

# 库布齐东段典型人工固沙林土壤水分时空变化特征

刘 源,段玉玺\*,王 博,李晓晶,王伟峰,刘宗奇

(内蒙古自治区林业科学研究院,内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘 要:**以库布齐沙漠东段典型人工固沙林(油蒿林、沙柳林、柠条林)为对象,利用 TRIME-PICO 土壤水分观测系统对 2017—2019 年生长季迎风坡顶部、中部和底部 0~180 cm 土层深度土壤含水量进行连续监测,探讨区域植被类型和环境因子对土壤水分时空变化的影响。结果表明,研究区平均土壤含水量年际变化受降雨量影响表现为:2019 年(9.7%)>2018 年(8.6%)>2017 年(4.3%);因植被生长特性差异,土壤含水量表现为:油蒿林(7.9%)>沙柳林(7.8%)>柠条林(6.9%);不同坡位土壤含水量略有差异,油蒿林和柠条林表现为:迎风坡底部>中部>顶部,而沙柳林为:迎风坡底部>顶部>中部;不同样地土壤含水量垂直变化明显,均呈现先减小后缓慢增大的趋势,含水量最大值均出现在浅层(0~40 cm),由于降雨入渗和植被根系分布的不同,最小值在中层和深层均有出现;3 种样地土壤水分时间变异系数为 0.2~0.4,浅层时间变异性较大,深层较为稳定;土壤水分与垂直变异系数呈负相关。总体上,季节变化和土层深度在时间和空间维度对土壤水分有较大影响,土壤水分和植被生长既相互作用又相互制约。

**关键词:**库布齐沙漠;人工固沙林;土壤水分;时空变化

**中图分类号:**S152.7      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2021)01-0001-08

## Spatial and Temporal Characteristics of Soil Moisture in Typical Sand Fixation Plantations in the Eastern Hobq

LIU Yuan, DUAN Yu-xi\*, WANG Bo, LI Xiao-jing, WANG Wei-feng, LIU Zong-qi

(Inner Mongolia Forestry Research Institute, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Soil moisture is a key factor for vegetation restoration in desert area. In this study, we took the typical man-made sand fixation forests (*Artemisia ordosica*, *Salix psammophila*, and *Caragana korshinskii*) in the eastern margin of Hobq desert as the research objects, to conduct a continuous monitoring of the soil moisture in 0—180 cm layer at the top, middle and bottom of windward slope in the growth season of 2017—2019 by using Trime-pico Soil Moisture Observation System. The objective of this study was to examine the effects of vegetation types and environmental factors on the spatial-temporal dynamics of soil moisture in desert. The results showed that the interannual variation of the average soil moisture content in the study area was affected by rainfall, which is was shown as: 2019(9.7%)>2018(8.6%)>2017(4.3%). Because of the difference in vegetation growth characteristics, the soil moisture contents of the three sand fixation forests were in the order of *A. ordosica* (7.9%)>*S. psammophila* (7.8%)>*C. korshinskii* forest (6.9%). The soil water content of different slope positions is was slightly different. For *A. ordosica* forest and *C. korshinskii* forests, it was in the order of are at the bottom>middle>top of the windward slope, while for *S. psammophila* forest, the order was is at the bottom>top>middle of the windward slope; The

收稿日期:2020-03-24 修回日期:2020-04-16

基金项目:林业科技创新平台项目(2019132021); 内蒙古自然科学基金(2019MS03037); 内蒙古自治区 2019 年应对气候变化及低碳发展专项资金(275604)。

作者简介:刘 源。研究方向:林业碳汇和荒漠化防治。E-mail:lyuan1992@163.com

\*通信作者:段玉玺,博士,研究员。研究方向:荒漠化防治。E-mail:nmg\_dyx@163.com

vertical change of soil moisture in different areas was obvious, which presented the trend of first decreasing and then slowly increasing with the depth of soil layer. The maximum value of water content appeared in the shallow layer (0–40 cm), and the minimum value appeared in the middle and deep soil layer due to different rainfall infiltration and distribution of vegetation root system. The variation coefficient of soil water in the three soils forests ranged from 0.2 to 0.4, the variation in shallow soil water was large, but it was relatively stable in deep soil. There was a negative correlation between soil moisture and vertical coefficient of variation. In general, seasonal change and soil depth had great influence on soil moisture in time and space dimensions, soil moisture and vegetation growth interacted and restricted each other.

**Key words:** Hobq desert; artificial sand fixation forest; soil moisture; spatio-temporal variation

土壤水分不仅是区域水文循环和流域水量平衡的重要影响因子,也是区域植被生长发育和恢复的主要限制因子<sup>[1-3]</sup>。土壤水作为荒漠生态系统中水的主要存在形式,连接着大部分生态水文过程,促进土壤、植被和大气中物质的流动和循环,很大程度上影响着荒漠生态系统各组分的运作过程<sup>[4-5]</sup>。荒漠生态修复的核心要素是合理协调土壤水分与植被生长相互作用与制约关系<sup>[6]</sup>。土壤水分变化在大尺度上受到区域降水、蒸发和地形的影响,小尺度上也受到土壤理化特性、植被生长状况及微地形等影响<sup>[7-9]</sup>。目前,在不同时空尺度上,大量学者对土壤水分变化进行相关研究,杨凯悦等<sup>[10]</sup>利用 ECH20 土壤含水量监测系统对高寒沙区典型人工林不同林龄和深度进行相关分析,苏莹等<sup>[11]</sup>研究荒漠草原不同类型土壤水分时空动态变化。张帅普等<sup>[12]</sup>采用地统计法探索绿洲—荒漠过渡带不同土地利用土壤水分时空变化特征,伍永秋等<sup>[13]</sup>引进时间和垂直变异系数反映毛乌素沙地土壤水分时空变化,罗维成等<sup>[14]</sup>揭示了科尔沁沙地樟子松人工林土壤水分动态变化规律。

