

桥山林区不同林分和坡位土壤水分对典型降雨的响应

郭义选, 李婧, 徐国策, 张译心, 陈曦, 谷丰佑, 王斌

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: [目的]降雨是土壤水分补给的主要来源,直接影响着土壤水分的分布特征,进而影响植被的生长状况,为探明桥山林区不同林分和坡位土壤水分对典型降雨的响应规律。[方法]以黄土高原南部桥山林区为研究对象,通过对典型林分(阔叶纯林和针阔混交林)不同土层深度土壤水分和降雨的监测,探究不同植被覆盖和坡位条件下的各层土壤水分体积分数对典型降雨的响应特征。[结果]1)研究期,降雨量主要集中在 8 月、9 月、10 月,其中 9 月的降雨量最大为 251.7 mm。各样点同一土层的土壤水分体积分数季节性差异显著($p \leq 0.05$),不同土层的平均土壤水分体积分数均在夏季最低。2)中雨事件仅浅层土壤水分体积分数对降雨发生响应,针阔混交林土壤水对降雨的响应强度>阔叶纯林。3)大雨事件土壤水对降雨的响应为针阔混交林大于阔叶纯林,不同坡位的响应关系为浅层坡下>坡中>坡上,深层坡上>坡中>坡下。4)暴雨事件土壤水对降雨的响应为阔叶纯林大于针阔混交林,不同坡位的响应关系为浅层坡下>坡中>坡上,深层坡上>坡中>坡下。5)在 3 场降雨中针阔混交林的补给量分别为纯阔叶林的 1.55、1.65、1.00 倍。[结论]探究桥山林区土壤水分对降雨的响应和浅层土壤水运动的过程,对桥山林区坡面降雨资源的优化配置和森林生态系统可持续恢复具有重要意义。

关键词: 土壤水分; 降雨响应; 桥山林区; 林分类型

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0084-10

Response of Soil Moisture to Typical Rainfall at Different Stands and Slope Sites in Qiaoshan Forest Region

GUO Yixuan, LI Jing, XU Guoce, ZHANG Yixin, CHEN Xi, GU Fengyou, WANG Bin

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: [Objective] Rainfall is the main source of soil water supply, which directly affects the distribution characteristics of soil water, and then affects the growth of vegetation, to explore the response of soil moisture to typical rainfall at different stands and slope sites in Qiaoshan forest region. [Methods] The Qiaoshan forest area on the southern Loess Plateau was taken as the research object. Through monitoring the rainfall and soil moisture at different depths of typical stands (broad-leaved pure forest and mixed forest), the response characteristics of soil moisture at different layers to rainfall patterns under different vegetation cover and slope location conditions were explored. [Results] 1) Rainfall during the study period was mainly concentrated in August, September and October, with the highest rainfall being 251.7 mm in September. The seasonal differences in soil moisture in the same soil layer at different points were significant ($p \leq 0.05$), and the average soil moisture in all soil layers was the lowest in summer. 2) During moderate rainfall events, only shallow soil moisture content responded to rainfall, and the response intensity of soil moisture content to rainfall in mixed forest was greater than that in broad-leaved pure forest. 3) In the event of heavy rain, the response of soil moisture to rainfall was greater in the mixed forest than in the pure broad-leaved forest, and

收稿日期: 2024-07-18

修回日期: 2024-09-26

录用日期: 2024-10-02

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-11-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(42277191); 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(23JY057)

第一作者: 郭义选(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态水文与土壤水研究。E-mail: gyx15531088330@163.com

通信作者: 李婧(1986—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事水土保持与生态水文研究。E-mail: lijing8615@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

the response relationship was as follows: lower slope > middle slope > upper slope for the shallow layer, and upper slope > middle slope > lower slope for the deep layer. 4) In the event of heavy rainfall, the response of soil moisture to rainfall was greater in broad-leaved pure forest than in mixed broad-leaved forest, and the response relationship was as follows: lower slope > middle slope > upper slope for the shallow layer, and upper slope > middle slope > lower slope in the deep layer. 5) In the three rainfall events, the supplement amount of the mixed forest was 1.55, 1.65 and 1.00 times that of the pure broad-leaved forest, respectively. [Conclusion] It is of great significance to study the response of soil moisture to rainfall and the process of shallow soil moisture movement in Qiaoshan forest area for optimal allocation of rainfall resources and sustainable restoration of forest ecosystems.

Keywords: soil moisture; rainfall response; Qiaoshan forest area; vegetation type

Received: 2024-07-18

Revised: 2024-09-26

Accepted: 2024-10-02

Online(www.cnki.net): 2024-11-05

土壤水是陆地水体的重要组成部分之一,是联系地下水与地表水的纽带^[1-2],土壤水对于植被生长起着决定性的作用,特别是在干旱半干旱地区,土壤水分的补给量是决定土壤水分承载力大小的物质基础^[3-4]。降雨是土壤水分补给的重要来源之一,降雨入渗对土壤水分体积分数有显著影响^[5-6],其决定着土壤水分的分布特征,进而影响植被的生长状况和区域的植被承载力大小,因此,研究降雨条件下不同植被类型土壤水分体积分数的变化对探究土壤内部机理具有重要意义。

近年来,许多学者对不同区域、不同土地利用方式、不同植被覆盖、不同坡位等条件下的土壤水对降雨的响应进行研究。有研究^[7-8]表明,上层土壤水分的空间分布相对比较均质,而下层土壤水分的空间异质性较强,且土壤水分体积分数具有垂直梯度变化,随着土层深度的增加,土壤水分体积分数对降雨的响应逐渐呈现滞后现象。袁二双等^[9]对喀斯特林地冬季土壤水分对降雨的响应特征进行研究分析表明,冬季土壤水分随降雨强度和降雨量的增加,响应时间加快,在降雨强度相同的情况下,林地各土层土壤水分响应时间冬季快于非冬季;王佳珍等^[10]在南小河沟径流场开展对不同土地利用方式下次降雨对深层土壤水分体积分数变化的影响研究表明,林地降雨特征因子与土壤水分体积分数的关联程度总体较好,农地和草地次之,裸地最差,说明相对于裸地,林地、草地和农地对土壤水分的调控作用较大。此外,黄土高原是水土流失最为典型的地区之一,国家在此开展大规模的退耕还林草工程,显著改善区域生态环境。由于黄土高原土层深厚,受植被、降水、蒸散发等影响,土壤水分在垂直剖面上的变化规律表现为随土层深度的增加,土壤水分呈先减少后增加趋势^[11]。表明不同区域土壤水对降雨都有着良好的响应,且在黄土高原研究土壤水对降雨响应主要集中在季节或年际变化特征,针对黄土高原林区次降雨条件下土壤水的响

应关系研究较少,缺少在次降雨过程中黄土高原林区的土壤水分体积分数的动态变化过程,因此,研究桥山林区不同林分和坡位下的土壤水分体积分数对典型降雨的响应具有重要意义。

