

华北土石山区坡面土壤水分动态变化 及其对降雨的响应

唐武^{1,2}, 卢山^{1,2}, 王一³, 刘太艳⁴, 张劲松^{2,5}, 桑玉强^{1,2}, 张志华^{1,2}

(1.河南农业大学 林学院, 河南 郑州 450002; 2.河南小浪底森林生态系统国家野外科学观测研究站, 河南 济源 454650; 3.河北鹏宇嘉业建筑工程有限公司, 河北 张家口 075400; 4.北京林业大学 林学院, 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083; 5.中国林业科学研究院 林业研究所, 国家林业和草原局 林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 分析华北土石山区坡面土壤水分的动态变化及其对降雨的响应, 揭示其降雨响应补给特征及规律, 旨在为该地区水资源合理利用以及水土保持提供参考和理论依据。[方法] 以华北土石山区典型自然荒坡地为研究对象, 实时监测不同坡位土壤水分动态变化, 研究土壤水分对降雨的动态响应特征及其内在规律。[结果] ①坡面年均含水量表现为下坡(20.3%±5.5%)>上坡(19.5%±5.7%)>中坡(15.9%±7.0%), 在垂直剖面呈现深层土壤含水量大于浅层土壤含水量。②土壤水分对降雨的响应速度表现为中坡(1.50 h)显著高于上坡(4.10 h)和下坡(2.80 h), 在垂直剖面呈现深层土壤水分对降雨的响应更为迅速。③降雨对土壤水分的平均补给速率和消退速率为中坡(1.4%/h, 0.3%/h)>上坡(0.9%/h, 0.2%/h)>下坡(0.7%/h, 0.1%/h), 在垂直剖面呈现降雨对深层土壤水分的补给速率、消退速率均大于浅层土壤。[结论] 在华北土石山区, 当降雨量>2.7 mm能有效补给坡面土壤水分, 中坡和深层土壤对降雨的响应更为迅速。

关键词: 华北土石山区; 坡面; 土壤水分; 降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0077-11

中图分类号: S152.7

文献参数: 唐武, 卢山, 王一, 等. 华北土石山区坡面土壤水分动态变化及其对降雨的响应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 77-87. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240923.002; Tang Wu, Lu Shan, Wang Yi, et al. Dynamic changes in soil moisture on slopes and its response to rainfall in earth-rocky mountain area of North China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 77-87.

Dynamic Changes in Soil Moisture on Slopes and Its Response to Rainfall in Earth-rocky Mountain Area of North China

Tang Wu^{1,2}, Lu Shan^{1,2}, Wang Yi³, Liu Taiyan⁴, Zhang Jinsong^{2,5}, Sang Yuqiang^{1,2}, Zhang Zhihua^{1,2}

(1.College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China;

2.Henan Xiaolangdi Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Jiyuan, Henan

454650, China; 3.Hebei Pengyu Jiaye Construction Engineering Co. Ltd., Zhangjiakou, Hebei 075400,

China; 4.State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, College of Forestry, Beijing

Forestry University, Beijing 100083, China; 5.Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National

Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] The dynamic changes in soil moisture and its response to rainfall in earth-rocky mountain areas of North China were analyzed, and the characteristics and laws of its rainfall response recharge were revealed, aiming at providing a reference and theoretical basis for rational utilization of water resources and water conservation in this area. [Methods] This study focused on typical natural barren slopes in earth-rocky mountain area of North China, employing in-situ monitoring to collect real-time data on soil moisture at different slope positions for detailed analysis. The dynamic response characteristics of soil

收稿日期: 2024-04-11

修回日期: 2024-09-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“砾石对华北土石山区坡面水分运移的影响”(41807174); 河南省高等学校重点科研项目(24A220004); 河南省科技攻关项目(232103810014)

第一作者: 唐武(2000—), 男(汉族), 四川省达州市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤水文学。Email: tangwu0324@163.com。

通信作者: 张志华(1984—), 女(汉族), 宁夏回族自治区吴忠市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤水文学方面的研究。Email: zhihua1221@163.com。

moisture to rainfall and its intrinsic patterns were studied. [Results] ① The average annual soil moisture content along the slope exhibited the following pattern: bottom slope ($20.3\% \pm 5.5\%$) > top slope ($19.5\% \pm 5.7\%$) > middle slope ($15.9\% \pm 7.0\%$), and in the vertical profile, deeper soil layers had a higher moisture content than that in shallower layers. ② The response rate of soil moisture to rainfall was significantly faster in the middle slope (1.50 h) compared to that in the top (4.10 h) and bottom slopes (2.80 h), and in the vertical profile, deeper soil layers responded to rainfall more quickly than shallower layers. ③ The average rates of moisture replenishment and depletion due to rainfall were as follows: middle slope (1.4%/h, 0.3%/h) > top slope (0.9%/h, 0.2%/h) > bottom slope (0.7%/h, 0.1%/h), and in the vertical profile, the replenishment and depletion rates were higher in deeper soil layers than in shallower layers. [Conclusion] In the earth-rocky mountainous area of North China, when rainfall exceeds 2.7 mm, it can effectively recharge soil moisture on slopes. Additionally, the responses of the middle slope and deeper soil layers to rainfall were notably more rapid.

Keywords: earth-rocky mountain area of North China; slopes; soil moisture; rainfall

土壤水分是地球系统中的关键变量,影响陆地表面与大气之间的交换,在地球系统内的各种过程和反馈机制中发挥重要作用^[1]。作为重要的生态因子,土壤水分影响土壤的形成、物质与能量的迁移以及植物的生存^[2]。降雨作为土壤水分的主要补给源,对其变化影响深远。土壤水分对降水的响应在水循环中占重要地位,影响入渗、蒸发和径流等水文过程^[3]。因此,深入理解并分析土壤水分对降雨补给的动态响应机制,对于促进区域土壤水分的高效合理利用至关重要。

研究表明,在干旱半干旱区,降雨是土壤水分的主要来源^[4],其数量、强度、历时及时间分布影响土壤水分的变化及响应。降雨量对土壤水分的影响最显著,尤其是在生长季节,降雨量及其分布模式直接决定了土壤水分的变化趋势^[5]。降雨量增加会加深对土壤的补给,但补给效果会减弱^[6]。Liu Muxing 等^[7]研究显示小于 8 mm 的降雨几乎不会引起土壤水分的响应。赵晓光等^[8]研究发现在一定降雨强度下,土壤水分含量与降水量呈正相关关系。He Zimiao 等^[9]通过模拟降雨实验表明,降雨初期时,降雨强度对水分入渗的影响尤为显著,随着降雨时间的延长,影响逐渐减小。石春茂等^[10]在西南干热河谷区研究发现短历时小雨对表层土壤影响有限,但大雨可以对深层土壤进行有效补给,且坡上对降雨的响应更为迅速,保水能力更优。此外,地形、土壤结构和植被等因素也影响土壤水分对降雨的响应过程^[11]。Zhang Junyi 等^[12]在典型草原区研究发现土壤含水量和储水量随上坡到下坡方向增加,并在环境因子的共同作用下,土壤水分在上坡受到土壤沙粒含量的影响,在中坡主要由土壤的粘粒含量和地下生物量的多少决定,而在下坡土壤水分更多地受到植被属性的影响。王秋月^[13]对三峡典型坡面的研究发现地形主导土壤地下侧向流,与上坡和中坡相比,下坡土壤水分响应

