

宁南山区不同植被退耕林地及其坡位的土壤 水分时空分布特征 ——以骆驼林流域为例

陶吉杨^{1,2,3}, 谭军利^{1,2,3}, 魏童¹, 郑飞龙¹, 张维江^{1,2,3}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏银川 750021; 3. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 宁夏银川 750021)

摘要: 为研究宁南山区退耕还林区不同坡位土壤水分时空分布规律, 利用定点取样和室内实验相结合的方法, 研究了天然沙棘和人工油松两个典型坡面的上、中、下3个坡位0~100 cm土层土壤含水率的动态变化, 分析其沿深度方向变化和季节动态情况。结果表明: 天然沙棘和人工油松土壤含水率最高的坡位与土壤容重最小、孔隙度最大的坡位一致, 分别为中坡位和下坡位; 坡位对天然沙棘土壤含水率的影响层在20 cm以下, 对人工油松的影响层在40 cm以下; 土壤含水率随降雨量增加而增大, 天然沙棘土壤含水率对于降雨量的响应较人工油松更敏感; 相同降雨条件下天然沙棘土壤含水率增幅大于人工油松; 在不同坡位土壤水分的时空分布上, 沿深度方向天然沙棘各坡位土壤含水率在20 cm以下土层出现差异, 人工油松在40 cm以下土层出现差异, 当月降雨超过200 mm时, 天然沙棘各坡位间土壤含水率的差异性减小, 人工油松各坡位的差异性增大, 这说明植被类型对土壤含水率的分布具有重要影响。

关键词: 土壤含水率; 时空分布; 退耕林地; 坡位; 植被类型; 宁南山区

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0216-07

Spatial and temporal distribution characteristics of soil water in different reforestation lands of slope positions in hilly area of Southern Ningxia:

A case study of Luotuolin Watershed

TAO Jiyang¹, TAN Junli^{1,2,3}, WEI Tong¹, ZHENG Feilong¹, ZHANG Weijiang^{1,2,3}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 3. Engineering Technology Research Center of Water-saving Irrigation and Water Resource Regulation in Ningxia, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to investigate the spatial-temporal distribution of soil water in the reforestation hilly area of different slope positions in Southern Ningxia, the seasonal dynamics and vertical changes of soil water content in 0–100 cm soil layer at upper, middle, and lower slope positions of two typical slopes with natural forest of sea-buckthorn and artificial forest of *pinus tabulaeformis* were studied by in-situ field sampling and laboratory experiments. The results showed that the slope position with the highest soil water content was consistent with the slope position with the most favorable soil bulk density and pore conditions, which happened at the middle slope position of sea-buckthorn forest and the lower of *pinus tabulaeformis* forest. The slope position influenced the soil water content of natural sea-buckthorn forest below 20 cm soil depth, and below 40 cm to *pinus tabulaeformis*. Soil water content increased with the increase of rainfall, and the effect of rainfall on the soil water of natural forest was greater than that of arti-

收稿日期: 2020-05-31; 修回日期: 2020-07-30

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发项目(2018BEG02010); 国家自然科学基金项目(51309135, 31860590); 宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)项目(NXYLXK2017A03)

作者简介: 陶吉杨(1996-), 女, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源与生态环境研究。

通讯作者: 谭军利(1978-), 男, 湖南茶陵人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事农业水资源高效利用研究。

cial forest. Under the same rainfall condition, soil water content of natural sea-buckthorn forest increased more than that of artificial *pinus tabulaeformis* forest. The significant difference of soil water between slope positions occurred under 20 cm soil depth for natural sea-buckthorn forest, and under 40 cm soil depth for artificial *pinus tabulaeformis* forest. When the monthly rainfall exceeded 200 mm, the difference of soil moisture among slope positions reduced for natural sea-buckthorn forest but increased for artificial *pinus tabulaeformis* forest, which indicated that vegetation type had an important influence on the distribution of soil moisture content.