库布齐沙漠位于鄂尔多斯高原,北部紧邻黄河,是我国第 7 大沙漠,东缘是荒漠向草地、农田过渡的脆弱生态区,人为活动强烈<sup>[15]</sup>。目前对于该区域的研究大部分集中于不同防护林地土壤水分变化、不同土地利用如荒漠、农田、草地和林地土壤水分对比及不同林分密度和盖度对林地土壤水分的影响,对不同人工固沙林土壤水分在时间尺度上的连续监测,以及土壤水分对坡位、土层等空间尺度的响应方面研究较少。基于 2017—2019 年对环境因子和生长季土壤水分连续监测数据,选取不同人工固沙林(油蒿林、沙柳林和柠条林)为对象,分析植被类型和环境因子对土壤水分的影响,揭示年际间不同人工固沙林生长季土壤水分在水平和垂直方向上动态变化规律,为荒漠区植被建设和人工植被的生态管理提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于库布齐沙漠东段,属内蒙古自治区

鄂尔多斯市准格尔旗,地理位置 110°48′30″E, 40°3′42″N, 海拔 1 100~1 300 m。该区域属于温带大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热,昼夜温差较大,季节变化显著,年均气温 6.1℃~7.2℃,生长季平均气温 18.2℃,生长季最高温 38.9℃,生长季最低温 -9.4℃,年均降水量 270.4 mm,主要集中于 7、8 月份,年均蒸发量 2 560.6 mm,年均日照时数 3 138.7 h,年均无霜期 130~140 d。全年干旱多风,主导风向主要为西南风(32%)和西北风(34.9%),年平均风速为 3.3 m·s<sup>-1</sup>,最大风速可达 24 m·s<sup>-1</sup>。研究区内土壤以风沙土为主,主要植物种为沙柳(*Salix cheilophila*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、杨柴(*Hedysarum mongolicum*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等。

### 1.2 样地选择与数据采集

根据立地类型及灌木种类、林龄,选取固定沙地生长良好的油蒿林、沙柳林和柠条林 3 种人工固沙林为对象(表 1),分别在其迎风坡坡顶、坡中及坡底埋设 3 根长 2 m 的 TDR 测管,共 27 个监测点。土壤体含水量由土壤水分观测系统(TRIME-PI-CO, Germany)进行监测,监测时间为 2017 年、2018 年和 2019 年的 5—10 月。每月上旬和下旬各监测 1 次,共监测 972 次,如遇降雨则需等待 2~3 d 水分稳定后进行监测。土壤含水量监测深度为 0~180 cm,土层划分为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160、160~180 cm 共计 9 层。研究区内气象资料来源于小型自动气象站(HOBO, USA)记录。

### 1.3 数据处理

变异系数在统计学中是样本标准差与平均值的比值,这里引入来表示土壤含水量的变异情况,变异系数<0.1 为弱变异,变异系数 0.1~0.3 为中等变异,变异系数>0.3 为强变异<sup>[16]</sup>。标准差及变异系数计算公式如下:

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} \tag{1}$$

$$C_v=\frac{S}{\bar{x}} \tag{2}$$

式中,垂直方向上, $x_i$  分别取 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160、160~180 cm 土壤含水量; $\bar{x}$  为垂直方向上 0~180 cm 土壤含水量平均值;水平方向上, $x_i$  为第  $i$

月土壤含水量; $\bar{x}$  为 5—10 月土壤含水量平均值; $S$  为标准差; $C_v$  为变异系数。

利用 Excel 2013、SPSS 20.0 及 MATLAB7.0 软件进行数据处理、作图及统计分析,其中选取最小显著极差法(LSD)对不同试验样地、不同坡位及不同土层垂直深度间土壤含水量进行差异性显著检验( $P=0.05$ ),采用双因素方差分析检验研究区环境因子对土壤含水量的响应程度。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situations of the sample plots

样地类型	地理位置	海拔 /m	坡度 /( $^{\circ}$ )	造林 方式	灌木高度 /cm	灌木密度 /(株 $\cdot$ hm $^{-2}$ )	林龄 /a	植被 盖度/%	结皮 厚度/mm
油蒿林	110 $^{\circ}$ 46'42.50"E,40 $^{\circ}$ 04'43.73"N	1 142	3	飞播	43 $\pm$ 11	1720	19	66.5	7.8
沙柳林	110 $^{\circ}$ 48'30.12"E,40 $^{\circ}$ 03'41.76"N	1 159	5	人工植苗	178 $\pm$ 19	580	17	62.3	3.6
柠条林	110 $^{\circ}$ 46'56.94"E,40 $^{\circ}$ 04'40.00"N	1 113	11	人工植苗	254 $\pm$ 21	630	17	56.4	1.2

