

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.042.

翟博超, 朱燕, 申小娟, 等. 黄土丘陵区两个典型成熟森林群落土壤水分时空变化特征及对降雨事件的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 170-178.
Zhai Bochao, Zhu Yan, Shen Xiaojuan, et al. Spatiotemporal Variation of Soil Moisture and the Responses to Rainfall Events in Two Typical Mature Forest Stands in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 170-178.

黄土丘陵区两个典型成熟森林群落土壤水分 时空变化特征及对降雨事件的响应

翟博超^{1,2}, 朱燕^{1,2}, 申小娟^{1,4}, 孙美美¹, 杜盛^{2,3}

(1.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学

黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.重庆市林业投资开发有限责任公司, 重庆 401120)

摘要: [目的]探究黄土丘陵区刺槐人工林和辽东栎天然次生林土壤水分的时空变化特征及其对降雨事件的响应机制,揭示该区域两个典型森林群落的土壤水分特征及其差异性,为该地区森林植被建设与管理提供科学依据。[方法]以黄土丘陵区两个典型树种的成熟森林群落为研究对象,通过对试验地 0—300 cm 范围土壤含水量 10 年间(2009—2019)的监测,并结合同期降水量变化,分析这两种森林群落土壤水分的时空变化规律及对降雨的响应。[结果](1) 2019 年生长季末两森林群落 0—100 cm 和 0—300 cm 平均土壤含水量均高于 2009 年平均值,在 0—100 cm 范围内两群落均达到显著差异,且 2019 年辽东栎林平均土壤含水量显著高于刺槐林;在 0—300 cm 范围的平均值仅辽东栎林达到显著差异。(2) 两森林群落土壤水分的空间分布均在 0—200 cm 土层内呈现较为明显波动;在 2—300 cm 土层辽东栎林土壤水分在时间和空间上的稳定性均高于刺槐林。(3) 两森林群落土壤水分的月际动态趋势基本一致,与降雨量月际动态大致同步,但辽东栎林土壤含水量始终高于刺槐林。(4) 在年际尺度上,两森林群落生长季末土壤含水量均与当年降雨量呈显著正相关,随降雨量的增大,辽东栎林在抵消蒸散耗水的同时对土壤水分的补充作用大于刺槐林。两森林群落土壤储水量增量与次降雨量均呈现极显著的指数增长关系,次降雨量较小时(小于 22 mm)刺槐林土壤水分的补充作用大于辽东栎林,而次降雨量较大时(大于 22 mm)则辽东栎林更有利于土壤水分的补充。[结论]两种森林群落土壤水分的时空变化特征存在显著差异,尤其是在深层土壤。与刺槐林相比,辽东栎林土壤水分对年际降雨的响应更为明显,而两森林群落土壤储水量对单次降雨事件响应的差异取决于次降雨量。

关键词: 黄土丘陵区; 森林群落; 土壤水分; 时空变化; 降雨响应

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0170-09

Spatiotemporal Variation of Soil Moisture and the Responses to Rainfall Events in Two Typical Mature Forest Stands in the Loess Hilly Region

Zhai Bochao^{1,2}, Zhu Yan^{1,2}, Shen Xiaojuan^{1,4}, Sun Meimei¹, Du Sheng^{2,3}

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.State Key Laboratory of Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 4.Chongqing Forestry Investment Development Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the temporal and spatial variation characteristics of soil moisture in *Robinia pseudoacacia* plantation and *Quercus liaotungensis* natural secondary forest in the loess hilly region and its response mechanism to rainfall events, and reveal the soil moisture characteristics and differences between two typical forest communities in this region, so as to provide scientific basis for the

收稿日期: 2023-09-13

修回日期: 2023-10-13

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄土高原人工生态系统结构改善和功能提升技术”(2017YFC0504601)

第一作者: 翟博超(1994—), 男, 河北石家庄人, 在读博士, 主要研究方向为森林生态、流域生态与管理。E-mail: bochaozhai@nwafu.edu.cn

通信作者: 杜盛(1965—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 博士, 研究员, 主要研究方向为森林生态、流域生态与管理。E-mail: shengdu@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

construction and management of forest vegetation in this area. [Methods] The mature forest communities of two typical tree species in the loess hilly region were taken as the objects. By monitoring the soil moisture content in the range of 0—300 cm in the experimental site for 10 years (2009—2019), combining with the change of precipitation in the same period, the temporal and spatial variation pattern of soil moisture in these two typical forest communities and its response to rainfall were analyzed. [Results] (1) At the end of the growing season in 2019, the average soil water contents of the two forest communities at 0—100 cm and 0—300 cm were higher than the average values in 2009, and there was a significant difference between the two communities in the range of 0—100 cm, and the average soil water content of *Quercus liaotungensis* forest in 2019 was significantly higher than that of *Robinia pseudoacacia* forest. The average value in the range of 0—300 cm was significantly different only in *Quercus liaotungensis* forest. (2) The spatial distribution of soil moisture in the two forest communities fluctuated obviously in the 0—200 cm soil layer. The temporal and spatial stability of soil moisture in *Quercus liaotungensis* forest in 200—300 cm soil layer was higher than that in *Robinia pseudoacacia* forest. (3) The monthly dynamic trend of soil moisture in the two forest communities was basically the same, which was roughly synchronized with the monthly dynamic trend of rainfall, but the soil moisture in *Quercus liaotungensis* forest was always higher than that in *Robinia pseudoacacia* forest. (4) On the interannual scale, the soil water content of the two forest communities at the end of the growing season was significantly positively correlated with the rainfall in that year. With the increase of rainfall, the *Quercus liaotungensis* forest offset the evapotranspiration water consumption and supplemented the soil water more than the *Robinia pseudoacacia* forest. The increment of soil water storage in the two forest communities showed a very significant exponential growth relationship with the secondary rainfall. The supplementary effect of soil moisture in *Robinia pseudoacacia* forest was greater than that in *Quercus liaotungensis* forest when the secondary rainfall was small (less than 22 mm), but it was more beneficial to supplement soil moisture in *Quercus liaotungensis* forest when the secondary rainfall was large (more than 22 mm). [Conclusion] There are significant differences in temporal and spatial variation characteristics of soil moisture between two forest communities, especially in deep soil. Compared with *Robinia pseudoacacia* forest, the response of soil moisture in *Quercus liaotungensis* forest to interannual rainfall is more obvious. The difference of soil water storage in two forest communities to rainfall event depends on the amount of rainfall.

