

黄土丘陵区天然植被坡面土壤水分变化 对次降雨过程的响应

何文文^{1,2}, 肖培青^{1,2}, 何子森³, 王靖淑²

(1. 郑州大学 水利与交通学院, 郑州 450001; 2. 黄河水利科学研究院 水利部

黄土高原水土保持重点实验室, 郑州 450003; 3. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 郑州 450046)

摘要: [目的] 探究黄土丘陵区天然植被坡面土壤水分的动态变化过程, 对定量评价植被水文效应具有重要意义。[方法] 以天水市罗玉沟流域的裸地、灌木地和草地坡面为研究对象, 基于野外人工模拟降雨, 利用水分测定仪进行全过程监测, 分析了不同被覆坡面土壤水分随降雨时间的动态变化特征, 阐明不同深度不同坡位土壤水分的空间分布规律。[结果] 裸地、灌木地和草地的土壤含水量均值分别为 23.6%, 26.0%, 36.7%, 植被覆盖显著提升了土壤持水能力; 裸地、灌木地和草地的变异系数分别为 31.0%, 37.0%, 18.0%, 草被覆盖坡面土壤水分空间异质性最低。草地和灌木地土壤含水量垂直变化总体上随土层深度增加呈平稳增长趋势, 裸地则呈现先增加后减少趋势, 深层水分空间异质性增强。不同坡位的土壤水分空间变异性显著($p < 0.05$), 上坡位土壤水分变化剧烈, 中、下坡位变化相对平稳。[结论] 降雨过程中植被覆盖坡面的土壤含水量均值高于裸地, 随着土层深度增加不同被覆坡面土壤水分的波动性逐渐减弱, 中、下坡位的水分变化较上坡位相对稳定。草地和灌木地增加了坡面土壤水分的储存能力, 为黄土丘陵区林草措施的优化配置提供科学依据。

关键词: 土壤水分; 动态变化; 天然植被; 野外模拟降雨; 黄土丘陵区

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0042-08

Response of soil moisture variation of natural vegetation slopes to individual rainfall in loess hilly-gully region

He Wenwen^{1,2}, Xiao Peiqing^{1,2}, He Zimiao³, Wang Jingshu²

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau of Ministry of Water

Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 3. College of Surveying

and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: [Objective] Studying the dynamic variation process of soil moisture on natural vegetation slopes in the loess hilly-gully region is important for quantitatively evaluating vegetation's hydrological effects. [Methods] Bare land, shrubland, and grassland slopes in Luoyugou watershed of Tianshui City were selected as study sites. Continuous monitoring throughout the rainfall process was conducted using moisture meters based on artificial simulated rainfall. The dynamic variation characteristics of soil moisture on differently covered slopes with rainfall duration were analyzed, and the spatial distribution patterns of soil moisture at different depths and slope positions were elucidated. [Results] The mean soil moisture contents of bare land, shrubland, and grassland were 23.6%, 26.0% and 36.7% respectively, indicating that vegetation cover significantly enhanced soil water retention capacity.

收稿日期: 2025-05-27

修回日期: 2025-06-25

接受日期: 2025-07-08

资助项目: 国家自然科学基金(U2243210); 河南省自然科学基金(252300421756, 252300420859); 黄河水利科学研究院科技发展基金(黄科发 202312)

第一作者: 何文文(1999—), 女, 河南濮阳人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: 2625860963@qq.com

通信作者: 肖培青(1972—), 女, 河南卫辉人, 博士, 教授级高工, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: peiqingxiao@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

The variation coefficients of bare land, shrubland, and grassland were 31.0%, 37.0% and 18.0% respectively, demonstrating that grassland slopes exhibited the lowest spatial heterogeneity of soil moisture. Vertical changes of soil moisture in grassland and shrubland generally showed steady growth with increasing soil depth, while bare land exhibited an initial increase followed by decrease, with enhanced spatial heterogeneity in deep soil layers. Significant spatial variability in soil moisture was observed at different slope positions ($p < 0.05$), showing drastic changes at upper slopes but relatively stable conditions at middle and lower slopes. [Conclusion] Vegetation-covered slopes exhibit higher mean soil moisture content than bare land during rainfall. Soil moisture variability gradually decreases with increasing soil depth across cover types, with middle and lower slope positions demonstrating greater stability in moisture dynamics compared to upper slopes. Grassland and shrubland increase soil moisture storage capacity on slopes, providing a scientific basis for optimal allocation of forestry and grassland measures in the loess hilly-gully region.

