

宁夏河东沙地土壤水分动态变化

张维福, 张呈春, 马思怡, 展秀丽

(宁夏大学 地理科学与规划学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: [目的] 探究沙地土壤水分动态变化特征, 为沙漠化治理提供科学支撑。[方法] 选择宁夏回族自治区河东沙地(流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘、防护林)为研究对象, 根据定位观测和自动观测系统数据, 分析沙地土壤(0—150 cm 深度)水分分布特征。[结果] ① 各样地土壤含水量随时间变化趋势表现出良好的一致性, 根据土壤含水量变化可分为3个时期: 4—5月为土壤水分积累期, 6—8月为土壤水分消耗期, 9—11月为土壤水分平稳期; ② 不同月份0—10 cm 土壤含水量差异明显, 40—150 cm 土层土壤含水量差异不显著; ③ 0—20 cm 为土壤水分活跃层, 20—40 cm 为土壤水分次活跃层, 40—150 cm 为土壤水分稳定层; ④ 各样地之间土壤含水量表现为: 流动沙丘 > 防护林(旱柳+新疆杨+樟子松林) > 固定沙丘(花棒林) > 固定沙丘(沙拐枣+柠条林) > 半固定沙丘(沙拐枣+柠条林); ⑤ 不同地形部位土壤含水量表现为: 坡底 > 坡中 > 丘顶。[结论] 宁夏河东沙地土壤含水量垂直分布分层特征明显, 土壤含水量的变化除了受到降雨量、植被种类、植被分布格局的影响, 还与沙丘微地貌形态有关。

关键词: 土壤含水量; 动态变化特征; 固定沙丘; 宁夏河东沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0097-10

中图分类号: S152.7

文献参数: 张维福, 张呈春, 马思怡, 等. 宁夏河东沙地土壤水分动态变化[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 97-106. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.010; Zhang Weifu, Zhang Chengchun, Ma Siyi, et al. Dynamic changes of soil moisture in sandy lands in east of Yellow River in Ningxia [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 97-106.

Dynamic Changes of Soil Moisture in Sandy Lands in East of Yellow River in Ningxia

Zhang Weifu, Zhang Chengchun, Ma Siyi, Zhan Xiuli

(College of Geography Science and Planning, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021)

Abstract: [Objective] The dynamic characteristics of soil moisture in sandy arid lands were analysed to provide scientific support for desertification control. [Methods] Sandy land (mobile dunes, semi-fixed dunes, fixed dunes and shelter forest) in east of the Yellow River in Ningxia Hui Autonomous Region was selected as the research object. According to data from the positioning observation and automatic observation systems, the soil moisture distribution characteristics of sandy soils (0—150 cm depth) were analysed. [Results] ① Changes in soil moisture content in the different plots showed a consistent pattern with time. Changes in soil moisture content could be divided into three periods: the soil moisture accumulation period from April to May, the soil moisture consumption period from June to August, and the soil moisture stable period from September to November. ② The soil moisture content in the 0—10 cm topsoil layer was significantly different in the three periods, whereas the soil moisture content in the 40—150 cm soil layer did not differ significantly. ③ The topsoil (0—20 cm) was the active layer of soil moisture, 20—40 cm was the subactive layer, and 40—150 cm was the stable layer of soil moisture. ④ The soil moisture content between the different plots was as follows: moving dune > shelter forest (*Salix matsudana*, *Populus bolleana*, and

收稿日期: 2024-03-24

修回日期: 2024-05-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“宁夏河东沙地水分在土壤-植被系统演变中的驱动作用”(42161013); 宁夏自然科学基金项目(2021AAC03048)

第一作者: 张维福(1995—), 男(回族), 宁夏回族自治区海原县人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区生态水文与荒漠化防治。Email: 18109551420@163.com。

通信作者: 展秀丽(1983—), 女(汉族), 甘肃省靖远县人, 博士, 副教授, 主要从事荒漠化防治研究。Email: zhanxiuli@mail.bnu.edu.cn。

Pinus sylvestris forest) > fixed dune (*Hedysarum scoparium* forest) > fixed dune (*Calligonum mongolicum* and *Caragana korshinskii* forest) > semi-fixed dune (*C. mongolicum* and *C. korshinskii* forest). ⑤ The soil moisture content in different terrain parts decreased from the slope bottom > slope middle > hill top. [Conclusion] The vertical distribution and stratification characteristics of soil moisture in the sandy arid lands in east of the Yellow River in Ningxia are clear. Changes in soil moisture content are not only affected by rainfall, vegetation type, and vegetation distribution patterns, but also by the microgeomorphology of the sand dunes.

Keywords: soil moisture content; dynamic change characteristics; fixed sand dunes; sandy land in east of the Yellow River in Ningxia Hui Autonomous Region

土壤水分是陆地水循环过程中的关键状态变量,是联系陆地水和生态过程的关键桥梁^[1]。在干旱区,降雨是沙地土壤水分的重要来源,不同季节土壤含水量与该时间段内降雨量密切相关^[2]。目前,众多学者在干旱区对土壤水分开展了大量的研究,Cheng等^[3]通过研究固定沙丘发现,土壤存在春季融雪和夏季降水的补给过程。Song等^[4]分析了毛乌素沙地固沙林土壤水分对降雨的动态响应特征。一些学者^[5-6]对沙地土壤水分时间变化特征以及不同沙丘类型土壤含水量开展了相关研究,发现沙丘土壤水分可分为3个时期:积累期、消耗期和稳定期。在垂直方向和不同地形部位上,随着土层深度的增加,土层含水量也会有所不同,地表土壤含水量受外界的影响较大,而沙丘微地貌形态使得不同部位土壤含水量也存在差异。于晓娜等^[7]通过研究毛乌素沙地发现,种植油蒿植被的半固定沙丘土壤水分呈双峰型;展秀丽等^[8]发现河东沙地表层土壤含水量在不同时间具有明显差异;崔利强等^[9]研究发现,流动沙丘土壤含水量最大,半固定沙丘次之,固定沙丘最小;王宇祥等^[10]发现半固定和固定沙丘阴坡土壤水分变异性随深度的增加逐渐减弱;李衍青等^[11]研究发现,流动沙丘土壤水分随深度的增加呈现先增加后减小趋势,而固定沙丘土壤水分随深度的增加呈现先增加后减小再增加的趋势;阿拉木萨等^[12]分析了流动沙丘不同部位土壤水分的变化规律。综上所述,目前对沙地土壤水分开展了较多

的研究,包括土壤水分对不同降雨的响应程度,土壤水分年、季、月的变化特征以及垂直剖面土壤水分的研究等,而对于宁夏河东沙地的土壤水分动态变化特征缺乏长期定位监测以及全面深入的研究,因此加强该地区土壤水分时空动态特征的研究对建立水文过程与生态格局之间的定量关系、了解其中的变化至关重要。为此,本研究选取宁夏河东沙地白芨滩国家级自然保护区为研究区域,根据实地观测和自动观测系统数据,分析沙地土壤水分分布特征,研究沙地的土壤水分变化规律,揭示宁夏河东沙地的土壤水分动态变化特征,以为沙漠化治理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏河东沙地白芨滩自然保护区位于宁夏回族自治区灵武市以南40 km,地理位置37°49′—38°20′N, 106°20′—106°37′E,平均海拔1 300 m,面积约为748.43 km²。该区域属于中温带干旱区,大陆性气候,冬冷夏热,年温差大,降水集中,四季分明,年降雨量较少,年均温在10.4℃,年均降雨量为206.2~255.2 mm,降雨量主要集中在6—9月。土壤主要为风沙土,土壤结构松散,肥力较低。研究区植被主要以沙生植物为主,主要有柠条(*Caragana korshinskii*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)等(表1)。

