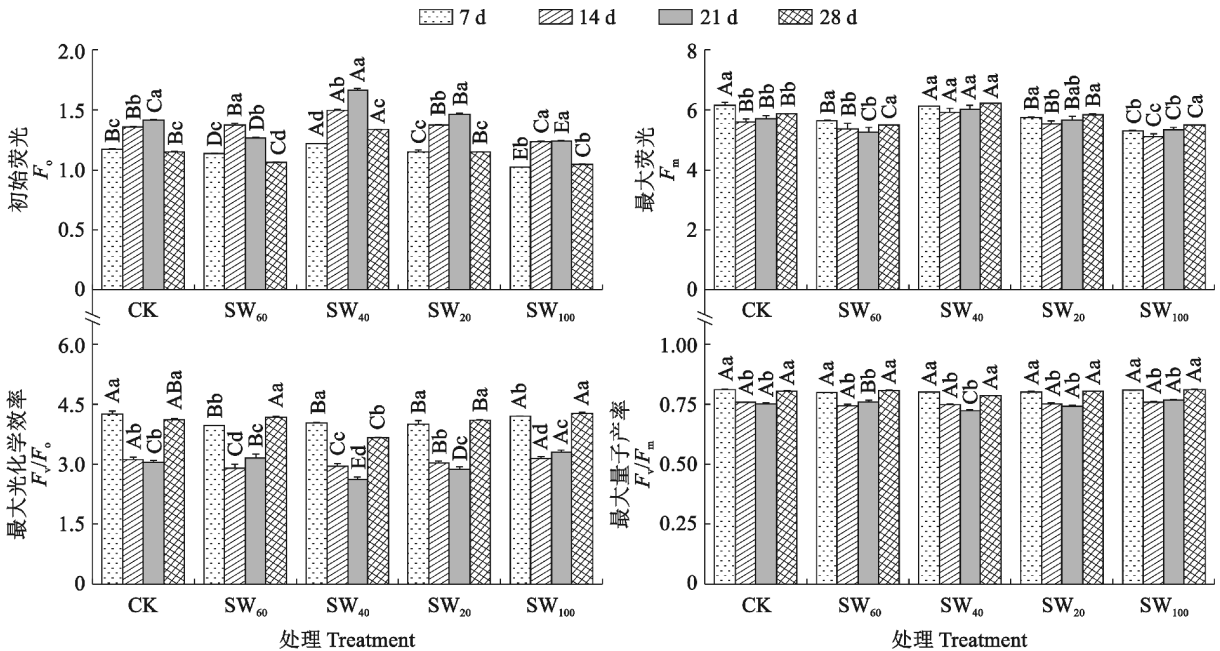


图 6 水分胁迫下海刀豆幼苗叶片的叶绿素荧光参数

Fig. 6 The chlorophyll fluorescence parameters in the leaves of *C. maritima* seedlings under water stress

3 讨论

3.1 海刀豆幼苗对水分胁迫的生长响应

水分胁迫对植物茎叶和根系的生长具有显著影响,而生长指标则是评估植物抗旱能力及耐涝程度的重要依据。霍芸芸等^[18]研究发现,干旱胁迫显著抑制了菊花(*Chrysanthemum morifolium* Ramat.)幼苗茎叶和根系的生长。而在本研究中,SW₆₀ 干旱胁迫处理下海刀豆幼苗的苗高、叶面积、叶相对含水量比对照组(CK)均有所升高,同时其总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径均在 SW₆₀ 时达到最高值并显著高于 CK。根系作为植物吸收水分的主要器官,对土壤水分条件变化的反应尤为敏感。随着土壤相对含水量的减少,植物会优先将有限的水分分配给根系以确保其正常生长。另外,前人研究表明,在水涝胁迫下,紫花苜蓿‘三得利’(*Medicago sativa* L. ‘Sanditi’)^[19] 幼苗的苗高、叶相对含水量均无显著变化,醉马草(*Achnatherum inebrians*)^[20] 的叶面积显著降低,青桐(*Firmiana platanifolia*)^[21] 幼苗的根系生长受到显著抑制。而本研究中,SW₁₀₀ 处理下海刀豆幼苗的苗高、叶面积、叶相对含水量均比 CK 显著升高,但其总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径均低于 CK。这可能是由于在水涝胁迫下,海刀豆幼苗的根系处于缺氧环境中,导致根系活力减弱,从而促使更多的水分运输到地上部分促进茎叶的生长。这些结果说明,海刀豆幼苗在水分胁迫下会通过改变水分的积累和分配格局来减轻胁迫伤害。但在水分胁迫下海刀豆幼苗叶干重均比 CK 显著降低,又说明其自我调节能力具有一定限度。

