DOI: 10.20103/j.stxb.202310172256
范严伟,史金红,唐兴鹏,李泽林,王延祥,石雯.不同灌溉防护措施下梭梭根系生物量及形态特征.生态学报,2024,44(16):7278-7289.
Fan Y W, Shi J H, Tang X P, Li Z L, Wang Y X, Shi W.Root biomass and morphological characteristics of *Haloxylon ammodendron* under different irrigation protection measures.Acta Ecologica Sinica,2024,44(16):7278-7289.

不同灌溉防护措施下梭梭根系生物量及形态特征

范严伟[1,*],史金红[1],唐兴鹏[1],李泽林[1],王延祥[2],石 雯[3]
1 兰州理工大学能源与动力工程学院,兰州 730050
2 兰州有色冶金设计研究院有限公司,兰州 730000
3 平凉市基础产业投资集团有限公司,平凉 744000

摘要:梭梭是防风固沙和改善生态环境的先锋树种,但在种植过程中存在成活率偏低和生长缓慢的瓶颈问题,科学合理的灌溉防护是保障梭梭幼苗成活并健康生长的关键。多年来,关于梭梭灌溉防护技术的研究主要集中在单一的灌溉方法或防护措施上,对于多种灌溉防护措施的综合比较和差异分析缺乏足够认识,这在一定程度上制约了人们对灌溉防护措施的优化选择和合理应用。鉴于此,设置了 4 种灌溉防护措施:传统地表滴灌(TSDI)、无灌溉竖管防护(NIPP)、竖管地表滴灌(PSDI)和无灌溉无防护(NINP),通过野外筒栽试验,比较了不同措施下土壤水分分布及梭梭幼苗成活率的差异,分析了不同措施及竖管参数(管径和埋深)组合下梭梭根系性状特征。结果表明,4 种措施下土壤水分均随深度的增大而增大,同一时期相同深度处土壤含水率大小表现出 PSDI>NIPP>TSDI>NINP 的规律;移栽 1 年后,梭梭在不同措施下其成活率存在显著差异,PSDI 措施下的成活率最高,达到 88.9%,NINP 措施下的成活率最低,仅为 11.1%,而 NIPP 和 TSDI 措施下的成活率介于 PSDI 和 NINP 之间,分别为 81.5%和 44.4%;4 种灌溉防护措施中,PSDI 的梭梭根系生物量、主根增长量及各形态指标(总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径和根尖数)均为最大值,NIPP 的根系生物量、主根增长量及各形态指标优于 TSDI 但不及 PSDI,而 NINP 措施的均为最小值;PSDI 措施下竖管参数对梭梭根系的生长有显著影响($P<0.05$),相同管径时,根系生物量、主根增长量及根系形态指标均随埋深的增大呈先增大后减小的趋势,根冠比则呈先减小后增大的规律;同一埋深时,根系生物量、主根增长量及根系形态指标均随管径的增大而增大,而根冠比则随管径的增大而减小。综合分析,4 种措施下 PSDI 措施最有利于 1 年生梭梭根系的生长发育,3 种管径(9、11 cm 和 16 cm)和埋深(10、15 cm 和 20 cm)下竖管参数最优组合为管径 16 cm、埋深 15 cm。

关键词:梭梭(*Haloxylon ammodendron*);竖管地表滴灌;根系生物量,形态指标;竖管参数

Root biomass and morphological characteristics of *Haloxylon ammodendron* under different irrigation protection measures

FAN Yanwei[1,*], SHI Jinhong[1], TANG Xingpeng[1], LI Zelin[1], WANG Yanxiang[2], SHI Wen[3]
1 *College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou* 730050, *China*
2 *Nonferrous Metallurgic Design and Research Institute, Lanzhou* 730000, *China*
3 *Pingliang Basic Industry Investment Group Co., Ltd., Pingliang* 744000, *China*

Abstract: *H. ammodendron* is a pioneer tree species to prevent wind and sand and improve the ecological environment, but there are bottlenecks of low survival rate and slow growth in the planting process. Scientific and reasonable irrigation protection is the key to ensure the survival and healthy growth of *H. ammodendron* seedlings. Over the years, the research on *H. ammodendron* irrigation protection technology mainly focuses on a single irrigation method or protection measure. There is a lack of sufficient understanding of the comprehensive comparison and difference analysis of multiple irrigation protection

基金项目:国家自然科学基金项目(52369007, 51969013)
收稿日期:2023-10-17; **网络出版日期**:2024-06-18
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: fanyanwei24@163.com

measures, which to a certain extent restricts the optimal selection and rational application of irrigation protection measures. In view of this, four types of irrigation protection measures were set up: traditional surface drip irrigation (TSDI), non-irrigation vertical pipe protection (NIPP), vertical pipe surface drip irrigation (PSDI), and non-irrigation non-protection (NINP). The differences in soil moisture distribution and the survival rate of *H. ammodendron* seedlings under the different measures were compared through the field cylinder planting experiment, and the root characteristics of *H. ammodendron* were analyzed under the different measures and the combination of vertical pipe parameters (pipe diameter and burial depth). The results showed that soil moisture increased with depth under the four measures, and the soil water content at the same depth in the same period showed the pattern of PSDI>NIPP>TSDI>NINP; one year after transplanting, there were significant differences in the survival rate of *H. ammodendron* seedlings under the different measures, with the highest survival rate of 88.9% under the measure of PSDI, and the lowest survival rate of 11.1% under the measure of NINP, while the survival rates under NIPP and TSDI measures were between PSDI and NINP, 81.5% and 44.4%, respectively. Among the four irrigation protection measures, the maximum values of *H. ammodendron* root biomass, primary root growth and various morphological indicators (total root length, total root surface area, total root volume, average root diameter and number of root tips) were found in PSDI, and the root biomass, primary root growth and each morphological index in NIPP were better than in TSDI but not as good as in PSDI, while they were all at the minimum in the NINP model; The vertical pipe parameters in the PSDI measures had a significant effect on the growth of the *H. ammodendron* root system ($P<0.05$), and at the same pipe diameter, the root biomass, primary root growth and root morphology indexes showed a tendency to increase and then decrease with the increase of the burial depth, while the root-shoot ratio showed a pattern of decreasing and then increasing; At the same burial depth, the root biomass, primary root growth and root morphology indexes increased with the increase of the pipe diameter, while the root-shoot ratio decreased with the increase of the pipe diameter. In the overall analysis, the PSDI measures were the most advantageous to the root growth and development of 1-year-old *H. ammodendron* under the four measures, and the optimal combination of the vertical pipe parameters under the three pipe diameters (9, 11 cm, and 16 cm) and burial depths (10, 15 cm, and 20 cm) was 16 cm for the diameter of the pipe and 15 cm for the depth of the buried pipe.