2 结果与分析

2.1 研究区环境因子变化特征

由图 1 和图 2 可以看出,降雨量年际变化较大,2017 年生长季共发生降雨 35 次,累积降雨量 233.8 mm,<5 mm 降雨事件 18 次,占生长季降雨量 51.4%。2018 年降雨最多,生长季共发生降雨 42 次,累积降雨量 329.0 mm,<5 mm 和>20 mm 降雨事件分别为 24 次和 6 次,分别占生长季总降雨量的 13.9%和 48.9%,单次最大降雨量 35.8 mm。

2019 年共发生 29 次降雨事件,生长季累积降雨量 308.1 mm,单次最大降雨量达 65.8 mm,占生长季降雨量的 21.32%。3 a 主要降雨集中于 6—8 月,与多年历史平均降雨量(270.4 mm)相比,2017 年为相对干旱年份,2018 年和 2019 年为相对湿润年份<sup>[16]</sup>。空气温湿度年际变化较小,干旱年份(2017 年)平均温度最高,为 18.8 $^{\circ}$ C,2018 年平均湿度最大,为 57.6%,2019 年平均温度和平均湿度均相对较低,分别为 18.0 $^{\circ}$ C和 55.4%,温湿度的变化与当年降雨量有密切关系。

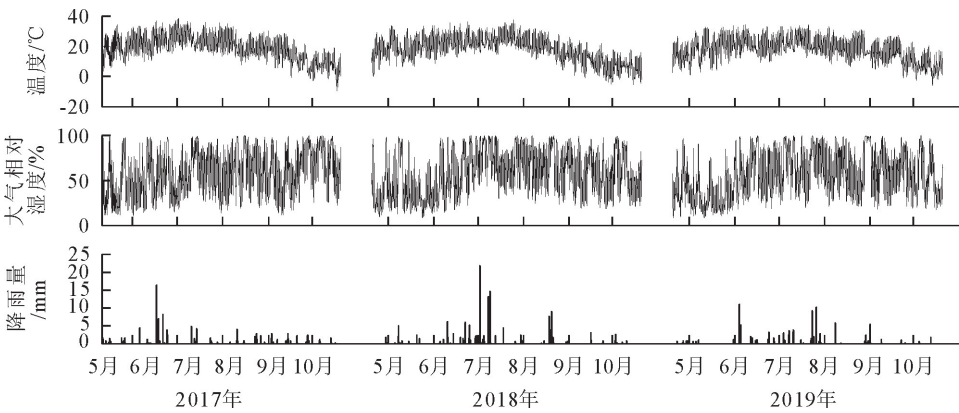


图 1 研究区生长季空气温湿度及降雨量变化

Fig. 1 Variations of air temperature, humidity and rainfall in the growing season in the study area

2.2 人工固沙林土壤水分时间变化特征

不同人工固沙林平均土壤含水量年际差异较大,受降雨量年际变化影响,3 种人工固沙林在 2017—2019 年土壤含水量整体呈上升趋势。由图 3 可知,2017、2018 年 3 种样地土壤含水量在 5—10 月表现出基本一致的季节变化规律,均呈“W”型,峰值出现在 5、7 月和 10 月,最小值集中于 6 月和 8 月,2019 年则相反,均呈“M”型变化,峰值出现在 8 月。

降雨量是影响土壤含水量的主要因素,降雨再分配及降雨入渗的滞后作用会导致土壤水分在降雨后缓慢增加<sup>[17-19]</sup>。水平方向上,对研究区不同人工固沙林平均土壤含水量与季节变化进行了双因素方差分析(表 3),季节变化和不同植被类型对土壤含水量的影响均达到极显著水平( $P<0.01$ ),二者交互作用的影响达到显著水平( $P<0.05$ ),且季节变化对土壤含水量的影响较大。总体来说,不同人工固沙

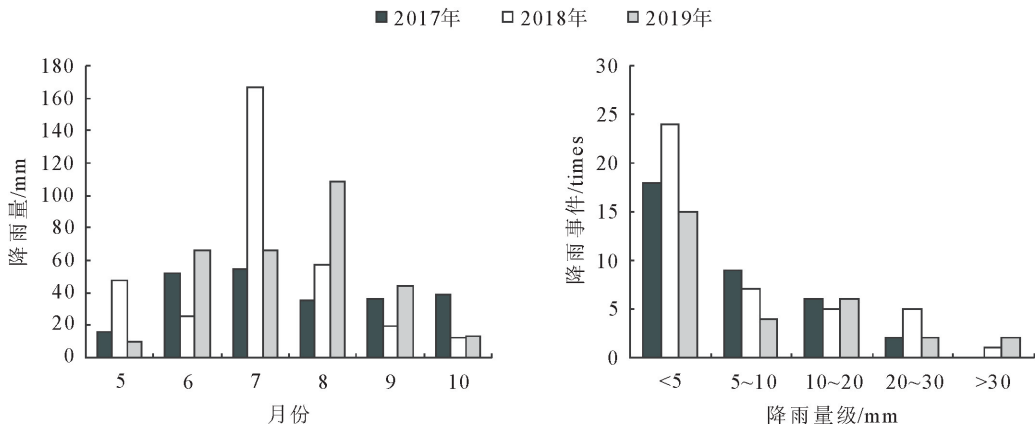


图 2 研究区生长季降雨量及降雨事件变化

Fig. 2 Variations of rainfall and rainfall events in the growing season in the study area

