

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.014

引用格式:张浩浩,张永强,蒋昂辰,等.干旱胁迫下伊犁绢蒿幼苗根系的构型、生理与解剖结构响应研究[J].草地学报,2026,34(4):1288—1301

ZHANG Hao-hao, ZHANG Yong-qiang, JIANG Ang-chen, et al. Research on the Response of Root System Configuration, Physiology and Anatomical Structure of *Seriphidium transiliense* Seedlings under Drought Stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1288—1301

干旱胁迫下伊犁绢蒿幼苗根系的构型、生理与解剖结构响应研究

张浩浩,张永强,蒋昂辰,陈爱萍*

(新疆农业大学草业学院/西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室/新疆草地资源与生态实验室,新疆乌鲁木齐 830000)

摘要:本研究以伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)幼苗为研究对象,通过持续干旱胁迫盆栽实验,系统探究了根系形态构型、生理响应及解剖结构的动态变化规律。结果表明:随着干旱胁迫强度的增加,根系形态拓扑指数和分形维数逐渐降低,根系分支模式向更高效的叉状结构转变。随着干旱胁迫增强,生理代谢层面,活性氧积累、膜脂过氧化程度及渗透调节能力显著增强,抗氧化酶活性呈现先升高后降低的趋势。解剖结构分析显示,根尖的表皮和内皮层细胞增厚以增强保水能力,而皮层薄壁组织、维管系统及根尖直径均呈现减小趋势,以优化水分运输效率。本研究揭示了伊犁绢蒿通过整合根系构型可塑性、生理调控及解剖结构优化的适应策略,为荒漠植物抗旱机制研究提供了科学依据,同时为干旱区生态恢复及抗逆种质选育提供了重要参考。

关键词:伊犁绢蒿;干旱胁迫;根系构型;生理特性;根尖解剖结构

中图分类号:Q945.78

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1288-14

Research on the Response of Root System Configuration, Physiology and Anatomical Structure of *Seriphidium transiliense* Seedlings under Drought Stress

ZHANG Hao-hao, ZHANG Yong-qiang, JIANG Ang-chen, CHEN Ai-ping*

(College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Key Laboratory for Western Arid Region Grassland Resources and Ecology, Ministry of Education, Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: In this study, we used *S. transiliense* seedlings as a research object and conducted a pot experiment with continuous drought stress to systematically investigate the dynamic changes in root system morphology, physiological response and anatomical structure. The results showed that with the increase of drought stress intensity, root system morphology changed significantly, with a decrease in topological index and fractal dimension, and a shift in root branching patterns towards a more efficient “dendritic” structure. At the physiological level, there was a significant accumulation of reactive oxygen species (ROS), increase in membrane lipid peroxidation and enhanced ability to regulate osmosis. Antioxidant enzyme activity showed a trend of increasing first and then decreasing. The anatomical structure analysis revealed that the root tip epidermal and endodermal cells thickened to enhance water-holding capacity, while the cortical parenchyma, vascular system and root tip diameter all showed a decreasing trend to optimize water transport efficiency. This study revealed the adaptive strategy of *S. transiliense* by integrating root system configuration plasticity, physiological regulation, and anatomical structure optimization, providing a scientific basis for studying the drought resistance mechanisms of

收稿日期:2025-04-24;修回日期:2025-07-25

基金项目:伊犁绢蒿苗期干旱胁迫应答机制研究及抗旱基因的筛选与功能验证(32160341)资助

作者简介:张浩浩(2000-),男,汉族,湖北十堰人,硕士研究生,主要从事草种质资源与育种方面研究, E-mail:3353360540@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:xjauchenaiping@sina.com

desert plants and also offering an important reference for ecological restoration and breeding in arid areas.

Key words: *Seriphidium transiliense*; Drought stress; Root system configuration; Physiological traits; Root tip anatomical structure

在全球气候变化背景下,气候干旱化已成为显著的环境演变特征。近几十年的观测数据表明,全球干旱与半干旱区呈现持续扩张趋势,其干旱事件的发生频率和强度均表现出明显的增强态势^[1]。这种气候格局的变化不仅对水文循环以及降水分布模式产生深度扰动,同时通过土壤水分亏缺对植物生理代谢产生胁迫效应^[2],从而对生态系统的物种多样性维持形成严峻考验。新疆位于欧亚大陆腹地,是典型的干旱-半干旱区^[3]。该区域是中亚山地生物多样性的重要组成部分^[4],其独特的荒漠-草原复合生态系统通过植被-土壤互作机制,在维持区域生态安全和调节碳循环方面发挥着关键作用。然而,在全球气候变化背景下,加上人类活动的干扰,该地区正面临生态系统退化加速的严峻挑战,主要表现为土地荒漠化进程加剧和生态服务功能衰退^[5]。

荒漠植物作为干旱胁迫环境长期自然选择的产物,已进化出独特的生存策略,在维持干旱区生态系统功能方面具有不可替代的作用^[6]。耐旱牧草作为生态-经济兼用型植物资源,既能改良退化草地,又能提供优质饲草,是实现生态修复与牧业发展协同推进的理想材料^[7]。目前,荒漠植物抗旱机制研究从个体水平的形态生理适应到分子水平的基因调控网络均有深入探索,并据此筛选出一批具有应用潜力的耐旱种质^[8],为干旱区生态恢复提供了重要的种质基础。

根系作为植物的重要功能器官,在植物适应环境胁迫过程中发挥着核心作用^[9]。除了固定植株和吸收水分养分的基本功能外^[10],其形态可塑性被认为是植物抵御干旱胁迫的重要适应特征。作为最先感知土壤水分变化的器官,根能够通过快速的环境信号感知和转导系统激活植物的整体抗旱响应机制^[11],这种适应性特征在荒漠植物中尤为显著。然而,由于根系生长环境的复杂性和研究手段的局限,相关研究相对滞后。现有研究多聚焦于农作物根系特性分析,而对荒漠植物根系生态适应机制的研究无论在系统性还是深度上都存在明显不足。

伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)作为新疆荒漠生态系统中的优势建群种^[12-13],其发达的根系结构使其能够有效获取深层土壤中的有限水分和养分资源。该物种不仅具有较高的饲用价值,还在防风固

沙、水土保持和荒漠化控制中发挥着重要作用^[14]。

本研究选取3月龄伊犁绢蒿(*S. transiliense*)为研究对象,通过持续干旱胁迫处理,从形态学特征、生理响应以及根尖解剖结构的变化,系统解析其根系对干旱环境的适应策略。研究旨在揭示伊犁绢蒿幼苗根系适应干旱环境的内在机制,为新疆地区草原和荒漠生态系统的保护与恢复提供科学依据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 植物材料

伊犁绢蒿种子采自新疆维吾尔自治区昌吉市三工滩荒漠草原(43°50'9"N, 87°11'21"E, 海拔994 m)。于2024年3月底取土样,取地表至地下0~40 cm土层的土壤。

1.2 试验设计

本研究采用3:1(v/v)的原生境土与营养土混合作为基质,土壤基本理化性质为pH值(8.06±0.12)、电导率(142.7±6.79) μS·cm⁻¹、有机质(13.82±0.50) g·kg⁻¹、速效磷(14.7±0.55) mg·kg⁻¹、速效钾(247.3±12.92) mg·kg⁻¹、碱解氮(11.54±0.75) mg·kg⁻¹。2024年4月初在温室内进行播种繁殖,将种子播于PVC培养容器(直径16 cm×高度60 cm)中,其中原生境土3.8 kg,花土0.8 kg。待幼苗出土14 d后,株高约2 cm时进行间苗,每容器保留1株长势一致的健壮幼苗,每3 d用蒸馏水浇灌一次,培育至3月龄。

干旱胁迫处理采用自然失水法,设置5个胁迫时间梯度(10, 20, 30, 40, 50 d),3月龄后对处理组进行自然干旱,对照组采用称重法测定土壤相对含水量(Soil relative water content, SRWC),SRWC始终维持在80%~85%范围。各处理组与对照组同步采样,各取6盆,3次重复,共90盆。根尖解剖样品立即固定于FAA溶液中保存。

本试验中CK代表对照组;D10代表干旱处理第10天;D20代表干旱处理第20天;D30代表干旱处理第30天;D40代表干旱处理第40天;D50代表干旱处理第50天。

1.3 形态参数的测定

仔细将PVC管中的根系和土壤全部取出后,用直径为0.25 mm的网兜将根系包裹住,流水冲洗获得完整根系样品。将样品表面水分吸干后,使用根系扫描系统(MRS-3200A3L)扫描,通过LA-S植物根系分析系统测定总根长、总表面积、根系体积、根系平均直径、根尖数、分形维数、分支参数(内部连接数A、外部连接数M)等指标。随后,样品经75℃烘干至恒重后测定生物量,最终计算获得比根长等关键功能性状参数^[15]。

$$\text{比根长} = \text{总根长} / \text{根生物量} \quad (1)$$

$$\text{比表面积} = \text{总表面积} / \text{根生物量} \quad (2)$$

$$\text{根组织密度} = \text{根生物量} / \text{根系体积} \quad (3)$$

1.4 根系拓扑参数的计算

采用拓扑指数(Topological index, TI)定量表征根系分支模式,其计算公式见式(4)。

$$TI = \lg_A / \lg_M \quad (4)$$

M为根系所有外部连接的总数;A为最长根系通道内部连接的总数。TI的值为0.5~1,越接近0.5表明根系的外部分支较多,根系结构趋向于叉状分支;越接近1表明根系的外部分支较少,根系结构趋向于鱼尾形分支^[16](图1)。

