

## 荒漠—绿洲过渡带典型混交灌木根区土壤含水率变化特征

麻 进,胡广录\*,陈海志,焦 娇

(兰州交通大学 环境与市政工程学院,甘肃 兰州 730070)

**摘 要:**土壤水分是干旱区植被生长的限制因子,研究荒漠—绿洲过渡带植被根区土壤水分时空变化对抵御沙漠化进程具有重要意义。以荒漠-绿洲过渡带3种典型混交灌木梭梭×泡泡刺(SS×PP)、泡泡刺×沙拐枣(PP×SG)、沙拐枣×梭梭(SG×SS)为研究对象,对3种典型混交灌木根区0~100 cm土层土壤进行连续采样并测定土壤含水率。结果表明:1)7—9月,3种混交灌木根区0~100 cm土层土壤含水率的变化范围依次为:梭梭×泡泡刺0.54%~2.75%、1.06%~2.41%、0.73%~4.72%;沙拐枣×梭梭0.42%~2.59%、0.96%~2.35%、0.57%~3.58%;泡泡刺×沙拐枣0.31%~2.38%、0.56%~2.33%、0.79%~3.71%。3种混交灌木在0~60 cm土层土壤含水率随深度增加而增大,60~100 cm土层各类型混交灌木土壤含水率变化逐渐趋于稳定。2)7月,0~100 cm土层混交灌木梭梭×泡泡刺的土壤含水率显著高于沙拐枣×泡泡刺,9月,20~40、60~100 cm土层混交灌木沙拐枣×梭梭的土壤含水率显著低于其他2种混交灌木类型。3)3种混交灌木土壤持水能力大小为梭梭×泡泡刺>泡泡刺×沙拐枣>沙拐枣×梭梭。研究结果为荒漠—绿洲过渡带防风固沙植被建设中植物种类的选择提供科学依据。

**关键词:**荒漠—绿洲过渡带;土壤含水率;混交灌木;土壤持水能力

**中图分类号:**S718.43

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)01-0034-08

### Variation Characteristics of Soil Moisture Content in the Root-Zone Soil of Typical Mixed Shrubs in the Desert-Oasis Transition Zone

MA Jin, HU Guang-lu\*, CHEN Hai-zhi, JIAO Jiao

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** Soil moisture is the limiting factor for vegetation growth in arid regions. It is of great significance to study the temporal and spatial changes of soil moisture in the root zone of vegetation in the desert-oasis transition zone to resist the process of desertification. In this paper, three typical mixed shrubs occurring in the desert-oasis transition zone were studied: *Haloxyylon ammodendron* × *Nitraria sphaerocarpa* (SS × PP), *Nitraria sphaerocarpa* × *Calligonum mongolicum* (PP × SG) and *Calligonum mongolicum* × *Haloxyylon ammodendron* (SG × SS). Soils in the 0—100 cm soil layer in the root zone of three typical mixed shrubs were continuously sampled and the soil moisture contents were measured. The results showed that 1) from July to September, the ranges of soil moisture content in the 0—100 cm soil layer in the root zone of the three mixed shrubs were as follows: SS × PP: 0.54%—2.75% (July), 1.06%—2.41% (August), 0.73%—4.72% (September); SG × SS: 0.42%—2.59%, 0.96%—2.35%, 0.57%—3.58%; SG × PP: 0.31%—2.38%, 0.56%—2.33%, 0.79%—3.71%. From July to September, the soil moisture contents of the three types of fixing land plants in the 0—60 cm soil layer increased with soil depth, while the contents were gradually stable in the soil layer of 60—100 cm in three mixed shrubs. 2) In July, the soil moisture

收稿日期:2022-05-06 修回日期:2022-06-16

基金项目:国家自然科学基金(41561102,41867074)。

第一作者:麻 进。研究方向:干旱区环境生态修复。E-mail:845041926@qq.com

\* 通信作者:胡广录,博士,教授。研究方向:生态水文及生态修复。E-mail:hgl0814@163.com

content in the soil layer of 0—100 cm with SS×PP was significantly higher than that of SG×PP. In September, the soil moisture contents of SG×SS in the soil layers of 20—40 cm and 60—100 cm were significantly lower than those of other mixed types. 3) The soil water-holding capacity of the three types of fixing land plants ranked as SS×PP>SG×PP>SG×SS. The results of this study can provide a scientific basis for the construction of windbreak and sand fixation vegetation in the desert-oasis transition zone.

**Key words:** desert-oasis transition zone; soil moisture content; mixed shrub; soil water holding capacity

荒漠—绿洲过渡带生态环境脆弱且敏感<sup>[1]</sup>,但在保护绿洲稳定及抵御荒漠化进程中起着重要作用。过渡带区域有部分和沙漠生境相类似的特性,降雨稀少且蒸发量大,存在显著的资源型缺水问题,地表风蚀风积严重,容易形成结皮<sup>[2-3]</sup>;过渡带亦有部分与绿洲相类似的特性,能够保留一定程度的肥力,使得部分耐干旱、耐盐碱、抗风蚀、抗沙埋的荒漠植被正常生长发育。土壤作为植物生长的载体,其质量高低,对荒漠—绿洲过渡带植被的生长及生态环境的稳定有着直接影响。土壤水分作为土壤的重要组成部分,不仅影响着植物的生长,同时对荒漠—绿洲过渡带生态系统的结构和功能起着至关重要的作用<sup>[4-7]</sup>。因此,了解荒漠—绿洲过渡带土壤水分的变化规律对沙漠化逆转<sup>[8]</sup>、固沙植被的建设具有重要指导意义。