黄土高原南部桥山林区以麻栎纯林、麻栎阔叶混交林、麻栎油松针阔混交林构成的当地独特的森林景观^[12],对当地水土保持、水源涵养、保护生物多样性等方面发挥着重要作用^[13]。本研究通过对开展土壤水分和典型林分(阔叶纯林和针阔混交林)的相关监测,以林区坡上、坡中、坡下 6 个样点为研究对象,分析不同土层土壤水分对降雨的响应关系,为揭示黄土高原桥山林区典型林分水分变化过程提供科学支撑,为桥山林区林分优化配置提供理论参考^[14-16],对构建合理的生态水文格局和提高黄土高原林草质量具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市黄陵县南峪口流域内(108°58′50″~108°59′10″E, 35°38′07″~35°38′26″N。)的桥山林区双龙林场(图 1a)。桥山林区是陕西省五大林区之一,地处陕北黄土高原丘陵沟壑区,海拔 900~1 500 m,平均海拔 1 200 m。桥山林区属暖温带半湿润季风气候,年平均降水量 612.3 mm,年平均气温 9.2 °C,最高气温 39.4 °C,最低气温 -22.7 °C,降水主要集中在夏季,年相对湿度 60%。林区土壤类型主要为森林褐土和灰褐土,土壤有机质的积累比较丰富,腐殖质质量分数为 3.6%~7.5%,适宜于林木生长。地带性植被是暖温带落叶阔叶林及针叶林。阔叶林以栎类为主,针叶林主要是油松,形成以上树种为主的成片分布的麻栎阔叶纯林(Broad-leaved pure forest of *Quercus acutissima*)和麻栎油松针阔混交林(Mixed forest of *Q. Acutissima* with *Pinus tabulaeformis*)。

1.2 数据来源与分析

在林场内选取植被分布差异明显的坡面布设 2

条土壤水分监测系统,林地类型为阔叶纯林(B)和针阔混交林(M),每条林带沿坡上、中、下布设 M1、M2、M3、B1、B2、B36 个观测样点(图 1b),坡度约为 30°。样点采用土壤水分多层监测系统(智墒 ET200)实时动态监测土壤水分,每 10 cm 土层布设有水分、温度等传感器,共 100 cm,间隔 1 h 采集 1 次数据,自 2021 年 8 月 1 日至 2022 年 7 月 31 日,共 365 d。由于土壤表层对降雨响应剧烈,而深层对降雨响应不明显,因此,选取 10、20、30、50、70、100 cm 土层作为研究对象,并且将 100 cm 土层深划分为浅层(0~50 cm)和深层(50~100 cm)来讨论土壤水分对降雨的响应关系。

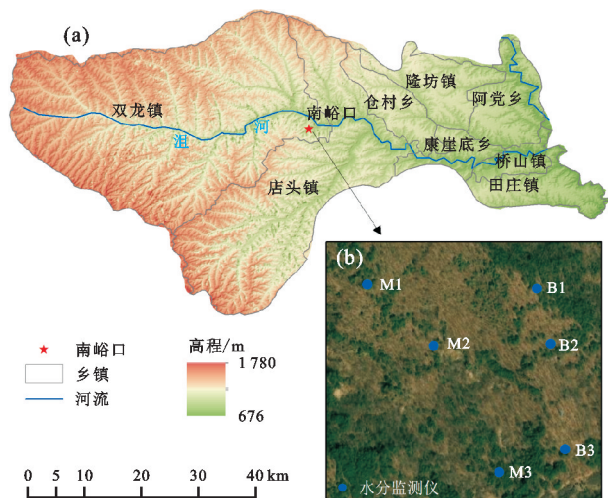


图 1 研究区概况

Fig.1 General situation of the study area

林场内设有双龙林场气象站,对当地降雨实时监测,每 1 h 获取 1 组数据,有降雨量、太阳辐射强度、空气湿度、空气温度等。在土壤水分在线监测仪附近布设土壤剖面(长 1 m、宽 0.5 m、深 1 m),用环刀每隔 10 cm 土层采集土样,采样土层深度 100 cm 土层,每层 3 个重复,密封放置于铝制小盒内,土壤样品带回实验室后测定土壤基本性质。

对土壤水分随时间的变化特征分析,得出变异系数可反映土壤水分随降雨的响应幅度,其计算公式为:

$$CV = \frac{\sigma}{\alpha} \times 100\% \quad (1)$$

式中:CV 为变异系数; σ 为标准差; α 为平均值。

土壤蓄水量为不同土层中存储的土壤水分体积分数,其计算公式为:

$$SWS_i = SWC_i \times h_i \quad (2)$$

$$SWS = \sum_{i=1}^{10} SWS_i \quad (3)$$

式中:SWS 为 1 m 土层土壤蓄水量,mm;SWS_i 为第 i 层土壤蓄水量,mm;SWC_i 为第 i 层土壤水分体积分数,%;h_i 为土层厚度,mm。

土壤水分的消耗与补给量指某次降雨事件后,土壤剖面中存储的水分体积分数变化值,其计算公式为:

$$SWD = SWS_i - SWS_0 \quad (4)$$

式中:SWD 为土壤水分的补给量,mm;SWS_i 为降雨后土壤蓄水量,mm;SWS₀ 为降雨前土壤蓄水量,mm。

$$v = \frac{\Delta SWS_i}{\Delta t} \quad (5)$$

式中:v 为土壤水补给速率,mm/h;ΔSWS_i 为降雨后第 i 层土壤蓄水量最大值与初始值的差值;Δt 为降雨开始后第 i 层土壤蓄水量达到最大值所需要的时间,h。

2 结果与分析

2.1 年降水特征

研究区 2021 年 8 月至 2022 年 7 月的降水量变化特征见图 2。研究期内降水量丰富且具有明显的季节分配不均的特征,年降雨总量为 1 012.1 mm,降水量主要集中在 8—10 月,其中,9 月降雨量最大,达到 251.7 mm,8 月、9 月和 10 月降水占比分别为 13.27%、24.87% 和 22.96%。较小的月份为 2021 年 11 月至 2022 年 2 月,月降水量不足 10 mm。全年最大日降雨量为 2021 年 10 月 3 日,降雨量达到 100.67 mm。

参考中国气象局对 24 h 雨量等级划分(表 1),可将降雨类型划分为小雨(<10 mm)、中雨(10~25 mm)、大雨(25~50 mm)和暴雨(50~100 mm)。

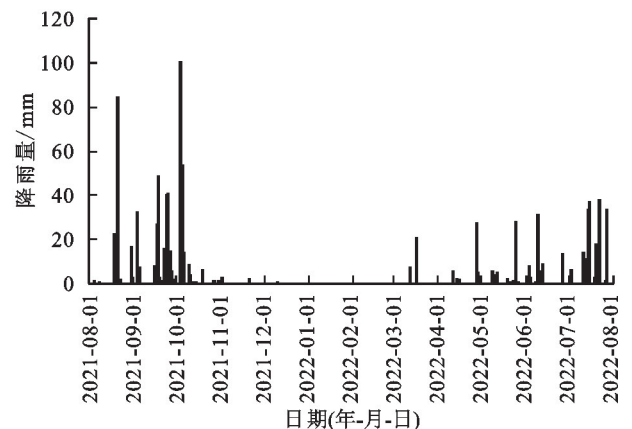


图 2 年降雨量分布

Fig.2 Annual rainfall distribution map

2.2 土壤含水量时空分布特征

不同林分各土层土壤水分的季节差异见表 2、各样点同一土层的土壤水分体积分数季节性差异显著($p \leq 0.05$)。不同土层的平均土壤水分体积分数在夏季最低,浅层(≤ 50 cm)土壤水分体积分数在秋季最高,深层(> 50 cm)土壤水分体积分数在冬季最高。在不同林地里,春夏季 0~1 m 土层土壤储水体积分数为 B1>M3>M1>B3>M2>B2,秋冬季 0~1 m 土层土壤储水体积分数为 M3>B1>M1>B3>M2>B2。

表 1 不同降雨类型特征

Table 1 Characteristics of different rainfall types

降雨类型	频数	累计降雨量/mm	平均降雨量/mm	最大 1 h 雨强/(mm·h ⁻¹)	平均雨强/(mm·h ⁻¹)	累计降雨历时/h	平均降雨历时/h
小雨	83	154.47	1.86	4.21	0.57	228	2.74
中雨	13	205.32	15.79	22.24	2.60	98	7.53
大雨	13	466.76	35.90	27.63	5.05	145	11.15
暴雨	2	186.06	90.03	27.66	7.71	27	13.50

