

晋西黄土区不同立地刺槐林土壤水分动态特征

孔凌霄¹, 毕华兴^{1,2,3,4}, 周巧稚¹, 魏曦¹, 侯贵荣¹, 常译方¹, 王杰帅¹, 张渲东¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 山西 吉县 042200;
3. 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 102206; 4. 水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学), 北京 100083)

摘要: 选择晋西黄土区蔡家川流域 4 块不同坡向(阴坡、阳坡)、不同密度(1 450, 2 150, 2 525 株/hm²)刺槐样地作为研究对象, 在每块样地的中心位置布设一个观测点, 采用 TRIME-TDR 土壤水分测定仪定位观测 2016 年 1—12 月的土壤体积含水量, 每月上、中、下旬分别对各样地 0—200 cm 土层的土壤水分进行分层观测(每个测层 20 cm), 研究 4 块刺槐样地的土壤水分季节变化规律、垂直剖面变化规律以及坡向和密度对土壤水分的影响。结果表明: (1) 研究区土壤水分季节变化分为平稳期、消耗期、波动期和恢复期 4 个时期, 年最大土壤水分与年最大降水量所在月份相同, 降水季节分配对土壤水分有影响。(2) 研究区土壤水分垂直变化土层分为剧烈变化层、弱变化层和相对稳定层 3 个土层, 土壤水分随土层深度表现为先增加后减少最后趋于稳定的趋势。(3) 坡向和密度对研究区刺槐林的土壤水分具有显著性影响, 阴坡的土壤水分显著高于阳坡($P < 0.01$), 低密度的土壤水分显著高于高密度($P < 0.01$)。

关键词: 晋西黄土区; 土壤水分; 动态变化; 刺槐人工林

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0163-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.027

Dynamics of Soil Moisture in Different Stand Sites of *Robinia Pseudoacacia* Forestlands in Loess Region of Western Shanxi Province

KONG Lingxiao¹, BI Huaxing^{1,2,3,4}, ZHOU Qiaozhi¹, WEI Xi¹,

HOU Guirong¹, CHANG Yifang¹, WANG Jieshuai¹, ZHANG Xuandong¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Jixian, Shanxi 042200; 3. Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit trees, Beijing 102206; 4. Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing 100083)

Abstract: In this paper, four sampling plots with different slope directions and different densities were selected as the research object in the Caijiachuan watershed of the loess area in western Shanxi Province. An observation point was placed at the center of each plot, and the soil volumetric water content from January 2016 to December 2016 were determined by the TRIME-TDR soil moisture analyzer. The soil moisture in each 0—200 cm soil layer was determined stratified with every 20 cm respectively in the early, middle and late of each month. Four sampling plots were studied about the seasonal variation of soil moisture, the vertical variation in soil profiles, and the effects of slope directions and densities on soil moisture. The results showed that: (1) Seasonal changes of soil moisture could be divided into four periods including stationary period, consumption period, fluctuation period and recovery period, the annual maximum soil moisture was in the same month of the maximum rainfall in the year, and the seasonal distribution of precipitation had effect on soil moisture. (2) Soil layers could be divided vertically into three layers, including severe-changing layer, weak-changing layer and relatively stable layer. With the increasing soil depth, soil moisture increased first, decreased next, and then leveled off. (3) The slope directions and densities had significant effects on soil moisture. Soil moisture on shady slopes was significantly higher than that on sunny slopes ($P < 0.01$). Low-den-

收稿日期: 2018-04-30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501704); 科技创新服务能力建设—科研基地建设—林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011 协同创新中心)(市级)(PXM2018_014207_000024)

第一作者: 孔凌霄(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事林业生态工程研究。E-mail: konglx958@163.com

通信作者: 毕华兴(1969—), 男, 教授, 博导, 主要从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail: bixh@bjfu.edu.cn

sity soil moisture was significantly higher than the high-density ($P<0.01$).

Keywords: Loess Region of Western Shanxi Province; soil moisture; dynamics; *Robinia Pseudoacacia* plantation

土壤是植被的载体,根系只有不断地从土壤中吸收水分和养分才能维持植物的正常生长^[1]。土壤水分是土壤养分循环和流动的载体,影响着生态环境建设、水资源的合理分配以及高效利用^[2]。土壤水分具有高度的异质性,土壤水分空间异质性是土壤水分随季节和年份等时间单位变化的结果,受到土壤结构、植被根系分布、植被耗水、降水入渗、土壤蒸散、干湿季节交替和人类活动等综合因素的影响^[3-4]。