速度较快,土壤蓄水量更大。Zhao Chunlei 等^[14]和 Su Bingqian 等^[15]在黄土高原研究发现:林地的土壤水分含量最低,其次是灌丛地、草地和农田。由于立地条件差、设备安装维护成本过高、监测过程繁琐耗时等挑战,导致目前对土石山区土壤水分的观测较少,且以往研究大多聚焦于林木、草地,对于自然荒坡的关注较少,缺乏对自然荒坡土壤水分动态变化及其对降雨的响应过程的动态监测和量化分析。

华北土石山区是京津冀地区的重要生态屏障^[16]。由于独特的地质条件和人类活动的影响,该地区的植被退化和土壤侵蚀已成为人们关注的重要问题,并且严重威胁着华北平原的生态安全。该地区土层浅薄,砾石含量较高,具有典型的土石二元结构,与其他均质土壤地貌类型区相比,该地区土壤水分变化与降雨的关系复杂多变。本研究以华北土石山区典型的自然荒坡地为研究对象,通过原位监测法收集不同坡位土壤水分的实时数据进行深入分析,揭示该地区坡面土壤水分对降雨的动态响应特征及其内在规律,以期对华北土石山区植被和生态恢复重建提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于河南省济源市,隶属于河南小浪底森林生态系统国家野外科学观测研究站($35^{\circ}01'N$, $112^{\circ}28'E$),毗邻太行山南麓,地形多为山地。该地区属于暖温带大陆性季风气候^[17]。由于季风气候的影响,四季变化明显,雨热同季,夏季水热资源丰富。年平均气温为 $13.1^{\circ}C$,年降水量为 613 mm。降水的季节分布不均匀,主要集中在 6—9 月,占年总降水量的 68.3%。在中国土壤分类系统中,该地区土壤主要被归类为在石灰岩母质上形成的棕壤,土壤瘠薄,结构不良,土壤质地主要是砂土,砾石含量较高,平均土壤深

度约为 40 cm。由于广泛的森林砍伐,当地的植被破坏严重。该地区以人工林地为主,自 20 世纪 70 年代以来,进行了大规模人工造林及植被恢复工程,造林树种主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)和栓皮栎(*Quercus variabilis*),灌木以酸枣(*Ziziphus jujuba*)和荆条(*Vitex negundo*)为主。

2 研究方法

2.1 样地设置

基于野外调查,在研究区选取具有代表性的自然荒坡地作为研究对象(图 1)。自然荒坡地的特征为坡

面长度 85 m、坡面宽度 30 m,坡向为阳坡,海拔约 360 m,坡度约 19°,土壤质地主要为砂土,且含有较高比例的砾石。

根据坡面地形特征及植被类型,将坡面划分为上坡、中坡和下坡。中坡较为陡峭,下坡较为平缓。上坡、中坡和下坡的土壤厚度分别为 20,35 和 45 cm。植被类型从上坡到下坡分别为草本、灌木和乔木。乔木主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和栓皮栎(*Quercus variabilis*);灌木主要为酸枣(*Ziziphus jujuba*)、扁担杆(*Grewia biloba*)和荆条(*Vitex negundo*)。样地基本情况如表 1 所示。

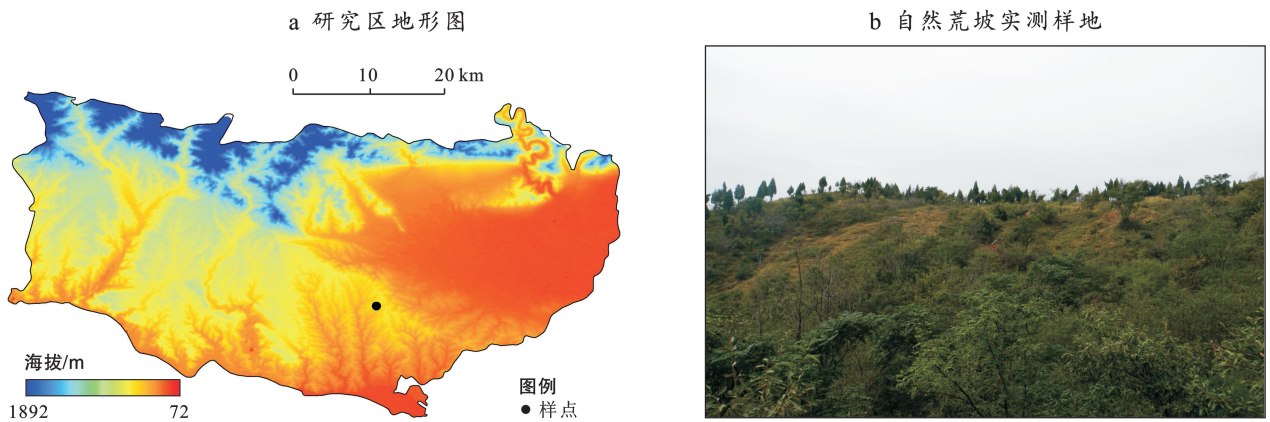


图 1 研究区地形图及试验样地景观

Fig.1 Topographic map of study area and landscape of test area

表 1 华北土石山区坡面样地基本情况

Table 1 Basic situation of slope sample land in soil and earth-rock mountainous areas of North China

坡位	土层深度/ cm	坡度/ (°)	草本覆 盖度/%	饱和导水率/ (mm·min ⁻¹)	容重/ (g·cm ³)	机械组成/%		
						砂粒	黏粒	粉粒
上坡	20	18.96	42.96	2.32	1.54	90.08	2.54	7.38
中坡	35	18.95	43.70	3.12	1.47	89.29	3.39	7.32
下坡	45	20.44	37.69	2.65	1.40	89.08	4.68	6.24

2.2 数据获取

在自然荒坡地的上坡、中坡和下坡安装土壤水分监测装置(数据采集器为 EM50 和 ZL6;传感器为: ECH₂O)对土壤水分进行连续监测,监测装置通过测量土壤的介电常数来计算土壤体积含水量,测量范围为 0%~100%,测量精度在±3%以内。在安装土壤水分监测装置时采取挖土壤剖面的方式进行埋设。安装深度分别为 0—10,10—20,20—40,40—60,60—80 cm(图 2),一共 5 个深度。将土壤水分监测装置的传感器以水平状态,且沿垂直方向从上到下依次插入相应土层测定土壤体积含水量,每一土层设置一个水分传感器探头。在安装土壤层下岩石风化层的水分监测探头时,首先凿出一个与探头尺寸相符的孔洞,然后将探头放入其中。安装完成后,用该层的

土石混合物回填土壤剖面。利用数据采集器每隔 5 min 连续监测土壤体积含水量。

气象资料通过附近地面标准气象站获取,可以连续监测降雨量、风速、温度等气象因子,每 10 min 输出 1 组平均值。根据以往的研究和气象部门的划分标准,超过 24 h 的降雨被视为两次独立的降水事件^[18]。依据中国气象部门的标准,24 h 以内的降水量可划分为 6 个降雨等级事件:0.1~9.9 mm 为小雨,10.0~24.9 mm 为中雨,25.0~49.9 mm 为大雨,50.0~99.9 mm 为暴雨,100.0~249.9 mm 为大暴雨,超过 250.0 mm 则为特大暴雨。本研究采用 2020 年 10 月至 2021 年 9 月的土壤水分及降雨量数据,深入分析不同降雨量对坡面土壤水分的具体影响情况。