目前,许多国内学者针对干旱半干旱区土壤水分开展了大量研究。其中张克海等<sup>[9]</sup>对单一固沙植被梭梭进行研究,发现在花期与果期土壤水分含量的主要影响因素不同,石薇等<sup>[10]</sup>以腾格里沙漠人工固沙植被区土壤为例,研究了浅层土壤水分入参与再分配过程,陈悦等<sup>[11]</sup>研究了新疆艾比湖湿地土壤水、盐、SOM 含量和空间分布以及三者之间的关系,张帅普等<sup>[12]</sup>对黑河中游边缘的土壤有机质与土壤水分之间的相关性进行研究,徐雅洁等<sup>[13]</sup>对鄂尔多斯西柳沟不同林分配置对土壤水分物理性质的影响进行探讨,张定海等<sup>[14]</sup>通过建立生态-水文模型,模拟了腾格里沙漠固沙灌木盖度和深层土壤水分的动态变化过程。这些研究主要集中在单一植被水分动态变化、植被水分空间分布与土壤理化性质的关系、土壤水分动态模拟等方面,但对于干旱区混交灌木根区土壤含水率特征研究涉及较少。

甘肃省临泽县北部的荒漠—绿洲过渡带,自 20 世纪 50 年代后,当地群众为了防风固沙、保护绿洲农业生产,在流动和半固定沙地上不间断地栽植了大量防风固沙植物,不同时期栽植的植物大多是抗旱、抗风蚀、耐盐碱的灌木,但受气候、土壤和水分条件的限制,植物的成活率并不高,目前该区域固沙植被大多呈斑块状格局,有天然的(泡泡刺)也有人工的(梭梭、沙拐枣等),基本属于混交栽植模式,植被

覆盖度约为 30%,但这些固沙植被对于保护临泽绿洲的安全稳定发挥了极其重要的作用。因此,以此区域固沙植物根区土壤为研究对象,通过对 3 种典型混交灌木根区的土壤进行采样和土壤含水率测定,比较不同类型混交灌木根区土壤含水率的垂直分布及差异性,旨在为荒漠—绿洲过渡带固沙植被局地生态环境的快速构建以及固沙植物种类的合理选择提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于河西走廊张掖市临泽县北部、巴丹吉林沙漠南缘的沙漠—绿洲过渡带(39°21′53″—39°22′01″N, 100°09′12″—100°09′14″E)(图 1),海拔 1 380~2 278 m,属典型的温带大陆性荒漠气候,多年平均气温 7.6℃,最高温度为 39.1℃,最低气温为-27.3℃。年降水量 117 mm,且多集中在 7—9 月;年蒸发量 2 360 mm,空气相对湿度 46%。风向以西北风为主,年平均风速为 3.2 m·s<sup>-1</sup>,4—5 月风沙活动强烈,最大风速 21 m·s<sup>-1</sup>。土壤以风沙土为主,植被群落简单,以超旱生植被为主,代表性植物有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)等。

### 1.2 样地选择与土壤采样

选择地势相对平坦的丘间地段作为样地,于 2021 年 7—9 月进行采样,7 月 6 日开始第 1 次采样,采样间隔为 30 d,共计采样 3 次。在样地中选取 3 种不同类型的混交灌木,分别为梭梭×泡泡刺(SS×PP)、泡泡刺×沙拐枣(PP×SG)、沙拐枣×梭梭(SG×SS)。所选混交灌木的 2 棵植株间距为 1~3 m,植株周围 5 m 范围内无其他或极少有其他固沙植物存在,此种情况下能更好反映各类型混交灌木的土壤水分特征。每种混交灌木类型选取 3 处土壤采样点。

每月上旬,以混交的 2 株植物几何中心连线的中点作基点开挖土壤剖面,剖面深度为 100 cm,每 20 cm 垂直间距作为一采样土层。采样时开辟 50 cm×50 cm 采样平台,通过五点采样法进行采

样,每层共采取 200~300 g 土壤,混合装入塑封袋中,之后置于储物箱内,待采样完毕后一并带回实验室处理。实验室采取烘干法测量土壤含水率<sup>[15-16]</sup>。

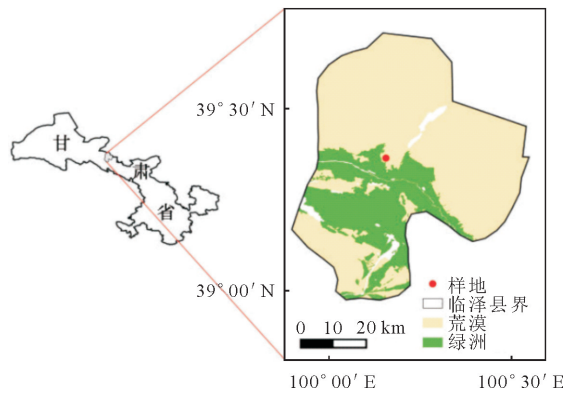


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

### 1.3 数据处理

采用 Excel 2019 和 SPSS26.0 软件对混交灌木根区土壤含水率数据进行统计分析,采用 Origin2018 软件绘制图形。数据分析采用描述性统

计、单因素方差分析(ANOVA)。其中,单因素方差分析采用最小显著性差异法(Least Significance Difference),使用邦弗伦尼法(Bonferroni)进行差异性检验,采用沃勒-邓肯(Waller-Duncan)法分析试验结果并进行差异性标注。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同混交灌木根区土壤含水率描述性统计特征