3.2 海刀豆幼苗对水分胁迫的生理响应

通常情况下,植物体内 ROS 的生成与清除处于动态平衡状态。然而,这种平衡在水分胁迫下会被打破,进而引发细胞膜发生膜脂过氧化反应。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化反应的产物,其含量可以作为衡量植物受水分胁迫伤害程度的标准^[22]。在本研究中,各水分胁迫处理下海刀豆幼苗叶片的 MDA 含量显著升高,并在 SW₂₀ 处理下达到最高值。这表明水分胁迫对海刀豆的细胞膜造成了严重损伤,加剧了膜脂过氧化的程度,这与牛最荣等^[23] 对葡萄(*Vitis vinifera* L.)的相关研究结果一致。

CAT、POD、SOD 是植物保护酶系统中的关键酶,具有清除 ROS、减轻膜脂过氧化反应,并维持细胞膜结构和功能的作用,它们的活性高低能够反映植物的抗逆性强弱^[24]。例如,文冠果(*Xanthoceras*

sorbifolia Bunge) 幼苗叶片 CAT 活性在水分胁迫下显著下降^[25],百日草(*Zinnia elegans* Jacq.) 幼苗叶片的 POD 和 SOD 活性在干旱胁迫下也显著下降^[26]。而本研究中海刀豆幼苗叶片的 CAT、POD、SOD 活性在水分胁迫下均有不同程度增强,其中 CAT 和 POD 活性均在 SW₂₀ 处理下达到最高值,而 SOD 活性相对稳定。说明在水分胁迫下,海刀豆幼苗主要通过增强 CAT 和 POD 活性来清除 ROS,从而减轻膜脂过氧化反应,表现出了较强的抗逆性。

渗透调节是植物抵御水分胁迫的关键机制。在水分胁迫条件下,植物会积累渗透调节物质以降低细胞膜的渗透势,维持细胞膜结构和功能^[27]。渗透调节物质积累量越大,表明植物应对水分胁迫的渗透调节能力越强。常见的渗透调节物质包括可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸。王俊刚等^[28] 研究发现,芦苇(*Phragmites communis*) 在水分胁迫下通过积累大量的可溶性蛋白来降低细胞膜渗透势,维持细胞膜结构和功能。而本研究中海刀豆幼苗叶片的可溶性蛋白含量随土壤相对含水量的减少而下降,在 SW₂₀ 时降至最低值。这可能是由于 ROS 大量积累导致分解代谢大于合成代谢,促使可溶性蛋白大量降解。前人研究发现,裸果木(*Gymnocarpus przewalskii*)^[29] 幼苗中可溶性糖和火龙果(*Hylocereus polyrhizus*)^[30] 幼苗中脯氨酸含量均随土壤相对含水量的减少而先增后减,而本研究中海刀豆幼苗叶片的可溶性糖和脯氨酸含量随土壤相对含水量的减少而显著升高。这表明可溶性糖和脯氨酸在海刀豆幼苗应对水分胁迫的伤害中发挥着关键作用。