表1 观测试验样地基本情况

Table 1 Basic situation of experimental plots in monitoring experimental area

样地编号	样地类型	海拔/m	植被种类	植被覆盖度/%	植被高度/m	粒径组成/%		
						黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.050 mm)	砂粒(0.05~2.00 mm)
MD	流动沙丘	1 203.22	—	0	—	1.88	12.00	86.12
FD ₁	固定沙丘	1 205.35	沙拐枣、柠条、花棒林	51.33	1.51	1.85	11.51	85.60
SFD	半固定沙丘	1 226.31	沙拐枣、柠条林	35.52	1.85	1.72	10.92	87.36
FD ₂	固定沙丘	1 160.46	花棒林	63.91	1.77	2.07	14.30	83.38
SF	防护林	1 159.51	旱柳、新疆杨、樟子松林	46.80	6.67	2.18	14.03	83.79

1.2 样地选择和仪器安装

于2023年4月,在宁夏回族自治区灵武市白芨滩国家级自然保护区选取5种典型样地(图1)。如图1所示,这5种样地分别为:MD(流动沙丘)、FD₁(固定沙丘1)、SFD(半固定沙丘)、FD₂(固定沙丘2)、

SF(防护林),其中MD和SF作为对照样地。本试验选择在固定沙丘1(FD₁)架设自动观测系统,对气象基本要素风速、风向、空气温度、空气湿度、太阳辐射量和降雨量进行连续观测,观测高度为2 m,数据采集间隔为5 min。



a 流动沙丘(MD)



b 固定沙丘1(FD₁)



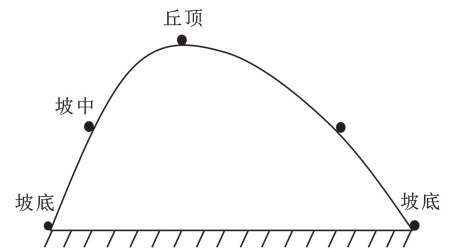
c 半固定沙丘(SFD)



d 固定沙丘2(FD₂)



e 防护林(SF)



f 采样点分布示意图

图1 观测试验样地概况

Fig.1 Overview of plot in monitoring experimental area

1.3 样品采集与测定

土壤水分采用烘干法测定。于2023年4—10月每月中旬在研究样地内使用土钻进行人工采样,每层每次取3个重复样,装入铝盒。在MD,SFD和FD样地中选择不同地形部位(坡底、坡中、丘顶)为土壤水分采样点,每个样地共5处采样点,SF选择一处为土壤水分采样点。采样深度均为6层,分别为0—10,10—20,20—40,40—60,60—100,100—150 cm,每次共采集378个样品,将样品带回实验室,在105℃烘箱内烘干至恒重,待冷却后称其干重,计算土壤质量含水量。

1.4 数据分析

利用Excel 2019对原始数据进行整理和分析;采用SPSS 26.0软件对垂直剖面、不同地形部位以及不同样地间的土壤含水量进行单因素方差分析;使用Origin 20.0对整理的数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 观测期降雨变化特征

研究区2023年5月18日至10月21日共发生27次降雨事件(图2),总降雨量124.2 mm。24 h降

雨量≤5 mm的19次,占总降雨次数的70.38%,占总降雨量的27.06%;24 h降雨量介于5~10 mm的降雨事件4次,占总降雨次数的20.77%,占总降雨量的14.81%;24 h降雨量≥10 mm的4次,占总降雨次数的14.81%,占总降雨量的52.17%。可见降雨大多为0~10 mm范围内,总共23次,最大降雨强度为22.8 mm/d,属于中雨等级,仅发生4次,研究区主要以小雨为主,主要发生在6—9月。

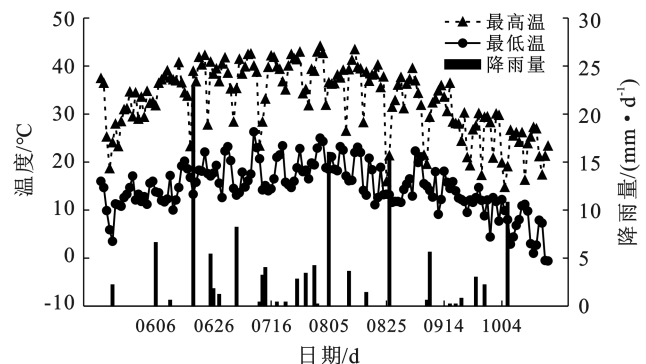


图2 观测试验区2023年5—10月温度和降雨因素
Fig.2 Temperature and rainfall factors in monitoring experimental area from May to October 2023

2.2 土壤含水量随时间变化特征

各个观测样地(MD, FD₁, SFD, FD₂, SF)土壤含水量随时间的变化趋势一致(图3)。土壤含水量总体表现为:10月>4月>5月>7月>9月>8月>6月。从图3可以看出,2023年各沙丘部位土壤含水量的变化趋势相同。MD, FD₁在6月和9月各为2个土壤含水量低谷,在5月和7月各为2个土壤含水量高峰;SFD和FD₂在6月和8月各为2个土壤含水量低谷,SF在8月为土壤含水量低谷,SFD, FD₂, SF在7月各为1个土壤含水量高峰。2023年土壤含水

量动态变化明显受年内的降雨事件影响。6月MD平均土壤含水量较低,为0.94%,7月、8月平均土壤含水量都较高,为1.90%,1.91%,5月迎风坡坡底平均土壤含水量波动较大。6月FD₁平均土壤含水量较低,为0.34%,5月平均土壤含水量高于其余月,为1.30%;6月SFD平均土壤含水量较低,为0.32%,4月平均土壤含水量较高,为1.33%。6月FD₂平均土壤含水量最低,为0.81%,4月平均土壤含水量较高,为1.50%。8月SF平均土壤含水量最低,为0.93%,10月平均土壤含水量较高,为2.26%。

