南京农业大学学报 2026,49(3):522-530
Journal of Nanjing Agricultural University
http://nauxb.njau.edu.cn
DOI:10.7685/jnau.202501019

肖维焘,王纪忠,黄志炜,等. 盐胁迫和干旱胁迫对杜梨幼苗生长和根系特性的影响[J]. 南京农业大学学报,2026,49(3):522-530.
Xiao W T,Wang J Z,Huang Z W,et al. Effects of salt and drought stress on the growth and root characteristics of *Pyrus betulaefolia* seedlings[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2026,49(3):522-530.

盐胁迫和干旱胁迫对杜梨幼苗生长和根系特性的影响

肖维焘[1],王纪忠[1],黄志炜[1],孙敏[1],吴巨友[2],陈国栋[1,2*]

(1.淮安大学生命科学与食品工程学院,江苏 淮安 223001;2.南京农业大学园艺学院,江苏 南京 211800)

摘要:[**目的**]本研究旨在探讨不同程度盐胁迫和干旱胁迫对杜梨幼苗生长指标及根系特性的影响,为果树耐盐、抗旱性研究和品种改良提供理论依据。[**方法**]以杜梨幼苗为试材,分别采用 NaCl 溶液(浓度分别为 0、3、6 和 12 g·L^{-1},记为 CK、S1、S2 和 S3)和 PEG-6000 溶液(浓度分别为 0、50、100 和 200 g·L^{-1},记为 CK、D1、D2 和 D3)模拟盐胁迫与干旱胁迫,测定幼苗的地上部形态、叶绿素含量、根冠比、根系活力和根系构型等生长和生理指标。[**结果**]随着盐胁迫程度的加深,幼苗的根系长度、根系表面积、根系体积和根系数量均呈下降趋势,而根冠比则呈先降低后升高的趋势。其中,与对照组(CK)相比,S3 处理幼苗根系活力降低 81.0%,叶绿素含量减少 23.6%,株高缩短 57.3%,均差异显著;根系长度、表面积、体积和根系数量分别降低 80.0%、78.8%、73.8%和 72.5%,均差异显著。在干旱胁迫处理中,随着胁迫程度的加重,幼苗的根系长度、根系表面积、根系体积和根系数量均受到显著抑制,而根冠比呈先升高后降低的趋势。其中,D1 处理虽然促进了根系伸长生长,但抑制了根系平均直径的增加;与 CK 相比,D3 处理幼苗根系活力降低 67.3%,叶绿素含量减少 30.6%,株高缩短 53.3%,均差异显著;幼苗根系长度、表面积、体积和根系数量分别降低 41.78%、43.97%、70.08%和 45.51%,均差异显著。[**结论**]杜梨幼苗通过动态调节根冠比和根系构型响应非生物胁迫,其耐盐阈值为 6 g·L^{-1} NaCl(S2 处理),抗旱阈值为 100 g·L^{-1} PEG-6000(D2 处理)。当各胁迫强度超过其阈值时,幼苗的生长及生理指标均显著下降。

关键词:盐胁迫;干旱胁迫;杜梨;根系构型;根系活力
中图分类号:S661.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2030(2026)03-0522-09

Effects of salt and drought stress on the growth and root characteristics of *Pyrus betulaefolia* seedlings

XIAO Weitao[1],WANG Jizhong[1],HUANG Zhiwei[1],SUN Min[1],WU Juyou[2],CHEN Guodong[1,2*]

(1.Institute of Life Sciences and Food Engineering,Huai'an University,Huai'an 223001,China;
2.College of Horticulture,Nanjing Agricultural University,Nanjing 211800,China)

Abstract:[**Objectives**]This study aimed to investigate the effects of varying degrees of salt stress and drought stress on the growth parameters and root system characteristics of *Pyrus betulaefolia* seedlings,providing a theoretical foundation for research on stress tolerance and cultivar improvement in fruit trees. [**Methods**]*P. betulaefolia* seedlings were used as the experimental material. Salt stress was simulated using NaCl solutions at concentrations of 0,3,6 and 12 g·L^{-1}(labeled as CK,S1,S2 and S3,respectively),and drought stress was achieved using PEG-6000 solutions at concentrations of 0,50,100 and 200 g·L^{-1}(labeled as CK,D1,D2 and D3,respectively). The growth and physiological parameters were measured,including aboveground morphology,chlorophyll content,root/shoot ratio,root activity and root system architecture. [**Results**]With increasing salt stress,the seedlings exhibited a notable decline in root length,root surface area,root volume and root number,while the root/shoot ratio initially decreased and then increased. Compared to the control(CK),root activity of the seedlings in S3 treatment prominently decreased by 81.0%,chlorophyll content remarkably reduced by 23.6%,and plant height dominantly shortened by 57.3%;root length,surface area,volume and root number significantly decreased by 80.0%,78.8%,73.8% and 72.5%,respectively. Under drought stress,as stress severity increased,root length,surface area,volume and root number were significantly inhibited,while the root/shoot ratio initially increased and then decreased. Specifically,root elongation growth in D1 treatment was promoted,but the increase of the average root diameter was suppressed. Compared to CK,root activity of the seedlings in D3 treatment prominently decreased by 67.3%,chlorophyll content remarkably reduced by 30.6%,and plant height dominantly shortened by 53.3%;root length,surface area,volume and root number of seedlings significantly decreased by 41.78%,43.97%,70.08% and 45.51%,respectively. [**Conclusions**]*P. betulaefolia* seedlings responded to abiotic stress by dynamically adjusting their root/shoot ratio and root system architecture. The salt tolerance threshold was identified as 6 g·L^{-1} NaCl

收稿日期:2025-01-18
基金项目:江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(22)3050];中国博士后科学基金项目(2022M721654)
*通信作者:陈国栋,副教授,主要从事果树根系生长调控及养分高效利用研究,E-mail:chenguodong@hyit.edu.cn。

(S2 treatment),and the drought tolerance threshold as 100 g·L^{-1} PEG-6000(D2 treatment). Beyond these thresholds,seedling growth and physiological indices were significantly declined.

