

# 干旱胁迫对苔闽苣苔光合作用和抗氧化酶的影响

潘向东<sup>1</sup>, 万紫云<sup>2</sup>, 刘西<sup>1</sup>, 孟森<sup>3</sup>, 李婷婷<sup>3</sup>, 王磊<sup>2</sup>, 金松恒<sup>2</sup>, 雷祖培<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>浙江乌岩岭国家级自然保护区管理中心, 浙江 温州

<sup>2</sup>浙江农林大学暨阳学院园林学院, 浙江 诸暨

<sup>3</sup>泰顺县林业事业发展中心, 浙江 温州

收稿日期: 2026年5月26日; 录用日期: 2026年6月26日; 发布日期: 2026年7月7日

## 摘要

台闽苣苔是我国特有的珍稀濒危植物, 为了解台闽苣苔栽培中的水分需求问题。以台闽苣苔为试材, 研究干旱胁迫对台闽苣苔气体交换、叶绿素荧光和抗氧化酶的影响。结果表明, 干旱胁迫使台闽苣苔净光合速率(Pn)和气孔导度(Gs)明显下降; 台闽苣苔Fv/Fm、Fv'/Fm'、ΦPSII、qP和ETR在干旱胁迫下也呈持续下降趋势, 表明干旱胁迫下台闽苣苔的开放PSII反应中心部分和PSII反应中心光能转换效率都下降, 从而降低了电子传递能力, 导致Pn的降低。但干旱胁迫后, 台闽苣苔的非光化学猝灭(NPQ)和超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性明显上升, 说明台闽苣苔启动了天线色素的热耗散和抗氧化酶系统, 但这些防御反应可能不足以及时地有效地耗散过剩激发能和清除活性氧物质, 从而使干旱胁迫下台闽苣苔的Pn仍持续下降。

## 关键词

干旱胁迫, 台闽苣苔, 光合作用, 叶绿素荧光, 抗氧化酶

# Effects of Drought Stress on Photosynthesis and Antioxidant Enzymes of *Titanotrichum oldhamii*

Xiangdong Pan<sup>1</sup>, Ziyun Wan<sup>2</sup>, Xi Liu<sup>1</sup>, Sen Meng<sup>3</sup>, Tingting Li<sup>3</sup>, Lei Wang<sup>2</sup>, Songheng Jin<sup>2</sup>, Zupei Lei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Zhejiang Wuyanling National Nature Reserve Management Center, Wenzhou Zhejiang

<sup>2</sup>College of Landscape Architecture, Jiyang College of Zhejiang A&F University, Zhuji Zhejiang

<sup>3</sup>Taishun County Forestry Development Center, Wenzhou Zhejiang

Received: May 26, 2026; accepted: June 26, 2026; published: July 7, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 潘向东, 万紫云, 刘西, 孟森, 李婷婷, 王磊, 金松恒, 雷祖培. 干旱胁迫对苔闽苣苔光合作用和抗氧化酶的影响[J]. 植物学研究, 2026, 15(4): 204-210. DOI: 10.12677/br.2026.154024

## Abstract

*Titanotrichum oldhamii* is a rare and endangered plant unique to China. In order to address the water demand issue in the cultivation of *T. oldhamii*, we used *T. oldhamii* as the test material, the effects of drought stress on gas exchange, chlorophyll fluorescence, and antioxidant enzymes were studied. The results showed that drought stress significantly reduced the net photosynthetic rate (Pn) and stomatal conductance (Gs) of *T. oldhamii*; The Fv/Fm, Fv'/Fm', ΦPSII, qP, and ETR of *T. oldhamii* also showed a continuous downward trend under drought stress, indicating that the open PSII reaction center and PSII reaction center light energy conversion efficiency of *T. oldhamii* decreased under drought stress, thereby reducing its electron transfer ability and leading to a decrease in Pn. However, after drought stress, the non-photochemical quenching (NPQ), superoxide dismutase (SOD) activity, and peroxidase (POD) activity of *T. oldhamii* significantly increased, indicating that *T. oldhamii* has activated the heat dissipation and antioxidant enzyme system of antenna pigments, but these defense reactions may not be sufficient to effectively dissipate excess excitation energy and clear reactive oxygen species in a timely manner, resulting in a continuous decrease in Pn of *T. oldhamii* under drought stress.