7—9 月 3 种混交灌木 SS×PP、SG×SS、SG×PP 在 0~100 cm 土层土壤含水率描述性统计特征(表 1)结果显示:每种混交灌木根区土壤含水率的平均值在各个月份不同,SS×PP 9 月(2.77%)>7 月(1.88%)>8 月(1.84%);SG×SS 9 月(1.84%)>7 月(1.82%)>8 月(1.56%);SG×PP 9 月(2.43%)>8 月(1.71%)>7 月(1.48%)。

上述结果说明混交灌木 SS×PP 根区土壤含水率相对较高,与 8 月相比,7、9 月 3 种混交灌木土壤含水率变异程度相对较大,但都属于中低等变异程度。

表 1 不同混交灌木 0~100 cm 土层土壤含水率描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of soil moisture contents in 0~100 cm soil layers of different mixed shrubs

混交类型	月份	最大值(%)	最小值(%)	平均值(%)	标准差	变异系数
SS×PP	7	2.75	0.54	1.88	0.88	0.47
	8	2.41	1.06	1.84	0.47	0.25
	9	4.72	0.73	2.77	1.35	0.49
SG×SS	7	2.59	0.42	1.82	0.84	0.46
	8	2.35	0.96	1.56	0.42	0.27
	9	3.58	0.57	1.84	1.03	0.56
SG×PP	7	2.38	0.31	1.48	0.79	0.54
	8	2.33	0.56	1.71	0.45	0.26
	9	3.71	0.79	2.43	0.98	0.40

### 2.2 混交灌木根区土壤含水率垂直变化特征及差异

2.2.1 不同混交灌木根区土壤含水率垂直变化特征 由图 2 可见,7 月 3 种混交灌木土壤含水率都随土层深度增加而增大;此月土壤含水率最大值出现在混交灌木 SS×PP 的 60~80 cm 土层,最小值出现在混交灌木 SG×PP 的 0~20 cm 土层。8 月混交灌木 SS×PP、SG×PP 土壤含水率呈现先增大后减小趋势;混交灌木 SG×SS 土壤含水率仍随土层深度增加而增大;混交灌木 SG×PP 土壤含水率在 60~80 cm 随土层深度增加而减小,而混交灌木 SS×PP 土壤含水率在 60~100 cm 随土层深度增加而减小。本月土壤含水率最大值出现在混交灌木 SS×PP 的 80~100 cm 土层,最小值出现在混交灌木 SS×PP 的 0~20 cm 土层。9 月 3 种混交灌木的土壤含水率均呈现先增大后减小的趋势;混交灌木

SG×PP 土壤含水率在 40~100 cm 随土层深度增加而减小,而混交灌木 SS×PP、SG×SS 土壤含水率在 60~100 cm 随土层深度增加而减小。此月土壤含水率最大值出现在混交灌木 SS×PP 的 40~60 cm 土层,最小值出现在混交灌木 SG×SS 的 0~20 cm 土层。分析结果表明不同类型的混交灌木根区土壤含水率在垂直分布上存在差异。

2.2.2 同一类型混交灌木不同土层土壤含水率的差异 由图 3 可见,7 月混交灌木 SS×PP、SG×SS 在不同土层间土壤含水率均存在显著性差异,而混交灌木 SG×PP 土壤含水率在 60~100 cm 的不同土层间无显著差异。8 月混交灌木 SS×PP 在 40~80 cm 的各土层间土壤含水率差异性不显著,而混交灌木 SG×SS、SG×PP 在各土层间土壤含水率无显著性差异。9 月混交灌木 SS×PP、SG×PP 在各土层间土壤含水率均差异性显著,而混交灌木 SG×

SS的土壤含水率在60~80 cm与80~100 cm土层间无显著性差异,混交灌木SS×PP、SG×SS在40~60 cm的土壤含水率均显著高于其余土层。分析结果表明同一混交灌木在不同月份、不同土层,其根区土壤含水率存在不同程度的差异性。

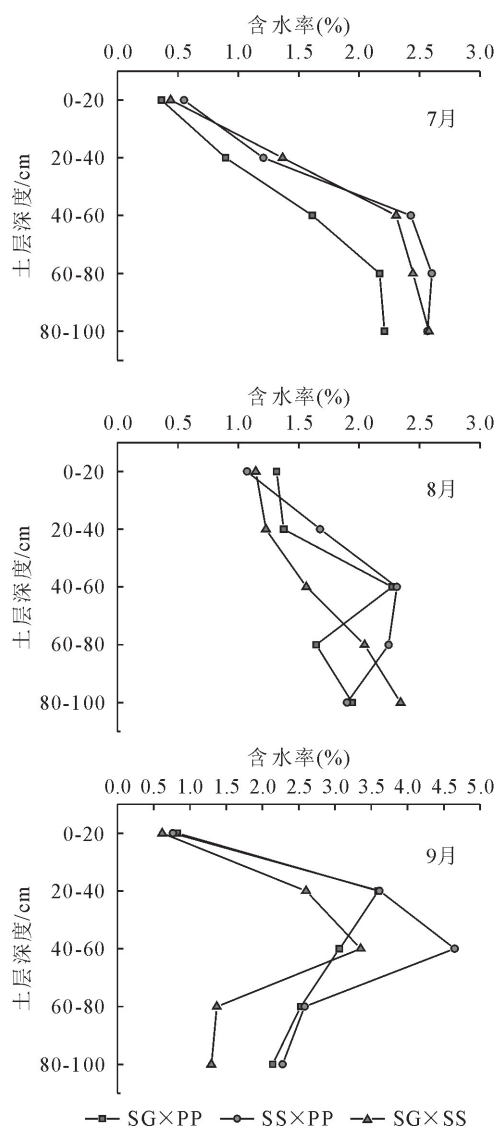


图2 7—9月不同类型混交灌木根区土壤含水率垂直变化

Fig. 2 Vertical change of soil moisture contents in root zone of different types of mixed shrubs from July to September

