

黄土高原沟壑区不同植被恢复方式对降雨入渗的影响

李若萱, 范碧航, 林珂, 江彦佳, 张亚玲, 王二清, 许航, 郭立

(四川大学水利水电学院, 成都 610065)

摘要: [目的] 为研究不同植被恢复措施对黄土坡面降雨入渗过程的影响。[方法] 选取黄土高原西峰南小河沟植被自然恢复(草地景观)和人工植树造林(林地景观)小流域组成配对流域。2017—2018 连续采集 10 min 分辨率气象数据和不同坡位(山坡、沟谷)5 个深度(10、20、40、60、100 cm)的土壤水分数据, 探究降雨后土壤水分入渗的响应特征及影响因素。[结果] 1) 不同降雨属性显著影响土壤湿润深度和湿润速度, 降雨量大、降雨强度大且历时长降雨更容易引起土壤水分响应和水分深层下渗。2) 林地促进土壤水分深层入渗。与草地(40~60 cm)相比, 林地(60~100 cm)的湿润深度更深、湿润速度更快(13.6、8.2 cm/h), 优先流发生频率更高(18.3%、14.6%)。然而, 过高的植被覆盖度(如林地沟谷点)对水分入渗产生一定抑制作用。3) 地形因素显著影响坡位间土壤水分的响应特征, 沟谷的湿润深度(60~100、20~40 cm)、湿润速度(13.6、8.2 cm/h)和优先流发生频率(18.3%、14.6%)均高于山坡。[结论] 研究结果量化对比不同植被恢复措施(草地和林地)对降雨入渗黄土坡面的影响, 有助于深入理解黄土高原小流域产流能力对不同植被恢复措施的响应, 为黄土高原生态治理提供理论支撑。

关键词: 对比小流域; 优先流; 土壤水分; 植被恢复; 入渗机制

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0060-11

Effects of Different Vegetation Restoration on Rainfall Infiltration in the Loess Plateau Gully Region

LI Ruoxuan, FAN Bihang, LIN Ke, JIANG Yanjia, ZHANG Yaling, WANG Erqing, XU Hang, GUO Li

(College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: [Objective] In order to understand the impact of different vegetation restoration measures on rainfall infiltration processes on loess slopes is of critical importance. [Methods] Paired watersheds in the Nanxiaohe Valley of Xifeng, Loess Plateau, were selected to represent natural vegetation restoration (grassland landscape) and artificial afforestation (forest landscape). From 2017 to 2018, meteorological data with a 10-minute resolution and soil moisture data at different slope positions (uphill slope, downhill gully) and five depths (10, 20, 40, 60 and 100 cm) were continuously collected. The characteristics and influencing factors of soil moisture infiltration in response to rainfall events were analyzed. [Results] 1) Different rainfall attributes significantly influenced soil wetting depth and wetting velocity. Rainfall events with greater intensity, higher total rainfall, and longer duration were more likely to trigger soil moisture responses and promote deeper infiltration. 2) Forestland facilitated deeper soil moisture infiltration. Compared with grassland, forestland exhibited deeper wetting depths (60–100, 40–60 cm), faster wetting velocities (13.6, 8.2 cm/h), and higher preferential flow frequencies (18.3%, 14.6%). However, excessive vegetation coverage (e.g., at the forest downhill gully) inhibited water infiltration to certain degree. 3) Topography significantly influenced soil moisture response characteristics between slope positions. Downhill gully areas exhibited deeper wetting depths (60–100, 20–40 cm), faster wetting velocities (13.6, 8.2 cm/h), and higher preferential

收稿日期: 2024-11-25

修回日期: 2025-03-05

录用日期: 2025-04-12

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-16

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(42201033)

第一作者: 李若萱(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文变化规律及其应用研究。E-mail: 2023223060015@stu.scu.edu.cn

通信作者: 范碧航(1987—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事山区水文与水资源研究。E-mail: fanbh@scu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

flow frequencies (18.3%, 14.6%) than uphill slope areas. [Conclusion] These findings quantitatively compare the effects of different vegetation restoration measures (grassland and forestland) on rainfall infiltration on loess slopes, can provide valuable insights into the response of runoff generation capacity under varying vegetation restoration strategies. This research offers theoretical support for ecological restoration efforts on the Loess Plateau.