Keywords: soil moisture; dynamic variation; natural vegetation; field rainfall simulation; loess hilly-gully region

土壤水分是生态系统水循环的重要组成部分,是联系大气水、地表水、地下水的重要纽带^[1-3]。短历时暴雨是土壤水分补给的关键驱动力,次降雨作用下坡面径流—入渗过程受植被、土壤和地形地貌的共同耦合作用^[4-6]。黄土高原退耕还林还草工程实施以来,区域植被覆盖状况得到明显改善,不同植被类型由于冠层截留、地表覆盖和根系结构对降雨的再分配作用,暴雨条件下水分响应产生分异调控^[7-8]。因此,明晰次降雨过程中不同植被覆盖坡面土壤水分的动态响应变化,有助于深入了解水分在不同土地被覆类型中的分布与流动,为优化区域水土保持措施提供理论基础。

关于黄土高原土壤水分变化过程的研究取得了重要进展,揭示了降雨、土壤及植被类型对土壤水分的影响作用^[9-11],阐明了不同降雨模式下土壤水分的运移过程^[12-13]。王佳珍^[14]、赵意茹^[15]等研究表明,降雨过程中不同深度土层的土壤含水量呈现差异化响应特征。表层土壤含水量受降雨影响最为显著,变化最为剧烈;中层土壤因水分运移过程的缓冲作用,土壤含水量变化趋于平稳;深层土壤含水量则呈现明显滞后性,变化幅度最小^[16]。白雨诗^[17]、姚雪玲^[18]等研究发现,不同土层土壤含水量对降水响应存在差异,且土壤水分的时空稳定性随土层深度呈正相关关系。周怡雯等^[19]基于三峡库区典型分布的茶园为对象,发现降雨和土壤含水量均表现出明显的季节性特征,随土层深度增加,土壤水分对降雨的响应逐渐呈现滞后现象。何子森等^[20]揭示了暴雨作用下土壤水分的流动存在梯度性差异和非均匀性特征。不同土地利用类型及不同深度土层的土壤含水量对降雨的响应程度也有所差异,尤其是大雨或暴雨条件下土壤含水量发生显著变化^[21]。王坤悦

等^[22]研究表明,不同植被类型下降雨量越大,降雨能补给的土层深度越深,土壤水分补给效果越好。吴远菲等^[23]通过对黄土丘陵区典型灌木和荒草地土壤水分对天然降雨的响应研究,发现不同土地利用类型土壤水分具有显著差异,荒草地土壤含水量总体高于灌木地。

目前,关于土壤水分变化的研究多集中于天然降雨前后的对比分析,针对不同植被覆盖类型在次降雨过程中的坡面水分动态变化研究较少。因此,本文以黄土丘陵区天然植被坡面为研究对象,基于人工模拟降雨试验,对比裸地、灌木地、自然草地3种被覆类型的土壤水分变化,深入分析不同被覆条件下土壤水分的变化特征及其对次降雨过程的响应,以期为区域生态林草措施建设提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省天水市北郊黄土丘陵沟壑区罗玉沟流域(105°42'E, 34°36'N),是黄河流域渭河的一条支沟(图1)。流域地表覆盖厚层黄土,沟壑密度 3.54 km/km²,平均坡度 15°,海拔 1 500 m。该区处于亚热带气候和温带大陆性气候过渡区,年均气温约 10 °C,年均降水量 551.2 mm,主要集中在汛期 7—9 月,约占年降水量的 80%,且多以大雨、暴雨形式出现。多年平均土壤侵蚀模数为 5 510 t/(km²·a)。流域土壤具有较好的耕作性能,但透水性能较差,易板结。植被类型主要为灌木、草本植物及部分乔木。灌木主要为紫穗槐(*Amorpha fruticosa* L.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.),草本植物以龙须草(*Eulaliopsis binata* (Retz.) C.E.Hubb.)、小冠花(*Securigera varia* (L.) Lassen)为主,伴有少量蒿类(*Artemisia* spp.)。

2 试验设计与研究方法

2.1 试验小区与装置系统

通过野外实地勘察,试验区布设于罗玉沟流域下游的一块天然撂荒地坡面,小区坡度为 15° 。试验小区长 10 m、宽 2 m,包含有自然草地覆盖小区、灌木地小区和裸地对照小区(图 2)。自然草地小区为龙须草、小冠花,覆盖度约为 90%,其中龙须草约占 75%,龙须草平均株高 12.5 cm,主根长 15.2 cm,小冠花平均株高 20.6 cm,主根长 74 cm。灌木主要为紫穗槐,覆盖度约 30%,平均株高 45 cm,主根长 40 cm。

野外人工模拟降雨试验系统采用 QYJY-501 型便携下喷式装置。经多次雨强和雨量的率定试验,结果表明,三组降雨器喷头喷洒的雨滴粒径大小及降雨终速均与天然降雨的相应参数高度接近,相似度达 80% 以上。基于以往研究中降雨对土壤影响深度的相关结论,本研究将土壤水分测量范围确定为 0—100 cm。采用土壤剖面水分测定仪(PR2/6)进行原位连续监测,该仪器通过单根探杆上分布的 6 个土壤