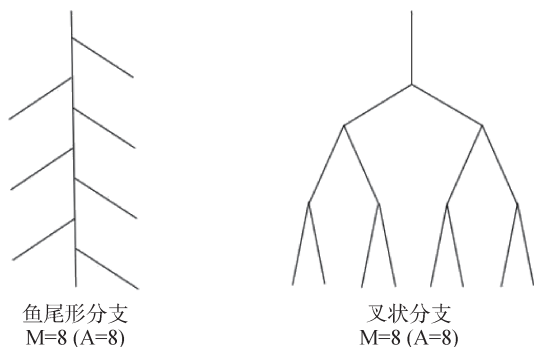


图1 两种极端根系拓扑结构模式

Fig. 1 Two extreme root topology patterns

1.5 生理指标测定

采用电导率仪法测定电导率^[17];硫代巴比妥酸显色法丙二醛(MDA)含量测定^[18];游离脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮显色法测定^[19];可溶性蛋白(SP)含量采用考马斯亮蓝G-250法测定^[19];可溶性糖(SS)含量的采用蒽酮比色法测定^[20];超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定^[21];过氧化物酶(POD)活性的采用愈创木酚显色法测定^[22];过氧化氢酶(CAT)活性的采用紫外吸收法测定^[23];过氧

化氢(H₂O₂)含量采用硫酸钛法测定^[24],超氧阴离子(O₂^{•-})含量采用羟胺法测定^[25],羟基自由基(·OH)含量采用HPLC法测定^[26]。

1.6 根尖解剖结构测定

在距根尖相同距离的根毛区(即成熟区),运用刀片从根基起始,连续获取3段根部样本,每段长度均控制在1 cm左右。每种处理选取不同植株的3条长度相似的不定根作为3次重复。采用石蜡切片技术,切厚度为14 μm的切片。使用尼康光学显微镜(Nikon-E100,日本)成像根尖解剖结构。使用NIS-Elements D4.20.00软件测量参数,包括表皮细胞厚度、皮层薄壁细胞厚度、皮层细胞平均直径、内皮层厚度、导管直径、维管柱直径和根尖直径。

1.7 数据分析

数据以平均值±平均值标准误差(SEM)表示。用SPSS27.0进行数据统计分析,各试验指标用单因素方差分析(ANOVA)进行显著性检验,用Origin2024软件作图。

2 结果与分析

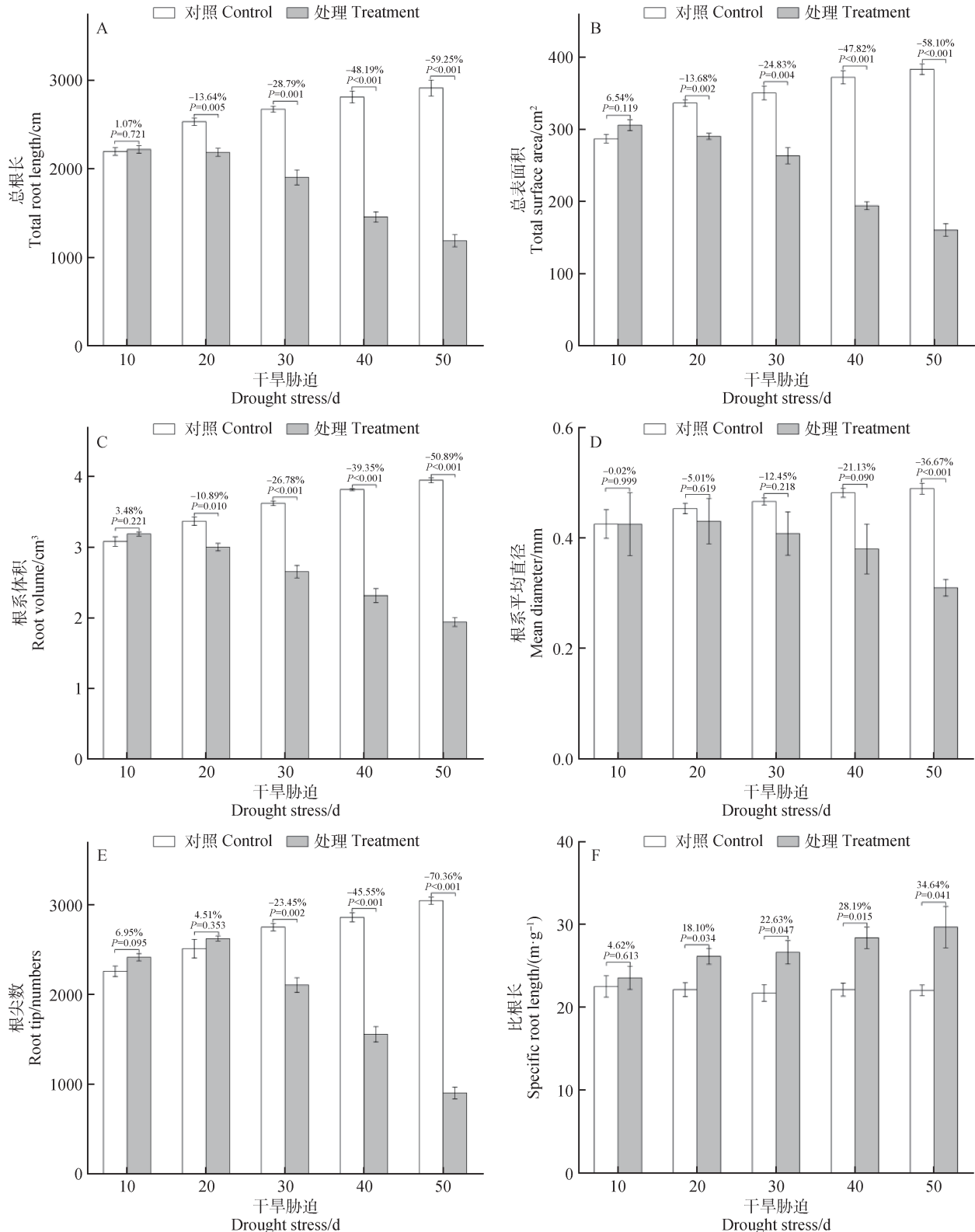
2.1 干旱胁迫下伊犁绢蒿幼苗根系形态指标变化

5个胁迫时间梯度(10, 20, 30, 40, 50 d)的SRWC分别为68.64%, 41.72%, 25.91%, 12.98%和4.3%。随着干旱胁迫时间的延长和SRWC的降低,伊犁绢蒿幼苗根系形态呈现明显的适应性变化。

干旱胁迫显著影响了伊犁绢蒿幼苗的根系形态特征(图2)。胁迫10 d虽使总根长、总表面积和根系体积分别比对照增加了1.07%, 6.54%和3.48%,但差异不显著。随着胁迫时间延长,各参数呈显著下降趋势,干旱胁迫20~50 d时,总根长降幅达13.64%~59.25%(图2A),总表面积减少13.68%~58.10%(图2B),根系体积降低10.89%~50.89%(图2C)。根系平均直径仅在干旱胁迫40 d和50 d出现显著下降($P < 0.05$),分别下降了21.13%和36.37%(图2D),而根尖数呈现先增后减的趋势,干旱胁迫10 d和20 d分别增加了6.95%和4.51%,30~50 d则显著减少($P < 0.001$)(图2E)。研究显示,SRL对干旱胁迫的响应更为敏感,在干旱

胁迫 20 d 时显著增加了 18.10% ($P < 0.05$), 并随胁迫时间延长呈持续上升趋势, 50 d 时增幅达 34.64% (图 2F)。相比之下, SSA 的响应相对滞后, 仅在干旱胁迫 40 d 和 50 d 时分别显著增加了 29.43% 和

37.35% ($P < 0.05$) (图 2G)。根组织密度 (RTD) 反映了植物根系的组织强度, 干旱胁迫下呈现相反的变化趋势, 干旱处理 20~50 d 时出现显著变化, 显著降低 17.92%~37.40% ($P < 0.05$) (图 2H)。