Keywords: loess hilly region; forest community; soil moisture; spatiotemporal variation; rainfall response

黄土高原地区生态环境脆弱,水土流失严重,保护自然植被和营造人工林是生态环境恢复与重建的重要措施^[1]。在半干旱黄土丘陵区,土壤水分是影响植物生长与植被恢复的关键因子^[2]。土壤水分状况是气候、地形、土壤以及植被等多种因素的综合反映,一方面土壤水分状况直接影响植物的生长和群落演替,另一方面植被类型和生态过程也影响土壤水分含量与分布^[3-4]。因此,土壤水分不仅是干旱半干旱地区植被建设的基础条件,同时也是蒸发、蒸腾和径流等生态水文过程的重要影响因素^[5-7]。

土壤含水量及其时间动态受降雨波动的影响显著,具有明显的季节和年际特征^[8-11]。黄土高原中部的丘陵区属于半干旱半湿润气候,生态系统普遍存在水分供求矛盾,通过降雨进入土壤中的水分除极少部分渗漏外,大部分通过植物蒸腾作用和土壤蒸发进入大气中^[12]。

森林群落上一个生长季末期的土壤水分状况、上年生长季末期至当年生长季末期的降水量以及这一期间的总蒸散量共同构成了该水文年度的水分平衡和最终的土壤含水量。因此,在生长季节末期(10月下旬)测得的土壤含水量可以被认为是植被类型和降水相互作用的累积结果。在降雨、土壤以及微地形等因子相似条件下,不同森林群落下的土壤水分状况通常是植被对土壤水分长期消耗的结果,能够反映不同森林群落植被的耗水特征^[13]。相关研究表明,黄土丘陵区不同类型林地,在生长季的土壤水分状况具有显著差异^[14]。同一林地的土壤含水量在0—100 cm土层也呈现较大的垂直变化,随垂直深度增加呈下降趋势^[15-16]。降水对浅层土壤水分表现出很大影响,而深层土壤水分则受植被类型的影响更为显著^[17]。降雨量越大,植被类型对土壤水分的影响作用越小,降雨

量越小,植被类型对土壤水分的影响作用越大^[18]。

上述研究大多集中于同一年份等较小的时间尺度上,少数具有较大时间跨度的研究但测定的土层深度较浅,多集中于 0—100 cm 土层,对于揭示较大时间跨度的土壤水分多层次的变化特征具有一定局限性。本文对黄土丘陵区两种典型森林群落(刺槐人工林和辽东栎天然次生林)2009—2019 年土壤水分的时空动态差异进行分析,以期阐明两种森林群落土壤含水量与储水量的空间和时间动态变化特征以及对降雨的响应,为水分可持续利用以及森林植被建设与管理提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市南郊的公路山林区,地理坐标为 36°25.40' N, 109°31.53' E, 海拔 1 245 ~

1 395 m。据位于试验地北约 15 km 处的延安市气象台资料显示,该区域 1988—2007 年的平均年降水量为 498 mm,平均气温为 10.6 °C,雨季集中于 7—9 月份^[19]。该区域属于温带落叶阔叶林区向温带草原区的过渡地带,气候类型为暖温带半干旱季风气候,地貌为梁峁状黄土丘陵沟壑区,土壤类型主要为黄绵土。本研究选取的辽东栎(*Quercus liaotungensis*)天然次生林群落远离村落,人为干扰较少,是该区典型的天然林类型,伴生树种有山杏、大果榆、水栒子、细裂槭、侧柏等;刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林群落为该区主要人工林类型,林下灌草稀疏杂生。

1.2 样地设置

本研究以林区内多年固定监测样地为依托,在相距约 100 m 的辽东栎天然次生林群落和刺槐人工林群落各设有一处 20 m×20 m 标准样地,开展综合性研究。两固定样地基本特征见表 1。

表 1 研究区样地概况(2009 年)

Table 1 General information of study plots

样地	坡向	坡度/ (°)	容重/ (g·cm ⁻³)	平均 林龄/a	林分密度/ (DBH≥5 cm 株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m
辽东栎	西南	22	0.9±0.1	50	1350	11.7	6.4
刺槐	东南	26	1.1±0.1	30	2900	9.3	8.6

1.3 相关指标测定方法

1.3.1 降雨量监测 在距离两林地较近的一处空地安装微型气象站,监测空气温度、相对湿度、风速、太阳辐射、实时降雨量等基本气象要素,本文采用的降雨量数据由翻斗式自记雨量计(7852 型,美国 Davis 公司)测量。