2.2.3 同一土层不同类型混交灌木土壤含水率的差异 由图4可见,7月0~60 cm土层3种混交灌木根区土壤含水率之间均存在显著性差异;60~80 cm土层,混交灌木SG×SS、SG×PP的土壤含水率无显著性差异,同时两者土壤含水率显著低于混交灌木SS×PP;80~100 cm土层,混交灌木SS×PP、SG×SS的土壤含水率无显著性差异,但均显著高于混交灌木SG×PP的土壤含水率。8月在0~20、80~100 cm土层,3种混交灌木土壤含水率之间均无显著性差异;20~80 cm土层3种混交灌木土壤含水率之间均存在显著性差异。9月在0~20 cm

土层,3种混交灌木土壤含水率之间均无显著性差异;20~40、60~100 cm土层混交灌木SG×SS的土壤含水率显著低于其余混交类型,且其余各混交类型的土壤含水率之间均无显著性差异;40~60 cm土层3种混交灌木土壤含水率之间均存在显著性差异。分析结果表明不同类型混交灌木根区土壤含水率在不同月份、同一土层间均存在不同程度的差异性。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

1)7—9月混交灌木根区0~100 cm土层土壤含水率变化范围依次如下:SS×PP为0.54%~2.75%、1.06%~2.41%、0.73%~4.72%;SG×SS为0.42%~2.59%、0.96%~2.35%、0.57%~3.58%;SG×PP为0.31%~2.38%、0.56%~2.33%、0.79%~3.71%;3种混交灌木土壤含水率变化均在60~100 cm土层逐渐趋于稳定。

2)混交灌木根区土壤含水率垂向上表现出2种变化趋势,一是随深度增加而增大,二是随深度增加先增大后减小。月际间,同一土层下不同混交灌木土壤含水率之间存在显著性差异,7月在0~100 cm土层混交灌木SS×PP土壤含水率显著高于混交灌木SG×PP,8月在20~80 cm土层混交灌木SS×PP土壤含水率整体上显著高于SG×SS,9月在20~40 cm与60~100 cm土层混交灌木SG×SS土壤含水率均显著低于其他2种混交类型。

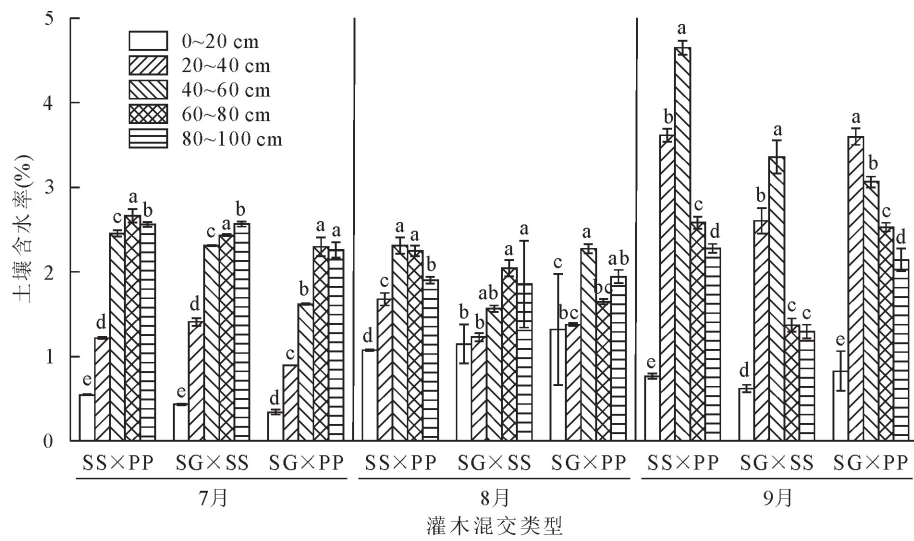
3)研究区3种类型混交灌木根区的土壤含水率为SS×PP>SG×PP>SG×SS,说明混交灌木SS×PP根区土壤的持水能力显著高于其他2种混交方式。因此,在维持现有植被格局稳定的基础上,大力推广梭梭与泡泡刺的混交栽植,是今后防沙治沙工程中固沙植物种类选择及合理搭配的主要举措。

#### 3.2 讨论

3.2.1 不同混交灌木根区土壤含水率垂直变化特征 土壤水分与植物类型、气候、降水、土壤质地<sup>[17]</sup>以及地形地貌等相关性较强。在本研究区气象与水文条件基本一致的情况下,土壤质地及固沙植被的不同混交类型成为影响土壤含水率的重要因素。研究结果表明3种混交灌木根区的土壤含水率垂直变化表现出2种变化趋势。

1)土壤含水率随深度增加而增大,包括7月份3种混交灌木及8月份混交灌木SG×SS。这是由于研究区内表层土壤蒸发量大,使各混交灌木在0~20 cm土层土壤含水率最小<sup>[18]</sup>。而蒸发形成的浅层干沙可有效防止深层土壤水分的散失(图5),对