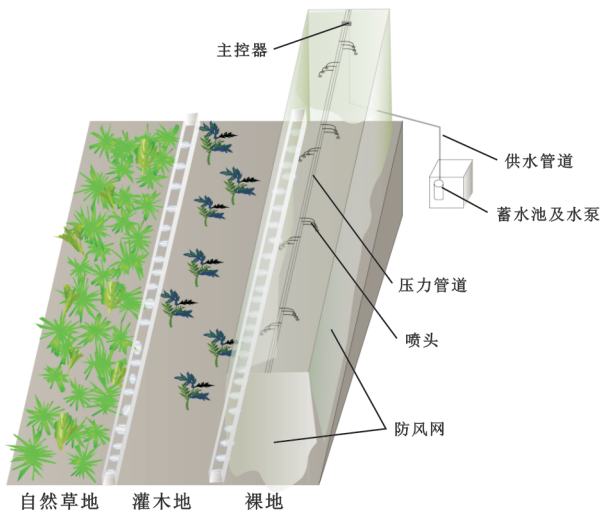


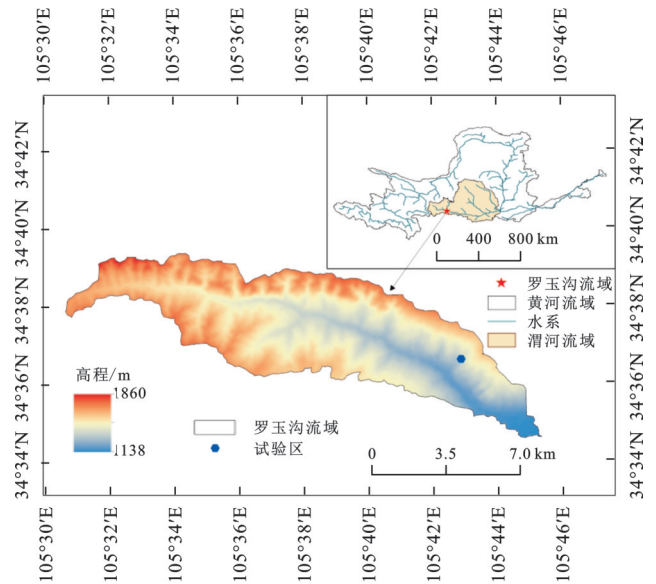
图 2 试验小区及植被垂直结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental plots and vegetation vertical structure

2.2 试验设计及数据处理

参考黄土高原侵蚀性降雨标准、试验区高概率暴雨事件以及当地降雨特征,试验设计降雨强度为 90 mm/h,总历时 1 h,在不同被覆坡面小区的上、中、下坡位分别布设观测点。数据采集时间间隔设为 5 min,利用 PR2/6 传感器读数快速获取不同坡位不同深度的土壤体积含水量。为消除初始含水量对入渗过程的差异性,在每次模拟暴雨试验前 24 h 实施标准化预处理,采用 30 mm/h 的前期降雨至坡面刚出现产流,并通过含水量采集验证所有试验小区表层土壤含水率基本稳定在 20% 左右。正式试验启动前,使用防雨布覆盖小区,待降雨强度率定完成后移

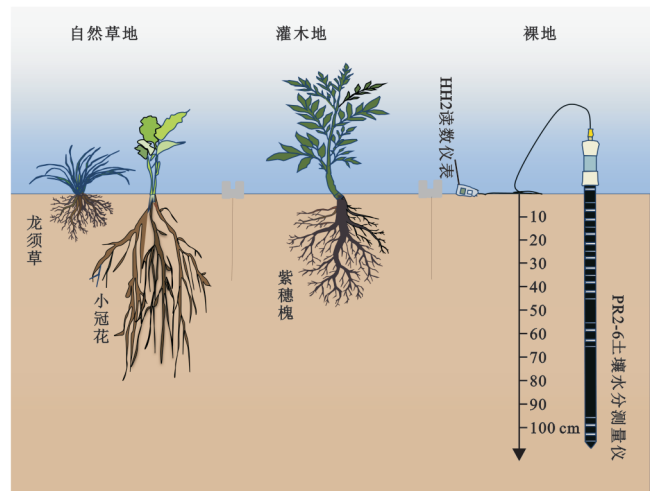
水分探头,可同步获取 10, 20, 30, 40, 60, 100 cm 深度处的土壤含水量。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)3333 号的标准地图制作,底图未做修改。

图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location map of the study area



除防雨布并开始试验;试验过程中,采用防风网以减小风对降雨分布的干扰。每次降雨试验至少重复 1 次,并根据初步结果及试验现场情况进行补充试验,累计完成 7 场降雨试验。根据不同覆盖类型获得 638 组数据。根据变异系数 CV 评估土壤水分含量的空间变异性,应用 Excel 实现土壤水分差异性层次的划分,Origin 实现土壤水分变化过程的动态分析。变异系数 CV 及标准差 s 的计算公式分别为:

$$CV = s / \bar{x} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: \bar{x} 为样本平均值; n 为样本总数; x_i 为样本的第 i 个观测值。

3 结果与分析

3.1 不同被覆坡面土壤水分动态变化

人工模拟降雨条件下,不同被覆坡面土壤含水量对次降雨的响应过程存在显著差异。由表1可知,降雨过程中裸地、灌木地和草地的土壤含水量均值分别为23.6%、26.0%、36.7%,表现为草地>灌木地>裸地,植被覆盖显著提高了土壤的持水能力($p < 0.01$)。同时,植被覆盖大幅降低了土壤水分空间变异性,裸地变异系数为31%,自然草地变异系数(CV)均值最低为18%,灌木地CV均值最高为37%,植被表层覆盖和根系影响了水分分布的空间异质性。