1.3.2 土壤含水量定期测定 在两森林群落的样地内各选 3 处监测点,分别位于林分上、中、下坡位较有代表性的位置(避开灌木影响和树冠间隙、距离树干不小于 1 m)。在每个监测点处安装内径为 42 mm,长度为 300 cm 的土壤水分测量管,经过近一年的稳定期待管壁与土壤紧密贴合,使用时域反射仪(TRIME-TDR,德国 IMKO 公司)在生长季的每个月末对各测管分层(每 20 cm 间隔)测定土壤体积含水量。

1.3.3 土壤含水量连续监测和储水量计算 为了分析土壤水分对降雨事件的响应,本文同时采用 2019 年生长季内土壤含水量连续监测数据。该方法是在两森林群落的样地内各选一处避开灌木影响和树冠间隙且距离树干不小于 1 m 的较有代表性的位置,在深度为 100 cm 的土壤剖面上安装 6 个 S-SMC-M005 土壤水分探针(美国 Onset 公司),安装深度分别为 6 cm, 12 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm 和 90 cm,采用 HOB0H21-001 数据采集器(美国 Onset 公司)自动记录每小时的土壤体积

含水量。根据每个探针所代表的土层厚度进行加权平均计算获得 0—100 cm 土层的平均土壤含水量。

土壤储水量(SWS, mm)采用以下公式由土壤含水量计算获得:

$$SWS = SWC \times h \times 10$$

式中:SWS 为测定深度内的土壤储水量(mm);SWC 为测定深度内土壤平均体积含水量(%);h 为土层厚度(本文计算的测定深度为 100 cm),10 为单位转换系数(10 mm/cm)。

1.3.4 变异系数计算 变异系数(Coefficient of Variation)是表示样本离散程度的统计学量度,定义为样本标准差与平均值的比率。本文采用该指标考查不同月份间的土壤水分变异程度,计算公式为:

$$C.V = (SD/MN) \times 100\%$$

式中:C.V 为变异系数(%);SD 为标准差;MN 为平均值。

1.3.5 数据处理 对原始数据进行初步整理和计算之后,采用 SPSS 20.0 统计分析软件对不同数据组进行差异显著性检验,并采用 Sigmaplot 14.0 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 两森林群落土壤含水量总体变化

由两样地分别于 2009 年和 2019 年生长季末(10

月末)测定的土壤含水量(图1)可以看出,随着土层深度的增加,两样地土壤含水量大致呈现为先增大后减小并趋于稳定的变化趋势,这符合上层土壤易受水分收支变化所影响的特点。在同一年份,两林地土壤水分的垂直变化趋势基本一致,这与两林地在相同气候条件下呈现相同的水分收支节律相关联。

2009年和2019年两林地土壤含水量空间分布的波动均主要集中在浅、中土层(0—200 cm),辽东栎林0—200 cm土层土壤含水量垂直波动在2009年

和2019年均较活跃,变异系数分别为16.5%和14.9%。刺槐林0—200 cm土层土壤含水量垂直波动在2009年较为活跃,变异系数为18.1%;而在2019年相对稳定,变异系数为8.5%。在深土层(200—300 cm),辽东栎林2009年和2019年的土壤含水量垂直分布都比较稳定,变异系数分别为5.1%和2.4%。而刺槐林土壤含水量的垂直分布在2009年和2019年均具有微弱波动,土壤含水量随土层深度的增加呈现降低趋势,变异系数分别为13.4%和9.6%。

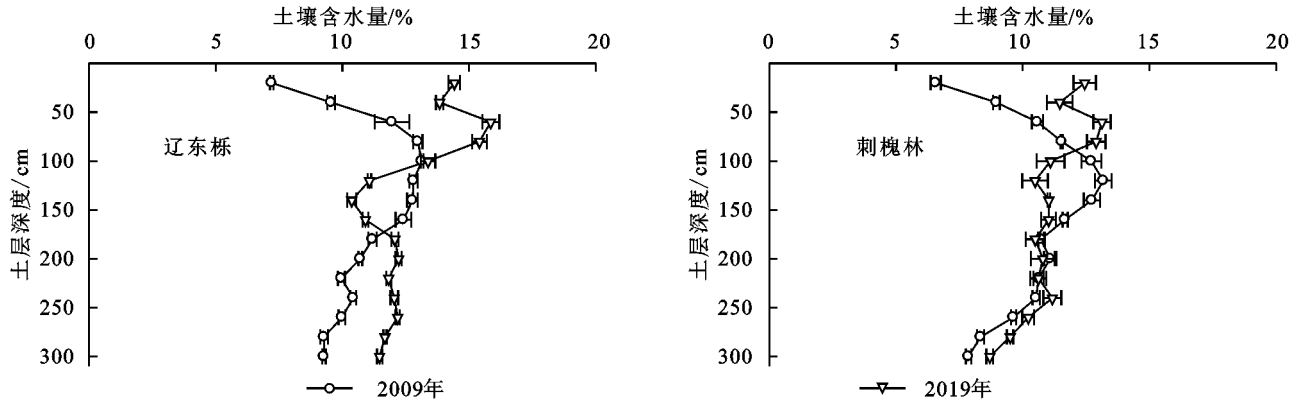


图1 两森林群落2009年和2019年生长季末土壤含水量的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of soil water content in two forest communities at the end of the 2009 and 2019 growing seasons