另外,在水分胁迫条件下,植物体内的 ROS 含量升高,可导致叶绿素降解,从而减弱植物的光合作用能力。然而,一些抗性和适应性较强的植物叶绿素含量在逆境下反而会增加,比如大麻(*Cannabis sativa* L.)^[31] 和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)^[32]。本研究结果表明,海刀豆幼苗叶片的叶绿素(a+b)、叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均在 SW₂₀ 处理时降至最低值,表明相比于沙生植物海刀豆对水分胁迫的抗性和适应性较差。植物叶绿素 a/b 值波动幅度越小,表明其对逆境的抗性和适应能力越强^[33]。本研究发现,海刀豆幼苗叶片的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量与叶绿素(a+b)含量的变化趋势基本一致,其比值一直保持在 2.0 左右,表明海刀豆在水分胁迫下能够维持较高的光合作用效率,对水分胁迫具有一定的抗性和适应能力,这与黄静等^[9] 的研究结果相吻合。

叶绿素荧光参数是反映植物光合作用效率的关

键指标,尤其是光系统Ⅱ(PSⅡ)的状态和功能。 F_0 表示PSⅡ反应中心完全开放时的最小荧光, F_0 值越大通常代表植物光系统Ⅱ受损越严重^[34]。 F_m 表示PSⅡ反应中心关闭时的最大荧光, F_v/F_0 和 F_v/F_m 分别表示PSⅡ的最大光化学效率和最大量子产率,其值下降则表明植物PSⅡ的光化学效率和健康状况受到逆境影响,其中 F_v/F_m 应保持在0.75~0.85^[35]。本研究结果表明, F_0 在SW₄₀处理时显著升高,说明此时海刀豆幼苗叶片PSⅡ反应中心受损,邓平等^[36]在对青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)幼苗的研究中也得出类似结论。同时,本研究中 F_m 在SW₁₀₀处理下, F_v/F_0 和 F_v/F_m 在SW₄₀处理下均显著低于CK,表明这些水分胁迫处理对海刀豆幼苗PSⅡ均造成了严重损伤,这与于思敏等^[37]对紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)的相关研究结果一致。

参考文献:

[1] 黄小芳,石培礼,余成群,等. 非生物胁迫下牧草抗逆性研究进展[J]. 草地学报, 2023, 31(5): 1293-1301.
HUANG X F, SHI P L, YU C Q, *et al.* A review of abiotic stress resistance of forages[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(5): 1293-1301.

[2] 苏春莉,段姚,顾振瀛,等. 水分胁迫对闽楠幼苗生理及光合特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(6): 85-92.
SU C L, DUAN Y, GU Z Y, *et al.* Effects of water stress on the physiological and photosynthetic characteristics of *Phoebe bournei* seedlings[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(6): 85-92.

[3] 程平,汤东,王凯,等. 天山北坡前山带 12 种植物对干旱胁迫和复水的生理响应及抗旱性评价[J]. 西北植物学报, 2024, 44(5): 691-705.
CHENG P, TANG D, WANG K, *et al.* Physiological responses and drought resistance evaluation of 12 plants to drought stress and rehydration in the northern piedmont of Tianshan Mountains in Xinjiang[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(5): 691-705.

[4] 张晓燕. 涝渍胁迫对白蜡、枫杨和黄连木生长与生理的影响[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 96-100.
ZHANG X Y. Effects of water logging stress on the growth and physiology of *Fraxinus chinensis*, *Pterocarya stenoptera* and *Pistacia chinensis* [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(6): 96-100.

[5] 胡衍平,刘卫东,庞文胜,等. 水分胁迫对山乌柏幼苗生长及生理生化的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(8): 62-72.
HU Y P, LIU W D, PANG W S, *et al.* Effects of water stress on the growth, physiological and biochemical characteristics of *Sapium discolor* seedlings[J]. *Journal of Central South University of*

4 结 论

干旱胁迫和水涝胁迫分别对海刀豆幼苗茎叶和根系的生长产生了明显的抑制作用,其通过改变水分的积累和分配格局来减轻胁迫伤害。在水分胁迫处理下,海刀豆幼苗叶片的MDA含量显著增加,膜脂过氧化作用加剧,叶片主要通过增强CAT和POD活性,增加可溶性糖和脯氨酸含量来减轻伤害。海刀豆幼苗叶片的叶绿素(a+b)、叶绿素a和叶绿素b含量在水分胁迫下均有所减少,但叶绿素a/b值一直保持在2.0左右;同时其叶绿素荧光参数 F_0 在SW₄₀处理下显著升高, F_m 在SW₁₀₀处理下, F_v/F_0 和 F_v/F_m 在SW₄₀处理下均显著降低,但 F_v/F_m 始终维持在0.75~0.85。海刀豆具有较强的抗旱耐涝能力,可作为滨海沙地先锋植物应用于绿化、生态修复和缓解海岸侵蚀工程。

Forestry & Technology, 2023, 43(8): 62-72.