Keywords:salt stress;drought stress;*Pyrus betulaefolia*;root architecture;root activity

梨(*Pyrus* L.)是世界上最受消费者喜爱的水果之一,也是我国第三大水果。2023 年全国梨栽培面积和产量分别为 90.4 万 hm^2 和 1 960 万 t,在国民经济发展和乡村振兴中具有重要价值。在全球气候变化加剧的背景下,盐和干旱胁迫已成为威胁农业可持续发展的关键环境因子。土壤盐渍化通过渗透胁迫和离子毒害双重机制抑制植物生理活动,导致作物水分吸收受阻、代谢紊乱,最终引发生长抑制和产量损失[1]。木本植物对盐胁迫尤为敏感,研究显示苹果砧木(红果海棠)在盐胁迫下呈现显著的表型劣变,新梢生长速率降低 100%,叶面积减少 36.8%,根系活力下降 50%,且盐害指数与胁迫强度呈显著正相关[2]。与此同时,干旱胁迫持续加剧,农作物水分利用效率与抗逆性能受到严峻挑战[3]。研究表明,干旱胁迫下,玉米'郑单 958'苗期的气孔导度显著降低,降幅达 76.7%,其光系统Ⅱ效率也显著下降,降幅为 6.8%,这导致幼苗的光合碳同化能力明显减弱,抑制其正常生长[4]。同时,苹果砧木幼苗在遭受干旱胁迫时,其株高、主干直径、总干重、相对生长速率、叶绿素含量和净光合作用速率均明显下降,造成植株矮小细弱、叶片发育不良等现象[5]。因此,深入研究盐和干旱胁迫对梨砧木幼苗生长及根系特性的影响,对梨产业的发展具有重要的理论意义。

根系作为植株地下部重要的营养器官,是植株地上部与地下部水肥交互的"桥梁",对地上部新梢生长和果实发育等过程产生直接影响。木本植物根系通过根尖分生组织(根冠细胞、伸长区)的机械敏感通道(如小电导机械敏感通道)和渗透感应系统(如活性氧-钙离子信号振荡、脱落酸梯度分布)实现土壤水分和盐分的动态感知[6]。果树遭遇土壤盐或干旱胁迫时,其根系主要通过三重协同机制响应逆境伤害,即构型可塑性调控(主根延伸和侧根增生)、解剖结构重构(凯氏带增厚和通气组织形成)以及细胞稳态维持(液泡区隔化、代谢物积累)。在中度盐或干旱胁迫条件下,果树根系可以通过激活超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶等抗氧化酶系统,显著增强活性氧清除能力,从而维持氧化还原稳态,减少胁迫条件带来的损害[7]。然而,当盐或干旱胁迫强度超过阈值时将会引发渗透失衡、离子毒害和氧化代谢紊乱等连锁反应,破坏细胞结构和功能,威胁植物生长与生存[8]。根系构型作为表征植物地下部三维空间拓扑结构的重要形态学指标,其形成受遗传调控网络与环境因子的协同塑造。研究表明,非生物胁迫可通过调控细胞分裂素/脱落酸平衡,诱导根系构型发生特异性重塑[9]。例如,当棉花幼苗遭遇盐胁迫时,其总根长缩短 19.8%[10]。在干旱胁迫条件下,紫花苜蓿的根系发育受到显著抑制,其总根长度、根系表面积和根系体积分别降低 66.7%、50.0%和 62.0%[11]。同样,苹果幼苗遭遇干旱胁迫时,其根系质量、根系长度和根系表面积分别显著降低 44.96%、41.24%和 29.83%[12]。上述研究证实,根系构型可塑性不仅直接影响植物的物理固着与资源捕获效率,其结构-功能互作关系更在抵御非生物胁迫中发挥重要作用。

因此,选育耐盐和抗旱砧木是应对梨生产中逆境胁迫的有效措施之一,但目前关于梨砧木在盐和干旱胁迫下的表型症状及生长动态变化尚不清楚,不利于梨耐盐和抗旱种质资源的筛选与应用。鉴于此,本研究以梨生产中应用最为广泛的砧木杜梨为材料,采用人工模拟盐和干旱胁迫的方法,探讨幼苗在不同程度盐或干旱胁迫条件下的植株表型症状及各项生长指标的变化,旨在为深入揭示杜梨在盐、干旱等不利环境条件下的适应策略提供科学依据,同时为梨砧木在盐、干旱等区域的合理利用和抗逆品种的选育改良提供理论支持与实践指导。

1　材料与方法

1.1　试验材料

以砧木杜梨为试材,其种子于 2023 年 10 月采自南京农业大学梨工程中心种质资源圃。选取大小一致、充实饱满的种子,用蒸馏水洗净,在清水中浸泡 24 h 后转移至无菌操作台;用 10%次氯酸钠溶液消毒杀菌 20 min,随后用蒸馏水冲洗 3 次;用无菌手术镊将种皮去除,并均匀放置于洁净、湿润的纱布上,然后转移至培养室进行催芽。待胚根长至 1 cm 左右时,将其播种在湿润的蛭石穴盘中;待幼苗长出 2~3 片真叶时,挑选长势良好的幼苗,移栽到装有营养土的培养皿中,置于生长室培养。培养室各生长参数如下:光周期为 14 h 光照/10 h 黑暗,昼/夜温度为 26 ℃/22 ℃,光照强度为 800 μmol·m^{-2}·s^{-1},相对湿度为 75%。

1.2 试验处理

当杜梨幼苗长出 3~4 片真叶时,挑选长势良好且一致的幼苗,分别浇灌不同浓度 NaCl 或 PEG-6000 溶液进行盐或干旱胁迫处理。在盐胁迫处理中,随机选取 4 组梨苗,并参照在桃幼苗上实施盐胁迫处理的 NaCl 浓度[13]进行设定,即分别浇灌质量浓度为 0、3、6 和 12 g·L^{-1}的 NaCl 溶液,分别记为 CK、S1、S2 和 S3;在干旱胁迫处理中,随机选取 4 组梨苗,并依据在毛竹幼苗干旱胁迫处理时所采用的 PEG-6000 浓度[14]进行设置,即分别浇灌质量浓度为 0、50、100 和 200 g·L^{-1}的 PEG-6000 溶液,分别记为 CK、D1、D2 和 D3。试验所用试剂均购自上海国药集团化学试剂有限公司。每个处理均随机选取 10 株杜梨幼苗,设置 3 次重复。盐胁迫和干旱胁迫处理溶液每隔 5 d 更换 1 次,单株杜梨幼苗的施用量为 20 mL。

1.3 生长指标的测定

1.3.1 样品采集和生长参数的测定 处理结束后,使用 PowerShot Pro 1 相机(佳能,日本)拍摄杜梨幼苗地上部和地下部表型生长状态。分别选取表型症状典型的幼苗根、茎、叶进行生长指标的测定。用电子分析天平(FA2204N,上海菁海仪器有限公司)称量根系、叶片和茎的鲜重,用直尺测量植株的茎和株高。

