

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.005

引用格式:孙颖,苏世平,刘小娥,等.不同栽植处理对梭梭幼苗气孔形态及解剖结构的影响[J].草地学报,2026,34(1):43–51

SUN Ying, SU Shi-ping, LIU Xiao-e, et al. The Effects of Different Planting Treatments on Stomatal Morphology and Anatomical Structure of *Haloxylon ammodendron* Seedlings[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):43–51

不同栽植处理对梭梭幼苗气孔形态及解剖结构的影响

孙颖¹, 苏世平^{1*}, 刘小娥¹, 赵彦坤², 何彩³, 郑锡鹏¹

(1. 甘肃农业大学林学院, 甘肃兰州 730070; 2. 武威市石羊河林业总场, 甘肃武威 733000;

3. 武威市林业科学研究院, 甘肃武威 733000)

摘要:梭梭(*Haloxylon ammodendron*)是中国西北防风固沙,保护生态平衡的优良树种,但西北干旱荒漠区气候干燥、夏季高温严重影响了梭梭幼苗生长发育。为探究适宜梭梭幼苗生长的栽植方式,本研究以1年生梭梭幼苗为实验对象,设置5种不同剂量保水剂(0,1,2,3,4 g),4种栽植深度(20,40,60,80 cm)组合处理,研究不同栽植处理后梭梭的气孔形态和解剖结构的变化。结果表明:随着保水剂剂量和栽植深度的增加,梭梭幼苗气孔长度、气孔宽度、气孔面积、各解剖结构厚度均呈先上升后下降的趋势;气孔密度呈先下降后上升的趋势。其中,3g保水剂、60cm栽植深度处理,气孔长度、气孔宽度、气孔面积、同化枝直径、角质层、栅栏组织、贮水组织、维管柱厚度、导管孔径均最大,气孔密度均最小。说明施用适宜的栽植处理,能够为梭梭创造较好的生长环境,遭遇环境胁迫时,能提高植物抗逆性,有效缓解了胁迫对植物的影响。

关键词:保水剂;栽植深度;梭梭;气孔特征;解剖结构

中图分类号:S792.99

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0043-09

The Effects of Different Planting Treatments on Stomatal Morphology and Anatomical Structure of *Haloxylon ammodendron* Seedlings

SUN Ying¹, SU Shi-ping^{1*}, LIU Xiao-e¹, ZHAO Yan-kun², HE Cai³, ZHENG Xi-peng¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China; 2. Shiyanghe Forestry General Field, Wuwei, Gansu Province 733000, China; 3. Wuwei Academy of Forestry, Wuwei, Gansu Province 733000, China)

Abstract: *Haloxylon ammodendron* is an excellent tree species in northwest China for windproof/prevention, sand fixation, and ecological balance protection. However, the dry climate and high summer temperatures in the arid desert areas of northwest China severely affect the growth and development of *H. ammodendron* seedlings. To explore the suitable planting methods for the growth of the seedlings, this study used 1-year-old *H. ammodendron* seedlings as experimental subjects and set up 5 different doses of super absorbent polymers (0 g, 1, 2, 3, 4 g) and 4 planting depths (20, 40, 60, 80 cm) for combination treatments. The changes in stomatal morphology and anatomical structure of *H. ammodendron* after different planting treatments were studied. The results showed that with the increase of water retaining agent dosage and planting depth, the stomatal length, stomatal width, stomatal area, and thickness of various anatomical structures of the seedlings showed a trend of first increasing and then decreasing. The pore density shows a trend of first decreasing and then increasing. Stomatal length, stomatal width, stomatal area, diameter of assimilating branch, stratum corneum, palisade tissue, water storage tissue, vascular column thickness, and duct aperture were all the largest, while stomatal

收稿日期:2025-03-27;修回日期:2025-05-25

基金项目:甘肃省科技计划项目(23YFFA0066);甘肃农业大学青年导师扶持基金项目(GAU-QDFC-2023-09);国家自然科学基金(32560400);甘肃省科技重大专项(25ZDWA007)资助

作者简介:孙颖(1997-),女,汉族,湖南常德人,硕士研究生,主要从事林木种质资源方向研究,E-mail:2947985856@qq.com;*通信作者 Author for correspondence E-mail:susp008@163.com

density was the smallest when treated with 3g super absorbent polymer and 60cm planting depth. The application of suitable planting treatments can create a better growth environment for *H. ammodendron*. When facing environmental stress, it can improve plant stress resistance and effectively alleviate the impact of stress on plants.

Key words: Super absorbent polymer; Planting depth; *Haloxylon ammodendron*; Stomatal characteristics; Anatomical structure

近年来,全球气候变暖和极端气候频发导致了干旱区面积不断扩大,加剧了荒漠化程度,未来干旱荒漠区生态安全保障面临着严峻的挑战^[1]。干旱荒漠区占全球陆地总面积的 18.5%,全国荒漠化土地总面积 26 115.93 万 hm^2 , 占国土总面积的 27.20%。其中,甘肃地区荒漠化土地面积为 1950.20 万 hm^2 , 占全国荒漠化土地总面积的 7.47%^[2]。干旱荒漠区降水量少蒸发量大,且地下水位远大于植物根系分布深度,进而植物对降水和地下水的利用极其有限^[3-5]。水分是影响干旱荒漠区植物生长和植被群落更新的重要限制因素,减少水分损失,提高土壤水分的利用率是荒漠化防治过程中的主要任务之一^[6]。保水剂又称抗旱保水剂或农林保水剂,是一种吸水力极强的功能性高分子材料。在短时间内吸收自身重量数百倍的水分后形成固体凝胶颗粒,并能抑制水分蒸发、渗漏,将水分储存在土壤中,从而维持局部恒湿环境^[7]。保水剂可以大幅度提高土壤含水量^[8],改善土壤容重、孔隙度、团粒结构、渗透性等土壤物理性质^[9-10]。在植物遭遇干旱胁迫时,保水剂能缓慢释放水分,以维持植物正常生理代谢^[11-12]。因此,在荒漠植被的繁育过程中,可以利用保水剂抑制水分通过土壤损失,减少无效蒸腾,提高土壤含水量^[13],确保植物在干旱逆境中也可吸收水分维持正常生长^[14-15]。高温导致植物蒸腾加速,影响植物根系活力、抑制植物正常水分吸收,是限制干旱荒漠地区植物生长发育的另一因素。干旱荒漠区日照充足,夏季近地面和地表温度明显高于植物正常生长所需的温度^[16],而夏季土壤温度随土层加深而呈现递减的趋势^[17],因此,适当增加栽植深度能有效避开夏季高温层,可确保根系活力和植物正常水分吸收,从而提高植物成活率^[18-19]。