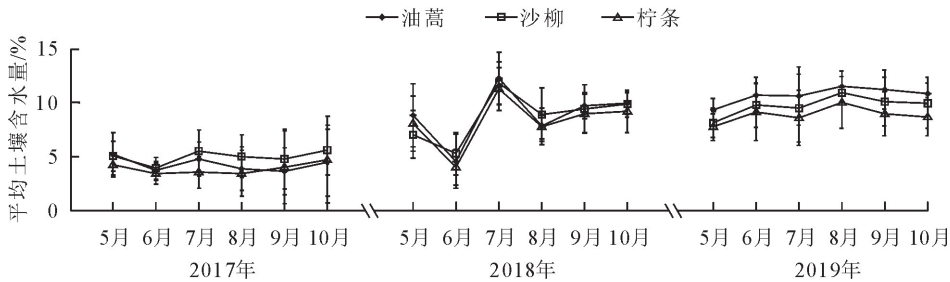


图 3 3 种人工固沙林平均土壤含水量变化

Fig. 3 Changes of average soil water content of three forests

林平均土壤含水量表现为春季缓慢下降,夏季降雨后快速补给,秋季稳定积累。

2.3 人工固沙林土壤水分空间变化特征

因年降雨量的不同,3 种人工固沙林年平均土壤含水量差异明显(图 3)。相对干旱年份 2017 年土壤含水量表现为:沙柳林>油蒿林>柠条林,相对湿润年份 2018、2019 年则表现为:油蒿林>沙柳林>柠条林,2019 年油蒿林平均土壤含水量达到最大值,为 10.7%。由于降水是天然荒漠地区土壤水分主要的补给来源,年降雨事件及降雨量的差异是影响土壤含水量的主要因素,但不同植被自身蒸腾及土壤蒸发散对土壤含水量的变化也起到关键作用<sup>[17,20]</sup>。

不同坡位的空间分布对土壤含水量的响应也存在明显差异(表 2)。2017—2019 年,3 种人工固沙林土壤含水量在不同坡位间差异显著( $P<0.05$ )。油蒿林和柠条林平均土壤含水量总体均表现为:迎风坡底部>中部>顶部,且油蒿林和柠条林迎风坡底部土壤含水量分别高于顶部 13.6%、13.5%。而沙柳林则表现为:迎风坡底部>顶部>中部,迎风坡底部土壤含水量分别高于顶部和底部 2.9% 和 8.1%。总体上,不同人工固沙林土壤含水量均在迎风坡底部最高,顶部相对较低。

不同人工固沙林土壤含水量垂直变化明显(图

4)。2017 年 3 种人工固沙林土壤含水量随深度均表现为先减小后缓慢增大,2018、2019 年沙柳林土壤含水量的变化趋势与 2017 年保持一致,且 3 a 间土壤含水量上升拐点均出现在 40~60 cm 土层,而油蒿林和柠条林土壤含水量的垂直变化与 2017 年略有不同,表现为近地表层(0~20 cm)缓慢增大再减小后增大,这与不同年际降雨量大小、温度及植物蒸腾作用有关。2017—2019 年,3 种人工固沙林土壤含水量最大值均出现在浅层 0~40 cm,油蒿林和沙柳林最小值出现在 100~120 cm,柠条林最小值出现在 100~140 cm。整体上,浅层 0~40 cm 土壤含水量明显高于其他各层,表现为:沙柳林>柠条林>油蒿林,在中层 40~120 cm,其土壤含水量变化相对缓慢,深层 120~180 cm,土壤含水量逐渐趋于稳定。

垂直方向上,对不同人工固沙林平均土壤含水量与坡位和土层深度进行了双因素方差分析(表 3)。坡位变化对土壤含水量的影响达到显著水平( $P<0.05$ ),土层深度对土壤含水量的影响达到极显著水平( $P<0.01$ ),二者交互作用的影响达到显著水平( $P<0.05$ ),且土层深度对土壤含水量影响较大,说明区域环境因子和土层深度变化在时间和空间维度上对土壤含水量有较大的影响。



表 2 不同坡位土壤含水量变化							
Table 2 Variations of soil water content at different slope positions							
年份	坡位	油蒿林		沙柳林		柠条林	
		平均值/%	变异系数	平均值/%	变异系数	平均值/%	变异系数
2017	坡顶	4.05b	0.48	5.26a	0.35	3.57b	0.72
	坡中	4.25a	0.48	4.53c	0.5	3.68b	0.67
	坡底	4.53a	0.53	5.13b	0.38	4.04a	0.63
2018	坡顶	7.57b	0.37	8.4c	0.3	7.49b	0.34
	坡中	9.5a	0.29	8.73b	0.34	8.54a	0.33
	坡底	9.45a	0.36	9.06a	0.35	8.56a	0.37
2019	坡顶	10.28b	0.17	9.92b	0.16	8.12c	0.28
	坡中	10.94a	0.16	9.18c	0.2	9.32a	0.2
	坡底	10.89a	0.17	10.07a	0.39	9.14b	0.26
平均	坡顶	7.3b	0.34	7.86b	0.27	6.39c	0.45
	坡中	8.23a	0.31	7.48c	0.35	7.18b	0.4
	坡底	8.29a	0.35	8.09a	0.38	7.25a	0.42