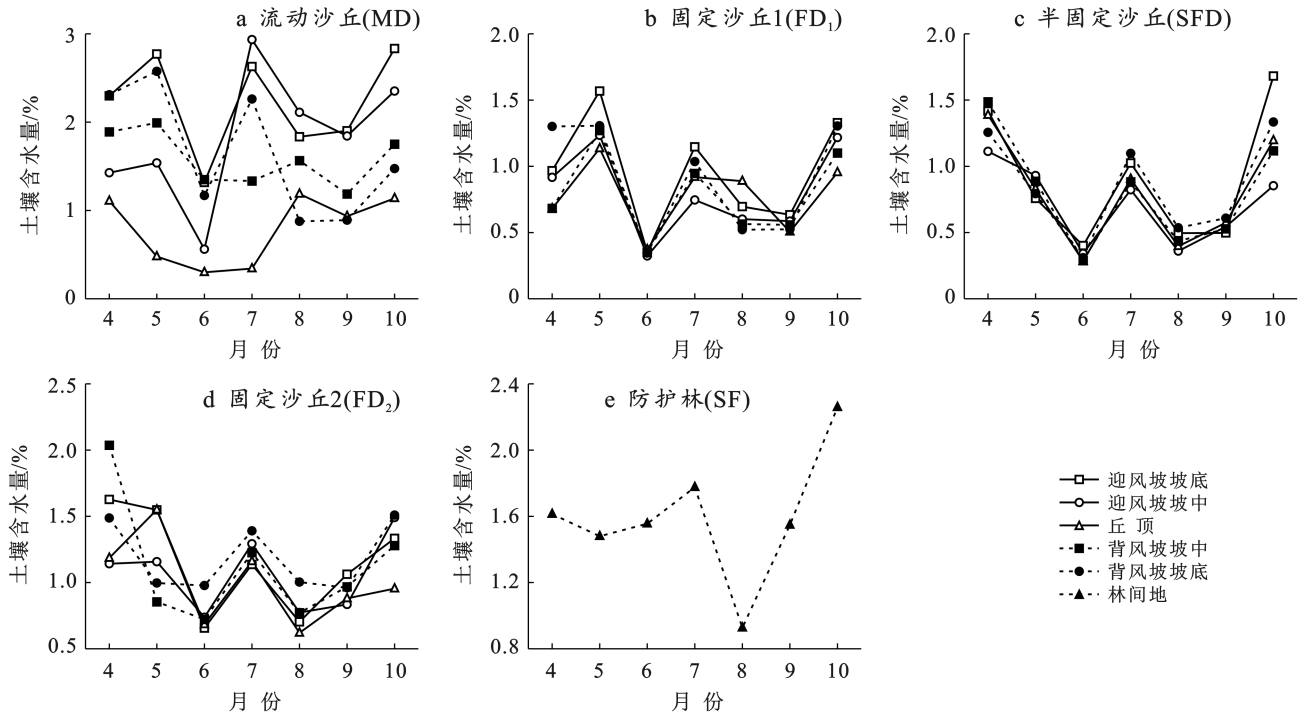


图3 观测试验区2023年4—10月土壤含水量随时间的变化

Fig.3 Changes of soil moisture content with time in monitoring experimental area from April to October 2023

2.3 土壤含水量垂直变化特征

由图4可以看出:①MD表层土壤含水量较低,为0.93%。其中,迎风坡坡底土壤含水量显著高于其他部位,迎风坡坡底土壤含水量随土层的增加呈现先增大后减小的趋势,迎风坡坡底最大值(2.70%)出现在20—40 cm处,在0—10 cm出现最小值(1.11%);迎风坡坡中、背风坡坡中土壤含水量随土层的增加呈现先增大后减小再增大后减小的趋势,拐点均分别出现在10—20,40—60 cm处,迎风坡坡中和背风坡坡中在10—20 cm均出现最大值(2.39%,1.92%),在0—10 cm均出现最小值(1.04%,0.72%);丘顶土壤含水量随土层的增加呈现先增大后减小再逐渐增大的趋势,拐点分别出现在10—20,40—60 cm,在120—150 cm达到最大值(1.27%);背风坡坡底土壤

含水量随土层的增加呈现先增大后减小再增大后减小的趋势,拐点分别出现在20—40,40—60 cm处,在10—20 cm出现最大值(2.17%),在0—10 cm出现最小值(1.33%)。②FD₁深层土壤含水量显著低于表层,迎风坡坡底、迎风坡坡中、丘顶、背风坡坡中、背风坡坡底土壤含水量随土层深度的增加均呈现出先增大后减小后趋于平缓的趋势,最大值(1.84%,1.40%,1.43%,1.37%,1.62%)均出现在10—20 cm,平缓拐点出现在40—60 cm,迎风坡坡底在40—60 cm出现最小值(0.55%),迎风坡坡中、丘顶、背风坡坡中、背风坡坡底在60—100 cm均出现最小值(0.54%,0.49%,0.52%,0.43%)。③SFD深层土壤含水量也是显著低于表层,迎风坡坡底土壤含水量随深度的增加呈现先增大后减小的趋势,在10—20 cm出现最大

值(1.59%),在100—150 cm出现最小值(0.45%);丘顶土壤含水量随土层深度的增加均呈现先增大后减小再增大而后减小的趋势,在10—20,60—100 cm出现两次峰值(1.23%,0.48%),在40—60 cm出现最小值(0.45%);迎风坡坡中、背风坡坡中、背风坡坡底土壤含水量随土层深度的增加均呈现先增大后减小而后趋于平缓的趋势,最大值(1.43%,1.48%,1.84%)均出现在10—20 cm处;迎风坡坡中、背风坡坡底均在40—60 cm出现最小值(0.45%,0.48%),背风坡坡中在100—150 cm出现最小值(0.46%)。④SFD深层土壤含水量略低于表层,比FD₁,SFD深层土壤含水量高0.50%左右,迎风坡坡底、丘顶土壤含水量随土层深度的增加均呈现先增大后减小再增大而后减

小的趋势,在10—20,60—100 cm出现两次峰值,在10—20 cm均出现最大值(1.61%,1.34%),最小值(0.90%,0.83%)均出现在100—150 cm处;迎风坡坡中土壤含水量随土层深度的增加均呈现先增大后减小而后趋于平缓的趋势,最大值(1.63%)出现在10—20 cm处,在60—100 cm出现最小值(0.86%);背风坡坡中、背风坡坡底土壤含水量随土层深度的增加均呈现先增大后减小再增大的趋势,最大值(1.32%,1.58%)均出现在10—20 cm处,在40—60 cm均出现最小值(0.89%,0.98%)。⑤SF土壤含水量随土层深度的增加呈现先增大后减小再持续增大的趋势,在10—20 cm出现一次峰值(1.39%),最小值(1.01%)出现在0—10 cm处,在100—150 cm出现最大值(2.30%)。