Key Words: *Haloxylon ammodendron*; vertical pipe surface drip irrigation; root biomass, morphological indicators; vertical pipe parameters

风沙灾害是我国尤其是西北地区最为严重的生态环境问题[1—3]。采取有效的防风固沙措施是应对风沙灾害的必然选择。在众多防风固沙措施中,植物固沙是防治风沙灾害和构建风沙区生态屏障最有效、最持久和最具潜力的途径和方法[4—6]。在沙漠地区实施植物固沙,存在众多固沙植物的选择。梭梭(*Haloxylon ammodendron*)以其良好的抗旱耐热特性和显著的生态经济价值,成为风沙区植被恢复和重建的先锋树种[7—9]。

目前,梭梭林地的恢复与重建主要有两种方式:(1)自然更新;(2)人工种植。考虑风沙区生态环境恶劣,自然更新困难的实际状况,人工种植以促进风沙区生态恢复与重建成为当务之急[10—13]。然而,在风沙环境中种植梭梭幼苗,存在幼苗成活率偏低(≤10%)和生长缓慢的瓶颈问题[14]。在梭梭的生长过程中,根系是吸收养分、水分的重要器官,其形态特征及生长状况决定着梭梭对土壤资源的获取能力和对荒漠环境的适应能力[15—16]。植物根系的生长是一个动态、可塑的过程,会受到多种环境因素的胁迫,如水分、温度和光照等[17—21]。通过合理的调控措施,为植物生长提供一个相对适宜的微环境,将有助于促进根系的生长和发育。

一些研究报道了滴灌措施对梭梭根系生长发育的影响,指出滴灌技术能够有效改善土壤水分状况,在促进根系生长发育方面具有积极作用,但尚需解决灌溉水利用率偏低(≤50%)和根系分布浅层化(0—40 cm)等问题[22—24]。另有一些学者将管件防护技术应用于梭梭造林工程中,该技术解决了地表层高温对梭梭幼苗

茎基部的灼伤胁迫,在土壤含水率相对较高的荒漠区应用效果良好,而在极端干旱区表现不佳,究其原因是其未从根本上解决土壤水分短缺问题[14, 25]。基于此,范严伟等[26]借鉴地表滴灌与管件防护的优点,设计了一种竖管地表滴灌技术。相比较于传统地表滴灌,竖管地表滴灌的节水控温效果得到大幅提升[27—28]。作为新发展的灌溉技术,目前对竖管地表滴灌的认识仅停留在无植被情景下土壤水热运移特性研究,而关于其在梭梭造林工程中的应用效果和适用性方面尚未得到充分的验证。此外,以往对梭梭根系的研究大多局限于单一的灌溉或防护措施,缺乏多种措施下的综合比较和差异分析,这在一定程度上制约了人们对灌溉防护措施的优化选择和合理应用。

鉴于此,本研究以 1 年生梭梭幼苗为供试植物,设置 4 种灌溉防护措施:传统地表滴灌、无灌溉竖管防护、竖管地表滴灌和无灌溉无防护,通过野外筒栽试验,综合分析不同灌溉防护措施对土壤水分、梭梭成活率及根系性状的影响,力求明确以下问题:(1)土壤水分状况和梭梭成活率及根系生长发育是否与灌溉防护措施密切相关?(2)何种灌溉防护措施更有利于梭梭根系的生长发育?(3)对于初筛出的最佳灌溉防护措施,其技术参数对梭梭根系的影响是否存在差异?这些科学问题的解答,将揭示梭梭根系对生境变化的响应机制,优选梭梭健康生长的技术参数组合,可为风沙区植被恢复与重建提供理论支撑和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于甘肃省武威市九墩镇腾格里沙漠边缘(东经 102°44′,北纬 38°08′),属典型的大陆性温带气候。冬季寒冷,夏季酷热,昼夜温差大,年平均气温为 8℃,无霜期为 150 d 左右;干旱少雨,多年干旱天数达 120 d,平均降水量为 110 mm;日照强烈,蒸发量大,多年平均日照时数 3049 h,平均蒸发量为 2000 mm;风沙活动频繁且剧烈,主风向为西北风,主要集中在 2—5 月,多年平均风速为 2.3 m/s。试验布置选在较为平坦且开阔的场地进行,场地面积为 120 m^2(图 1)。

图 1 试验布置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the test layout

左起第一排为无灌溉竖管防护,共 27 组;第二排为竖管地表滴灌,共 27 组;第三排为传统地表滴灌和无灌溉无防护,共 54 组,第四排为模型验证组

1.2 试验设计及供试材料

试验设置 4 种灌溉防护措施,分别为无灌溉竖管防护(NIPP)、竖管地表滴灌(PSDI)、传统地表滴灌(TSDI)和无灌溉无防护(NINP)。其中,有防护措施的考虑竖管参数即管径(D)和埋深(B)的差异,管径依据梭梭幼苗冠幅大小取常见 PVC 管材规格,分别为9 cm、11 cm 和 16 cm,埋深参照梭梭幼苗根系长度(10—22 cm)取值,分别为 10、15 cm 和 20 cm,竖管高度统一取 30 cm。试验所用测筒为塑料筒(上口径 38 cm,下口径 30 cm,高 48 cm)。供试土壤为风沙土,将其晾晒、过筛,测得初始含水率为 0.031 cm^3/cm^3,田间持水量为 0.230 cm^3/cm^3,按干容重 1.52 g/cm^3分层(5 cm)装入筒中,装土高度为 45 cm。竖管地表滴灌技术实际应用时,先将竖管套在梭梭苗上,使幼苗处于竖管中部,然后下压竖管至设计埋深,最后将滴头放入竖管;传统地表滴灌直接将滴头放置于梭梭幼苗茎基部。幼苗定植后,所有处理均浇灌一次定植水,水量通过(田间持水量-初始含水率)×筒内土体体积确定为 8 L。试验中,所有处理均接受大气降水补给,有灌溉处理的每月月初(2022 年 6—11 月和 2023 年 4—5 月)对幼苗进行滴灌,灌水量每次取 2 L,在滴灌过程中滴头流量(Q)的取值依据参考文献[26]经验模型($Q = 0.072D^{2.01}B^{-0.64}$)而定,分别取2.73、2.11、1.75、4.09、3.15、2.62、8.68、6.70、5.57 L/h;无灌溉处理的待定植水浇灌完毕后再不灌溉,后期仅依靠大气降水来补充水分。试验筒布置采用行列式设计,为确保后期所观察的幼苗成活率能代表各灌溉防护措施的差异性,每种措施设置 9 组试验处理,每组试验处理设置 3 个重复,每筒内种植 3 株大小相近的幼

苗,定植成活后取其中 1 株作为研究对象。

1.3　测定项目及方法

试验选用民勤 1 年生梭梭幼苗,于 2022 年 5 月初移栽定植,定植完毕后将土壤温湿度传感器探针垂直插入地表层(0—5 cm),其中竖管地表滴灌和无灌溉竖管防护的放置于管内,传统地表滴灌和无灌溉无防护的放置于根茎附近,从地表层开始每隔 10 cm 沿筒壁水平插入 1 支土壤温湿度传感器,直至 40 cm 深度。从定植至生长 1 年期内进行 4 次成活率观察(2022 年 6、8、11 月和 2023 年 5 月),于次年 5 月中旬进行根系采集测定(图 2)。取幼苗根系时先将圆筒破坏直至整株幼苗完全暴露,拿取中心处幼苗,再将土、杂质和竖管去除。将待测梭梭整株装入密封袋,分别编号带回试验室,测定地上植株和地下根系鲜质量,测量主根长度及粗度,用根系扫描仪扫描,WinRhizo 分析总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径和根尖数等形态指标,然后将根系样品剪短装入铝盒于 105℃杀青 30 min 后,80℃烘干至恒重,分别称量植株和根系干质量,并算出梭梭的根冠比。

