

荒漠人工固沙植被区土壤水分的时空变异性

潘颜霞, 王新平*, 苏延桂, 何明珠, 贾荣亮

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 表层土壤水分具有高度的时间和空间变异性。研究的目的: (1) 揭示沙坡头人工固沙植被区浅层土壤水分的时空变异性特征; (2) 确定驱动土壤水分变异的主要环境因子。在人工固沙植被区内一个 4500m² 的网格样地上每隔 10m 设置取样点, 在连续 7 个月的时间内 (2005 年 4 ~ 10 月), 每隔 15d 用时域反射仪测量各样点表层以下 15cm 和 30cm 深度的土壤容积含水量。结果表明, 该区网格尺度上浅层土壤水分的分布具有明显的空间变异性, 其变异性随着土壤水分含量的降低而减小; 相对海拔是驱动土壤水分空间变异的主要环境因子, 其作用在降雨后尤为显著, 且其对土壤下层的影响比上层更明显; 植被和土壤水分含量的相关性时间序列与相对海拔一致——降雨使其相关性增加; 土壤质地 (土壤粒径分布) 和土壤水分含量的相关性时间序列特征与植被和相对海拔相反, 且其对土壤上层的影响比下层更明显。因此, 在沙坡头荒漠人工固沙植被区, 降雨后的短暂湿润期, 地形和植被是驱动浅层土壤水分变异的主要影响因子, 而随着降雨之后土壤逐渐变干, 土壤质地的影响变得更加明显。

关键词: 人工植被; 荒漠; 土壤水分; 空间变异性; 影响因子

文章编号: 1000-0933 (2009) 02-0993-08 中图分类号: Q142, Q945, S715.2 文献标识码: A

Temporal and spatial variability of surface soil moisture in a re-vegetation desert area in Shapotou

PAN Yan-Xia, WANG Xin-Ping*, SU Yan-Gui, HE Ming-Zhu, JIA Rong-Liang

1 Shapotou Desert Experimental Research Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 0993 ~ 1000.

Abstract: Soil moisture content in surface layer exhibits large spatial and temporal variability. The purpose of this study was (a) to characterize the spatial and temporal variability of soil moisture in surface layer in an artificially re-vegetation desert area in Shapotou. (b) to make inferences regarding the environmental factors that affect this variability. During the experimental period of seven months (from April to October 2005), soil moisture content was measured using the time domain reflectometry about every half a month at a grid with 10m × 10m intervals at a plot of 4500m², the topography of the experimental area varying from dune crest to dune hollow, and again to dune crest. Results indicated that the distribution of soil moisture at grid scale was in normal distribution with a significant spatial variability; the variability of soil moisture decreased with decreasing mean soil moisture content as soil dried down following rain events. Relative elevation was a main driving factor of soil moisture variability especially after rainfall events, and its influence was more obvious in the depth of 0 – 30cm than in the depth of 0 – 15cm. The correlation between the vegetation and soil moisture content in time series was in consistent with that of the relative elevation and soil moisture content, which was strengthened by rain storm events, though the relationship between vegetation and soil moisture content was less obvious. There was an opposite time series pattern in correlation between soil texture (particle size distribution) and soil moisture content with that of the correlation between relative elevation and vegetation cover, and the relativity was higher in the depth of 0 – 15cm than in the depth of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40871051)

收稿日期: 2007-09-22; 修订日期: 2008-03-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xpwang@lzb.ac.cn

0—30cm. We may concluded that local topography and vegetation cover were the main driving factors for surface soil moisture spatial variability in a short duration after the rain storm events, while the shallow soil texture exerted more influence on the surface soil moisture spatial variability as the soil dried following heavy rainfall events in this specific re-vegetated arid desert area.

Key Words: artificially re-vegetation; desert area; soil moisture; spatial variability; influence factors

在极端干旱条件下,水分是影响环境变化的主要因子。土壤水分限制着干旱区长期定居的植物种类和数目^[1],因此土壤水分动态对植被系统演化具有十分重要的作用。在沙坡头沙漠生态系统中,地下水埋深超过80m,不能为植物利用,天然降雨成为该区维持荒漠生态系统稳定演替的唯一水分来源。因此,降雨特征和土壤水分动态控制着天然植被状况及退化荒漠植被功能恢复的可能性。土壤水分动态指示着局地气候、地形、土壤和植被之间的相互作用与反馈关系。为了理解该区有限的土壤水分对荒漠植被的有效性,并阐明荒漠化逆转过程,必须了解该区土壤水分的时空变异性机制。因此,本文针对以下两个方面的主要问题开展研究:(1)通过长期连续定位观测试验,揭示历经50a稳定演替的沙坡头人工固沙植被区浅层土壤水分的时空变异性特征;(2)通过多元回归统计分析,确定驱动该区浅层土壤水分时空变异的主要环境因子。