土壤含水量变化过程随降雨历时均呈递增趋势,响应动态特征因覆盖类型而异(图3)。降雨初期(0~10 min),裸地土壤水分未明显增加,呈先降低后升高的滞后现象,平均土壤含水量呈波动性增长,从21.7%增长到25.9%,这可能与降雨过程中地表土壤结皮的动态变化有关。灌木地土壤含水量增幅有限,从24.4%增长到26.7%,其根系分布较深但密度较低,能够在一定程度上改善土壤结构促进水分下渗,但其吸水效率相对较低。草地土壤含水量增长绝对值不大,相对稳定,从35.4%增长到37.5%。随着降雨持续时间的延长,不同被覆类型下土壤平均含水量峰值呈现明显时间差异性,草地在降雨开始后35 min时达

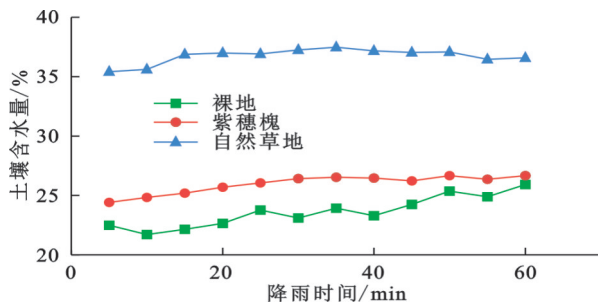


图3 不同被覆坡面土壤含水量动态过程

Fig. 3 Dynamic process of soil moisture under different vegetation-covered slopes

3.2 土壤水分垂直分布特征

图5,图6为不同被覆类型的土壤水分垂直变化特征,各土层土壤水分差异均达到显著水平($p < 0.01$)。裸地土壤水分随土层深度的增加,呈现先增大(0—40 cm)后减小(40—100 cm)的趋势,其变异系数整体呈增长—降低—增长趋势。裸地浅层土壤易受降雨冲击形成物理结皮,限制了水分的进一步下渗,导致该层土壤含水量较高但空间变异大。40—60 cm受表层结皮影响,水分补给受限,土壤含水量逐渐下降且趋于稳定,因此变异系数略有下降。在

到最大值为37.5%;其次为灌木地,在降雨开始后50 min时达到最大值为26.7%;裸地在降雨开始后60 min时达到最大值为25.9%。

不同被覆坡面土壤水分变异系数均随降雨历时呈阶段性递减趋势(图4)。在0~10 min内,土壤水分下渗较快,土壤表层含水量迅速增加但分布不均,导致土壤含水量变化较为显著,CV值较大。在10~45 min内CV值呈稳定下降的趋势,土壤接近饱和状态,水分下渗速度减缓分布逐渐均匀。45~60 min阶段,土壤水分变化再次活跃,CV值有一定的波动,CV值从下降转为上升的趋势主要与深层土壤水分运移过程及植被的作用有关,在降雨后期土壤水分是一个复杂性变化过程。灌木地CV值在降雨30 min后土壤水分变异性发生突变,这可能与根系分布特征对水分运移过程的影响作用有关。试验数据分析表明,草地在降雨过程中表现出更强的水分保持能力,且土壤水分的活跃程度较小。

表1 不同被覆坡面土壤含水量变化
Table 1 Soil moisture variation under different vegetation-covered slopes

植被覆盖类型	平均值/%	最小值/%	最大值/%	标准差/%	变异系数/%
裸地	23.6	21.7	25.9	7.3	31.0
灌木地	26.0	24.4	26.7	10.0	37.0
草地	36.7	35.4	37.5	7.0	18.0

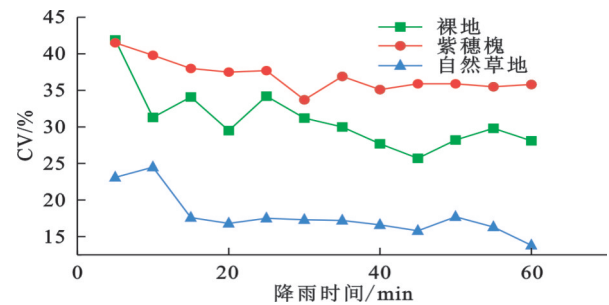


图4 不同被覆坡面土壤水分变异性

Fig. 4 Soil moisture variability under different vegetation-covered slopes

60—100 cm的深层土壤中,受持续入渗影响,土壤水分分布仍表现出一定的不均匀性,CV值再次上升。

灌木地土壤水分从表层到深层整体表现为增长趋势。0—40 cm土层,CV值呈下降趋势且变幅较大;大于40 cm土层,CV值呈增长趋势且变幅较小,该现象可归因于其根系垂直分布特征。紫穗槐根系主要分布在40 cm深度附近,降雨后浅层(0—40 cm)水分快速积累,但因根系密度相对较低,水分吸收效率受限,导致水分动态波动剧烈、空间异质性高。随着土层深度增加(>40 cm),根系对水分的吸收作用