## Keywords

Drought Stress, *Titanotrichum oldhamii*, Photosynthesis, Chlorophyll Fluorescence, Antioxidant Enzymes

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

台闽苣苔(*Titanotrichum oldhamii* (Hemsl.) Soler.)隶属于台闽苣苔属(*Titanotrichum*),为苦苣苔科单属单种植物,多年生草本,是我国的特有种,分布范围狭窄,特产于浙江、福建等省份地区,属濒危稀有种[1]。其叶片形状美观,花色鲜艳,可以作为观赏植物开发利用,而且台闽苣苔的全草可药用,有清热解毒,平肝止血之功效,但是对其光合作用对干旱适应性、耐旱临界点以及干旱胁迫下生理变化的研究却较少报道[2]。但目前台闽苣苔在野外分布稀少,所以迫切需要对台闽苣苔进行基础性研究并提出保护对策,开展人工繁殖和栽培是当前开发利用的重点工作之一。水分条件是严重限制台闽苣苔人工繁殖和栽培的重要因素。在当前气候变化背景下,极端高温和常与干旱同步出现,植物生长发育面临干旱胁迫的严峻挑战。干旱胁迫不仅造成植物细胞失水,还会通过改变渗透势、破坏膜系统稳定性、限制气孔开放、扰乱叶绿体电子传递以及诱导活性氧过量积累等一系列过程,持续影响植物的生长、产量、观赏品质及生态适应[3]。光合作用是植物物质生产和能量转化的核心过程,也是干旱胁迫下最敏感的生理过程之一。所以,本实验研究干旱胁迫对台闽苣苔气体交换、叶绿素荧光和抗氧化酶的影响,进而掌握干旱胁迫对台闽苣苔生长产生的影响,为台闽苣苔的人工繁殖和栽培提供理论依据和实践指导。

## 2. 材料与方

### 2.1. 试验材料与处理

台闽苣苔取自浙江省泰顺县乌岩岭自然保护区,选择1年生生长良好、无病虫害的幼苗为试验材料,

栽于 21.5 cm × 19.5 cm × 14.5 cm 的营养钵中, 栽培基质采用泥炭:蛭石:珍珠岩 = 1:1:1。放置于浙江农林大学暨阳学院(N 29°44'51", E 120°15'17")温室里进行缓苗, 缓苗期间保持土壤相对含水量在 75%以上, 时间持续 1 个月左右。选用长势基本一致, 生长健壮, 无病虫害的台闽苧苔作为本实验材料, 试验处理前一天对所有的植株进行浇水, 使基质处于饱和含水状态。干旱处理的植株不浇水, 处理期间, 每隔 4 天测定叶片含水量和生理指标, 测定重复 3 次。

## 2.2. 叶片相对含水量测定

叶片相对含水量采用常规鲜重 - 饱和重 - 干重法测定。在不同时间点取功能叶, 晾干表面水分后马上称取其鲜重; 然后把叶片放在蒸馏水中吸水直至饱和, 再称其饱和鲜重; 之后在 105℃ 下烘干到一定重量, 得到其干重。用鲜重、饱和鲜重以及干重来推算叶片相对含水量反映植物在整个干旱过程中失水情况以及组织保水能力。

## 2.3. 气体交换和叶绿素荧光参数测定

气体交换参数利用 LI-6800 便携式光合测定系统(LI-COR, Lincoln, USA)配备的荧光叶室(6800-01A)对成熟的顶端第二叶位叶片进行光合指标的测定。光合有效辐射(PAR)为 1000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 叶室温度为 25℃,  $\text{CO}_2$  浓度为 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、气体流速为 500  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其中, 叶片气体交换参数包括净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和胞间  $\text{CO}_2$  浓度(Ci)。叶绿素荧光参数是在叶片暗适应 30 min 后测定, PSII 的最大光化学活性(Fv/Fm)、开放 PSII 反应中心激发能捕获效率 Fv'/Fm'、光化学猝灭 qP、非光化学猝灭 NPQ、PSII 的实际量子产额( $\Phi\text{PSII}$ )、电子传递速率(ETR)的计算参考李雪芹等的方法[4]。