[6] 王丽华,余凌帆,李欣欣,等. 水分胁迫对3个品种油橄榄幼苗生理指标的影响[J]. 经济林研究, 2023, 41(3): 296-302.
WANG L H, YU L F, LI X X, *et al.* Effects of water stress on physiological indexes of three varieties of olive seedlings [J]. *Non-wood Forest Research*, 2023, 41(3): 296-302.

[7] 沈健,何宗明,董强,等. 滨海沙地2种防护林土壤呼吸月际动态及影响因素[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(2): 432-439.
SHEN J, HE Z M, DONG Q, *et al.* Monthly dynamics and influencing factors of soil respiration in two shelter plantations in coastal sandy land[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(2): 432-439.

[8] 王文卿,陈琼. 南方滨海耐盐植物资源(一) [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2013.

[9] 黄静,刘楠,任海,等. 海刀豆的抗逆生理生化特征分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(2): 157-163.
HUANG J, LIU N, REN H, *et al.* Physiology and biochemical characteristics of *Canavalia maritima* under stress[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2019, 27(2): 157-163.

[10] BHAGYA B, SRIDHAR K R, SEENA S, *et al.* Nutritional evaluation of tender pods of *Canavalia maritima* of coastal sand dunes[J]. *Frontiers of Agriculture in China*, 2010, 4(4): 481-488.

[11] 李婕,刘楠,任海,等. 7种植物对热带珊瑚岛环境的生态适应性[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 790-794.
LI J, LIU N, REN H, *et al.* Ecological adaptability of seven plant species to tropical coral island habitat[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(5): 790-794.

[12] 卞阿娜,王文卿,陈琼. 福建滨海地区耐盐园林植物选择与配置构想[J]. 南方农业学报, 2013, 44(7): 1154-1159.
BIAN A N, WANG W Q, CHEN Q. Selection and configuration of salt-tolerant landscaping plant in the coastal areas of Fujian[J].

Journal of Southern Agriculture, 2013, 44(7): 1154-1159.

[13] XU M J, HUANG X P, LI M, *et al.* Cytotoxic and pro-apoptotic activities of medicarpin from *Canavalia maritima* (Aubl.) via the suppression of NF- κ B activation in HeLa cells[J]. *Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences*, 2009, 18(4): 331-336.

[14] 戴志聪, 杜道林, 司春灿, 等. 用扫描仪及 Image J 软件精确测量叶片形态数量特征的方法[J]. 广西植物, 2009, 29(3): 342-347.

DAI Z C, DU D L, SI C C, *et al.* A method to exactly measure the morphological quantity of leaf using scanner and Image J software[J]. *Guihaia*, 2009, 29(3): 342-347.

[15] LIAO T, WANG Y, XU C P, *et al.* Adaptive photosynthetic and physiological responses to drought and rewatering in triploid *Populus* populations[J]. *Photosynthetica*, 2018, 56(2): 578-590.

[16] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 210-217.

[17] 努尔凯麦尔·木拉提, 杨亚杰, 帕尔哈提·阿布都克日木, 等. 小麦叶绿素含量测定方法比较[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(9): 156-159.

Nurkaimar Murat, YANG Y J, Paerhati Abudoukerium, *et al.* Comparative study on determination methods of chlorophyll content in wheat[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(9): 156-159.

[18] 霍芸芸, 罗艳, 杨小英, 等. 外源褪黑素对于干旱胁迫下菊花幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(3): 54-60.