梭梭 (*Haloxylon ammodendron*) 属于藜科 (Chenopodiaceae) 梭梭属 (*Haloxylon*) 灌木或小乔木^[20]。梭梭在中国主要分布于西北荒漠区、半荒漠区以及干旱盐碱区^[21],具有很强的抗旱、抗盐碱以及抗风沙能力^[22],对改善环境、防风固沙、维护干旱荒漠区的生态平衡和防止沙漠化方面具有重要作用^[23],是干旱荒漠区防风固沙,保护生态平衡的优

良树种^[24]。目前,在荒漠区植被恢复过程中,对梭梭抗旱耐盐等方面研究较多,主要集中于种子萌发^[25]、光合和叶绿素荧光特性^[26-27]等方面。而在遭遇环境胁迫时,植物的气孔形态以及解剖结构也会响应环境变化。因此,研究不同栽植处理下梭梭幼苗气孔形态及解剖结构的变化。旨在探索出最适宜梭梭的生长发育的栽植处理,从而提高干旱荒漠区的植被覆盖度,对荒漠化防治过程中梭梭种群的繁殖和保护具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本试验地位于甘肃省武威市林业技术服务中心的良种繁育基地 (102.7°E, 38.05°N), 地处甘肃省西部,河西走廊东端,属于温带大陆性干旱气候,冬寒夏暑、气候干燥、太阳辐射强。碱性沙质土,质地疏松,热交换快,温差大。根据 2022 年武威市气象资料显示,武威市年平均气温 7.1℃,最热月 7 月平均气温 20.5℃,极端最高气温 41.7℃。年平均降水量 262.9 mm,年蒸发量 1996.6 mm。

1.2 试验材料

植物材料选取长势良好且基本一致的 1 年生梭梭幼苗,甘肃民勤本地苗木,高 40 cm 以上、地径 0.3 cm,根长 30 cm 以上。保水剂 (河北燕兴化工有限公司生产) 主要成分为丙烯酰胺、丙烯酸甲共聚物,吸水倍率 300~400 倍。试验过程中均按照说明使用。

1.3 试验设计

梭梭幼苗于 2024 年 3 月栽植。采用野外田间试验,穴状整地,栽植密度 0.8 m×0.8 m,栽植穴直径 30 cm。选取 4 种栽植深度 (20 cm、40 cm、60 cm、80 cm),将 5 种不同剂量保水剂 (0 g、1 g、2 g、3 g、4 g) 与 500 g 挖出土混合均匀后回填至穴底根部,随后栽植梭梭幼苗,同时根部预埋浇灌水管,各处理随机排列,回填表土确保幼苗地上部分至少保留 20 cm。

共栽植三块梭梭样地,每块样地 20 个处理各 10 株,共 600 株。定植后通过预埋水管直接浇灌到植株根部,每月浇灌一次,7 月后不再浇灌,任其自然生长。

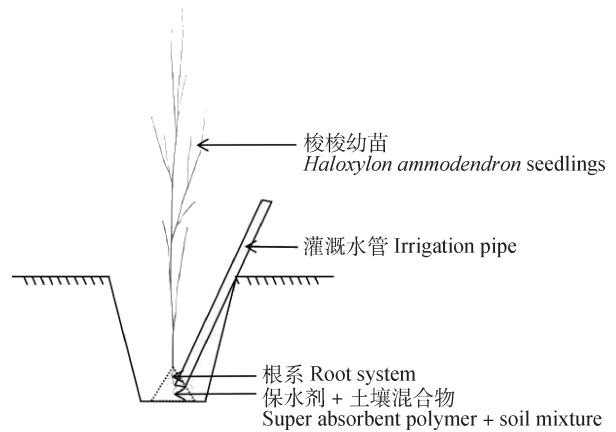


图 1 梭梭栽植示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shuttle planting

1.4 指标测定

于 2024 年 8 月进行梭梭采样。同化枝气孔形态和解剖结构采样选取无病害且同一高度的同化枝,用蒸馏水将表面冲洗干净后,截取中间段,立即放入 2.5 %戊二醛固定液和 FAA 固定液(酒精:福尔马林:冰醋酸=90:5:5)中进行固定,用于同化枝气孔形态和解剖结构测定。

同化枝气孔形态测定:将固定好的样品用磷酸钠缓冲液($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 值=7.2)清洗 3 次,用梯度乙醇脱水,100%叔丁醇置换 2 次。脱水后样品冷冻干燥处理,随后固定在电镜样品台上,离子溅射仪喷镀金属膜后,用 S-3400N 扫描电子显微镜观察

拍照,进行数据统计^[28]。每种处理三个重复,取 15 个数据平均值。

同化枝解剖结构测定:将取固定好的同化枝,用梯度乙醇脱水、透明、浸蜡、包埋后,用轮转式切片机横向切割同化枝,采用番红-固绿进行双重染色,中性树胶封片。Pannoramic 250FLASH 显微镜玻片扫描仪下观察选择有代表性的石蜡切片进行扫描,并记录同化枝的横切面特征。每种处理三个重复,取 15 个数据平均值。

1.5 数据处理

采用 ImageJ2x 软件测量梭梭同化枝气孔长度、气孔宽度、同化枝直径、角质层、栅栏组织、贮水组织、维管柱厚度和导管孔径,并计算出气孔面积和密度(气孔面积= $3.14\times 1/4\times$ 气孔长 $\times$ 气孔宽),采用 Microsoft Excel 2019 进行数据统计,SPSS25.0 软件进行双因素方差分析,Duncan 法在 0.05 水平上进行显著性检验,Origin2022 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同栽植处理对梭梭生长和生理特性影响的方差分析

栽植深度和保水剂剂量处理对梭梭气孔形态以及各解剖结构在处理间均有极显著差异($P<0.01$);保水剂剂量 $\times$ 栽植深度对气孔宽度、气孔面积、同化枝直径、贮水组织厚度、维管柱厚度、导管孔径交互作用极显著($P<0.01$)(表 1)。

表 1 不同栽植处理对梭梭气孔形态及解剖结构的影响(F 值)

Table 1 The effects of different planting treatments on the morphology and anatomical structure of stomata in *Haloxylon ammodendron* (F value)

项目 Item	气孔长度 Stomatal length/ μm	气孔宽度 Stomatal width/ μm	气孔面积 Stomatal area/ μm^2	气孔密度 Stomatal density/ (个 $\cdot\text{mm}^{-2}$)	同化枝直径 Diameter/ μm	角质层厚度 Cuticle thickness/ μm	栅栏组织厚度 Palisade tissue Thickness/ μm	贮水组织厚度 Water storage Thickness/ μm	维管柱厚度 Vascular cylinder Thickness/ μm	导管孔径 Vessel diameter/ μm
P	100.112**	156.521**	369.781**	45.036**	632.077**	14.968**	24.500**	137.767**	127.928**	45.093**
D	83.783**	73.061**	229.947**	43.100**	257.047**	13.140**	33.715**	66.930**	43.395**	14.848**
P $\times$ D	2.199*	6.152**	24.060**	0.369	6.755**	1.132	1.771	2.604**	4.959**	2.598**