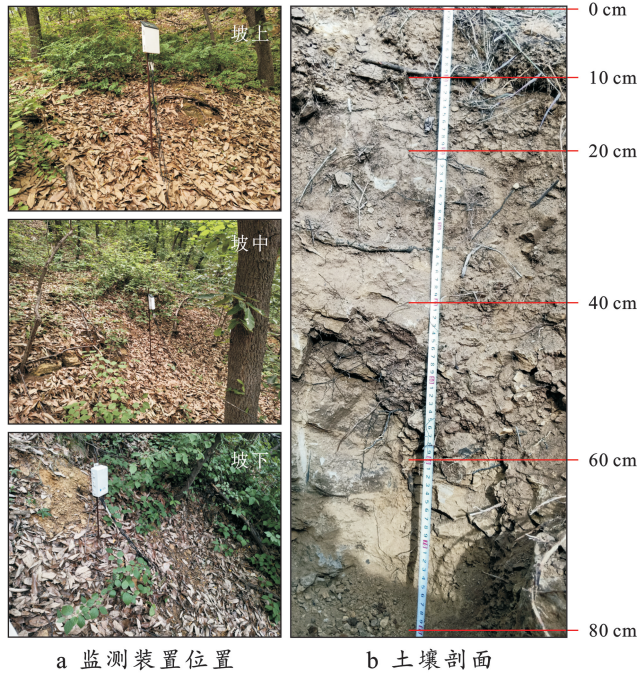


图 2 试验样地水分监测装置

Fig.2 Moisture monitoring device at test plot

2.3 数据处理与统计分析

土壤容重的测定采用环刀法,土壤机械组成的测定采用比重计法,饱和和导水率采用双水头渗透计测定。

土壤水分对降雨的反应速度通过响应时间来衡量,次降雨对土壤水分的补给速率可通过水分增量与达到峰值时间的比值表示,而其对土壤水分的补给量则由水分增量来体现,土壤水分的消退速率则通过消退量与其所需时间的比值来表示。分析坡面土壤水分对降雨的响应特征,各指标的计算公式^[18-19]分别为:

$$t_1 = t_a - t_b \quad (1)$$

$$t_2 = t_c - t_b \quad (2)$$

$$SW_1 = SW_x - SW_0 \quad (3)$$

$$V_1 = SW_1 / t_2 \quad (4)$$

$$SW_2 = SW_x - SW_1 \quad (5)$$

$$t_3 = t_d - t_c \quad (6)$$

$$V_2 = SW_2 / t_3 \quad (7)$$

式中: t_1 表示次降雨过程中土壤水分响应的时间(h); t_a 表示垂直剖面各土层土壤水分响应的时间; t_b 表示降雨开始的时间; t_2 表示土壤水分在次降雨期间达到峰值所需的时间(h); t_c 表示垂直剖面各土层土壤水分达到峰值所需的时间; SW_1 表示土壤水分在降雨后的增量(%); SW_x 表示土壤水分在降雨后的最大值(%); SW_0 表示土壤前期含水量; V_1 表示土壤水分补给速率; SW_2 表示土壤水分消退量(%);

SW_1 表示降雨后 72 h 的土壤含水量(%); t_3 表示土壤水分消退所需的时间(h); t_d 表示降雨开始后的持续时间,本研究设置为 72 h; V_2 表示土壤水分消退速率。

运用 Excel, SPSS 20.0, Origin 2021 处理数据及作图,对不同坡位土壤水分均值的差异性进行比较,图表中数据为平均值±标准差。

3 结果与分析

3.1 降雨特征

在研究区试验期间,记录了 40 次降雨,总量为 1 140.6 mm(图 3)。小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨分别有 24, 5, 5, 2, 3, 1 次,所占比例分别为 60%, 12.5%, 12.5%, 5%, 7.5%, 2.5%;各类型降雨的总量分别为 81.3, 85.7, 170.1, 132.0, 402.2, 269.3 mm, 分别占总降雨量(1 140.6 mm)的 7.1%, 7.5%, 14.9%, 11.6%, 35.3%, 23.6%。随着降雨级别的增加,降雨次数呈现减小的趋势,对降雨量的贡献率呈现升高的趋势。

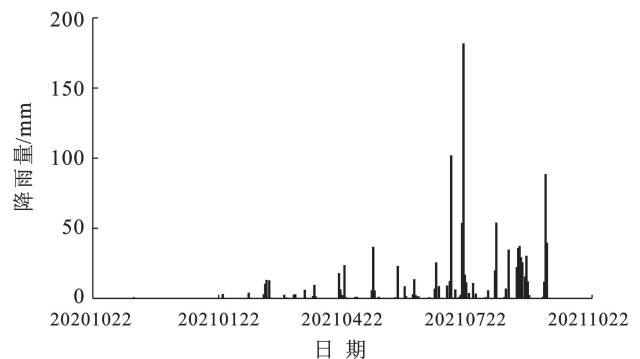


图 3 华北土石山区坡面研究期内降水动态分布

Fig.3 Dynamic distribution of precipitation on slope of earth-rock mountains in North China during study period

3.2 土壤水分变化特征

3.2.1 不同坡位土壤水分变化 根据研究区降雨特征,将土壤水分在年内的分布划分为旱季和雨季,旱季为 10 月至次年 6 月,该时期几乎没有降雨或降雨较少,土壤水分较低且相对稳定,土壤含水量为 $17.5\% \pm 0.05\%$;雨季为 7—9 月,该时期降雨频发、雨量大且持续时间长,土壤含水量波动剧烈,土壤含水量为 $20.6\% \pm 0.07\%$ 。

由图 4 可知,全年不同坡位土壤水分动态变化总体上一致,表现为降雨量越大,土壤水分波动越剧烈。比较不同坡位土壤年均含水量,上坡为 $19.5\% \pm 5.7\%$,中坡为 $15.9\% \pm 7.0\%$,下坡为 $20.3\% \pm 5.5\%$,采用单因素方差分析上坡、中坡及下坡土壤平均含水量,差异

性极显著 ($p < 0.01$)。在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,土壤平均含水量从上坡到下坡呈现递减趋势,上坡为 $20.6\% \pm 5.1\%$,中坡为 $20.3\% \pm 5.6\%$,下坡为 $17.8\% \pm 3.3\%$;在 20—40, 40—60 cm 和 60—80 cm 土层平均土壤含水量均表现为下坡 ($21.9\% \pm 4.1\%$) > 上坡 ($18.9\% \pm 4.0\%$) > 中坡 ($12.8\% \pm 3.5\%$)。