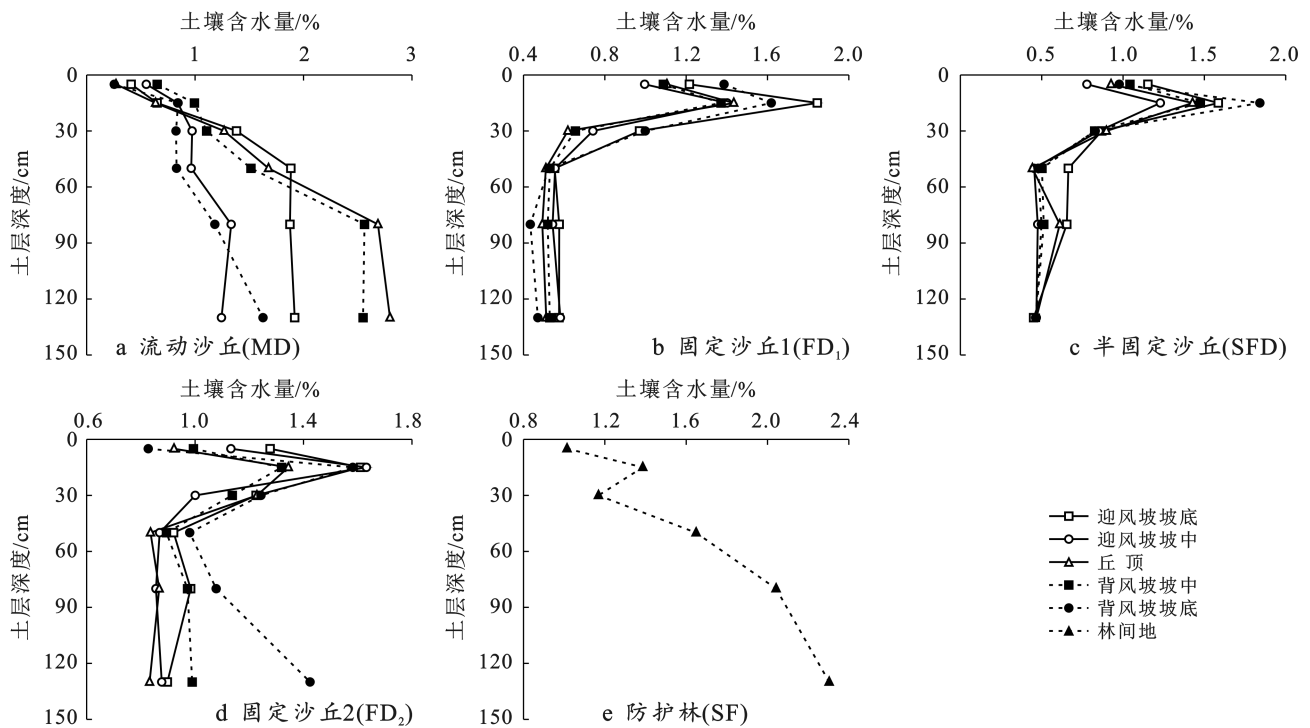


图4 观测试验区2023年4—10月土壤含水量随深度的变化

Fig.4 Changes of soil moisture content with depth in monitoring experimental area from April to October 2023

2.4 不同地形部位土壤含水量变化特征

从图5可以看出:①MD丘顶土壤含水量显著低于其他部位,土壤含水量随地形部位的变化呈现V形曲线。4月土壤含水量最大值(2.31%)出现在背风坡坡底,在丘顶出现最小值(1.11%);5月、10月最大值(2.77%,2.83%)均出现迎风坡坡底,在丘顶出现最小值(0.48%,1.14%);6月土壤含水量随地形部位的变化呈现先减小后增大再减小的趋势,峰值(1.35%)出现在背风坡坡中,也是最大值,在丘顶出现最小值(0.30%);7月土壤含水量随地形部位的变化呈现先增大后减小再增大的趋势,峰值(2.93%)出现在迎风

坡坡中,也是最大值,在丘顶出现最小值(0.34%);8月土壤含水量随地形部位的变化呈现先增大后减小再增大再减小的趋势,在迎风坡坡中出现最大值(2.11%),背风坡坡底出现最小值(0.88%);9月土壤含水量随地形部位的变化呈现先减小再增大后减小的趋势,峰值(1.19%)出现在背风坡坡中,最大值(1.90%)出现在迎风坡坡底,在背风坡坡底出现最小值(0.89%)。②FD₁土壤含水量随地形部位的变化土壤含水量整体变化不明显。4月土壤含水量随地形部位的变化呈现先减小后增大的趋势,最大值(1.30%)出现在背风坡坡底,在丘顶出现最小值

(0.68%)。5,9 和 10 月土壤含水量随地形部位的变化呈现先减小后增大的趋势,呈现 V 形曲线,最大值(1.57%,0.63%,1.33%)均出现在迎风坡坡底,在丘顶均出现最小值(1.13%,0.51%,0.95%);6 月土壤含水量随地形部位的变化趋于平均值(0.32%),最大值(0.40%)出现在迎风坡坡底;7 月土壤含水量随地形部位的变化呈现先减小后增大的趋势,最大值(1.15%)出现在迎风坡坡底,在迎风坡坡中出现最小值(0.75%);8 月土壤含水量随地形部位的变化呈现先减小后增大再减小的趋势,两者最大值(0.89%)出现在丘顶,在背风坡坡底出现最小值(0.52%)。③SFD 土壤含水量随地形部位的变化土壤含水量整体变化不明显,而 10 月土壤含水量随地形部位的变化波动起伏较大。4 月土壤含水量随地形部位的变化呈现先减小后增大再减小的趋势,最大值(1.49%)出现在背风坡坡中,在迎风坡坡中出现最小值(1.11%);5 月

土壤含水量随地形部位的变化呈现 M 形曲线,最大值(0.93%)出现在迎风坡坡中,在迎风坡坡中出现最小值(0.76%);6,8 和 9 月土壤含水量随地形部位的变化趋于平缓;7 和 10 月土壤含水量随地形部位的变化呈现 W 形曲线,7 月最大值(1.10%)出现在背风坡坡底,10 月最大值(1.68%)出现在迎风坡坡底,在迎风坡坡中均出现最小值(0.82%,0.85%)。④4 月 FD₂ 土壤含水量随地形部位的变化呈现先减小后增大再减小的趋势,最大值(2.04%)出现在背风坡坡中,在迎风坡坡中出现最小值(1.14%);5 月土壤含水量随地形部位的变化呈现 W 形曲线,最大值(1.49%)出现在丘顶,在背风坡坡中出现最小值(0.85%);6,7,8,10 土壤含水量随地形部位的变化,曲线趋于平缓;9 月土壤含水量随地形部位的变化呈现先减小后增大的趋势,最大值(1.06%)出现在迎风坡坡底,在迎风坡坡中出现最小值(0.83%)。