目前,对于土壤水分的研究多集中在植被、林分年龄与土壤水分的关系、土壤水分对降雨的响应等方面,坡向和密度对土壤水分影响方面的文章较少。张建军等^[5]研究表明,次生林、刺槐人工林和油松人工林的土壤水分差异显著,次生林的土壤水分明显高于人工林。茹豪等^[6]研究认为,降雨对表层土壤水分的影响较为显著,随土层深度的增加,土壤水分对降雨的响应逐层减弱。王舒等^[7]研究认为,成熟刺槐林对坡面土壤水分空间分配的调节作用更大,15 年以上的刺槐林对深层土壤水分的影响已趋于稳定。

晋西黄土区气候干旱、降水稀少且时空分配不均匀、植被稀疏、水土流失严重,降水是维持植物生长的唯一水源。由于该地区不合理的人工植被配置模式,使得植被对土壤水分的消耗超出了天然降雨的补偿能力,导致各层次土壤水分均出现不同程度的亏缺问题^[8],土壤水分成为了黄土高原地区林木生长、植被恢复和生态建设的主要限制因子。因此,研究晋西黄土区的土壤水分基本特征和动态变化规律,对合理利用有限水资源、促进植被恢复、生态建设和可持续发展具有重要意义。

本文选择晋西黄土区蔡家川流域 4 块不同坡向、不同密度的刺槐样地为研究对象,采用 TRIME-TDR 土壤水分测定仪对 0—200 cm 土层的土壤体积含水量进行测定,分析 4 块刺槐样地的土壤水分季节变化规律和垂直剖面变化规律,揭示不同坡向和密度

的刺槐林对土壤水分的影响,以期为晋西黄土区植被恢复、生态建设和人工林合理配置提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县蔡家川流域,地理坐标为 35°53′—36°21′ N,110°27′—111°07′ E,海拔为 900~1 510 m,属于典型的黄土残塬沟壑区。该地区属于暖温带大陆性季风气候,年均气温为 9.0~11.5 ℃;多年平均降水量 575.9 mm,降水季节分配不均匀,植物生长季(4—10 月)降水量约占全年降水量的 90%(521 mm),年潜在蒸发量为 1 724 mm。研究区土壤类型主要为褐土,黄土母质,土层深厚,土壤质地主要为粉砂质壤土,土质均匀。

蔡家川流域乔木树种主要包括刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、山杨(*Populus davidiana*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)等;灌木主要包括沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、荆条(*Vitex negundo*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)等;草本植物主要包括狗尾草(*Setaria viridis*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、细叶苔草(*Carex rigescens*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

在对研究区全面踏查的基础上,选取 4 块刺槐样地,分析不同坡向(阴坡、阳坡)、不同密度(1 450, 2 150, 2 525 株/hm²)的土壤水分。其中刺槐 1 与刺槐 2 的坡向不同,其他立地条件基本相同,而刺槐 2、刺槐 3 和刺槐 4 的密度不同,其他立地条件基本相同。样地面积为 20 m×20 m,在选定的样地内,测定刺槐树高、胸径、冠幅、郁闭度等林分基本指标,并记录坡向、坡度、海拔等立地特征,其中郁闭度采用样点法进行测定。样地的基本特征见表 1。

表 1 刺槐样地基本特征

林分类型	林龄/ a	林分密度/ (株·hm ⁻²)	坡向	坡度/ (°)	海拔/ m	郁闭度	平均 胸径/cm	平均 树高/m	平均 冠幅/m ²
刺槐 1	22	1425	阴坡	22	1170	0.71	10.69	9.28	6.80
刺槐 2	22	1450	阳坡	24	1160	0.71	10.69	9.29	7.10
刺槐 3	22	2150	阳坡	21	1190	0.66	10.11	9.34	6.70
刺槐 4	19	2525	阳坡	20	1120	0.64	10.11	9.27	7.70

2.2 研究方法

2.2.1 土壤体积含水量测定 在每块样地的中心位置布设 1 个观测点,采用 TRIME-TDR 土壤水分测定仪定位观测 2016 年 1—12 月的土壤体积含水量,

同时用土钻取土,利用烘干称重法进行 TDR 土壤水分测值的标定。每月上、中、下旬分别对各样地 0—200 cm 土层的土壤体积含水量进行分层观测(每个测层 20 cm),测定时读取 3 次重复读数,取平均值作

为该测层的土壤体积含水量。

2.2.2 降雨量测定 在样地附近空旷地设置翻斗式自记雨量计,用来获取并记录 2016 年的降雨量数据。其中少量监测点雨量缺失数据根据研究区气象站资料与本监测点对应雨量关系补充获得。

2.3 数据处理

使用 Excel 2016 对土壤水分数据进行初步处理及作图,使用 DPS 9.5 对土壤水分进行有序聚类分析,使用 SPSS 20.0 对数据进行基础统计学特征计算、单因素方差分析及 LSD 多重比较分析等处理。