图 2　梭梭根系挖掘现场

Fig.2　Excavation site of *H. ammodendron* root system

1.4　数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2022 对数据进行整理,利用 SPSS 27 软件对试验数据进行多因素方差分析,用 LSD(Least Significant Difference)法分析不同灌溉防护措施及其竖管参数在 $P = 0.05$、$P = 0.01$ 水平上的差异性,用 Origin 2018 作图。

2　结果与分析

2.1　不同灌溉防护措施下土壤水分变化特征

以 2022 年 6 月—11 月每日 14:00 的土壤含水率测量值为统计量,分类整理,以月为单位取平均值,绘制不同深度土壤含水率变化曲线(图 3)。

由图 3 可见,4 种灌溉防护措施下,6—11 月份各土层土壤含水率在 0.074—0.170 cm^3/cm^3 之间波动,其中表层(0 cm)最低,底层(40 cm)最高,呈现出随土壤深度的增大而不断增大的趋势。不同措施之间,同一时期相同深度处土壤含水率大小表现为 PSDI>NIPP>TSDI>NINP 的规律,灌溉防护措施对 0—20 cm 深度土壤含水率影响显著($P<0.05$),不同措施之间土壤含水率存在明显差异,而在 20—40 cm 深度土壤含水率差异不显著($P>0.05$)。

2.2　不同灌溉防护措施对梭梭幼苗生长期成活率的影响

图 4 显示了不同灌溉防护措施下梭梭幼苗种植后成活状况。种植 1 月后梭梭苗全部成活;到 8 月份,仅

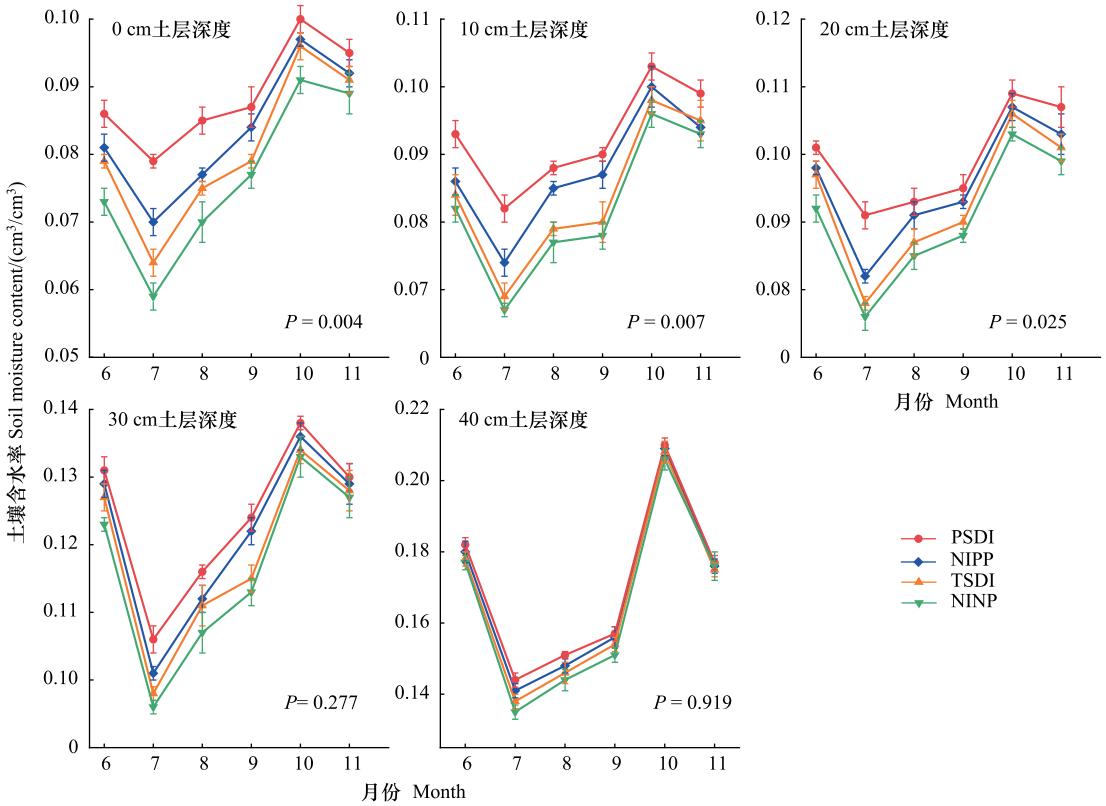

图 3 4 种灌溉防护措施下不同深度土壤含水率变化曲线

Fig.3 Variation curves of soil water content at different depths under four irrigation protection measures

PSDI:竖管地表滴灌;NIPP:无灌溉竖管防护;TSDI:传统地表滴灌;NINP:无灌溉无防护;*P*:显著性检验值

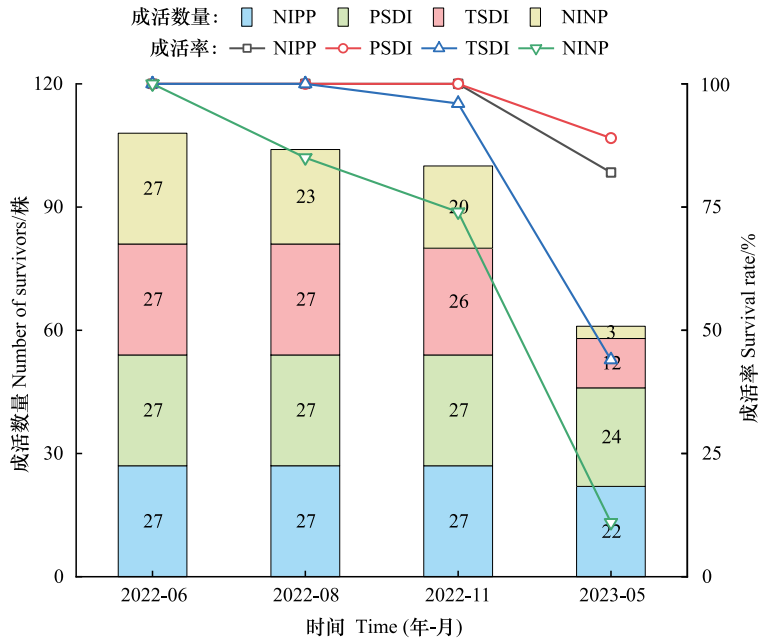

图 4 不同灌溉防护措施对梭梭幼苗成活率的影响

Fig.4 Effect of different irrigation protection measures on the survival rate of *H. ammodendron* seedlings