1 研究方法

1.1 试验地概况

中国科学院沙坡头沙漠研究试验站地处宁夏中卫市境内,位于腾格里沙漠东南缘(37°32'N,105°02'E),是荒漠化草原向草原化荒漠的过渡地带,也是沙漠与绿洲的过渡区。该区海拔高度约为1288m,格状新月形沙丘由西北向东南倾斜,呈阶梯状分布。受蒙古高压的影响,寒冷、干燥、多西北风,年平均风速 2.9ms^{-1} ,夏秋降雨集中,兼有大陆性气候和季风降雨的特点;该区年平均气温为 10°C ,低温极值为 -25.1°C ,高温极值为 38.1°C ,全年日照时数为3264h,年均降水量仅为180mm,年潜在蒸发量高达3000mm。地下水埋深超过80m,不能为植物直接利用,降雨成为该区植物生长的唯一水分来源。天然植被主要包括花棒、油蒿和柠条,其盖度仅有接近1%~2%^[2]。

为了确保包兰铁路沙坡头沙漠地段的畅通无阻,我国沙漠科学工作者于1956年开始相继建立了“以固为主、固阻结合”的植被固沙防护体系:首先在流动沙丘上垂直于主风的方向扎设阻沙栅栏,然后在阻沙栅栏后面扎设 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 的麦草方格作为固沙屏障,在无灌溉条件下栽植柠条(*Caragana korshinskii*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)、沙拐枣(*Calligonum arborescens*)和沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)等为主的旱生灌木,其株距与行距为 $1\text{m}\times 2\text{m}$ 或 $2\text{m}\times 3\text{m}$,逐年实施,50a来在铁路北侧与南侧建立了宽度分别为500m与200m的人工植被固沙带,该固沙带全长约16km。

本文的研究地点设在1956年始植的人工固沙植被区,在建立草方格沙障并栽植灌木植被对流动沙丘进行固定的过程中,荒漠灌丛生态系统中微生物土壤结皮和亚表面土层的发育加快了微生境的进化,区域荒漠化逆转过程开始^[3]。

1.2 试验方法

在试验区沿东西方向90m,南北方向50m固定一个 4500m^2 的样地,样地自西向东依次为背风坡、丘间低地和迎风坡,在整个样地内每隔10m设木桩作为取样点,总共得到60个取样点;研究区位置及样地地形图见图1。从2005年4月15日开始,每隔15d用时域反射仪TDR(Trase system I,美国,测量范围0~100%,误差 $\leq \pm 0.2\%$)测定每个样点0~15cm和0~30cm深度的土壤容积含水量。同时在每个样点周围设置 $10\text{m}\times 10\text{m}$ 的样方对灌木进行调查, $1\text{m}\times 1\text{m}$ 的样方对草本进行调查(种类、覆盖度等指标)。

用GPS和水准仪测量60个样点的海拔高度,其中最低点海拔1284m,最高点海拔1292.42m,高程为8.42m。9月下旬在每个样点周围1m半径范围的圆内采集4个样点的表层(0~5cm)土样充分混合,用四分

法取大约 1kg 样品,室内风干,对土壤粒径用 MS-S 激光粒度分析仪(英国马尔文 Malvern 仪器有限公司)进行分析。

试验期间主要的气象因子——降雨由沙坡头沙漠研究试验站自动气象站(Milos 520, Vaisala, 芬兰)观测。

2 结果与分析

2.1 试验期间降雨状况

试验期间共观测到 26 次降雨事件,总降雨量为 64.7mm,其中 85% 的次降雨量少于 5mm,92% 的次降雨强度小于 5mm h⁻¹,其间包括两次较大的降雨事件(5 月 16 日,降雨量 15mm;7 月 26 日,降雨量 13mm)和一个相对干旱期(5 月 17 日~7 月 25 日,无降雨)(图 2)。