2.3.1 土壤储水量计算 利用 TDR 土壤水分测定仪观测各土层的土壤体积含水量(每个测层 20 cm),各层的土壤储水量为:

$$W_i = \theta_i \times D_i$$

式中: W_i 为各土层土壤储水量(mm); θ_i 为各土层的土壤体积含水量(%); D_i 为土层厚度(mm)。

该仪器的观测深度为 200 cm,则各观测点 200 cm 土层的总储水量为:

$$W = \sum_{i=1}^{10} \theta_i \times D_i$$

式中: W 为 0—200 cm 土层的总储水量(mm)。

2.3.2 土壤水分变异系数计算 利用变异系数 CV (%)表示土壤水分的变化程度,其计算公式为:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\%$$

式中: S 为各层土壤含水量的样本标准差; $\bar{X}$ 为各层土壤含水量的样本平均值。

2.3.3 有序聚类法 有序聚类法是聚类分析中的一种,其不同于系统聚类法和逐步聚类法的地方在于有序聚类法的分类结果不会打乱样本次序^[9]。本研究采用有序聚类法中的有序样本最优分割法,该方法能同时保持样本的顺序性和相似性,通过定义直径和计算最小误差函数,缩小聚类内样本离差平方和,对样本进行最优分割,最终确定分类数和样本划分边界^[10]。最后绘制碎石图,拟合误差函数与分类数的函数关系曲线,确定各样地土壤水分的最优分类数(即为曲线的拐点)和划分边界。

3 结果与分析

3.1 不同立地刺槐林土壤水分时间分布

3.1.1 土壤水分季节变化时期划分 晋西黄土区土壤水分表现出明显的季节变化规律,土壤水分季节变化是土壤蒸发、降雨、植物耗水以及立地条件等因素共同作用的结果^[10],主要受降水量的影响。利用有序聚类法对 2016 年月平均土壤储水量进行季节变化时期划分,分别以 4 块刺槐样地的误差函数为 x 轴、分类数为 y 轴作碎石图,并拟合误差函数与分类数

的关系曲线。由图 1 可知,4 块刺槐样地的误差函数与分类数的拟合关系呈现出对数分布规律,且决定系数较大,分别为 0.876 9、0.958 6、0.992 0、0.972 3,4 块刺槐样地的曲线拐点均出现在分类数 $K=4$ 时。因此,各样地土壤水分季节变化时期的最佳分类数为 4,依据 $K=4$ 时各时期的划分界线,将刺槐样地土壤水分季节变化分为平稳期、消耗期、波动期和恢复期 4 个时期(表 2)。将划分结果与各样地 2016 年月平均土壤储水量实际变化曲线(图 2)进行对比可知,运用有序聚类法划分土壤水分季节变化时期的结果与实际变化情况基本吻合,同时,可以降低人为主观因素对土壤水分季节划分的影响,提高时期划分的科学性^[10]。

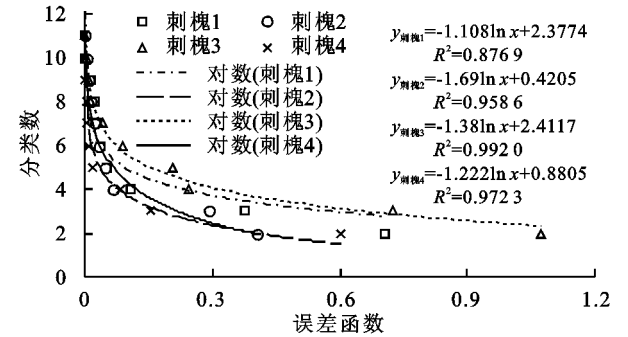


图 1 不同立地刺槐林土壤水分有序聚类碎石图

表 2 不同立地刺槐林土壤水分季节变化时期划分

林分类型	月份			
	平稳期	消耗期	波动期	恢复期
刺槐 1	1—2	3—6	7—9	10—12
刺槐 2	1—2	3—6	7—10	11—12
刺槐 3	1—3	4—6	7—10	11—12
刺槐 4	1—3	4—6	7—10	11—12

由表 2 可知,4 块刺槐样地的土壤水分季节变化分为土壤水分平稳期、土壤水分消耗期、土壤水分波动期和土壤水分恢复期 4 个时期,但在月份划分上有所不同。由图 2 可知,土壤水分平稳期处于冬季,气温较低,地表有枯落物覆盖,土壤水分蒸发量少,植物未进入生长期,其根系基本不吸收土壤水分,同时还有少量降水补充,土壤储水量波动很小,几乎保持稳定的状态;土壤水分消耗期气温回升,土壤蒸发逐渐加强,植物进入生长期,根系活动加强,蒸散消耗大量土壤水分,虽然降雨对土壤水分有一定的补充作用,但土壤水分的消耗大于补给,土壤储水量不断降低;土壤水分波动期气温达到全年最高值,土壤蒸发强烈,植物生长最为旺盛,蒸散作用强烈,同时进入雨季,降水量最高,在降水补给和植物生长消耗的共同作用下,土壤储水量呈现出剧烈的变动;土壤水分恢复期降水减少,但气温逐渐下降,林木进入休眠期,植物耗水量和土壤蒸发量减少,土壤储水量渐渐回升,进入恢复期。