## 2.4. 抗氧化酶活性测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性采用试剂盒(江苏科铭生物技术有限公司)测定, 操作参照试剂盒说明书进行。

# 3. 结果与分析

## 3.1. 叶片相对含水量的变化

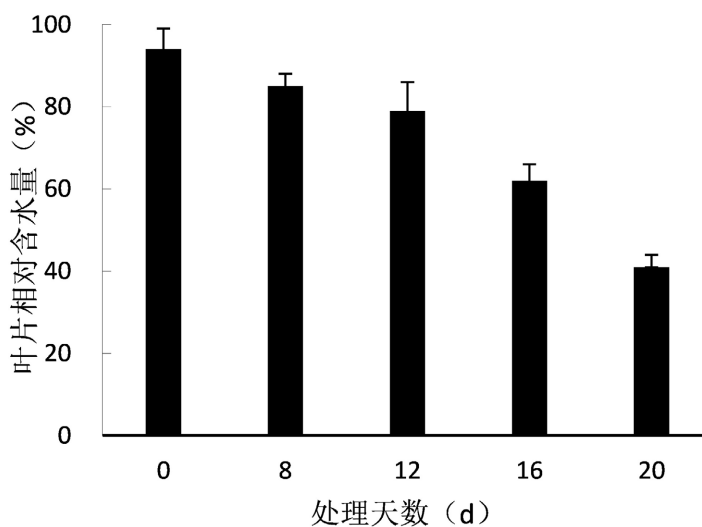
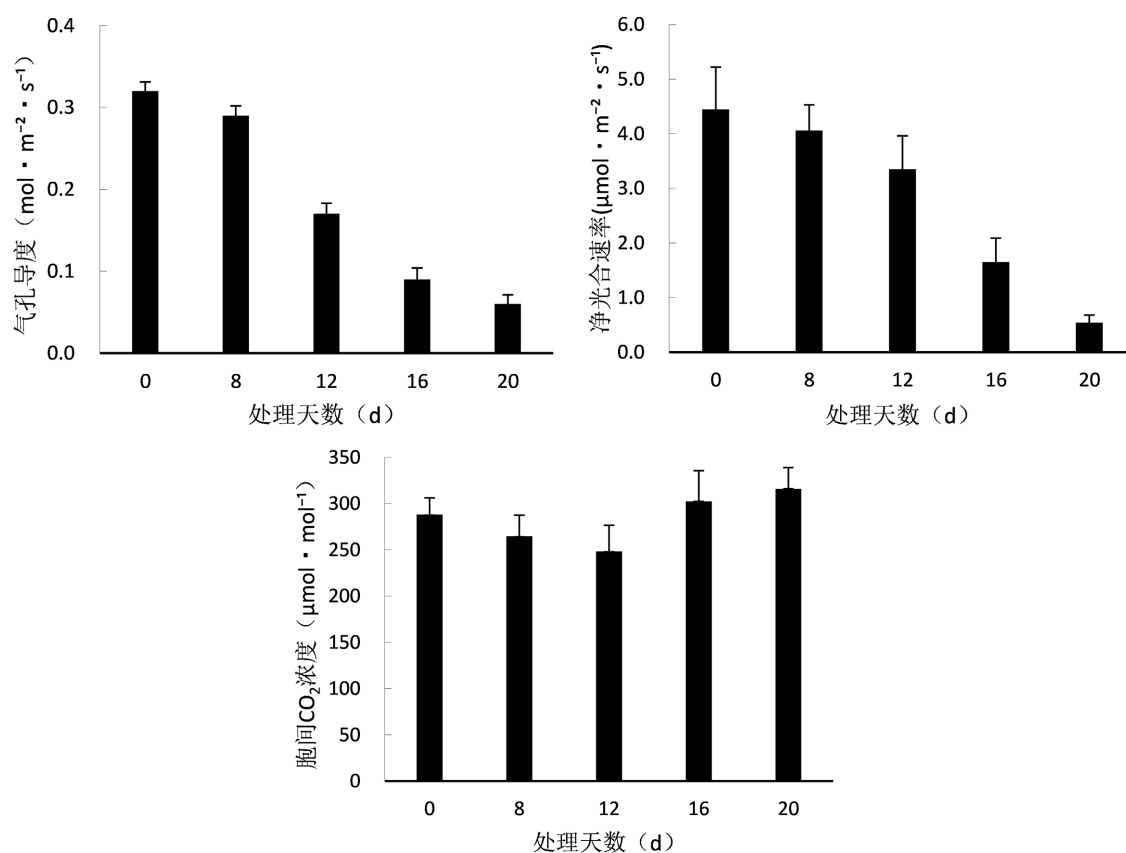