Key words: soil water content; spatial and temporal distribution; reforestation land; slope position; vegetation type; hilly area of Southern Ningxia

1 研究背景

土壤水分是陆地生态系统多种生态过程的重要纽带^[1],一方面土壤水既是区域水资源的重要组成部分,也是水资源各组分相互转化的重要媒介;另一方面植物的生长发育离不开土壤水,天然降水和灌溉水均需要转化为土壤水才能被植物所吸收^[2]。为了充分了解土壤水分动态变化情况,提高水资源利用效率,国内外学者从不同角度切入进行了大量研究^[3-4]。Penna等^[5]通过对阿尔卑斯坡地3个不同深度的土壤水分研究发现随土层加深土壤水分偏态值减小。王月玲等^[6]发现土壤的垂直分布受土壤入渗性能的影响,在不同土地利用方式下存在较大差异。李婧^[7]等发现退耕条件下人工植被干预初期对土壤水分有较好的改良效果,但随年限增加,自然恢复的优势逐渐显现出来。研究表明,土壤水分的变化是降水、土壤蒸发、土地利用方式、植被等多种因素共同作用的结果^[8-9]。

宁夏六盘山骆驼林位于黄土高原地区,自2000年国家推行退耕还林还草政策以来,通过大量营造水源涵养林,有效减少了降水对地表的侵蚀,改善了地区生态环境^[10]。但由于地处干旱地带,水分蒸散量大,地下水埋藏较深,生态需水亏缺问题日益显著^[11],土壤水分成为限制当地植被重建和恢复的重要因素之一^[12]。在沟壑纵横、支离破碎的黄土高原地区,由于不同坡位地理因素的影响,土壤含水率普遍存在一定的时空分布差异^[13-14]。同一坡位的人工植被与天然植被土壤水分分布也不尽相同^[15],可见坡位是影响黄土高原土壤水分特征的重要因子之一。目前将坡位列为影响因子的研究考虑因素比较单一,因此本文综合坡位、植被、降雨等多种因素探究土壤水分的时空分布特征,依据土壤水分动态变化规律优化植树造林的种类及模式,为该区域生态恢复提供理论依据。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区域概况

试验区骆驼林流域位于距泾源县城北28 km处的六盘山石林区,东经106°14′24.4″,北纬35°36′31.0″,海拔高度2 186~2 835 m,流域面积2.3 km²。夏季短暂温湿多雨,冬季漫长寒冷干燥,是典型的大陆性季风气候。在常年流水侵蚀作用下形成山间溪流,两岸岩石裸露多平滩,山顶地势平坦,山坡陡峻多阶状。土壤风化程度不一,腐殖质较多,主要为黑垆土。土地利用类型以苜蓿草地、天然沙棘、华北落叶松和人工油松为主。

2.2 试验方法

2.2.1 土样采集 在试验区选择两个坡度及朝向均一致的天然沙棘和人工油松坡面,在两坡面的上、中、下3个坡位分别设置3个10 m×10 m的样地。于2018年5、7、8、9、10月(6月因降雨量大无法上山取样)在每个样地中按照5点取样法用土钻分别取0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm土层土样,每个测点设2~3个重复,采用烘干法测定土壤含水率。同时每10 cm用环刀采集0~40 cm土层土样测定土壤容重和孔隙度。孔隙度各项指标计算公式为:

$$Q = \frac{M_1 - M_2}{V} \times 100\% \quad (1)$$

$$P = \frac{M_2 - M_3}{V} \times 100\% \quad (2)$$

$$T = Q + P \quad (3)$$

式中: Q 为非毛管孔隙度,%; M_1 为环刀样品在泡水12 h后的质量,g; M_2 为环刀样品在泡水后放置在干沙上12 h的质量,g; M_3 为烘干5 h(120℃)后环刀和干土质量,g; V 为环刀体积,取100 cm³; P 为毛管孔隙度,%; T 为土壤总孔隙度,%。

2.2.2 降雨收集 采用自记式雨量计(JL-21-A3)测量研究区域2018年5-10月降雨量,其中5、7月降

雨量较小,两月中仅有1 d降雨量达到中雨标准(日降雨量10~25 mm),降雨量之和仅占总降雨量的23.5%;8月的降雨总量为260 mm,其中日降雨量超过10 mm的次数达到月观测降雨数的42.8%;9月的降雨总量为85.8 mm,日降雨量超过10 mm的次数为月观测降雨数的15%;10月观测降雨量为14.2 mm。2018年5~10月研究区域日降雨量分布见图1。

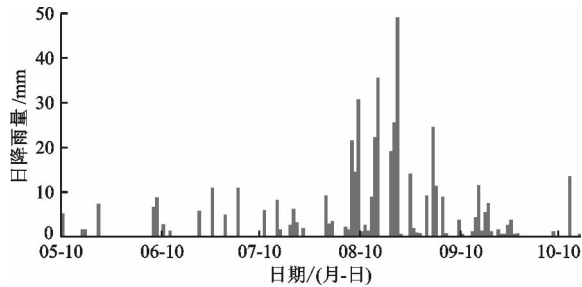


图1 2018年5~10月研究区域日降雨量分布

2.2.3 数据处理及分析方法 观测数据用Excel2010和SPSS22.0软件统计完成。不同坡位土壤含水率时空变化采用单因素方差和多重比较(Duncan)法($P < 0.05$)进行分析,不同植被土壤含水率用独立样本T检验进行比较分析。