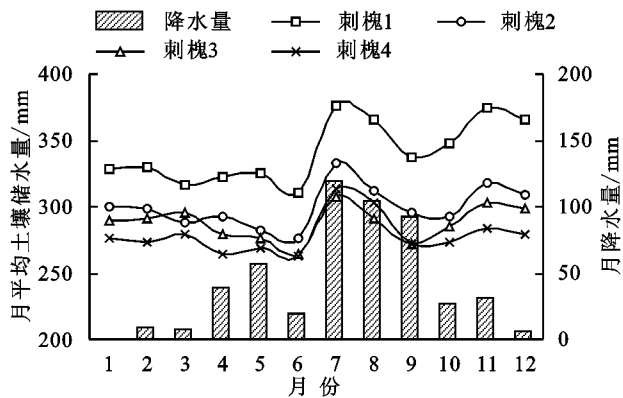


图2 不同立地刺槐林月平均土壤储水量动态变化

3.1.2 不同坡向刺槐林土壤水分时间变化 由图3可知,刺槐1与刺槐2的土壤储水量随月份的变化趋势基本相同,均在1—2月保持稳定状态,在3—6月表现出不同程度的下降趋势,在7—9月两块样地均呈现出较大的波动性,而刺槐1(阴坡)10月的土壤储水量呈现上升趋势,开始进入恢复期,但刺槐2(阳坡)10月的土壤储水量(292.1 mm)仍然低于年平均储水量(299.5 mm),11月才开始回升。

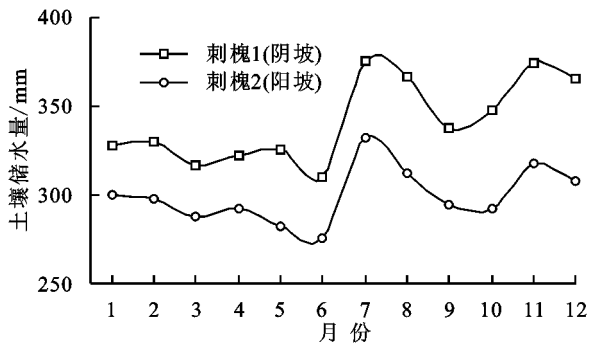
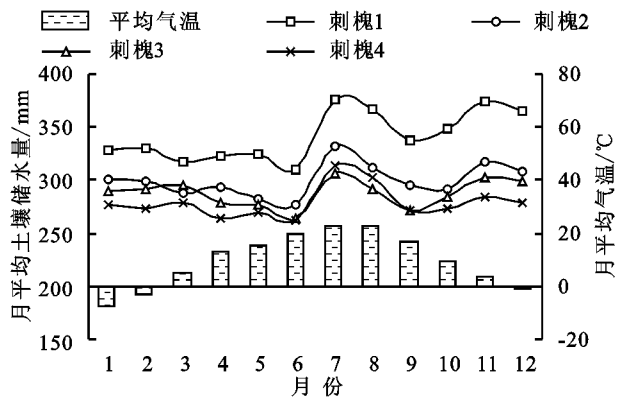


图3 不同坡向刺槐林月平均土壤储水量动态变化

在0—200 cm土层中,刺槐1(阴坡)年平均土壤储水量为341.6 mm,刺槐2(阳坡)年平均土壤储水量为299.5 mm,且4个时期刺槐1的土壤储水量均高于刺槐2。两块样地土壤储水量的最大值均出现在7月,分别为375.7,332.2 mm,与年最大降水量(118.7 mm)所在月份相同;最小值均出现在6月,分别为310.1,276.1 mm,该月降水量较小(19.5 mm)而气温较高(19.8℃)。利用单因素方差分析法评价不同坡向时间序列上土壤储水量的差异水平,表明刺槐1与刺槐2的土壤储水量在时间序列上差异极显著($P < 0.01$),这说明坡向对土壤储水量的月变化具有显著性影响,阴坡的土壤储水量显著高于阳坡,阴坡的土壤水分条件较好。