Figure 1. Changes in relative water content of leaves of *T. oldhamii* under drought stress  
图 1. 干旱胁迫下台闽苧苔叶片相对含水量变化

如图 1 所示, 在干旱胁迫下台闽苣苔叶片相对含水量随着干旱处理时间的延长呈下降的趋势。在 12 天前变化缓慢, 16 天以后下降速度加快, 处理 8 天仅比对照(0 天)下降 3%, 12 天下降了 14%, 干旱 20 天下降了 44%。

### 3.2. 气体交换参数的变化

如图 2 所示, 台闽苣苔的  $P_n$ 、 $G_s$  均随着干旱处理时间的延长呈下降的趋势。在干旱胁迫 8 天内, 台闽苣苔  $P_n$  略有下降, 在胁迫 16 天后  $P_n$  下降迅速, 第 8 天的  $P_n$  只比对照(0 天)下降了 2.70%, 第 20 天则下降了 82.42%。干旱胁迫 8 天前, 无柄小叶榕  $G_s$  与对照(0 天)的数值相比下降了 9.37%, 随着干旱胁迫的持续, 气孔导度有明显的下降趋势, 12 天时的  $G_s$  比 0 天下降了 46.87%, 20 天时的  $G_s$  比 0 天下降了 81.25%。随着干旱胁迫的持续, 台闽苣苔的  $C_i$  开始呈下降的趋势, 后又逐渐上升。