3 结果与分析

3.1 不同坡位土壤容重及孔隙度特征

土壤容重及孔隙度反映了土壤密实情况,容重越低、孔隙度越大表明土壤越疏松,水土保持能力越好^[16]。表1为天然沙棘和人工油松坡面不同坡位0~40 cm土层土壤容重及孔隙度。由表1可见,天然沙棘土壤容重变化范围为1.01~1.43 g/cm³,人工油松为1.26~1.51 g/cm³,两种植被除下坡位外,其他两坡位同一土层土壤容重均为天然沙棘<人工油松。天然沙棘0~40 cm土层土壤容重均值下坡>上坡>中坡,分别为1.33、1.23、1.14 g/cm³,人工油松土壤容重均值中坡>上坡>下坡,分别为1.42、1.41、1.32 g/cm³。由于土壤细颗粒受雨水淋洗沿坡面下降,使得两种植被下坡位土壤容重最大值均出现在0~10 cm土层。土壤总孔隙度与土壤容重呈相反的规律。由表1还可以看出,除下坡位外天然沙棘其他两坡位0~40 cm土层土壤总孔隙度均值均超出人工油松14%以上。两种植被各坡位的非毛管孔隙度均小于毛管孔隙度,非毛管孔隙度占总孔隙度的比例集中在7%~20%之间,其中天然沙棘0~40 cm土层非毛管孔隙度均值以中坡位最高,为16.85%,超出人工油松非毛管孔隙度均值最大的下坡位18%以上。

表1 两种植被样地不同坡位0~40 cm土层土壤容重及孔隙度

林地类型	坡位	土层深度/cm	土壤容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%		
				总孔隙	毛管	非毛管
天然沙棘	上坡	0~10	1.19	55.11	46.45	8.66
		10~20	1.17	55.87	36.80	19.07
		20~30	1.33	49.95	41.28	8.67
		30~40	1.23	53.50	39.15	14.36
	中坡	0~10	1.01	61.86	37.17	24.69
		10~20	1.24	53.07	42.20	10.87
		20~30	1.20	54.83	40.73	14.10
		30~40	1.12	57.73	39.99	17.74
	下坡	0~10	1.43	45.99	40.16	5.83
		10~20	1.17	55.84	34.55	21.29
		20~30	1.36	48.81	39.39	9.42
		30~40	1.36	48.57	39.68	8.89
人工油松	上坡	0~10	1.34	49.40	36.60	12.80
		10~20	1.44	45.48	38.08	7.40
		20~30	1.51	43.05	39.52	3.53
		30~40	1.34	49.48	33.59	15.89
	中坡	0~10	1.44	45.72	36.68	9.05
		10~20	1.42	46.50	36.78	9.72
		20~30	1.42	46.39	36.62	9.76
		30~40	1.40	47.07	35.98	11.09
下坡	0~10	1.41	46.76	38.58	8.17	
	10~20	1.35	49.12	35.02	14.10	
	20~30	1.27	51.94	35.77	16.16	
	30~40	1.26	52.59	34.13	18.46	

3.2 不同坡位土壤含水率垂直变化特征

图2为研究期内两种植被样地不同坡位0~100 cm各土层的土壤含水率均值。由图2可知,天然沙棘3个坡位土壤含水率的最大值均出现在0~10 cm土层,同一坡位10 cm以下土层土壤含水率变化范围均维持在1%以内。人工油松土壤含水率最大值出现在下坡位40~60 cm土层,为28.86%,各坡位土壤含水率随土层加深无明显变化趋势。两种植被土壤含水率最大的坡位与容重、孔隙度条件最优越的坡位一致,分别是天然沙棘的中坡位(各土层土壤含水率均达到了28%)和人工油松的下坡位(各土层土壤含水率均达到了22%)。天然沙棘各土层土壤含水率中坡>上坡>下坡,除0~20 cm土层的土壤含水率在上、中、下坡位间无显著差异外,20 cm以下土层中坡位与下坡位均存在显著差