HUO Y Y, LUO Y, YANG X Y, *et al.* Effects of exogenous melatonin on growth and chlorophyll fluorescence characteristics of chrysanthemum seedlings under drought stress[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(3): 54-60.

[19] 周志东, 张煜, 李湘如, 等. 渍水和生物炭对紫花苜蓿幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(4): 1087-1093.

ZHOU Z D, ZHANG Y, LI X R, *et al.* Effects of water logging and biochar addition on the growth and antioxidant enzyme activity of alfalfa seedlings[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(4): 1087-1093.

[20] 蔡沙, 岳永寰, 靳瑰丽. 水分胁迫对醉马草生长的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(11): 2714-2723.

CAI S, YUE Y H, JIN G L. Effects of water stress on the growth of *Achnatherum inebrians*[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2022, 59(11): 2714-2723.

[21] 朱孟一, 傅松玲, 孟然, 等. 青桐幼苗对水分胁迫的生长及生理响应[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(6): 883-888.

ZHU M Y, FU S L, MENG R, *et al.* Growth and photosynthetic characteristics of the seedlings of *Firmiana plataniifolia* under water stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2021, 48(6): 883-888.

[22] KONG W W, LIU F, ZHANG C, *et al.* Non-destructive determination of malondialdehyde (MDA) distribution in oil-seed rape leaves by laboratory scale NIR hyperspectral imaging[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35393.

[23] 牛最荣, 赵霞, 张芮, 等. 水分胁迫对日光温室葡萄叶片生理变化及果实发育的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 265-271.

NIU Z R, ZHAO X, ZHANG R, *et al.* Effects of water stress at different growth stages on leaf physiological changes and fruit development of grape in greenhouse[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(2): 265-271.

[24] 熊仕发, 吴立文, 陈益存, 等. 不同种源白栎幼苗叶片对于干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 3924-3933.

XIONG S F, WU L W, CHEN Y C, *et al.* Response of leaf of *Quercus fabri* seedlings from different provenances to drought stress and drought resistance evaluation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(12): 3924-3933.

[25] 马剑, 刘贤德, 孟好军, 等. 水分胁迫对文冠果幼苗生长及生理特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(1): 128-132.

MA J, LIU X D, MENG H J, *et al.* Effects of water stress on growth and physiological characteristics of seedlings of the *Xanthoceras sorbifolia*[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(1): 128-132.

[26] 齐颖, 罗平, 胡小京. 三唑酮预处理对于干旱胁迫下百日草幼苗生长生理的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(2): 293-300.

QI Y, LUO P, HU X J. Effects of triadimefon pretreatment on the growth and physiology of *Zinnia elegans* seedlings under drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(2): 293-300.

[27] BU C F, WANG C, YANG Y S, *et al.* Physiological responses of artificial moss biocrusts to dehydration-rehydration process and heat stress on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2017, 9(3): 419-431.

[28] 王俊刚, 陈国仓, 张承烈. 水分胁迫对 2 种生态型芦苇的可溶性蛋白含量及 SOD、POD、CAT 活性的影响[J]. 西北植物学报, 2002, 22(3): 561-565.

WANG J G, CHEN G C, ZHANG C L. The effects of water stress on soluble protein content, the activity of SOD, POD and CAT of two ecotypes of reeds (*Phragmites communis*)[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(3): 561-565.

[29] 黄海霞, 杨琦琦, 崔鹏, 等. 裸果木幼苗根系形态和生理特征对水分胁迫的响应[J]. 草业学报, 2021, 30(1): 197-207.

HUANG H X, YANG Q Q, CUI P, *et al.* Changes in morphological and physiological characteristics of *Gymnocarpus przewalskii* roots in response to water stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(1): 197-207.

[30] 李莉婕, 赵泽英, 黎瑞君, 等. 火龙果的抗旱生长及生理响应[J]. 西南农业学报, 2022, 35(6): 1371-1377.

LI L J, ZHAO Z Y, LI R J, *et al.* Growth and physiological response of *Hylocereus polyrhizus* to drought stress[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(6): 1371-1377.