NINP 措施下梭梭死亡了 4 棵,成活率降至 85.2%;至 11 月份,NINP 措施下梭梭又死亡了 3 棵,TSDI 措施下梭梭也出现了死亡情况,成活率降到 96.3%,PSDI 和 NIPP 措施下梭梭成活率继续保持 100%。从 2022 年 11 月

至 2023 年 4 月,梭梭进入冬眠期,至次年 5 月份,梭梭在 4 种灌溉防护措施下均出现不同程度死亡,其中 PSDI 措施下梭梭存活了 24 棵,成活率最高,达到 88.9%,而 NINP 措施下梭梭死亡了 24 棵,成活率最低,仅为 11.1%,NIPP 措施下梭梭生长良好,存活了 22 棵,成活率为 81.5%,TSDI 措施下梭梭死亡过半,仅存活了 12 棵,成活率降至 44.4%。综合比较,4 种灌溉防护措施下梭梭成活率表现为 PSDI>NIPP>TSDI>NINP 的规律。

2.3　不同灌溉防护措施下梭梭根系形态特征

2.3.1　不同灌溉防护措施下梭梭生物量分配特征

对所有梭梭地上和根系生物量进行整理,分类取平均值,并计算根冠比(表 1),对比分析梭梭移栽 1 年后生物量分配特征。

表 1　不同灌溉防护措施下梭梭生物量及根冠比

Table 1　Biomass and root-shoot ratio of *H. ammodendron* under different irrigation protection measures

灌溉防护措施 Irrigation protection measures	根系生物量 Root biomass		地上生物量 Above-ground biomass		根冠比 Root-shoot ratio
	鲜重/g Fresh weight	干重/g Dry weight of roots	鲜重/g Fresh weight	干重/g Dry weight of roots	
NIPP	3.10±0.46b	1.87±0.41b	9.81±3.16ab	7.19±2.91b	0.28±0.06bc
PSDI	3.64±0.58a	2.17±0.38a	11.01±2.79a	8.85±3.02a	0.26±0.06c
TSDI	2.88±0.41b	1.70±0.42b	8.35±2.86bc	6.21±2.71b	0.30±0.06ab
NINP	2.48±0.50c	1.41±0.42c	7.08±2.97c	4.77±2.37c	0.33±0.08a
P	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***

NIPP:无灌溉竖管防护 No irrigation pipe protection;PSDI:竖管地表滴灌 Vertical pipe surface drip irrigation;TSDI:传统地表滴灌 Traditional surface drip irrigation;NINP:无灌溉无防护 No irrigation and no protection;表中数值为平均值±标准差;同一列不同小写字母表示不同灌溉防护措施之间差异显著($P<0.05$);*、** 和 *** 分别表示处理间在 $P=0.05$、$P=0.01$ 和 $P=0.001$ 水平上存在显著差异

由表 1 可见,灌溉防护措施对梭梭地上、根系生物量以及根冠比均有极显著影响($P<0.01$)。梭梭根系和地上生物量在不同措施间均表现为 PSDI>NIPP>TSDI>NINP 的规律,而根冠比则呈现出相反规律。相较于 NIPP、TSDI 和 NINP 措施,PSDI 措施能够明显提高梭梭根系和地上生物量,其根系干重和地上干重分别比 NIPP、TSDI、NINP 措施增加了 16.0%、27.6%、53.9%和 23.1%、42.5%、85.5%,而根冠比则分别减小了 7.7%、15.4%和 26.9%。

2.3.2　不同灌溉防护措施下梭梭根系形态特征比较

梭梭根系形态特征因灌溉防护措施的不同而形态各异(图 5)。由图 5 可见,无论 NIPP 措施还是 PSDI 措施,其根系形态特征均表现出主根和侧根分布明显,侧根的分支多,根系结构相对复杂,侧根的长度和数目远大于 NINP 措施,NINP 措施下侧根的长度和数目最小。相较于 NIPP 措施,PSDI 的侧根多且粗壮但长度短,而 TSDI 的侧根少且短而细。

将试验前(2022 年 5 月)后(2023 年 5 月)所有梭梭主根长度和粗度进行整理,分类取平均值,并计算增

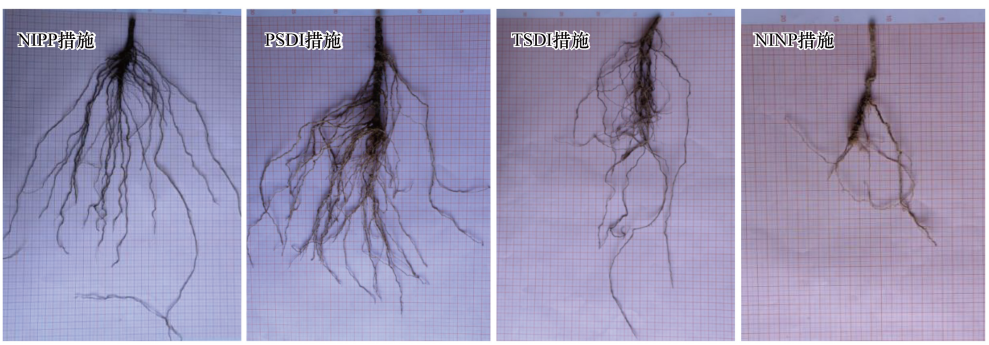

图 5　不同灌溉防护措施下梭梭幼苗根系形态特征

Fig.5　Morphological characteristics of the root system of *H. ammodendron* seedlings under different irrigation protection measures

长量(表 2)。

表 2 不同灌溉防护措施下梭梭主根长度和粗度

Table 2 Main root length and thickness of *H. ammodendron* under different irrigation protection measures

灌溉防护措施 Irrigation protection measures	2022 年 5 月		2023 年 5 月		增长量 Amount of growth	
	主根长/cm Main root length	主根粗/mm Main root thickness	主根长/cm Main root length	主根粗/mm Main root thickness	主根长/cm Main root length	主根粗/mm Main root thickness
NIPP	17.60±2.12a	1.84±0.23a	45.17±7.60b	4.58±0.71b	27.56±9.10b	2.75±0.66b
PSDI	17.93±2.77a	1.89±0.27a	50.84±10.31a	5.20±0.69a	32.91±12.02a	3.31±0.50a
TSDI	17.23±1.90a	1.99±0.44a	42.27±7.34b	4.33±0.76b	25.04±8.22bc	2.34±0.71c
NINP	15.96±1.91b	1.66±0.34b	36.97±8.51c	3.55±0.73c	21.01±8.71c	1.89±0.76d
P	0.008**	0.004**	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***

表中数值为平均值±标准差;同一列不同小写字母表示不同灌溉防护措施之间差异显著($P<0.05$);*、** 和 *** 分别表示处理间在 $P=0.05$、$P=0.01$ 和 $P=0.001$ 水平上存在显著差异