表 2 2 种林分各土层土壤水分体积分数

Table 2 Seasonal differences in soil moisture in each layer of the two stands

样点	季节	10 cm	20 cm	30 cm	50 cm	70 cm	100 cm
B1	秋季	22.63±2.85a	21.12±2.11a	14.95±1.77a	1.63±0.31ab	16.11±3.97b	20.52±5.30b
	冬季	19.12±1.12b	18.52±0.28b	13.64±0.14b	1.68±0.02a	16.88±0.19a	22.53±0.30a
	春季	19.01±1.98b	18.32±1.28b	12.83±1.00c	1.54±0.10b	16.50±0.55ab	22.18±0.46a
	夏季	15.61±5.18c	15.96±4.11c	10.46±3.09d	1.25±0.69c	12.21±2.30c	16.31±2.19c
B2	秋季	22.86±3.11a	19.30±1.68a	13.34±1.106a	1.27±0.16ab	3.82±0.79a	4.05±1.03b
	冬季	16.93±2.70b	17.65±0.45b	12.39±0.10b	1.29±0.02a	3.91±0.02a	4.32±0.04a
	春季	16.33±2.82b	16.87±1.70c	11.70±1.12c	1.23±0.12b	3.74±0.25a	4.15±0.16b
	夏季	14.39±5.38c	14.12±4.34d	9.55±3.14d	0.84±0.32c	2.57±0.88b	2.91±0.49c
B3	秋季	14.83±2.00a	22.72±1.88a	22.68±1.95a	13.76±2.38b	4.76±1.21b	3.43±0.98a
	冬季	10.68±2.76b	20.82±1.19b	22.26±0.25a	14.33±0.09a	5.23±0.04a	3.99±0.04b
	春季	12.08±1.80c	21.55±1.10b	22.50±0.72a	14.52±0.36a	5.20±0.09a	3.83±0.07c
	夏季	9.23±4.06d	17.16±5.16c	16.82±4.72b	9.88±2.75c	3.70±0.81c	2.73±0.55d
M1	秋季	23.72±3.93a	12.31±1.52a	6.57±0.75a	3.22±0.64b	19.14±4.43a	29.84±4.47a
	冬季	16.58±3.14b	10.53±0.23b	6.32±0.08a	3.44±0.09a	19.56±0.17a	30.10±0.25a
	春季	15.53±4.74b	8.77±2.01c	5.14±1.06b	2.79±0.43c	17.77±1.77b	29.54±0.94a
	夏季	13.90±6.41c	8.14±3.07d	4.30±1.65c	2.08±0.93d	14.43±5.15c	25.48±3.07b
M2	秋季	20.76±2.70a	12.54±1.13a	13.91±1.06a	7.00±0.82a	7.00±1.39a	6.93±1.85b
	冬季	13.05±3.45c	10.26±0.90b	12.94±0.26b	6.60±0.08b	7.08±0.07a	7.39±0.07a
	春季	15.30±1.58b	10.85±0.66c	13.17±0.51b	6.82±0.25ab	7.07±0.21a	7.38±0.12a
	夏季	13.85±4.53c	9.46±2.93d	11.08±2.87c	5.46±1.57c	5.26±1.38b	5.30±1.23c
M3	秋季	25.91±3.41a	12.94±1.43a	6.43±0.73a	17.12±2.91a	17.96±4.37a	23.29±5.78b
	冬季	14.45±3.87b	10.30±0.98b	5.96±0.34b	16.79±0.29a	18.86±0.27b	25.02±0.27a
	春季	15.14±3.45b	9.89±1.25bc	5.22±0.59c	14.58±1.96b	16.83±1.67c	23.76±1.21b
	夏季	14.66±6.97b	9.50±3.52c	4.59±1.54d	11.28±3.24c	12.24±2.93d	16.63±2.08c

注:数据为平均值±标准差;不同字母表示 2 种林分各点相同土层深度土壤水分体积分数季节性差异显著($p \leq 0.05$)。

针阔混交林与阔叶纯林 6 个点位的平均土壤水分体积分数随土层深度的分布差异见图 3。2 种林区在坡上与坡中的变化趋势大致相同,坡下的分布差异较大。坡上 2 个点位随土层深度增加呈先减少后增加趋势,在 50 cm 土层水分体积分数最小,分别为 2.87% 和 1.51%;坡中在 0~40 cm 土层呈减少趋势,针阔混交林 M 减少到 4.68% 后开始波动,且整体趋势略微增长,阔叶纯林 B 减少到 2.55%,之后至 80 cm 土层增长到 5.32% 后再发生波动;坡下土壤水分体积分数分布差异较大,针阔混交林与其坡上变化趋势相同,呈先减少后增加趋势,而阔叶纯林与其他点位均不同,呈先增加后减少,在 40 cm 土层达到极小值 7.92%,后产生波动降低到 3.50%。

2.3 土壤水分对典型降雨事件的动态响应

为进一步探究不同降雨类型下各土层土壤水分体积分数的动态变化特征及其对不同降雨响应的差异,在每个降雨类型中选择典型降雨,分析降雨前后各层土壤水分体积分数的动态变化特征及其对典型降雨的响应差异。当发生 <10 mm 小雨时,土壤水分体积分数仅在表层 10 cm 土层发生微小变化,深层土壤水分体积分数不受影响,响应特征不明显。因此,选取 3 场典型降雨事件为 2022 年 3 月 16 日的中雨($p=20.64$ mm, $D=9$ h, $I_1=5.65$ mm/h)、2021 年 9 月 24 日的大雨($p=40$ mm, $D=6$ h, $I_1=13.81$ mm/h)、2021 年 10 月 3 日的暴雨($p=100.48$ mm, $D=16$ h, $I_1=26.21$ mm/h),结合每小时的降雨监测数

据和土壤水分监测数据,研究分析不同植被覆盖,不

同坡位下的各层土壤水分体积分数动态变化特征。

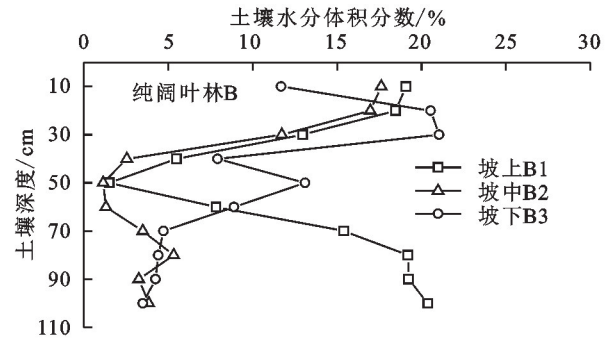
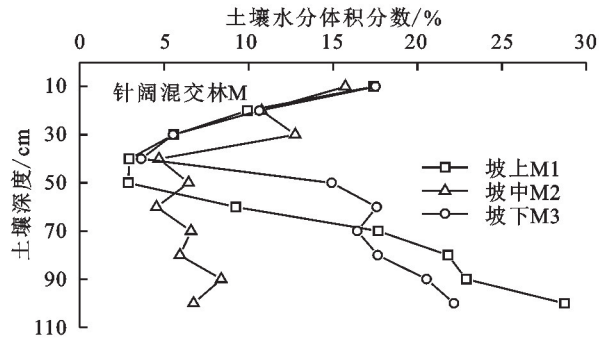


图 3 2 种林分平均土壤水分体积分数垂直变化

Fig.3 Vertical changes of average soil moisture in two stands

2.3.1 中雨事件 图 4 为中雨条件下不同点位各土层土壤水分对降雨的响应。根据对降雨事件的统计,此次降雨前于 3 月 12 日 03:00—04:00 有 1 场降