注:同行不同小写字母表示相同年份同一样地不同坡位间土壤含水量差异显著( $P<0.05$ )。

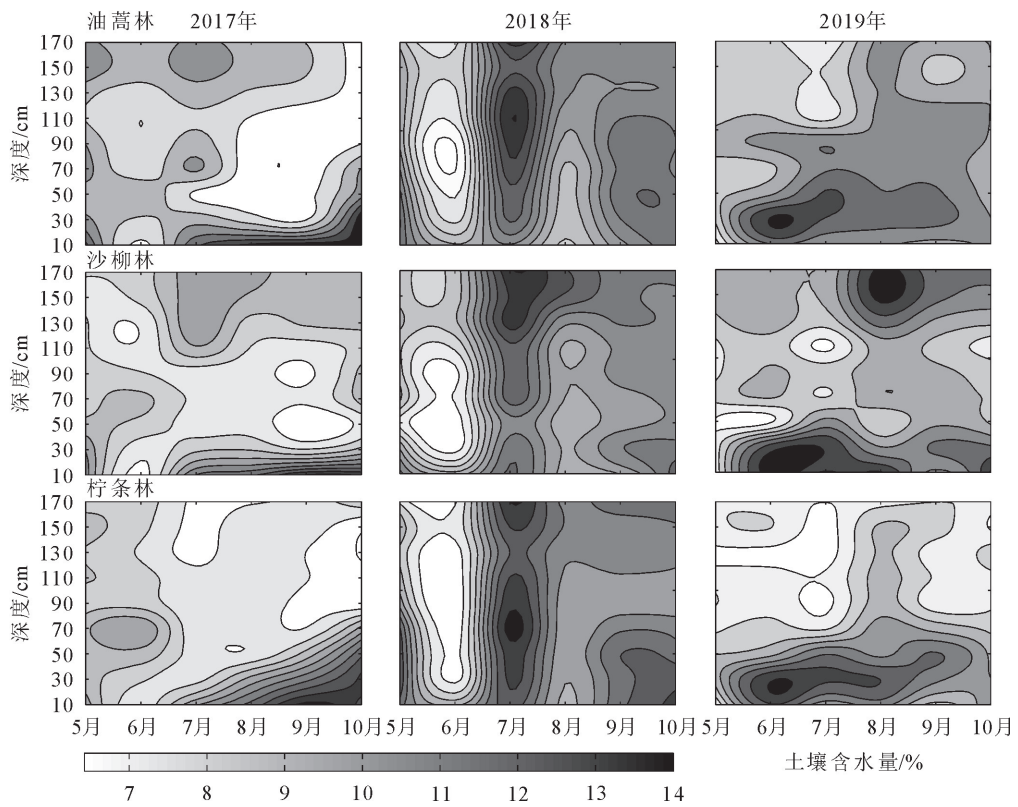


图 4 不同土层深度土壤含水量变化

Fig. 4 The variation of soil water content with soil depths

表 3 土壤含水量对环境因子的响应						
Table 3 The response of desert soil water content to environment factors						
指标	类别	差异源	<i>df</i>	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i>
土壤含水量	水平方向	季节变化	5	2.315	20.645	<0.001**
		样地类型	2	1.773	15.817	0.001**
		季节变化×样地类型	10	0.112	4.033	0.036*
	垂直方向	坡位变化	2	0.781	5.003	0.021*
		土层深度	8	1.695	10.863	<0.001**
		坡位变化×土层深度	16	0.156	2.974	0.019*

### 2.4 土壤水分变异系数时空变化特征

将研究区不同人工固沙林每个坡位同一深度 3 a 监测土壤含水量的平均值和标准差的比值作为时间变异系数,取相同坡位 3 个监测点相同深度的时间变异系数平均值作为该深度的时间变异系数(表 4)。3 种人工固沙林时间变异系数随深度变化总体呈下降趋势,且不同人工固沙林的变异系数差异较小,变化范围为 0.2~0.4。油蒿林和柠条林时间变异系数分别在 20~40 cm 和 0~20 cm 土层达到峰值,两者均为 0.4,而沙柳林最大值出现在 40~60 cm 土层,为 0.3。总体上,3 种人工固沙林时间变异性在浅层(0~40 cm)相对较大,深层(100~180 cm)较为稳定,这与不同人工林根系分布、生长耗水及土壤理化性质、环境因子等有密切关系。

将研究区不同人工固沙林每个坡位 9 个垂直深度土壤含水量平均值和标准差的比值作为垂直变异系数,取相同坡位 3 个监测点垂直变异系数的平均值作为该次测量土壤含水量的垂直变异系数(图

5)。2017 年不同人工固沙林土壤水分垂直变异系数表现为先减小再增加后趋于稳定,而 2018 年和 2019 年则表现为先增大再减小后趋于稳定。由图 3 和图 4 可知,不同人工固沙林土壤含水量与垂直变异系数呈负相关,土壤含水量增大,其垂直变异系数减小。