3.1.3 不同密度刺槐林土壤水分时间变化 由图4可知,3块样地的土壤储水量随月份的变化趋势基本相同,其中刺槐3和刺槐4在1—3月均保持稳定状态,而刺槐2在1—2月保持稳定状态,3月的土壤储水量(287.7 mm)低于年平均土壤储水量(299.5



mm),出现了明显的水分消耗;3块样地4—6月均呈现出下降趋势,7—10月进入波动期,而土壤储水量在11月出现回升现象。

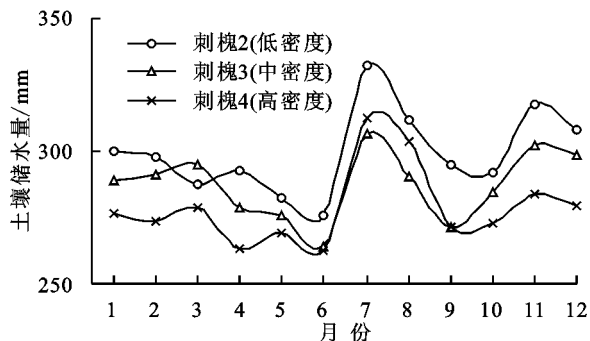


图4 不同密度刺槐林月平均土壤储水量动态变化

在0—200 cm土层中,刺槐2(低密度)年平均土壤储水量为299.5 mm,刺槐3(中密度)年平均土壤储水量为287.4 mm,刺槐4(高密度)年平均土壤储水量为278.9 mm,4个时期刺槐2的土壤储水量基本都高于另外两块样地,而刺槐3的土壤储水量在波动期出现了低于刺槐4的现象。3块样地土壤储水量的最大值均出现在7月,分别为332.2,306.8,312.8 mm,与年最大降水量(118.7 mm)所在月份相同;最小值均出现在6月,分别为276.1,263.9,262.2 mm,该月降水量较小(19.5 mm)而气温较高(19.8℃)。利用单因素方差分析法和LSD多重比较分析法评价不同密度时间序列上土壤储水量的差异水平,表明3块样地的土壤储水量在时间序列上差异极显著($P < 0.01$),刺槐2的土壤储水量显著高于刺槐4($P < 0.01$),其他样地之间的差异不显著($P > 0.05$)。这说明密度对土壤储水量的月变化具有显著性影响,低密度的土壤储水量显著高于高密度,低密度(1450株/hm²)的土壤水分条件较好。

3.2 不同立地刺槐林土壤水分垂直分布

3.2.1 土壤水分垂直方向土层划分 变异系数是衡量观测值变异程度的统计量,变异系数越大,观测数据的离散性越大,即土壤水分含量的变化越剧烈^[11]。由图5可知,各样地0—200 cm土层土壤水分变异系

数随土层深度的增加基本呈现逐渐递减的趋势。其中 0—80 cm 土层土壤水分变异系数呈快速减小的趋势,土壤水分波动较大,变化较剧烈,而在 80—200 cm 土层土壤水分变异系数基本保持不变,土壤水分趋于稳定。

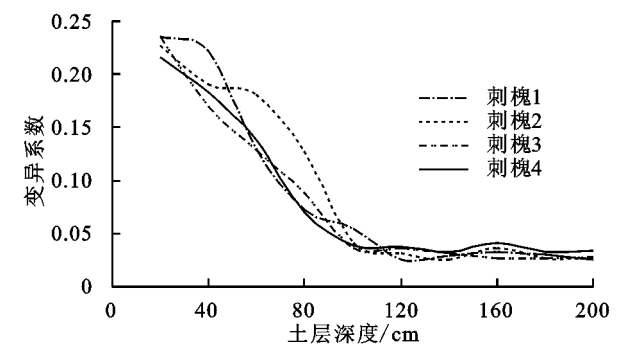


图 5 不同立地刺槐林土壤水分变异系数对比

根据王瑜等^[9]、张建军等^[11]和陈洪松等^[12]对土壤水分垂直变化层次划分的研究,并结合刺槐林分根系分布情况,使用目前广泛应用的变异系数法对 4 块刺槐样地 0—200 cm 土层进行分层,结果表明,4 块刺槐样地均可分为土壤水分剧烈变化层(变异系数大于 0.20)、土壤水分弱变化层(变异系数为 0.10~0.20)和土壤水分相对稳定层(变异系数小于 0.10)3 个土层,但每块样地的土层深度划分情况有所不同,具体划分结果见表 3。

表 3 不同立地刺槐林土壤水分垂直剖面变化土层划分

林分类型	土层深度/cm		
	剧烈变化层	弱变化层	相对稳定层
刺槐 1	0—40	40—60	60—200
刺槐 2	0—20	20—80	80—200
刺槐 3	0—20	20—60	60—200
刺槐 4	0—20	20—60	60—200

土壤水分剧烈变化层:雨水首先渗入该层,使土壤水分急剧增加,雨后经过土壤蒸发、入渗和林木根系吸收的作用,使其水分急剧减少,从而形成较大的波动^[13];对林木的生长作用较小,水分利用难度较大,也被称为土壤水分弱利用层。

土壤水分弱变化层:降水下行入渗对该层水分进行补给,而林木根系主要从该层吸收水分,受降水特性和根系耗水的双重作用,干旱时土壤水分降低,降雨后土壤水分易恢复,具有明显的季节性干湿变化过程^[14];对林木生长具有重要作用,是林木用水的主要来源,也被称为土壤水分利用层。