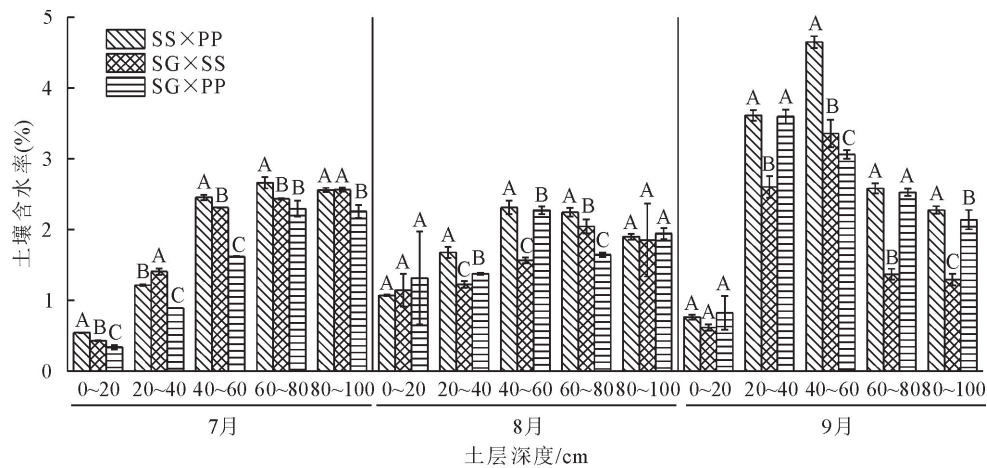




注:小写字母表示同一类型混交灌木不同土层间土壤含水率在  $P < 0.05$  水平上存在显著差异。

图3 同一类型混交灌木在不同土层间土壤含水率的差异

Fig. 3 Differences in soil moisture contents of the same type of mixed shrubs in different soil layers



注:大写字母表示不同类型混交灌木同一土层土壤含水率在  $P < 0.05$  水平上存在显著差异。

图4 同一土层不同类型混交灌木土壤含水率的差异

Fig. 4 Differences in soil moisture content of different types of mixed shrubs in the same soil layer

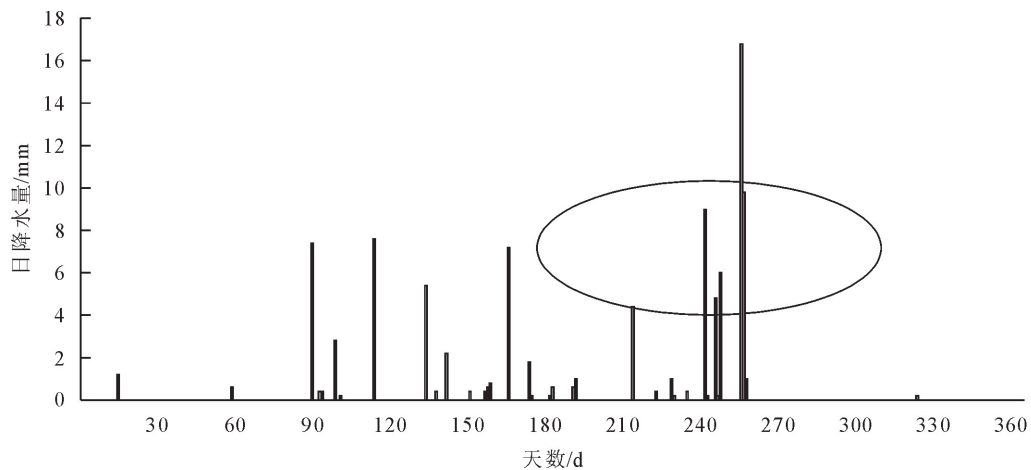


图5 2021年研究区全年日均降水量

Fig. 5 Average daily precipitation in the study area in 2021

下层的土壤水分起到一定保护作用<sup>[19]</sup>。项目组多年的检测资料显示(表 2),深层土壤中黏粉砂( $d < 250\ \mu\text{m}$ )的含量占 50 % 以上,不同固沙植物根区深层土壤粒级虽然存在差异,但黏粉砂含量的增加无疑对土壤水分(毛细水)具有很好的保持作用。另外雨季(7—9 月)相对较多的降水缓解了植被对深层土壤水分的摄取,深层土壤水分得到暂时保护,并保持在相对较高的水平。而固沙植被中 SG、SS 的根系组成较 PP 更发达<sup>[20]</sup>,深层相对发达的根系极易形成水分渗透的优势流,致使深层与周围的土壤水分之间存在较大的水势梯度<sup>[21]</sup>,有利于周围土壤水分及地下水对其进行补充。使得混交灌木 SG×SS 深层土壤含水率在高消耗的前提下,仍然能保持较高水平。

表 2 研究区不同固沙植物根区 0~100 cm 土层土壤机械组成

Table 2 Soil mechanical composition of 0~100 cm soil layers in the root zone of different sand-fixing plants in the study area

植物种类	土层深度/cm	特细沙含量(%) ( $<250\ \mu\text{m}$ )	细沙及中沙含量(%) ( $250\sim500\ \mu\text{m}$ )	粗沙含量(%) ( $>500\ \mu\text{m}$ )
梭梭	0~20	59.134	38.476	2.390
	20~40	64.532	35.155	0.313
	40~60	70.278	29.599	0.123
	60~80	50.881	43.798	5.321
	80~100	50.394	37.756	11.850
泡泡刺	0~20	57.035	39.188	3.777
	20~40	58.813	39.482	1.705
	40~60	41.162	41.883	16.955
	60~80	55.153	38.711	6.136
	80~100	67.273	32.258	0.469
沙拐枣	0~20	66.946	33.008	0.046
	20~40	75.971	24.028	0.001
	40~60	80.269	19.731	0.000
	60~80	83.049	16.951	0.000
	80~100	85.733	14.267	0.000