注:P,保水剂剂量处理,D,栽植深度处理,P $\times$ D,保水剂剂量 $\times$ 栽植深度交互处理;*,代表差异显著($P<0.05$),**,代表差异极显著($P<0.01$)

Note: P, Dosage treatment of super absorbent polymer, D, Planting depth treatment, P $\times$ D, super absorbent polymer dosage $\times$ planting depth interactive treatment. *, meaning significant difference at the 0.05 level, **, the difference was very significant at the 0.01 level

2.2 不同栽植处理对梭梭气孔形态的影响

梭梭同化枝气孔在叶片表皮随机分布,由两个肾形保卫细胞和两个体积较大的副保卫细胞构成。

气孔呈椭圆形或长形半下陷,气孔室不发达(图 2)。不同栽植处理下,梭梭气孔形态均发生了不同程度的变化。

随着保水剂剂量和栽植深度的增加,气孔长度、宽度、面积均呈现先上升后下降的趋势,气孔密度均呈现先下降后上升的趋势(图3)。

气孔长度变化范围为 $5.80\sim 14.57\ \mu\text{m}$ 。从不同剂量保水剂来看,0 g处理最低,平均为 $7.34\ \mu\text{m}$ 。1~4 g处理分别比0 g显著增加了14.27%,34.67%,62.76%和36.88% ($P<0.05$);从不同栽植深度来看,20 cm处理最低,平均为 $7.96\ \mu\text{m}$ 。40~80 cm处理比20 cm处理显著增加了21.94%,42.97%和13.23% ($P<0.05$)(图3A)。

气孔宽度变化范围为 $1.81\sim 5.82\ \mu\text{m}$ 。0 g处理最低,平均为 $2.18\ \mu\text{m}$ 。1~4 g处理分别比0 g显著增加了10.45%,40.10%,97.02%和50.82% ($P<0.05$);20 cm处理最低,平均为 $2.56\ \mu\text{m}$ 。40~80 cm处理比20 cm处理显著增加了19.66%、

46.28%、9.97% ($P<0.05$)(图3B)。

气孔面积变化范围为 $8.33\sim 66.16\ \mu\text{m}^2$ 。0 g处理最低,平均为 $12.82\ \mu\text{m}^2$ 。1~4 g处理分别比0 g显著增加了24.25%,86.78%,222.57%和103.05% ($P<0.05$);20 cm处理最低,平均为 $16.65\ \mu\text{m}^2$ 。40~80 cm处理比20 cm处理显著增加了44.93%,109.27%和22.46% ($P<0.05$)(图3C)。

气孔密度变化范围为 $111.65\sim 326.03\ \text{个}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。0 g处理最高,平均为 $275.79\ \text{个}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。1~4 g处理分别比0 g显著降低了7.29%,20.24%,39.68%和26.32% ($P<0.05$);20 cm处理最高,平均为 $269.76\ \text{个}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。40~80 cm处理比20 cm处理显著降低了18.54%,34.11%和14.90% ($P<0.05$)(图3D)。

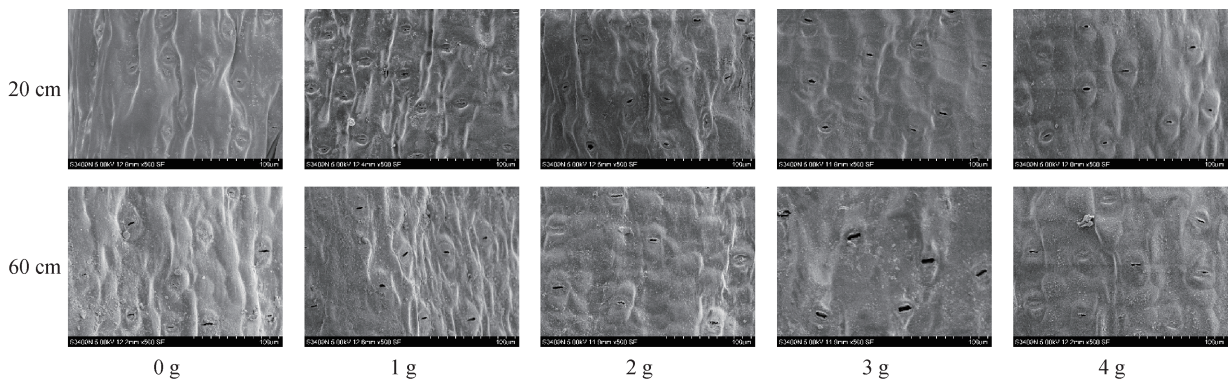


图2 不同栽植处理下梭梭的气孔形态

Fig. 2 Stomata morphology of *Haloxylon ammodendron* under different planting treatments

注:第一行为20 cm栽植深度下,0 g,1 g,2 g,3 g,4 g保水剂处理;第二行为60 cm栽植深度下,0 g,1 g,2 g,3 g,4 g保水剂处理。下同

Note: Under a planting depth of 20 cm, the first row was treated with 0 g, 1 g, 2 g, 3 g, and 4 g water retaining agents; The second action involves treating with 0 g, 1 g, 2 g, 3 g, and 4 g water retaining agents at a planting depth of 60 cm. Same below

2.3 不同栽植处理对梭梭同化枝解剖结构的影响

不同栽植处理下梭梭同化枝横切面呈圆形,叶退化为鳞片状突起,其解剖结构由外至内可分为表皮、皮层和维管柱三部分。其中,角质层较薄,表皮上分布有半下陷的气孔,气室不发达;表皮细胞在各处理下的形状结构相似,由两层椭圆形薄壁细胞组成,排列整齐,细胞间隙较大,含晶细胞散布其中;栅栏组织由一层紧密排列的细长条形细胞构成,富含叶绿素,其间分布有含晶细胞;栅栏组织内侧具有花环细胞,由粘液细胞组成,呈波浪形紧密排列,其内含叶绿体;贮水组织发达占同化枝直径约3/4,其间具有散生小型维管束。贮水组织由巨大多边形薄壁细胞构成,无细胞核,细胞腔大且透明,富含细胞液,起贮水保水作用。贮水组织内分

布大量含晶细胞和粘液细胞,可降低植株水势,减少水分流失并增强吸水力,维持细胞正常代谢环境;维管柱外围具有一圈由薄壁组织特化而成的厚壁组织,木质部内分布有导管,负责水分和无机盐运输。髓射线较狭窄,不发达,髓内分布有含晶细胞(图4)。

不同栽植处理下,梭梭同化枝解剖结构均发生了不同程度的变化。随着保水剂剂量和栽植深度的增加,同化枝直径、角质层厚度、栅栏组织、贮水组织、维管柱厚度以及导管孔径均呈现先上升后下降的趋势(表2)。