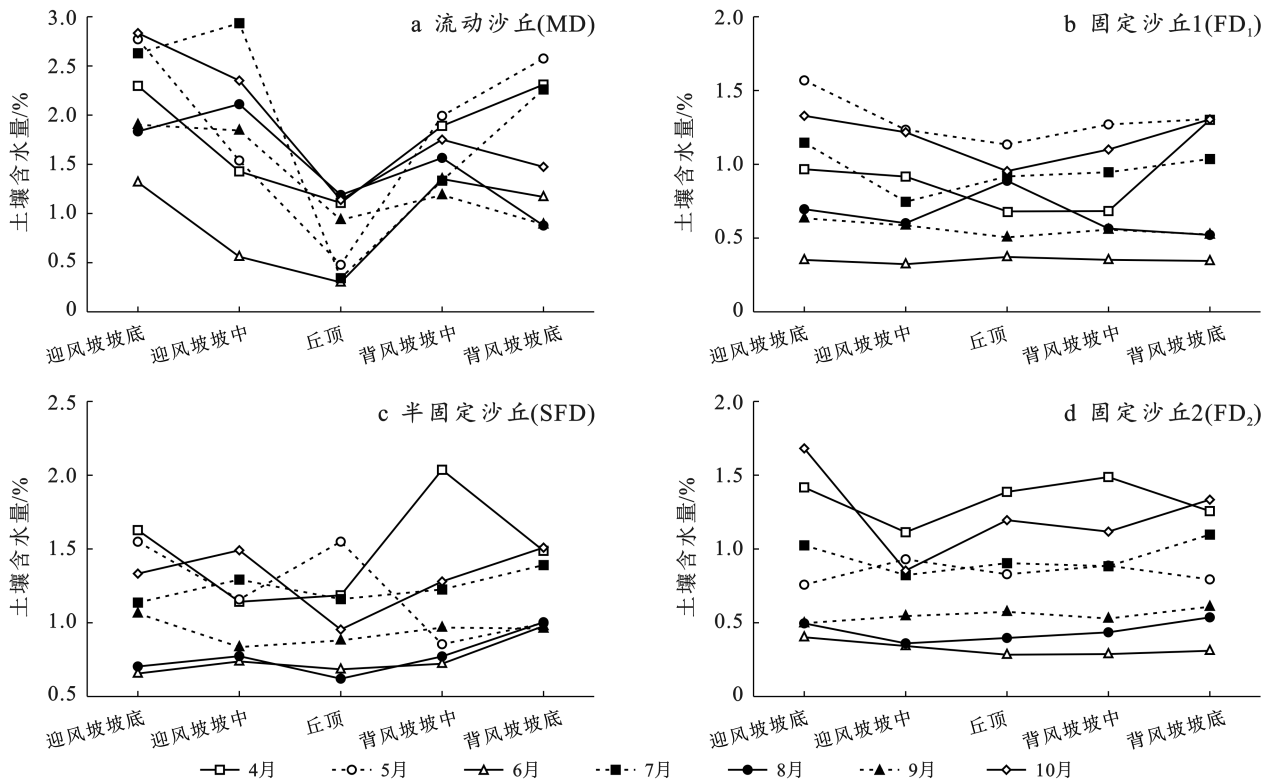


图 5 观测试验区 2023 年 4—10 月土壤含水量随地形部位的变化

Fig.5 Changes of soil moisture content with terrain in monitoring experimental area from April to October 2023

2.5 不同样地和不同地形部位土壤含水量的空间差异

由方差分析可得,MD 垂直剖面土壤含水量差异不明显($p > 0.05$)(表 2);FD₁,SFD 和 FD₂ 垂直剖面土壤含水量具有极显著差异($p < 0.01$);SF 垂直剖面土壤含水量具有显著差异($p < 0.05$)。由方差分析可知,不同样地之间土壤含水量具有极显著差异($p < 0.01$)

(图 6),其中,MD 平均土壤含水量最大,为 1.61%。其次为 SF,平均土壤含水量为 1.59%,SFD 平均土壤含水量最低,为 0.81%。由方差分析可知,FD₁,SFD 和 FD₂ 样地不同地形部位之间土壤含水量差异不明显($p > 0.05$)。MD 土壤含水量具有极显著差异($p < 0.01$),丘顶土壤含水量与其他部位土壤含水量具有显著差异($p \leq 0.05$)(图 7)。

3 讨论

降雨、土壤理化性质、植被种类、沙丘地形和当地气候状况是影响土壤含水量变化的重要因素^[13]。从时间角度分析本研究区土壤含水量变化特征,发现各样地土壤含水量随时间表现出较好的一致性。本研究中根据土壤含水量随时间变化可以分为3个时期:土壤水分积累期(4—5月),土壤水分消耗期(6—8月),土壤水分稳定期(9—11月),这与胡安焱^[6]、伍永秋等^[14]、王艳莉等^[15]的研究结果基本一致,而朱海

等^[5]则认为土壤含水量变化可分为补给期(3—5月)、耗损期(6—10月)、稳定期(11月至翌年2月),这与环境、土壤结构、土壤理化性质以及土壤植被都有很大的关系。土壤含水量在不同发育阶段表现为:春季>秋季>夏季,这与朱海等^[5]对古尔班通古特南缘固定沙丘土壤含水量研究结果一致,而赵鑫^[16]对毛乌素人工灌丛土壤含水量研究发现,2018年监测期间土壤含水量季节变化表现为:秋季>夏季>春季,2019年土壤含水量表现为:春季>秋季>夏季,监测期降雨量的差异是导致结论不一致的主要原因。

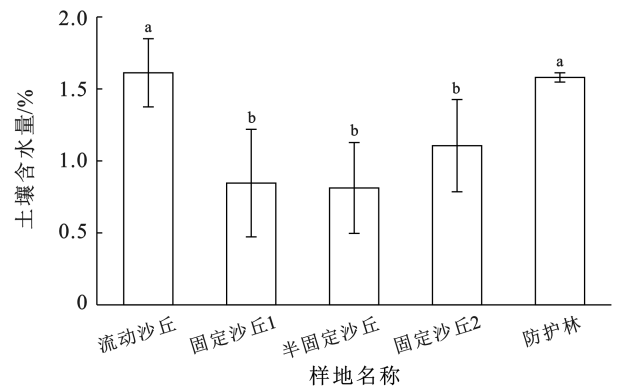
表2 各样的垂直剖面差异性统计

Table 2 Vertical profile difference statistics in monitoring experimental area

样地编号	土层深度/cm						p 值
	0—10	10—20	20—40	40—60	60—100	100—150	
MD	0.93±0.34	1.88±0.69	1.85±0.74	1.57±0.72	1.66±0.58	1.77±0.38	>0.05
FD ₁	1.16±0.15 ^b	1.53±0.2 ^b	0.80±0.18 ^{ab}	0.53±0.02 ^a	0.51±0.06 ^a	0.53±0.04 ^a	<0.01
SFD	0.98±0.14 ^d	1.51±0.22 ^c	0.86±0.03 ^d	0.51±0.89 ^b	0.55±0.75 ^{ab}	0.46±0.01 ^{ab}	<0.01
FD ₂	1.03±0.18 ^b	1.50±0.15 ^a	1.17±0.10 ^b	0.90±0.53 ^c	0.95±0.09 ^c	1.00±0.24 ^c	<0.01
SF	0.70±0.59 ^c	0.99±0.34 ^{bc}	1.16±0.29 ^{ABC}	1.67±1.02 ^{AB}	1.81±0.59 ^{AB}	1.90±0.55 ^A	<0.05

注:小写相同字母表示极显著性($p < 0.01$),大写相同字母表示显著性($p < 0.05$)。

本研究区1—4月降雨事件极少,5月地表解冻对土壤水分进行补给,此时植被对土壤含水量的消耗较小,所以4和5月土壤含水量保持在较高值。6月植被进入生长季初期,虽有降雨,但都是小雨,只能补充表层土壤含水量,很难对深层土壤含水量进行补给^[17-18],因此土壤含水量呈现下降的态势。6月下旬和7月中强度降雨对于深层土壤含水量进行了补给,使得7月100—150 cm土壤含水量大于10月100—150 cm土壤含水量,8月处于植被生长旺盛期,虽有降水补给,但无法满足土壤蒸发和植物蒸腾对于土壤含水量的消耗^[19],因此根系不断从土壤中汲取水分,土壤含水量迅速下降至一个较低值。9月植被蒸腾减弱,地表蒸发作用不明显,土壤含水量较8月有所上升。10月植被进入生长末期,加之温度降低,使得表层及深层土壤水分得到极大的补充,此月土壤含水量表现为较高值^[19]。因此,植被生长季初期土壤含水量较高,随着时间的推移,土壤含水量逐渐下降,生长季中期主要受降雨的影响,降雨对于沙地土壤含水量深层渗漏补给起着重要作用,当降雨量较小时深层渗漏是以持续、长时、量小的补给方式为主,降雨量较大会明显增加渗漏的补给量^[20]。通过降雨与土壤含水量变化对比分析,发现降雨与土壤含水量波动变化一致。但研究期间土壤降雨强度整体较小,因此生长季中期土壤含水量相对生长初期较低,生长季末期受植物根系、土壤水分蒸发等影响较小,土壤含水量上升^[21]。