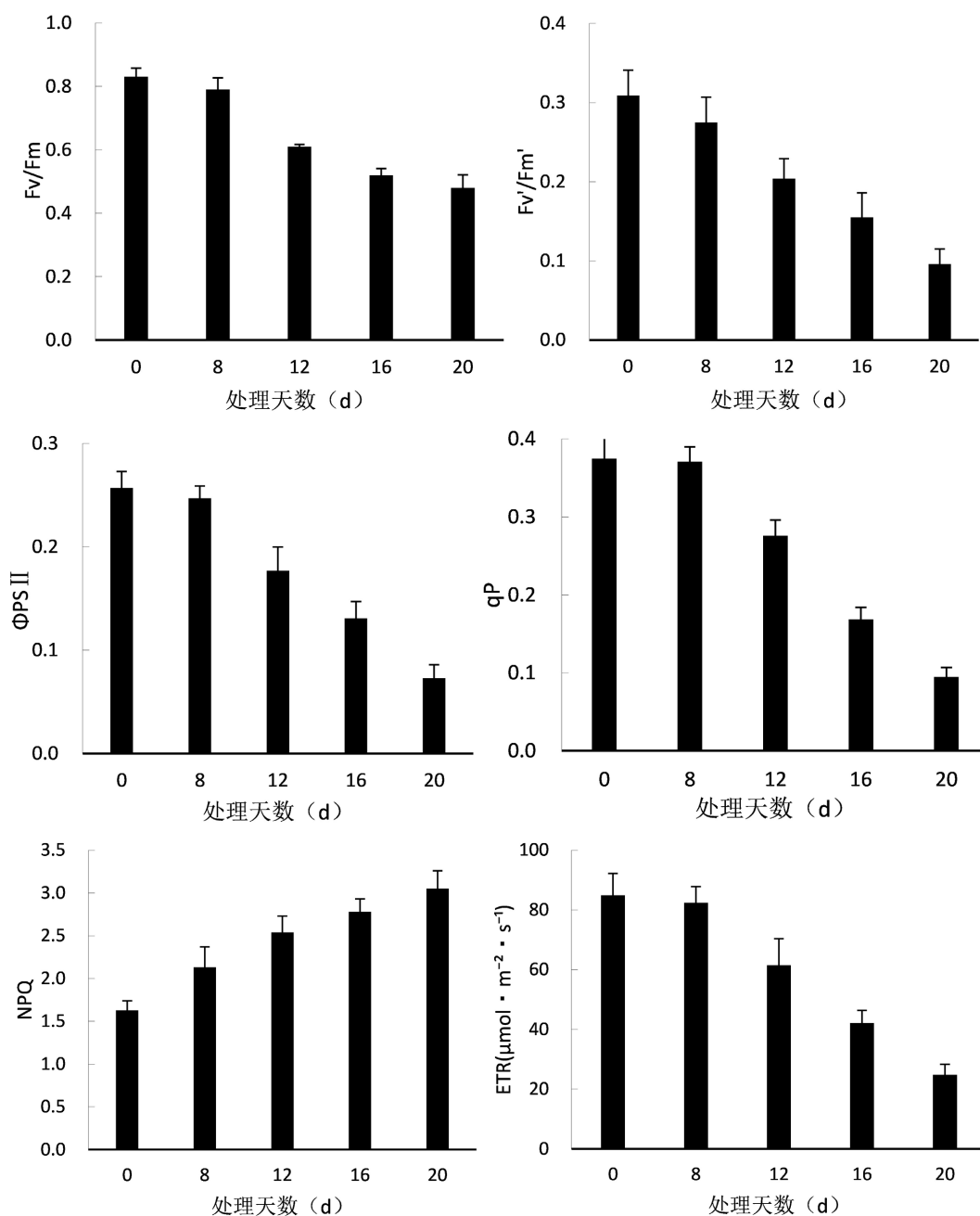


**Figure 2.** Changes in net photosynthetic rate, stomatal conductance, and intercellular  $\text{CO}_2$  concentration of *T. oldhamii* under drought stress

**图 2.** 干旱胁迫下台闽苣苔净光合速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度的变化

### 3.3. 叶绿素荧光参数的变化

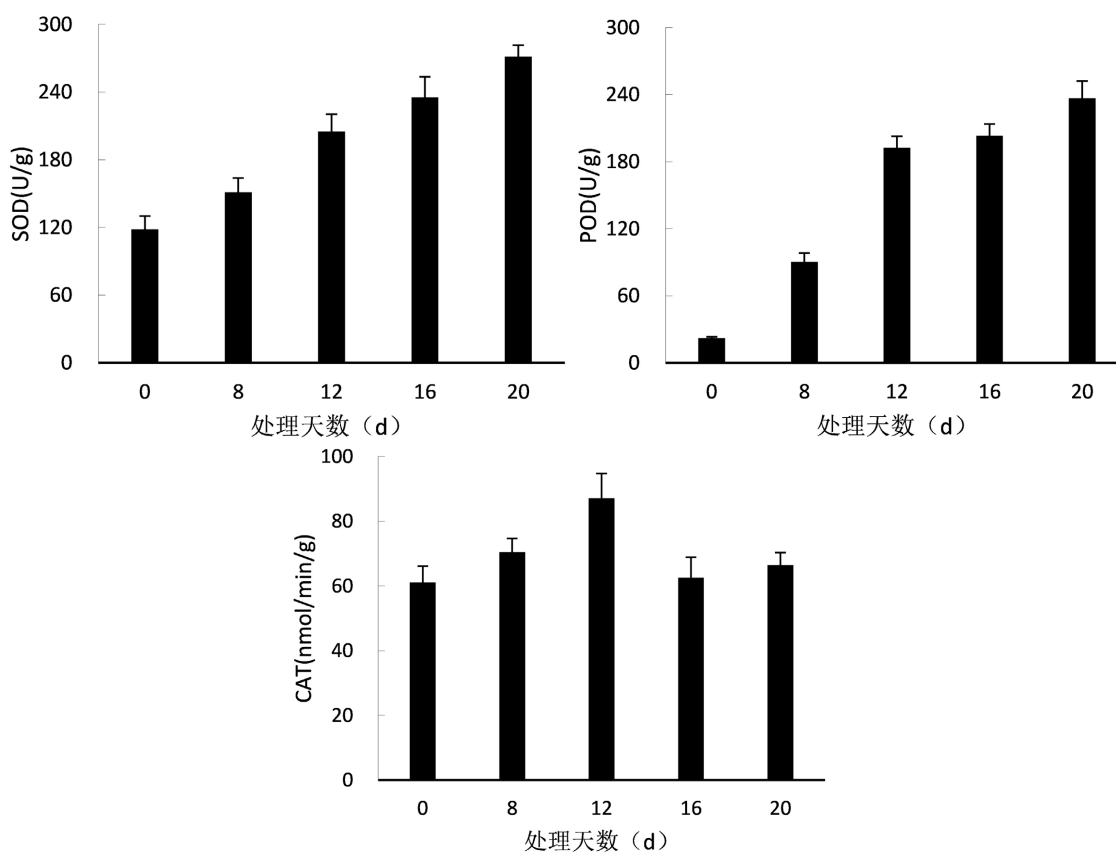
如图 3 所示, 台闽苣苔的  $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、 $\Phi\text{PSII}$ 、 $qP$  和  $\text{ETR}$  都随着干旱胁迫呈下降趋势。在干旱处理 0~8 天之间  $F_v/F_m$  略微下降, 处理 12 天后开始明显下降, 处理 16 天时  $F_v/F_m$  比 0 天下降了 37.35%。 $F_v'/F_m'$  下降趋势和  $F_v/F_m$  类似, 在 8 天时略有下降, 12 天后迅速下降。干旱胁迫下,  $\Phi\text{PSII}$ 、 $qP$  和  $\text{ETR}$  的变化趋势基本相同, 在处理前 8 天没有明显变化, 12 天后迅速下降。但  $\text{NPQ}$  是呈逐步上升的趋势, 在处理 8 天后上升了 30.67%, 在处理 20 天之间达到最大值, 比 0 天上升了 87.12%。