1.3.2 叶绿素含量的测定 分别选取表型症状典型的幼苗新鲜叶片,用去离子水洗净后擦干,并使用打孔器(直径 1 cm)将其制成小圆片(避开主叶脉)。准确称取 0.2 g 样品于洁净研钵中,加入 10 mL 85%(体积分数)丙酮研磨 5 min,随后将匀浆过滤至 25 mL 的容量瓶,用 85%丙酮定容,过夜,最后利用 UV-1800 分光光度计分别在 663 和 644 nm 波长下测定不同处理溶液的吸光值。提取液中叶绿素 a 和叶绿素 b 含量(mg·g^{-1})分别通过公式进行计算:叶绿素 a 含量 = $1.07D_{663} - 0.094D_{644}$;叶绿素 b 含量 = $1.77D_{644} - 0.280D_{663}$;总叶绿素含量=叶绿素 a 含量+叶绿素 b 含量。

1.3.3 根系活力的测定 根系活力采用 TTC 方法[15]进行测定。

1.3.4 根系构型的测定 分别选取表型症状典型的幼苗,用去离子水把根系冲洗干净。使用根系扫描仪(Phantom 9900 XL,上海中晶科技有限公司)对根系样品进行扫描后,借助 LA-S 根系分析仪系统软件对扫描所得图片进行根系构型分析,计算根系根长、根系表面积、根系体积、根系直径及根系数量。

1.4 数据分析

试验选取表型症状典型的材料并进行处理,最终测得的所有数据均表示为平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$, $n=3$)。利用 SPSS 25.0 软件对数据进行统计分析,使用 Duncan's 多重检验法对样本之间的差异进行统计学比较。利用 GraphPad Prism 9 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同胁迫对杜梨幼苗表型生长的影响

如图 1 所示,盐胁迫与干旱胁迫对杜梨幼苗表型生长具有明显影响。随着盐和干旱胁迫程度的加重,杜梨幼苗叶面由正常的绿色逐渐转变为淡绿色或黄色,表明叶片正经历不同程度的逆境响应。在正常条件下,杜梨幼苗根系发育良好,数量多且长度较长;而在受到盐或干旱胁迫时,根系生长受到明显抑制,其长度和数量均有明显减少。

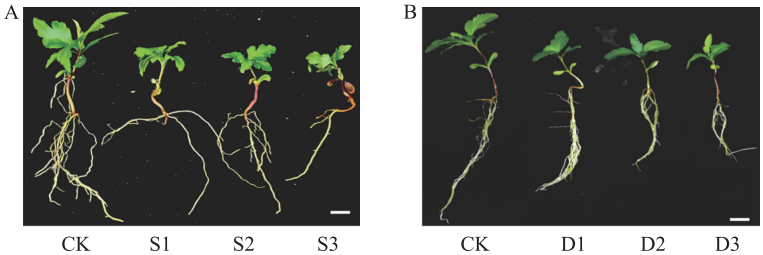

图 1 不同程度盐胁迫(A)和干旱胁迫(B)对杜梨幼苗表型生长的影响

Fig. 1 Effects of salt stress(A)and drought stress(B)at different degrees on the phenotype growth of *Pyrus betulaefolia* seedlings

CK 为对照组;S1、S2、S3 分别表示盐浓度为 3、6 和 12 g·L^{-1}的处理;D1、D2、D3 分别表示 PEG-6000 浓度为 50、100 和 200 g·L^{-1}的处理。下同。CK represents the control group;S1,S2,S3 indicate the treatments with salt concentrations of 3,6 and 12 g·L^{-1},respectively;D1,D2,D3 indicate treatment groups with PEG-6000 concentrations of 50,100 and 200 g·L^{-1},respectively. The same as follows. Scale bar=1 cm.

2.2　不同胁迫对杜梨幼苗地上部生长的影响

如图 2 所示,在干旱和盐胁迫条件下,幼苗的株高和叶片数量均发生了明显变化。在盐胁迫下,与对照组(CK)相比,S1、S2 和 S3 处理中幼苗的株高分别显著降低 32.6%、52.8%和 57.3%(P<0.05)。其中,S1 和 S2 处理叶片数量无显著变化,而 S3 处理叶片数量显著减少,为 31.25%。在干旱胁迫下,与 CK 相比,D1、D2 和 D3 处理幼苗的株高分别显著降低 27.8%、44.4%和 53.3%,且各处理的叶片数量均降低 31.58%。

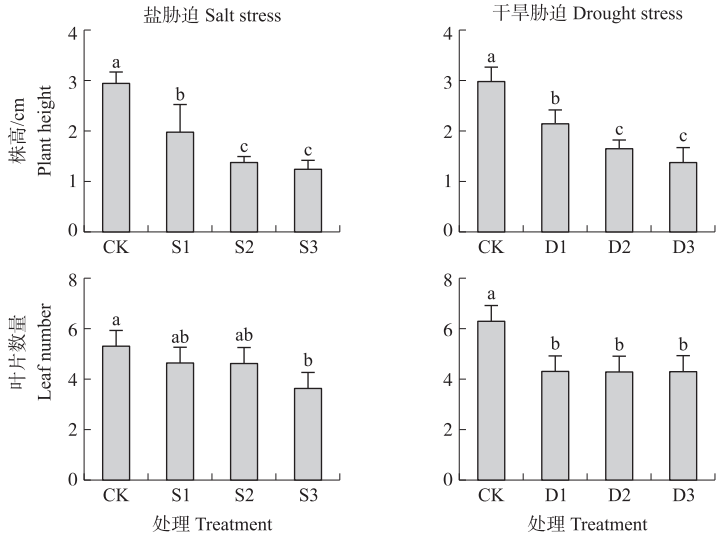

图 2　不同程度盐胁迫和干旱胁迫对杜梨幼苗株高和叶片数量的影响

Fig. 2　Effects of salt stress and drought stress at different degrees on plant height and leaf number of *P. betulaefolia* seedlings

不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same as follows.