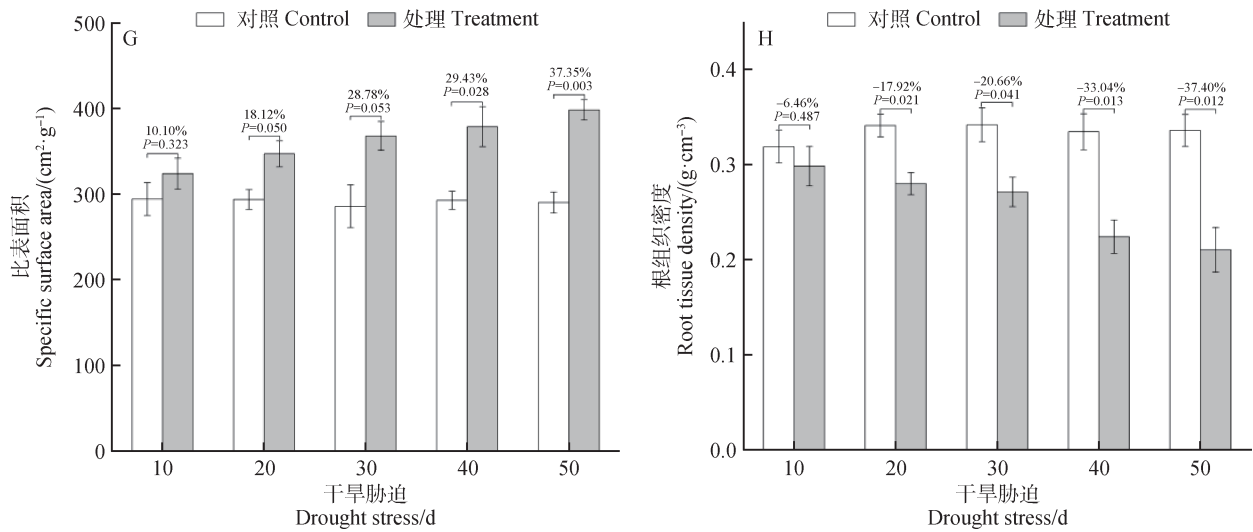


图2 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗根系形态的影响

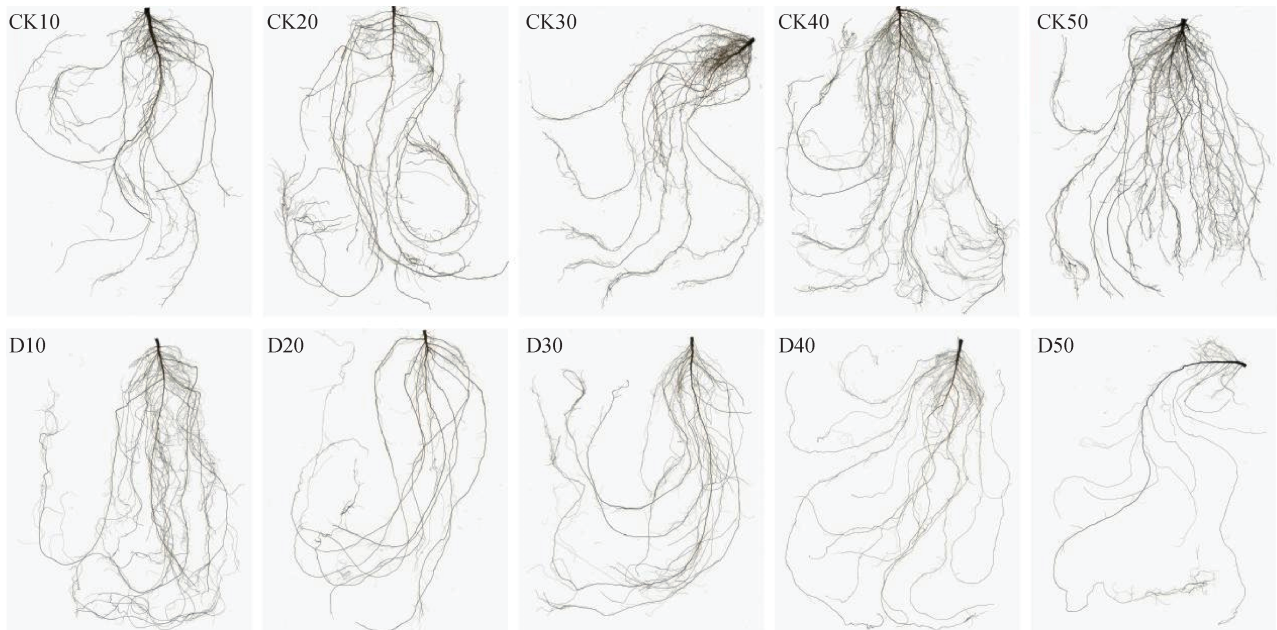
Fig. 2 Effects of drought stress on root morphology of *S. transiliense* seedlings

图3 不同SRWC下伊犁绢蒿幼苗根系形态变化

Fig. 3 Changes in root morphology of *S. transiliense* seedlings under different SRWCs

2.2 干旱胁迫下伊犁绢蒿幼苗根系拓扑结构和分形维数的响应变化

干旱胁迫显著改变了伊犁绢蒿幼苗的根系拓扑结构特征(图4)。结果表明,在干旱胁迫20 d时达到峰值,内部连接增加10.10%,但不显著,外部连接显著增加62.01% ($P < 0.001$),随后随胁迫加剧而逐渐降低。由图4C,图4D可知伊犁绢蒿幼苗根系构型为“叉状”分支模式,拓扑指数在干旱处理20 d后比对照降低3.83%~6.85%,分形维数则在干旱处理30 d后比对照降低8.43%~10.66%。

2.3 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗根系生理特性的影响

2.3.1 细胞膜透性

干旱胁迫显著影响了伊犁绢蒿幼苗根系的膜系统稳定性(图5)。结果显示,随着胁迫时间的延长,根系相对电导率和MDA含量均呈现明显的上升趋势。相对电导率在胁迫10 d即表现出显著增加 ($P < 0.05$),较对照升高11.33%,随后持续增加,至50 d时增幅达78.78%(图5A)。MDA含量的变化相对滞后,在30 d时开始显著增加 ($P < 0.05$),较对照升高63.62%,并在40 d和50 d时分别比对照增加104.19%和132.47%(图5B)。