Keywords: paired watersheds; preferential flow; soil moisture; revegetation; infiltration mechanism

Received: 2024-11-25

Revised: 2025-03-05

Accepted: 2025-04-12

Online(www.cnki.net): 2025-05-16

黄土高原作为全球最为严重的水土流失区之一^[1],生态系统极为脆弱。该地区独特的地质结构与强烈的降雨模式,导致坡面侵蚀和土壤退化问题尤为严重^[2]。为减少水土流失并改善土壤结构,国家推出退耕还林(草)等一系列生态治理工程。随着系列工程的实施,黄土高原的土壤侵蚀显著减轻,河流泥沙明显减少,但出现植被蒸发过多、产流能力显著下降的现象^[3-4]。已有研究^[5]表明,黄土高原的降雨—产流机制发生重大变化,部分地区出现从“超渗产流”向“蓄满产流”转变趋势。降雨入渗是降雨—产流机制的关键过程,直接调控地表径流、土壤水储量、地下水补给^[6]。因此,在大规模植被恢复的背景下,深入研究黄土高原降雨入渗规律及驱动机制具有重要意义。

降雨入渗过程受到降雨条件、土地利用和地形等多种因素的共同影响^[7]。黄土的普遍各向异性与原生、次生节理的相互转化,发育丰富的优先流通道,成为黄土高原降雨入渗的重要路径^[8]。已有研究^[9]表明,黄土丘陵区土壤储水量对单次降雨的响应主要取决于降雨量;土壤水分从山坡到沟谷再到沟床逐渐增加,不同土地利用类型在坡位间分布规律各异^[10]。优先流在黄土高原的分布特征受到植被类型显著影响。例如,刺槐人工林地的优先流发育最为显著,且细根对其形成具有促进作用,而高土壤体含水率和较大的根系则抑制优先流的发生^[11]。尽管部分研究揭示降雨入渗过程中土壤优先流的存在,但对其在不同植被覆盖和地形条件下的触发机制与空间分布特征的深入分析仍显不足。现阶段关于黄土高原降雨入渗机制的研究^[12]多集中于长期的水文响应分析,而对降雨事件后土壤水分短期动态变化的定量研究则较为缺乏。因此,针对黄土高原不同植被恢复类型下的坡面降雨—土壤水分响应的短期动态、土壤优先流发生机制,仍是亟需进一步研究的方向。

本研究在甘肃西峰南小河沟水土保持试验站选择2个典型的对比小流域^[13],利用实时土壤水分监测来表征根区土壤水分对降雨的短期动态响应,量化不同植被覆盖(草地与林地)下降雨入渗模式(如湿润深度、湿润速度及引发土壤充分入渗的最小降雨

量),识别优先流发生频率,评估山区小流域自然和人为生态治理措施下的植被和地形位置对黄土高原降雨入渗规律的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在黄土高原甘肃省庆阳市附近的南小河沟流域(35°41'~35°44'N, 107°30'~107°37'E)进行,流域面积36.3 km²。该地区为半干旱内陆气候,年平均气温9.3℃,年平均降水量556.5 mm,年降水量的80%以上集中在5—10月。研究区为典型的黄土高原沟壑区地貌,塬面、梁峁坡与沟谷型交替^[14],海拔1050~1423 m。当地的地质构造比较单一,所覆盖的黄土几乎全部来自第四纪黄土,厚度约为250 m,质地主要为粉砂壤土,土壤侵蚀严重。

本研究选择西峰南小河沟草地(董庄沟)和林地(杨家沟)小流域组成配对流域^[15],2个相邻的小流域具有非常相似的流域形态特征和水文土壤条件(图1、表1),最大程度剔除非植被因素的潜在影响,旨在比较植被自然恢复与人工植树造林对小流域生态水文过程的影响。1954年起,国家开展一系列生态治理工作,在董庄沟实施植被自然恢复方案,在杨家沟实施植树造林方案。经过60 a的植被恢复,2条小流域已形成完全不同的景观。董庄沟形成自然草地小流域,主要植被为冰草、野古草和白羊草等;杨家沟形成人工森林小流域,主要植被为小乔木(如刺槐、山杏和油松等)和林下灌木(如茅莓、草葡萄和薄叶鼠李等)。