2)土壤含水率随深度增加先增大后减小,包括 8 月混交灌木 SS×PP、SG×PP 及 9 月 3 种混交灌木。张勃等<sup>[22]</sup>对绿洲-荒漠生态脆弱带土壤含水量空间分异的研究表明,土壤含水率明显呈现出表层和底层低,中间层高的特点,与本研究结果一致,这是由于研究区温度快速升高,植物进入一年中的最快生长期,植被蒸腾作用造成较大的水力提升,仅降水不足以满足植被生长需求,故加速了深层土壤水分的耗水量<sup>[23]</sup>。同时也表明在酷暑季节植被的生长对深层土壤水分有强烈的依赖性<sup>[24]</sup>。随着时间的推移,植物逐渐进入一年中生长发育的后期,枝叶开始枯萎凋谢,蒸腾作用造成的水力提升降低,同时

植物对根系层土壤水分的摄取量减少<sup>[25-27]</sup>。降水有机会向深层转移,但降水向深层土壤入渗存在滞后性<sup>[28]</sup>,致使 40~60 cm 土层土壤含水率呈现出较高水平。深层土壤含水率的减小,可能与深层土壤水分在重力作用下对地下水进行补充有关,7—9 月地下水水位得到一定程度的提升(表 3)。由于本次试验时间较短,未对不同季节的混交灌木剖面土壤含水率进行长期监测,后期还需要更进一步开展研究。

表 3 2021 年研究区地下水埋深

Table 3 Groundwater burial depth in the study area in 2021

月份	地下水埋深/m	月份	地下水埋深/m
1	4.26	7	4.41
2	4.78	8	4.32
3	4.73	9	4.31
4	4.22	10	4.53
5	4.19	11	3.87
6	4.29	12	3.78

注:地下水埋深为每月 1 日、11 日、21 日实测的平均值。

3.1.2 不同混交灌木根区土壤含水率月际间变化特征 当土壤含水率较高时,土壤水分分布主要由土壤质地与降水决定,而当土壤含水率较低时,土壤水分主要受混交灌木根系的穿插作用影响,并且混交灌木根系的水分吸收会弱化土壤质地及降水的影响。因此,混交灌木类型对土壤水分分布有着重要影响,主要通过植被根系的穿插作用,有效增加土壤孔隙度,降低容重,提升土壤的持水能力。其次,不同混交灌木植被冠幅不同,影响植被对土壤水分的吸收及降雨截留。本研究结果表明,月际间同一土层不同混交灌木根区土壤含水率差异显著( $P < 0.05$ )。7 月在 0~100 cm 土层混交灌木 SS×PP 土壤含水率显著高于 SG×PP,8 月份在 20~80 cm 土层,混交灌木 SS×PP 土壤含水率显著高于混交灌木 SG×SS。付鹏程等<sup>[29]</sup>对沙漠-绿洲过渡带固沙植被根区土壤理化性质的研究结果表明,3 种固沙植物的土壤持水性能为:SS>PP>SG,与本研究结果一致,主要原因是梭梭冠幅较大,防风固沙作用显著高于其他 2 种固沙植物,梭梭的枝叶特点也决定了其能有效地截留细小沙尘颗粒,细小颗粒在根区沉积且随截留的雨水向下运移,在改变根区土壤机械组成的同时,还可汇集根区被微生物分解的枯落物、分泌物等有机质成分,使根区出现“肥岛效应”<sup>[30]</sup>,进而提高了根区深层土壤的持水性能。另一方面由于泡泡刺在自然状态下以灌丛沙堆的形式存在,且在沙质生境下拥有发育完善的二态性根系,通过对降雨多少的判断,该根系能够灵活地利用降水与地下水<sup>[31-32]</sup>。9 月在 20~40 cm 与 60~100 cm 土层,混交灌木 SG×SS 的土壤含水率均显著低于

混交灌木 SS×PP、SG×PP。是由于沙拐枣枝叶稀疏,冠幅小,棵间蒸发强烈,当年生长发育的不定根主要集中在 20~40 cm 土层,致使该层土壤水分大量消耗。而梭梭根区表层逐渐增多的凋落物,以及长期受到各种风化作用,使表层土壤理化性质改变,极易形成生物结皮,不利于降水入渗,而主要消耗于蒸发<sup>[34-36]</sup>。同时梭梭虽属于深根系灌木<sup>[37]</sup>,主要利用深层地下水维持生命活动,对浅层土壤水分的需求量小于沙拐枣和泡泡刺<sup>[38]</sup>,但其冠幅远大于两者,故存在深层土壤水分被根系吸收,以及在重力作用下对地下水补充的可能,致使深层土壤含水率下降。另外赵文玥等<sup>[33]</sup>的研究结果表明,泡泡刺含有蜡质层的卵形叶片不易截留降雨,易促进雨水以穿透雨的形式滴落土层,有效促进冠层下土壤水分补充。同时泡泡刺沙堆四周不同程度的穴洞极易形成优先流通道,致使泡泡刺根区可迅速得到雨水的补充。因此,泡泡刺沙堆的浅层和深层土壤含水率相对较高,但其与沙拐枣或梭梭混交后的土壤水分特点,可能影响因素较为复杂,尚需进一步探究。