2.3　不同胁迫对杜梨幼苗鲜重的影响

如图 3 所示,在盐胁迫处理中,杜梨幼苗经 S1、S2 和 S3 处理后,与 CK 相比,其地下部鲜重分别显著降低 61.5%、72.6%和 76.1%,而地上部鲜重分别显著降低 38.6%、61.2%和 71.6%。在干旱胁迫处理中,杜梨幼苗经 D1、D2 和 D3 处理后,与 CK 相比,其地下部鲜重分别降低 11.1%、36.9%和 73.1%,而地上部鲜重

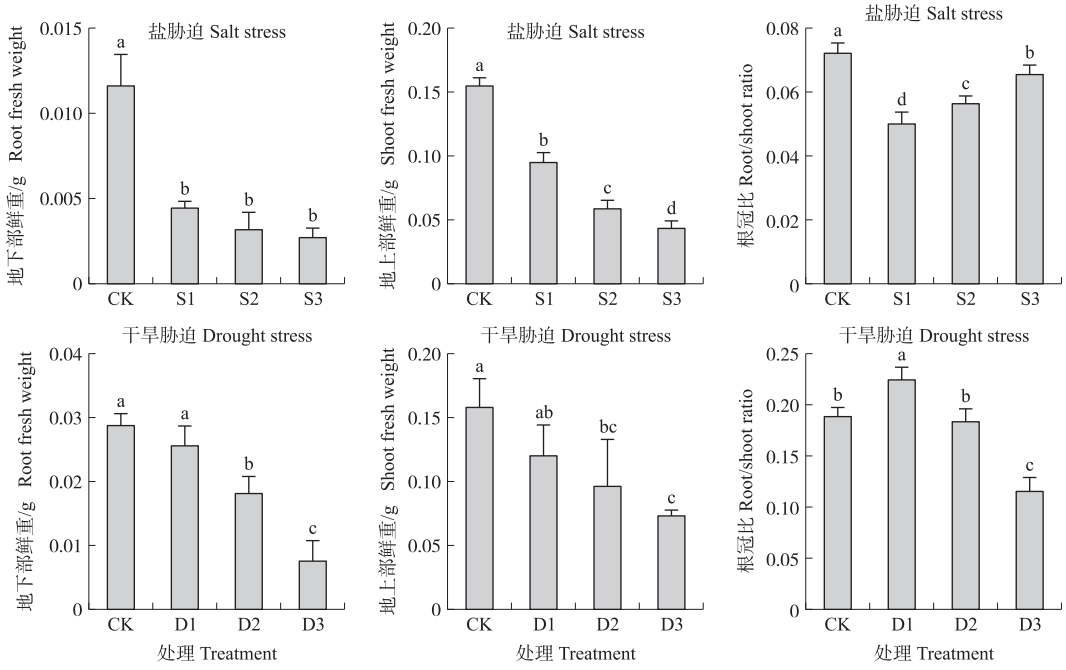

图 3　不同程度盐胁迫和干旱胁迫对杜梨幼苗鲜重及根冠比的影响

Fig. 3　Effects of salt stress and drought stress at different degrees on the fresh weight and root/shoot ratio of *P. betulaefolia* seedlings

分别降低 23.9%、39.0%和 53.5%。此外,当杜梨幼苗遭受盐胁迫时,根冠比呈先下降后上升的趋势,而幼苗遭受干旱胁迫时,根冠比呈先上升后下降的趋势。综上,随着盐胁迫和干旱胁迫程度的加剧,杜梨幼苗地上部和地下部的鲜重、根冠比均受到显著影响。

2.4 不同胁迫对杜梨幼苗叶绿素含量的影响

如图 4 所示,在盐胁迫处理中,经 S1、S2 和 S3 处理后,与 CK 相比,其叶绿素含量分别显著降低 14.3%、20.1%和 23.6%;而在干旱胁迫处理中,经 D1、D2 和 D3 处理后,与 CK 相比,其叶绿素含量分别显著降低 16.6%、24.0%和 30.6%。

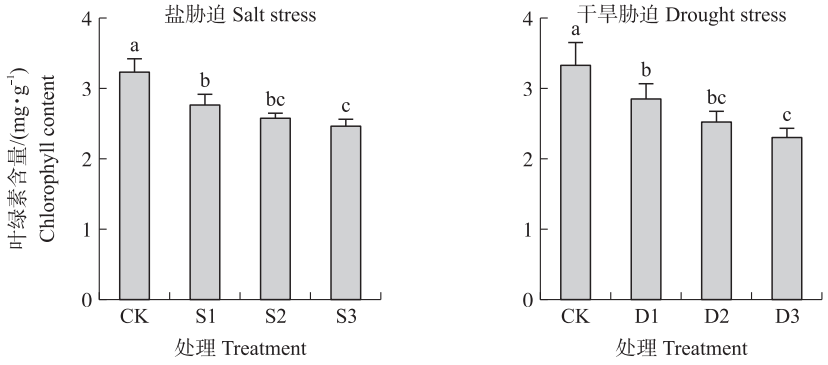

图 4 不同程度盐胁迫和干旱胁迫对杜梨幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effects of salt stress and drought stress at different degrees on the chlorophyll contents of leaves of *P. betulaefolia* seedlings

2.5 不同胁迫对杜梨幼苗根系活力的影响

如图 5 所示,在盐胁迫处理中,经 S1、S2 和 S3 处理后,与 CK 相比,杜梨幼苗的根系活力分别显著降低 37.5%、46.3%和 81.0%。而在干旱胁迫处理后,随着胁迫程度的加剧,与 CK 相比,D1 处理的根系活力未发生显著变化,而 D2 和 D3 处理则分别显著降低 45.7%和 67.3%。这些结果表明,盐胁迫和干旱胁迫均对杜梨幼苗根系活力产生了抑制作用。

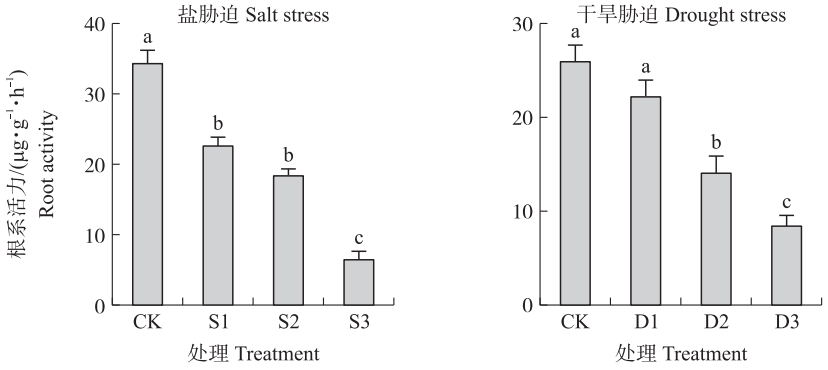

图 5 不同程度盐胁迫和干旱胁迫对杜梨幼苗根系活力的影响

Fig. 5 Effects of salt stress and drought stress at different degrees on the root activity of *P. betulaefolia* seedlings

2.6 不同胁迫对杜梨幼苗根系构型的影响

如图 6 所示,在盐胁迫处理下,杜梨幼苗的根系生长发育受到显著抑制,表现为根系长度、体积、表面积、投影面积及根系数量均明显减少。与 CK 相比,S1、S2 和 S3 处理的根系长度分别缩短 42.4%、47.7%和 80.0%,而根系平均直径没有显著变化;根系体积则分别减少 52.2%、50.1%和 73.8%;根系表面积分别减少 70.9%、79.5%和 78.8%;根系投影面积分别减少 54.7%、54.0%和 77.8%;根系数量分别减少 36.7%、46.7%和 72.5%。