雨量为 7 mm 的小雨,之后到本次降雨期间无雨,并且本次降雨过后近 1 个月的时间内无降雨发生,可看作 1 次独立降雨事件。

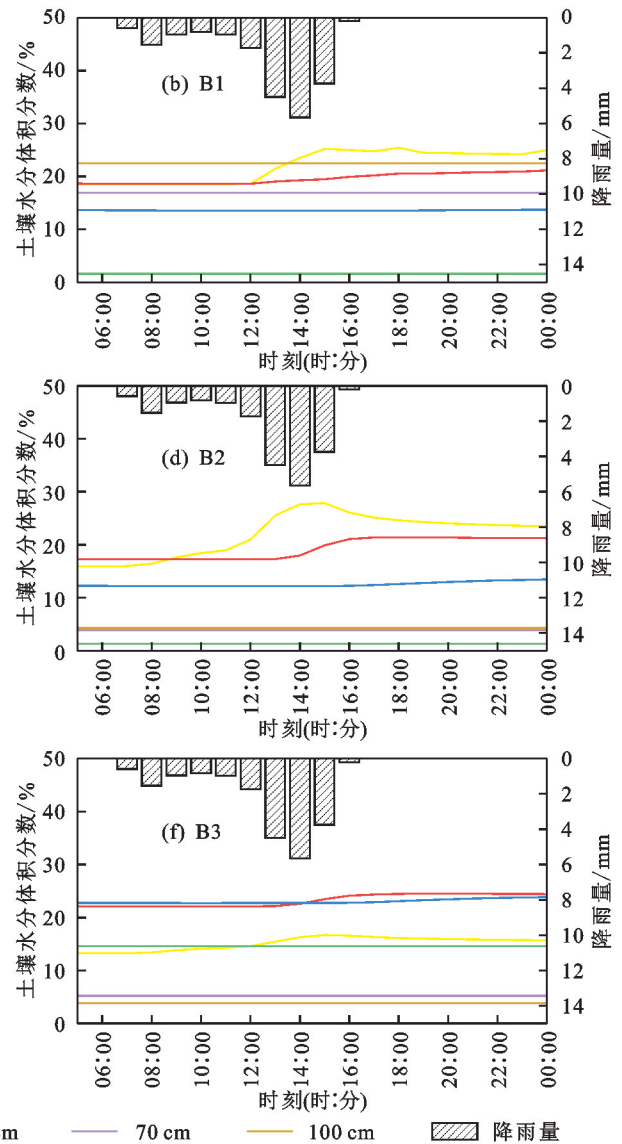
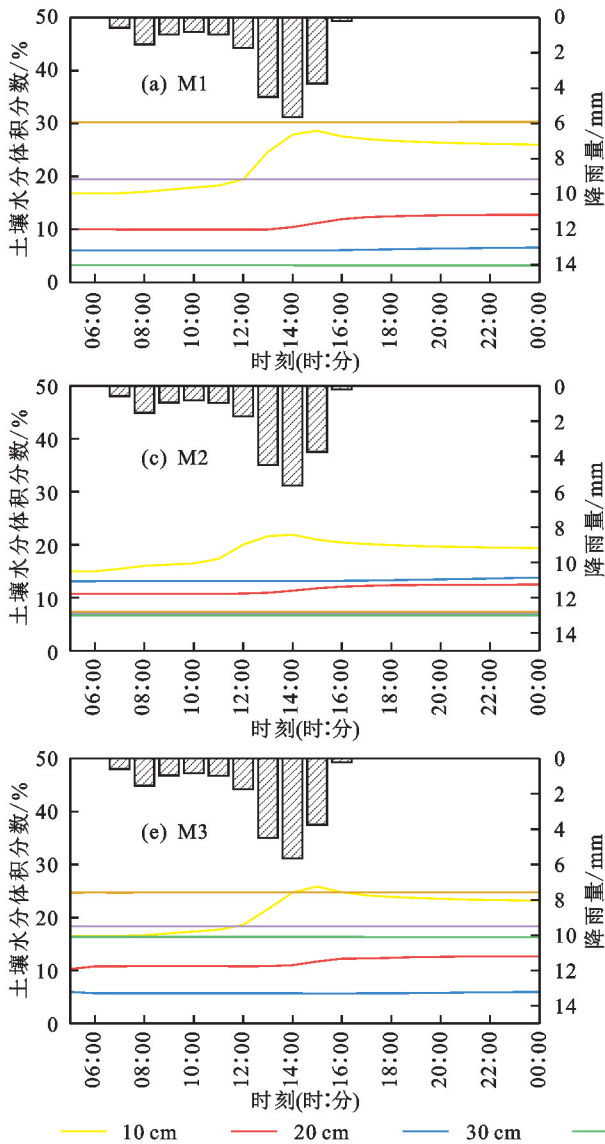


图 4 中雨条件下不同点位各层次土壤水分对降雨的响应

Fig.4 Response of soil moisture in different layers at different points to rainfall under moderate rainfall conditions

在中雨事件中,阔叶纯林与针阔混交林土壤水对降雨的响应趋势大致相同,降雨自 07:00 开始,14:00 达

到最大,16:00 结束,土壤水分体积分数在 12:00 开始明显增加,在 14:00 达到最大之后开始降低。计

算降雨过后不同土层深度土壤水分体积分数的变异系数可知,10 cm 土层土壤水分体积分数对降雨的响应幅度最大的是针阔混交林坡上点位 M1,之后依次为 B2、M3、M2、B1,阔叶林坡下点位 B3 响应幅度最小,20 cm 土层土壤水分对降雨的响应幅度最大的是阔叶林坡中 B2,最小的依旧为阔叶林坡下点位 B3,自 30 cm 土层以下的土壤水分体积分数对该次中雨事件响应较小。从整体来看,各层土壤对降雨的响应为针阔混交林>阔叶纯林,2 种林区自坡上、中、下各层土壤水对降雨的响应无明显规律。

2.3.2 大雨事件 图 5 为大雨条件下不同点位各土

层土壤水分体积分数对降雨的响应。此次降雨为发生在 2021 年 9 月 24 日的大雨,降雨量 $p=40$ mm,降雨历时 $D=6$ h,最大 1 h 雨强 $I_1=13.81$ mm/h。根据对降雨事件的统计,此次降雨前于 9 月 22 日 16 点至 9 月 23 日凌晨 05:00 发生 1 场历时 14 h 的中雨,由于其降雨历时长,平均每小时降雨量少,因此,忽略其对本次降雨的影响,之后到本次降雨期间无降雨发生,本次降雨过后 16 h 内无降雨发生。8—10 月研究区正处于雨季,降雨充沛,浅层土壤初始水分体积分数普遍高于旱季,尤其表层土层在此期间处于湿润状态。