表 4 土壤水分时间变异系数变化

Table 4 Changes of the time variation coefficient (time $c_v$ ) of soil moisture			
土层/cm	油蒿林	沙柳林	柠条林
0~20	0.31	0.33	0.37
20~40	0.37	0.30	0.35
40~60	0.30	0.30	0.35
60~80	0.30	0.31	0.34
80~100	0.31	0.30	0.35
100~120	0.30	0.32	0.33
120~140	0.26	0.26	0.33
140~160	0.27	0.24	0.32
160~180	0.25	0.24	0.29

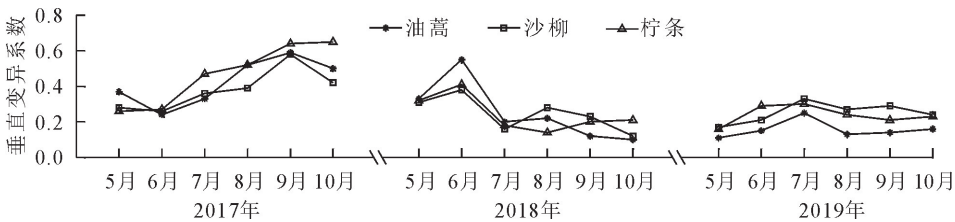


图 5 土壤水分垂直变异系数变化

Fig. 5 Changes of vertical variation coefficient (vertical  $c_v$ ) of soil moisture

### 3 结论与讨论

库布齐沙漠东段不同人工固沙林土壤含水量在不同年际、季节、坡位及不同深度都表现出十分明显的时空差异。3 种人工固沙林平均土壤含水量年际变化呈逐渐上升的趋势,随季节总体表现为春季缓慢下降,夏季降雨后的快速补给和秋季的稳定积累,峰值均出现在 7 月或 8 月。不同样地土壤含水量总体表现为:油蒿林(7.9%)>沙柳林(7.8%)>柠条林(6.9%),且土壤含水量均为迎风坡底部最大;在垂直深度上,整体呈现先减小后增大的动态趋势,最大值均出现在 0~40 cm 土层,最小值在中层和深层均有出现。3 种人工固沙林土壤水分时间变异系数为 0.2~0.4,浅层土壤时间变异性较大,深层较为稳定;土壤水分垂直变异系数为 0.1~0.6,土壤含水量增大,垂直变异系数减小。

荒漠土壤含水量既受到区域降雨、温度、微地形、土壤质地、地下水等环境因素的影响,也与地表植被的生长特性及覆盖度等有密切关系<sup>[21-22]</sup>。研究发现,不同人工固沙林土壤含水量在相对湿润年份

(2018、2019 年)明显大于干旱年份(2017 年),由于降雨是荒漠区土壤水分主要的补给来源<sup>[18-19,23]</sup>,2018 年生长季集中降雨对植物生长发育提供了充足的水分,土壤含水量增加,2019 年降雨相对充沛,又受到 2018 年水分积累作用的影响,土壤含水量已有稳定盈余,故而在 3 a 间逐渐上升。季节上整体表现为春季缓慢下降,夏季降雨后快速补给,秋季稳定积累,这与王艳莉等<sup>[16]</sup>对沙坡头 2009—2013 年人工固沙林土壤水分变化的研究结果一致。生长季初期降雨较少,此时植被生长缓慢,水分消耗较少,土壤含水量波动较缓;生长旺盛期植被的快速生长,加之温度升高导致蒸腾速率加快,土壤水分消耗剧增,同期的集中降雨又可为土壤形成及时补给,支出与收入强烈变化,使得该时期土壤含水量波动幅度明显;生长季末期植物长势渐缓,对水分的需求减弱,而此时的降雨事件仍相对较多,因此土壤含水量在该时期能够缓慢积累。

研究期间,在干湿不同年份 3 种人工固沙林土壤含水量表现出一定的差异性,相对于干旱年份不同人工固沙林平均土壤含水量表现为:沙柳林>油蒿

林>柠条林,湿润年份则表现为:油蒿林>沙柳林>柠条林,这表明降雨量及植被差异性在一定程度上影响土壤含水量的大小,这与何志斌等<sup>[24]</sup>、潘颜霞等<sup>[25]</sup>、W. B. Yang *et al*<sup>[26]</sup>的研究结果一致。植被根系分布特征、蒸发散及生物土壤结皮的形成是导致土壤水分空间差异的主要原因<sup>[20,27]</sup>。研究区中油蒿、沙柳、柠条根系分别主要集中于 20~40、0~60、40~100 cm 土层<sup>[28-29]</sup>。柠条根系垂直分布范围最广,且自身蒸散量较大,冠层对降雨截留作用明显,进入的土壤水分少而消耗大<sup>[30-31]</sup>,故而无论在干旱还是湿润年份,柠条林土壤含水量均为最小。油蒿根系分布较浅,在干旱年份,较少的降雨量对深层土壤水分补给较弱,浅层土壤水的补给作用相对明显,油蒿可以从浅层土壤中吸取水分供自身生长需要,而沙柳林因水分条件使其生长受到一定限制,蒸发散及自身土壤耗水量减小<sup>[32-33]</sup>,加之自身的林冠截留降雨,以及结皮对降雨的部分截留和利用,因此,在干旱年份沙柳林土壤含水量相对较大。在湿润年份,由于降雨的充分补给,结皮对水分截留效应不会对土壤含水量产生显著影响<sup>[27]</sup>。随降雨量的增加,沙柳和油蒿均得以快速生长,整体上油蒿蒸发散和林冠截留较小,土壤得到的有效入渗增加,其土壤含水量较高<sup>[34]</sup>。所以,降水补给深度、植被根系需水层次和林冠截留降雨差异也是导致不同植被土壤水分时间和空间异质性的的重要因素。