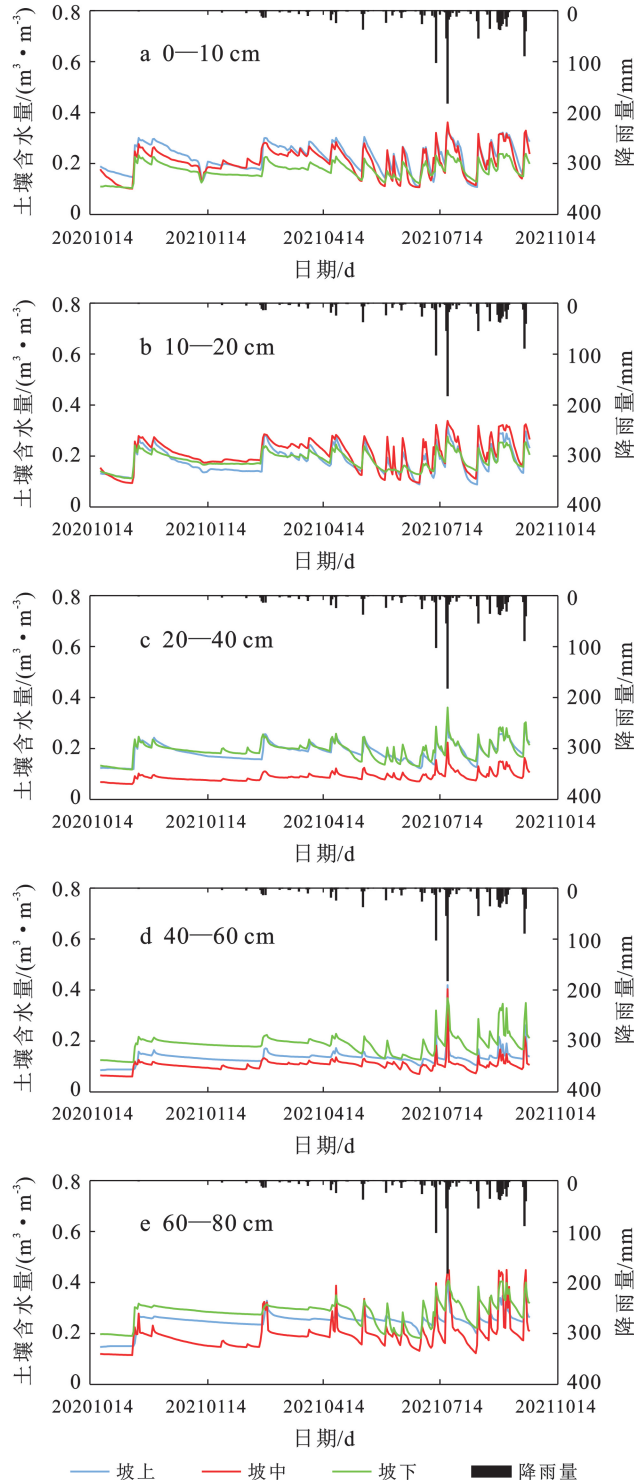


图 4 华北土石山区坡面研究期内土壤水分动态变化特征
Fig.4 Dynamic changes of soil moisture on slope of earth-rock mountain in North China during study period

3.2.2 土壤垂直剖面水分动态 图 5 为剖面土壤年均含水量分布情况。在上坡,土壤水分总体呈现先减小后增加的趋势,土壤平均土壤含水量从 22.5% (0—10 cm) 持续降低至最低点 13.4% (40—60 cm),在 60—80 cm 土层 (24.8%) 又升高至最高点,呈“S”型变化趋势。在中坡,土壤水分总体趋势与上坡一致,呈现先减小后增加的趋势,土壤平均土壤含水量从 20.6% (0—10 cm) 持续降低至最低点 8.9% (20—40 cm),在 40—80 cm 逐步回升。在下坡,土壤水分总体呈现逐渐增加的趋势,土壤平均土壤含水量从 17.3% (0—10 cm) 持续升高至最高点 28.1% (60—80 cm)。

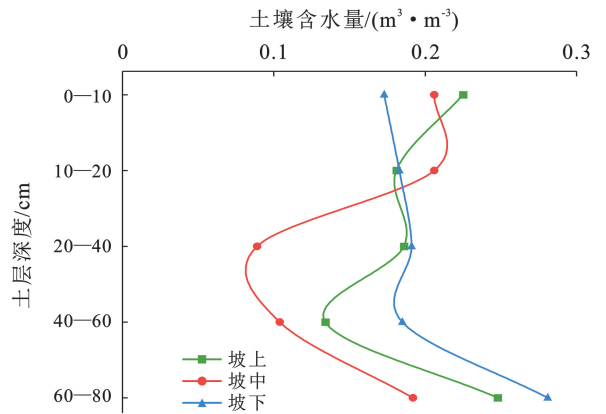


图 5 华北土石山区坡面不同坡位土壤水分剖面的变化特征
Fig.5 Variation characteristics of soil moisture profile at different slope positions in earth-rock mountainous areas of North China

3.3 不同降雨事件中土壤水分的响应特征

本研究选择间隔至少 3 d 无降雨事件进行分析,目的是为避免连续降雨影响土壤水分的响应。研究包括了从小雨到特大暴雨的 6 个降雨等级(表 2),旨在分析华北土石山区坡面土壤水分在不同降雨事件中的响应特征。土壤水分对不同降雨事件的响应程度不同(图 6)。

表 2 华北土石山区坡面在不同降雨事件中的降雨特征
Table 2 Rainfall characteristics of slope surface in different rainfall events in earth-rocky mountain area of North China

日期	降雨量/mm	降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	降雨历时/ h
20210125	2.7(小雨)	1.35	2.00
20210602	22.7(中雨)	8.02	2.83
20210822	34.5(大雨)	2.41	14.33
20210812—0813	73.2(暴雨)	6.55	11.17
20210710—0712	113.6(大暴雨)	10.82	10.50
20210717—0724	269.3(特大暴雨)	4.29	62.83