由表 2 可见,灌溉防护措施对梭梭主根生长有极显著影响($P<0.01$),根长和根粗的增长量在不同措施间均呈现出 PSDI>NIPP>TSDI>NINP 的规律。相较于 NIPP、TSDI 和 NINP 措施,PSDI 措施能够明显促进主根的生长发育,其主根长度和粗度的增长量分别比 NIPP、TSDI、NINP 措施提高了 19.4%、31.4%、56.6%和 20.4%、41.5%、75.1%。

对所有梭梭根系各形态指标进行整理,分类取平均值(表 3),对比分析梭梭移栽 1 年后根系形态特征。

表 3 不同灌溉防护措施下梭梭根系形态指标

Table 3 Morphological indicators of *H. ammodendron* root system under different irrigation protection measures

灌溉防护措施 Irrigation protection measures	总根长/cm Total root length	总根表面积/cm^2 Total root surface area	总根体积/cm^3 Total root volume	根平均直径/mm Average root diameter	根尖数 Number of root tips
NIPP	270.88±62.09b	118.42±56.21b	3.37±1.56b	0.96±0.40b	472.00±126.35b
PSDI	437.80±195.78a	148.68±72.83a	4.54±2.72a	1.15±0.40a	760.11±374.91a
TSDI	238.30±55.95b	99.55±45.24b	2.73±1.19b	0.83±0.34bc	408.29±112.48b
NINP	156.69±33.03c	70.59±26.01c	1.70±0.64c	0.66±0.30c	230.96±67.82c
P	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***

表中数值为平均值±标准差;同一列不同小写字母表示不同灌溉防护措施之间差异显著($P<0.05$);*、** 和 *** 分别表示处理间在 $P=0.05$、$P=0.01$ 和 $P=0.001$ 水平上存在显著差异

由表 3 可见,灌溉防护措施对梭梭根系各形态指标(梭梭总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径和根尖数)有极显著影响($P<0.01$),各形态指标的数值大小在不同措施间均表现为 PSDI>NIPP>TSDI>NINP 的规律。PSDI 措施下的梭梭根系各形态指标分别高出 NIPP 措施 1.62、1.26、1.35、1.20 倍和 1.61 倍,高出 TSDI 措施 1.84、1.49、1.66、1.39 倍和 1.86 倍,与 NINP 相比则分别增长了 2.79、2.11、2.67、1.74 倍和 3.29 倍。

如上所述,通过对梭梭根系生物量、主根长、主根粗及形态指标的分析,发现 PSDI 措施对梭梭根系生长发育最有利、最有效。为进一步筛选出 PSDI 措施下梭梭根系健康生长的最优竖管参数,还需对不同竖管管径和竖管埋深组合下梭梭根系的形态特征进行深入研究。

2.4 竖管地表滴灌措施下竖管参数对梭梭根系形态特征的影响

2.4.1 竖管参数下梭梭生物量分配的变化

整理 PSDI 措施下的全部试验处理,每组处理取 3 个重复的平均值,对比分析竖管参数对梭梭生物量及根冠比的影响(表 4)。

由表 4 可见,管径和埋深对梭梭地上生物量、根系生物量以及根冠比均有显著影响($P<0.05$),两者对梭梭地上鲜重和干重表现出极显著交互作用($P<0.01$)。在相同管径条件下,随着埋深的增大,地上和根系生物量均呈先增大后减小的趋势,根冠比则表现出先减小后增大的规律;同一埋深时,随着管径的增大,地上和根

系生物量逐渐增大,而根冠比逐渐减小。综合分析,竖管地表滴灌措施下,D=9 cm 和 B=20 cm 组合的地上和根系鲜重及干重最小,分别为 7.63 g、2.88 g 和 5.36 g、1.79 g,根冠比最大,为 0.34,而 D=16 cm 和 B=15 cm 组合的地上和根系鲜重及干重最大,分别为 15.87 g、4.62 g 和 14.68 g、2.66 g,根冠比最小,为 0.18。

表 4　竖管地表滴灌措施下竖管参数对梭梭生物量及根冠比的影响

Table 4　Effect of vertical pipe parameters on *H. ammodendron* biomass and root-shoot ratio under vertical pipe surface drip irrigation measures

D/cm	*B*/cm	根系鲜重/g Fresh weight of roots	地上鲜重/g Above-ground fresh weight	根系干重/g Dry weight of roots	地上干重/g Above-ground dry weight	根冠比 Root-shoot ratio
9	10	3.07±0.28cB	9.30±0.18cB	1.92±0.22bA	6.70±0.36cB	0.29±0.05aA
	15	3.78±0.14cA	11.32±0.45cA	2.12±0.06aA	8.77±0.13cA	0.24±0.01aA
	20	2.88±0.20bB	7.63±0.15bC	1.79±0.25aA	5.36±0.42bC	0.34±0.07aA
11	10	3.73±0.11bB	11.58±0.49bB	2.36±0.12aAB	9.15±0.08bB	0.26±0.01aAB
	15	4.11±0.12bA	14.16±0.21bA	2.53±0.35aA	12.40±0.30bA	0.20±0.03abB
	20	3.05±0.20abC	8.16±0.21abC	1.84±0.38aB	6.12±0.20aC	0.30±0.06aA
16	10	4.13±0.06aB	12.78±0.27aB	2.37±0.14aAB	10.06±0.14aB	0.24±0.02aB
	15	4.62±0.12aA	15.87±0.14aA	2.66±0.29aA	14.68±0.33aA	0.18±0.02bC
	20	3.44±0.32aC	8.34±0.45aC	1.91±0.33aB	6.36±0.41aC	0.27±0.01aA
P	*D*	0.000***	0.000***	0.016*	0.000***	0.009**
	B	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***
	D∗*B*	0.167ns	0.000***	0.575ns	0.000***	0.993ns

D:管径 Pipe diameter;*B*:埋深 Burial depth;方差分析结果中,同一埋深下,同一列不同小写字母表示管径间差异显著(P<0.05);同一管径下,同一列不同大写字母表示埋深间差异显著(P<0.05);*、** 和 *** 分别表示处理间在 P=0.05、P=0.01 和 P=0.001 水平上存在显著差异,ns 表示差异不显著(P>0.05)

2.4.2　竖管参数下梭梭根系形态指标的变化

对 PSDI 措施下的梭梭主根长度和粗度进行整理,分类取平均值,并计算增长量(表 5)。

表 5　竖管地表滴灌措施下竖管参数对梭梭主根长度和粗度的影响

Table 5　Influence of vertical pipe parameters on the length and thickness of *H. ammodendron* main roots under vertical pipe surface drip irrigation measures