2.2 土壤水分的均值和变异系数

总体上说,浅层土壤水分含量与降雨量变化一致,较大的降雨量对应较高的土壤水分含量值(图 2、图 3)。影响土壤水分含量的其他因子包括初始水分条件(在相同的降雨强度和降雨历时下,初始水分条件越湿润,降雨后土壤水分含量越高),降雨强度(高强度的降雨产生更多的表面径流,因此比低强度的降雨具有更低的土壤水分含量值),降雨与土壤水分含量测量的时间间隔和蒸发率。

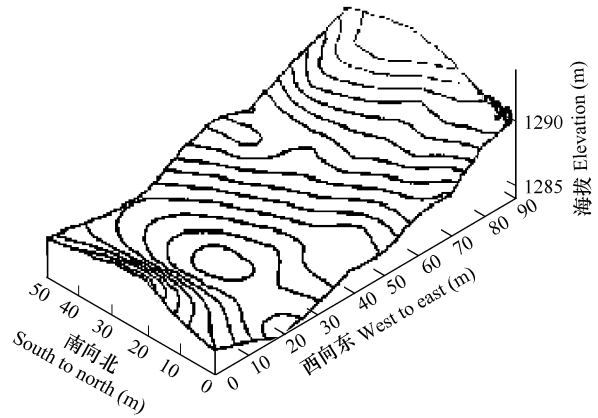


图 1 研究区位置及试验样地地形图

Fig. 1 Location of the study area and topographic map of the experiment field

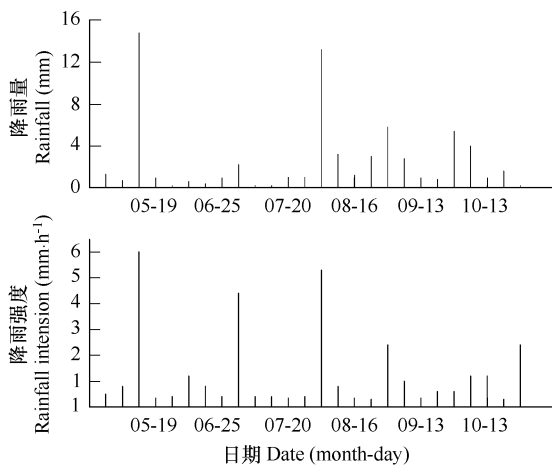


图 2 试验期间降雨状况

Fig. 2 The precipitation during the experiment

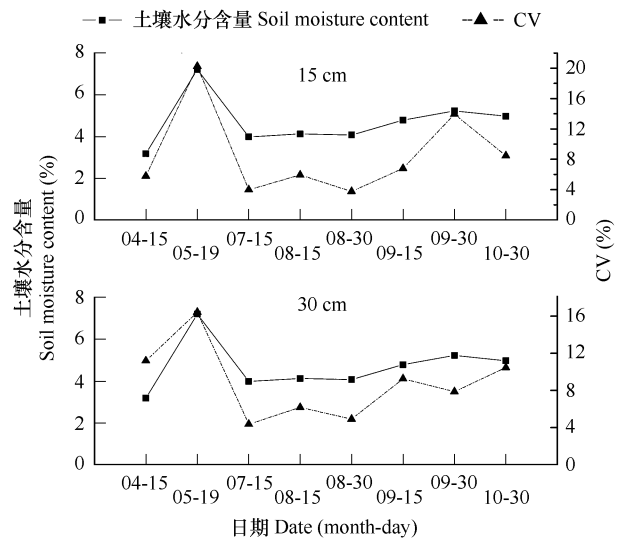


图 3 土壤水分含量及其变异系数的时间序列特征

Fig. 3 Volumetric soil moisture contents (%) and CV (%) at grid-scale versus time

浅层土壤水分含量的变化具有重要的季节趋势(图 3),0~15cm 和 0~30cm 深度土壤水分含量在春季和秋季降雨后的峰值高于夏季,并且此现象在 0~15cm 比 0~30cm 深度更加明显,一方面,这可能是由于春秋两季具有较低蒸散率的结果,另一方面,秋季有较多小的降雨,它们提高了大降雨之前的初始水分条件;由于较高的蒸散率和较少的降雨量,0~15cm 和 0~30cm 土层深度的最低土壤水分含量值都出现在夏季。