由图1还可以看出,在0—100 cm土层范围内,两林地2019年生长季末土壤含水量均明显高于2009年生长季末。辽东栎林在180 cm深度以下均表现为2019年大于2009年;刺槐林在180—220 cm深度表现为两时期相近,在240 cm深度以下表现为2019年略高于2009年。分别对两林地0—100 cm, 100—200 cm, 200—300 cm和整个0—300 cm土层的平均含水量进行分析发现,两个年份间差异在0—100 cm均达到显著或极显著水平(图2)。在100—

200 cm土层两林地均呈现相反的变化,即2019年较2009年有所降低。在200—300 cm和整个0—300 cm土层,两林地均表现为2019年高于2009年,辽东栎林的增加幅度更为明显,而刺槐林均未达到显著水平。两年份辽东栎林各土层平均土壤含水量均高于刺槐林,但2009年两群落各土层平均土壤含水量差异均不显著,而2019年在0—100 cm土层辽东栎林平均土壤含水量(14.58%)显著高于刺槐林(12.21%)($p < 0.05$)。

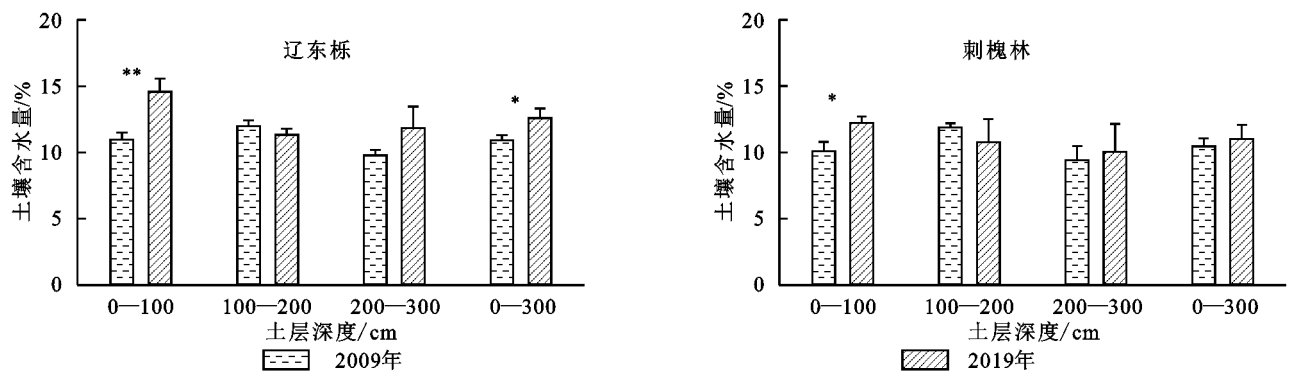


图2 两森林群落0—300 cm不同土层2009年和2019年生长季末平均土壤含水量

Fig. 2 Average soil water content at the end of the 2009 and 2019 growing seasons in different soil layers of 0—300 cm in the two forest communities

2.2 两森林群落土壤含水量月际动态

两森林群落0—300 cm平均土壤含水量在生长季各月份的变化趋势基本相同(图3),并呈现出与各月降雨量变化的关联性,在降雨较多的月份或次月会

有所升高。在2009年的生长季前期和中期(5—8月),两林地土壤含水量基本相同,在生长季末期(9—10月)都有所升高,但辽东栎林略高于刺槐林,应该与7—9月间降雨量较大(490 mm),两林地土壤水分

的补充存在差异有关。在2019年,两林地土壤含水量的月际动态趋势基本一致,都呈上升趋势,但辽东栎林始终高于刺槐林,两林地的差异较为明显。

对两森林群落不同土层深度范围土壤含水量月际变异系数进行比较分析发现(图4),0—100 cm土层的月际变异系数均大于20%,两森林群落之间和

两个年份之间的差异均未达到显著水平,但2019年低于2009年。在100—200 cm土层,两林地2019年土壤含水量的月际变异系数与2009年相比均明显减小,辽东栎林小于刺槐林。在200—300 cm土层,两林地2019年土壤含水量的月际变异系数略高于2009年,刺槐林大于辽东栎林。

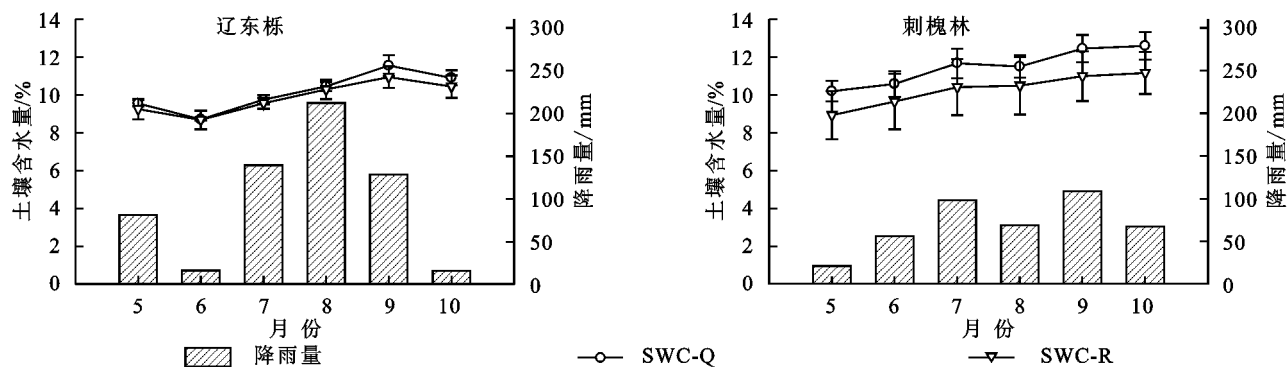


图3 两森林群落2009年和2019年生长季降雨量与0—300 cm平均土壤含水量的月际动态

Fig. 3 Inter-monthly variation of rainfall and 0—300 cm mean soil water content in two forest communities during the growing seasons of 2009 and 2019