2条小流域的主要地貌单元包括塬面、山坡和沟谷。塬面坡度低于5°,作为农田管理,不进行植被恢复;山坡坡度为10°~20°,面积约占流域总面积的25%,连接塬面和沟谷;沟谷坡度较陡(>25°),植被覆盖度高。在草地小流域,山坡的植被覆盖度约为60%;沟谷植被覆盖度高达65%。大多数草根分布在表层土壤(0~20 cm),0~100 cm土层土壤有机碳质量分数为5.22 g/kg。在林地小流域,山坡植被覆盖度为50%,林下植被较少;沟谷植被覆盖度达到90%以上,林下植被丰富。乔灌木根系深入数米,0~100 cm土层土壤有机碳质量分数为3.84 g/kg。

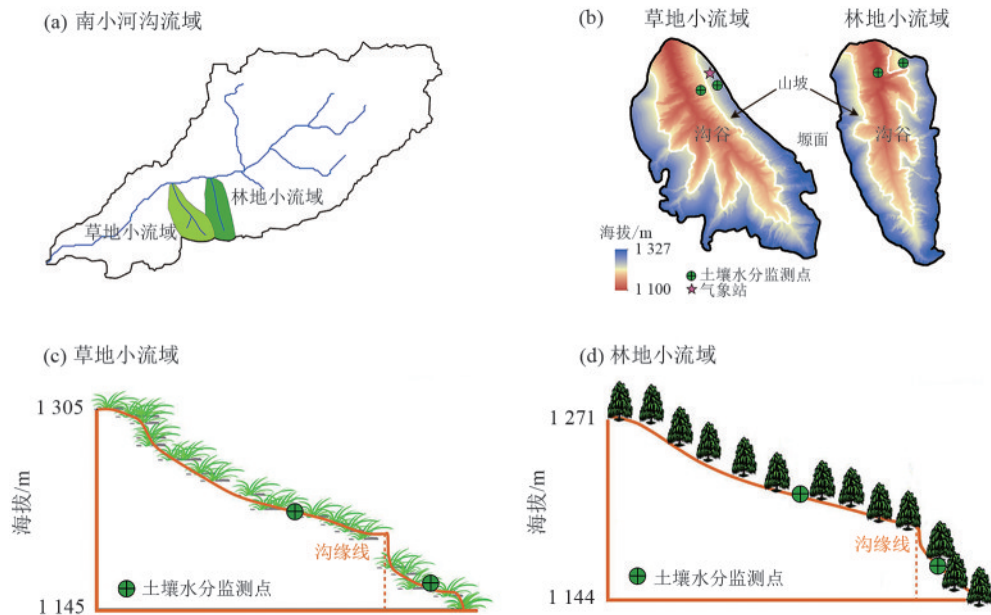


图 1 研究区域与监测站点布设

Fig.1 The study area and layout of the monitoring sites

表 1 研究区对比小流域自然地形地貌特征

Table 1 Natural topographic and geomorphic characteristics of contrasting watersheds in the study area

流域	总面 积/km ²	塬面 积/km ²	塬面 占比/ %	山坡面 积/km ²	山坡 占比/ %	沟谷面 积/km ²	沟谷占 比/%	沟长/ m	沟道比 降/%	土壤体积 质量/ (g·cm ⁻³)	土壤孔 隙度/%	砂粒/ %	粉粒/ %	黏粒/ %
草地小流域 (董庄沟)	1.15	0.38	33.0	0.315	27.4	0.455	39.6	1 600	8.93	1.28± 0.08	0.55± 0.03	7.59± 0.39	83.24± 0.87	9.05± 1.89
林地小流域 (杨家沟)	0.87	0.30	34.5	0.208	23.9	0.362	41.6	1 500	10.67	1.33± 0.05	0.51± 0.03	6.14± 1.88	83.45± 1.67	10.53± 0.66