微地形的变化对土壤含水量的响应也存在差异,伍永秋等<sup>[13]</sup>对半固定沙丘和固定沙丘不同坡位土壤含水量研究认为迎风坡底部均最大,中部、顶部较小。罗梦娇等<sup>[35]</sup>研究沙棘林不同坡位土壤水分变化得到相同的结论。本研究发现不同人工固沙林土壤含水量在迎风坡底部最高,顶部和中部相对较低,这与前人的研究结果一致<sup>[18,23]</sup>。因为迎风坡底部相对于中部和顶部地势平坦,当发生强度较大的降雨时,水分会沿坡面向坡底汇集,增加土壤入渗,加之底部的平均温度和风速均低于顶部和中部,地表蒸发及植物蒸腾耗水量较小,所以土壤含水量相对较高。

总体来说,荒漠生态系统土壤水分与植被系统相互作用,相互影响,在地表植被改变土壤水分时空分布时,土壤水分也对植被生长和演替产生明显的促进或制约<sup>[36-37]</sup>。所以,在荒漠化防治过程中,不仅要根据土壤水分特征选择适宜的灌木树种,满足植物自身的生存需水,也要考虑灌木的种植密度,选取灌草配置最优模式,实现对深层土壤水的保护和持续利用,确保人工固沙植被可持续发展及荒漠生态系统的稳定。

参考文献:

[1] HU W, SHAO M G, HAN F P, *et al*. Spatio-temporal variability behavior of land surface soil water content in shrub- and grass-land[J]. *Geoderma*, 2011, 162(3): 260-272.

[2] CHO J, LEE Y W. The effect of fractional vegetation cover on the relationship between EVI and soil moisture in nonforest regions[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(1): 37-45.

[3] 张立恒, 李昌龙, 姜生秀, 等. 梭梭林下土壤结皮对土壤水分空间分布格局的影响[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(5): 17-22. ZHANG L H, LI C L, JIANG S X, *et al*. Effect of soil crusts on the spatial distribution pattern of soil moisture under *Haloxyylon ammodendron* Plantations[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(5): 17-22. (in Chinese)

[4] 张瑞强, 高天明, 王健, 等. 希拉穆仁草原根层土壤水分变化特征[J]. *草业科学*, 2016, 274(5): 58-65.

[5] VOLPE V, MARANI M, ALBERTSON J D, *et al*. Root controls on water redistribution and carbon uptake in the soil-plants system under current and future climate[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 60: 110-120.

[6] 王明明, 刘新平, 李玉霖, 等. 不同植被盖度沙质草地生长季土壤水分动态[J]. *中国沙漠*, 2019, 3(5): 54-61.

[7] 顾梦鹤, 谢泽慧, 王春晖, 等. 库布其沙漠 8 种防护林的土壤水分特征[J]. *草业科学*, 2017, 34(12): 2437-2444. GU M H, XIE Z H, WANG C H, *et al*. Soilmoisture characteristics of eight types of shelterforest in Kubuquidesert[J]. *Prat-acultural Science*, 2017, 34(12): 2437-2444. (in Chinese)

[8] 王家强, 韩路, 柳维扬, 等. 塔里木河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间格局变化关系研究[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(1): 1-10. WANG J Q, HAN L, LIU W Y, *et al*. Variable relationship of soil moisture and spatial pattern along desert oasis transition zone in the tarim River middle reache basin[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(1): 1-10. (in Chinese)

[9] ENTIN J K, ROBOCK A, VINNIKOV K Y, *et al*. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the ex-tratropics[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(9): 11865-11877.

[10] 杨凯悦, 贾志清, 张立恒, 等. 高寒沙区典型人工林土壤水分空间分布特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(5): 90-96.

[11] 苏莹, 陈林, 李月飞, 等. 荒漠草原不同类型土壤水分时空变化特征[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1308-1316.

[12] 张帅普, 邵明安, 李丹凤. 绿洲-荒漠过渡带土壤蓄水量的空间分布及其时间稳定性[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2509-2516. ZHANG S P, SHAO M A, LI D F. Spatial distribution and temporal stability of soil water storage in an oasis-desert ecotone[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(8): 2509-2516. (in Chinese)

[13] 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.

[14] 罗维成, 赵文智, 孙程鹏, 等. 科尔沁沙地樟子松(Pinus sylvestris)人工固沙林演变过程中物种多样性和土壤水分特征[J].

中国沙漠,2018,38(1):126-132.

[15] 王睿,杨国靖. 库布齐沙漠东缘防沙治沙生态效益评价[J]. 水土保持通报,2018,38(5):174-179,188.  
WANG R, YANG G J. Evaluation of ecological benefits of combating desertification in east edge of Hobq dersert[J]. Bulletin of Soil and Water Conservations, 2018, 38(5): 174-179, 188. (in Chinese)

[16] 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.