如图 7 所示,在干旱胁迫条件下,杜梨幼苗根系生长呈现出较为复杂的变化。就根系长度而言,D1 处理较 CK 增加 19.82%,而 D2 和 D3 处理则分别减少 24.87%和 41.78%。干旱胁迫下根系平均直径和体积呈先降低后增加再降低的趋势,其中 D2 处理的平均直径与 CK 无显著差异,而 D1 和 D3 处理分别减少 20.74%和 17.78%;D1、D2 和 D3 处理根系体积分别减少 41.06%、18.68%和 70.08%。此外,D1 处理的根系

表面积、投影面积和根系数量与 CK 相比无显著变化,而 D2 和 D3 处理根系表面积分别降低 24.13%和 43.97%,投影面积分别减少 15.17%和 67.7%,根系数量则分别减少 20.51%和 45.51%。综上,盐胁迫和干旱胁迫均对杜梨幼苗的根系构型产生了显著影响。

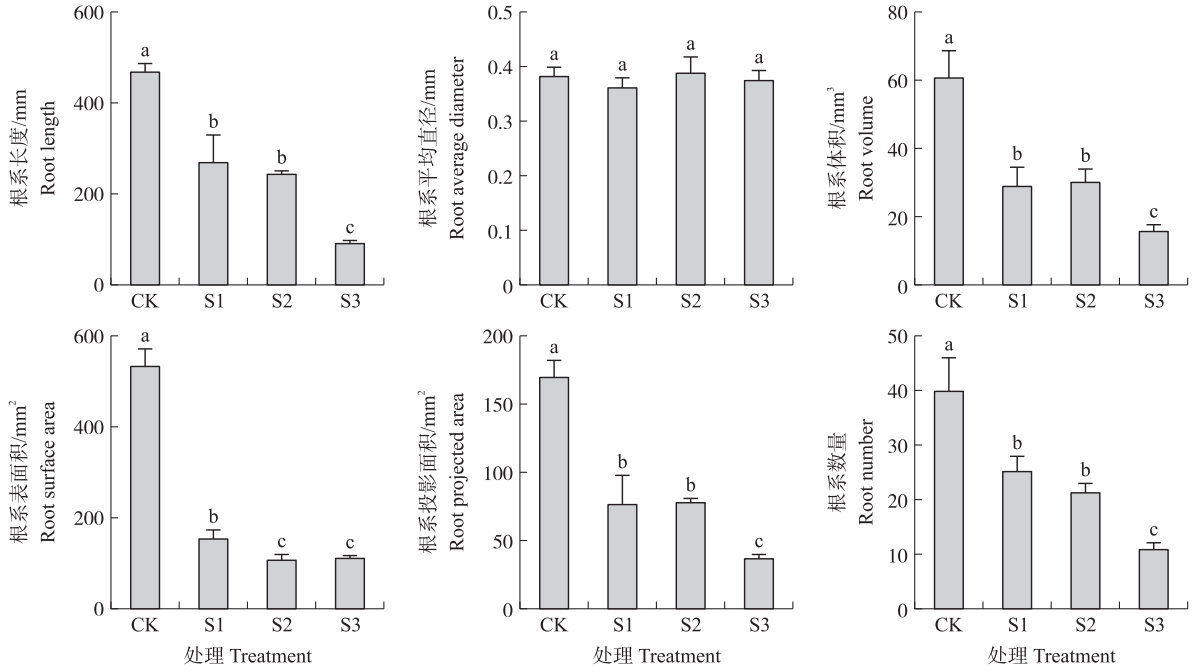

图 6　不同程度盐胁迫对杜梨幼苗根系构型的影响

Fig. 6　Effects of salt stress at different degrees on the root architecture of *P. betulaefolia* seedlings

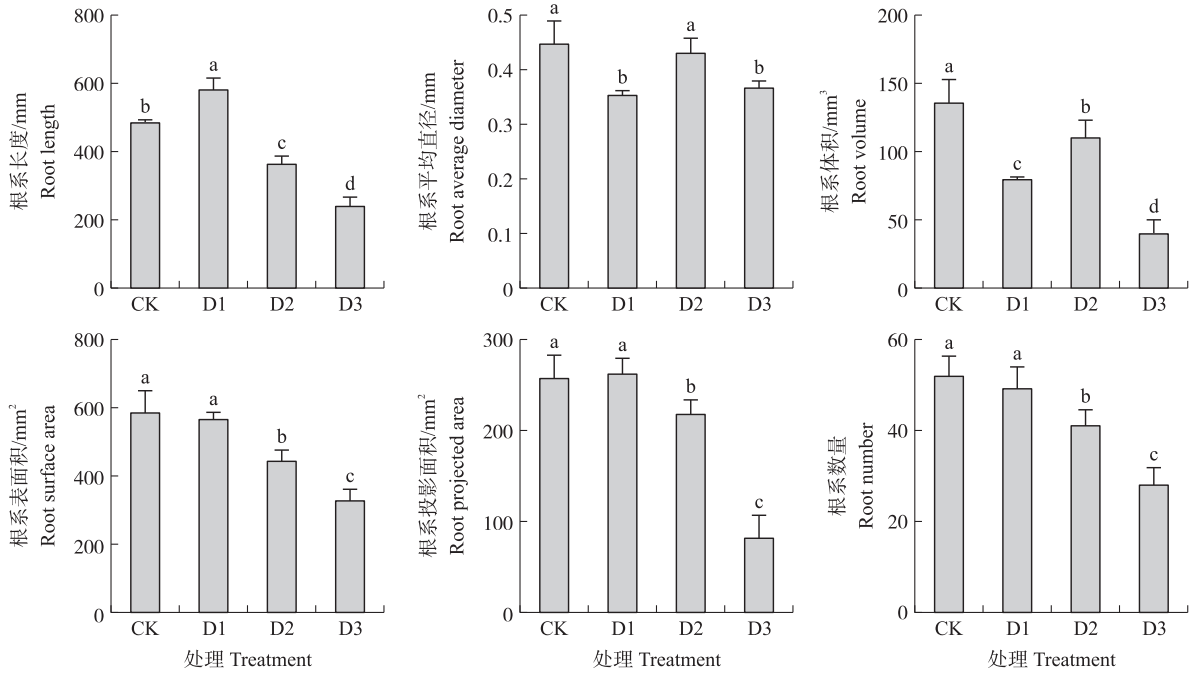

图 7　不同程度干旱胁迫对杜梨幼苗根系构型的影响

Fig. 7　Effects of drought stress at different degrees on the root architecture of *P. betulaefolia* seedlings