注:土壤性质的数据为平均值±标准差。下同。

1.2 监测内容

在草地山坡的空地安装自动气象站(Onset U30 NRC; Onset Company, 美国),从 2017—2018 年每 10 min 记录 1 次降水量。草地和林地小流域分别设有 2 个土壤水分监测点,位于山坡和沟谷区域,局部坡度分别为草地山坡约 20°、草地沟谷约 35°、林地山坡约 20°、林地沟谷约 45°。4 个监测剖面的土壤结构均匀,分层特征一致,表层有机层厚度约 10 cm,以下无显著分层。从 2017—2018 年,在每个监测点的山坡土坑内垂直设置 5 个土壤水分探头(EC-5 探头,精度 ±0.1 体积百分比;METER Group, Inc., Pullman, 华盛顿),深度分别为 10、20、40、60、100 cm,数据通过 EM50 记录仪(METER Group, Inc., 美国)每 10 min 记录 1 次(图 1b)。

1.3 研究方法

在降雨入渗与优先流分析中,采用双阈值法参考文献划分降雨事件,以最小无雨时间(T_p)和最小降雨量(T_a)为标准。当 2 次降雨事件时间间隔超过 T_p 时,将其视为独立降雨事件;同时,将降雨总量低于 T_a 的降雨记录排除在分析之外。参考 JIN 等^[13]的研究,本研

究将 T_a 设为 0.4 mm, T_p 设为 96 h,共划分出 44 个降雨事件。土壤水分响应起点按深度定义为浅层(10、20 cm)以 10 min 内土壤水分增量 ≥ 0.4% 为响应,深层(40、60、100 cm)以累计水分增量 > 0.2% 为响应。基于此标准,降雨事件被划分为触发土壤水分响应(22 个响应事件)和未触发响应(22 个无响应事件)。通过分析土壤水分时间序列,记录不同站点和深度的响应起始时间,并计算湿润深度(最深响应探针深度)、滞后时间(降雨开始至响应的间隔)、触发所需降雨量(滞后时间内累计降雨量)及湿润速度(深度/响应时间)。计算并比较 4 个地点在研究期内的平均土壤储水量,阐明土壤水分垂直分布与生态水文过程的关系。

参考 GRAHAM 等^[16]研究,根据土壤水分探头的响应模式,将水分响应分为 6 类:1)顺序流,所有探针按深度顺序响应;2)顺序流,连续深度的部分探针按顺序响应;3)优先流,仅深层探针响应,浅层探针无响应;4)优先流,深层探针早于或同步于浅层探针响应;5)优先流,湿润速度超过当地土壤饱和和导水率 10 倍(草地 5.4 cm/h,林地 8.4 cm/h);6)无检测流,无探针响应。根据每次降水输入事件的响应模式,确

定 4 个监测站的优先流频率,并记录响应时间及相关特征参数。

采用 K-means 聚类法按降雨历时、总降雨量和峰值雨强将事件划分为 4 组:短时、高降雨量、高强度的大雨(Ⅰ组);短时、少雨、高峰值强度的中雨(Ⅱ组);持续时间长、由多个单次降雨组成的连续降雨,雨量中等、平均强度低(Ⅲ组);短时、少量、低强度的小雨(Ⅳ组)。在选取用于探讨优先流发生时土壤水分动态变化的典型降雨事件时,确保所选事件符合降雨强度、时长及土壤水分响应的要求,并能够在 4 个监测站点展示明显的优先流响应,从而确保事件具备代表性和研究价值。所选事件涵盖不同降雨类型,全面反映黄土高原地区的降水特征及其对土壤水分变化的影响。由于小雨(Ⅳ组)在土壤水分响应和优先流发生上的影响较为有限,且其表现出的优先流响应较弱,因此未予考虑。通过多站点验证并排除极端降水事件,确保所选事件具备较强的普适性,避免偶然性和局限性对研究结果的干扰。最终,选择大雨(P12)、中雨(P22)和连续雨(P6)作为典型降雨事件进行进一步研究。

表 2 10 cm 土层不同降雨类型和站点的滞后时间、累计降雨量

Table 2 Lag time and cumulative rainfall at 10 cm depth for different rainfall types and sites