从不同剂量保水剂来看,0 g处理下各解剖结构均最低。其中,同化枝直径1~4 g处理分别比0 g显著增加了8.48%,18.03%,35.71%和24.41%

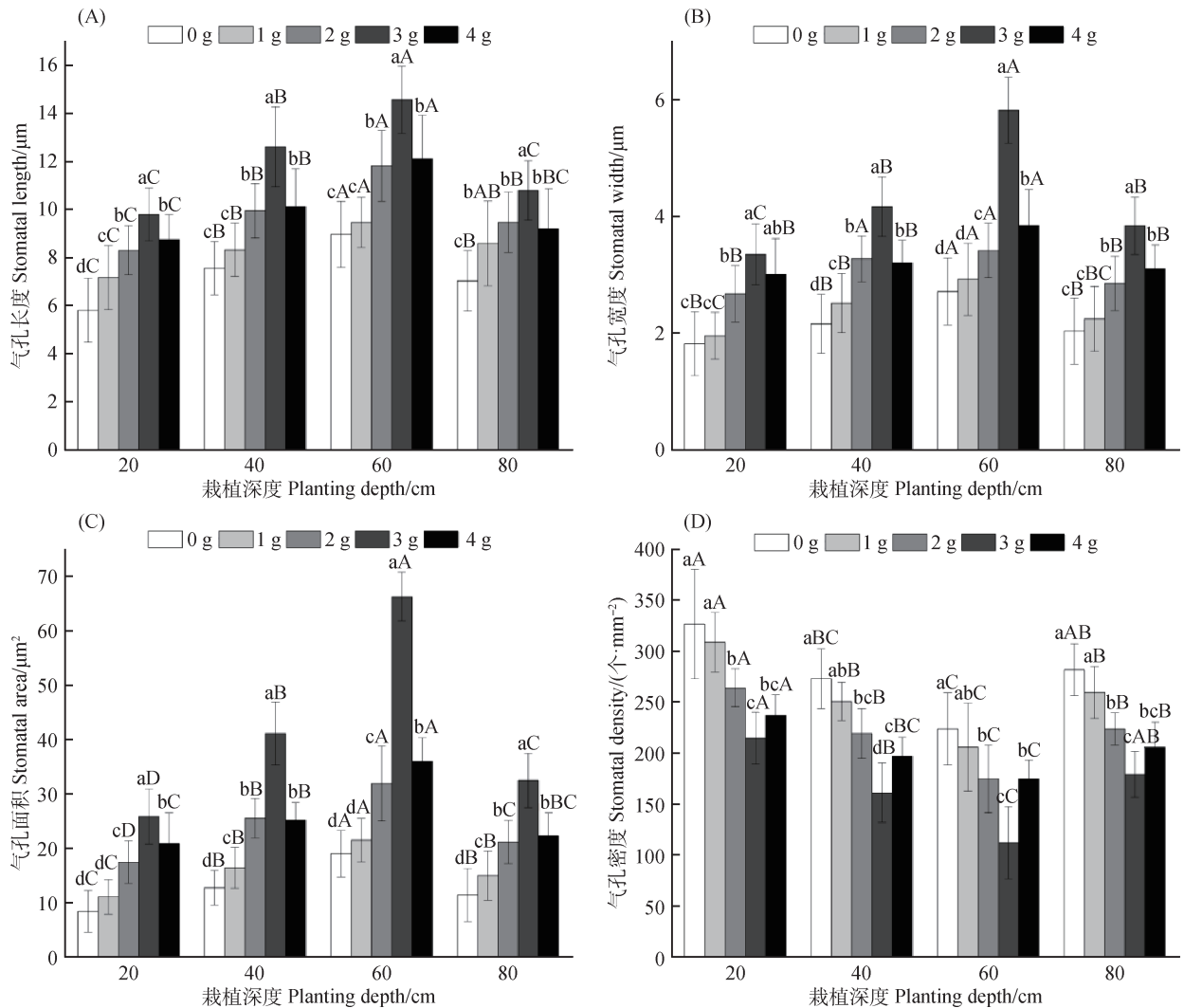


图3 同栽植处理对梭梭气孔形态的影响

Fig. 3 The effect of different planting treatments on the stomatal morphology of *Haloxylon ammodendron*

注:数值用平均±标准误。不同小写字母表示同一栽植深度处理下不同剂量保水剂处理之间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一剂量保水剂处理下不同栽植深度处理之间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: The values are expressed as mean ± standard error. Different lowercase letters indicate significant difference between different doses of water-retaining agent under the same planting depth treatment at the 0.05 level; Different capital letters indicate significant difference between different planting depth treatments under the same dose of water-retaining agent treatment at the 0.05 level. The same as below

($P<0.05$);角质层厚度1~4 g处理分别比0 g显著增加了6.43%,10.26%,15.11%和9.62%($P<0.05$);栅栏组织厚度1~4 g处理分别比0 g显著增加了5.90%,6.83%,11.43%和6.92%($P<0.05$);贮水组织厚度1~4 g处理分别比0 g显著增加了8.63%,20.68%,43.93%和23.91%($P<0.05$);维管柱厚度1~4 g处理分别比0 g显著增加了10.34%,21.61%,48.14%和27.06%($P<0.05$);导管孔径1~4 g处理分别比0 g显著增加了11.42%,28.60%,45.34%和27.25%($P<0.05$)(表2)。

从不同栽植深度来看,20 cm处理下各解剖结

构均最低。其中,同化枝直径40~80 cm处理比20 cm处理显著增加了10.27%,17.66%和7.15%($P<0.05$);角质层厚度40~80 cm处理比20 cm处理显著增加了4.07%,10.89%和6.32%($P<0.05$);栅栏组织厚度40~80 cm处理比20 cm处理显著增加了5.46%,10.39%和5.00%($P<0.05$)。贮水组织厚度40~80 cm处理比20 cm处理显著增加了14.28%,23.54%和10.11%($P<0.05$);维管柱厚度40~80 cm处理比20 cm处理显著增加了4.52%,19.23%和4.65%($P<0.05$);导管孔径40~80 cm处理比20 cm处理显著增加了15.36%,22.95%和13.99%($P<0.05$)(表2)。