异。人工油松各坡位土壤含水率在0~40 cm土层无显著差异,40 cm以下土层下坡位与上、中坡位均存在显著差异。

表2为两种植被样地不同坡位0~100 cm土层在研究期内各月土壤含水率垂直变异系数。由表2可知,天然沙棘土壤含水率变异系数较大值集中在8~10月的上坡位,5、7月由于降雨量较小,土壤含水率变异性中坡>下坡>上坡,当8月降雨量增大为7月降雨量的4倍时,上坡位土壤含水率变异系数增大为原来的2.28倍,其他坡位变异系数不增反减,可见降雨量增大加剧了天然沙棘上坡位土壤水分垂直分布的不均匀性。人工油松土壤含水率变异系数超过10%的集中在下坡位,除9月外,其他月份变异系数均达到13%以上;上、中两坡位土壤含水率变异系数最大值均出现在9月,虽然8月降雨量最大,但变异系数没有出现随降雨量增大而增大的明显趋势,说明土壤含水率不仅与降雨有关,还与前期降雨量有关。

对于天然沙棘而言,强降雨条件下短时间内大量水分迅速打击在上坡,使得表层土壤含水率激增,随土层加深土壤孔隙减少,水分的深层渗漏较慢,导致层间土壤含水率变异系数较大;人工油松上坡位地势相对平缓,有利于土壤水分在各层平稳入渗使得土壤含水率变异系数较小,而下坡位40 cm以下土层受植物根系作用且蒸散量较小,土壤含水率显著大于40 cm以上土层,导致沿深度方向土壤含水率变异系数较大。

3.3 不同坡位土壤含水率季节变化特征

土壤水分的变化主要受降水和蒸散发过程影响^[17],图3为两种植被样地不同坡位0~100 cm土层在研究期内各月土壤含水率均值。由图3可以看出,天然沙棘土壤含水率中坡>上坡>下坡,5、7月由于降水较少,受光照与温度影响,上坡位土壤水分蒸发较快,下坡位土壤含水率增幅为上坡位的3倍,使得上、下两坡位土壤含水率的差异减小;8月降雨量增加后上、中、下3个坡位土壤含水率分别增加了29%、14%、16%,降雨量的增加可以减小上坡位与中坡位土壤含水率的差异。人工油松土壤含水率变化范围在21.06%~27.08%,除8月外,其他月份降雨条件下各坡位土壤含水率均无显著差异,在本次试验中月降雨量达到200 mm时人工油松各坡位间土壤水分才会产生差异。

表3为两种植被样地不同坡位0~100 cm土层在研究期内各土层土壤含水率变异系数。由表3可

知,天然沙棘在0~40 cm土层土壤含水率变异系数均值以上坡最大,为17.82%,在40 cm以下土层以下坡最大,为17%,人工油松在0~100 cm土层土壤含水率变异系数均以下坡最大。两种植被中坡位的变异系数均较其他两个坡位小,这与中坡植被稀疏,各土层土质受植被影响小且比较均一有关^[18]。上坡位与中坡位的变异系数均随土层加深而减小^[19],下坡变异系数则呈现以40~60 cm土层为分界线先减小后增大的趋势。这是由于植物根系在土壤深层分布密集,耗水作用区位于40 cm以下土层,从而影响了水分的分布。天然沙棘10%以上的变异系数明显多于人工油松,产生这样的结果与植被改变了降雨入渗情况和坡面径流过程密不可分^[20]。

表2 两种植被样地不同坡位0~100 cm土层在研究期内各月土壤含水率垂直变异系数 %

植被类型	坡位	月 份				
		5	7	8	9	10
天然沙棘	上坡	2.86	3.6	8.23	10.71	7.51
	中坡	6.41	7.27	5.54	6.84	6.58
	下坡	3.36	5.63	4.45	7.54	3.74
人工油松	上坡	3.09	4.58	6.37	7.84	4.01
	中坡	3.53	4.89	6.29	7.83	3.72
	下坡	13.49	18.66	13.44	9.05	17.09