注:不同小写字母表示不同地形部位土壤含水量存在显著性差异($p \leq 0.05$)。

图6 观测试验样地间差异性

Fig.6 Difference between plots in monitoring experimental area

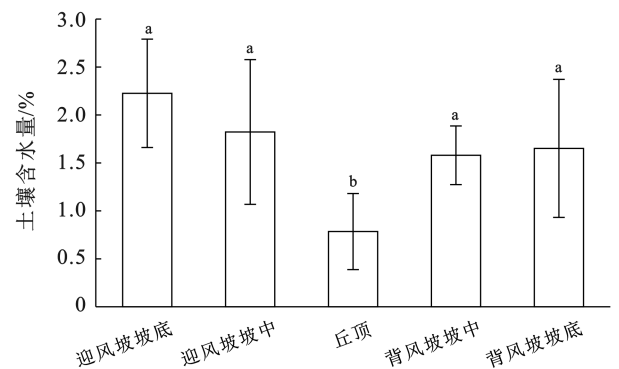


图7 流动沙丘观测试验样地不同地形部位间差异性

Fig.7 Differences between different terrain parts in monitoring experimental area of MD

从土壤垂直剖面分析土壤含水量变化规律,发现各样地土壤立地条件、植被类型存在差异,使得不同植被类型样地土壤含水量表现出显著的垂直差异性。流动沙丘土壤含水量垂直变化不明显,主要受降雨影响^[22],流动沙丘土壤质地疏松,缺少结皮、植被等保护,土壤含水量在雨后更容易蒸发和下渗,土壤含水量相对其他样地较高^[23],流动沙丘表层土壤含水量与降雨关系密切,降雨越多表层土壤含水量就越大^[24-25]。固定沙丘植被盖度较大,加之生物结皮的保护,可以减少土壤水分蒸发^[26],有研究表明只有大于 35.0 mm 降雨事件才能对固定沙丘 60 cm 以下土层土壤含水量进行补充^[27],洪光宇等^[28]通过研究毛乌素沙地扬柴林发现,44.60 mm 以上降雨可以下渗到 110 cm 土层,而本研究区降雨主要以小雨为主,加上一定盖度的生物土壤结皮,导致表层具有较强的阻水能力,限制了土壤水分的下渗^[29-30],这使得深层土壤含水量长期不能得到补充。半固定沙丘土壤质地较疏松,植被盖度相对较低,表层对于土壤水分蒸发的拦截效果不显著,而研究区降雨主要以小雨为主,加上植被根系对水分下渗的拦截作用,便使得深层土壤含水量整体低于固定沙丘。防护林植被冠幅和丛经较大,根系分布较密、较深,植被根系对土壤水分的吸附能力强^[13]。按照土壤水分变异系数和土壤水分实测值(图 8),可以按深度将沙丘垂直剖面分为水分活跃层($0.5 < \text{变异系数} < 1.0$)、水分次活跃层($0.3 < \text{变异系数} < 0.5$)、水分相对稳定层(变异系数 < 0.3)。FD₁, SFD, FD₂, SF 在 0—20 cm 土层,变异系数介于 0.5~1.0,属于水分活跃层,FD₁, FD₂ 在 20—40 cm 土层,变异系数介于 0.3~0.5,属于水分次活跃层;MD, FD₁, SFD, FD₂ 在 40—150 cm 土层,变异系数较小(小于 0.3),属于水分稳定层。而 SFD 在 20—40 cm 土层,变异系数介于 0.5~1.0,属于活跃层。从 5 个样地土壤含水量变异系数上可以发现, SFD 土壤含水量变异系数最大,其他样地变异系数相对较小。从不同地形部位角度分析土壤含水量变化规律,发现土壤含水量表现为:坡底(1.23%) > 坡中(1.09%) > 丘顶(0.84%),这与伍永秋等^[14]、张进虎等^[31]、罗梦娇等^[32]研究结果一致,坡底土壤含水量明显高于其他两个部位,这是因为坡底处于低洼的地方,能够容纳水分,水分在土壤表面持续停留,使得水分下渗时间增长,从而土壤含水量更高。各样地之间土壤含水量表现为:MD(1.61%) > SF(1.59%) > FD₂(1.11%) > FD₁(0.85%) > SFD(0.81%),这与张友焱等^[33]、张圆浩等^[34]结论一致,MD 土壤质地疏松,缺少结皮、植被等保护,土壤含水量在雨后更容易蒸发和下渗,土壤

含水量相对其他样地较高;虽然 SF 采样点与人工灌溉点较远,但是长期的灌溉使得土壤含水量整体高于半固定和固定沙丘,但土壤含水量的值低于流动沙丘;FD₂ 土壤含水量显著高于 FD₁ 和 SFD,说明 FD₂ 植被覆盖度或者植被种类较其他两种样地较为适宜;SFD 植被覆盖度较低,对于土壤水分蒸发的拦截效果不显著,因此半固定沙丘土壤含水量应较固定沙丘土壤含水量较高^[14],然而研究区降雨主要以小雨为主,加上植被根系对水分的吸收,便使得土壤含水量低于固定沙丘。而伍永秋等^[14]对毛乌素沙地南缘不同活性沙丘土壤水分研究结论不一致,这与研究样地的自然背景和日降雨量有关。

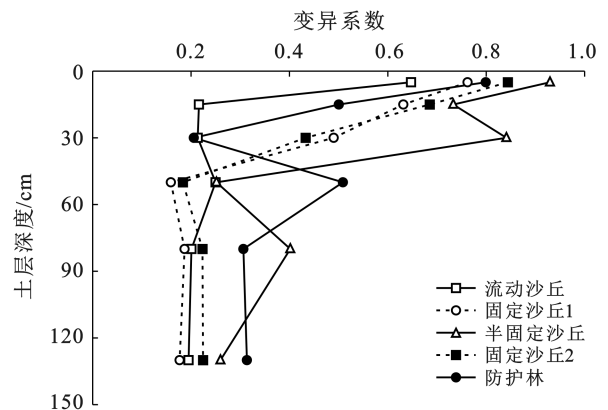


图 8 土壤含水量变异系数随深度的变化

Fig.8 Variation coefficient of soil moisture content with depth

4 结论

(1) 土壤水分具有明显的季节变化特征,4—5 月为土壤水分积累期,6—8 月为土壤水分消耗期,9—11 月为土壤水分平稳期;不同月份 0—10 cm 土壤含水量差异明显,40—150 cm 土层土壤含水量差异不显著。

(2) 土壤水分具有明显垂直变化特征,按照深度可分为活跃层、次活跃层和相对稳定层;半固定沙丘、固定沙丘土壤含水量随土层深度的增加呈现先增大后减小的趋势,防护林土壤含水量随土层深度的增加,在 0—100 cm 呈现逐渐增大的趋势,100—150 cm 保持稳定。