D/cm	*B*/cm	2022 年 5 月		2023 年 5 月		增长量 Amount of growth	
		主根长/cm Main root length	主根粗/mm Main root thickness	主根长/cm Main root length	主根粗/mm Main root thickness	主根长/cm Main root length	主根粗/mm Main root thickness
9	10	20.67±0.58aA	2.05±0.10aA	45.00±3.61aB	5.19±0.06aA	24.33±4.16aB	3.14±0.16aA
	15	19.67±1.89aA	1.55±0.49cB	52.33±1.15cA	4.84±0.09cB	32.67±1.40cA	3.29±0.07cA
	20	18.00±1.00bA	1.59±0.08bB	40.00±2.00bC	4.32±0.14bC	22.00±1.00bB	2.73±0.07bB
11	10	18.00±1.00abA	1.81±0.05bA	49.00±1.00aB	5.09±0.24aAB	31.00±1.73aB	3.29±0.26aA
	15	18.00±1.02aA	1.92±0.23bA	59.33±0.85bA	5.54±0.30bA	41.33±0.35bA	3.62±0.10bA
	20	16.67±1.52bA	2.02±0.15aA	39.67±1.53bC	4.97±0.09aB	23.00±1.00bC	2.95±0.07aB
16	10	17.00±2.65bB	1.98±0.03aB	48.67±3.21aB	5.33±0.54aB	31.67±5.86aB	3.35±0.54aB
	15	12.33±1.53bC	2.36±0.21aA	74.00±1.32aA	6.77±0.18aA	61.67±0.76aA	4.41±0.04aA
	20	21.00±0.87aA	1.73±0.09bB	49.53±1.75aB	4.75±0.15aB	28.53±1.17aB	3.03±0.07aB
P	*D*	0.003**	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***
	B	0.019*	0.020*	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***
	D∗*B*	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.008**

由表 5 可见,埋深对梭梭主根长度和粗度的增长量均有极显著影响($P<0.01$),在相同管径条件下,主根长度和粗度随埋深的增大呈先增大后减小的趋势,如 $D=11$ cm 时,$B=15$ cm 的主根长度和粗度增长量相比 10 和 20 cm 的埋深分别增大了 33.3%、10.0%和 79.7%、22.7%;管径对主根长度和粗度的增长量均有极显著影响($P<0.01$),同一埋深时,主根长度和粗度均随管径的增大而增大,如 $B=15$ cm 时,$D=16$ cm 的主根长度和粗度增量分别为 61.67 cm 和 4.41 mm,与 $D=11$ cm 相比,分别增加了 49.2%和 21.8%,与 $D=9$ cm 相比,分别增加了 88.8%和 34.0%。综合比较,在 $D=16$ cm 和 $B=15$ cm 组合下梭梭主根长度和粗度的生长量均为最大。

针对 PSDI 措施,分类整理不同竖管参数组合下梭梭总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径和根尖数,列于表 6。

表 6 竖管地表滴灌措施下竖管参数对梭梭根系形态指标的影响

Table 6 Influence of vertical pipe parameters on morphological indicators of *H. ammodendron* roots under vertical surface drip irrigation measures

D/cm	*B*/cm	总根长/cm Total root length	总根表面积/cm^2 Total root surface area	总根体积/cm^3 Total root volume	根平均直径/mm Average root diameter	根尖数 Number of root tips
9	10	317.39±45.50bB	92.13±4.58cB	2.50±0.10cB	0.79±0.17cB	376.67±22.19cB
	15	451.00±16.84cA	183.58±5.83bA	5.09±0.76cA	1.22±0.05cA	851.67±74.93cA
	20	224.93±8.69cC	42.71±9.62cC	0.81±0.05cC	0.49±0.17bC	261.67±13.32cC
11	10	330.15±25.15bB	142.71±4.08bAB	3.22±0.29bB	1.10±0.02bB	608.67±24.03bB
	15	577.71±42.62bA	195.43±53.41bA	7.33±0.43bA	1.59±0.09bA	1184.00±169.73bA
	20	249.44±1.30bC	100.31±5.91bB	1.82±0.12bC	0.97±0.04aB	578.33±32.96bB
16	10	504.12±15.99aB	160.16±3.02aB	6.69±0.09aB	1.30±0.11aB	872.00±55.67aB
	15	880.48±27.11aA	299.58±9.87aA	9.33±0.93aA	1.85±0.01aA	1476.00±124.9aA
	20	405.01±17.46aC	121.31±5.91aC	4.08±0.27aC	1.10±0.03aC	632.00±18.52aC
P	*D*	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***
	B	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***
	D * *B*	0.000 ***	0.006 **	0.018 *	0.332 ns	0.051 ns

由表 6 可见,管径和埋深对梭梭根系各形态指标均有极显著影响($P<0.01$),两因素对总根长、总根表面积和总根体积均表现出显著交互作用($P<0.05$)。同一管径时,随着埋深的增大,根系各形态指标均表现出先增大后减小的趋势,如 $D=11$ cm 时,$B=15$ cm 的总根长(577.71 cm)、总根表面积(195.43 cm^2)、总根体积(7.33 cm^3)、根平均直径(1.59 mm)和根尖数(1184.00)相比 10 和 20 cm 的埋深分别增大了 75.0%、36.9%、127.6%、44.5%、94.5%和 131.6%、94.8%、302.7%、63.9%、104.7%;在相同埋深条件下,根系各形态指标均随管径的增大而增大,如 $B=15$ cm 水平下,$D=16$ cm 的总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径和根尖数均达最大,分别为 880.48 cm、299.58 cm^2、9.33 cm^3、1.85 mm、1476.00,相比 $D=11$ 和 9 cm,分别增加了 52.4%、53.3%、27.3%、16.4%、24.7%和 95.2%、63.2%、83.3%、51.6%、73.3%。综合分析,在 $D=16$ cm 和 $B=15$ cm 组合下梭梭根系各形态指标均为最大值。

3 讨论

3.1 不同灌溉防护措施对土壤水分和梭梭成活率的影响

植物固沙区可利用水资源短缺,加之蒸发蒸腾量大,土壤水分成为植物生长发育的关键胁迫因子,而植物对土壤水分的动态响应主要是通过根系进行的。研究发现,4 种措施情景下土壤水分均随土层深度的增大而增大,这应该是风沙环境中浅层土壤蒸发强烈造成水分损失所致,这一水分分布规律有利于植物根系向深层生长以提高其抗旱性和抗热性,这与唐国栋等[29]在腾格里沙漠东北缘飞播造林区观测到的土壤水分分布规