#### 参考文献:

- [1] 张进虎,唐进年,李得禄,等.民勤荒漠绿洲过渡带灌丛沙堆形态特征及分布格局[J].中国沙漠,2015,35(5):1141-1149.  
ZHANG J H, TANG J N, LI D L, *et al.* Morphological characteristics and distribution patterns of nebkhas in desert-oasis eco-tone[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(5): 1141-1149. (in Chinese)
- [2] 周晓兵,张丙昌,张元明.生物土壤结皮固沙理论与实践[J].中国沙漠,2021,41(1):164-173.  
ZHOU X B, ZHANG B C, ZHANG Y M. The theory and practices of biological soil crust rehabilitation[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 164-173. (in Chinese)
- [3] 朱明珠,古杏红,张树俊,等.论我国“东泥西运”“南泥北运”进行沙漠生态治理的战略意义和可行性[C]//中国环境科学学会环境工程分会.中国环境科学学会 2019 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分论坛论文集(二).北京:《环境工程》编辑部,2019:5.
- [4] 彭飞,何新林,刘兵,等.干旱区荒漠植被生态需水量计算方法研究[J].节水灌溉,2017(12):90-93.  
PENG F, HE X L, LIU B, *et al.* A Study on estimation method for ecological water requirement of desert vegetation in arid area[J]. Water Saving Irrigation, 2017(12): 90-93. (in Chinese)
- [5] 赵文智,程国栋.干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J].科学通报,2001(22):1851-1857.
- [6] BERNDTSSON R, NODOMI K, YASUDA H, *et al.* Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand[J]. Journal of Hydrology, 1996, 185(1/4): 221-240.
- [7] 张宏伟,胡广录,刘桂民,等.黑河中游荒漠绿洲过渡带斑块植被区土壤水分与有机质空间变异特征[J].土壤通报,2016,47(6):1325-1331.  
ZHANG H W, HU G L, LIU G M, *et al.* Spatial variability of soil moisture and organic matter in desert-oasis ecotone in the middle reaches of Heihe River[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(6): 1325-1331. (in Chinese)
- [8] 张玉兰,陈利军.沙漠化逆转过程中土壤性状演变综述[J].生态学报,2010,29(7):1440-1450.  
ZHANG Y L, CHEN L J. Evolution of soil properties during reversal of desertification: research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(7): 1440-1450. (in Chinese)
- [9] 张克海,胡广录,张钰佳,等.黑河中游荒漠绿洲过渡带梭梭(*Haloxylon ammodendron*)根区土壤含水量分布特征及影响因素[J].西北林学院学报,2019,34(4):16-25.  
ZHANG K H, HU G L, ZHANG Y J, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of soil water content in the root zone of *Haloxylon ammodendron* in desert-oasis ecotone in the middle reaches of the Heihe river[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 16-25. (in Chinese)
- [10] 石薇,王新平,张亚峰.腾格里沙漠人工固沙植被区浅层土壤水分对降水和生物结皮的响应[J].中国沙漠,2018,38(3):600-609.  
SHI W, WANG X P, ZHANG Y F. Response of soil moisture in shallow depth to stochastic rainfall and biological crust in revegetated sand dunes in the Tengger Desert, China[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(3): 600-609. (in Chinese)
- [11] 陈悦,吕光辉,曹靖,等.荒漠土壤水、盐、有机质空间分布及相互关系[J].江苏农业科学,2018,46(12):254-257,265.
- [12] 张帅普,邵明安.绿洲边缘土壤水分与有机质空间分布及变异特征[J].干旱区研究,2014,31(5):812-818.  
ZHANG S P, SHAO M A. Spatial variability of soil moisture content and soil organic matter content in oasis marginal zone[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(5): 812-818. (in Chinese)
- [13] 徐雅洁,郭月峰,姚云峰,等.不同林分配置对土壤水分物理性质的影响[J].四川农业大学学报,2021,39(3):370-377.  
XU Y J, GUO Y F, YAO Y F, *et al.* Effect of different forest stand configuration on soil moisture physical properties[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, 39(3): 370-377. (in Chinese)
- [14] 张定海,李新荣,陈永乐.腾格里沙漠人工植被区固沙灌木影响深层土壤水分的动态模拟研究[J].生态学报,2016,36(11):3273-3279.  
ZHANG D H, LI X R, CHEN Y L. Simulation study on the effects of sand binding shrub on the deep soil water in a recovered area on the southeast fringe of Tengger Desert, north China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3273-3279. (in Chinese)
- [15] 马玉莹,雷廷武,张心平,等.体积置换法直接测量土壤质量含水率及土壤容重[J].农业工程学报,2013,29(9):86-93.  
MA Y Y, LEI T W, ZHANG X P, *et al.* Volume replacement method for direct measurement of soil moisture and bulk density[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(9): 86-93. (in Chinese)
- [16] 张建军,朱金兆.水土保持监测指标的观测方法[M].北京:中国林业出版社,2013:72-73.
- [17] 韩美清,闫晓俊,周宇,等.植物配置对岷江干旱河谷铁路边坡土壤理化性质的影响[J].重庆师范大学学报:自然科学版,