降雨类型/站点	滞后时间/h			滞后时间内累计降雨量/mm		
	M±SE	min	max	M±SE	min	max
Ⅰ组	5.9±5.1a	0.2	13.0	61.2±36.4a	8.8	127.7
Ⅱ组	17.2±20.1b	0.5	48.0	12.8±4.3b	6.4	15.6
Ⅲ组	58.8±34.4d	7.2	76.2	21.0±17.2b	3.6	43.0
Ⅳ组	26.9±9.9c	6.3	37.3	11.6±5.7b	3.0	18.2
草地山坡	23.7±25.7b	0.5	75.8	31.6±28.0b	3.6	89.0
草地沟谷	25.6±27.3b	0.5	76.0	35.9±28.7b	3.6	88.1
林地山坡	15.9±23.2a	0.2	76.2	21.2±24.8a	3.0	93.3
林地沟谷	11.0±13.5a	0.2	28.8	45.5±47.3c	7.2	127.7

注:min 和 max 分别为各组的最低和最高观测值;同列不同小写字母表示不同降雨类型或站点间差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 湿润深度与湿润速度

降雨事件后土壤水分入渗的湿润深度见图 2。不同降雨组间湿润深度的顺序为Ⅰ组>Ⅱ组>Ⅲ组>Ⅳ组。其中,大雨(Ⅰ组)的湿润深度最深,达到 100 cm 的事件占比超过 75%;中雨强度较高,湿润深度集中在 60~100 cm 土层;连续雨持续时间较长,但峰值雨强较低,湿润深度主要集中在 40~60 cm 土层;小雨(Ⅳ组)的湿润深度较浅,多为未响应事件。不同小流域土壤水分深层入渗的变化规律为林地小流域>草地小流域,其中林地小流域的根系作用显著促进土壤水分的深层入渗,100 cm 深度的响应事件占比为 45.5%,而草地小流域仅为 4.5%。沟谷区地势低洼,有利于周围土壤水分的汇聚,促进雨水的入渗,导致沟谷站点湿润深度达到 40~100 cm 土层的响应事件占比为 54.5%,而山坡

用单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行各监测点的平均土壤水分体积分数方差分析和多重比较($\alpha=0.05$)。所有统计分析采用 Matlab R 2022 b 和 SPSS 27.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 响应滞后时间与所需累计降雨量

在 22 个响应事件中,有 14 个降雨事件的土壤水分在 10 cm 土层时存在响应。由表 2 可知,不同降雨类型下表层土壤水分的响应滞后时间和所需累计降雨量存在显著差异。其中,大雨的滞后时间最短,平均为 5.9 h,而连续雨的滞后时间最长,平均为 58.8 h;在所需累计降雨量方面,大雨(Ⅰ组)为 61.2 mm,连续雨(Ⅲ组)为 21.0 mm。不同站点间,草地山坡和草地沟谷的响应滞后时间较长,分别为 23.7、25.6 h,林地山坡和林地沟谷的滞后时间较短,分别为 15.9、11.0 h。草地山坡、草地沟谷和林地山坡触发土壤水分响应的最小降雨量基本相同(3.0~3.6 mm)。林地沟谷由于植被覆盖度较高(>90%),冠层拦截作用较为显著,因此,需要更高的降雨量(7.2 mm)才能触发土壤水分响应。

站点为 40.9%。

由表 3 可知,不同降雨类型和站点条件对土壤湿润速度的影响差异显著。从降雨类型来看,大雨(Ⅰ组)的湿润速度在各土层均显著高于其他组($p<0.05$)。尤其是在 40、60、100 cm 土层,平均湿润速度分别达到 22.9、52.5、24.9 cm/h,显著超过草地和林地的优先流阈值(草地 5.4 cm/h,林地 8.4 cm/h),表明强降雨更容易触发优先流,促进水分快速渗透至深层土壤。相比之下,中雨(Ⅱ组)和连续雨(Ⅲ组)的湿润速度显著低于大雨(Ⅰ组),尤其在表层土壤(10、20 cm),中雨(Ⅱ组)湿润速度分别仅为 0.4、0.1 cm/h,表明较弱降雨类型主要影响表层土壤湿润,深层入渗受到明显限制。小雨(Ⅳ组)的湿润速度在各土层均较低,进一步表明,小雨对土壤湿润状态的影响有限。