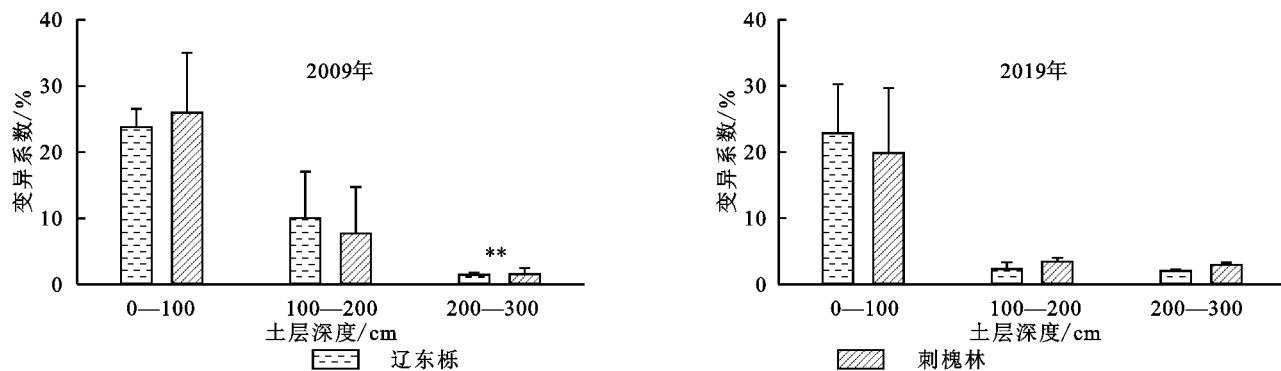


图4 2009年和2019年两森林群落0—300 cm不同土层土壤含水量月际变异系数($n=6$)

Fig. 4 Inter-monthly variation coefficient of soil water content at different soil layers of 0—300 cm in two forest communities in 2009 and 2019

2.3 两森林群落土壤水分对降雨的响应

对两森林群落在试验期间每年生长季末0—300 cm平均土壤含水量与对应水文年降雨量(上年11月—当年10月)的关系进行分析显示(图5),生长季末土壤含水量与全年降雨量呈显著正相关关系,但两森林群落的拟合趋势线斜率有所不同,辽东栎林的斜率明显大于刺槐林,说明降雨量增加对于提高辽东栎林水分平衡的盈余作用大于刺槐林。

对2019年生长季内9次 >5 mm有效降雨事件后两森林群落0—100 cm土壤储水量增量与次降雨量的关系进行分析表明(图6),土壤储水量增量与次降雨量呈现极显著的指数增长关系。在次降雨量较小时,刺槐林土壤储水量增量大于辽东栎林,但随着次降雨量的增大,在次降雨量超过22 mm后辽东栎林土壤储水量增量大于刺槐林,辽东栎林拟合曲线的指数增长斜率(0.135 5)大于刺槐林(0.079 5),而且随着次降雨

量的增大两林地土壤储水量增量的差值也逐渐变大。

3 讨论

3.1 土壤水分空间变化特征

土壤含水量在剖面上的垂直分布状况取决于土壤水分的补给和消耗两方面因素^[20]。无论是在2009年还是2019年,经过整个生长季降雨补水和蒸散耗水的共同作用后,两林地生长季末土壤含水量的空间垂直分布均具有部分相似的特征。如图1所示,随着土层深度的增加,两林地土壤含水量在垂直剖面上呈现先增大后减小再逐渐趋于稳定的分布特征,无论是2009年还是2019年,两林地土壤含水量空间垂直分布的波动均主要集中在浅、中土层(0—200 cm),这与现有的关于黄土高原地区的研究结果相似^[21-25]。说明两林地土壤水分在0—200 cm土层的空间分布易受林地水分收支状况的影响。

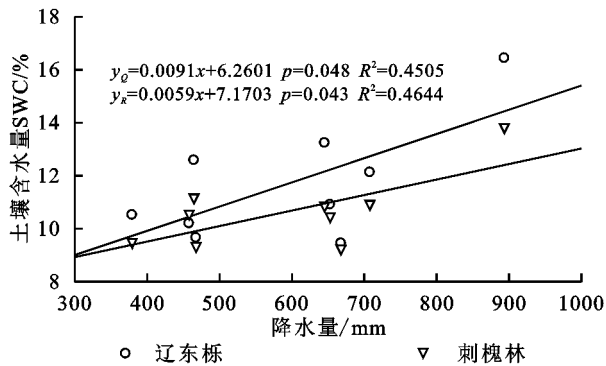


图5 试验期间两森林群落生长季末平均土壤含水量对该水文年(上年11月—当年10月)降雨量的响应

Fig. 5 Response of soil water content at the end of each growing season to precipitation of corresponding hydrological year (from Nov of previous year to Oct of current year) in the two forest communities