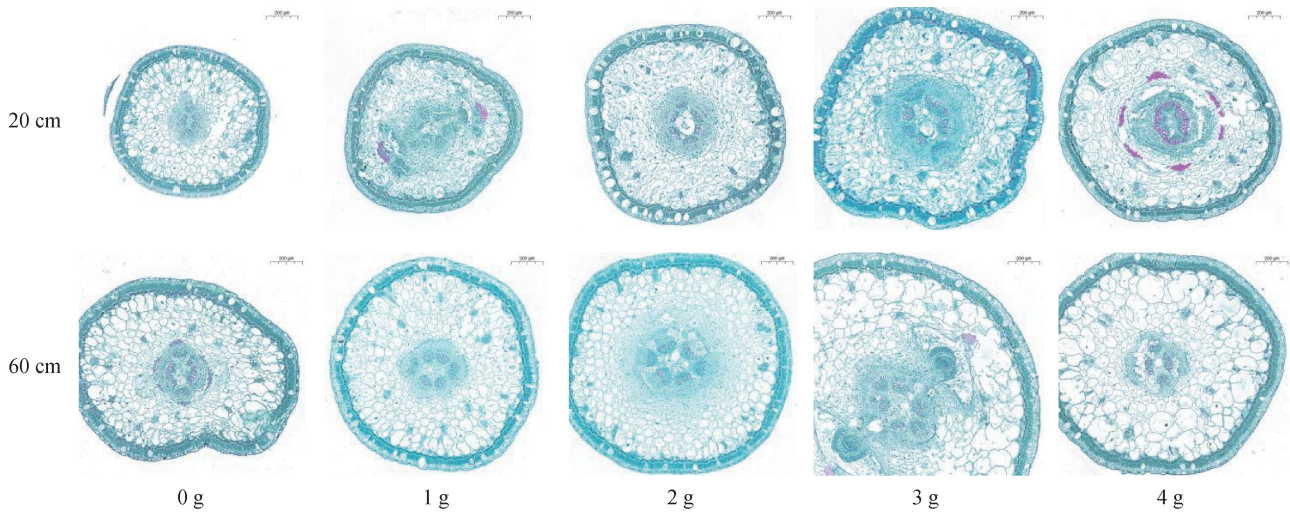


图 4 不同栽植处理下梭梭同化枝解剖结构

Fig. 4 Anatomical structure of assimilating branches of *Haloxylon ammodendron* under different planting treatments

表 2 不同栽植处理对梭梭同化枝解剖形态的影响

Table 2 The effect of different planting treatments on the anatomical morphology of assimilating branches of *Haloxylon ammodendron*

项目 Item		同化枝直径		角质层 Cuticle		栅栏组织 Palisade tissue		贮水组织 Water storage		维管柱 Vascular cylinder		导管 Vessel	
D	P	Diameter/ μm		厚度 Thickness/ μm	R/%	厚度 Thickness/ μm	R/%	厚度 Thickness/ μm	R/%	厚度 Thickness/ μm	Z/%	孔径 Diameter/ μm	R/%
20 cm	0g	1048.68 $\pm$ 45.26 ^c		3.77 $\pm$ 0.42 ^b	0.72	26.70 $\pm$ 2.25 ^c	5.09	287.01 $\pm$ 31.52 ^b	54.74	294.30 $\pm$ 33.86 ^c	28.06	6.49 $\pm$ 1.29 ^b	1.24
	1g	1108.82 $\pm$ 37.17 ^{cd}		3.9 $\pm$ 0.29 ^{bc}	0.70	29.56 $\pm$ 2.09 ^{ab}	5.33	280.57 $\pm$ 26.7 ^c	50.61	351.07 $\pm$ 41.32 ^b	31.66	8.41 $\pm$ 1.51 ^b	1.52
	2g	1271.29 $\pm$ 43.31 ^c		4.09 $\pm$ 0.49 ^{ab}	0.64	30.36 $\pm$ 2.06 ^{ab}	4.78	351.59 $\pm$ 32.13 ^c	55.31	391.83 $\pm$ 35 ^{ab}	30.82	10.45 $\pm$ 1.63 ^c	1.64
	3g	1404.23 $\pm$ 43.54 ^c		4.25 $\pm$ 0.43 ^{ab}	0.61	31.59 $\pm$ 1.39 ^{ab}	4.50	385.12 $\pm$ 32.48 ^c	54.85	456.91 $\pm$ 37.71 ^c	32.54	11.75 $\pm$ 2.00 ^b	1.67
	4g	1370.01 $\pm$ 48.66 ^{bc}		4.12 $\pm$ 0.25 ^{bb}	0.60	29.58 $\pm$ 1.75 ^c	4.32	355.01 $\pm$ 33.58 ^{bc}	51.83	437.73 $\pm$ 40.59 ^{ab}	31.95	10.52 $\pm$ 1.36 ^{bb}	1.54
40 cm	0g	1142.33 $\pm$ 54.15 ^{ab}		3.85 $\pm$ 0.41 ^{cAB}	0.67	29.58 $\pm$ 1.6 ^{ab}	5.18	316.09 $\pm$ 43.15 ^{ab}	55.34	336.79 $\pm$ 43.83 ^{ab}	29.48	9.00 $\pm$ 1.48 ^{cA}	1.58
	1g	1296.77 $\pm$ 41.77 ^{ab}		4.09 $\pm$ 0.38 ^{bcBC}	0.63	31.29 $\pm$ 2.84 ^{abA}	4.83	352.23 $\pm$ 30.4 ^{ab}	54.32	401.54 $\pm$ 34.79 ^{abA}	30.96	11.02 $\pm$ 2.2 ^{abA}	1.70
	2g	1375.67 $\pm$ 63.04 ^{ab}		4.11 $\pm$ 0.48 ^{bcB}	0.60	30.70 $\pm$ 1.71 ^{bb}	4.46	376.37 $\pm$ 26.86 ^{ab}	54.72	400.97 $\pm$ 43.72 ^{bb}	29.15	10.91 $\pm$ 1.45 ^{bc}	1.59
	3g	1587.73 $\pm$ 43.18 ^{ab}		4.63 $\pm$ 0.57 ^{abB}	0.58	32.41 $\pm$ 2.02 ^{ab}	4.08	460.37 $\pm$ 26.19 ^{ab}	57.99	481.87 $\pm$ 45.99 ^{bc}	30.35	12.78 $\pm$ 1.72 ^{abB}	1.61
	4g	1437.75 $\pm$ 41.33 ^{bb}		4.27 $\pm$ 0.6 ^{abAB}	0.59	31.87 $\pm$ 1.84 ^{ab}	4.43	391.25 $\pm$ 33.5 ^{abB}	54.43	397.91 $\pm$ 46.8 ^c	27.68	11.21 $\pm$ 1.98 ^{abAB}	1.56
60 cm	0g	1257.67 $\pm$ 47.72 ^{cA}		4.08 $\pm$ 0.29 ^{cA}	0.65	31.25 $\pm$ 1.28 ^{cdA}	4.97	346.01 $\pm$ 44.97 ^A	55.02	375.62 $\pm$ 38.73 ^{cA}	29.87	10.11 $\pm$ 1.54 ^{cA}	1.61
	1g	1363.13 $\pm$ 35.37 ^{dA}		4.45 $\pm$ 0.46 ^{ba}	0.65	32.11 $\pm$ 1.35 ^{cdA}	4.71	383.14 $\pm$ 31.85 ^{cA}	56.21	398.45 $\pm$ 38.29 ^{cA}	29.23	10.59 $\pm$ 1.49 ^{cA}	1.55
	2g	1442.5 $\pm$ 32.19 ^{cA}		4.51 $\pm$ 0.55 ^{ba}	0.63	32.42 $\pm$ 1.66 ^{bcA}	4.49	401.93 $\pm$ 34.79 ^{ca}	55.73	479.69 $\pm$ 38.89 ^{ba}	33.25	12.13 $\pm$ 1.69 ^{ba}	1.68
	3g	1724.2 $\pm$ 75.92 ^{Ad}		4.83 $\pm$ 0.6 ^{Ad}	0.56	33.87 $\pm$ 1.81 ^{Ad}	3.93	506.77 $\pm$ 39.97 ^{Ad}	58.78	579.79 $\pm$ 34.36 ^{Ad}	33.63	13.87 $\pm$ 2.00 ^{Ad}	1.61
	4g	1511.09 $\pm$ 43.64 ^{ba}		4.46 $\pm$ 0.34 ^{ba}	0.59	33.51 $\pm$ 1.4 ^{ba}	4.43	412.07 $\pm$ 27.53 ^{ba}	54.54	469.72 $\pm$ 72.78 ^{ba}	31.08	11.84 $\pm$ 1.36 ^{ba}	1.57
80 cm	0g	1151.81 $\pm$ 53.08 ^{ab}		3.97 $\pm$ 0.43 ^{AB}	0.69	29.59 $\pm$ 2.67 ^{ab}	5.14	295.58 $\pm$ 32.38 ^{ab}	51.32	356.37 $\pm$ 35.52 ^{abAB}	30.94	9.55 $\pm$ 1.97 ^{cA}	1.66
	1g	1222.07 $\pm$ 46.28 ^{ac}		4.24 $\pm$ 0.38 ^{bcAB}	0.69	31.07 $\pm$ 1.7 ^{ba}	5.08	336.21 $\pm$ 32.91 ^{ab}	55.02	352.97 $\pm$ 42.5 ^{ab}	28.88	9.14 $\pm$ 1.41 ^{cb}	1.50
	2g	1340.53 $\pm$ 62.83 ^{ab}		4.55 $\pm$ 0.3 ^{Ad}	0.68	31.63 $\pm$ 1.91 ^{abAB}	4.72	372.24 $\pm$ 33.74 ^{bc}	55.54	385.09 $\pm$ 44.56 ^{cb}	28.73	11.72 $\pm$ 1.48 ^{abAB}	1.75
	3g	1527.31 $\pm$ 52.31 ^{ac}		4.33 $\pm$ 0.46 ^{abB}	0.57	32.64 $\pm$ 1.42 ^{abB}	4.27	439.2 $\pm$ 48.52 ^{ab}	57.51	500.71 $\pm$ 50.53 ^{ab}	32.78	12.7 $\pm$ 2 ^{abAB}	1.66
	4g	1404.55 $\pm$ 49.93 ^{bb}		4.32 $\pm$ 0.4 ^{abAB}	0.62	30.26 $\pm$ 2.19 ^{bc}	4.31	383.91 $\pm$ 32.64 ^{ab}	54.67	426.5 $\pm$ 32.99 ^{bc}	30.37	11.16 $\pm$ 1.63 ^{abAB}	1.59