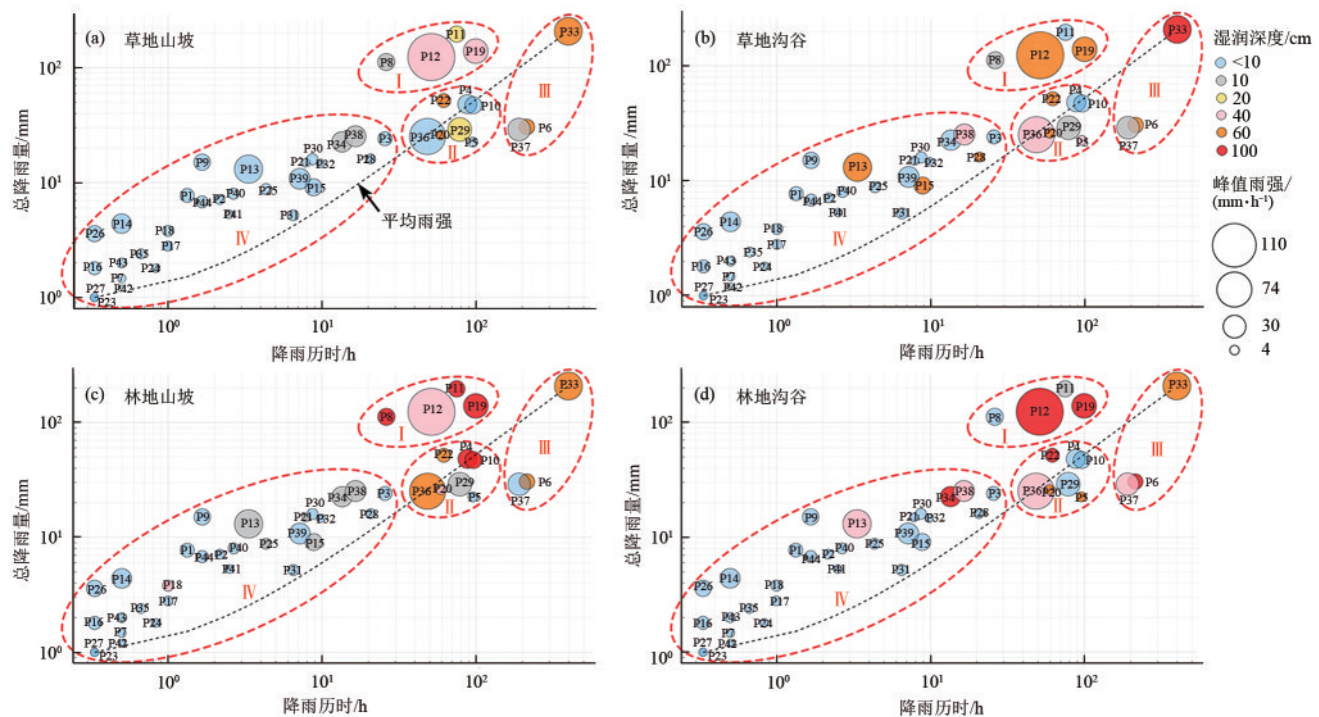


图 2 不同降雨类型下各站点的湿润深度分布

Fig.2 Distribution of wetting depths at each site under different rainfall types

表 3 土壤剖面不同降雨类型和站点的湿润速度

Table 3 Wetting velocity of the soil profile for different rainfall types and sites

降雨类型/站点	10 cm	20 cm	40 cm	60 cm	100 cm
I 组	4.9±1.7b	16.9±7.2b	22.9±8.5c	52.5±27.2c	24.9±15.8c
II 组	0.4±0.3a	0.3±0.1a	7.4±3.5b	4.0±5.7b	21.3±19.4c
III 组	0.8±0.2a	0.7±0.1a	4.9±2.3b	6.4±1.3b	3.3±1.2b
IV 组	0.3±0.4a	0.6±0a	1.0±0.3a	1.0±0.2a	0.8±0.2a
草地山坡	2.5±1.8a	6.4±5.9a	3.4±2.0a	1.4±0.3a	—
草地沟谷	2.7±2.1a	20.4±19.8c	22.9±11.5c	37.4±21.9c	1.1±0.2a
林地山坡	5.6±2.6b	10.4±9.8b	14.5±5.7b	5.9±2.9a	19.9±10.9b
林地沟谷	8.0±4.6c	30.1±17.2d	20.1±12.5c	13.5±11.7b	24.5±16.5b