[17] 李新荣,张志山,黄磊,等. 我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述[J]. 科学通报,2013,58(5/6):397-410.  
LI X R, ZHANG Z S, HUANG L, *et al.* Reviewoftheeco-hydrologicalprocess andfeedbackmechanism controlling sand-binding vegetation system in sandy desert regions of China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(5/6): 397-410. (in Chinese)

[18] 冯伟,李卫,杨文斌,等. 毛乌素沙地樟子松固沙林土壤水分对降雨的动态响应[J]. 水土保持研究,2019,26(3):101-107.  
FENG W, LI W, YANG W B, *et al.* Dynamic response of soil moisture to rainfall in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sand fixation forest of Mu Us sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 101-107. (in Chinese)

[19] 孙媛,董晓华,郭梁锋,等. 不同降雨条件下土壤水运动及再分布模拟研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(Supp. 2):74-80.  
SUN Y, DONG X H, GUO L F, *et al.* Simulation of soil water movement and redistribution under different rainfall conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(Supp. 2): 74-80. (in Chinese)

[20] 张志山,李新荣,王新平,等. 沙漠人工植被区的蒸发蒸腾测定[J]. 生态学报,2005,25:2484-2490.

[21] 蔺鹏飞,朱喜,何志斌,等. 土壤水分时间稳定性研究进展[J]. 生态学报,2018,38(10):3403-3413.  
LING P F, ZHUX, HE Z B, *et al.* Research progress on time stability of soil moisture[J]. Acta Ecologica Sinica , 2018, 38(10): 3403-3413. (in Chinese)

[22] 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 in fluencing factors of soil water content in the root zone of *Haloxylon ammodendron* in desert-oasis ecotone in the middle reaches of Heihe River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 16-25. (in Chinese)

[23] MCCOLL K A, ALEMOHAMMAD S H, AKBAR R, *et al.* The global distribution and dynamics of surface soil moisture [J]. Nature Geoscience, 2017, 10(2): 100-104.

[24] 何志斌,赵文智. 半干旱地区流动沙地土壤湿度变异及其对降水的依赖[J]. 中国沙漠,2002,22(4):359-362.

[25] 潘颜霞,王新平,苏延桂,等. 不同植被类型沙地表层土壤水分变化特征[J]. 水土保持学报,2007,21(5):106-109,186.

[26] YANG W B, TANG J N, LIANG H R, *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.

[27] 李新荣,贾玉奎,龙利群,等. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展[J]. 中国沙漠,2001,20(1):4-11.

[28] ZHANG Z S, LI X R, WANG T, *et al.* Distribution and seasonal dynamics of roots in a revegetated stand of *Artemisia ordosica* Kracsh. in the Tengger desert (North China) [J]. Arid Land Research and Management, 2008, 22(3): 147-154.

[29] 于晓娜,黄永梅,陈慧颖,等. 土壤水分对毛乌素沙地油蒿群落演替的影响[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(2):92-98.  
YU X N, HUANG Y M, CHEN H Y, *et al.* Effect of soil moisture on community succession of *Artemisia ordosica* in Mu Us sandy land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(2): 92-98. (in Chinese)

[30] 杨凯悦,贾志清,李清雪,等. 高寒沙地典型人工林土壤水分动态及其对降雨的响应[J]. 生态环境学报,2019,28(9):1757-1766.  
YANG K Y, JIA Z Q, LI Q X, *et al.* Soil water dynamics of typical plantation in alpine sandy land and its response to rainfall[J]. Ecology and Environment, 2019, 28(9): 1757-1766. (in Chinese)

[31] 李新乐,吴波,张建平,等. 白刺沙包浅层土壤水分动态及其对不同降雨量的响应[J]. 生态学报,2019,39(15):5701-5708.  
LI X L, WU B, ZHANG J P, *et al.* Soil water dynamics in the shallow layer of *Nitraria alba* and its response to different rainfall[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5701-5708. (in Chinese)

[32] LIU L C, LI S Z, DUAN Z H, *et al.* Effects of microbiotic crusts on dew deposition in the restored vegetation area at Shapotou, northwest China[J]. Journal of Hydrolqgy, 2006, 328: 331-337.

[33] ZHANG Z S, LIU L C, LI X R, *et al.* Evaporation properties of a revegetated area of the Tengger desert, north China[J]. Journal of Arid Environments, 2008, 72: 964-973.

[34] ZHANG Z S, LI X R, LIU L C, *et al.* Distribution, biomass, and dynamics of roots in a revegetated stand of *Caraganakorshinskii* in the Tengger desert, northwestern China[J]. Journal of Earch, 2009, 122: 109-119.

[35] 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, 191.  
LUO M J, AI N, LIU C H, *et al.* Influence of different vegetation types on soil moisture in Semi-arid Loess Region[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2019, 37(2): 177-184, 191. (in Chinese)

[36] XIA J, NING L, WANG Q, *et al.* Vulnerability of and risk to water resources in arid and semi-arid regions of west China under a scenario of climate change[J]. Climatic Change, 2017, 144(3): 549-563.

[37] SENEVIRATNE S I, CORTI T, DAVIN E L, *et al.* Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review[J]. Earth Science Reviews, 2010, 99(3): 125-161.