注：P, 保水剂剂量处理；D, 栽植深度处理；R, 占半径比例；Z, 占直径比例

Note: P, Dosage treatment of super absorbent polymer; D, Planting depth treatment; R, Proportion of radius; Z, proportion of diameter

3 讨论

土壤水分夏季地表温度是影响干旱荒漠区植物正常生长发育的关键因素,土壤水分缺失和夏季地表高温严重时甚至会导致植物死亡^[29]。本研究通过施用保水剂和增加栽植深度,提高土壤含水量、避开夏季高温层,降低土壤水分缺失和夏季地表高温对植物带来的伤害,以为梭梭幼苗生长发育提供良好环境。

气孔在植物气体交换、调节水分温度平衡方面起着关键作用,植物通过调节气孔来适应环境变化,以维持植物正常生理代谢^[30]。在遭受水分和高温胁迫时,植物叶片气孔密度增加,气孔开度变小的同时长度、宽度和面积也显著减小,胁迫严重时甚至会使气孔关闭。反之在正常生长的条件下,植物叶片密度较小,气孔开度、面积均较大,有利于植物进生长发育^[31]。本研究发现,梭梭同化枝气孔形态由两个肾形保卫细胞和两个副保卫细胞构成。

气孔呈椭圆形或长形半下陷,气孔室不发达。这与董占元等^[32]的研究一致。不同栽植处理下,梭梭气孔形态均发生了不同程度的变化,随着保水剂剂量和栽植深度的增加,梭梭气孔长度、宽度、面积均呈现先上升后下降的趋势,梭梭气孔密度呈现先下降后上升的趋势。气孔宽度减小,可能是水分和高温胁迫使梭梭叶绿素合成受阻,导致梭梭光合能力下降,梭梭同化枝中细胞碳水化合物含量和保卫细胞的渗透压也随之下降,保卫细胞难以从环境中吸水膨胀,最终导致气孔开度和面积减小^[33]。施用适宜剂量的保水剂、适当增加栽植深度后,能有效减少土壤水分损失,为植物生长维持良好的生长环境,推迟了植物遭受环境胁迫时间使得植物遭受环境胁迫时间较短、程度较低,对植物的影响较小。这与高彦萍等^[34]的研究结果一致。

水分、温度与地理环境都会对植物解剖结构产生影响。其中,叶片厚度作为植物水分保持能力的重要表征指标,其变化直接反映了植物对干旱环境的适应性^[35]。角质层是植物表皮细胞的特殊保护结构,在维持植物水平衡方面发挥着关键作用^[36]。栅栏组织作为植物光合作用的特化结构,其发育程度和叶绿体数量是评估植物光合效率的重要指标^[37]。贮水组织由薄壁细胞构成,具有贮水保水作用,使植物在高温干旱胁迫下也能生存并维持正常的生理活动,其发达程度直接影响植物的抗旱性和水分利用效率^[38]。维管柱作为植物的重要支撑和输导系统,其发育程度与植物的活力和抗逆能力呈正相关^[39]。导管作为水分和矿质运输的主要通道,其径长是决定水分运输效率的关键因素之一。本研究发现,随着保水剂剂量和栽植深度的增加,梭梭同化枝直径、角质层厚度、栅栏组织厚度、贮水组织厚度、维管柱厚度、导管孔径厚度均呈现先上升后下降的趋势。3g保水剂、60cm栽植深度的土壤含水量明显高于其它处理,前期较好的水分条件促使该处理下梭梭植株生长优良,同化枝的直径、贮水组织厚度、维管柱、导管孔径等结构增大。这说明不同栽植处理提高了土壤含水量,同时植物根系避开了土壤高温层,促进了贮水组织、维管柱增厚、导管孔径增大,从而提高了植物保水能力、活力、抗逆性以及水分运输效率。而在高温干旱胁迫下,梭梭通过自身的生理调节及形态结构变化来适应周围的环境变化,适宜的栽植处理也能增加其抗逆性。角质层厚度、栅栏组织厚度增大,有效降低了蒸腾作用,减少了强光