土壤水分含量变异系数的时间变化特征与平均值相似(图 3),降雨之后达到峰值,这一现象在 5 月 16 日第 1 次较大降雨之后最明显,此时土壤水分含量的平均值和变异系数同时到达最大值,即越大的降雨和越高的土壤水分含量经常伴随着越高的变异性,反之亦然;这一结论与以前的研究结果^[4,5]一致,土壤水分含量与变异系数的相关性分析结果表明两者的相关性在 0~15cm ($R^2 = 0.8366$) 比 0~30cm 土层深度 ($R^2 =$

0.3675) 更高。

给定了上面的关系,可以通过土壤水分含量的季节倾向更好地理解变异系数的季节倾向,变异系数的时间序列中峰值出现在5月16日降雨之后,此时土壤水分含量处于研究期间的最高值,最小值出现在相对干旱期末的7月15日,中间值出现在8月和9月份。由于较低的蒸散率,土壤水分含量在春季比夏季高,变异系数也表现出相同的变化规律,正如秋季频繁的小降雨阻止了土壤水分降低到夏季观测期间的最小值,秋季土壤水分含量的变异系数也相似地被阻止进一步地降低。

2.3 土壤水分的空间变异性特征

土壤水分具有明显的空间变异性特征,降雨后其空间变异性达到最大值并随着土壤含水量的降低而减小(图4)。土壤水分的空间变异性程度与降雨量显著相关,5月16日15mm的降雨3d后导致0~30cm深度土壤水分的变异系数达到16.43%,7月26日13mm的降雨经过相同的时间后导致同一深度土壤水分的变异系数达到16.06%;降雨后经过相同的逐渐干旱时间,0~15cm深度土壤水分的变异系数降低到更小值,5月16日降雨后,0~15cm深度土壤水分的变异系数增加到20.26%,0~30cm深度增加到16.43%,经过一段干旱时期后,到7月15日0~15cm深度土壤水分的变异系数降低到4%,0~30cm深度土壤水分的变异系数为4.35%;但是由于降雨对下层土壤水分的补充较少并且下层土壤具有活跃根系层,0~30cm深度土壤水分含量总是低于0~15cm深度。