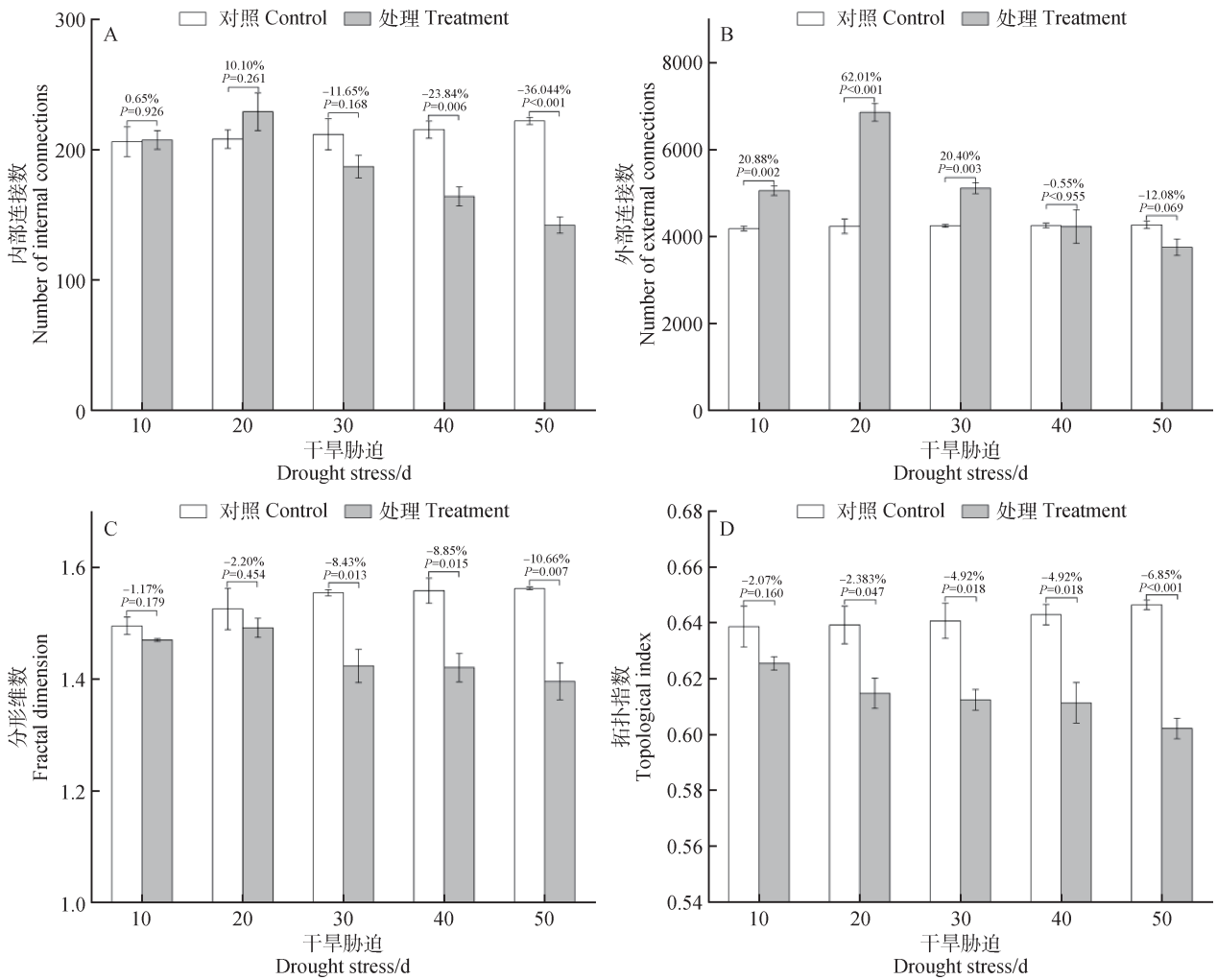


图4 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗根系拓扑结构及分形维数的影响

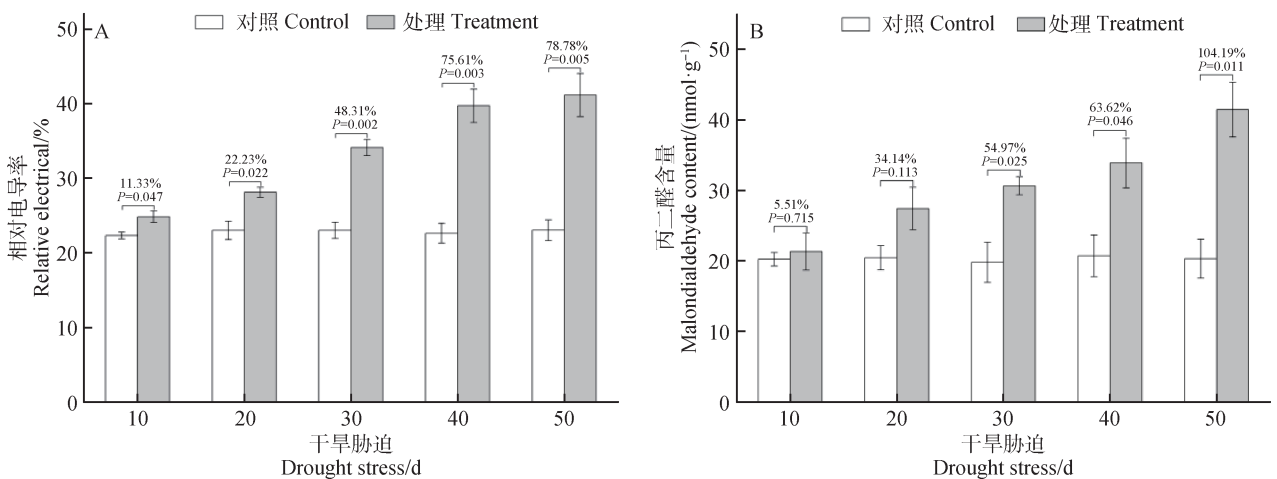
Fig. 4 Effects of drought stress on the topology and fractal dimension of root system of *S. transiliense* seedlings

图5 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗根系细胞膜透性的影响

Fig. 5 Effects of drought stress on cell membrane permeability of root system of *S. transiliense* seedlings

2.3.2 渗透调节物质 干旱胁迫显著诱导了伊犁绢蒿幼苗根系渗透调节物质的积累(图6)。SS含量、SP含量和Pro均在干旱胁迫20 d时显著高于对照,与对照组

存在显著性差异($P < 0.05$)。三种渗透调节物质均在干旱胁迫50 d时达到峰值,分别比对照增加100.88%(图6A),53.69%(图6B),195.83%(图6C)。

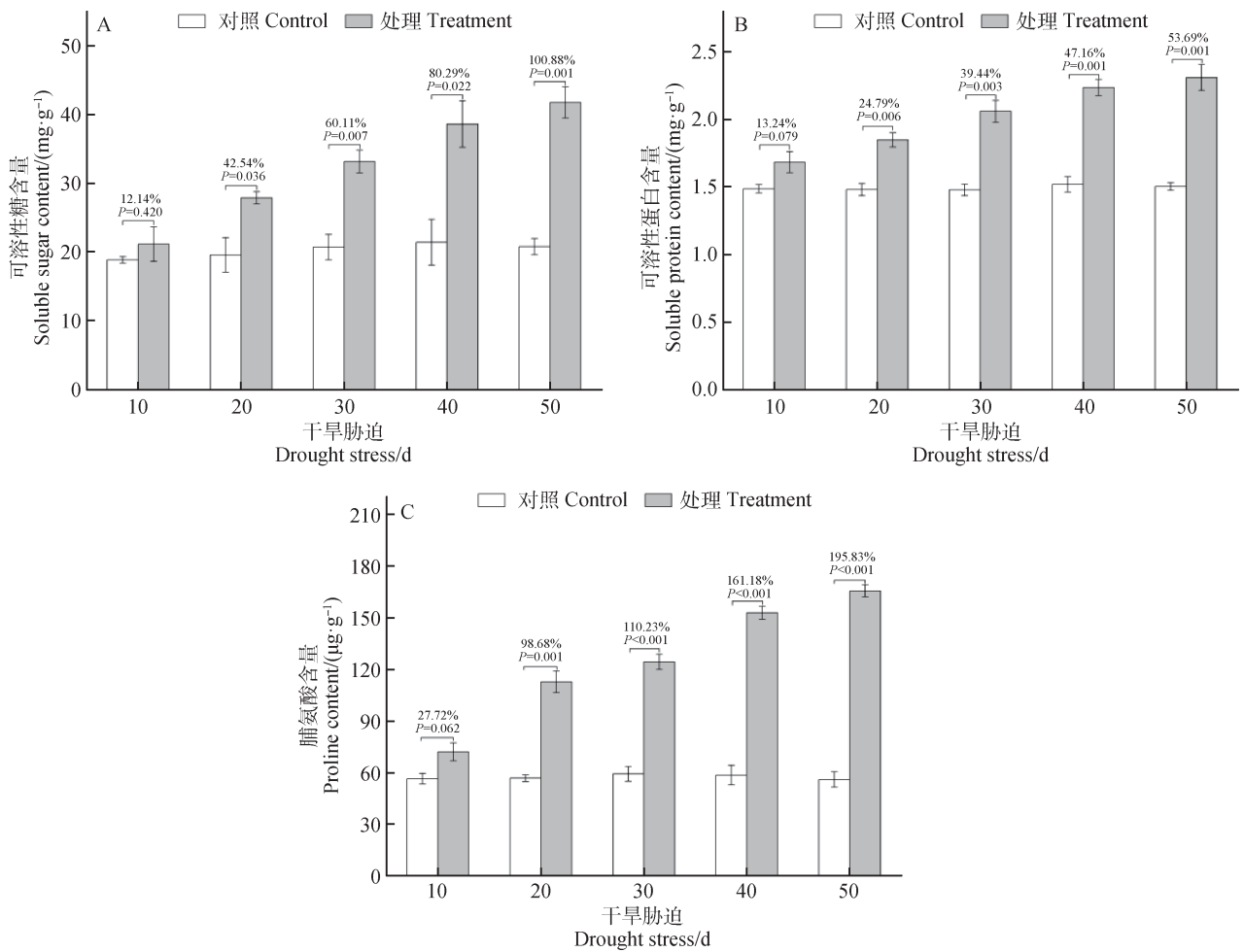


图 6 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗根系渗透调节物质的影响

Fig. 6 Effects of drought stress on osmoregulatory substances in the root system of *S. transiliense* seedlings

2.3.3 干旱胁迫对抗氧化酶活性的影响 由图 7 可知, SOD 活性在胁迫处理 20 d 后出现显著变化 ($P < 0.05$), POD 活性在胁迫处理 20~40 d 时出现显著变化 ($P < 0.05$), CAT 活性在干旱胁迫 30 d 后出现显著变化 ($P < 0.05$), 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗根系抗氧化酶系统的影响呈现诱导-抑制响应模式(图 7)。SOD 和 POD 活性均在胁迫 30 d 时达到峰值(图 7A, 图 7B), 分别较对照显著提高 67.62% 和 58.54% ($P < 0.05$); 而 CAT 活性的峰值出现相对滞后, 在 40 d 时达到最大值, 比对照增加 132.42%(图 7C)。

2.3.4 活性氧 干旱胁迫显著促进了伊犁绢蒿幼苗根系活性氧(ROS)的积累, 但不同 ROS 组分表现出差异化的积累特征(图 8)。O₂·⁻和·OH 含量在所有处理组均呈现显著增加趋势 ($P < 0.05$), O₂·⁻含量从干旱胁迫 10 d 时的 17.62% 持续上升至干旱胁迫 50 d 时的 69.49% (图 8A), ·OH 含量增幅为

27.26%~77.98%(图 8C)。H₂O₂ 的积累自干旱胁迫 20 d 起显著高于对照, 并在干旱胁迫 50 d 时达到峰值, 比对照增加 116.11% ($P < 0.05$)(图 8B)。