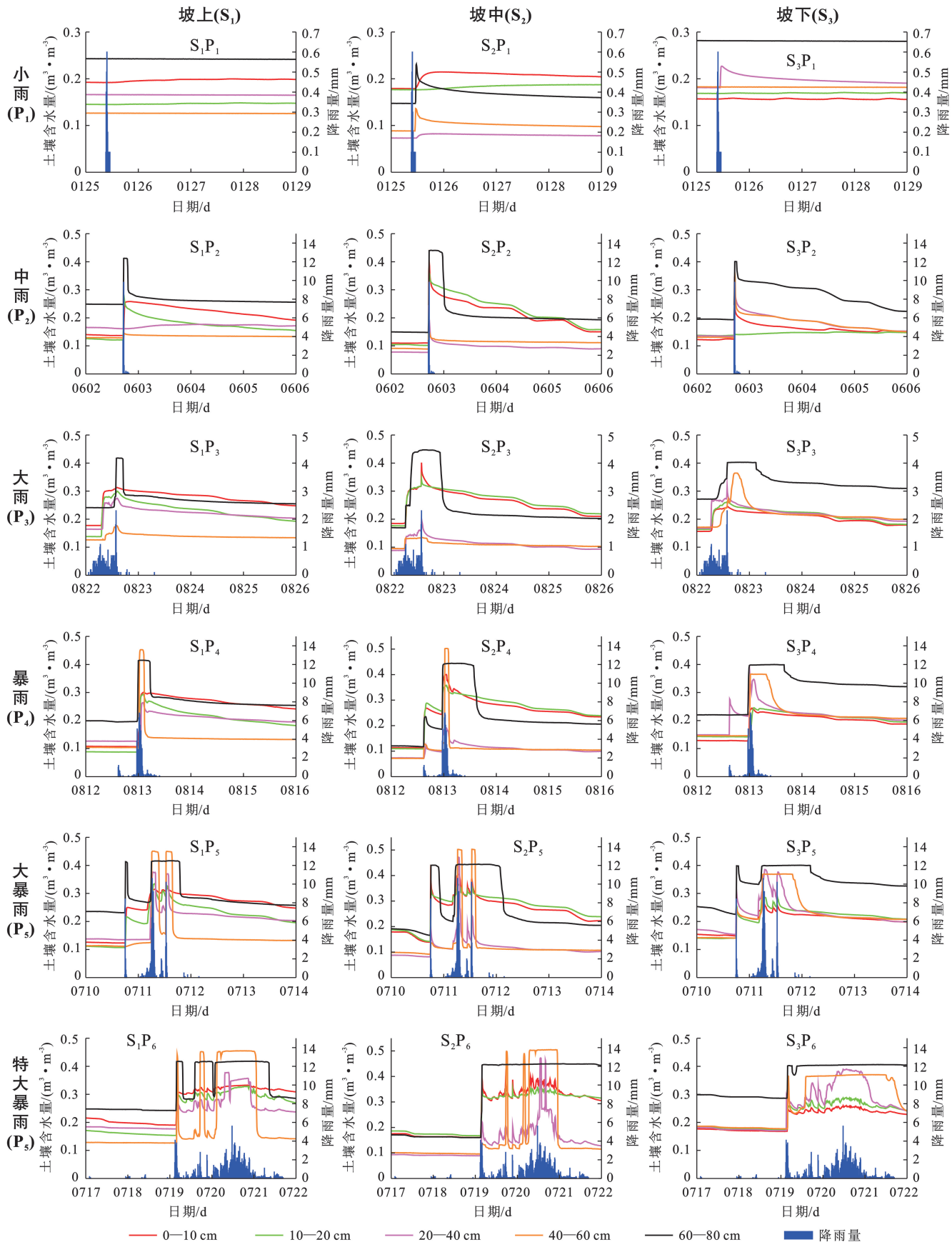


图 6 华北土石山区不同降雨事件下剖面土壤水分的时间变化特征

Fig.6 Temporal variation characteristics of soil moisture in profile under different rainfall events in earth-rock mountainous areas of North China

3.4 不同降雨事件土壤水分对降雨的响应特征

在小雨事件中,下坡的土壤水分响应速度为 1.25 h, 快于中坡(2.33 h)和上坡(4.00 h)。中坡的土壤水分补给量为 3.74%, 土壤水分补给速率为 1.19%/h, 均大于下坡(0.99%, 0.39%/h)和上坡(0.22%, 0.01%/h) (见图 7)。在垂直剖面上, 上坡仅 0—10 cm 土层在降雨 4.00 h 后响应, 补给量为 0.22%, 补给速率为 0.01%/h。中坡 10—20 cm 土层在降雨后 3.65 h 响应, 其余土层在 2 h 后响应, 补给量和补给速率均呈现先减小后增加的趋势。下坡仅 0—10 cm (0.67 h) 和 20—40 cm (1.83 h) 土层发生响应, 20—40 cm 土层的补给量(1.81%)和补给速率(0.75%/h)均大于 0—10 cm 土层。

在中雨事件中, 中坡和下坡的土壤水分响应速度均为 0.50 h, 快于上坡(1.70 h)。中坡的土壤水分补给量(10.07%)和补给速率(0.52%/h)最大, 上坡和下坡分别为 5.65%, 0.18%/h 和 5.82%, 0.25%/h。在垂直剖面上, 上坡 20—40 cm 土层在降雨 6.50 h 后响应, 其余土层在 0.50 h 后响应, 补给量和补给速率呈现“增—减—增”的趋势。中坡各土层在降雨后 0.50 h 响应, 补给量和补给速率先减小后增加。下坡各土层在降雨后 0.50 h 响应, 补给量和补给速率也呈现先减小后增加的趋势。

在大雨事件中, 中坡的土壤水分响应速度为 4.50 h, 快于下坡(6.00 h)和上坡(6.30 h)。中坡的土壤水分

补给量为 16.24%, 土壤水分补给速率为 1.34%/h, 均大于上坡(12.71%, 1.04%/h) 和下坡(13.27%, 0.94%/h)。在垂直剖面上, 上坡各土层的响应时间依次为 0—40 cm(5.00 h), 40—60 cm(7.00 h), 60—80 cm(9.50 h), 补给量和补给速率呈“增—减—增”趋势, 最高点出现在 60—80 cm 处(17.67%, 1.43%/h); 中坡各土层在 4.50 h 后响应, 补给量和补给速率呈现先减后增的趋势, 最高点出现在 60—80 cm(27.73%, 2.19%/h); 下坡土层的响应时间为 0—40 cm(5.00 h), 40—60 cm(8.00 h), 60—80 cm(7.00 h), 补给量和补给速率呈现先增后减的趋势, 最高点出现在 40—60 cm(19.3%, 1.26%/h)。

在暴雨事件中, 中坡的土壤水分响应速度为 0.33 h, 快于下坡(7.30 h)和上坡(9.00 h)。中坡的土壤水分补给量为 28.2%, 土壤水分补给速率为 2.61%/h, 均大于上坡(22.01%, 1.98%/h) 和下坡(16.38%, 1.39%/h)。在垂直剖面上, 上坡各土层在降雨 9.00 h 后响应, 补给量和补给速率呈现先减后增的趋势, 最低点出现在 20—40 cm 处(13.73%, 1.19%/h); 中坡各土层在 0.33 h 后响应, 补给量和补给速率也呈现先减后增的趋势, 最低点出现在 20—40 cm 处(11.76%, 1.1%/h); 下坡除 20—40 cm 土层在 0.33 h 响应外, 其余土层在 9.00 h 后响应, 补给量和补给速率最低点出现在 10—20 cm 处(10.27%, 0.89%/h), 随后逐步回升。