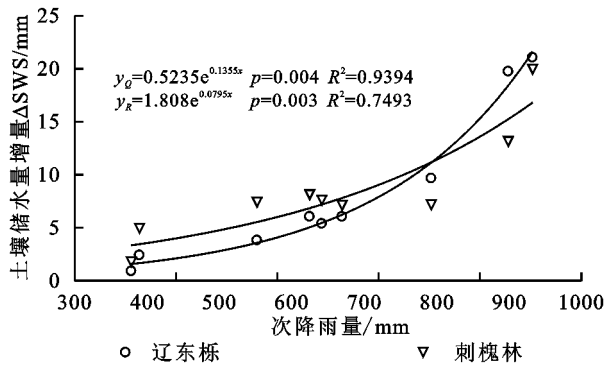


图6 两森林群落土壤储水量增量对单次降雨量的响应(2019年)

Fig. 6 Response of soil water storage increment to individual rainfall amount in the two forest communities in 2019

在深土层(200—300 cm),辽东栎林2009年和2019年的土壤含水量垂直分布都较为稳定,而刺槐林土壤含水量的垂直分布在2009年和2019年均具有微弱波动,土壤含水量随土层深度的增加呈现降低趋势。相关研究也显示黄土高原地区刺槐人工林一般在200—300 cm土层的垂直分布不能达到稳定状态^[17,21,26]。在不同年份之间,土壤含水量在0—300 cm土层的垂直分布受降水的影响大于受植被类型的影响^[17],但在同一年份,两林地深层土壤含水量的垂直分布特征的差异主要由森林类型所决定的,所以与刺槐人工林相比,辽东栎天然次生林深层土壤水分的空间分布更为稳定。

3.2 土壤水分时间变化特征

在黄土高原地区,降水通常是土壤水分补充的唯一来源,在有植被覆盖的区域,土壤水分的消耗包括植被蒸腾和地表蒸发。相应地,受降水月际分布和蒸散发过程影响,土壤水分状况会呈现明显的季节性变化^[27-29]。

两森林群落土壤含水量的月际动态总体变化趋

势基本相同,这与两森林群落的物候动态以及降雨等气候条件的基本一致相吻合。相关研究表明,一般在月际尺度上,降雨状况对浅层土壤水分有较大影响,中、深层土壤水分受降雨动态的影响较小^[30],这与本研究结果(图4)一致。一般认为,深层土壤水分较稳定且与植被类型有显著相关关系^[31-32]。因此,在较长的时间尺度上(2009年、2019年),两林地平均土壤含水量产生的差异(图2,图3)应该是由森林群落长期水分收支状况造成的。本研究进一步说明土壤水分的月际动态主要受降雨状况影响,但不同森林群落土壤含水量的差异主要与群落的优势树种有关。

简言之,在两个试验年份里(2009年和2019年)两森林群落的土壤含水量月际动态与降雨量的月际动态基本同步,在生长季降雨量较大的2009年月际间变异系数也大于降雨量较小的2019年;但两森林群落接受降雨的补充存在一定的差异。在多年时间尺度上辽东栎林平均土壤含水量有明显增加而刺槐林增加不明显,而且辽东栎林深层(200—300 cm)土壤含水量较刺槐林更为稳定。

3.3 土壤水分对降雨的响应

土壤水分的来源和运移过程受降雨过程的影响显著^[33]。土壤水分的补充和入渗对降雨的响应与土壤性质和降雨特性密切相关,并且显著影响着森林生态系统的水文过程以及植被的生长与生态功能^[34]。因此,分析土壤水分对降雨的响应状况,有利于探究研究区的两种典型森林群落水文过程的差异特征。

两森林群落生长季末平均土壤含水量与对应水文年的全年降雨量均呈显著正相关关系,说明降雨补充对于林地土壤水分收支平衡具有关键作用。辽东栎林拟合趋势线的斜率明显大于刺槐林(图5),说明在两林地降雨量相同的情况下,随着降雨量的增大和土壤水分的改善,刺槐林在生长季对土壤水分的消耗也随之增加,而辽东栎林则能在蒸散耗水的同时保持土壤水分较大的盈余。

生长季内单次降雨量对土壤储水量的影响也证实了上述差异。两森林群落0—100 cm土壤储水量增量与次降雨量均呈现极显著的指数增长关系,在次降雨量较小时,更有利于刺槐林土壤水分的补充,这可能与刺槐林的冠层结构有关,而辽东栎林由于冠层、凋落物层等的遮挡在次降雨量较小时不利于水分的穿透与入渗。当次降雨量超过22 mm后辽东栎林土壤储水量增量大于刺槐林,而且随着次降雨量的增大两林地土壤储水量增量的差值也逐渐变大,说明当次降

雨量较大时,辽东栎林更有利于土壤水分的补充。

4 结论

2019 年生长季末两森林群落 0—100 cm 和 0—300 cm 平均土壤含水量均高于 10 年前平均值,在 0—100 cm 范围内两群落均达到显著水平,且 2019 年辽东栎林平均土壤含水量显著高于刺槐林,而在 0—300 cm 仅辽东栎林达到显著水平。两森林群落土壤水分的空间分布的波动均在 0—200 cm 土层较为明显,在 200—300 cm 土层辽东栎林土壤水分的时间和空间稳定性均高于刺槐林。两森林群落土壤水分月际动态趋势基本一致,与降雨量月际动态大致同步,但辽东栎林土壤含水量始终高于刺槐林。在年际尺度上,两森林群落生长季末土壤含水量均与当年降雨量呈显著正相关,随降雨量的增大,辽东栎林在抵消蒸散耗水的同时对土壤水分的补充作用大于刺槐林。两森林群落土壤储水量增量与次降雨量均呈现极显著指数增长关系,次降雨量较小时(小于 22 mm)刺槐林土壤水分的补充作用大于辽东栎林,而次降雨量较大时(大于 22 mm)则辽东栎林更有利于土壤水分的补充,这可能与林分的冠层结构和土壤入渗的差异有关。