增强,水分分布趋于平稳,CV值较低。这表明紫穗槐能够通过其深根系将水分吸收到更深的土壤中,尤其是在60 cm以上的土层,土壤水分变化较为平稳使得深层水分空间分布趋于均质化。通过对比分析裸地和灌木地土壤含水量,土层深度超过60 cm时,两种坡面土壤含水量差别较大。在浅层土壤范围内,土壤水分的分布主要受降雨及土壤质地、结构等物理特性的共同影响,紫穗槐种植时间及其植被类型的差异尚未成为主导因素。灌木地60 cm以下深层土壤含水量远大于裸地,其显著性水平 p 值均小于0.01,表明植物根系通过调控深层土壤水分的吸收与持留能力,导致不同土层深度含水量差异显著。

草地各土层平均土壤含水量最高,且随深度增

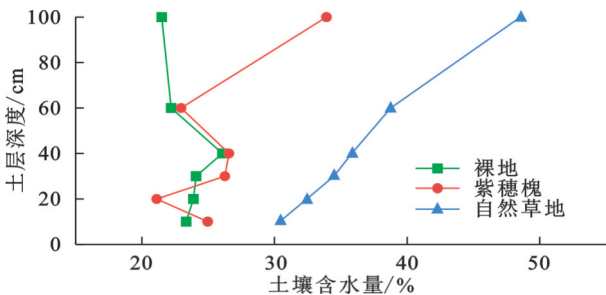


图 5 不同深度土壤含水量

Fig. 5 Soil moisture content at different depths

图 7 为不同被覆坡面不同深度土壤含水量随降雨时间的变化过程,浅层 10 cm 深度的土壤含水量对降雨响应最为剧烈,裸地土壤含水量随降雨时间的延长而迅速增加,灌木地和草地的土壤含水量呈现前期增长、后期稳定的特征,但两者增长停滞时间点不同。不同被覆类型各土层达到近似饱和状态的时间点存在差异。裸地深度小于 20 cm 时,土壤含水量整体呈上升趋势,但在 15 min 和 45 min 出现明显波动。灌木地、草地浅层土壤含水量增幅较小,整体变化趋于稳定,表明浅层深度的水分运移速率较低。中层(30—40 cm)土壤含水量草地最

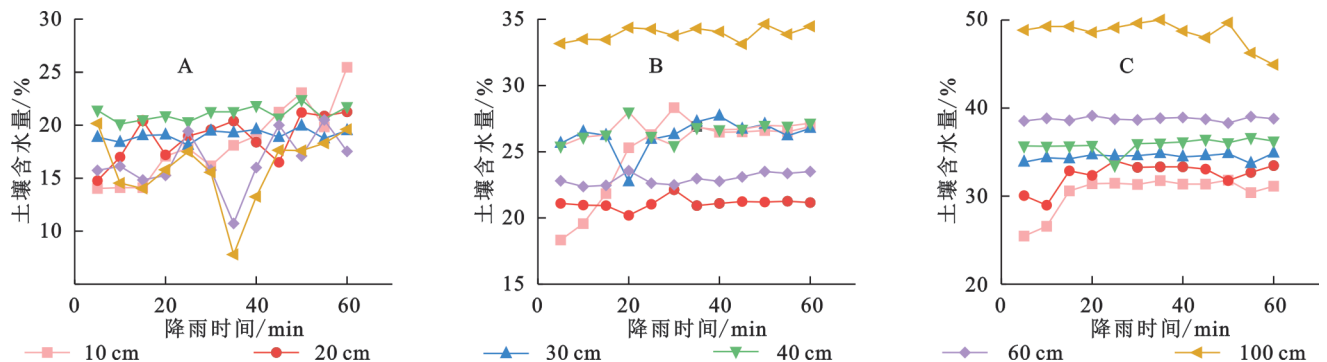


图 7 不同深度土壤含水量变化过程

Fig. 7 Variation process of soil moisture content at different depths

3.3 不同坡位土壤水分的空间分布变异特征

不同被覆坡面上、中、下坡位土壤含水量随降雨

加呈平稳增长趋势,其CV值在0—30 cm土层呈下降趋势,大于30 cm土层CV值低且变幅较小。草地表层土壤有较强的水分保持能力,不仅能在浅层有效保持水分,还能促进水分向下渗透到深层,减少土壤水分波动性,进而降低空间异质性。草地各深度土壤含水量均显著高于裸地和灌木地,凸显高植被覆盖度对土壤含水量的关键作用。灌木地和草地在土层深度小于30 cm的相邻土层变异系数差别较大,30 cm土层深度以下的相邻土层变异系数差别较小,裸地整体较大。表明降雨对土壤水分活跃性的影响受不同被覆类型调控:对于植被覆盖坡面,其影响主要表现在0—30 cm土层范围内;对裸地而言,影响可延伸至更深土层。