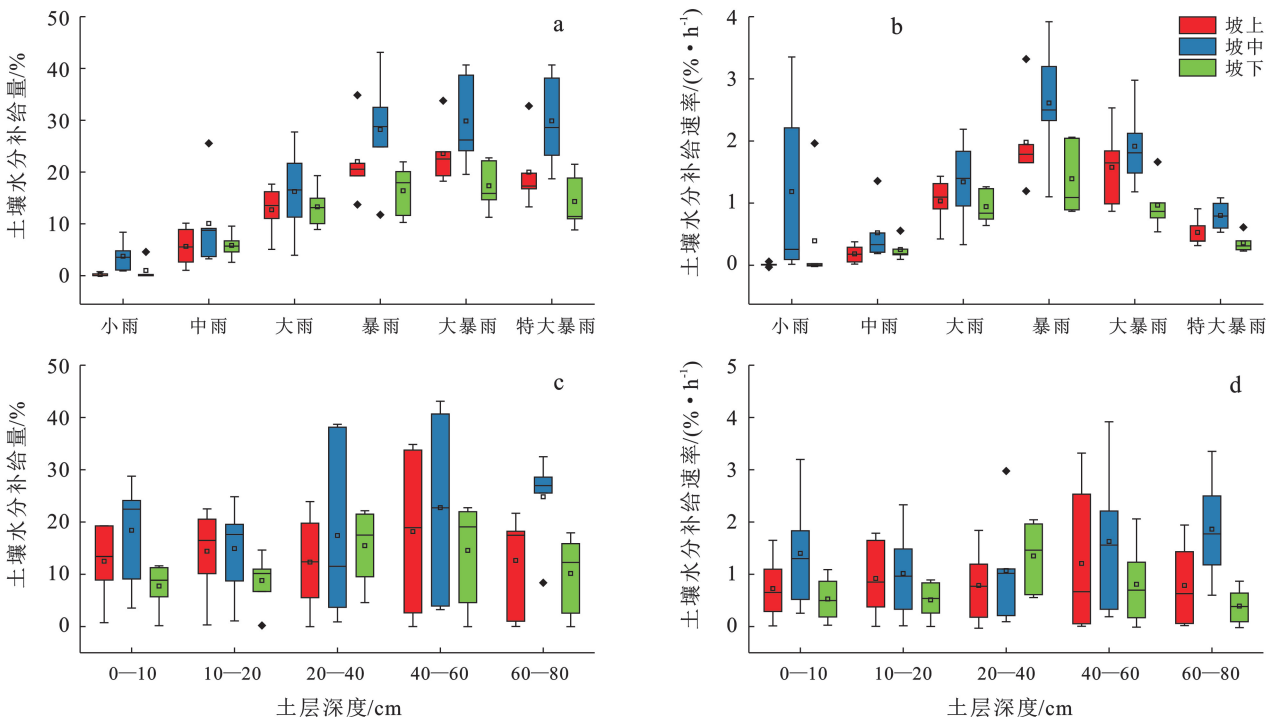


图 7 不同降雨事件和垂直剖面下各坡位的土壤水分补给量和补给速率

Fig.7 Soil moisture replenishment and rates at different slope positions under different rainfall events and vertical profile

在大暴雨事件中,中坡和下坡的土壤水分响应速度均为 0.33 h,快于上坡(2.10 h)。中坡的土壤水分补给量为 29.85%,土壤水分补给速率为 1.92%/h,均大于上坡(23.55%,1.58%/h)和下坡(17.34%,0.97%/h)。在垂直剖面上,上坡除 20—40 cm 土层在降雨后 9.00 h 响应外,其余土层在 0.33 h 响应,补给量和速率呈现先增后减的趋势,最高点出现在 40—60 cm(33.77%,2.53%/h);中坡各土层在 0.33 h 响应,补给量和补给速率呈现先减后增的趋势,最低点出现在 10—20 cm(19.55%,1.49%/h);下坡各土层在 0.33 h 响应,补给量和补给速率先增加后减小,最高点出现在 40—60 cm 土层范围(22.74%,1.66%/h)。

在特大暴雨事件中,中坡的土壤水分响应速度为 1.00 h,快于上坡(1.50 h)和下坡(1.50 h)。中坡的土壤水分补给量为 29.85%,土壤水分补给速率为 0.8%/h,均大于上坡(19.98%,0.53%/h)和下坡(14.32%,0.36%/h)。在垂直剖面上,上坡各土层在 1.50 h 响应,补给量和补给速率呈现先增后减的趋势,最高点出现在 40—60 cm(32.76%,0.91%/h);中坡各土层在 1.00 h 响应,补给量和补给速率呈现先减后增的趋势,最低点出现在 10—20 cm(18.69%,0.53%/h);下坡各土层在 1.50 h 响应,补给量和补给速率呈现先增后减的趋势,最高点出现在 20—40 cm(21.51%,0.61%/h)。

在不同降雨事件中,就土壤水分平均响应速度而言,中坡(1.50 h)>上坡(4.10 h)>下坡(2.80 h);就土壤水分平均补给量和补给速率而言,下坡(11.35%,0.72%/h)<上坡(14.02%,0.89%/h)<中坡(19.66%,1.40%/h)。在垂直剖面上,随着土层深度的增加,上坡至下坡的土壤水分整体表现为深层土壤对降雨的响应早于浅层,且深层土壤的水分补给量和补给速率均高于浅层。

3.5 不同降雨事件土壤水分消退速率

由图 8 可知,中坡的土壤水分消退速率(0.300%/h)>上坡(0.181%/h)>下坡(0.143%/h)。上坡、中坡及下坡随着降雨级别的升高,土壤水分消退速率均呈现加快的趋势。上坡、中坡及下坡土壤水分消退速率均在特大暴雨事件中最快,分别为 0.390,0.606,0.262%/h;在小雨事件中最慢,分别为 0.004,0.059,0.014%/h。在垂直剖面上,随着土壤深度的增加,土壤水分消退速率总体呈现先增加后减慢的趋势。上坡土壤水分消退速率从 0.07%/h(0—10 cm)持续增加至最高点 0.34%/h(40—60 cm),在 60—80 cm(0.22%/h)土层减小;中坡土壤水分消退速率从 0.19%/h(0—10 cm)持续增加至最高点 0.47%/h(40—60),在 60—80 cm(0.39%/h)土层减小;下坡土壤水分消退速率从 0.07%/h(0—10 cm)持续增加至最高点 0.24%/h(40—60 cm),在 60—80 cm(0.11%/h)土层减小。

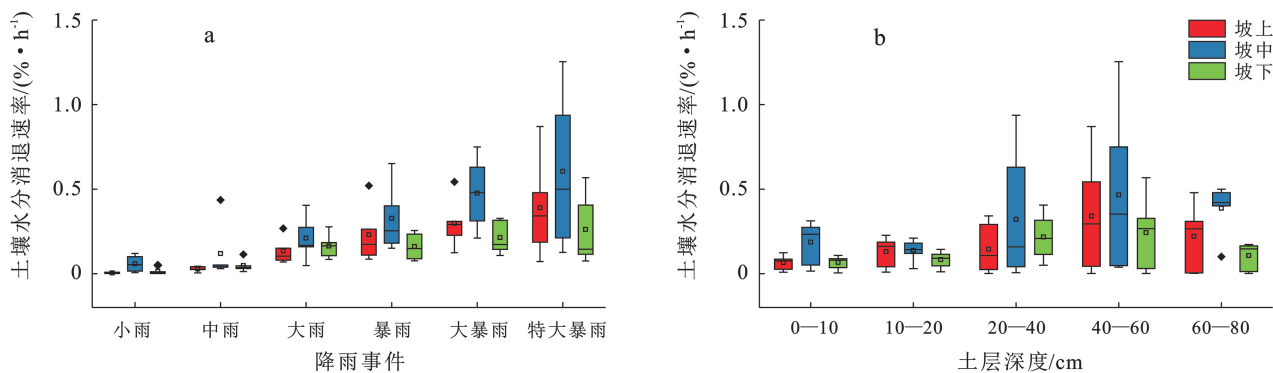


图 8 不同降雨事件和垂直剖面下各坡位的土壤水分消退速率

Fig.8 Soil moisture deletion rates at different slope positions under different rainfall events and vertical profile

4 讨论

4.1 土壤水分动态特征

降雨的季节性分布决定土壤含水量的季节变化,当降雨量达到峰值时土壤水分随之达到峰值。本研究发现坡面土壤水分最大值均出现在 7 月,与降雨量呈正相关关系。土壤含水量在 10—12 月呈上升趋势,在该时期植物生长速度缓慢或进入休眠期,导致

土壤含水量升高。1—2 月无明显变化,该时期土壤处于冻结期,导致土壤含水量趋于稳定。3—4 月呈上升趋势,该时期积雪处于融化状态^[20],增加了土壤含水量。5—6 月呈下降趋势,该时期降雨量少,但植物的生长和蒸发量增加,植被通过蒸腾作用会从土壤中吸收水分^[21],导致土壤含水量减少。7—9 月呈上升趋势,该时期降雨频发、雨量较大,为土壤提供了充足的水分补给,导致土壤含水量升高。