2.4 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗根尖解剖结构的影响

干旱胁迫显著重塑了伊犁绢蒿根尖成熟区的解剖结构(图 9, 图 10)。结果表明, 随着干旱胁迫时间的延长和 SRWC 的降低, 根尖表皮细胞厚度和内皮层厚度呈现显著的增加趋势。在干旱处理持续 50 d 时达到峰值, 表皮细胞厚度显著增加 38.78% ($P < 0.001$), 内皮层厚度显著 ($P < 0.001$) 增加 16.36%(图 9A 和 9D), 而皮层厚度、皮层薄壁细胞厚度、导管直径、维管柱直径以及根尖直径均呈现出不同程度的减少, 在干旱胁迫 50 d 时, 分别比对照减少 31.09%, 23.95%, 39.42%, 38.79%, 25.80%(图 9B、9C、9E、9F 和 9G)。

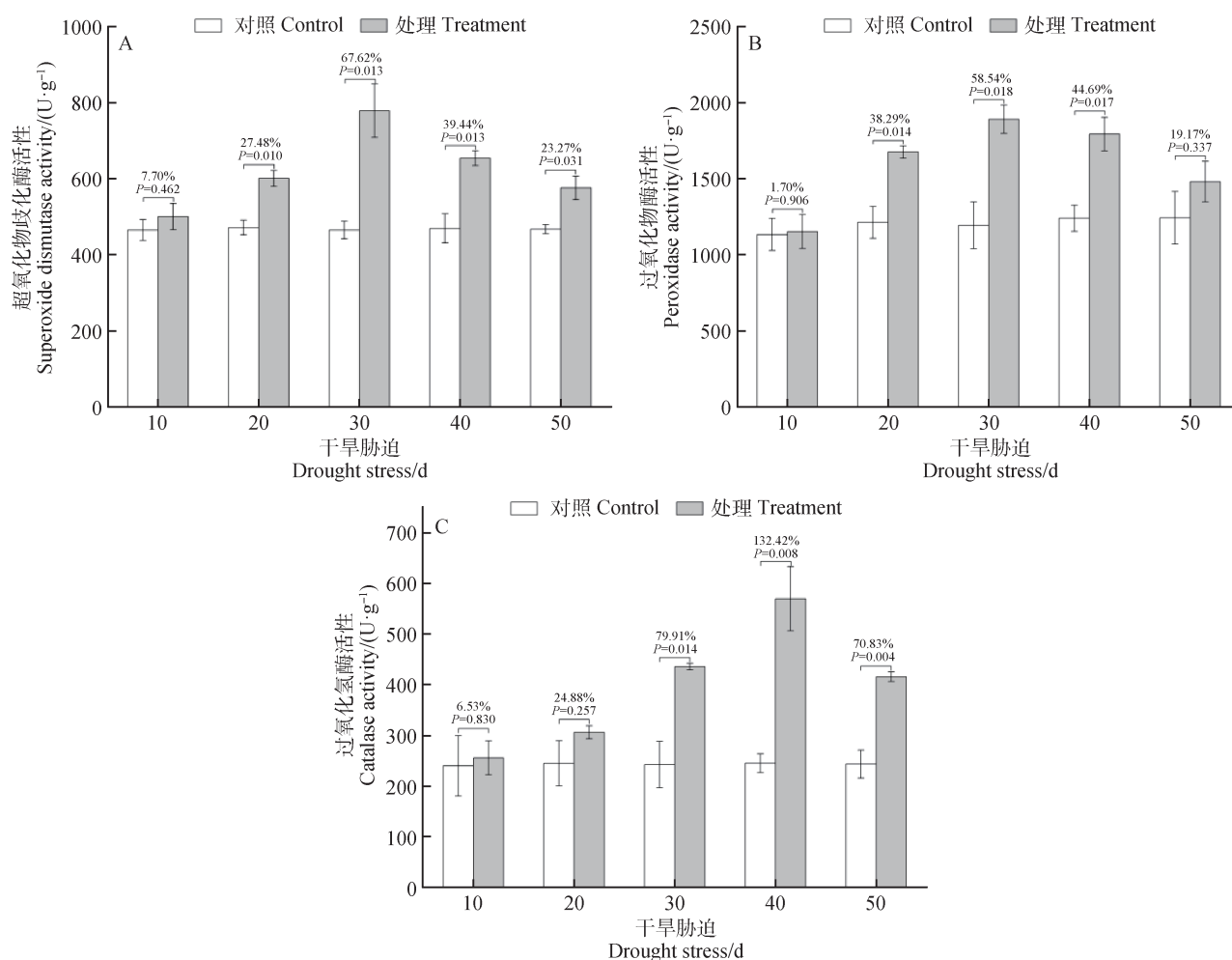
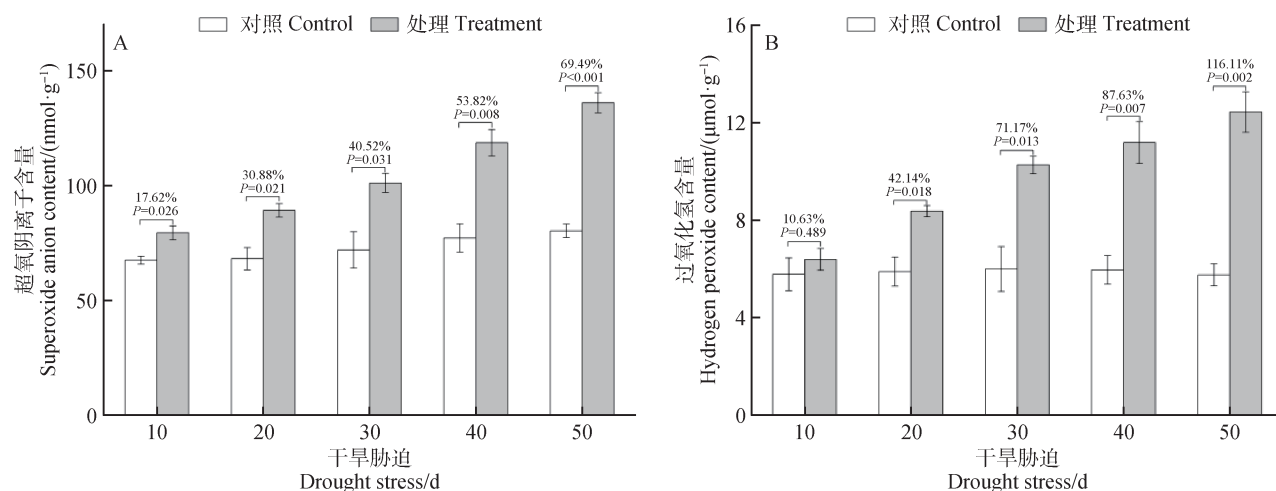


图7 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗根系抗氧化酶活性的影响

Fig. 7 Effects of drought stress on antioxidant enzyme activities in the root system of *S. transiliense* seedlings

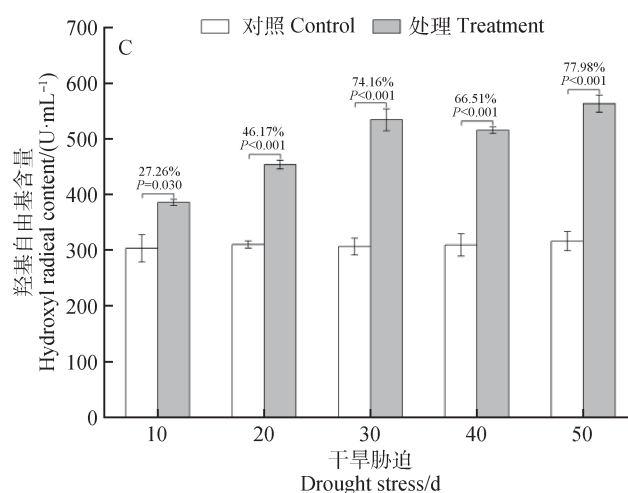
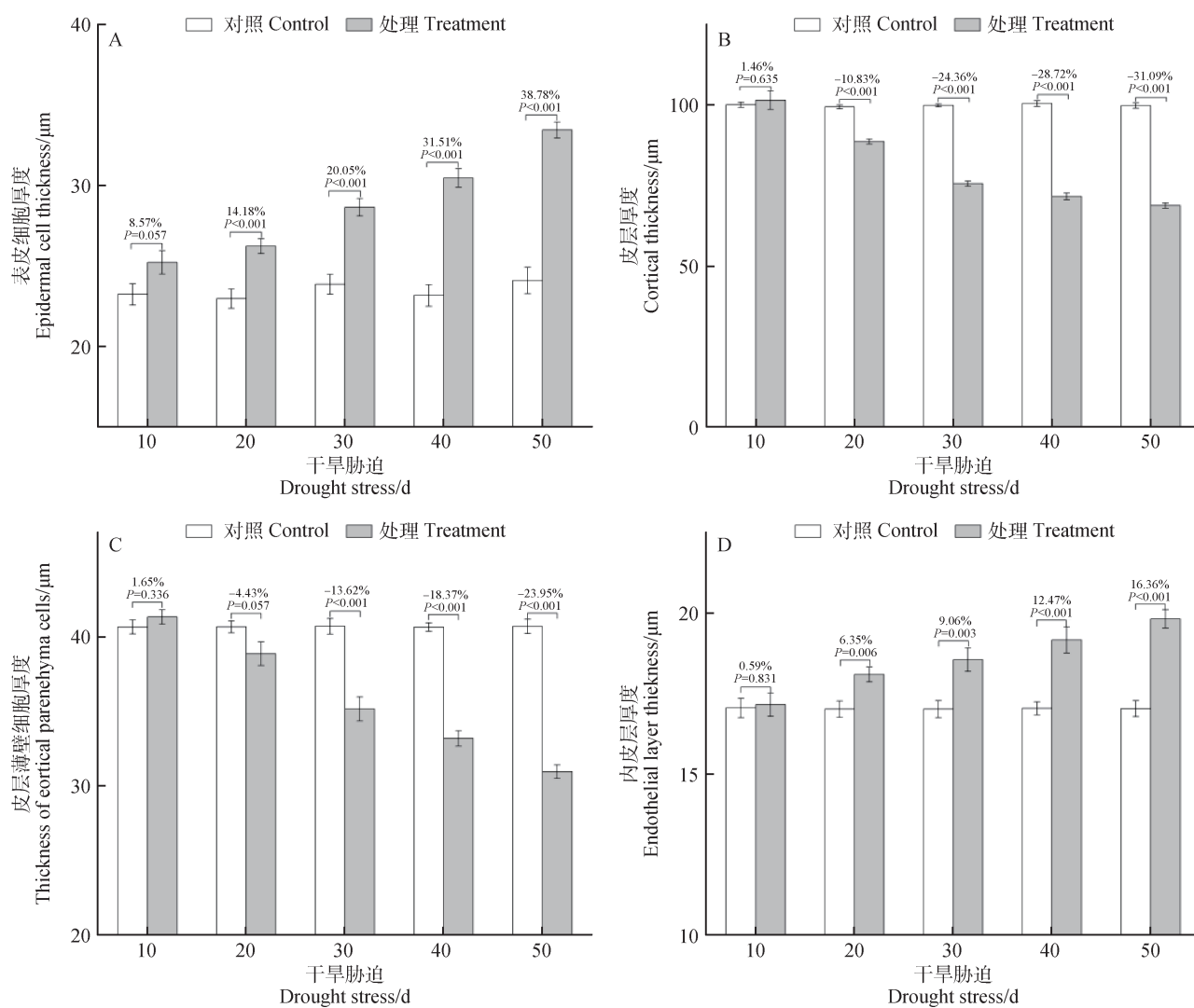