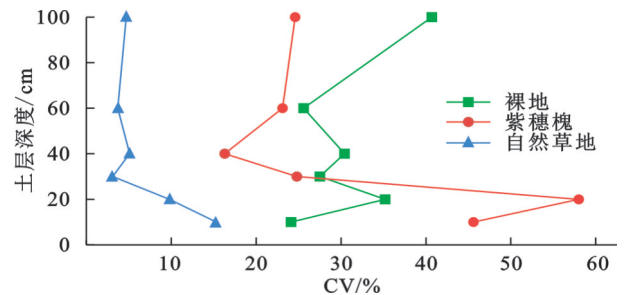


图 6 不同深度土壤含水量变异性

Fig. 6 Variability of soil moisture content at different depths

高,变化最为平稳,灌木地次之,裸地最低。灌木地较低的覆盖度及较强的根系吸水能力使得中层土壤含水量较为集中,且变化较为稳定。深层(60—100 cm)土壤含水量裸地波动较大,且在降雨开始后 35 min 发生突变达到最低值,这可能受深层土壤质地或局部水分运移影响。深层土壤各土层间土壤水分的差异较小,且变化曲线交叉较少,表明降雨入渗增加了整体土壤含水量,但对于土壤剖面中水分的相对分布影响有限。当土壤含水量接近饱和和状态时,水分积累速率减缓,中层和深层土壤含水量的变化趋于平稳。

时间的动态响应存在显著差异(图 8)。在坡面上坡位,草地土壤含水量最高变化平稳,灌木地前期土壤

水分得到迅速补充,后期趋于稳定,裸地土壤含水量波动较大,这表明无植被覆盖坡面水分空间分布异质性高,土壤含水量呈现波动变化。在中坡位,地势较为平缓,利于水分积累,裸地土壤含水量呈上升趋势,灌木地变化较小,草地呈上升趋势,植被覆盖坡面土壤含水量高且相对稳定。下坡位地势较低,易汇集水分,裸地和灌木地土壤含水量整体呈上升趋势,草地

因接受径流补给,含水量最高,但后期呈现下降趋势。随降雨历时延长,各坡位土壤含水量均有所增加,不同坡位的含水量变化幅度为上坡位>中坡位>下坡位,表明降雨入渗是土壤水分补给的主要驱动力。土壤水分随降雨历时延长而增加,不同坡位间土壤水分分布具有显著的空间变异性,其显著性水平 p 值均小于 0.05,且该分异性在不同被覆类型下均成立。

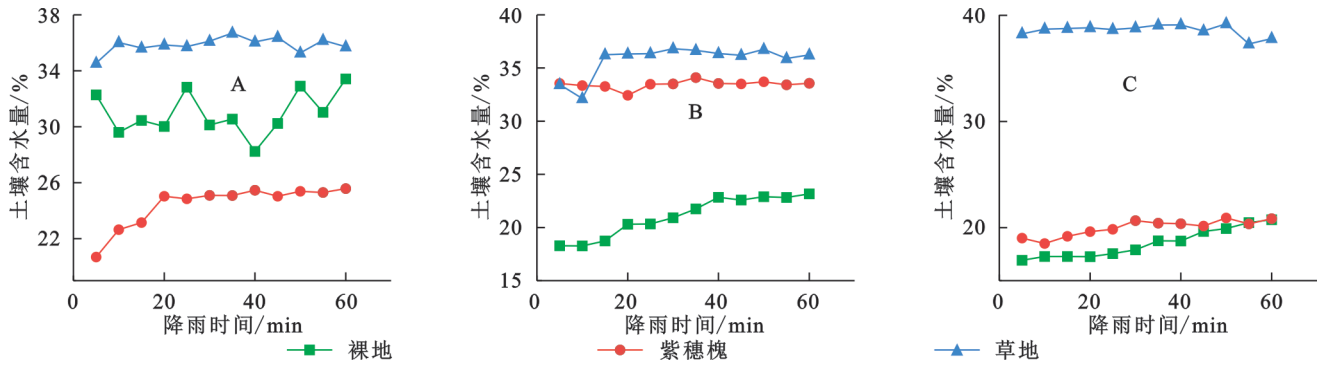


图 8 不同被覆坡面各坡位土壤含水量变化

Fig. 8 Variations in soil moisture content on different slope positions under different vegetation-covered slopes

不同坡位土壤水分垂直剖面空间异质性如图 9 所示,上、中坡位土壤水分变异系数随土层深度由浅至深呈“V”型和“S”型变化,总体变异程度为上坡位>中坡位>下坡位。裸地各坡位土壤含水量随土层深度显示下降趋势,在下坡位,土壤含水量虽仍较低,但由于上、中坡位的径流水分易在此聚积,从而在一定程度上补充了土壤水分,其下降幅度有所减缓。紫穗槐灌木地在上坡位土壤含水量小于裸地,中坡