(3) 不同样地的土壤含水量差异显著,表现为:流动沙丘 > 防护林 > 固定沙丘 > 半固定沙丘;不同地形部位的土壤含水量差异显著,表现为:坡底 > 坡中 > 丘顶。

参考文献 (References)

- [1] 黄磊,张志山,陈永乐.干旱人工固沙植被区土壤水分动态随机模拟[J].中国沙漠,2013,33(2):568-573.
Huang Lei, Zhang Zhishan, Chen Yongle. Probabilistic

- modelling of soil moisture dynamics in a revegetated desert area [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(2): 568-573.
- [2] 特日格勒,冯伟,杨文斌,等.浑善达克沙地土壤水分深层渗漏的动态特征[J].*水土保持通报*,2022,42(1):77-82.
Terigele, Feng Wei, Yang Wenbin, et al. Dynamic characteristics of deep soil water leakage in Otindag sandy land [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(1):77-82.
- [3] Cheng Yiben, Yang Wenbing, Zhan Hongbin, et al. On change of soil moisture distribution with vegetation reconstruction in Mu Us sandy land of China, with newly designed lysimeter [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12:609529.
- [4] Song Shanshan, Liu Ben, Wang Jingjing, et al. Response of soil moisture to rainfall in *Pine Sylvestris* in the Mu Us Sandy Land [J]. *Environment, Resource and Ecology Journal*, 2022, 6(2):119-127.
- [5] 朱海,胡顺军,陈永宝.古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征[J].*土壤学报*,2016,53(1):117-126.
Zhu Hai, Hu Shunjun, Chen Yongbao. Spatio-temporal variation of soil moisture in fixed dunes at the southern edge of Gurbantungut Desert [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1):117-126.
- [6] 胡安焱,付稳东,陈云飞,等.毛乌素沙地不同覆被类型土壤水分动态及其对降水的响应[J].*水土保持研究*,2023, 30(6):133-142.
Hu Anyan, Fu Wendong, Chen Yunfei, et al. Soil moisture dynamics and its response to precipitation in different cover types of the Mu Us sandy land [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6):133-142.
- [7] 于晓娜,李恩贵,黄永梅,等.毛乌素沙地油蒿(*Artemisia ordosica*)群落土壤水分动态特征[J].*中国沙漠*,2015,35(3):674-682.
Yu Xiaona, Li Engui, Huang Yongmei, et al. Soil moisture dynamics of *Artemisia ordosica* communities in the mu us sandy land [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(3):674-682.
- [8] 展秀丽,韩磊,赖荣生.宁夏河东沙区浅层风沙土壤含水量季节变化及空间分布特征[J].*干旱区资源与环境*, 2016,30(10):138-144.
Zhan Xiuli, Han Lei, Lai Rongsheng. Seasonal variation and spatial distribution characteristics of soil water content in shallow aeolian sandy soil in east of Yellow River in Ningxia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(10):138-144.
- [9] 崔利强,吴波,杨文斌,等.毛乌素沙地东南缘不同植被盖度下土壤水分特征分析[J].*干旱区资源与环境*,2010,24(2):177-182.
Cui Liqiang, Wu Bo, Yang Wenbin, et al. The characteristics of soil water in different vegetation coverage on the southeastern margin Mu Us sandy land [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(2): 177-182.
- [10] 王宇祥,刘廷玺,段利民,等.科尔沁不同类型沙丘土壤水分时空变化特征及其环境影响因子[J].*水土保持学报*,2020,34(6):125-134.
Wang Yuxiang, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. Temporal and spatial variation characteristics of soil moisture and environmental impact factors in different types of dunes in Horqin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6):125-134.
- [11] 李衍青,张铜会,刘新平,等.科尔沁地区不同类型沙地土壤水分变化分析[J].*水土保持通报*,2010,30(3):31-35.
Li Yanqing, Zhang Tonghui, Liu Xinping, et al. Change pattern of soil water content in different dunes and grassland in Horqin sandy land [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(3):31-35.
- [12] 阿拉木萨,周丽芳.科尔沁沙地流动沙丘土壤水分空间变化特征分析[J].*土壤*,2011,43(3):392-397.
Alamusa, Zhou Lifang. Spatial variation of soil water storage(SWS) on active dune in Horqin sandy land [J]. *Soils*, 2011, 43(3):392-397.
- [13] 孙学兵,姜生秀,赵鹏.民勤绿洲边缘固沙灌木林地土壤水分时空动态研究[J].*陕西林业科技*,2022,50(6):6-11.
Sun Xuebing, Jiang Shengxiu, Zhao Peng. Temporal and spatial variation of soil moisture in typical sand-fixation shrub at Minqin oasis fringe [J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2022, 50(6):6-11.
- [14] 伍永秋,张健枫,杜世松,等.毛乌素沙地南缘不同活性沙丘土壤水分时空变化[J].*中国沙漠*,2015, 35(6): 1612-1619.
Wu Yongqiu, Zhang Jianfeng, Du Shisong, et al. Temporal and spatial variation of soil moisture in dunes with different vegetation coverage in southern margin of the Mu Us sandy land [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(6):1612-1619.
- [15] 王艳莉,刘立超,高艳红,等.人工固沙植被区土壤水分动态及空间分布[J].*中国沙漠*,2015, 35(4):942-950.
Wang Yanli, Liu Lichao, Gao Yanhong, et al. Dynamic and spatial distribution of soil moisture in an artificially revegetated desert area [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(4):942-950.
- [16] 赵鑫.毛乌素沙地典型人工灌丛土壤水分时空变化及蒸散耗水特征研究[D].山东 聊城:聊城大学,2021.
Zhao Xin. Spatial and temporal variation of soil moisture and evapotranspiration water consumption characteristics of typical artificial shrub in Mu Us Sandy Land