本研究发现,土壤水分随土壤深度增加总体呈现先减小后增大的趋势,与许多学者研究结果一致^[22]。植被根系主要分布于土壤表层(0—20 cm),植物根系吸水补充叶片蒸腾耗水^[23],导致表层土壤水分减小。此外,优先流现象可能是造成深层土壤水分增加的主要原因。本研究区砾石含量较高,砾石的存在破坏了土壤中小孔隙的连续性,且随着土壤深度的增加,砾石含量也逐步增加^[24],砾石之间的接触也随之增加,导致土壤大孔隙的平均半径和体积增大,土壤内部形成大量连续的优先流通道^[25],提高了水分的渗透率和范围,使土壤水分迅速到达深层土壤。

本研究结果表明,全年土壤水分均值呈现出:下坡>上坡>中坡的趋势。Fu Chaofeng 等^[26]研究发现土壤水分从上坡到下坡呈逐渐增加的趋势,与本研究结果不一致,究其原因可能是:①在华北土石山区,土层浅薄,砾石出露率高,上坡的砾石覆盖度大于中坡。砾石覆盖度较低时,更容易嵌入表层土壤并形成表面结皮^[27],从而降低了表面粗糙度,增加了地表径流,减少水分入渗^[28]。Diaz F. 等^[29]通过土柱模拟试验发现,相比于裸露土壤,有砾石覆盖的土壤显著减少土壤蒸发量,且砾石覆盖度越大,抑制蒸发的作用越强。上坡高的砾石覆盖度增加了水分入渗且减小了蒸发,所以土壤水分呈现:上坡>中坡。②本研究中上坡以草本为主,中坡多为灌木,上坡植被覆盖度小于中坡。在相同降雨条件下,较高的植被覆盖度容易对降雨产生截留作用^[30]。此外,中坡枯落物较厚且具有极强的吸持降水能力,渗入到土壤的降水变少,导致上坡土壤水分大于中坡。③在本研究区,上坡较平缓,中坡较陡,因此土壤水分由于径流作用的影响,在剖面呈现上坡>中坡。

4.2 不同降雨事件下土壤水分的响应特征

本研究区域降雨是该地区植物生长的主要水分补给源,降雨量是决定土壤水分补给深度的关键因素。本研究结果显示除小雨事件(2.7 mm)外,40—80 cm 处的土壤水分早于 10—40 cm 土层对降雨发生响应,且深层土壤水分补给量大于浅层土壤。原因可能是在垂直剖面上,随着砾石量的增加,砾石与砾石之间的接触也随之增加,土壤大孔隙结构开始逐渐成形,土壤内部形成大量连续的优先流通道,土壤水分沿着优先流通道自上而下快速入渗,且受到山区深层岩石界面的阻挡^[31]综合导致的。有研究表明,土壤水分对降雨的响应不仅与单次降雨量有关,还与土壤初始含水量有关^[32]。本研究结果表明,深层土壤初始含水量(17.3%)高于浅层土壤(15.1%),土壤初始含水量越高,降雨入渗历时越短,补给作用越大,这

与贺帅等^[33]研究结论较为一致。

本研究中坡土壤水分对降雨的响应速度快于上坡和下坡。中坡植被覆盖少,响应最快主要由于缺乏冠层及枯落物层的保护,对降雨溅蚀的拦截和缓冲作用较为薄弱^[34],雨水迅速到达土壤层;中坡粘粒含量较少,大孔隙数量多,土壤水分在渗透过程中不易受到阻碍^[35]综合导致的。此外,石春茂等^[10]通过对干热河谷区的研究表明,土壤饱和导水率越大,其对降雨的响应越迅速,土壤水分能充分下渗。同理,以上三个原因也导致中坡土壤水分消退速率快于上坡和下坡。

5 结论

本文以华北土石山区典型的自然荒坡地为研究对象,通过实时监测不同坡位土壤水分动态变化,分析了该地区土壤水分对降雨的响应特征,得出以下结论。

(1) 研究区降雨类型以小雨为主,小雨的发生频率为 60%,占降雨总量的 7.1%;虽然中雨、大雨、暴雨、大暴雨和特大暴雨的发生频率为 40%,但却占降雨总量的 92.9%。

(2) 全年土壤水分均值在坡面表现为下坡大于上坡和中坡。上坡、中坡及下坡土壤平均含水量分别为 $19.5\% \pm 5.7\%$, $15.9\% \pm 7.0\%$, $20.3\% \pm 5.5\%$ 。

(3) 与上坡和下坡相比,中坡土壤水分对降雨的响应更为迅速,降雨对其土壤水分的补给量大和土壤水分补给速率均较大。土壤水分对降雨的响应速度上坡为 4.10 h,中坡为 1.50 h,下坡为 2.80 h,土壤补给量和补给速率上坡为 14.0%, 0.9%/h;中坡为 19.7%, 1.4%/h;下坡为 11.4%, 0.7%/h。在垂直剖面,深层土壤水分较浅层土壤水分对降雨的响应更为迅速,降雨对深层土壤水分的补给量、补给速率大于浅层土壤。

(4) 中坡土壤水分的消退速率大于上坡和下坡。上坡、中坡及下坡土壤水分的消退速率分别 0.2, 0.3, 0.1%/h。在垂直剖面,深层土壤水分的消退速率大于浅层土壤。

参考文献 (References)

- [1] Fu Xiaolei, Lyu Haishen, Yu Zhongbo, et al. Effects of soil hydraulic properties on soil moisture estimation [J]. Journal of Meteorological Research, 2023, 37(1): 58-74.
- [2] 马婧怡,贾宁凤,程曼.黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J].生态学报, 2018, 38(10): 3471-3481. Ma Jingyi, Jia Ningfeng, Cheng Man. Water characteristics of soil under different land-use types in the Loess Plateau region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(10):