位大于裸地,下坡位土壤含水量在 40—100 cm 土层范围内大于裸地且随土层深度增加,出现明显的增长趋势,变异系数小于裸地,这与植物根系对水分的稳定吸收作用有关。草地不同坡位土壤含水量均最高,且随深度平稳增加。变异系数最小,表明植物根系及覆盖度对降雨影响显著,保水效果更为明显,特别是在较深土层(如 40—100 cm)中,草地和灌木地的土壤含水量均高于裸地。

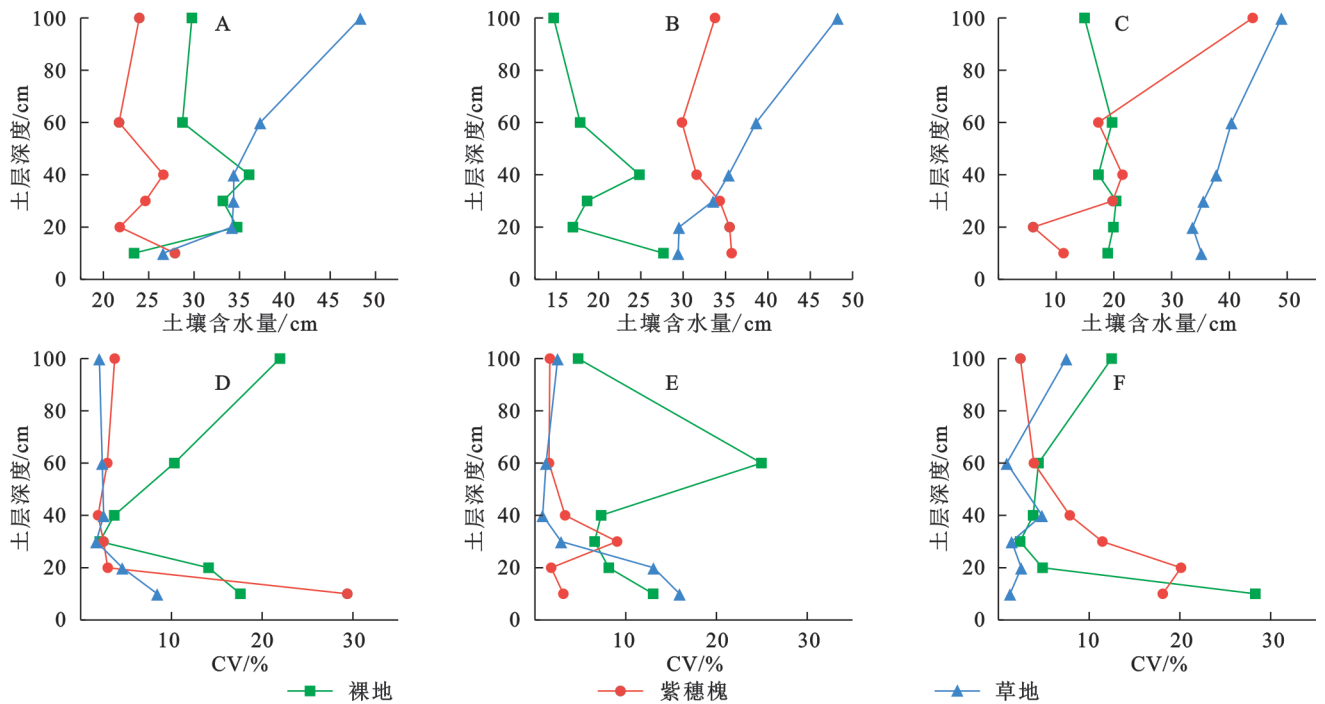


图 9 不同被覆坡面不同深度各坡位土壤含水量及变异性

Fig. 9 Soil moisture content and variability at different slope positions and depths under different vegetation-covered slopes

4 结论

(1) 降雨过程中裸地、灌木地和草地的土壤含水量大小为草地>灌木地>裸地,草被和灌木覆盖坡面的平均土壤含水量均高于裸地坡面。不同被覆坡面土壤水分变异性与植被种类有关,草地的变异性最小,灌木地的变异性最大,裸地土壤水分的波动性最强。

(2) 不同被覆坡面降雨对含水量的影响主要集中在0—20 cm浅层土壤。草地和灌木地土壤含水量的垂直变化为平稳增长趋势,空间变异性随深度增加趋于稳定。裸地坡面不同深度土壤水分呈先增加后下降趋势,大于60 cm的深层土壤水分空间异质性增强。

(3) 不同坡位土壤含水量及其变异性具有显著的空间分异特征,上坡位土壤水分变化最剧烈,中、下坡位的水分变化相对平稳。不同被覆坡面上、中坡位土壤水分变异系数随土层深度呈“V”型和“S”型变化。此外,草地不同坡位的土壤含水量最高,而变异系数最低。

土壤水分动态变化受多种因素耦合作用的共同影响,本文基于模拟降雨试验从植被类型方面探讨了土壤水分运动的变化特征。未来研究可结合野外天然降雨数据采集,进一步揭示不同植被坡面降水量、径流量和土壤水分变化量的平衡关系,为区域水土保持措施配置提供理论支持。

参考文献(References):