图 8 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗根系 ROS 的影响

Fig. 8 Effects of drought stress on ROS in the root system of *S. transiliense* seedlings

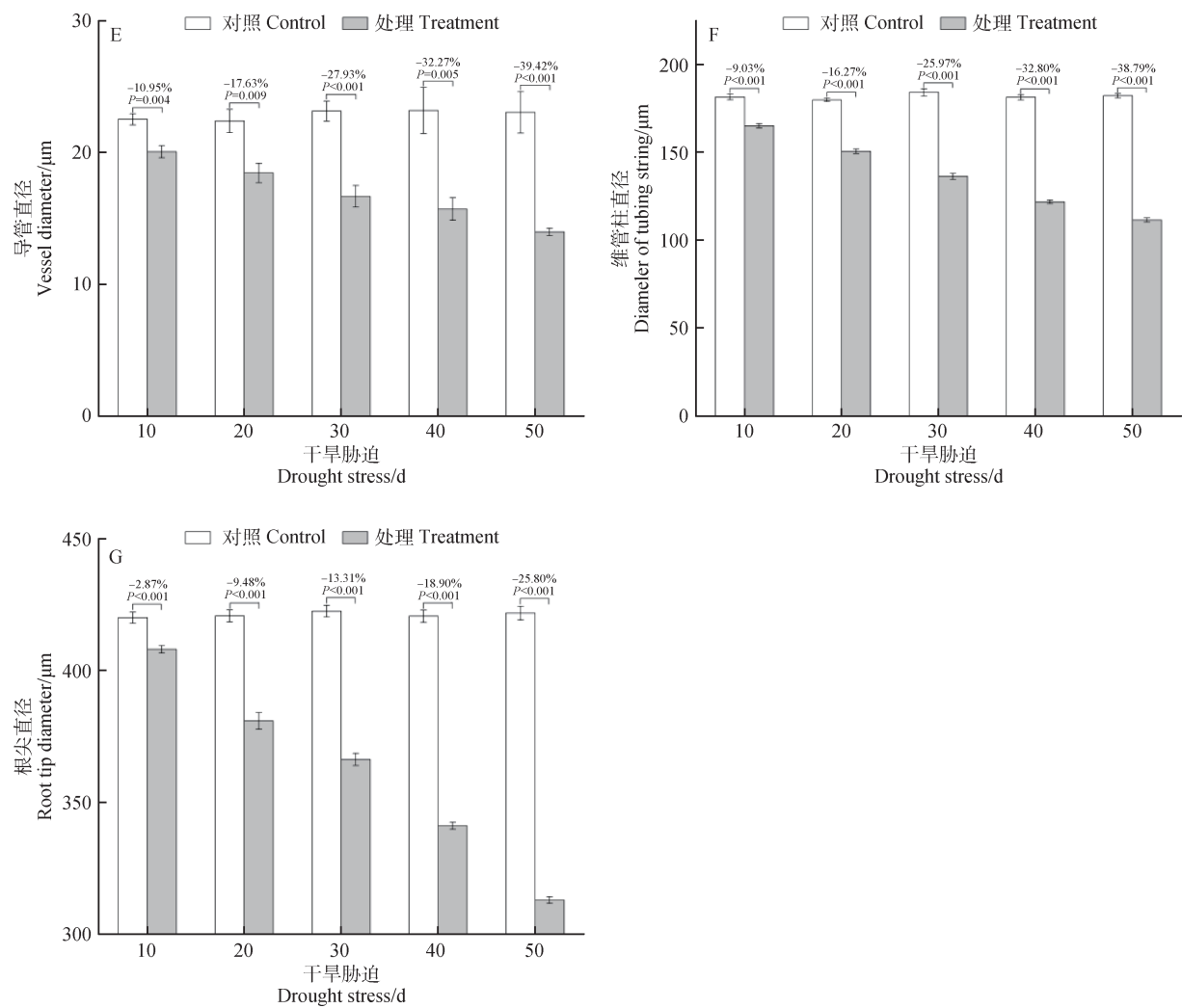


图 9 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗根尖解剖结构的影响

Fig. 9 Effects of drought stress on the anatomical structure of root tips of *S. transiliense* seedlings

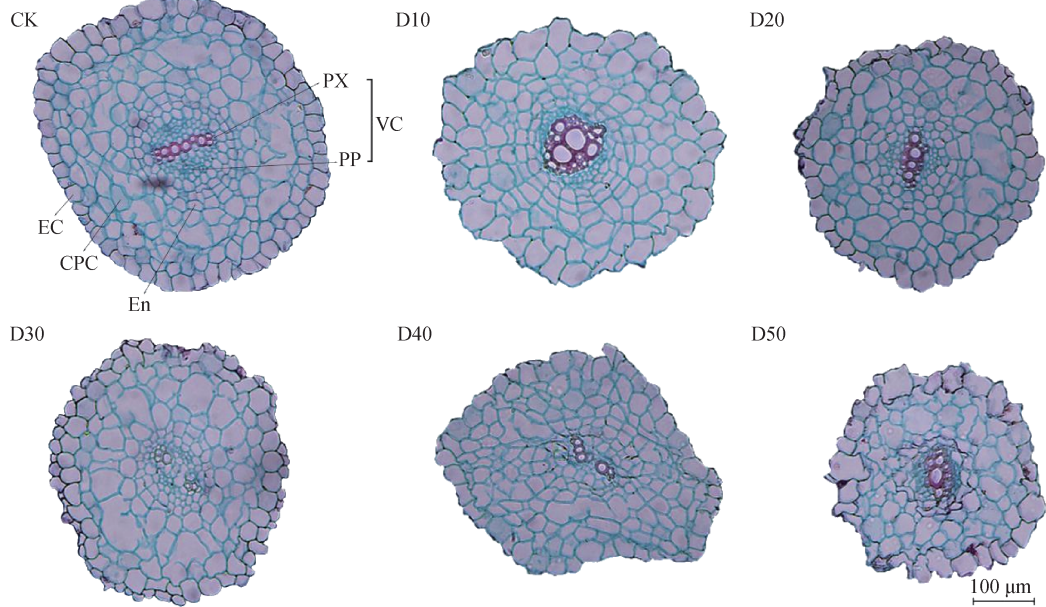


图 10 干旱胁迫 50 天下伊犁绢蒿幼苗根尖解剖结构变化

Fig. 10 Changes of anatomical structure of root tip of *S. transiliense* seedlings under drought stress for 50 days

注: EC, 表皮细胞; CPC, 皮层薄壁细胞; En, 内皮层; PX, 初生木质部; PP, 初生韧皮部; VC, 维管柱

Note: EC, epidermal cells; CPC, cortical parenchyma cells; En, endodermis; PX, primary xylem; PP, primary phloem; VC, vascular column