参考文献(References):

- [1] 陈丽华,鲁绍伟,张学培,等.晋西黄土区主要造林树种林地土壤水分生态条件分析[J].水土保持研究,2008,15(1):79-82,86.
Chen L H, Lu S W, Zhang X P, et al. Analysis of soil water content of main afforestation species in western Shanxi of Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(1): 79-82, 86.
- [2] 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.
Yang L, Wei W, Mo B R, et al. Soilwater deficit under different artificial vegetation restoration in the semi-arid hilly region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3060-3068.
- [3] 吴钦孝,杨文治.黄土高原植被建设与持续发展[M].北京:科学出版社,1998.
Wu Q X, Yang W Z. Forest and Grassland Vegetation Construction and Its Sustainable Development in Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [4] 常学向,赵爱芬,赵文智,等.黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况[J].水土保持学报,2003,17(2):126-129.
Chang X X, Zhao A F, Zhao W Z, et al. Status of soil moisture in oasis and desert unirrigated vegetation region along middle reaches of Heihe River Basin[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(2): 126-129.
- [5] 王国梁,刘国彬,党小虎.黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):31-35.
Wang G L, Liu G B, Dang X H. Effects of land use on soil moisture in loess hilly and Gully Region of China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(2): 31-35.
- [6] 胡良军,邵明安.黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J].应用生态学报,2002,13(8):1045-1048.
Hu L J, Shao M A. Review on water eco-environment in vegetation restoration in Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(8): 1045-1048.
- [7] 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.
Chen H S, Shao M A, Wang K L. Water cycling characteristics of grassland and bare land soils on Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10): 1853-1857.
- [8] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版社,2000.
Yang W Z, Shao M A. Study on Soil Moisture in Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [9] 杨文治.黄土高原土壤水资源与植树造林[J].自然资源学报,2001,16(5):433-438.
Yang W Z. Soil water resources and afforestation in Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(5): 433-438.
- [10] 刘佩伶,陈乐,刘效东,等.鼎湖山不同演替阶段森林土壤水分时空变异研究[J].生态学报,2021,41(5):1798-1807.
Liu P L, Chen L, Liu X D, et al. Temporal and spatial variability of soil moisture in a forest succession series in Dinghushan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1798-1807.
- [11] 陈维梁,王树学,齐统祥,等.黄土丘陵区不同恢复年限人工刺槐林土壤水分时空动态及其时间稳定性[J].生态学报,2021,41(14):5643-5657.
Chen W L, Wang S X, Qi T X, et al. Spatiotemporal dynamics and temporal stability of soil moisture at black locust plantations with different restoration years on hilly region of the Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5643-5657.
- [12] 潘竞虎,刘春雨.基于 TSEB 平行模型的黄土丘陵沟壑区蒸散发遥感估算[J].遥感技术与应用,2010,25(2):

- 183-188.
- Pan J H, Liu C Y. Retrieving evapotranspiration of loess hilly-gully region using TSEB parallel model based on remote sensing image[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(2): 183-188.
- [13] 王翼龙.黄土高原半干旱区两典型林分主要树种光合耗水特性及影响因素研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
- Wang Y L. Characteristics of Photosynthesis and Water Use of Dominant Tree Species in Two Typical Forests and Related Factors in the Semiarid Region of Loess Plateau, China[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [14] 王晶,朱清科,刘中奇,等.黄土丘陵区不同林地土壤水分动态变化[J].水土保持研究,2011,18(1):220-223.
- Wang J, Zhu Q K, Liu Z Q, et al. Dynamics of soil water content under different forestland in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(1): 220-223.
- [15] 郭利军,王百田,王旭虎.晋西黄土区土地利用类型对阳坡土壤水分特征的影响[J].应用与环境生物学报, 2020,26(3):643-648.
- Guo L J, Wang B T, Wang X H. How land-use types affect the soil moisture characteristics of sunny slopes in the loess area of western Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2020, 26(3): 643-648.
- [16] 陈晓燕.大青山前山区主要植被类型土壤水分动态和植被承载力研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学, 2010.
- Chen X Y. Study on Soil Water Dynamics and Vegetation Carrying Capacity of Main Vegetation Types in Former Area of Daqing Mountain[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- [17] Cheng R R, Chen Q W, Zhang J G, et al. Soil moisture variations in response to precipitation in different vegetation types: A multi-year study in the Loess Hilly Region in China[J]. Ecohydrology, 2020, 13(3): e2196.
- [18] 丁文斌,王飞.植被建设对黄土高原土壤水分的影响[J].生态学报,2022,42(13):5531-5542.
- Ding W B, Wang F. Effects of vegetation construction on soil moisture in Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5531-5542.
- [19] 程然然.黄土丘陵区两典型天然林和人工林生态水文过程研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2020.
- Cheng R R. Eco-Hydrological Processes in Two Typical Natural Forests and Artificial Forests in the Loess Hilly Region of China[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [20] 白天路,杨勤科,申佳.黄土高原丘陵沟壑小流域土壤水分垂直分布变异特征及影响因子[J].生态学杂志, 2009,28(12):2508-2514.
- Bai T L, Yang Q K, Shen J. Spatial variability of soil moisture vertical distribution and related affecting factors in hilly and gully watershed region of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(12): 2508-2514.
- [21] 李剑,赵忠,袁志发,等.黄土高原刺槐林地土壤水分垂直分布特征及其动态模型的建立[J].西北植物学报, 2014,34(8):1666-1675.
- Li J, Zhao Z, Yuan Z F, et al. Dynamic model of soil moisture of *Robinia pseudoacacia* plantations in the Loess Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(8): 1666-1675.
- [22] 何福红,黄明斌,党廷辉.黄土高原沟壑区小流域土壤水分空间分布特征[J].水土保持通报,2002,22(4):6-9.
- He F H, Huang M B, Dang T H. Soil water distribution characteristics in Wangdonggou watershed in Gully Region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22(4): 6-9.
- [23] 王迪海,赵忠,张彦.黄土高原刺槐细根与土壤水分特征[J].西北林学院学报,2012,27(1):1-5.
- Wang D H, Zhao Z, Zhang Y. The fine root of *Robinia pseudoacacia* and soil moisture in the Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(1): 1-5.
- [24] 岳宏昌,王玉,李缠云,等.黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直分布研究[J].水土保持通报,2009,29(1):66-69,82.
- Yue H C, Wang Y, Li C Y, et al. Vertical distribution of soil moisture in the loess hilly and gully area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(1): 66-69, 82.
- [25] 邱德勋,赵佰礼,尹殿胜,等.黄土丘陵沟壑区土壤水分垂直变异及影响因素[J].中国水土保持科学(中英文), 2021,19(3):72-80.
- Qiu D X, Zhao B L, Yin D S, et al. Vertical variation of soil moisture in the loess hilly and Gully Region and its influence factors[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(3): 72-80.
- [26] 李洪建,王孟本,柴宝峰.黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J].应用生态学报,2003,14(4):515-519.
- Li H J, Wang M B, Chai B F. Spatial and temporal