- 2020,37(2):134-140.
- [18] 高露,张圣微,赵鸿彬,等.退化草原土壤理化性质空间异质性及其对土壤水分的影响[J].干旱区研究,2020,37(3):607-617.
- GAO L,ZHANG S W,ZHAO H B,*et al.* Spatial heterogeneity of soil physical and chemical properties spatial heterogeneity of soil physical and chemical properties[J]. Arid Zone Research,2020,37(3):607-617. (in Chinese)
- [19] 廖亚鑫.荒漠—绿洲过渡带斑块状植被区土壤水分特征及环境影响因素分析[D].兰州:兰州交通大学,2016.
- [20] 徐呈祥.沙拐枣在甘肃民勤沙区的适应性及其固沙造林技术研究[J].甘肃林业科技,1987(1):7-21.
- [21] BRESLER E,KEMPER W D,HANKS R J. Infiltration, redistribution, and subsequent evaporation of water from soil as affected by wetting rate and hysteresis[J]. Soil Science Society of America Journal,1969,33(6):832-840.
- [22] 张勃,张华,张凯,等.黑河中游绿洲及绿洲—荒漠生态脆弱带土壤含水量空间分异研究[J].地理研究,2007(2):321-327.
- [23] 丁爱强,徐先英,刘江,等.民勤绿洲自然稀疏人工梭梭林土壤水分动态[J].水土保持研究,2018,25(5):192-198.
- DING A Q,XU X Y,LIU J,*et al.* Soil water dynamics of natural thinning haloxylon ammodendron in Minqin Oasis[J]. Research of Soil and Water Conservation,2018,25(5):192-198. (in Chinese)
- [24] 杨磊,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵沟壑区深层土壤水分空间变异及其影响因子[J].生态与农村环境学报,2012,28(4):355-362.
- [25] 鲁延芳,权金鹏,占玉芳,等.黑河中游荒漠绿洲过渡带植被多样性特征及其水分的影响[J].西北林学院学报,2021,36(6):22-30.
- LU Y F,QUAN J P,ZHAN Y F,*et al.* Characteristics of vegetation diversity and effects of water in the desert-oasis region in the middle reaches of Heihe River Basin[J]. Journal of Northwest Forestry University,2021,36(6):22-30. (in Chinese)
- [26] 陈晓莹,陈林,宋乃平,等.荒漠草原两种类型土壤的水分动态对比[J].应用生态学报,2020,31(5):1560-1570.
- CHEN X Y,CHEN L,SONG N P,*et al.* Comparison on moisture dynamics of two different soil types in desert steppe[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(5):1560-1570. (in Chinese)
- [27] 方桥,胡广录,张克海,等.荒漠—绿洲过渡带固沙植被土壤剖面水分特征[J].兰州交通大学学报,2020,39(3):118-124.
- FANG Q,HU G L,ZHANG K H,*et al.* Soil profile moisture characteristics of sand fixing vegetation in desert-oasis ecotone[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University,2020,39(3):118-124. (in Chinese)
- [28] HE Z,ZHAO W,HU L,*et al.* The response of soil moisture to rainfall event size in subalpine grassland and meadows in a semi-arid mountain range: a case study in northwestern China's Qilian Mountains[J]. Journal of Hydrology,2011,420:183-190.
- [29] 付鹏程,胡广录,巩伟,等.河西走廊沙漠—绿洲过渡带固沙植物根区土壤物理性质及持水特性[J].土壤通报,2021,52(4):811-820.
- FU P C,HU G L,GONG W,*et al.* Soil physical properties and water holding capacity of sand-fixing plant root zone in desert-oasis transition area[J]. Chinese Journal of Soil Science,2019,50(4):0000-0000. (in Chinese)
- [30] 刘学东,陈林,杨新国,等.荒漠草原2种柠条(*Caragana korshinskii*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛土壤养分“肥岛”效应[J].西北林学院学报,2016,31(4):26-32,92.
- LIU X D,CHEN L,YANG X G,*et al.* “Fertile Island” effect of soil nutrients occurring in *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* shrubs in desert steppe[J]. Journal of Northwest Forestry University,2016,31(4):26-32. (in Chinese)
- [31] DAWSON T E,PATE J S. Seasonal water uptake and movement in root systems of Australian phraeatophytic plants of dimorphic root morphology: a stable isotope investigation. [J]. Oecologia,1996,107(1).
- [32] 周海,赵文智,何志斌.两种荒漠生境条件下泡泡刺水分来源及其对降水的响应[J].应用生态学报,2017,28(7):2083-2092.
- [33] 赵文玥,吉喜斌,金博文,等.西北干旱区泡泡刺灌丛的降雨再分配特征及影响因素分析[J].生态学报,2022,42(2):804-817.
- ZHAO W Y,JI X B,JIN B W,*et al.* Rainfall partitioning patterns of the desert shrub *Nitraria sphaerocarpa* and its influencing factors in drylands of northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(2):804-817. (in Chinese)
- [34] 郑强卿,李鹏程,李铭,等.滴灌条件下肉苁蓉与梭梭及根际土壤水分关系研究[J].新疆农业科学,2013,50(2):334-341.
- [35] 王国华,陈蕴琳,缙倩倩.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[J].生态学报,2021,41(14):5658-5668.
- WANG G H,CHEN Y L,GOU Q Q. Responses of *Haloxylon ammodendron* with different plantation ages to changes of soil moisture in a desert-oasis ecotone[J]. Acta Ecologica Sinica,2021,41(14):5658-5668. (in Chinese)
- [36] 巩伟,胡广录,付鹏程,等.干旱区沙漠—绿洲过渡带固沙植物的土壤水分入渗特征[J].中国沙漠,2020,40(5):200-208.
- GONG W,HU G L,FU P C,*et al.* Soil moisture infiltration characteristics of different sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone in arid region of China[J]. Journal of Desert Research,2020,40(5):200-208. (in Chinese)
- [37] 韩永伟,姚云峰,韩建国,等.吉兰泰地区退化梭梭光合生态生理学特性[J].草地学报,2001(2):143-147,153.
- [38] 陈宏祥,胡广录,赵晨宇,等.黑河中游荒漠绿洲过渡带固沙植被土壤水分的分布特征[J].西北林学院学报,2017,32(6):67-73.
- CHEN H X,HU G L,ZHAO C Y,*et al.* Distribution characteristics of soil moisture of sand fixing vegetation in desert-oasis ecotone in the middle reaches of the Heihe River[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(6):67-73. (in Chinese)