3 讨论

植物根系作为水分和矿物质营养吸收的主要功能器官,其构型特征直接影响资源获取效率。根系分支模式主要分为鱼尾形和叉状分支两种类型^[27],前者通过稀疏的次级根系减少重叠,扩大根系探索范围;后者则通过增加单位土壤体积内的根系表面积,提高干旱环境下的养分利用效率。荒漠植物如红砂和白刺普遍采用叉状分支模式^[28],这种结构使其能够在干旱条件下高效利用有限的资源,从而更好地适应恶劣的生存条件。本研究发现,干旱胁迫会显著影响根系发育动态,当SRWC为68.64%时,与对照相比其对根系生长影响最小,说明短期轻度干旱有利于根系的生长,此时幼苗通过延长根系、增加根系分支和扩大根系直径来增加根系的复杂程度,从而增强对资源的获取和运输能力,提高其对干旱的耐受能力,以维持正常的生命活动^[29-30],这与李佳欣等^[31]对植物逆境生存策略的研究基本一致。而随着干旱胁迫程度加深,伊犁绢蒿生长所需的水分供应不足,导致主根变细、直径下降,功能逐渐退化^[32],这种变化同时也抑制根系伸长,减少分支和直径,使其转向保守的资源利用策略。其拓扑指数(TI)变化也印证了这一规律,正常水分条件下其TI为0.64~0.65,呈现典型叉状分支特征,但随着干旱加剧,TI趋近0.6,表明根系拓展能力持续下降,其在土壤中的空间占有能力及水肥的吸收效率也会逐渐降低。

在干旱胁迫下,植物体内的抗氧化防御系统与自由基产生之间的平衡会被打破,导致ROS的积累无法及时清除,进而直接损伤植物的生物膜系统,导致植物幼苗根系发生膜脂过氧化,引起MDA含量的大量积累和相对电导率的增加^[33]。其中根尖作为根系吸收水分和养分的主要结构,其解剖结构与植物细胞膜稳定性呈现出显著的动态互作关系^[34]。在本研究中,正常条件下伊犁绢蒿根尖皮层薄壁细胞呈现规则排列,细胞壁与细胞膜通过疏水键紧密连接,这种排列方式不仅维持了细胞形态的稳定性,还为根系吸收功能提供了结构基础。然而,随着SRWC的降低,伊犁绢蒿幼苗根系中的相对电导率、MDA、 $O_2\cdot^-$ 、 H_2O_2 和 $\cdot OH$ 含量均随着干旱胁迫程度的加深呈逐渐上升趋势,而皮层薄壁细胞厚度和皮层细胞平均直径却表现出减少趋势,且细胞结构松散变形。说明在持续干旱胁迫下,伊犁

绢蒿根系中ROS,MDA和相对电导率的增加造成了膜系统的紊乱和破坏,根系过氧化水平和细胞膜脂化程度不断增加。这一现象与前人对黑果枸杞^[35]、草地早熟禾^[36]和紫花苜蓿^[37]的研究结论一致。

渗透调节是植物在逆境下通过降低渗透势,维持细胞膨压来保持正常生理活动的一种重要的生理调节机制^[38]。前人研究表明,不同植物在应对干旱胁迫时,会通过积累大量的Pro和SS来调节细胞质pH值;积累大量SP,来调节渗透势,从而束缚水分来维持细胞含水量^[39],帮助其对缺水环境进行调节和适应,保持细胞结构的完整性,从而提高耐旱性^[40]。本研究中,根系的SS,SP和Pro含量均随着干旱胁迫程度的加深而增加,根尖中表皮细胞厚度和内皮层厚度也与干旱胁迫程度呈正相关,说明在持续干旱胁迫下根系通过积累大量的SS和Pro来维持细胞内的渗透压平衡,防止细胞过度脱水,从而保护细胞结构和功能的完整性,根尖则通过增厚表皮细胞和内皮层来增强根系的机械强度和水分保持能力,同时SP的持续增加也说明在干旱胁迫期间根系中可以持续产生新的抗逆蛋白来抵御干旱,从而增强植物的抗逆性。然而,随着干旱程度的加深,伊犁绢蒿根尖皮层厚度、皮层细胞平均直径、导管直径、维管柱直径和根尖直径均呈现出不同程度的减少趋势,这说明植物的渗透调节能力是有限的,严重胁迫时渗透调节能力会减弱^[41]。同时,这种结构变化可能与植物在干旱胁迫下优化水分利用效率和减少水分损失的生理策略密切相关,通过减小导管直径和根尖直径,植物能够降低水分的传导速率,从而减少水分的散失,而皮层细胞的缩小则有助于提高细胞间的水分传导效率,进一步增强根系对干旱胁迫的适应能力。

为了抵御干旱胁迫对植物根系造成的损伤,其根尖解剖结构和根系抗氧化酶系统协调响应^[42]。在本研究中,根系作为植物最先感知干旱胁迫的器官,在轻度干旱胁迫下通过激活SOD酶系统,快速清除因代谢紊乱产生的超氧阴离子,将其歧化为 H_2O_2 和 O_2 ,维持细胞壁的完整性及根尖细胞的紧密排列,此外,POD和CAT之间具有协同作用,可以协同将 H_2O_2 转化成 H_2O 和 O_2 ,有效地清除因干旱胁迫而产生的大量活性氧,从而保护细胞免受氧化损伤^[43]。然而当干旱胁迫突破植物耐旱阈值时,抗氧化酶活性的降低打破了根系的氧化还原平衡,造

成根尖局部细胞膜的破损及其他结构的改变^[44]。这说明伊犁绢蒿根系在轻度干旱胁迫下会通过增加保护酶活性来减轻ROS对细胞的伤害,从而提高抵御干旱的能力,然而随着干旱胁迫程度的加剧,细胞膜透性受伤害加深,抗氧化酶活性降低,导致细胞内代谢紊乱,过氧化增强,积累大量自由基,从而破坏细胞的正常结构和功能。

4 结论

在干旱胁迫初期,根系通过增加根系总长度、总表面积、根系体积和根尖数来增强水分获取能力。随着干旱胁迫加剧,其适应策略转向资源优化配置,表现为比根长(SRL)和比表面积(SSA)显著增加,同时简化根系构型以减少水分运输能耗。在根系生理方面,随着干旱胁迫程度的加剧,活性氧(ROS)持续累积,细胞膜透性显著增加,表明细胞损伤程度逐渐加重,而渗透调节物质的持续增加以及抗氧化酶活性先升后降的趋势,反映出植株活性氧清除能力的动态变化。解剖学观察发现,随着干旱胁迫加剧,根尖皮层细胞与内皮层厚度显著增加,而皮层细胞平均直径、皮层厚度、导管直径、维管柱直径及根尖直径均呈下降趋势,这种结构重塑有助于增强根系机械强度,降低水分流失速率。综合来看,伊犁绢蒿幼苗根系在干旱胁迫过程中,早期通过形态可塑性最大化资源获取效率,后期则转向优化水分利用策略,并通过整合生理调节与结构变化维持植株生存,展现出复杂而高效的干旱适应机制。

参考文献

- [1] 张永强, 韩喆, 于爱萍, 等. PEG模拟干旱胁迫对不同苗龄伊犁绢蒿幼苗根系生理的影响[J]. 草业科学, 2025, 42(1): 129-139
ZHANG Y Q, HAN Z, YU A P, et al. Effects of PEG simulated drought stress on root physiology of *Seriphidium transiliense* seedlings at different ages [J]. Pratacultural Science, 2025, 42(1): 129-139
- [2] 王方琳, 柴成武, 赵鹏, 等. 3种荒漠植物光合及叶绿素荧光对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 西北植物学报, 2021, 41(10): 1755-1765
WANG F L, CHAI C W, ZHAO P, et al. Photosynthetic and chlorophyll fluorescence responses of three desert species to drought stress and evaluation of drought resistance [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(10): 1755-1765
- [3] ZHOU G X, CHEN Y N, YAO J Q. Variations in precipitation and temperature in Xinjiang (Northwest China) and their connection to atmospheric circulation[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 10: 1082713
- [4] CHEN X, LUO G P, XIA J, et al. Ecological response to the climate change on the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 48(6): 765-777
- [5] SUN F, WANG Y, CHEN Y N, et al. Historic and simulated desert-oasis ecotone changes in the arid Tarim River Basin, China[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4): 647
- [6] JIA R L, ZHAO Y, GAO Y H, et al. Antagonistic effects of drought and sand burial enable the survival of the biocrust moss *Bryum argenteum* in an arid sandy desert [J]. Biogeosciences, 2018, 15(4): 1161-1172
- [7] 努尤甫提·拉提非克, 胡金娇, 汪辉. 牧草抗旱性研究进展[J]. 草学, 2021(5): 1-10
LATIFFEIKE N, HU J J, WANG H. Research progress on drought resistance of forage [J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2021(5): 1-10
- [8] 高慧娟. 梭梭适应模拟干旱的差异表达基因分析及HaASR基因的功能鉴定[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 1-2
GAO H J. Analysis of differentially expressed genes of *Haloxylon ammodendron* adapting to simulated drought and functional identification of HaASR [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 1-2
- [9] AUGSTEIN F, CARLSBECKER A. Getting to the roots: a developmental genetic view of root anatomy and function from Arabidopsis to lycophytes [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1410
- [10] ZHANG X X, WHALLEY P A, ASHTON R W, et al. A comparison between water uptake and root length density in winter wheat: effects of root density and rhizosphere properties [J]. Plant and Soil, 2020, 451(1): 345-356
- [11] OROSA-PUENTE B, LEFTLEY N, WANGENHEIM V D, et al. Root branching toward water involves posttranslational modification of transcription factor ARF7 [J]. Science, 362(6421): 1407-1410
- [12] GERMAN D A, CHEN W L, SMIRNOV S V, et al. Plant Genera and species new to China recently found in northwest Xinjiang [J]. Nordic Journal of Botany, 2012, 30(1): 61-69
- [13] 韩喆, 张永强, 张浩浩, 等. 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗生长及叶片解剖结构的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(1): 105-112
HAN Z, ZHANG Y Q, ZHANG H H, et al. Effects of drought stress on growth and leaf anatomical structure of *Seriphidium transiliense* seedlings [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(1): 105-112
- [14] BADEMUQIQIGE, SUN Z J, LI P Y, et al. The effect of harvest time on seed germination characteristics of *Seriphidium transiliense* in northern Xinjiang, China [J]. Seed Science and Technology, 2018, 46(1): 139-147
- [15] FENG Z P, KONG D L, KONG Y H, et al. Coordination of