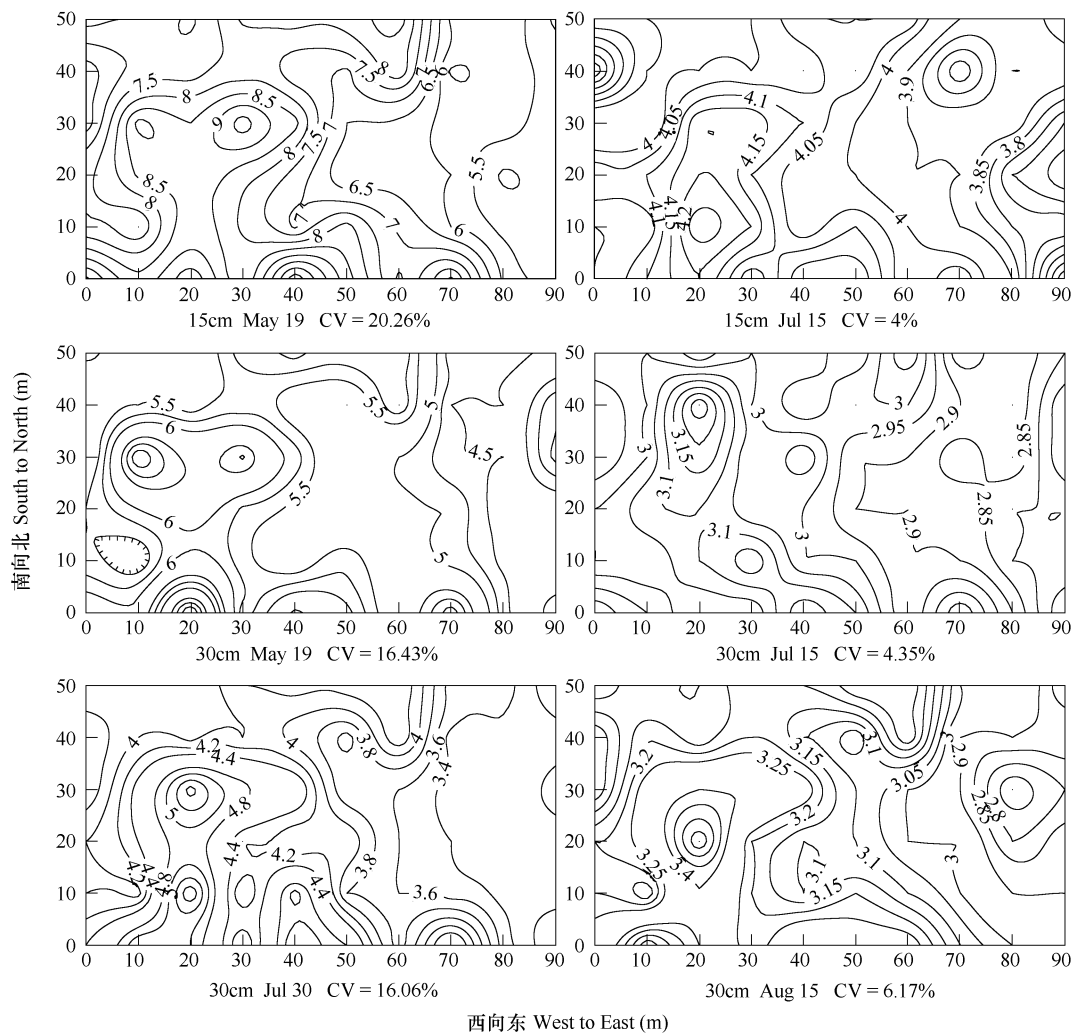


图4 降雨前后浅层土壤水分的空间变异性特征

Fig. 4 Kriging maps of spatial pattern of soil moisture contents after storm events

土壤水分的空间变异性特征也暗示了环境因子的影响,干旱时,0~15cm 和 0~30cm 深度土壤水分在丘间低地具有最大含量和最高的空间变异性,降雨后,0~15cm 土层的结果发生改变,丘间低地由于平坦的地势具有最低的空间变异性,此时地形影响表层土壤水分的空间分布,但在 0~30cm 土层,降雨前后结果不变,丘间低地均保持最高的空间变异性。

Reynolds^[6]指出较大的降雨或者使得土壤饱和,土壤水分的空间变异性最低,或者由于土壤孔径的影响使其空间变异性最大。基于本文的试验分析,该区浅层土壤水分对降雨的响应支持后一种假设。

2.4 土壤水分变异的影响因子分析

2.4.1 相对海拔及坡向的影响

相对海拔与影响土壤水分分布的各种土壤和地形属性有关。以前的一些研究^[7,8]发现土壤水分含量和相对海拔之间具有负的相关关系。坡向影响太阳辐射因而影响蒸散和表层土壤水分含量。Reid^[9]发现在坡向和土壤水分含量之间具有明显的相关关系,这种相关性随着深度的增加而减小,并随着季节变化。

图 5 给出了土壤水分含量和相对海拔之间的相关系数随时间的变化特征,在 0~15cm 和 0~30cm 深度都具有负的相关关系($P < 0.01$),除 9 月 30 日和 10 月 15 日的观测外,0~30cm 深度土壤水分含量与相对海拔的相关性更高,因为越接近土壤表层,诸如风力和太阳辐射等因子降低了土壤水分的海拔依赖性,9 月 30 日和 10 月 15 日观测前有少量降雨发生(9 月 20 日降雨 6mm,10 月 12、13 日降雨 5mm),其仅仅补充了土壤表层水分含量,相对海拔在表层土壤水分的分布中起了重要作用,导致 0~15cm 深度土壤水分含量的海拔依赖性增加。由于降雨后地形是土壤水分分布的主要影响因子(其他的影响因子,像植被、粒径等分布相对比较均匀),由图 5 也可以看出降雨增加了土壤水分含量和相对海拔之间的相关性;同时相关系数具有明显的季节倾向,相关性在春、秋季高,夏季低,夏季其他的气象因子干扰了相对海拔的影响,秋季小的降雨仅仅增加了 0~15cm 深度土壤水分含量和相对海拔的相关性,使得此时 0~15cm 比 0~30cm 深度土壤水分含量与相对海拔的相关性更高。

在表层下 15cm 和 30cm 深度,不同坡向土壤水分含量值均表现出丘间低地 > 背风坡 > 迎风坡的变化趋势(图 6)。

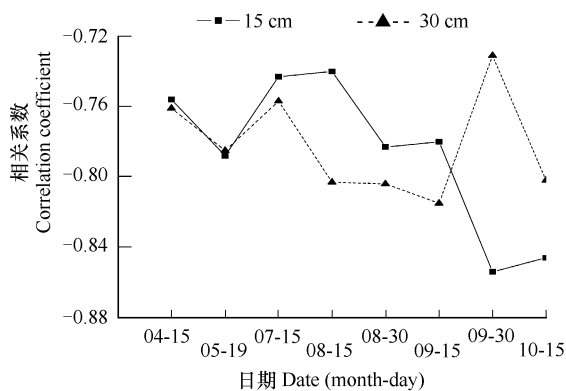


图 5 土壤水分含量与相对海拔之间相关系数的时间序列特征

Fig. 5 Correlation coefficient between relative elevation and soil moisture contents versus date