3　讨论与结论

3.1　盐胁迫对杜梨幼苗生长和根系特性的影响

植物盐胁迫通过干扰细胞膜完整性,增加通透性,引起电解质外泄、离子失衡和代谢紊乱等影响其生理过程[16]。根系作为感知土壤盐分的主要器官,不仅吸收水分和养分,也是盐胁迫信号转导的起始部位[17]。根据盐浓度和作用时间,植物通过调控多层次生理生化机制维持正常功能。例如,在轻度盐胁迫

(50 mmol·L^{-1} NaCl)条件下,翠竹根系迅速感知盐分上升,积累有机渗透调节物以降低细胞水势,并激活抗氧化防御系统,同时关闭部分叶片气孔以减少水分蒸腾,此时,叶片可能出现轻微卷曲或短暂萎蔫,根系活力下降约 20%[18]。本研究中,杜梨幼苗在 3 g·L^{-1} NaCl(51.3 mmol·L^{-1})处理后,叶片略显萎蔫,根系活力下降 37.5%,表明其响应阈值可能低于 50 mmol·L^{-1} NaCl。在中度盐胁迫(100 mmol·L^{-1} NaCl)条件下,幼苗茎粗和根系干重明显下降,生物量积累遭遇系统性抑制[19]。杜梨幼苗在 6 g·L^{-1} NaCl 处理后,叶绿素显著下降 20.1%,根系生长受抑,其响应阈值与其他作物相近。在重度盐胁迫(200 mmol·L^{-1} NaCl)条件下,随着离子毒害和代谢紊乱加剧,细胞内酶活性丧失、光合系统崩溃,叶片发生褐变坏死,根系活力骤降[20]。本研究中,杜梨幼苗在 12 g·L^{-1} NaCl 处理后,叶片枯萎,根系生长受阻且活力下降达 81%,表明其重度盐胁迫响应阈值与其他作物一致。

根系构型作为植物适应胁迫环境的关键形态特征,受遗传调控与环境因子的动态互作[21]。盐渍条件下,根系通过抑制主根伸长、减少侧根发生及降低根毛密度等策略应对离子毒害与渗透胁迫[22]。研究发现,盐胁迫显著抑制根系生长。例如,紫小麦在 150 mmol·L^{-1} NaCl 胁迫下,根系长度和表面积分别下降 71%和 80%[23];玉米幼苗在 2.0% NaCl 处理中,根长和鲜重分别下降 33.17%和 50.29%[24];垂丝海棠在 2% NaCl 胁迫下,根系长度、根系表面积和根系数量分别显著下降 47.24%、18.63%和 52.53%[25]。本研究中,杜梨幼苗在 12 g·L^{-1} NaCl 胁迫处理下,根系总长度、表面积和根系数量分别比对照下降 80.0%、78.8%和 72.5%,表明盐胁迫对根系构型的破坏具有跨物种普遍性。

根系活力作为评估植物生理功能的核心指标,其衰退直接反映盐胁迫对水分吸收与营养运输的损伤效应。当 NaCl 浓度超过 0.4%时,香石竹的根系活力开始迅速下降,且随着盐浓度的不断增加而迅速下降至 40%以下[26]。当微咸水矿化度大于 3.5 g·L^{-1}时,西瓜幼苗的根系吸收能力会受到明显抑制;当矿化度达到 4.0 和 4.5 g·L^{-1}时,根系活力分别显著降低 43.46%和 53.76%[27]。本试验中,杜梨幼苗遭受盐胁迫(12 g·L^{-1} NaCl)后,根系活力显著下降 81%,与上述物种盐害响应规律一致,表明高盐胁迫环境可能通过破坏根细胞膜系统完整性,引发 Na^+/K^+ 离子稳态失衡,导致渗透调节功能丧失,进而系统性抑制植株生长。

3.2 干旱胁迫对杜梨幼苗生长和根系特性的影响

根系通过代谢重编程与碳分配优化,动态调节形态特征以应对干旱胁迫[28]。研究表明,干旱强度阈值调控根系生长发育,如藜麦在 5% PEG 处理下根生物量增加,而 10% PEG 处理则导致根长、体积指标分别下降 21.9%、26.7%[29]。甘草幼苗在 5%干旱胁迫下会促进胚根生长,而 11%胁迫强度引发根长与胚轴宽等相关指标显著降低[30]。本研究中,杜梨幼苗在 50 g·L^{-1} PEG-6000 胁迫下根系总长度增加 19.82%,呈现适应性生长策略,但当胁迫强度增至 200 g·L^{-1}时,总根系长度、根系表面积、根系体积、根系数量等形态参数比对照组下降 17.78%~70.08%。该结果表明,干旱胁迫下杜梨幼苗通过表型可塑性建立动态适应策略,其临界阈值为 100~200 g·L^{-1} PEG-6000。当胁迫浓度超过这一阈值时,根系渗透调节能力崩溃,植株生长受到不可逆抑制。

干旱胁迫通过限制资源供给触发植物“生存优先”机制,经 ABA 信号通路与碳代谢调控实现光合产物再分配,引发生物量器官特异性抑制[31]。研究表明,干旱胁迫对植物生物量的抑制呈现器官特异性差异。木本植物(如‘新林 1 号’杨树)遭遇干旱胁迫后,地上部干重下降 15.91%,而根系干重降幅达 27.84%,表明地下器官对水分亏缺更为敏感[32]。而草本植物(如大白菜)遭遇干旱胁迫后,其地上部鲜重、干重分别下降 54.40%和 75.61%,揭示物种间生物量可塑性的差异[33]。本试验中,杜梨幼苗在梯度干旱胁迫下,地上部鲜重降幅(23.9%~53.5%)显著低于根系(11.1%~73.1%),与杨树研究结果[32]形成对照,表明蔷薇科木本植物可能优先维持地上部水分稳态以保障冠层功能。这些研究结果表明,植物通过抑制生长速率、重新编程资源分配(优先供给渗透调节与抗氧化系统),形成适应干旱胁迫的生存策略。

土壤水分有效性是调控根系生理活性的关键环境因子,其动态变化通过质膜透性修饰和线粒体功能调节影响根系的代谢活性[34]。当幼苗土壤相对含水量从 10%下降至 5%时,根系活力会急剧下降[35]。例如文冠果幼苗持续干旱处理 10 d 后,其根系活力降幅达 75.34%[36]。系统发育分析揭示木本与草本植物根系活力变化在响应干旱胁迫过程中具有不同表现,木本植物(如油桃)遭遇干旱胁迫后,根系活力下降 54.26%[37],而草本植物(如大麦)在干旱胁迫处理后,根系活力下降 29.2%~47.6%[38]。本研究中,杜梨幼苗在 50 g·L^{-1}PEG-6000(D1 处理)下根系活力无显著变化,但当胁迫强度增至 200 g·L^{-1}(D3 处理)时,根