- [D]. Liaocheng, Shandong: Liaocheng University, 2021.
- [17] Yang Wenbin, Tang Jinnian, Liang Hairong, et al. Deep soil water infiltration and its dynamic variation in the shifting sandy land of typical deserts in China [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(8):1816-1824.
- [18] 陈嘉嘉, 黄磊, 贾鸿飞, 等. 腾格里沙漠人工植被区不同植被类型土壤水分垂直变异特征及其动态变化模型[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(4):126-133.
- Chen Jiajia, Huang Lei, Jia Hongfei, et al. Vertical variability and dynamic simulation of soil moisture in different artificial vegetation arrangements in the Tengger Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(4):126-133.
- [19] 何晓帆, 田丽慧, 汪海娇, 等. 高寒沙地沙棘群落的土壤水分时空变异特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2):23-33.
- He Xiaofan, Tian Lihui, Wang Haijiao, et al. Temporal-spatial variation of soil moisture content of different *Hippophae rhamnoides* communities in an alpine desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2):23-33.
- [20] 特日格勒. 降雨对浑善达克沙地南缘土壤水分及深层渗漏的影响[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- Terigele. Effect of rainfall on soil moisture and deep leakage in the Southern Edge of Otindag Sandy Land [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia University, 2022.
- [21] 梁海荣, 王涛, 杨宇, 等. 毛乌素沙地与浑善达克沙地水分深层渗漏特征对比[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2):69-76.
- Liang Hairong, Wang Tao, Yang Yu, et al. Comparison of deep soil recharge characteristics between Mu Us Sandy Land and Hunshandake sandy land [J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(2):69-76.
- [22] 成龙, 吴波, 贾晓红, 等. 基于连续观测数据的毛乌素沙地生长季土壤水分动态及其对降雨的响应[J]. 干旱区地理, 2024, 47(4):648-661.
- Cheng Long, Wu Bo, Jia Xiaohong, et al. Dynamic change of soil moisture and its response to rainfall during the growing season in Mu Us Sandy Land based on continuous observation data [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(4):648-661.
- [23] 贺帅, 王晓江, 洪光宇, 等. 降雨对柠条锦鸡儿固沙林土壤水分动态变化特征的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5):106-112.
- He Shuai, Wang Xiaojiang, Hong Guangyu, et al. Effect of rainfall on characteristics of soil water dynamic in *Caragana microphylla* sand fixation forest [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5):106-112.
- [24] 郝需婷, 黄雅茹, 马迎宾, 等. 乌兰布和沙漠固沙梭梭林生长季土壤水分动态研究[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(7):187-196.
- Hao Xuting, Huang Yaru, Ma Yingbin, et al. Study on soil moisture dynamics in growing season of sand-fixing *Haloxylon ammodendron* forest in Ulan Buhe desert [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(7):187-196.
- [25] Fu Chaofeng, Zhao Jingbo, Mei Fanmin, et al. Vertical distribution of soil moisture and surface sandy soil wind erosion for different types of sand dune on the south-eastern margin of the Mu Us Sandy Land, China [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2015, 7(6):675-686.
- [26] 王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 人工固沙区植被演替过程中土壤水分时空分异特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4):881-889.
- Wang Bo, Duan Yuxi, Wang Weifeng, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture content during vegetation succession in sand-binding areas [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4):881-889.
- [27] Yu Xiaona, Huang Yongmei, Li Engui, et al. Effects of vegetation types on soil water dynamics during vegetation restoration in the Mu Us sandy land, Northwestern China [J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(2):188-199.
- [28] 洪光宇, 王晓江, 刘果厚, 等. 毛乌素沙地杨柴灌木林土壤水分对不同降雨格局的响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2):76-83.
- Hong Guangyu, Wang Xiaojiang, Liu Guohou, et al. Response of soil moisture to different rainfall patterns in *Hedysarum leave* in Mu Us sandy land [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2):76-83.
- [29] 李新乐, 刘雅婧, 孙非, 等. 乌兰布和沙漠白刺灌丛沙堆丘间地黏土层土壤水分时空格局及其对降雨变化的响应[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6):39-46.
- Li Xinle, Liu Yajing, Sun Fei, et al. Spatial-temporal patterns of soil water in clay layer at inter-dune area of *Nitraria tangutorum* and its response to rainfall changes in Ulan Buh desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6):39-46.
- [30] 闫德仁, 黄海广, 胡小龙, 等. 固沙植被土壤水分动态及其对降雨的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4):85-89.
- Yan Deren, Huang Haiguang, Hu Xiaolong, et al. Soil water dynamics of sand fixation vegetations and the responses to precipitation [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(4):85-89.

- logica Sinica, 2014, 34(22):6538-6547.
- [26] Rong Qiangqiang, Liu Jingtao, Cai Yanpeng, et al. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Tamarix chinensis* Lour. in the Laizhou Bay coastal wetland, China [J]. Ecological Engineering, 2015, 76(8):57-65.
- [27] 牛得草, 李茜, 江世高, 等. 阿拉善荒漠区 6 种主要灌木植物叶片 C : N : P 化学计量比的季节变化[J]. 植物生态学报, 2013, 37(4):317-325.
- Niu Decao, Li Qian, Jiang Shigao, et al. Seasonal variations of leaf C : N : P stoichiometry of six shrubs in desert of China's Alxa Plateau [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(4):317-325.
- [28] 陈晓萍, 郭炳桥, 钟全林, 等. 武夷山不同海拔黄山松细根碳、氮、磷化学计量特征对土壤养分的适应[J]. 生态学报, 2018, 38(1):273-281.
- Chen Xiaoping, Guo Bingqiao, Zhong Quanlin, et al. Response of fine root carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry to soil nutrients in *Pinus taiwanensis* along an elevation gradient in the Wuyi Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1):273-281.
- [29] 王凯, 邢仕奇, 张日升, 等. 科尔沁沙地杨树人工林植物—土壤 C、N、P 化学计量变化[J]. 生态学杂志, 2023, 43(1):162-169.
- Wang Kai, Xing Shiqi, Zhang Risheng, et al. Changes in C, N, and P stoichiometry of soil and plant of poplar plantations in Horqin Sandy Land [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(1):162-169.
- [30] 余杭, 高若允, 杨文嘉, 等. 干热河谷优势草本植物叶片、根系与土壤碳氮磷含量及其关系[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(3):727-735.
- Yu Hang, Gao Ruoyun, Yang Wenjia, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus contents of leaf, root, and soil and their relationships in dominant herbaceous plants in dry-hot valley [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(3):727-735.
- [31] 马玉珠, 钟全林, 靳冰洁, 等. 中国植物细根碳、氮、磷化学计量学的空间变化及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2015, 39(2):159-166.
- Ma Yuzhu, Zhong Quanlin, Jin Bingjie, et al. Spatial changes and influencing factors of fine root carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(2):159-166.
- [32] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 94(14):7362-7366.
- [33] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2008, 39:153-170.
- [34] Takashima T, Hikosaka K, Hirose T. Photosynthesis or persistence: Nitrogen allocation in leaves of evergreen and deciduous *Quercus* species [J]. Plant, Cell & Environment, 2004, 27(8):1047-1054.
- [35] Ojeda J J, Caviglia O P, Agnusdei M G. Vertical distribution of root biomass and soil carbon stocks in forage cropping systems [J]. Plant and Soil, 2018, 423(6):175-191.

(上接第 106 页)

- [31] 张进虎, 贺康宁, 段玉玺, 等. 毛乌素沙地西南缘不同植被下的土壤水分时空变化研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1):96-99.
- Zhang Jinhu, He Kangning, Duan Yuxi, et al. Study on the spacial and temporal change of soil water content under different plant coverage on the southwestern edge of maowusu sandy land [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1):96-99.
- [32] 罗梦娇, 艾宁, 刘长海, 等. 半干旱黄土区不同植被类型对土壤水分的影响[J]. 四川农业大学学报, 2019, 37(2):177-184.
- Luo Mengjiao, Ai Ning, Liu Changhai, et al. Influence of different vegetation types on soil moisture in the semiarid loess region [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019, 37(2):177-184.
- [33] 张友焱, 周泽福, 程金花, 等. 毛乌素沙地不同沙丘部位几种灌木地土壤水分动态[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(6):73-78.
- Zhang Youyan, Zhou Zefu, Cheng Jinhua, et al. Soil moisture characteristics of several types of shrubs in different anchored dune positions in Maowusu sandy land [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(6):73-78.
- [34] 张圆浩, 阿拉木萨, 印家旺, 等. 沙丘土壤含水量与地下水埋深时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6):1427-1436.
- Zhang Yuanhao, Alamus, Yin Jiawang, et al. Spatial and temporal variations in sand dune soil moisture content and groundwater depth [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6):1427-1436.