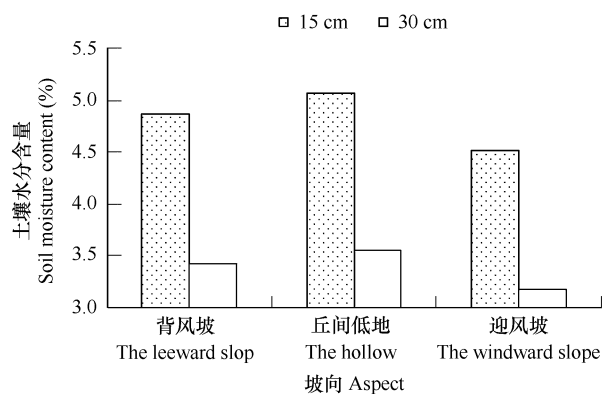


图 6 不同坡向土壤水分状况

Fig. 6 The soil moisture content in different aspects

虽然相对海拔显著地影响土壤水分的空间变异性,但它可能仅仅反映了土壤质地影响地表水分运移,从而影响土壤水分变异性的程度,为了更好地理解土壤质地对土壤水分空间变异的影响,下面分析了土壤粒径分布和土壤水分之间相关性随时间的变化特征。

2.4.2 土壤质地的影响

土壤质地的变化改变了土壤的水文属性,影响了土壤水分的分布特征。Reynolds^[10]和 Henninge^[11]等的

研究发现土壤水分的变异性与土壤质地有关。

试验地土壤粒径的空间分布特征显示丘间低地聚集了更多的粘粒、粉粒和更少的沙粒,由于风力沉积的作用,迎风坡具有最大的沙粒含量。样地沙粒含量占接近 80%,粘粒和粉粒含量仅仅占 20% 左右,沙粒的空间变异性(CV = 10.3%)比粘粒(27.9%)和粉粒(29.3%)低,粉粒和粘粒含量具有明显的从东南向西北增加的趋势,沙粒含量表现出相反的空间分布特征,从东南向西北减少。土壤质地的空间异质性能产生水文导度的空间变异,从而导致土壤水分分布的空间异质性。

通过粒径分析对土壤质地和土壤水分之间的相关性进行了研究(图 7),沙粒-土壤水分相关系数的时间序列与相对海拔-土壤水分相关系数的时间序列特征相反,但两者都与土壤水分呈负相关关系。土壤水分与粘、粉粒含量呈正相关关系且其相关系数与沙粒含量具有一致的时间序列特征,与相对海拔具有相反的时间序列特征。土壤粒径分布与土壤水分之间的相关性在干旱时期后到达最大值,无论在 0 ~ 15cm 还是 0 ~ 30cm 深度,相关性在经历了一个从 5 月 17 日到 7 月 14 日的相对干旱期后在 7 月 15 日达到最大值。图 7 也表明土壤粒径分布和土壤水分之间的相关性在 0 ~ 15cm 比 0 ~ 30cm 深度更高,与相对海拔相反。

2.4.3 植被的影响

植被通过冠层径流特征影响土壤水分变化;通过遮盖土壤表面影响蒸发率;通过产生湍流提高蒸散率;通过根活性影响土壤水导度并促进土壤表面有机物质的增加而影响土壤水分变化^[5]。这些因素对于土壤水分变化率的影响随着植被种类、密度和季节的变化而变化。Lull^[12]的研究发现当土地被完全覆盖时,其土壤水分的变异性最低,被零星覆盖时变异性最高。经调查试验地内灌木的总盖度为 8.61%,平均株高为 74.7cm,灌木种类以油蒿为主,其次为花棒、柠条和怪柳;草本总盖度接近 30%,以小画眉草为主,其次为狗尾草和雾冰藜(表 1)。