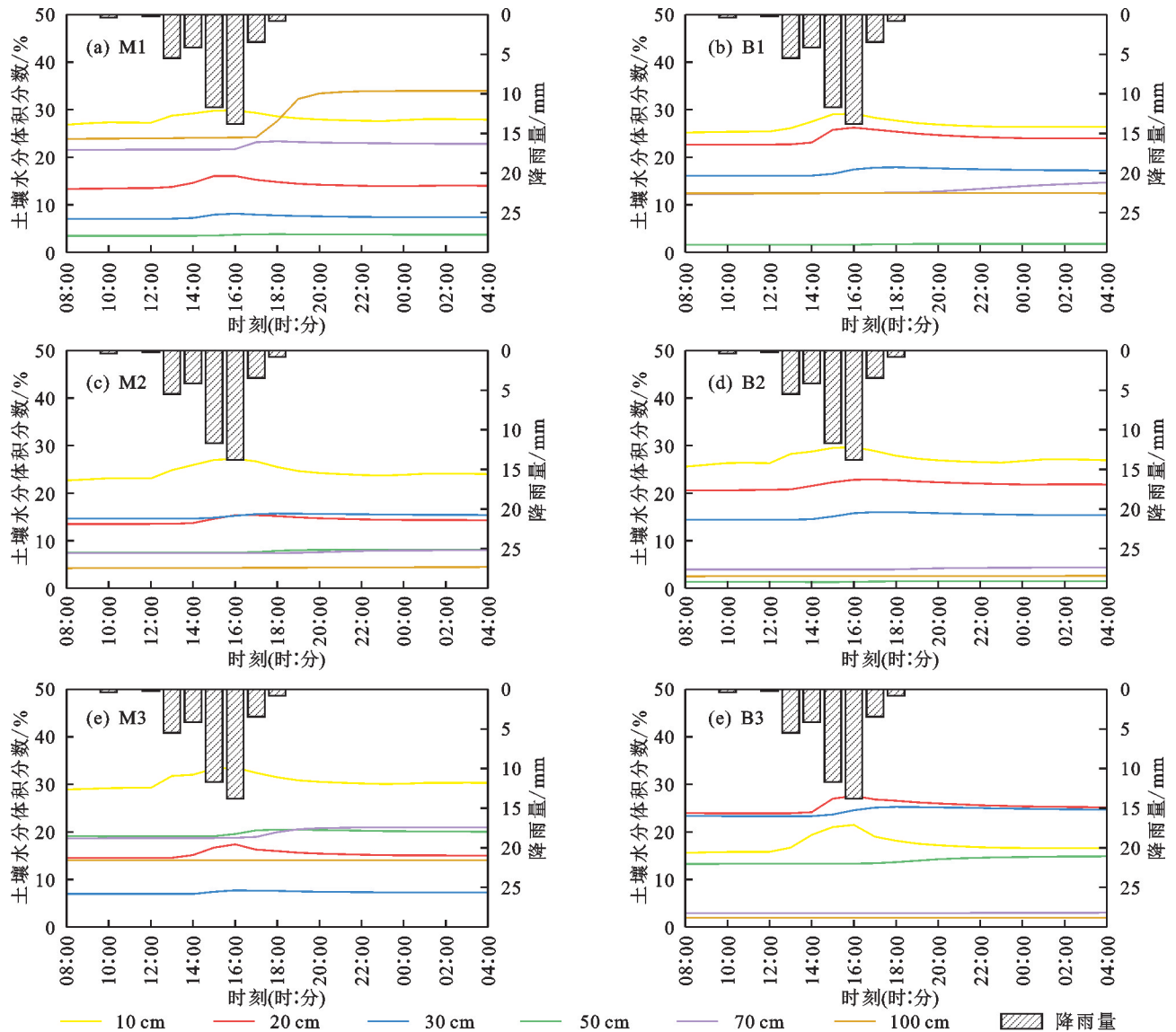


图 5 大雨条件下不同点位各层次土壤水分对降雨的响应

Fig.5 Response of soil moisture in different layers at different points to rainfall under heavy rainfall conditions

在大雨事件中,降雨自 12:00 开始,16:00 达到最大,18:00 结束,土壤水分体积分数的在 13:00 开始明显增加,在 16:00 达到最大,之后开始降低。阔叶纯林与针阔混交林浅层(10~50 cm)土壤对降雨的响应趋势大致相同,依据其变异系数的计算与

响应延迟对比得到,对降雨响应幅度最大的是 B3,之后依次为 M3、M2、B2、M1、B1,即 2 种林分浅层土壤水对降雨的响应为针阔混交林>阔叶纯林,坡下>坡中>坡上。深层(50~100 cm)土壤对降雨的响应趋势有所不同,响应幅度最大是 M1,之后依次为 B1、

M2、B2、M3、B3,即 2 种林分深层土壤水对降雨的响应为针阔混交林>阔叶纯林,坡上>坡中>坡下。

2.3.3 暴雨事件 图 6 为暴雨条件下不同点位各层次土壤水分对降雨的响应。此次降雨为 2021 年 10 月 3 日的暴雨,降雨量 $p=100.48$ mm,降雨历时 $D=18$ h,集中降雨时间为 6 h,最大 1 h 雨强 $I_1=26.21$ mm/h。根据

对降雨事件的统计,此次降雨前于 9 月 27 日 16:00 至次日 02:00 有 1 场历时 11 h 降雨量为 7.26 mm 的小雨,由于其降雨历时长,平均每小时降雨量少,忽略其对本次降雨的影响。本次降雨过后 5 h 内无降雨发生,后续 3 天内有持续降雨,最大 1 h 降雨量为 6.28 mm,平均每小时降雨量为 1.86 mm。