表3 两种植被样地不同坡位0~100 cm土层在研究期内各土层土壤含水率变异系数 %

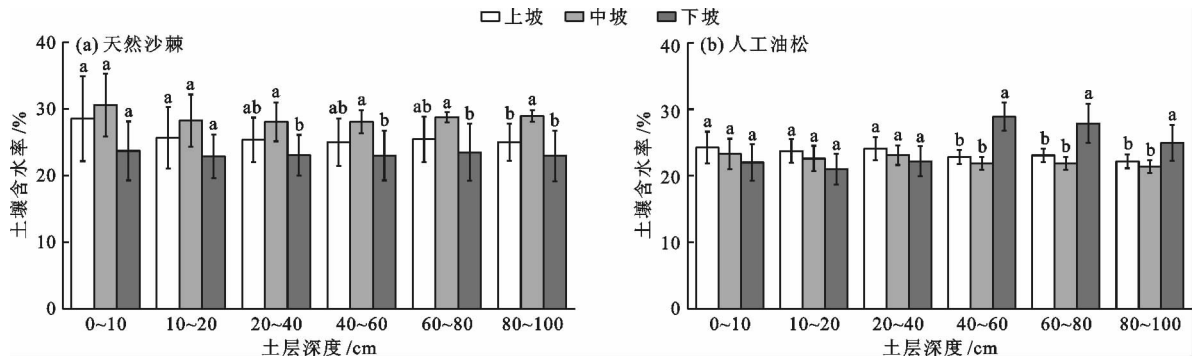
植被类型	坡位	土层深度/cm					
		0~10	10~20	20~40	40~60	60~80	80~100
天然沙棘	上坡	22.28	17.94	13.24	14.35	13.43	11.15
	中坡	15.5	13.83	10.36	6.05	2.61	3.11
	下坡	18.63	14.23	13.31	16.16	18.25	16.59
人工油松	上坡	9.86	7.59	7.36	4.69	4.29	4.73
	中坡	9.84	8.46	6.41	4.40	4.44	4.63
	下坡	12.55	10.98	10.32	7.42	10.58	10.83

3.4 不同坡位土壤含水率对植被类型的响应

不同植被类型下土壤垂直剖面土壤含水率存在差异,图4为两种植被样地不同坡位0~100 cm土层在研究期内各月土壤含水率垂向分布比较。由图4可知,除5月外,其他月份两种植被中坡位土壤含水率均出现显著差异,且在8月最大降雨前后出现差异的土层较多。除7月外,各个时段内,两种植被上、中两坡位土壤含水率沿土层深度方向有相同的变化趋势,说明土壤水分对这两个坡位的影响有相

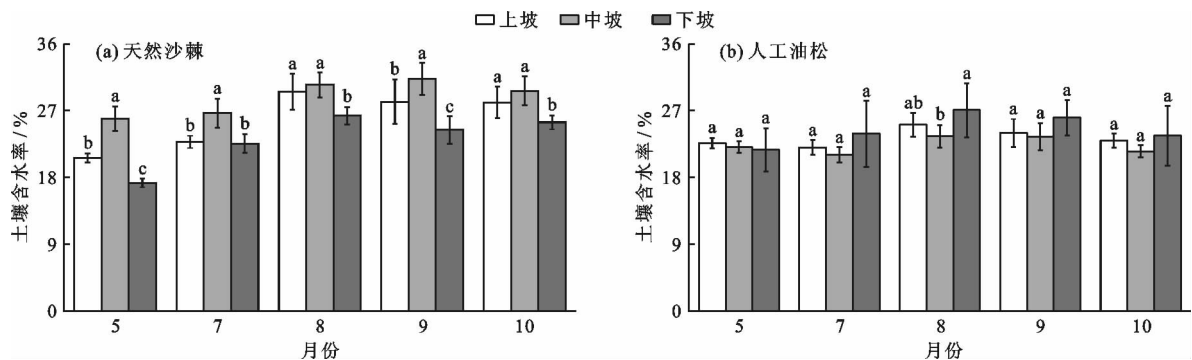
似的响应。天然沙棘各坡位 0~40 cm 和 40~100 cm 土层土壤含水率的差异均比人工油松小,人工油