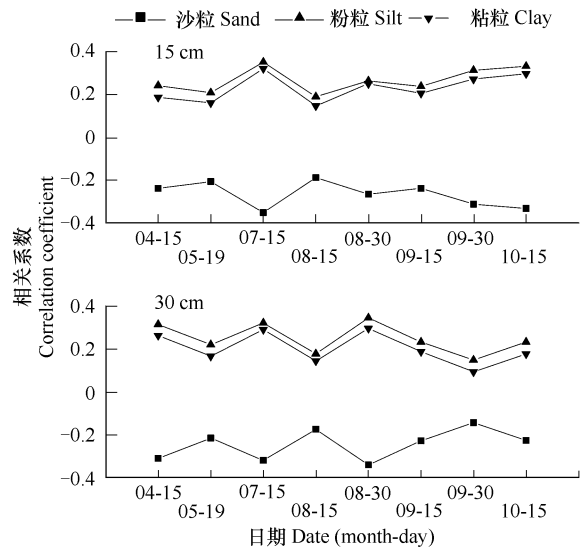


图 7 土壤水分与粒径分布之间相关系数的时间序列特征
Fig.7 Correlation coefficient between soil moisture contents and soil size particle

表 1 试验地植被种类

Table 1 The vegetation species in experiment field

植物种类 Plant Species (Family)	物种数 Plant number	总盖度 (%) Total cover ± S. E.
灌木 Shrub		
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i> Krasch (Compositae)	553	8.61 ± 4.54
花棒 <i>Hedysarum scoparium</i> Fisch. & Mey. (Leguminosae)	73	
柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i> Kom (Leguminosae)	39	
多枝怪柳 <i>Tamarix ramosissima</i> Ledeb (Tamaricaceae)	11	
头状沙拐枣 <i>Calligonum caput-medusae</i> Schrenk (Polygonaceae)	1	
草本 Herb		
小画眉草 <i>Eragrostis poaeoides</i> Beauv. (Gramineae)	3344	27.5
雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i> (Fisch. & Mey) O. Kuntze (Chenopodiaceae)	143	
绵蓬 <i>Corispermum patelliforme</i> Iljin (Chenopodiaceae)	45	
虎尾草 <i>Chloris virgata</i> Swartz. (Gramineae)	38	
狗尾草 <i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv. (Gramineae)	151	

草本覆盖度与土壤水分之间的相关性比灌木高(图 8),一方面由于试验地内灌木分布相对均匀,另一方面,灌木根系的分布大部分位于 30cm 以下。但是灌木的存在改变了灌丛下的有机质含量和土壤粒径分布,从而影响了水文导度,因此浅层土壤水分和灌木盖度之间依然存在相关性。由于草本植物的出现,土壤水分和草本盖度之间的相关性在 8 月份之后增加,在此之前灌木植被的影响更大,草本植物与上层土壤水分之间的相关性与相对海拔展示了相同的时间序列特征,降雨增加了土壤水分含量和草本盖度之间的相关性。

2.3.4 预测土壤水分含量

应用回归分析建立土壤水分含量、相对海拔、坡位、土壤质地和植被盖度之间的相关性模型(表 2),结果表明,在干旱条件下,相对海拔与 0~15cm 和 0~30cm 深度的土壤水分含量具有明显的负相关关系,是土壤水分含量的决定因子;在湿润条件下,土壤水分含量与相对海拔和草本盖度具有显著相关性,其大小由两者共同决定。

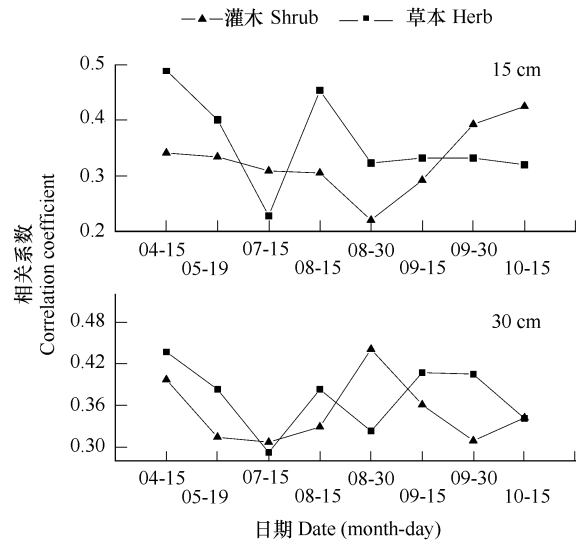


图 8 土壤水分和植被盖度之间相关系数的时间序列特征
Fig. 8 Correlation coefficient between soil moisture contents and vegetation cover