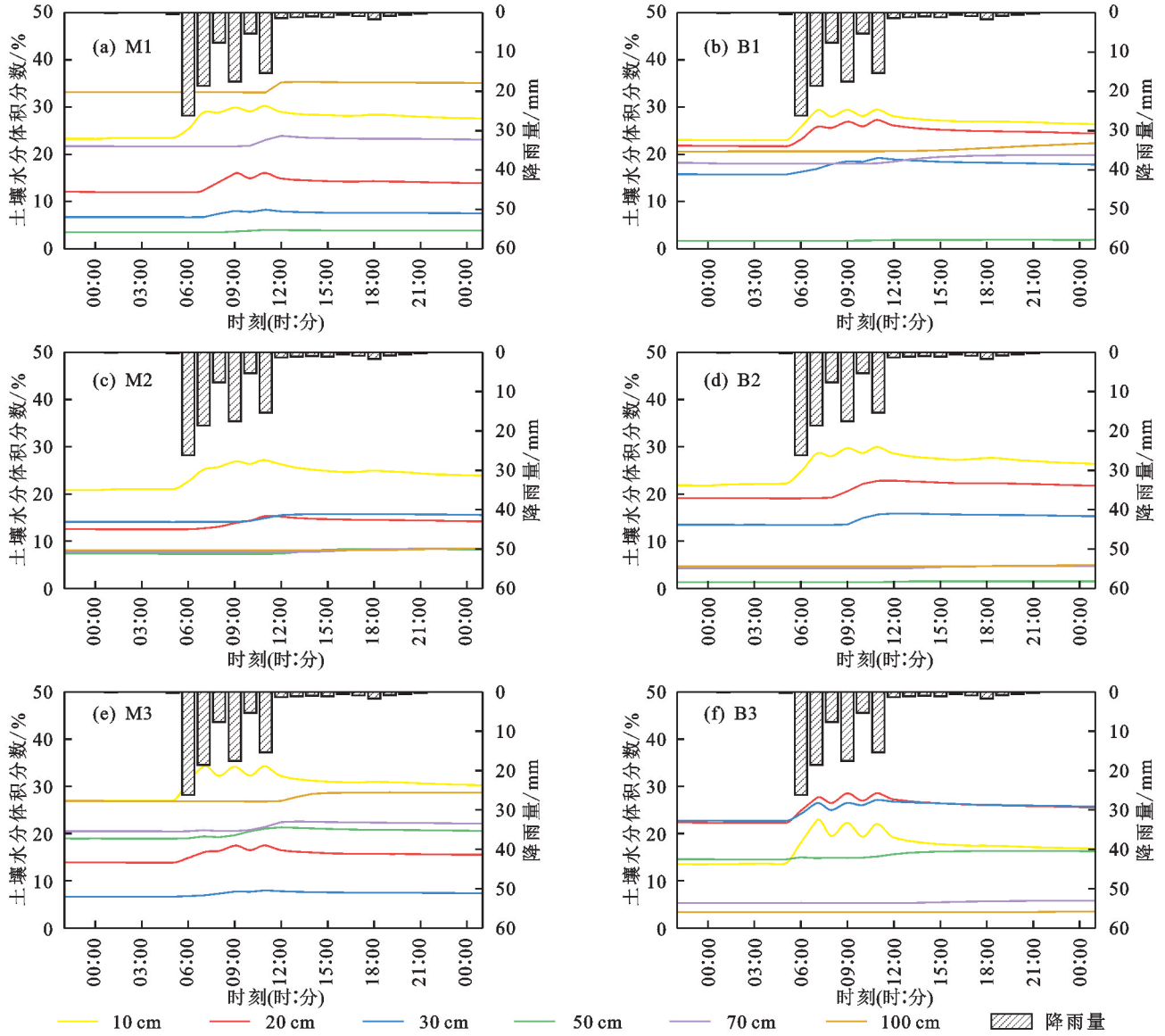


图 6 暴雨条件下不同点位各层次土壤水分对降雨的响应

Fig.6 Response of soil moisture in different layers at different points to rainfall under rainstorm conditions

在本次暴雨事件中,降雨主要集中在 06:00—11:00,降雨量的大小呈波动分布,土壤水分体积分数也随降雨量出现 3 个峰值。阔叶纯林与针阔混交林浅层(10~50 cm)土壤对降雨的响应趋势大致相同,依据其变异系数计算对比得到对降雨响应幅度最大的是 B3,之后依次为 B2、M1、M2、B1、M3,即 2 种林分浅层土壤水对降雨的响应为阔叶纯林>针阔混交林,坡下>坡中>坡上。深层(50~100 cm)土壤对降雨的响应趋势有所不同,响应幅度最大是 B2,之后依次为 M1、B1、M3、M2、B3,即 2 种林分深层土壤水对降雨的

响应为阔叶纯林>针阔混交林,坡上>坡中>坡下。

2.4 典型降雨条件下土壤水分补给特征

图 7 为 3 场典型降雨后各点 1 m 土层土壤水分的补给量,计算 3 场降雨前后各点土壤储水量的变化量,得到各点土壤水的补给量,针阔混交林的土壤水补给量均大于阔叶纯林,在 3 场降雨中其补给量分别为阔叶纯林的 1.55、1.65、1.00 倍。在中雨和大雨条件下针阔混交林的补给量均表现为坡上>坡下>坡中,阔叶纯林的补给量存在差异。在暴雨条件下均表现为坡上>坡下>坡中,其中,坡上与坡下补给量相

近且明显大于坡中。

表 3 为 3 场典型降雨能补给到不同土层的补给速率,中雨可补给到的最大土层深度为 30 cm,大雨和暴雨可以补给到 100 cm 土层。随着土层深度的增加,各点土壤水的补给速率逐渐减小,各点 10 cm 土层土壤水的补给速率差异性较小,自 20 cm 土层以下可发现,相同深度的补给速率表现为针阔混交林>阔叶纯林,坡上>坡下>坡中与土壤水补给量的差异性相同。

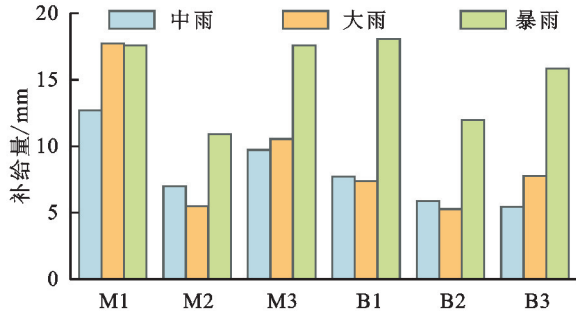


Fig.7 Soil moisture recharge at 1 m depth after typical rainfall

表 3 典型降雨后土壤水补给速率

Table 3 Soil moisture recharge rate after typical rainfall

样点	土层深度/cm	补给速率/(mm·h ⁻¹)					
		M1	M2	M3	B1	B2	B3
中雨	10	1.312	0.868	1.037	0.742	1.329	0.381
	20	0.194	0.131	0.146	0.129	0.379	0.207
	30	0.005	0.006	—	—	0.003	0.005
大雨	10	0.857	0.808	0.842	0.756	0.664	1.130
	20	0.640	0.372	0.574	0.720	0.432	0.734
	30	0.216	0.151	0.160	0.286	0.267	0.276
	50	0.046	0.054	0.200	0.014	0.020	0.050
	70	0.256	0.001	0.181	0.030	0.009	0.005
	100	0.519	0.010	0.008	0.002	0.007	—
暴雨	10	1.284	1.162	1.037	0.926	1.109	1.291
	20	0.786	0.394	0.517	0.79	0.534	0.891
	30	0.263	0.150	0.191	0.504	0.343	0.637
	50	0.390	0.066	0.301	0.116	1.293	0.112
	70	0.281	0.042	0.230	0.109	0.030	0.028
	100	0.311	0.012	0.129	0.070	0.011	0.004

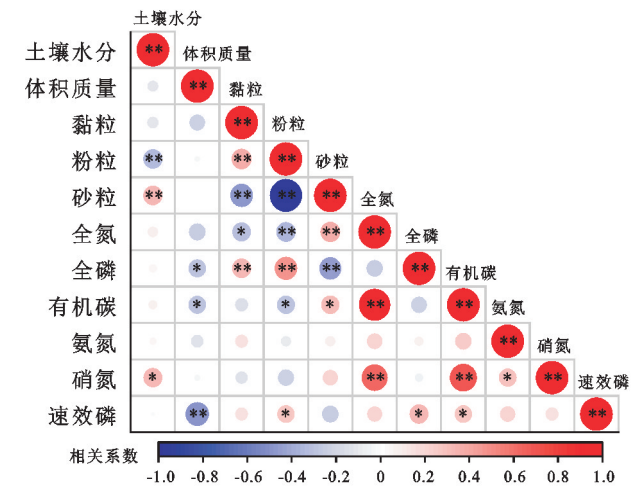
3 讨论

3.1 土壤水分体积分数的时空变化特征

各样点同一土层土壤水分季节性差异显著,不同土层的平均土壤水分体积分数在夏季最低,浅层土壤水分体积分数在秋季最高,深层土壤水分体积分数在冬季最高。春夏(4—10月)降雨充沛,降雨波动大,土壤水也随之波动,并在降雨量最大的 1 d 内土壤水分体积分数显著增加到最大值,降雨对土壤水分体积分数的变化有主要的影响作用。秋冬季(11—3月)降雨量极少,此时土壤水分体积分数并没有达到最低

值,反而是 1 a 中土壤水分体积分数最高的季节,可能是因为冬季气温低,且林区植被叶片已经凋落,在林区形成大约 10 cm 厚的枯枝落叶层,对土壤起到覆盖保护作用^[17-18],进而减弱土壤表层的蒸散发。同时,林区之前的枯枝落叶分解后在枯枝落叶层下地表上形成大约 2 cm 厚的腐殖质层,腐殖质与土壤颗粒结合后可形成更加稳固的团聚体结构^[19],使得土壤的持水性得到提高。林区植被密度较大,根系具有保水性^[20],秋冬季土壤水分存在冻融过程,降低土壤温度增加露水补给能有效提高土壤蓄水量^[21],因此,土壤水分体积分数在降雨较少的秋冬季节也可维持较高水平。