**Figure 3.** Changes in chlorophyll fluorescence parameters of *T. oldhamii* under drought stress  
**图3.** 干旱胁迫下台闽苕苔叶绿素荧光参数的变化

### 3.4. 抗氧化酶活性的变化

如图4所示, 台闽苕苔 SOD 活性随着干旱处理时间的延长呈逐步上升的趋势, 处理第8天时, SOD 活性比0天的上升了27.73%, 第20天 SOD 活性比0天的上升了129.10%。POD 活性的变化趋势与 SOD 一致, 随胁迫时间延长持续升高, 处理第20天时, POD 活性是第0天的10.77倍。CAT 活性则呈现“先升后降”的单峰变化特征, 处理第12天时, CAT 活性比第0天的增加了42.54%, 此后 CAT 活性逐渐回落, 处理第20天时, CAT 活性只比第0天的增加了8.78%。



**Figure 4.** Changes in antioxidant enzyme activity of *T. oldhamii* under drought stress  
**图 4.** 干旱胁迫下台闽苜蓿抗氧化酶活性的变化

#### 4. 结论与讨论

在干旱胁迫下, 台闽苜蓿的  $P_n$  与  $G_s$  呈持续下降趋势, 而  $C_i$  则是先下降后回升, 这一结果表明台闽苜蓿在失水初期首先通过气孔关闭减少水分流失, 导致  $P_n$  下降。但当叶片含水量持续下降时, 气孔因素并不是引起  $P_n$  下降的主要原因, 非气孔限制增强, 因而  $C_i$  逐渐升高[5]。

为了进一步明确干旱胁迫下台闽苜蓿  $P_n$  下降的主要原因, 我们分析了叶绿素荧光参数的变化。台闽苜蓿  $F_v/F_m$ 、 $F_v'/F_m'$ 、 $\Phi PSII$ 、 $qP$  和  $ETR$  在干旱胁迫下均呈持续下降趋势, 表明干旱胁迫下台闽苜蓿的开放  $PSII$  反应中心部分和  $PSII$  反应中心光能转换效率都下降, 从而降低了电子传递能力, 导致用于  $CO_2$  同化的光能减少[6]。

干旱胁迫会导致植物细胞活性氧(ROS)的形成, 从而对膜、脂质、蛋白质、核酸造成氧化损伤[7]。植物会产生各种机制来保护其受到逆境胁迫影响, 包括消耗多余的能量、避免水分流失、保护细胞成分和清除有毒物质等[7] [8]。在本研究中, 台闽苜蓿  $NPQ$  随干旱胁迫持续升高, 说明叶片通过增强热耗散主动消纳过剩激发能。这种“光化学利用下降-热耗散上升”的组合, 是植物应对干旱和光抑制的常见策略[9] [10]。 $NPQ$  的明显上升, 有助于耗散过剩的激发能, 有效地保护光合机构, 防止高温胁迫对光合结构的影响。另外, 台闽苜蓿的  $SOD$  和  $POD$  活性也随干旱胁迫持续升高,  $CAT$  活性则是先升高后降低, 说明台闽苜蓿的抗氧化系统有很强的诱导潜力, 即当水分亏缺、光系统压力加剧时, 植株能主动提高有关酶的活性以清除活性氧, 从而抑制膜脂过氧化及蛋白质氧化损伤的扩大[11]-[13]。但干旱胁迫下  $CAT$  清除活性氧的能力低于  $SOD$  和  $POD$ ,  $CAT$  在 12 天时最大, 说明此时  $CAT$  清除 ROS 的能力开始下降。