表 2 不同水分条件下土壤水分与各环境因子的回归分析

Table 2 Regression analysis of soil moisture contents in wet and dry conditions, respectively

深度 Depth (cm)	日期 Date	回归等式 Equations	决定系数 R^2	显著性水平 Level of significant
0~15	5~19	$M = -0.477H + 0.018HC + 620.3$	0.692	$P < 0.05$
	7~15	$M = -0.053H + 72.48$	0.551	$P < 0.05$
0~30	5~19	$M = -0.288H + 0.01HC + 375.5$	0.677	$P < 0.05$
	7~15	$M = -0.044H + 59.39$	0.574	$P < 0.05$

M 是土壤水分含量, H 是相对海拔, HC 是草本盖度 M is soil moisture content, H is relative elevation and HC is herb cover

3 结论

沙坡头人工固沙植被区浅层土壤水分的分布具有明显的空间和时间(季节相)变异性;变异性分析表明强降雨和高土壤水分含量值对应高空间变异性,并且其相关性在 0~15 cm 深度比 0~30 cm 深度更高。

不同地形位置 0~15 cm 深度土壤水分的空间变异性随着干旱与湿润期而发生改变,在长期无雨的干旱时期,丘间低地具有最高的空间变异性;而在降雨后的相对湿润期,丘间低地具有最小的空间变异性。而在同一位置的 0~30 cm 深度土壤水分空间变异性保持不变。

相对海拔是驱动该区域浅层土壤水分空间变异的一个主要影响因子,其作用在降雨后更明显且对 0~30 cm 深度比 0~15 cm 深度的影响更大。土壤粒径分布和土壤水分之间的相关性与相对海拔具有相反的时间序列特征,且其在 0~15 cm 深度的相关性比 0~30 cm 深度更高。草本盖度与表层土壤水分之间的相关性比灌木高且与相对海拔具有一致的时间序列特征,降雨增加了植被对土壤水分变异的影响程度。

References:

[1] Nash M S, Wierenga P J, Gutjahr A. Time series analysis of soil moisture and rainfall along a line transect in arid rangeland. Soil Science, 1991, 152: 189-198.
[2] Shapotou Desert Experimental Research Station, Chinese Academy of Sciences. Study on shifting sand control in Shapotou region of the Tengger

- Desert (2). Yingchuan: Ningxia People's Publishing House, 1991. 101 — 119.
- [3] Wang X P, Li X R, Xiao H L, *et al.* Evolution characteristics of the artificially re-vegetated shrub ecosystem of arid and semi-arid sand dune area. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1974 — 1980.
- [4] Charpentier M A, Groffman P M. Soil moisture variability within remote sensing pixels. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 18987 — 18995.
- [5] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 1998, 210: 259 — 281.
- [6] Reynolds S G. The gravimetric method of soil moisture determination III: An examination of factors influencing soil moisture variability. *Journal of Hydrology*, 1970, 11: 288 — 300.
- [7] Nyberg L. Spatial variability of water content in the covered catchment at Gardsjon, Sweden. *Hydrological Processes*, 1996, 10: 89 — 103.
- [8] Krumbach A W. Effects of microrelief on distribution of soil moisture and bulk density. *Journal of Geophysical Research*, 1959, 64: 1587 — 1590.
- [9] Reid I. The influence of slope orientation upon the soil moisture regime and its hydrogeomorphological significance. *Journal of Hydrology*, 1973, 19: 309 — 321.
- [10] Reynolds S G. The gravimetric method of soil moisture determination I: A study of equipment and methodological problems. *Journal of Hydrology*, 1970, 11: 258 — 273.
- [11] Henninger D L, Peterson G W, Engman E T. Surface soil moisture within a watershed: variation, factors influencing, and relationships to surface runoff. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40: 773 — 776.
- [12] Lull H W, Reinhart K G. Soil moisture measurement. U. S. D. A. Southern For. Exp. Sta., New Orleans, LA., Occas, 1955. 140.

参考文献:

- [2] 中国科学院沙坡头沙漠试验研究站著. 腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究. 银川:宁夏人民出版社,1991. 101 ~ 119.
- [3] 王新平,李新荣,肖洪浪,等. 干旱半干旱地区人工固沙灌木林生态系统演变特征. *生态学报*,2005,25 (8):1974 ~ 1980.