- characteristics of soil moisture dynamics in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(4): 515-519.
- [27] 邱扬,傅伯杰,王军,等.黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子[J].应用生态学报,2001,12(5):715-720.
- Qiu Y, Fu B J, Wang J, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture content on the Loess Plateau, China and its relation to influencing factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 715-720.
- [28] 杜康,张北赢.黄土丘陵区不同土地利用方式土壤水分变化特征[J].水土保持研究,2020,27(6):72-76.
- Du K, Zhang B Y. Characteristics of soil moisture variation in different types of land uses in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(6): 72-76.
- [29] 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):765-774.
- Tang M, Zhao X N, Gao X D, et al. Characteristics of soil moisture variation in different land use types in the hilly region of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 765-774.
- [30] 姚雪玲,杨国靖,王帅,等.黄土丘陵沟壑区不同深度土壤水分对降雨的响应及其稳定性[J].干旱区地理,2021,44(2):507-513.
- Yao X L, Yang G J, Wang S, et al. Soil moisture response and stability to rainfall in different depths in Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 507-513.
- [31] Yu Z B, Carlson T N, Barron E J, et al. On evaluating the spatial-temporal variation of soil moisture in the Susquehanna River Basin [J]. Water Resources Research, 2001, 37(5): 1313-1326.
- [32] Wang C, Fu B J, Zhang L, et al. Soil moisture-plant interactions: An ecohydrological review[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(1): 1-9.
- [33] Hsu H, Lo M H, Guillo B P, et al. Relation between precipitation location and antecedent/subsequent soil moisture spatial patterns[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(12): 6319-6328.
- [34] 王正安,邸利,王彦辉,等.六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分对降雨的响应[J].干旱区资源与环境,2018,32(4):144-151.
- Wang Z A, Di L, Wang Y H, et al. Response of soil moisture to rainfalls in a semi-arid larch forest in Liupan Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(4): 144-151.

(上接第169页)

- [26] 宋维峰,陈丽华,刘秀萍.林木根系固土的理论基础[J].水土保持通报,2008,28(6):180-186.
- Song W F, Chen L H, Liu X P. Review of theories of soil reinforcement by root system in forest[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(6): 180-186.
- [27] 冯旭环,周璐,熊伟,等.大渡河干热河谷区本土优势灌木植物根系的抗拉力学特性及其影响因素研究[J].干旱区资源与环境,2023,37(7):159-169.
- Feng X H, Zhou L, Xiong W, et al. Tensile mechanical properties of the roots of the native shrubs and herbs in the dry-hot valley of Dadu River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(7): 159-169.
- [28] 吕春娟.乔木根系抗拉力学特性及其与化学成分关系[D].北京:北京林业大学,2013.
- Lü C J. Tensile Properties of Tree Roots and Their Relationship with Chemical Composition[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.
- [29] 杜文志,陈超群,庞学勇,等.我国道路边坡植被修复的研究进展[J].应用生态学报,2023,34(12):3437-3446.
- Du W Z, Chen C Q, Pang X Y, et al. Research progress on vegetation restoration of road slopes in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(12): 3437-3446.
- [30] 刘武江,赵赓柯,段青松,等.不同播种方式草本植物土壤团聚体特征及对根系固土力的影响[J].水土保持研究,2021,28(6):25-31,38.
- Liu W J, Zhao Y K, Duan Q S, et al. Effects of different sowing patterns of herbs on soil aggregates characteristics and consolidating soil ability of roots[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 25-31, 38.