辐射的影响,从而维持光合作用的正常进行,确保植物生长发育所需的营养物质供应。咎丹丹等^[40]研究发现,不同地区梭梭同化枝解剖结构不同,随着降水量的减少其抗旱性增强。土壤含水量较高的精河地区抗旱性较弱,其梭梭同化枝直径、角质层厚度、栅栏组织厚度、贮水组织厚度、维管柱厚度、导管孔径厚度均较大,角质层厚度、栅栏组织厚度较小。本研究形态解剖结构与上述研究存在一定差异,这可能与梭梭种群所处环境的异质性有关。本试验处于同一地区,前期通过栽植处理为梭梭提供相对良好的生存环境,同时也提高了其抗逆性。

4 结论

本研究发现3g保水剂、60cm栽植深度处理下为梭梭创造了有利的生长环境,有效增强了其抗旱能力。该处理下,幼苗气孔更大而稀疏,同化枝增粗,角质层、栅栏组织、贮水组织和维管系统均更发达。因此,在荒漠区梭梭种群的保育过程中,可以利用适宜栽植处理推迟或缓解环境胁迫对梭梭植株的伤害,以确保梭梭幼苗的正常生长发育。

参考文献

- [1] 陈亚宁,李玉朋,李稚,等. 全球气候变化对干旱区影响分析[J]. 地球科学进展,2022,37(2):111-119
CHEN Y N, LI Y P, LI Z, et al. Analysis of the impact of global climate change on dryland areas[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2):111-119
- [2] 屠志方,李梦先,孙涛. 第五次全国荒漠化和沙化监测结果及分析[J]. 林业资源管理,2016(1):1-5,13
TU Z F, LI M X, SUN T. The status and trend analysis of desertification and sandification[J]. Forest Resources Management, 2016(1):1-5,13
- [3] 赵文举,李晓萍,范严伟,等. 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J]. 农业工程学报,2015,31(17):144-151
ZHAO W J, LI X P, FAN Y W, et al. Spatial-temporal stability distribution characteristics of soil moisture in gravel-sand mulched field in northwestern arid area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 144-151
- [4] LIU S S, XU G Q, CHEN T Q, et al. Quantifying the effects of precipitation exclusion and groundwater drawdown on functional traits of *Haloxylon ammodendron*—How does this xeric shrub survive the drought?[J]. Science of the Total Environment, 2023, 904:166945
- [5] HUANG F, ZHANG Y D, ZHANG D R, et al. Environmental groundwater depth for groundwater-dependent terrestrial eco-

- systems in arid/semiarid regions: a review [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(5):763
- [6] 罗雅曦,刘任涛,张静,等. 腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2):525-535
- LUO Y X, LIU R T, ZHANG J, et al. Soil particle composition, fractal dimension and their effects on soil properties following sand-binding revegetation within straw checkerboard in Tengger Desert, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2):525-535
- [7] 郭东权,饶良懿. 保水剂的发展现状及在农林和荒漠化修复中的应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(6):1372-1385
- GUO D Q, RAO L Y. Development situation of superabsorbent polymer and its application in agroforestry and desertification restoration [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(6):1372-1385
- [8] 侯利园,何祥,张生武,等. 保水剂对风沙土保水特性的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2024, 22(5):133-140
- HOU L Y, HE X, ZHANG S W, et al. Influences of superabsorbent polymers on the water retention characteristics of aeolian sandy soil [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(5):133-140
- [9] 黄占斌,孙朋成,钟建,等. 高分子保水剂在土壤水肥保持和污染治理中的应用进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1):125-131
- HUANG Z B, SUN P C, ZHONG J, et al. Application of superabsorbent polymer in water and fertilizer conservation of soil and pollution management [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1):125-131
- [10] 宋双双,孙保平,张建锋. 保水剂和微生物菌肥对半干旱区造林和土壤改良的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3):334-339
- SONG S S, SUN B P, ZHANG J F. Research on soil absorbent polymer and microbial fertiliser to improve semi-arid soil and afforestation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3):334-339
- [11] 高齐,盛阳阳,赵志伟,等. 不同类型保水剂对旱作谷子水分利用的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(9):154-163
- GAO Q, SHENG Y Y, ZHAO Z W, et al. Effects of different types of water retaining agents on water use of rainfed millet [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(9):154-163
- [12] 许允硕,高显,陈双,等. 复合保水剂对盐碱地冬小麦旗叶光合、衰老及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2):38-49
- XU Y S, GAO Y, CHEN S, et al. Effects of compound water retaining agent on photosynthesis, senescence and yield of flag leaf of winter wheat in saline-alkali land [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(2):38-49
- [13] 杨永辉,武继承,吴普特,等. 保水剂用量对小麦不同生育期根系生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1):73-78
- YANG Y H, WU J C, WU P T, et al. Effects of different application rates of water-retaining agent on root physiological characteristics of winter wheat at its different growth stages [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1):73-78
- [14] 李中阳,吕谋超,樊向阳,等. 不同类型保水剂对冬小麦水分利用效率和根系形态的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12):3753-3758
- LI Z Y, LYU M C, FAN X Y, et al. Influences of different kinds of water retentive agents on water use efficiency and root morphology of winter wheat [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12):3753-3758
- [15] 武毅,孙保平,张建锋,等. 保水剂对4种木本植物生长及根系形态的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(1):96-102
- WU Y, SUN B P, ZHANG J F, et al. Effects of water-retaining agent in different dosage on the growth and root morphology of 4 woody plants [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(1):96-102
- [16] 张强,王胜. 干旱荒漠区土壤水热特征和地表辐射平衡年变化规律研究[J]. 自然科学进展, 2007, 17(2):211-216
- ZHANG Q, WANG S. Study on annual variation law of soil water and heat characteristics and surface radiation balance in arid desert area [J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(2):211-216
- [17] 柳媛普,李耀辉,王胜,等. 河西走廊中段干旱荒漠区土壤水热状况初步分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(5):204-208
- LIU Y P, LI Y H, WANG S, et al. Soil temperature and water in arid desert area in the midst of Hexi Corridor [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(5):204-208
- [18] 刘春鹏,李向军,安萍,等. 超深栽对沙地白榆苗木地上部生长及根系发育的影响[J]. 生态学报, 2018, 37(8):2293-2299
- LIU C P, LI X J, AN P, et al. Effects of extra-deep-planting on shoot growth and root development of *Ulmus pumila* L. seedlings in sandy soils [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8):2293-2299
- [19] 丛云鹤. 栽植深度和浇水频率对沙冬青幼林生长与生理特性的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2022:45-46
- CONG Y H. Effects of Planting Depth and Watering Frequency on Growth and Physiological Characteristics of Young *Ammopiptanthus mongolicus* Plantation [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022:45-46
- [20] 李雪宁,徐先英,郑桂恒,等. 石羊河下游人工梭梭林健康评价体系构建及应用研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3):872-882
- LI X N, XU X Y, ZHENG G H, et al. A health evaluation of a *Haloxylon ammodendron* plantation in the Shiyang River lower reaches [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3):872-882
- [21] MA Q L, WANG X Y, CHEN F, et al. Carbon sequestration of sand-fixing plantation of *Haloxylon ammodendron* in Shiyang River Basin: storage, rate and potential [J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 28:e01607
- [22] 宋杰,田长彦,张立运,等. NaCl对囊果碱蓬、梭梭和白梭梭种子及初期幼苗的影响[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4):543-547
- SONG J, TIAN C Y, ZHANG L Y, et al. Effect of NaCl on salt resistance of *Suaeda physophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* during their seed germination and young seedling stages [J]. Arid Zone Research, 2009, 26(4):543-547