系活力降幅达 67.3%。这些结果表明,不同物种根系对干旱胁迫的响应具有显著系统发育特征,不仅揭示了植物在进化过程中对干旱环境适应能力的分化,还暗示植物根系形态、功能及分子调控方面存在明显的耐旱策略差异。

参考文献 References:

[1] 李慧,张雨峰,李晓刚,等. 全基因组 DNA 甲基化和转录组联合分析鉴定杜梨耐盐相关转录因子[J]. 中国农业科学,2023,56(7):1377-1390.
Li H,Zhang Y F,Li X G,et al. Identification of salt-tolerant transcription factors in the roots of *Pyrus betulaefolia* by the association analysis of genome-wide DNA methylation and transcriptome[J]. Scientia Agricultura Sinica,2023,56(7):1377-1390(in Chinese with English abstract).

[2] 张志晓,曾丽蓉,赵嘉菱,等. 五种苹果砧木的生长及生理特性对盐胁迫的响应[J]. 北方园艺,2017(3):19-25.
Zhang Z X,Zeng L R,Zhao J L,et al. Response to salt stress of growth and physiological characteristic of five apple rootstocks[J]. Northern Horticulture,2017(3):19-25(in Chinese with English abstract).

[3] Dai A G. Drought under global warming:a review[J]. WIREs Climate Change,2011,2(1):45-65.

[4] 张兴华,高杰,杜伟莉,等. 干旱胁迫对玉米品种苗期叶片光合特性的影响[J]. 作物学报,2015,41(1):154-159.
Zhang X H,Gao J,Du W L,et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics of maize hybrids at seedling stage[J]. Acta Agronomica Sinica,2015,41(1):154-159(in Chinese with English abstract).

[5] Liang B W,Shi Y,Yin B Y,et al. Effect of different dwarfing interstocks on the vegetative growth and nitrogen utilization efficiency of apple trees under low-nitrate and drought stress[J]. Scientia Horticulturae,2022,305:111369.

[6] 马涛,罗晨梦,李思佳,等. 木本植物响应干旱胁迫的研究现状[J]. 四川大学学报(自然科学版),2023,60(5):19-28.
Ma T,Luo C M,Li S J,et al. Current research status of woody plants responding to drought stress[J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition),2023,60(5):19-28(in Chinese with English abstract).

[7] Pandey R,Garg N. High effectiveness of *Rhizophagus irregularis* is linked to superior modulation of antioxidant defence mechanisms in *Cajanus cajan*(L.)Millsp. genotypes grown under salinity stress[J]. Mycorrhiza,2017,27(7):669-682.

[8] 程龙,韩占江,石新建,等. 白茎盐生草种子萌发特性及其对盐旱胁迫的响应[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(3):131-136.
Cheng L,Han Z J,Shi X J,et al. Seed germination characteristics and the response to salt and drought stress in *Halogeton arachnoideus* Bieb[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2015,29(3):131-136(in Chinese with English abstract).

[9] Rai G K,Khanday D M,Choudhary S M,et al. Unlocking nature's stress buster:abscisic acid's crucial role in defending plants against abiotic stress[J]. Plant Stress,2024,11:100359.

[10] Zhang D J,Tong C L,Wang Q S,et al. Mycorrhizas affect physiological performance,antioxidant system,photosynthesis,endogenous hormones,and water content in cotton under salt stress[J]. Plants,2024,13(6):805.

[11] Han L J,Hu L L,Lv Y Y,et al. Effects of *Bacillus amyloliquefaciens* QST713 on mineral nutrient utilization of alfalfa(*Medicago sativa* L.)under drought stress[J]. Agronomy,2024,14(8):1793.

[12] 张洁,高琛稀,宋春晖,等. 干旱胁迫对不同苹果砧穗组合根系形态与生理特性的影响[J]. 西北农业学报,2015,24(12):92-99.
Zhang J,Gao C X,Song C H,et al. Effects of drought stress on root morphological and physiological characteristics of different apple rootstock-scion combinations[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2015,24(12):92-99(in Chinese with English abstract).

[13] Sun M X,Liu X L,Gao H F,et al. Phosphatidylcholine enhances homeostasis in peach seedling cell membrane and increases its salt stress tolerance by phosphatidic acid[J]. International Journal of Molecular Sciences,2022,23(5):2585.

[14] 程明圣,邹欢欢,黄孝凤,等. 干旱与盐胁迫对毛竹幼苗生长及生理的影响[J]. 江西农业大学学报,2021,43(4):842-852.
Cheng M S,Zou H H,Huang X F,et al. Effects of drought and salt stress on growth and physiology of *Phyllostachys edulis* seedlings[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis(Natural Sciences Edition),2021,43(4):842-852(in Chinese with English abstract).

[15] 朱秀云,梁梦,马玉. 根系活力的测定(TTC 法)实验综述报告[J]. 广东化工,2020,47(6):211-212.
Zhu X Y,Liang M,Ma Y. A review report on the experiments for the determination of root activity by TTC method[J]. Guangdong Chemical Industry,2020,47(6):211-212(in Chinese with English abstract).

[16] 李彦,张英鹏,孙明,等. 盐分胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J]. 中国农学通报,2008,24(1):258-265.
Li Y,Zhang Y P,Sun M,et al. Research advance in the effects of salt stress on plant and the mechanism of plant resistance[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2008,24(1):258-265(in Chinese with English abstract).

[17] Tan J L,Ben-Gal A,Shtein I,et al. Root structural plasticity enhances salt tolerance in mature olives[J]. Environmental and Experimental Botany,2020,179:104224.

[18] 万贤崇,宋永俊. 盐胁迫及其钙调节对竹子根系活力和丙二醛含量的影响[J]. 南京林业大学学报,1995,19(3):16-20.
Wan X C,Song Y J. Effects of salt stress and calcium regulation on root activity and MDA content of bamboo[J]. Journal of Nanjing Forestry University,1995,19(3):16-20(in Chinese with English abstract).

[19] 田吉,张芸香,樊兴路,等. 文冠果幼苗对盐胁迫的生长策略响应和耐盐性阈值研究[J]. 中国农学通报,2016,32(19):18-22.
Tian J,Zhang Y X,Fan X L,et al. Growth strategy response to salt stress and salt tolerance threshold of *Xanthocera ssorbifolia* Bunge seedlings[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2016,32(19):18-22(in Chinese with English abstract).