土壤水分相对稳定层:林木根系减少,蒸腾耗水作用减弱,普通降雨得不到补充,土壤水分处于较低水平,但相对稳定;在丰水年可以储蓄水分,在枯水年和林木强烈蒸腾的生长季可向上输送水分^[15],是林木应对极端干旱年的土壤水分调节层。

3.2.2 不同坡向刺槐林土壤水分垂直变化 由图 6 可知,刺槐 1 和刺槐 2 的土壤体积含水量随土层深度的变化趋势基本相同,总体呈现为先增加后减少的趋势,减少后的土壤体积含水量均小于土壤表层(0—20 cm)。两块样地的土壤体积含水量在 0—80 cm 土层中变化幅度较大,其中 0—40 cm 土层随着土层深度的加深而增加,40—80 cm 土层随着土层深度的加深而减少;而 80—200 cm 土层中,两块样地的土壤体积含水量基本趋于稳定,其中刺槐 1 在 120—160 cm 土层中出现了小幅度先增加后减少的趋势,而刺槐 2 在 80—100 cm 呈现出小幅度增加的趋势,100—200 cm 土层基本趋于稳定。但在每一土层刺槐 1 的土壤体积含水量均大于刺槐 2,说明阴坡林分的土壤水分整体好于阳坡。

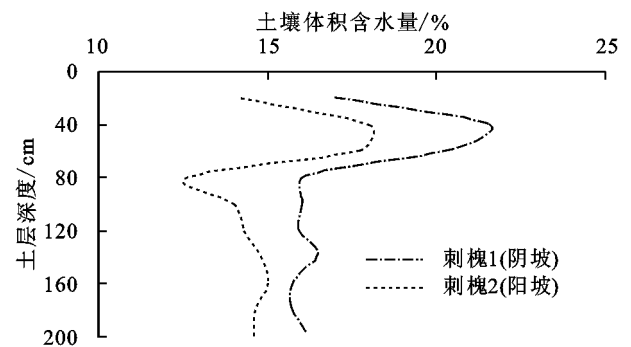


图 6 不同坡向刺槐林土壤体积含水量剖面变化

在 0—200 cm 土层中,刺槐 1 年平均土壤体积含水量为 17.1%,刺槐 2 年平均土壤体积含水量为 15.0%;两块样地土壤体积含水量的最大值均出现在 20—40 cm 土层,分别为 21.6%和 18.0%,刺槐 1 的最小值出现在 160—180 cm 土层,为 15.7%,刺槐 2 的最小值出现在 80 cm 土层,为 12.7%。利用单因素方差分析法评价不同坡向垂直方向上土壤体积含水量的差异水平,表明刺槐 1 和刺槐 2 的土壤体积含水量在垂直方向上差异显著($P<0.05$),刺槐 1 的土壤体积含水量显著高于刺槐 2。这说明坡向对土壤体积含水量的垂直剖面变化具有显著性影响,阴坡的土壤体积含水量显著高于阳坡。

3.2.3 不同密度刺槐林土壤水分垂直变化 由图 7 可知,刺槐 2、刺槐 3 和刺槐 4 的土壤体积含水量随土层深度的变化趋势基本相同,总体呈现先增加后减少的趋势,减少后的土壤体积含水量均小于土壤表层(0—20 cm)。3 块样地的土壤体积含水量在 0—80 cm 土层中变化幅度较大,其中 0—40 cm 土层随着土层深度的加深而增加,40—80 cm 土层随着土层深度的加深而减少;而 80—200 cm 土层中,3 块样地的土壤体积含水量基本趋于稳定,其中刺槐 2 在 80—100 cm 土层呈现出小幅度增加的趋势,100—200 cm 土

层基本趋于稳定,说明低密度林分对该土层的水分基本没有消耗,土壤水分状况良好;刺槐 3 在 80—100 cm 土层仍然呈现减少的趋势,并在 100—200 cm 土层保持小幅度的增加,说明中密度林分对该土层的水分有一定的消耗,但消耗程度不大,从 180 cm 土层开始接近正常值;而刺槐 4 则一直低于刺槐 2 和刺槐 3,说明高密度林分对该土层的消耗比较大,土壤体积含水量呈现越来越少的趋势。