因此干旱胁迫 12 天后, 尽管 NPQ 持续升高, SOD 和 POD 活性也明显升高, 但此时数据表明防御系统的能力可能已达上限, 这些防御反应可能难以消耗多余能量, 最终导致 PSII 损伤积累, Pn 出现明显下降。

## 基金项目

2025 年中央林业草原生态保护恢复资金(珍稀濒危植物台闽苣苔抢救保护, 泰财建[2025] 84 号)。

## 参考文献

- [1] 严彩霞, 马凯, 徐步青. 我国苦苣苔科植物研究进展[J]. 中国园艺文摘, 2013, 29(6): 64-66, 117.
- [2] Takagi, H., Sugawara, S., Saito, T., Tasaki, H., Yuanxue, L., Kaiyun, G., *et al.* (2011) Plant Regeneration via Direct and Indirect Adventitious Shoot Formation and Chromosome-Doubled Somaclonal Variation in *Titanotrichum oldhamii* (Hemsl.) Solereder. *Plant Biotechnology Reports*, **5**, 187-195. <https://doi.org/10.1007/s11816-011-0172-5>
- [3] Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D. and Basra, S.M.A. (2009) Plant Drought Stress: Effects, Mechanisms and Management. *Agronomy for Sustainable Development*, **29**, 185-212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>
- [4] 李雪芹, 金松恒. 干旱胁迫对假俭草气体交换和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(8): 170-174.
- [5] Flexas, J. and Medrano, H. (2002) Drought-Inhibition of Photosynthesis in C3 Plants: Stomatal and Non-Stomatal Limitations Revisited. *Annals of Botany*, **89**, 183-189. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf027>
- [6] Li, J.H., *et al.* (2017) Influence of Drought Stress on Photosynthetic Characteristics and Protective Enzymes of Potato at Seedling Stage. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, **16**, 82-88.
- [7] Gill, S.S. and Tuteja, N. (2010) Reactive Oxygen Species and Antioxidant Machinery in Abiotic Stress Tolerance in Crop Plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, **48**, 909-930. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.08.016>
- [8] Chaves, M.M., Flexas, J. and Pinheiro, C. (2009) Photosynthesis under Drought and Salt Stress: Regulation Mechanisms from Whole Plant to Cell. *Annals of Botany*, **103**, 551-560. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>
- [9] Mittler, R. (2002) Oxidative Stress, Antioxidants and Stress Tolerance. *Trends in Plant Science*, **7**, 405-410. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(02)02312-9)
- [10] Li, N., Geng, Z., Huang, X., Huang, S., Song, L., Chen, R., *et al.* (2025) A Review of Differential Plant Responses to Drought, Heat, and Combined Drought + Heat Stress. *Current Issues in Molecular Biology*, **47**, 975. <https://doi.org/10.3390/cimb47120975>
- [11] Foyer, C.H. and Noctor, G. (2005) Oxidant and Antioxidant Signalling in Plants: A Re-Evaluation of the Concept of Oxidative Stress in a Physiological Context. *Plant, Cell & Environment*, **28**, 1056-1071. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01327.x>
- [12] Bashir, S.S., Hussain, A., Hussain, S.J., Wani, O.A., Zahid Nabi, S., Dar, N.A., *et al.* (2021) Plant Drought Stress Tolerance: Understanding Its Physiological, Biochemical and Molecular Mechanisms. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, **35**, 1912-1925. <https://doi.org/10.1080/13102818.2021.2020161>
- [13] Zahra, N., Hafeez, M.B., Kausar, A., Al Zeidi, M., Asekova, S., Siddique, K.H.M., *et al.* (2023) Plant Photosynthetic Responses under Drought Stress: Effects and Management. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **209**, 651-672. <https://doi.org/10.1111/jac.12652>