土壤水分体积分数在 0~1 m 土层的垂直变化主要表现为先降低后增加。造成此趋势的主要原因是土壤内部的理化性质,而土壤体积质量和孔隙度是反映土壤物理性质的重要参数,二者直接影响着土壤蓄水和透气性能^[22]。土壤水分体积分数与土壤粉粒呈反比(图 8),研究区不同土层的土壤结构中粉粒占比为 60%~90%,在 50 cm 土层粉粒占比普遍可达到 90%左右,砂砾占比为 0~4%,相比于其他土层较少,因此,土壤水分体积分数普遍在 50cm 左右深处于最小值。



注: *、** 分别表示 $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 。

图 8 土壤水分体积分数与土壤性质的相关矩阵

Fig.8 Correlation matrix between soil moisture and soil properties

3.2 土壤水分体积分数对降雨的响应关系

林区不同土层土壤水分体积分数的变化特征明显不同,浅层土壤水对降雨的响应剧烈,随着土层增加,土壤水对降雨的响应逐渐趋于平缓,甚至对降雨无响应,不发生变化。导致此差异的主要原因是降雨条件^[23]、土壤理化性质差异^[24]及植被根系保水特性^[19],且土壤持水力^[25-26]也是影响土壤水分入渗的一项重要因素。土壤表层是生物与气候的水分交换层,往往存在着蒸发、入渗、径流等循环过程,在自然界的水循环中起着重要作用,而大气降水作为影响土壤水分体积分数的

主要影响因子对表层的影响更为剧烈。

林区不同植被覆盖引起下垫面条件不同,土壤水分入渗情况存在差异,对降雨的响应有所不同。不同坡位的坡度不同,导致降雨开始后形成的地表径流和对地表侵蚀量不同,进一步影响土壤水分入渗,并且坡度不同引起阳光照射角度等水热差异,影响地表水分的蒸散发,从而影响土壤水分分布^[27]。

3.3 典型降雨土壤水分对降雨的响应

根据典型降雨事件对 2 种林地土壤水对降雨的响应分析,在中大雨情况下,土壤水对降雨的响应、土壤水分的补给量均表现为针阔混交大于阔叶纯林,在暴雨情况下针阔混交林与阔叶纯林的差异不大,说明针阔混交林土壤水对降雨的响应、蓄水量的补给均优于阔叶纯林。当降雨量增大到某一阈值时,2 种林区的差异性减弱,对降雨的响应近似相同。降雨量的大小、降雨历时、降雨强度和土层初始土壤水分体积分数对土壤水分的动态变化均有着显著影响,随着降雨量的增加,降雨对土壤水分的贡献率增加,各土层对降雨的响应也增大。降雨对表层土壤水分体积分数影响较大,随着土层的加深,土壤水对降雨响应所需的雨强也越大^[28]。

根据典型降雨事件对不同坡位的土壤水对降雨的响应分析,浅层表现为坡下>坡中>坡上,与何其华等^[29]、邱扬等^[30]对黄土高原中部相对高度及不同坡位土壤水分的变化结果相似,表明相对高度与土壤水分体积分数呈负相关,即随着相对高度的增加土壤水分体积分数呈降低趋势,从同一坡面自坡底到坡顶土壤水分也有类似的变化趋势。而深层表现为坡上>坡中>坡下,与部分研究结论相悖,还需进一步研究,而造成此原因可能是不同坡位土壤持水力^[25]、土壤体积质量、孔隙度和颗粒分布量等土壤物理性质存在明显差异。3 场典型降雨后发现,坡中的土壤水的补给量最低,而坡中的粉粒占比为 80.73%~95.47%,黏粒占比仅为 3.84%~4.57%,可能是因为该区域土壤水发生侧向补给。

4 结论

1) 在全年季节变化特征中,降雨量主要集中在 8 月、9 月、10 月,其中,9 月的降雨量最大为 251.7 mm。各样点同一土层土壤水分体积分数季节性差异显著($p < 0.05$),不同土层平均土壤水分体积分数均在夏季最低。

2) 在中雨事件中,浅层土壤水分体积分数对降雨发生响应,深层无响应。各样点土壤水对降雨的响应为针阔混交林>阔叶纯林。在大雨事件中,2 种林分浅层土壤水对降雨的响应为针阔混交林>阔叶纯林,坡下>坡中>坡上。深层土壤水对降雨的响应为针阔混交林>阔叶纯林,坡上>坡中>坡下。在暴雨事

件中,2 种林分浅层土壤水对降雨的响应为阔叶纯林>针阔混交林,坡下>坡中>坡上。深层土壤水对降雨的响应为阔叶纯林>针阔混交林,坡上>坡中>坡下。

3) 针阔混交林土壤水对降雨的响应、蓄水量的补给均优于阔叶纯林,当降雨量增大到某一阈值时,2 种林区的差异性减弱,对降雨的响应近似相同。典型降雨后,1 m 土层的土壤水针阔混交林的补给量分别为阔叶纯林的 1.55、1.65、1.00 倍,且坡上>坡下>坡中。

参考文献:

- [1] 雷志栋,胡和平,杨诗秀.土壤水研究进展与评述[J].水科学进展,1999,10(3):311-318.
LEI Z D, HU H P, YANG S X. A Review of soil water research [J]. Advances in Water Science, 1999, 10(3): 311-318.
- [2] TAROLLI P, LUCAS-BORJA M E, YU G Q, et al. New sciences and technologies in soil conservation and eco-sustainability[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2023, 11(2): 412-414.
- [3] 郭忠升,邵明安.雨水资源、土壤水资源与土壤水分植被承载力[J].自然资源学报,2003,18(5):522-528.
GUO Z S, SHAO M A. Precipitation, soil water and soil water carrying capacity of vegetation[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(5): 522-528.
- [4] 徐志尧,张钦弟,杨磊.半干旱黄土丘陵区土壤水分生长季动态分析[J].干旱区资源与环境,2018,32(3):145-151.
XU Z Y, ZHANG Q D, YANG L. Analysis of temporal variation of soil water in a growing season in semi-arid loess hilly area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(3): 145-151.
- [5] 高露,张圣微,朱仲元,等.干旱半干旱区退化草地土壤水分变化及其对降雨时间格局的响应[J].水土保持学报,2020,34(1):195-201.
GAO L, ZHANG S W, ZHU Z Y, et al. Soil moisture changes in degraded grassland and its response to rainfall temporal pattern in arid and semi-arid areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1): 195-201.
- [6] 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.
ZHANG J J, LI H M, XU J J. Soil moisture dynamics of water and soil conservation forest on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(23): 7056-7066.
- [7] 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.
YAO X L, FU B J, LÜ Y H. Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [8] 周怡雯,戴翠婷,杜映妮,等.三峡库区典型茶园土壤水分对不同降雨模式的响应[J].生态学报,2023,43(3):