- 3471-3481.
- [3] Vereecken H, Huisman J A, Hendricks Franssen H J, et al. Soil hydrology: Recent methodological advances, challenges, and perspectives [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(4): 2616-2633.
- [4] Tang Min, Zhao Xining, Gao Xiaodong, et al. Land use affects soil moisture response to dramatic short-term rainfall events in a hillslope catchment of the Chinese Loess Plateau [J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(3): 1506-1515.
- [5] 刘苑秋, 王红胜, 郭圣茂, 等. 江西省退化石灰岩红壤区重建森林土壤水分与降水量和蒸发量的关系[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(12): 2588-2592.
- Liu Yuanqiu, Wang Hongsheng, Guo Shengmao, et al. Relationships of soil moisture content with precipitation and evaporation in rehabilitated forests in degraded limestone red-soil region of Jiangxi Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2588-2592.
- [6] 石明明, 王晓敏, 陈奇, 等. 高寒草地干湿生态系统土壤水分及入渗对降水的响应[J]. *草业学报*, 2021, 30(12): 49-58.
- Shi Mingming, Wang Xiaomin, Chen Qi, et al. Responses of soil moisture to precipitation and infiltration in dry and wet alpine grassland ecosystems [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(12): 49-58.
- [7] Liu Muxing, Wang Qiuyue, Guo Li, et al. Influence of canopy and topographic position on soil moisture response to rainfall in a hilly catchment of Three Gorges reservoir area, China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(6): 949-968.
- [8] 赵晓光, 吴发启, 刘秉正, 等. 黄土高原坡耕地土壤水分主要受控因子研究[J]. *水土保持通报*, 1999, 19(1): 10-14, 32.
- Zhao Xiaoguang, Wu Faqi, Liu Bingzheng, et al. Effects of primary factors on soil moisture in cultivated slopeland [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(1): 10-14, 32.
- [9] He Zimiao, Jia Guodong, Liu Ziqiang, et al. Field studies on the influence of rainfall intensity, vegetation cover and slope length on soil moisture infiltration on typical watersheds of the Loess Plateau, China [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(25): 4904-4919.
- [10] 石春茂, 罗娅, 杨胜天, 等. 干热河谷区不同坡位土壤水分对降雨的响应特征[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(5): 1352-1362.
- Shi Chunmao, Luo Ya, Yang Shengtian, et al. Responses of soil moisture at different slope positions to rainfall in dry-hot valley [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(5): 1352-1362.
- [11] Ding Wenbin, Wang Fei, Dong Yunyun, et al. Effects of rainwater harvesting system on soil moisture in rain-fed orchards on the Chinese Loess Plateau [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 243: 106496.
- [12] Zhang Junyi, Duan Limin, Liu Tingxi, et al. Experimental analysis of soil moisture response to rainfall in a typical grassland hillslope under different vegetation treatments [J]. *Environmental Research*, 2022, 213: 113608.
- [13] 王秋月. 三峡山地典型坡面土壤水分动态变化及影响因素分析[D]. 湖北 武汉: 华中师范大学, 2021.
- Wang Qiuyue. Analysis of soil moisture dynamic and influencing factors on typical hillslopes in the Three Gorges Mountains [D]. Wuhan, Hubei: Central China Normal University, 2021.
- [14] Zhao Chunlei, Jia Xiaoxu, Zhu Yuanjun, et al. Long-term temporal variations of soil water content under different vegetation types in the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2017, 158: 55-62.
- [15] Su Bingqian, Shangguan Zhouping. Decline in soil moisture due to vegetation restoration on the Loess Plateau of China [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(3): 290-299.
- [16] 冯雪瑾, 张志华, 杨喜田, 等. 太行山低山丘陵区人工林表层土壤有机碳和全氮分布特征[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 511-517.
- Feng Xuejin, Zhang Zhihua, Yang Xitian, et al. Distribution characteristics of surface soil organic carbon and total nitrogen in forest plantation of hilly area of Taihang Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 511-517.
- [17] 张志华, 张锦豪, 桑玉强, 等. 太行山南麓坡面土壤碳氮空间变异性及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2829-2838.
- Zhang Zhihua, Zhang Jinhao, Sang Yuqiang, et al. Spatial variations and its influencing factors of soil carbon and nitrogen on the southern foot of Taihang Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2829-2838.
- [18] 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 Lu, Zhang Shengwei, Zhu Zhongyuan, 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.
- [19] 杨磊, 张涵丹, 陈利顶. 黄土宽梁缓坡丘陵区次降雨对土壤水分补给效率与阈值研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(4): 457-466.

- Yang Lei, Zhang Handan, Chen Liding. Identification on threshold and efficiency of rainfall replenishment to soil water in semi-arid loess hilly areas [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2018, 48(4):457-466.
- [20] 石明明, 王晓敏, 周秉荣, 等. 高寒草原根系层土壤水分动态及其对降雨格局的响应[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(9):1723-1729.
- Shi Mingming, Wang Xiaomin, Zhou Bingrong, et al. Dynamic change of soil moisture at root layer and its response to precipitation pattern in the alpine grassland [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(9):1723-1729.
- [21] Liu Ziqiang, Liu Qianqian, Wei Zijun, et al. Partitioning tree water usage into storage and transpiration in a mixed forest [J]. *Forest Ecosystems*, 2021, 8(1):72.
- [22] Fu Zihuan, Yan Zhifen, Wang Yunqiang. The deep soil water dynamics and its environmental controls after long-term revegetation [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 628:130530.
- [23] 高瑞, 王祎珂, 艾宁, 等. 陕北特色经济林深层土壤有机碳特征及影响因素[J]. *森林与环境学报*, 2021, 41(5):464-470.
- Gao Rui, Wang Yike, Ai Ning, et al. Characteristics and influencing factors of deep soil organic carbon in characteristic economic forest in Northern Shaanxi [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2021, 41(5):464-470.
- [24] Niu Chenyu, Shi Yuefeng, Fan Guoqiang, et al. Effect of rock fragments on soil water and nutrient: A case study in rocky mountain area of North China [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24(1):716-731.
- [25] 骆紫藤, 牛健植, 孟晨, 等. 华北土石山区森林土壤中石砾分布特征对土壤大孔隙及导水性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3):305-308, 316.
- Luo Ziteng, Niu Jianzhi, Meng Chen, et al. Effects of distribution of rock fragment on macropores and hydraulic conductivity in forest soil in rocky mountain area of Northern China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(3):305-308, 316.
- [26] Fu Chaofeng, Bian Zihao, Xi Jianjian, et al. Spatial distribution characteristics of soil moisture in different types of sand dune in the Mu Us sandy land, adjacent to North of Chinese Loess Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(4):151.
- [27] Liu Dongdong, She Dongli. Can rock fragment cover maintain soil and water for saline-sodic soil slopes under coastal reclamation? [J]. *Catena*, 2017, 151:213-224.
- [28] Gong Tiexiong, Zhu Yuanjun, Shao Ming'an. Effect of embedded-rock fragments on slope soil erosion during rainfall events under simulated laboratory conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563:811-817.
- [29] Diaz F, Jimenez C C, Tejedor M. Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 74(1):47-55.
- [30] 景建生, 刘子琦, 李渊, 等. 石漠化治理区不同植被类型浅层土壤水分对降雨的响应[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(3):100-109.
- Jing Jiansheng, Liu Ziqi, Li Yuan, et al. Vegetation types affect responsive change in soil moisture to rainfall in under Karst rocky desertification control areas [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(3):100-109.
- [31] 杨志成, 柯奇画, 马芊红, 等. 喀斯特地区黄壤坡面土壤水分对降雨的响应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2):75-79.
- Yang Zhicheng, Ke Qihua, Ma Qianhong, et al. Response of soil moisture to rainfall on Karst yellow soil slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2):75-79.
- [32] 洪光宇, 王晓江, 刘果厚, 等. 毛乌素沙地杨柴灌木林土壤水分对不同降雨格局的响应[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2):76-83.
- Hong Guangyu, Wang Xiaojiang, Liu Guohou, et al. Response of soil moisture to different rainfall patterns in hedysarum leave in Mu Us sandy land [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2):76-83.
- [33] 贺帅, 王晓江, 洪光宇, 等. 降雨对柠条锦鸡儿固沙林土壤水分动态变化特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(05):106-112.
- He Shuai, Wang Xiaojiang, Hong Guangyu, et al. Effect of rainfall on characteristics of soil water dynamic in *Caragana microphylla* sand fixation forest [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5):106-112.
- [34] Lee E, Kumar P, Barron-Gafford G A, et al. Impact of hydraulic redistribution on multispecies vegetation water use in a semiarid savanna ecosystem: An experimental and modeling synthesis [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(6):4009-4027.
- [35] 党毅, 王维, 张永娥, 等. 坝上高原不同植被类型覆盖下土壤水分含量对降雨的动态响应[J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(5):106-118.
- Dang Yi, Wang Wei, Zhang Yonge, et al. Dynamic response of soil moisture content to rainfall under different vegetation cover types on the Bashang Plateau, Northwestern Hebei Province of Northern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(5):106-118.