[20] 赵天然,车路平,谢会成,等. 流苏树对 NaCl 的生理响应及耐盐阈值分析[J]. 植物生理学报,2022,58(10):1935-1945.

Zhao T R,Che L P,Xie H C,et al. Physiological response and salinity tolerance threshold analysis of *Chionanthus retusus* to NaCl stress[J]. Plant Physiology Journal,2022,58(10):1935-1945(in Chinese with English abstract).

[21] Fan S G,Amombo E,Yin Y L,et al. Root system architecture and genomic plasticity to salinity provide insights into salt-tolerant traits in tall fescue[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2023,262:115315.

[22] Julkowska M M,Koevoets I T,Mol S,et al. Genetic components of root architecture remodeling in response to salt stress[J]. The Plant Cell,2017,29(12):3198-3213.

[23] 朱妍钰,汪军成,姚立蓉,等. 盐胁迫对小麦籽粒萌发中淀粉分解及苗期根系生长的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2024,59(3):49-54,61.
Zhu Y Y,Wang J C,Yao L R,et al. Effect of salt stress on starch degradation in wheat seed germination and root system at seedling stage[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2024,59(3):49-54,61(in Chinese with English abstract).

[24] 袁海,何鹏飞,武君洁,等. 盐胁迫对耐盐和盐敏感玉米幼苗生长和生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(19):86-89.
Yuan H,He P F,Wu J J,et al. Effects of salt stress on growth and biological traits of salt-tolerant and salt-sensitive maize seedlings[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2019,47(19):86-89(in Chinese with English abstract).

[25] 朱燕芳,王延秀,陈佰鸿,等. 四种苹果砧木幼苗对 NaCl 胁迫的生理响应、根系生长及耐盐性评价[J]. 甘肃农业大学学报,2017,52(2):48-53.
Zhu Y F,Wang Y X,Chen B H,et al. Effect of NaCl stress on growth and physiological characteristics of four kinds of apple stock[J]. Journal of Gansu Agricultural University,2017,52(2):48-53(in Chinese with English abstract).

[26] 杨凯,孙迎坤,谭雯,等. 盐胁迫对香石竹种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 北方园艺,2013(22):86-88.
Yang K,Sun Y K,Tan W,et al. Effects of salt stress on seeds germination and seedling growth of carnation[J]. Northern Horticulture,2013(22):86-88(in Chinese with English abstract).

[27] 李雪芳,柳雪,王西娜,等. 盐胁迫对嫁接西瓜幼苗根系构型、活力及离子分配的影响[J]. 南方农业学报,2024,55(10):3084-3095.
Li X F,Liu X,Wang X N,et al. Effects of salt stress on root configuration,vitality and ion distribution in grafted watermelon seedlings[J]. Journal of Southern Agriculture,2024,55(10):3084-3095(in Chinese with English abstract).

[28] Pirnajmedin F,Majidi M M,Gheysari M. Root and physiological characteristics associated with drought tolerance in Iranian tall fescue[J]. Euphytica,2015,202(1):141-155.

[29] 姚天姿,赵子祎,秦曹瑜,等. 藜麦根系形态特征及生理特性对干旱胁迫的响应研究[J]. 现代农业科技,2024(7):37-41,46.
Yao T Z,Zhao Z Y,Qin C Y,et al. Response of morphological and physiological characteristics of quinoa root system to drought stress[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2024(7):37-41,46(in Chinese with English abstract).

[30] 张奥,张传领,薛焱,等. 碱、旱胁迫对乌拉尔甘草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草原与草坪,2025,45(1):173-181.
Zhang A,Zhang C L,Xue Y,et al. Effect of alkaline and drought stress on seed germination and seedling physiological characteristics of *Glycyrrhiza uralensis*[J]. Grassland and Turf,2025,45(1):173-181(in Chinese with English abstract).

[31] Wu G L,Du G Z. Relationships between seed size and seedling growth strategy of herbaceous plant:a review[J]. The Journal of Applied Ecology,2008,19(1):191-197.

[32] 尹鹏,沈佳佳,韩璐,等. 干旱胁迫对‘新林1号’杨生理生化的影响[J]. 东北林业大学学报,2024,52(4):1-8.
Yin P,Shen J J,Han L,et al. The effects of drought stress on the physiological and biochemical characteristics of *Polulus cathayana* × *canadansis*‘Xinlin 1’[J]. Journal of Northeast Forestry University,2024,52(4):1-8(in Chinese with English abstract).

[33] 张嘉悦,闫发,封越,等. 不同浓度 PEG 模拟干旱胁迫对大白菜种子萌发的影响[J]. 河北农业大学学报,2024,47(2):38-46.
Zhang J Y,Yan F,Feng Y,et al. Effects of different concentrations of PEG simulated drought stress on seed germination of Chinese cabbage[J]. Journal of Hebei Agricultural University,2024,47(2):38-46(in Chinese with English abstract).

[34] Liu R X,Zhou Z G,Guo W Q,et al. Effects of N fertilization on root development and activity of water-stressed cotton(*Gossypium hirsutum* L.) plants[J]. Agricultural Water Management,2008,95(11):1261-1270.

[35] 齐曼·尤努斯,木合塔尔·扎热,塔衣尔·艾合买提. 干旱胁迫下尖果沙枣幼苗的根系活力和光合特性[J]. 应用生态学报,2011,22(7):1789-1795.
Qiman·Yunus,Muhtar·Zari,Tayer·Ahmat. Root activity and photosynthetic characteristics of *Elaeagnus oxycarpa* seedlings under drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(7):1789-1795(in Chinese with English abstract).

[36] 李硕,李美玄,刘英卉,等. 干旱-复水处理对吉林文冠果幼苗生理特性和光合参数的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(18):134-143.
Li S,Li M X,Liu Y H,et al. Influences of drought-rewatering on physiological characteristics and photosynthetic parameters of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings in Jilin Province[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2023,51(18):134-143(in Chinese with English abstract).

[37] 尤超,沈虹,张营营,等. 油桃生理特性对水分胁迫的响应[J]. 江苏农业科学,2018,46(16):98-101.
You C,Shen H,Zhang Y Y,et al. Response of physiological characteristics of nectarine seedlings to water stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(16):98-101(in Chinese with English abstract).

[38] 郝晶,姚立蓉,汪军成,等. 不同基因型大麦苗期对干旱胁迫的响应及 *HvPIPs* 基因表达特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2023,41(4):41-50,60.
Hao J,Yao L R,Wang J C,et al. Response of different genotypes of barley to drought stress at seedling stage and analysis of *HvPIPs* gene expression characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2023,41(4):41-50,60(in Chinese with English abstract).

责任编辑:范雪梅