- [23] 康建军,王锁民,赵明,等. 苗期施用钠复合肥增强梭梭抗逆性的初步研究[J]. 草业学报,2011,20(2):127-133
KANG J J, WANG S M, ZHAO M, et al. Tentative research of Na compound fertilizer at seedling stage on enhancing drought resistance of *Haloxylon ammodendron*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(2):127-133
- [24] 徐高兴,徐先英,王立,等. 梭梭不同密度与配置固沙效果风洞模拟试验[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(9):189-195
XU G X, XU X Y, WANG L, et al. Sand-fix effects of *Haloxylon ammodendron* forests under the different densities and patterns under wind tunnel test [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9):189-195
- [25] 杨景宁,王彦荣. PEG模拟干旱胁迫对四种荒漠植物种子萌发的影响[J]. 草业学报,2012,21(6):23-29
YANG J N, WANG Y R. Effects of drought stress simulated by PEG on seed germination of four desert plant species [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(6):23-29
- [26] 张华,吴睿,康雅茸. 民勤绿洲梭梭同化枝光合生理特性与形态[J]. 草业科学,2018,35(2):371-379
ZHANG H, WU R, KANG Y R. Photosynthetic, physiological, and morphological characteristics of *Haloxylon ammodendron* assimilation twigs in Minqin Oasis [J]. Pratacultural Science, 2018, 35(2):371-379
- [27] 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
- [28] 师微柠,苏世平,李毅,等. 干旱生境下外源脯氨酸对红砂气孔形态的影响[J]. 草地学报,2023,31(3):777-784
SHI W N, SU S P, LI Y, et al. Effects of exogenous proline spraying on stomatal morphology of *Reaumuria soongorica* under arid environment [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(3):777-784
- [29] NIARI KHAMSSI N, NAJAPHY A. Physiological and biochemical responses of durum wheat under mild terminal drought stress [J]. Cellular and Molecular Biology, 2018, 64(4):59-63
- [30] WANG Z Z, ZHENG P, MENG J F, et al. Effect of exogenous 24-epibrassinolide on chlorophyll fluorescence, leaf surface morphology and cellular ultrastructure of grape seedlings (*Vitis vinifera* L.) under water stress [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, 37(1):1729
- [31] 王碧霞,曾永海,王大勇,等. 叶片气孔分布及生理特征对环境胁迫的响应[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(2):122-126,131
WANG B X, ZENG Y H, WANG D Y, et al. Responses of leaf stomata to environmental stresses in distribution and physiological characteristics [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(2):122-126, 131
- [32] 董占元,姚云峰,赵金仁,等. 梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge)光合枝细胞组织学观察及其抗逆性特征[J]. 干旱区资源与环境,2000,14(S1):78-83
DONG Z Y, YAO Y F, ZHAO J R, et al. Anatomical observations on the photosynthetic branch of *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge and its character of drought and salt resistance [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, 14(S1):78-83
- [33] 赵雅丽,熊浩,毕玉芬,等. 干热胁迫对紫花苜蓿叶片气孔大小的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2013,28(3):336-339
ZHAO Y L, XIONG H, BI Y F, et al. Effect of drought and heat stress on leaf stomata size in alfalfa [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2013, 28(3):336-339
- [34] 高彦萍,冯莹,马志军,等. 水分胁迫下不同抗旱类型大豆叶片气孔特性变化研究[J]. 干旱地区农业研究,2007,25(2):77-79
GAO Y P, FENG Y, MA Z J, et al. Stomatal character changes of soybean leaves under water stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(2):77-79
- [35] 姚泽,于思敏,王祺,等. 紫花苜蓿叶片水分生理及其解剖结构的水分胁迫响应[J]. 草地学报,2025,33(3):823-830
YAO Z, YU S M, WANG Q, et al. Water physiology and anatomical structure of *Medicago sativa* leaves in response to water stress [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(3):823-830
- [36] 洪文君,黄久香,申长青,等. 3种檉木属植物结构解剖及环境适应性评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(5):61-66
HONG W J, HUANG J X, SHEN C Q, et al. A study on anatomical structure and adaptations to environment of three *Loropetalum* species (variety) [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(5):61-66
- [37] LI Z D, YU X X, JIA G D. The anatomical structure of woody plants in arid habitats is closely related to nonstructural carbohydrates storage [J]. Forest Ecosystems, 2022, 9:100073
- [38] 寇萌,尹秋龙,焦菊英. 黄土丘陵沟壑区10种单子叶植物叶片解剖结构及环境适应性[J]. 西北植物学报,2019,39(1):102-109
KOU M, YIN Q L, JIAO J Y. Leaf anatomical structures and acclimation of ten monocotyledons in the hilly-gullied Loess Plateau Region [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(1):102-109
- [39] 王飞,郭树江,张卫星,等. 不同年代梭梭同化枝解剖结构特征及其对土壤条件的响应[J]. 西北植物学报,2021,41(3):473-479
WANG F, GUO S J, ZHANG W X, et al. Anatomic structure characteristics of assimilating shoots of *Haloxylon ammodendron* in different ages and their response to soil conditions [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(3):473-479
- [40] 笄丹丹,庄丽. 新疆干旱荒漠区梭梭同化枝解剖结构的抗旱性比较[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(5):146-152
ZAN D D, ZHUANG L. Drought resistance analysis based on anatomical structure of assimilating shoots of *Haloxylon ammodendron* from Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(5):146-152