- [1] Ma Y J, Li X Y, Guo L, et al. Hydropedology: Interactions between pedologic and hydrologic processes across spatiotemporal scales[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 171:181-195.
- [2] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546:113-122.
- [3] 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.
- [4] 王瑞兵,邹杰,丁建丽,等.土壤水分是中亚干旱区植被生长的驱动力[J].*生态学报*, 2025, 45(9):4294-4311.
Wang R B, Zou J, Ding J L, et al. Volumetric water content as the main driver of vegetation growth in the Arid Zone of Central Asia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(9):4294-4311.
- [5] Huang L M, Shao M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 199:102962.
- [6] 王云强,张少康,张萍萍,等.黄土高原关键带土壤水文过程研究进展与展望[J].*地质通报*, 2024, 43(8):1346-1360.
Wang Y Q, Zhang S K, Zhang P P, et al. Research progress and prospect of soil hydrological processes in critical zone of the Loess Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(8):1346-1360.
- [7] Tiwari S, Turnbull L, Wainwright J. Local- and global-scale hydrological and sediment connectivity over grassland and shrubland hillslopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 655:132896.
- [8] Jia X X, Shao M G, Yu D X, et al. Spatial variations in soil-water carrying capacity of three typical revegetation species on the Loess Plateau, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 273:25-35.
- [9] 王子涵,龚铭,赵炯昌,等.黄土残源沟壑区人工林小流域土壤水分时空变化特征[J].*水土保持研究*, 2025, 32(1):92-100.
Wang Z H, Gong M, Zhao J C, et al. The spatiotemporal variations in soil moisture of artificially afforested areas in small watershed of the Gully Region in the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1):92-100.
- [10] Xu L, Gao G Y, Wang X F, et al. Distinguishing the effects of climate change and vegetation greening on soil moisture variability along aridity gradient in the drylands of northern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 343:109786.
- [11] Shi S H, Wang X L, Hu Z R, et al. Geographic detector-based quantitative assessment enhances attribution analysis of climate and topography factors to vegetation variation for spatial heterogeneity and coupling[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2023, 42:e02398.
- [12] Guo H W, Ng C W W, Zhang Q. Three-dimensional numerical analysis of plant-soil hydraulic interactions on pore water pressure of vegetated slope under different rainfall patterns[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(9):3696-3706.
- [13] 周红娟,刘子赫,刘柯言,等.不同降雨条件下北京土石山区混生乔灌植物的水分吸收和生态位特征[J].*植物生态学报*, 2024, 48(9):1089-1103.
Zhou H J, Liu Z H, Liu K Y, et al. Water uptake and niche characteristics of neighboring plants for arbors and shrubs under different rainfall conditions in a rocky mountainous area, Beijing[J]. *Chinese Journal of Plant*

- Ecology, 2024, 48(9):1089-1103.
- [14] 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.
- [15] 赵意茹,高钰琪,王中琦,等.黄土塬区不同土地利用方式土壤水分对次降雨的响应特征[J].水土保持研究,2025,32(2):34-42.
Zhao Y R, Gao Y Q, Wang Z Q, et al. Response of soil water content to rainfall events under different land use types on the loess tableland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2):34-42.
- [16] A Y, Wang G Q, Sun W C, et al. Stratification response of soil water content during rainfall events under different rainfall patterns [J]. Hydrological Processes, 2018, 32(20):3128-3139.
- [17] 白雨诗,刘目兴,易军,等.三峡山地沟谷不同坡位土壤水分特征及对降雨过程的响应[J].长江流域资源与环境,2020,29(10):2261-2273.
Bai Y S, Liu M X, Yi J, et al. Response of soil moisture to precipitation in different slope areas in typical hill slope of the Three Gorges Mountain area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(10):2261-2273.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 何子森,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区野外坡面土壤水分变化对次降雨过程的响应[J].中国水土保持科学,2018,16(4):16-24.
He Z M, Xiao P Q, Hao S L, et al. Response of soil moisture variation to individual rainfall on the field slope in the loessial hilly-gully region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4):16-24.
- [21] 林佳欣,罗为群,张谭锋,等.峰丛洼地不同土地利用方式土壤水分对降雨入渗的响应机制[J].节水灌溉,2025(4):24-30,37.
Lin J X, Luo W Q, Zhang T F, et al. Response mechanism of soil moisture to rainfall infiltration in peak-cluster depression under different land use patterns [J]. Water Saving Irrigation, 2025(4):24-30, 37.
- [22] 王坤悦,李旭红,余新晓,等.北京山区典型植被土壤水分对次降雨的响应[J].生态学报,2024,44(6):2561-2571.
Wang K Y, Li X H, Yu X X, et al. Response of soil moisture of typical vegetation to individual rainfall in Beijing mountain area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(6):2561-2571.
- [23] 吴远菲,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区典型灌木和荒草地土壤含水量变化对降雨的响应[J].水土保持研究,2022,29(4):121-126.
Wu Y F, Xiao P Q, Hao S L, et al. Response of soil moisture of typical shrubland and waste grassland to precipitation in the loess hilly-gully region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4):121-126.