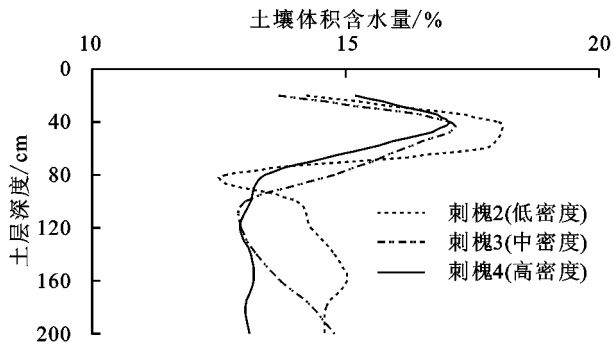


图 7 不同密度刺槐林土壤体积含水量剖面变化

在 0—200 cm 土层中,刺槐 2(1 450 株/hm²)年平均土壤体积含水量为 15.0%,刺槐 3(2 150 株/hm²)年平均土壤体积含水量为 14.4%,刺槐 4(2 525 株/hm²)年平均土壤体积含水量为 14.0%;3 块样地土壤体积分含量的最大值均出现在 20—40 cm 土层,分别为 18.0%,17.1%,17.0%,刺槐 2 的最小值出现在 60—80 cm 土层,为 12.7%,刺槐 3 和刺槐 4 的最小值均出现在 100—120 cm 土层,分别为 12.9%和 12.9%。利用单因素方差分析法和 LSD 多重比较分析法评价不同密度垂直方向上土壤体积分含量的差异水平,表明 3 块样地的土壤体积分含量在垂直方向上差异不显著($P>0.05$),这说明密度对土壤体积分含量的垂直剖面变化没有显著性影响,但 3 块样地土壤体积分含量仍然呈现出低密度最高,中密度次之,高密度最低的规律。

4 讨论

4.1 土壤水分季节变化规律

晋西黄土区 6 月的降雨还相对较少,但气温迅速升高,相对湿度低,导致土壤蒸发加剧,另一方面林木进入生长季,生长迅速,需要消耗大量土壤水分,蒸腾耗水快速升高,土壤水分消耗剧烈。因此,刺槐样地土壤储水量的最低值均出现在 6 月,与曹奇光^[16]对晋西黄土区刺槐林土壤水分特征的研究规律一致。而进入 10—11 月时,降雨开始减少,但林木进入了休眠期,基本停止生长,蒸腾耗水减少,气温降低,地表蒸发较小,所以样地土壤水分出现回升现象,这与马文^[17]对黄土丘陵区典型人工林土壤水分季节变化规

律的研究一致。土壤水分季节变化受降水、林分类型、气候条件等众多因素的影响,不同坡向、不同密度下对土壤水分的研究会呈现出一定的差异,因此,本文在土壤水分季节变化时期的划分结果上与张建军等^[5]和赵荣玮等^[18]的研究结果不同。

4.2 土壤水分垂直变化规律

降雨对表层土壤水分的影响较为显著,降雨时雨水首先渗入表层,使土壤水分急剧增加,雨后由于林木耗水和样地蒸发,使土壤水分减小,从而使土壤水分的波动较大^[16,19],因此土层越深,土壤水分变异系数越小。0—80 cm 土层主要受降水入渗、径流、土壤蒸发和林木根系吸水等因素的影响^[11],该层土壤水分变异系数呈快速减小的趋势;而 80—200 cm 土层主要受土地利用方式、地形等因素的影响,该层变异系数基本保持不变,这与高艳鹏等^[20]、黄琳琳等^[14]的研究结果相似。

降水通过入渗补充土壤水分,使表层(0—40 cm)土壤水分蒸发量小于补充量,土壤水分得到积累,因此表层的土壤含水量随土层深度逐渐增加;刺槐通过根系从土壤中吸收大量水分用于蒸腾作用,且降水补充量较少,从而导致 40—80 cm 土层的土壤含水量不断减少;80—200 cm 土层的土壤水分很难得到降水和地下水的补给,因此该层的土壤含水量均小于 0—40 cm 土层的含水量。

4.3 坡向和密度对土壤水分动态变化的影响

阳坡的日照时间大于阴坡,太阳直接辐射较多,土壤蒸发严重,植物蒸腾加剧,阳坡消耗土壤水分较多,使得阴坡的土壤水分条件较好^[20]。高密度的刺槐样地植物生长需水量较多,对土壤水分过度利用,造成土壤水分消耗严重,使得密度越高刺槐林土壤水分越低,低密度的土壤水分条件较好^[19]。这与常译方等^[21]的研究结果一致。

综上所述,晋西黄土区植被建设应综合考虑坡向和密度对土壤水分的影响,建议在阴坡种植刺槐林,种植密度不高于 1 500 株/hm²,此时的土壤水分状况较好,对土壤水分没有过度消耗,有利于林木的生长。土壤水分动态变化不仅与降水分配有关,还受林分类型、林分根系、植被耗水量、土壤蒸发量、气候条件、土地利用状况、立地条件和土壤特性等众多因素的影响。因此,在今后的研究中,应综合考虑多个影响因子,对土壤水分的动态变化进行更加深入、更加完善的研究。