- 1267-1275.
- ZHOU Y W, DAI C T, DU Y N, et al. Response of soil moisture in typical tea gardens to different rainfall regimes in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3): 1267-1275.
- [9] 袁二双, 周秋文, 严卫红, 等. 喀斯特林地冬季土壤水分对降雨的响应特征[J]. *生态科学*, 2023, 42(4): 56-63.
- YUAN E S, ZHOU Q W, YAN W H, et al. Response of soil moisture to rainfall in forest land in a karst region during winter season[J]. *Ecological Science*, 2023, 42(4): 56-63.
- [10] 王佳珍, 张秋芬, 彭华, 等. 不同土地利用方式下次降雨对土壤含水量深层变化的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 69-75.
- WANG J Z, ZHANG Q F, PENG H, et al. Impact of individual rainfall on the changes of soil water content in deep layer of different land uses[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(3): 69-75.
- [11] 乔江波, 朱元骏, 贾小旭, 等. 黄土高原关键带全剖面土壤水分空间变异性[J]. *水科学进展*, 2017, 28(4): 515-522.
- QIAO J B, ZHU Y J, JIA X X, et al. Spatial variability of soil water for the entire profile the critical zone of the Loess Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(4): 515-522.
- [12] 张维伟, 薛文艳, 杨斌, 等. 桥山栎林群落结构特征与物种多样性相关关系分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 3991-4001.
- ZHANG W W, XUE W Y, YANG B, et al. Differences in community characteristics, species diversity, and their coupling associations among three *Quercus acutissima* forests in Qiaoshan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 3991-4001.
- [13] 黄财智, 张文辉, 李罡, 等. 间伐强度对黄桥林区辽东栎林结实规律的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3413-3419.
- HUANG C Z, ZHANG W H, LI G, et al. Effect of thinning intensities on fruiting regularities of *Quercus liaotungensis* forests in Huanglong and Qiaoshan Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(11): 3413-3419.
- [14] SIMONSON W D, MILLER E, JONES A, et al. Enhancing climate change resilience of ecological restoration: A framework for action[J]. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 2021, 19(3): 300-310.
- [15] LIU Z, LAN J, LI W, et al. Reseeding improved soil and plant characteristics of degraded alfalfa (*Medicago sativa*) grassland in loess hilly plateau region, China[J]. *Ecological Engineering*, 2023, 190: e106933.
- [16] YE L P, FANG L C, SHI Z H, et al. Spatio-temporal dynamics of soil moisture driven by 'Grain for Green' program on the Loess Plateau, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019, 269: 204-214.
- [17] 许小明, 易海杰, 何亮, 等. 黄土高原地区林地枯枝落叶层水土保持效应研究进展[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 415-421.
- XU X M, YI H J, HE L, et al. Research advances on water and soil conservation effects of forest litter layer on the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 415-421.
- [18] 宝虎, 赵鹏武, 周梅, 等. 大兴安岭南段典型天然林枯枝落叶层及土壤层持水特性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(2): 175-181.
- BAO H, ZHAO P W, ZHOU M, et al. Water holding capacities of litters and soils in typical natural forests in south of Da Xing'an Mountains[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(2): 175-181.
- [19] 张晓曦, 刘增文, 朱博超, 等. 半干旱黄土丘陵区纯林土壤腐殖质异化特征及与其他性质的关系[J]. *生态学报*, 2015, 35(6): 1779-1787.
- ZHANG X X, LIU Z W, ZHU B C, et al. Humus differentiation and correlation with other soil properties under pure forest in semi-arid loess hilly area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(6): 1779-1787.
- [20] 高露, 张圣微, 赵鸿彬, 等. 退化草原土壤理化性质空间异质性及其对土壤水分的影响[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(3): 607-617.
- GAO L, ZHANG S W, ZHAO H B, et al. Spatial heterogeneity of soil physical and chemical properties in degraded grassland and their effect on soil moisture[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(3): 607-617.
- [21] XU G C, HUANG M S, LI P, et al. Effects of land use on spatial and temporal distribution of soil moisture within profiles[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(4): e128.
- [22] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 等. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 106-109.
- SUN Y H, ZHANG H J, CHENG J H, et al. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Jinyun Mountain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 106-109.
- [23] 刘宏伟, 余钟波, 崔广柏. 湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究[J]. *水利学报*, 2009, 40(7): 822-829.
- LIU H W, YU Z B, CUI G B. Pattern of soil moisture responding to precipitation in humid area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(7): 822-829.

(下转第 101 页)

- [17] 赵婧,段磊磊,王铭,等.水文管理措施对长白山区恢复泥炭地土壤酶活性的影响[J].生态学杂志,2022,41(5):948-954.
ZHAO J, DUAN L L, WANG M, et al. Effects of hydrological managements on soil enzyme activities during peatland restoration in the Changbai Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(5): 948-954.
- [18] GUO D L, OU Y S, ZHOU X H, et al. Response of soil enzyme activities to natural vegetation restorations and plantation schemes in a landslide-prone region [J]. Forests, 2022, 13(6): e880.
- [19] KUZYAKOV Y, XU X L. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: Mechanisms and ecological relevance [J]. The New Phytologist, 2013, 198(3): 656-669.
- [20] 卢安琪,陈志杰,李雪,等.不同林龄杉木人工林土壤微生物生物量与酶活性特征的影响机制[J].生态学杂志, 2025, 44(1): 11-20.
LU A Q, CHEN Z J, LI X, et al. Characteristics and influencing mechanisms of soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities in *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(1): 11-20.
- [21] 刘俊第,林威,王玉哲,等.火烧对马尾松林土壤酶活性和有机碳组分的影响[J].生态学报, 2018, 38(15): 5374-5382.
LIU J D, LIN W, WANG Y Z, et al. Effects of fire on soil enzyme activities and organic carbon fractions in *Pinus massoniana* forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5374-5382.
- [22] 陈佳,姚成硕,林勇明,等.武夷山林地土壤酶活性差异及土壤肥力质量评价[J].山地学报, 2021, 39(2): 194-206.
CHEN J, YAO C S, LIN Y M, et al. Soil enzyme activity difference in woodlands, and soil fertility quality evaluation in Mount Wuyi, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(2): 194-206.
- [23] 宋思宇,陈亚梅,汪涛,等.不同林龄的西藏林芝云杉人工林土壤酶活性及化学计量比特征[J].应用与环境生物学报, 2023, 29(1): 178-185.
SONG S Y, CHEN Y M, WANG T, et al. Characteristics of soil enzyme activity and stoichiometry in a *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* plantation with different ages [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(1): 178-185.
- [24] ALLISON S D, WEINTRAUB M N, GARTNER T B, et al. Evolutionary-economic principles as regulators of soil enzyme production and ecosystem function [M]// Soil Enzymology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 229-243.
- [25] WARING B G, WEINTRAUB S R, SINSABAUGH R L. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial nutrient acquisition in tropical soils [J]. Biogeochemistry, 2014, 117(1): 101-113.
- (上接第 93 页)
- [24] 李鲁华,李世清,翟军海,等.小麦根系与土壤水分胁迫关系的研究进展[J].西北植物学报, 2001, 21(1): 1-7.
LI L H, LI S Q, ZHAI J H, et al. Review of the relationship between wheat roots and water stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(1): 1-7.
- [25] 王孟本,柴宝峰,李洪建,等.黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[J].林业科学, 1999, 35(2): 7-14.
WANG M B, CHAI B F, LI H J, et al. Soil water holding capacity and soil available water in plantations in the loess region [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(2): 7-14.
- [26] SUN F H, XIAO B, LI S L, et al. Towards moss biocrust effects on surface soil water holding capacity: Soil water retention curve analysis and modeling [J]. Geoderma, 2021, 399: e115120.
- [27] 李增尧,赵兴凯,朱清科.陕北黄土区陡坡坡面因子对土壤水分的影响[J].排灌机械工程学报, 2017, 35(9): 798-805.
LI Z Y, ZHAO X K, ZHU Q K. Effects of farmland slope on soil moisture in semi-arid Loess Plateau of Northern Shaanxi [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(9): 798-805.
- [28] 侯贵荣,余新晓,刘自强,等.不同降雨强度下北京山区典型林地土壤水分时空变化特征[J].水土保持学报, 2017, 31(3): 209-215.
HOU G R, YU X X, LIU Z Q, et al. Spatial and temporal variation characteristics of soil moisture in typical forest land in Beijing Mountain region under different rainfall intensity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(3): 209-215.
- [29] 何其华,何永华,包维楷.干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J].山地学报, 2003, 21(2): 149-156.
HE Q H, HE Y H, BAO W K. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas [J]. Mountain Research, 2003, 21(2): 149-156.
- [30] 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.