律相一致,也与马晓东等[30]研究结果相符;因为有灌溉水的补给,同一时期相同深度 PSDI 的土壤含水率又高于 NIPP 的,而同一深度 TSDI 的土壤含水率略低于 NIPP 的,这可能与地表蒸发有关,NIPP 组合下由于竖管有效遮挡了太阳辐射和降低了地表风速,进而抑制了管内外土壤蒸发损失。另外有可能是随着夜间温度的降低,沙土层出现了吸湿凝结水汽的现象,而竖管对蒸发的抑制作用使部分凝结水保存了下来,提高了沙层土壤含水率[31]。遗憾的是在试验中我们忽略了这一现象的观测,在后续的研究中还需全面探究竖管夜间吸湿凝结水分现象。整体来看,同一时期相同深度土壤含水率表现为 PSDI>NIPP>TSDI>NINP 的规律,这一规律对于指导风沙区植被恢复与重建具有重要意义,对于无灌溉条件的地区,采用管件防护技术进行植树造林也是一种有效的方法[14],对于有灌溉条件的地区,将地表滴灌与管件防护技术相结合,组成竖管地表滴灌系统,其在风沙区植被恢复与重建中技术优势更显著[27—28]。此外,不同灌溉防护措施之间,0—20 cm 深度土壤含水率差异较大,而 20—40 cm 深度差异较小,这主要是因为 20 cm 以上沙土层蒸发强烈,竖管对蒸发产生抑制作用,而 20 cm 以下沙土层蒸发微弱,水分相对稳定的缘故。梭梭幼苗在移栽初期,基本能够全部成活,在无竖管防护的情况下,仅依靠天然降水,梭梭的成活率相对较低,说明水分对梭梭的存活至关重要[32]。梭梭幼苗在移栽后期,尤其是越冬期,灌溉防护措施将发挥重要作用。整个越冬季,梭梭幼苗均有不同程度死亡,成活率表现为 PSDI>NIPP>TSDI>NINP 的规律,这可能是由于低温对梭梭根系产生了冻害,而竖管防护对根系起到了保温作用,另外 PSDI 和 NIPP 措施下土壤含水率相对较高,也保证了梭梭幼苗在越冬期的水分供应。

3.2　不同灌溉防护措施对梭梭根系形态特征的影响

灌溉防护措施会对梭梭根系的生长发育产生影响,根系生物量及形态指标值均呈现出 PSDI>NIPP>TSDI>NINP 的规律,分析原因是不同灌溉防护措施引起了土壤水分的差异,PSDI 措施下筒内土壤水分含量最高,极大地促进了根系的生长,同时也推动了侧根的分支和发育,使梭梭根系生物量及根系形态指标均达到最大值;另外,NIPP 的根系生物量及形态指标值均优于 TSDI 和 NINP 措施,这主要归因于竖管的设置有效利用了天然降水并抑制了水分蒸发,使土壤含水率保持在较高水平。这表明在适宜的土壤水分环境下,较高的土壤含水率,有利于梭梭根系的生长发育,可使根系发达健壮,这与杨再强等[33]通过研究土壤水分胁迫对番茄根系生长的影响结论相一致。梭梭的根冠比呈现出 PSDI<NIPP<TSDI<NINP 的规律,这是因为土壤水分对梭梭地上部分的影响比对地下部分的影响更大所致,PSDI 措施下土壤水分含量较高,促进于梭梭地上部分的生长,导致根冠比降低;反之,NINP 措施下土壤水分含量较低,抑制于梭梭地上部分的生长,使得根冠比增大。这与王怀苹等[34]对不同节水灌溉方式下夏玉米生长及水分利用的研究结果相一致,也与 Shan 等[35]研究结果相吻合。

3.3　竖管地表滴灌措施下竖管参数对梭梭根系形态特征的影响

竖管地表滴灌改变了传统地表滴灌湿润模式,减少了水分蒸发,降低了地表高温和风沙流对植物幼苗的伤害,为幼苗生长提供了相对适宜的土壤水热微环境,相比于其他 3 种灌溉防护措施,其幼苗成活率及根系生长状态均表现出最佳性能。竖管参数对梭梭根系的生长有显著影响,当管径一定时,随着埋深的增大,根系生物量、主根增长量及根系形态指标均表现为先增大后减小的规律,根冠比则呈现先减小后增大的趋势,这可能是由竖管埋深较浅(10 cm)时,灌溉水容易到达地表,造成较大蒸发损失,而竖管埋深较深(20 cm)时,根系纵向生长受限所致;当埋深一定时,根系生物量、主根增长量及根系形态指标均随管径的增大而增大,而根冠比则随管径的增大而减小,这可能是因为管径过小(9 cm 和 11 cm),会束缚梭梭地上和根系生长的缘故。从经济和管理角度考虑,并不是管径越大越好,当管径超过 16 cm 时,由于管径过大太阳会大面积照射管内地表,加大土壤蒸发,进而抑制幼苗生长,同时还会增加经济成本;当竖管埋深较浅,竖管容易风吹倒伏,且灌溉水容易到达地表,增加蒸发损失,当竖管埋深较深,根系纵向生长受限,竖管长度被迫增大,引起经济成本增加。综合分析,在 3 种管径(9 cm、11 cm 和 16 cm)和埋深(10 cm、15 cm 和 20 cm)组合下,管径 16 cm 和埋深 15 cm 是最有利于梭梭幼苗生长的参数组合。

需要说明的是本试验采用筒栽方式,试验土体较小,水分蒸发量大,与实际大田中植物的生长还有一定差

异,试验结果还需进一步结合大田试验研究;另外,本研究采用的竖管为 PVC 材质,考虑到该材料难降解问题,后期仍需开展可降解、经济、环保的沙制管件研制工作,以期为干旱风沙区大面积生态植被恢复提供一种可靠的新思路和新技术。

4 结论

以 1 年生梭梭幼苗为试验材料,通过野外筒栽试验,研究了传统地表滴灌(TSDI)、无灌溉竖管防护(NIPP)、竖管地表滴灌(PSDI)和无灌溉无防护(NINP)等 4 种措施下土壤水分分布及梭梭幼苗成活率的差异,分析了不同情景及竖管参数(管径和埋深)组合下梭梭根系性状特征。主要结论如下:

1)4 种灌溉防护措施下土壤水分均随土层深度的增大而增大,同一时期相同深度土壤含水率表现为 PSDI>NIPP>TSDI>NINP 的规律;PSDI 的梭梭根系生物量、主根增长量及根系形态指标均为最大值,而 NINP 的均为最小值,NIPP 的优于 TSDI 而劣于 PSDI。

2)灌溉防护措施对梭梭成活率至关重要,不同措施下梭梭成活率存在显著差异。移栽 1 年后,PSDI 措施下的成活率最高,达到 88.9%,NINP 措施下的成活率最低,仅为 11.1%,而 NIPP 和 TSDI 措施下的成活率介于 PSDI 和 NINP 之间,分别为 81.5%和 44.4%;

3)PSDI 措施下竖管参数对梭梭生长有显著影响。当管径一定时,根系生物量、主根长、主根粗、总根长、总根表面积、总根体积、根平均直径和根尖数均随埋深的增大呈先增大后减小的趋势,根冠比则呈先减小后增大;当埋深一定时,根系生物量、主根长、粗度及各形态指标均随管径的增大而增大,根冠比则减小。

参考文献(References):

[1] Zhao W Z, Hu G L, Zhang Z H, He Z B. Shielding effect of oasis-protection systems composed of various forms of wind break on sand fixation in an arid region: a case study in the Hexi Corridor, Northwest China. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 119-125.

[2] 卢琦, 雷加强, 李晓松, 杨有林, 王锋. 大国治沙:中国方案与全球范式. 中国科学院院刊, 2020, 35(6): 656-664.

[3] 张正偲, 潘凯佳, 张焱, 韩兰英. 中国西北戈壁区沙尘暴过程中近地层风沙运动特征. 中国沙漠, 2023, 43(2): 130-138.