松下坡位 0~40 cm 和 40~100 cm 土层土壤含水率的差异最明显,在 7 月达到最大,9 月最小。



注:图中不同字母表示同一土层不同坡位土壤含水率差异显著($P < 0.05$)。

图2 研究期内两种植被样地不同坡位 0~100 cm 各土层土壤含水率均值



注:图中不同字母表示同一月份不同坡位土壤含水率差异显著($P < 0.05$)。

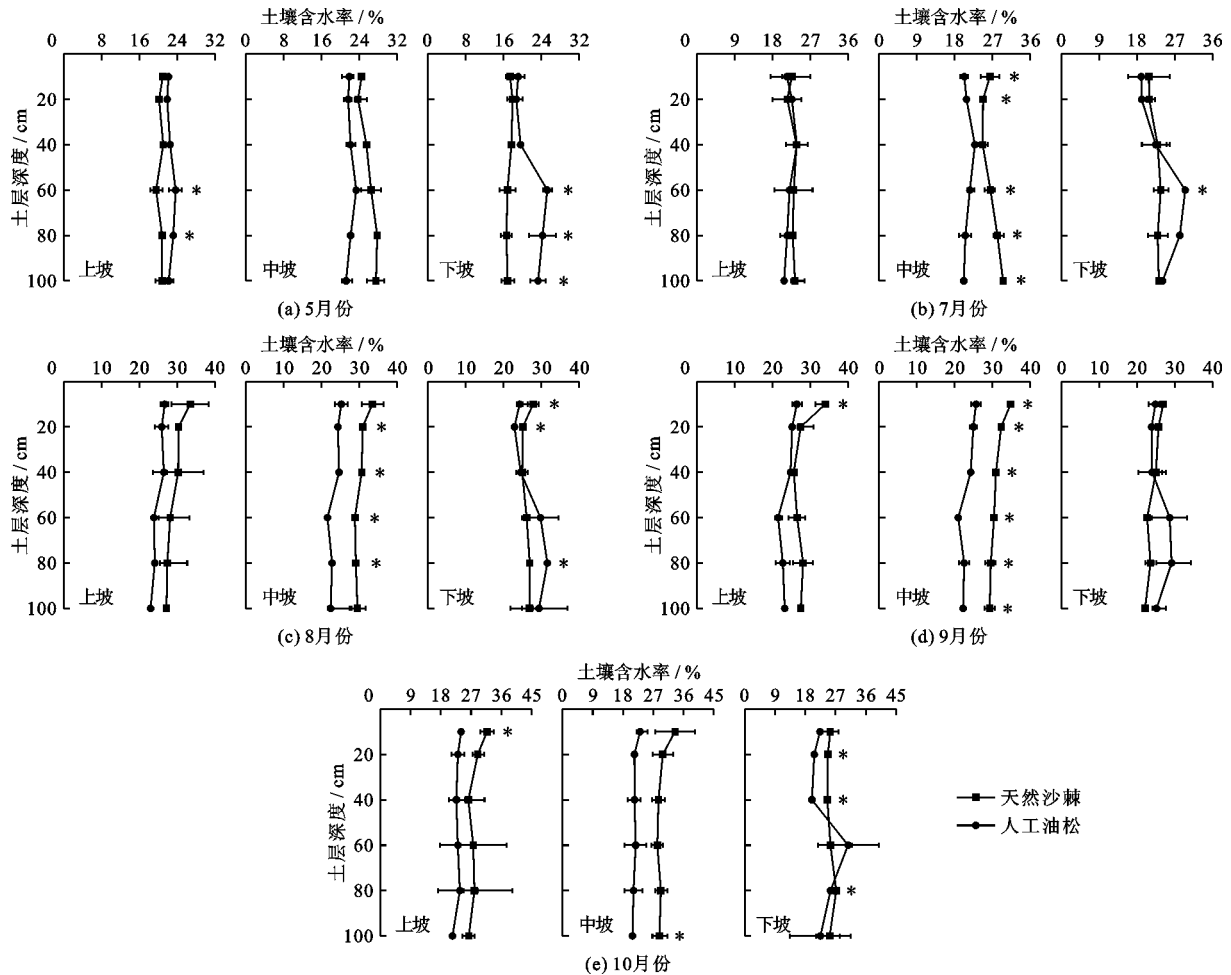
图3 两种植被样地不同坡位 0~100 cm 土层在研究期内各月土壤含水率均值

两种植被 5 月下坡位土壤含水率在 40 cm 以下土层出现显著差异,7~9 月下坡位土壤含水率变化具有相似性,即在 20~40 cm 土层两种植被土壤含水率最接近,天然沙棘土壤含水率随土层加深而减小,人工油松土壤含水率随土层加深先减小后增大再减小。原因是天然沙棘下坡位 20 cm 以下土层土壤孔隙度随土层加深而减小,而人工油松水分利用层较浅,除孔隙度外还受植物根系影响,土壤含水率波动较大。与 5 月相比,两种植被 7~9 月下坡位土壤含水率接近点下移,说明在前期降雨量较小的情况下,降雨量增加会增大两种植被 0~20 cm 土层土壤含水率的差异,减小 20 cm 以下土层土壤含水率的差异。与其他月不同,10 月下坡位土壤含水率出现两个重合点,分别在 40~60 cm 和 60~80 cm 土层。5~10 月间天然沙棘上坡位土壤含水率增长了 7.46%,增幅为人工油松的 24 倍,中坡位土壤含水率增长了 3.74%,人工油松不增反减,下坡位土壤含水率增长了 8.16%,增幅为人工油松的 4.25 倍。