5 结论

(1)研究区土壤水分季节变化分为平稳期、消耗期、波动期和恢复期 4 个时期,年最大土壤水分与年

最大降水量所在月份相同,降水季节分配对土壤水分有影响。

(2)研究区土壤水分垂直变化土层分为剧烈变化层、弱变化层和相对稳定层3个土层,土壤水分随土层深度表现为先增加后减少最后趋于稳定的趋势。

(3)坡向和密度对研究区刺槐林的土壤水分具有显著性影响,阴坡的土壤水分显著高于阳坡($P < 0.01$),低密度的土壤水分显著高于高密度($P < 0.01$)。

参考文献:

- [1] 田宁宁,张建军,茹豪,等. 晋西黄土区水土保持林地的土壤水分和养分特征[J]. 中国水土保持科学,2015,13(6):61-67.
- [2] 唐敏,赵西宁,高晓东,等. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报,2018,29(3):1-13.
- [3] 王延平,韩明玉,张林森,等. 洛川苹果园土壤水分变化特征[J]. 应用生态学报,2012,23(3):731-738.
- [4] 王舒. 晋西黄土区不同尺度土壤水分分布及其对降雨的响应[D]. 北京:北京林业大学,2016.
- [5] 张建军,李慧敏,徐佳佳. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J]. 生态学报,2011,31(23):7056-7066.
- [6] 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.
- [7] 王舒,马岚,张栋,等. 晋西黄土区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤水分特征[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(3):253-258.
- [8] 杨磊,卫伟,莫保儒,等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. 生态学报,2011,31(11):3060-3068.
- [9] 王瑜,朱清科,赵维军,等. 陕北黄土区人工林地土壤水分的垂直变化规律[J]. 中国水土保持科学,2015,13(6):54-60.
- [10] 常译方,毕华兴,高路博,等. 晋西黄土区刺槐和油松林地土壤水分动态变化[J]. 中国水土保持科学,2014,12(4):21-27.
- [11] 张建军,张岩,张波. 晋西黄土区水土保持林地的土壤水分[J]. 林业科学,2009,45(11):63-69.
- [12] 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J]. 应用生态学报,2005,16(10):1853-1857.
- [13] 王洪英. 黄土高原人工刺槐林土壤水分动态及生物量的密度效应研究[D]. 北京:北京林业大学,2006.
- [14] 黄琳琳,陈云明,王耀凤,等. 黄土丘陵区不同密度人工油松林土壤水分状况研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(5):1-5.
- [15] 原焕英,许喜明. 黄土高原半干旱丘陵沟壑区人工林土壤水分动态研究[J]. 西北林学院学报,2004,19(2):5-8.
- [16] 曹奇光. 晋西黄土区人工刺槐林地土壤水分特征及合理密度研究[D]. 北京:北京林业大学,2007.
- [17] 马文. 黄土丘陵区典型人工林土壤水分补给与消耗特征研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [18] 赵荣玮,张建军,李玉婷,等. 晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应[J]. 水土保持学报,2016,30(1):178-183.
- [19] 孙中峰,周玉喜,朱金兆,等. 晋西黄土丘陵区坡面刺槐林地土壤水分研究[J]. 中国水土保持科学,2007,5(5):43-49.
- [20] 高艳鹏,王志明,骆汉,等. 晋西黄土丘陵沟壑区春季土壤水分动态研究[J]. 水土保持研究,2010,17(3):92-96.
- [21] 常译方,毕华兴,许华森,等. 晋西黄土区不同密度刺槐林对土壤水分的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(6):227-232.
- [18] Misra, A, Tyler G. Influence of soil moisture on soil solution chemistry and concentrations of minerals in the calcicoles phleum phleoides and veronica spicata grown on a limestone soil [J]. Annals of Botany, 1999, 84(3): 401-410.
- [19] Zuo, Y, Ren L, Zhang F, et al. Bicarbonate concentration as affected by soil water content controls iron nutrition of peanut plants in a calcareous soil [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2007, 45(5): 357-364.
- [20] 吕福堂,司东霞. 日光温室土壤盐分积累及离子组成变化的研究[J]. 土壤,2004,36(2):208-210.
- [21] 郭春霞,沈根祥,黄丽华,等. 精确滴灌施肥技术对大棚土壤盐渍化和氮磷流失控制的研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(2):287-291.
- [22] Mmolawa K, Or D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review [J]. Plant and Soil, 2000, 222(1/2): 163-190.
- [23] Huber C, Baier R, Göttlein A, et al. Changes in soil, seepage water and needle chemistry between 1984 and 2004 after liming an N-saturated Norway spruce stand at the Höglwald, Germany [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 233(1): 11-20.
- [24] Kreutzer K. Effects of forest liming on soil processes [J]. Plant and Soil, 1995, 169(1): 447-470.
- [25] 王伟. 不同施肥与秸秆还田对设施菜田土壤硝态氮和盐基离子淋溶的影响[D]. 山东 青岛:青岛农业大学,2015.

(上接第162页)