[4] Wei W J, Wang B, Niu X. Soil erosion reduction by grain for green project in desertification areas of northern China. Forests, 2020, 11(4): 473.

[5] Cao X, Jiao J Y, Li J J, Qi H K, Bai L C, Wang X, Sun X C. Morphometric characteristics and sand intercepting capacity of dominant perennial plants in the Eastern Qaidam Basin: implication for aeolian erosion control. Catena, 2022, 210: 105939.

[6] Li X R, Zhang Z S, Tan H J, Gao Y H, Liu L C, Wang X P. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of Northern China: relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert. Science China Life Sciences, 2014, 57(5): 539-548.

[7] Xu G Q, Yu D D, Xie J B, Tang L S, Li Y. What makes *Haloxylon persicum* grow on sand dunes while *H. ammodendron* grows on interdune Lowlands: a proof from reciprocal transplant experiments. Journal of Arid Land, 2014, 6(5): 581-591.

[8] 张丹, 马松梅, 魏博, 王春成, 张林, 闫涵. 中国梭梭属植物历史分布格局及其驱动机制. 生物多样性, 2022, 30(1): 42-51.

[9] He P, Li Y F, Xu N, Peng C, Meng F Y. Predicting the suitable habitats of parasitic desert species based on a niche model with *Haloxylon ammodendron* and *Cistanche deserticola* as examples. Ecology and Evolution, 2021, 11(24): 17817-17834.

[10] Zandalinas S I, Mittler R, Balfagon D, Arbona V, Gomez-Cadenas A. Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. Physiologia Plantarum, 2018, 162(1): 2-12.

[11] Stephenson N L, Das A J. Height-related changes in forest composition explain increasing tree mortality with height during an extreme drought. Nature Communications, 2020, 11(1): 3402.

[12] 王波, 薛源, 潘绒, 任文静, 张桦. 梭梭幼苗在高温胁迫适应性建立过程中的细胞死亡特征分析. 分子植物育种, 2021, 19(15): 5157-5163.

[13] 周洁, 杨晓东, 王雅芸, 隆彦昕, 王妍, 李涔睿, 孙启兴, 孙楠. 梭梭和骆驼刺对干旱的适应策略差异. 植物生态学报, 2022, 46(9): 1064-1076.

[14] 麻浩, 张桦, 马林, 任财, 王泽, 高新, 方辉, 何小玲. 无灌溉管件防护梭梭荒漠造林新技术及其示范推广. 中国科学: 生命科学, 2014, 44(3): 248-256.

[15] 朱广龙, 陈许兵, 郭小倩, 焦秀荣, 周桂生. 酸枣根系结构可塑性对自然梯度干旱生境的适应机制. 生态学报, 2018, 38(16):

5810-5818.

[16] 卢福浩, 沙衣班·吾布力, 刘深思, 徐贵青. 根深决定不同个体大小梭梭对夏季干旱生理响应的差异. 生态学报, 2021, 41(8): 3178-3189.

[17] Maurel C, Nacry P. Root architecture and hydraulics converge for acclimation to changing water availability. Nature Plants, 2020, 6: 744-749.

[18] Zhang Z Y, Fan B M, Song C, Zhang X X, Zhao Q W, Ye B. Advances in root system architecture: functionality, plasticity, and research methods. Journal of Resources and Ecology, 2022, 14(1): 15-24.

[19] 张晓龙, 邓童, 刘学森, 郑玲娜, 于超, 罗乐. 单叶蔷薇幼苗根系对不同潜水埋深的适应机制. 生态学报, 2022, 42(15): 6137-6149.

[20] 郭京衡, 李尝君, 曾凡江, 张波, 刘波, 郭自春. 2 种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系. 干旱区研究, 2016, 33(1): 166-171.

[21] 刘深思, 徐贵青, 陈图强, 米晓军, 刘燕, 马健, 李彦. 地下水埋深对幼龄梭梭功能性状的影响. 应用生态学报, 2022, 33(3): 733-741.

[22] 单立山, 张希明, 花永辉, 魏疆, 闫海龙, 解婷婷. 塔克拉玛干沙漠腹地梭梭幼苗根系分布特征对不同灌溉量的响应. 植物生态学报, 2007, 31(5): 769-776.

[23] 郑强卿, 李鹏程, 李铭, 陈奇凌, 王晶晶. 滴灌条件下肉苁蓉与梭梭及根际土壤水分关系研究. 新疆农业科学, 2013, 50(2): 334-341.

[24] 杜虎林, 鲍忠文, 金小军, 周宏伟, 孙书澎, 阎若森, 吴天长. 塔里木沙漠公路防护林滴灌水分利用效率分析. 中国沙漠, 2012, 32(2): 359-363.

[25] 王泽, 梁燕, 阿不都克玉木·米吉提, 王新军, 陈亭亭, 赵国梅. 防护条件下梭梭幼苗生长及养分吸收特性. 干旱区研究, 2017, 34(1): 112-118.

[26] 范严伟, 王延祥, 朱鹏程, 杨志伟. 竖管地表滴灌下风沙土稳定入渗率与湿润体估算模型. 农业工程学报, 2021, 37(7): 103-111.

[27] 范严伟, 王延祥, 史金红, 马亮军, 殷伟凡. 竖管地表滴灌与普通地表滴灌土壤水分运移特性对比试验研究. 水土保持学报, 2022, 36(6): 163-170.

[28] 范严伟, 史金红, 唐兴鹏. 不同防护措施下流沙地表层温湿度的日变化特征. 水土保持通报, 2023, 43(6): 72-80, 88.

[29] 唐国栋, 葛楠, 张铁军, 郭建英, 刘艳萍. 腾格里沙漠东北缘飞播植物群落土壤水分特征. 水土保持通报, 2023, 43(6): 10-17.

[30] 马晓东, 李卫红, 朱成刚, 陈亚宁. 塔里木河下游土壤水分与植被时空变化特征. 生态学报, 2010, 30(15): 4035-4045.

[31] 李红寿, 汪万福, 郭青林, 范宇权, 李燕飞. 敦煌莫高窟干旱地区水分凝聚机理分析. 生态学报, 2009, 29(6): 3198-3205.

[32] 王国华, 陈蕴琳, 猴倩倩. 荒漠绿洲过渡带不同年限雨养梭梭(*Haloxylon ammodendron*)对土壤水分变化的响应. 生态学报, 2021, 41(14): 5658-5668.

[33] 杨再强, 邱译萱, 刘朝霞, 陈艳秋, 谭文. 土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响. 生态学报, 2016, 36(3): 748-757.

[34] 王怀苹, 杨明达, 张素瑜, 李帅, 关小康, 王同朝. 不同节水灌溉方式对夏玉米生长、产量及水分利用的影响. 作物杂志, 2024(2): 206-212.

[35] Shan L S, Zhang X M, Wang Y K, Wang H, Yan H N, Wei J, Xu H. Influence of moisture on the growth and biomass allocation in *Haloxylon ammodendron* and *Tamarix ramosissima* seedlings in the shelterbelt along the Tarim Desert Highway, Xinjiang, China. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 93-101.