- root growth with root morphology, physiology and defense functions in response to root pruning in *Platycladus orientalis* [J]. *Journal of Advanced Research*, 2022, 36: 187-199
- [16] 楼科尔, 曲文杰, 王磊, 等. 腾格里沙漠地区 4 种优势一年生草本植物根构型特征[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(11): 3015-3022
- LOU K E, QU W J, WANG L, et al. Root architecture characteristics of four dominant annual herbs in Tengger Desert, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(11): 3015-3022
- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 267-268
- LI H S. Plant physiological and biochemical experiment principle and technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 267-268
- [18] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1990: 133-135
- ZHANG Z L. Plant physiology experiment instruction [M]. 2 Edition. Beijing: Higher Education Press, 1990: 133-135
- [19] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 252-253
- KONG X S, YI X F. Plant Physiology Experiment Technology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 252-253
- [20] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 252-253
- ZOU Q. Plant Physiology Experiment Instruction [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 252-253
- [21] GIANNOPOLITIS C N, RIES S K. Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants[J]. *Plant Physiology*, 1977, 59(2): 309-314
- [22] DE AZEVEDO NETO A D, PRISCO J T, ENÉAS-FILHO J, et al. Hydrogen peroxide pre-treatment induces salt-stress acclimation in maize plants[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162(10): 1114-1122
- [23] BEERS R F, SIZER I W. A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1952, 195(1): 133-140
- [24] WILLEKENS H, CHAMNONGPOL S, DAVEY M, et al. Catalase is a sink for H₂O₂ and is indispensable for stress defence in C3 plants[J]. *The EMBO Journal*, 1997, 16(16): 4806-4816
- [25] LIU Y J, ZHAO Z G, SI J, et al. Brassinosteroids alleviate chilling-induced oxidative damage by enhancing antioxidant defense system in suspension cultured cells of *Chorispora bungeana*[J]. *Plant Growth Regulation*, 2009, 59(3): 207-214
- [26] ELSTNER E F, HEUPEL A. Formation of hydrogen peroxide by isolated cell walls from horseradish (*Armoracia lapathifolia* Gilib.) [J]. *Planta*, 1976, 130(2): 175-180
- [27] FITTER A H, STICKLAND T R. Architectural analysis of plant root systems 2. Influence of nutrient supply on architecture in contrasting plant species[J]. *New Phytologist*, 1991, 118(3): 383-389
- [28] 单立山, 李毅, 任伟, 等. 河西走廊中部两种荒漠植物根系构型特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 25-31
- SHAN L S, LI Y, REN W, et al. Root architecture of two desert plants in central Hexi Corridor of Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 25-31
- [29] PADILLA F M, AARTS B H J, ROIJENDIJK Y O A, et al. Root plasticity maintains growth of temperate grassland species under pulsed water supply[J]. *Plant and Soil*, 2013, 369(1): 377-386
- [30] CHOAT B. Predicting thresholds of drought-induced mortality in woody plant species[J]. *Tree Physiology*, 2013, 33(7): 669-671
- [31] 李佳欣, 张天赐, 任晓月, 等. 不同生育期马铃薯根系构型及生理指标对干旱胁迫的响应[J]. *西北植物学报*, 2024, 44(12): 1848-1855
- LI J X, ZHANG T C, REN X Y, et al. Responses of potato root architecture and physiological indexes to drought stress at different growth stages[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(12): 1848-1855
- [32] AHANGER M A, SIDDIQUE K H M, AHMAD P. Understanding drought tolerance in plants [J]. *Physiologia Plantarum*, 2021, 172(2): 286-288
- [33] 刘方春, 马海林, 刘丙花, 等. 持续干旱下接种 PGPR 对核桃苗抗氧化系统的影响[J]. *西北林学院学报*, 2023, 38(5): 73-78
- LIU F C, MA H L, LIU B H, et al. Effects of PGPR on the antioxidant system in the leaves of *Juglans regia* seedlings under continuous drought stress[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(5): 73-78
- [34] 张霞, 周存宇, 李俊凯, 等. 根皮层结构和组织化学分化及生理功能研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(14): 33-39
- ZHANG X, ZHOU C Y, LI J K, et al. Advances in the study of structure and histochemical differentiation and physiological function of root cortex [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(14): 33-39
- [35] 张金菊, 田青, 郭有燕, 等. 黑果枸杞根系对干旱胁迫响应的生理机制[J]. *甘肃农业大学学报*, 2023, 58(4): 183-191
- ZHANG J J, TIAN Q, GUO Y Y, et al. Physiological mechanism of root system response of *Lycium ruthenicum* to drought stress[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2023, 58(4): 183-191
- [36] 董文科, 张玉娟, 马福钦, 等. 草地早熟禾苗期耐低温的生理特性研究[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(5): 33-43
- DONG W K, ZHANG Y J, MA F Q, et al. Physiological characteristics of low temperature tolerance in *Poa pratensis* seedling stage [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(5): 33-43
- [37] 李硕. 水分亏缺下紫花苜蓿根系形态构型及其生理响应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021: 75-100
- LI S. The study on root morphology architecture and physiological response of *Alfalfa* root under water deficit [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021: 75-100

- [38] 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. Physiological response and drought resistance evaluation of four ground cover plants under drought stress[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2019, 39(6): 9-15
- [39] 牛欣益, 马瑞. 红砂幼苗叶片生理特性对干旱胁迫的响应[J]. 草业科学, 2023, 40(10): 2483-2492
NIU X Y, MA R. Effects of drought stress on leaf physiology of *Reaumuria soongorica* seedlings during the growing season[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(10): 2483-2492
- [40] 陈爱萍, 隋晓青, 王玉祥, 等. 干旱胁迫及复水对伊犁绢蒿幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1216-1225
CHEN A P, SUI X Q, WANG Y X, et al. Effects of drought and re-watering on growth and physiological characteristics of *Seriphidium transiliense* seedlings[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5): 1216-1225
- [41] 刘亚楠, 陈晓娜, 郭跃, 等. 沙旱生灌木对干旱胁迫的响应研究进展[J]. 世界林业研究, 2023, 36(5): 21-26
LIU Y N, CHEN X N, GUO Y, et al. Research progress in response of sandy xerophytic shrubs to drought stress[J]. World Forestry Research, 2023, 36(5): 21-26
- [42] 许璐璐, 王涵, 高盼盼, 等. 环境胁迫对植物根系形态的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(14): 16-19
XU L L, WANG H, GAO P P, et al. Effects of environmental stress on plant root morphology[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(14): 16-19
- [43] 韩喆, 张永强, 张浩浩, 等. 干旱胁迫对伊犁绢蒿幼苗叶绿体超微结构及生理特性的影响[J]. 草业科学, 2025, 42(6): 1403-1413
HAN Z, ZHANG Y Q, ZHANG H H, et al. Effects of drought stress on chloroplast ultrastructure and physiological characteristics of *Seriphidium transiliense* seedlings[J]. Pratacultural Science, 2025, 42(6): 1403-1413
- [44] 未晓巍, 杨艺, 王艺璇, 等. 玉米毛状根再生植株干旱胁迫与复水条件下膜质过氧化水平变化[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 97-101
WEI X W, YANG Y, WANG Y X, et al. Changes of membrane peroxidation levels in hairy root regeneration plant of maize under drought and rewatering conditions [J]. Jilin Normal University Journal (Natural Science Edition), 2019, 40(3): 97-101

(责任编辑 刘婷婷)