4 讨论

土壤水分的时空分布在不同植被类型、坡位、降雨

等因素作用下有不同的表现。在土壤水分的垂直分布上,天然沙棘和人工油松分别在 20、40 cm 以下土层表现出了坡位间土壤含水率的差异,对于天然沙棘来说,这种差异的产生主要是由于下坡位土壤孔隙度最低,以及其中坡位植被稀疏,而森林郁闭度越小,冠层截留的降雨量越小,穿透雨越大^[21],两种因素综合作用下加大了下坡位与中坡位土壤含水率的差异。而对于人工油松来说,林下枯落物蓄积量大,枯落物持水减小了地表径流,增加了降雨入渗,且下坡位地下水埋深较浅、水分的蒸散发小,使得下坡位土壤含水率显著高于其他两坡位。植被类型除了影响截留雨量外,对土壤水分的深层入渗也有很大的影响。沙棘为乔灌木种,根细且长,对土壤的水分利用主要在地面 2 m 以下;而油松的根系在 0~100 cm 土层分布较广^[22],耗水层较浅,因此在 0~100 cm 土层土壤含水率较低。除此之外,有研究表明土壤水分从下坡到上坡呈逐渐降低的趋势^[23-24],但本次试验中两种植被土壤水分分布均不符合这一规律,这除了与土壤特性有关外,还因为不同坡位植被生长情况以及生物量不同,分别影响了穿透雨量和耗水情况有关。



注: * 表示同一土层两种植被土壤含水率差异显著 ($P < 0.05$)。

图4 两种植被样地不同坡位0~100 cm土层在研究期内各月土壤含水率垂向分布比较

土壤含水率在5-10月有随降雨和前期雨量增大而增大的趋势^[25],这是因为5-7月气温回升快,土壤蒸发潜力大,植物蒸腾作用加强,土壤水分消耗大于补给,为水分消耗阶段;8-10月降雨量显著增多,降雨入渗使得土壤水分得到补充^[26]。天然沙棘坡位间土壤水分的差异性总体上大于人工油松,而当月降雨量超过200 mm时,人工油松坡位间土壤水分才产生差异。这也从侧面说明了人工林会降低土壤水分的异质性,不利于自然差异的产生^[27]。土壤水分变异系数大体上随着土壤深度的加深而减小,这与李小英等^[28]、韩新生等^[29]的研究结果一致,主要是由于0~40 cm的土壤水分受自然环境影响较大,变化极不稳定,而40~100 cm土层植物根系分布广泛,土壤水分为植物生长发育所消耗,受根系影响较大^[30]。研究期内小降雨居多,人工油松同一坡位的变异系数不及天然沙棘变化范围大,而这应该是人工林对降雨时空分布的响应不及天然林导致的。

通过以上分析,坡位间土壤水分的差异是普遍

存在的,且因植被类型、降雨量、土壤特性而异,人工林对水分的消耗不仅会降低土壤水分对降雨的响应,还会减少坡位间的自然差异。研究表明深层土壤水分贮量也受降雨和植被类型的影响^[31],在本次试验中初步探究了不同坡位土壤含水率对降雨和植被类型的响应,还可以在此基础上研究降雨量对不同坡位深层土壤水分的影响,进一步得到降雨条件下土壤水分动态变化的一般规律。

5 结论

(1)天然沙棘与人工油松植被类型分别以中坡位和下坡位土壤容重最小、孔隙度最大,非毛管孔隙度占比最大。

(2)天然沙棘的3个坡位和人工油松上、中两坡位土壤含水率均有随土层加深而减小的变化趋势。天然沙棘各土层土壤含水率中坡 > 上坡 > 下坡,20 cm以下土层土壤含水率在坡位间出现差异,人工油松各坡位土壤含水率大小以40 cm土层为界

呈不同的分布规律,在40 cm以下土层出现差异,土壤含水率受坡位影响的程度因植被而异,天然沙棘在20 cm以下,人工油松林在40 cm以下。

(3)土壤含水率随降雨量增大而增加,天然沙棘土壤含水率对降雨量的响应更敏感。降雨量的增加可以减小天然沙棘上坡位与中坡位土壤含水率的差异,而人工油松只有达到一定降雨量各坡位间土壤含水率才会产生差异。

参考文献:

- [1] 魏书精,罗碧珍,孙龙,等.森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展[J].生态环境学报,2013,22(4):689-704.
- [2] 马骥,张维江.六盘山地区不同林地土壤水分动态变化特征初探[J].宁夏工程技术,2016,15(2):167-170.
- [3] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河.黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J].生态学报,2012,32(16):4961-4968.
- [4] 刘春利,邵明安,张兴昌,等.神木水蚀风蚀交错带退耕坡地土壤含水率空间变异性研究[J].水土保持学报,2005,19(1):132-135.
- [5] PENNA D, BORGA M, NORBIATO D, et al. Hillslope scale soil moisture variability in a steep alpine terrain[J]. Journal of Hydrology, 2009,364(3-4):311-327.
- [6] 王月玲,蒋齐,蔡进军,等.半干旱黄土丘陵区土壤水分入渗速率的空间变异性[J].水土保持通报,2008,28(4):52-55+74.
- [7] 李婧,李占斌,李鹏,等.黄土高原丘陵沟壑区退耕生态系统土壤水分动态变化规律研究[J].水土保持研究,2009,16(5):153-156.
- [8] 蔡进军,张润源,火勇,等.宁南山区梯田土壤水分及养分特征时空变异性研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(5):83-87.
- [9] 贾小旭,邵明安,魏孝荣,等.黄土高原北部草地表层土壤水分状态空间模拟[J].农业工程学报,2010,26(10):38-44.
- [10] 何霄嘉,王国庆,鲍振鑫.气候、植被变化与水文循环响应研究进展及展望[J].水资源与水工程学报,2016,27(2):1-5.
- [11] 郑飞龙,谭军利,王西娜,等.黄土高原水源涵养林截蓄降雨研究进展[J].人民黄河,2020,42(4):89-93.
- [12] LEGATES D R, MAHMOOD R, LEVIA D F, et al. Soil moisture: A central and unifying theme in physical geography[J]. Progress in Physical Geography, 2011,35(1):65-86.
- [13] 张瑞,曹华,王云强,等.黄土丘陵沟壑区小流域土壤水分空间变异性及其影响因素[J].水土保持研究,2012,19(5):52-58.
- [14] 周萍,刘国彬,侯喜禄.黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究[J].水土保持学报,2008,22(1):7-12.
- [15] 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.
- [16] 李红,范素芳,张光灿,等.黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性[J].水土保持通报,2010,30(1):27-30.
- [17] 宁婷,郭忠升.半干旱黄土丘陵区撂荒地土壤水分循环特征[J].生态学报,2015,35(15):5168-5174.
- [18] 马菁,宋维峰,张娟,等.元阳梯田水源区不同坡位土壤水分变化研究[J].亚热带水土保持,2015,27(3):21-28.
- [19] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.
- [20] 吴宏伟.大气-植被-土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,39(1):1-47.
- [21] 巩合德,王开运,杨万勤,等.川西亚高山白桦林穿透雨和茎流特征观测研究[J].生态学杂志,2004,23(4):17-20.
- [22] 常恩浩,李鹏,刘莹,等.黄土丘陵区油松林细根在坡面的空间分布特征[J].水土保持研究,2016,23(5):28-34.
- [23] 黄奕龙,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵小流域地形和土地利用对土壤水分时空格局的影响[J].第四纪研究,2003,23(3):334-342.
- [24] 徐学选,刘文兆,高鹏,等.黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨[J].生态环境学报,2003,12(1):52-55.
- [25] 茹豪,张建军,张琦,等.晋西黄土区雨养果园土壤水分动态及对降雨的响应[J].水土保持学报,2014,28(1):36-42.
- [26] 张北赢,徐学选,白晓华.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分分析[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):96-99.
- [27] 安文明,韩晓阳,李宗善,等.黄土高原不同植被恢复方式对土壤水分坡面变化的影响[J].生态学报,2018,38(13):4852-4860.
- [28] 李小英,段争虎,谭明亮,等.黄土高原西部人工灌木生长季土壤水分变异特征[J].中国沙漠,2013,33(6):1759-1765.
- [29] 韩新生,王彦辉,于澎涛,等.六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分时空变化与影响因素[J].水土保持学报,2019,33(1):111-117.
- [30] 王继夏,孙虎,王祖正.延安碾庄流域梯田与坝地土壤水分对比分析[J].干旱地区农业研究,2007,25(1):88-93.
- [31] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等.黄土高原沟壑区不同植被对土壤水分分布特征影响[J].水土保持研究,2018,25(4):60-64.