[31] 刘同歌, 苑海鹏, 叶云舒, 等. 干旱胁迫和复水对火麻生理及次生代谢产物含量的影响[J]. 节水灌溉, 2023(12): 41-50.

LIU T G, YUAN H P, YE Y S, *et al.* Effects of drought stress and rewatering on physiology and contents of secondary metabolites of *Cannabis sativa* L. [J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(12): 41-50.

[32] 汤东, 程平, 杨建军, 等. 天山北坡山前植物对于干旱胁迫的生理响应[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1683-1694.

TANG D, CHENG P, YANG J J, *et al.* Physiological responses of plants to drought stress in the northern piedmont, Tianshan Mountains[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(6): 1683-1694.

[33] AREF I, ATTA H E, KHAN P, *et al.* Effect of water stress on relative water and chlorophyll contents of *Juniperus procera* Hochst. Ex Endlicher in Saudi Arabia[J]. *Life Science Journal*, 2014, 10(4): 681-685.

[34] 逯锦春, 王延松, 曹丽娜, 等. 大花银莲花对高温胁迫的生理及荧光特性响应[J]. 草业科学, 2023, 40(7): 1833-1843. LU J C, WANG Y S, CAO L N, *et al.* Physiological and fluorescence characteristics of *Anemone silvestris* in response to high temperature stress[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(7): 1833-1843.

[35] BJÖRKMAN O, DEMMIG B. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins[J]. *Planta*, 1987, 170(4): 489-504.

[36] 邓平, 吴敏, 林丁, 等. 干旱-复水对桂西北喀斯特地区青冈栎幼苗叶片光合能力、叶绿素荧光和显微结构的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(1): 63-76. DENG P, WU M, LIN D, *et al.* Effects of drought-rehydration on photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, and microstructure of *Cyclobalanopsis glauca* seedling leaves in Karst Area of Northwest Guangxi[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(1): 63-76.

[37] 于思敏, 罗永忠, 康芳明, 等. 干旱胁迫对紫花苜蓿生长和叶绿素荧光特性的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(6): 1762-1771. YU S M, LUO Y Z, KANG F M, *et al.* Effects of drought stress on growth and chlorophyll fluorescence characteristics of *Medicago sativa* L. [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(6): 1762-1771.

CSCD-JRC 2023 年植物学期刊引证指标(2024 年版)

序号	刊名	总被引频次	影响因子	H 指数	论文量	分区
1	<i>Molecular Plant</i>	4 521	2.387 5	10	178	Q1
2	植物生态学报	4 363	2.448 8	13	137	Q1
3	西北植物学报	3 027	1.201 7	7	223	Q1
4	植物生理学报	2 024	1.157 9	7	199	Q1
5	<i>Journal of Integrative Plant Biology</i>	1 902	1.955 6	7	177	Q1
6	广西植物	1 320	0.793 3	5	226	Q2
7	植物学报	1 096	1.129 3	6	86	Q1
8	植物研究	803	0.686 4	4	98	Q3
9	植物科学学报	632	0.818 8	5	85	Q2
10	热带亚热带植物学报	614	0.753 9	4	103	Q2
11	<i>Journal of Plant Ecology</i>	582	1.068 6	4	94	Q2
12	中国野生植物资源	579	0.522 3	4	213	Q3
13	植物资源与环境学报	567	1.243 1	4	74	Q1
14	<i>Plant Communications</i>	377	—	—	144	—
15	<i>Plant Diversity</i>	336	1.226 9	6	72	Q1
16	<i>Journal of Molecular Cell Biology</i>	260	0.281 8	3	47	Q4
17	<i>Plant Phenomics</i>	156	1.333 3	—	67	Q1

注:该统计数据以 CSCD 数据库为基础,所有指标统计遵循文献计量学的相关定律及统计方法,这些指标如实反映期刊在学术界的影响力。更详细的期刊所属学科及分区信息请访问 CSCD-JCR 官网(http://sciencechina.cn/scichina2/jcr/search_jcr.jsp)。

(供稿:裴阿卫)