从坡位和植被覆盖来看,沟谷站点的湿润速度显著高于山坡站点($p<0.05$)。其中,林地沟谷在 40、60 cm 土层的湿润速度分别为 20.1、24.5 cm/h,表现出坡度增加对降雨汇流和深层入渗的显著促进作用。林地的湿润速度整体显著高于草地($p<0.05$),如林地山坡在 20、40 cm 土层的湿润速度分别为 8.4、14.5 cm/h,均高于草地同层湿润速度;草地对深层(100 cm)的土壤水分湿润速度同样存在限制。可能与林地更高的土壤孔隙度和发达的根系网络有关^[11],增强土壤的垂直入渗能力,并有助于优先流的形成。

2.3 土壤优先流发生频率

总体来看,在 4 个站点中,有 67.0% 的降雨事件无法监测到土壤水分流动,其中顺序流发生的频率最少,仅为 11.4%。由图 3 可知,不同监测站点优先

流发生频率及其与降雨事件类型的关系。林地山坡的优先流发生频率最高,为 22.92%,其次为草地沟谷和林地沟谷,均为 20.83%,而草地山坡的优先流发生频率最低,仅为 14.58%。表明林地植被,尤其是山坡位置,更有利于优先流的形成。在不同降雨事件类型中,在优先流发生频率较低的情境下($<25\%$),主要受小雨(IV 组)和中雨(II 组)事件驱动;而随着优先流发生频率的增加,中雨(II 组)和大雨(I 组)的影响逐渐增加,尤其是在优先流发生频率达到 100% 的情境下,大雨(I 组)所占比例明显上升。表明优先流发生的频率不仅与监测站点的地理位置和植被类型相关,还受到降雨强度的显著影响。

2.4 典型降雨条件下土壤水分动态特征

为进一步探究优先流发生时土壤水分的动态变化,选取并分析 3 个典型降雨事件下土壤水分对降雨

的响应过程及优先流的发生条件,分别为 P12(大雨)、P22(中雨)和 P6(连续雨)事件。图 4 为不同站

点(草地山坡、草地沟谷、林地山坡、林地沟谷)土壤水分在 P12 大雨事件下的动态响应特征。

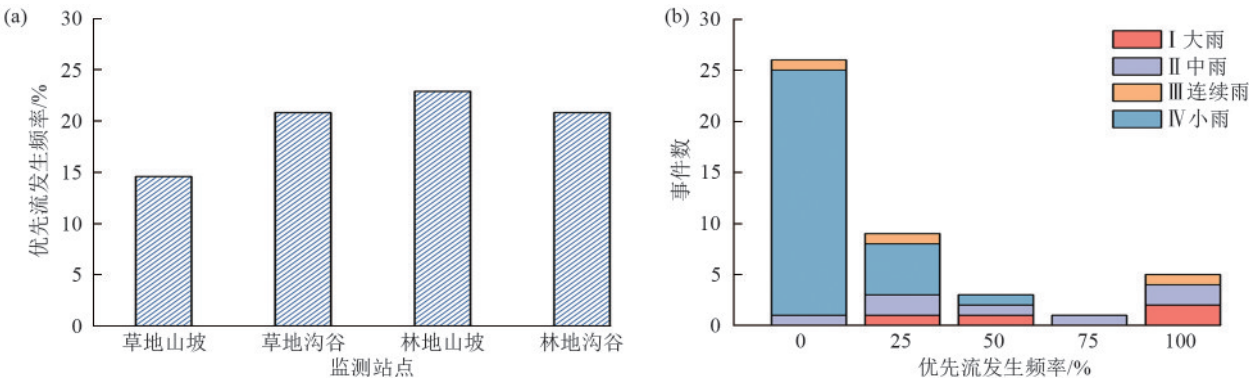


图 3 不同监测站点优先流发生频率与降雨类型的关系

Fig. 3 Relationship between preferential flow frequency and rainfall type across monitoring sites

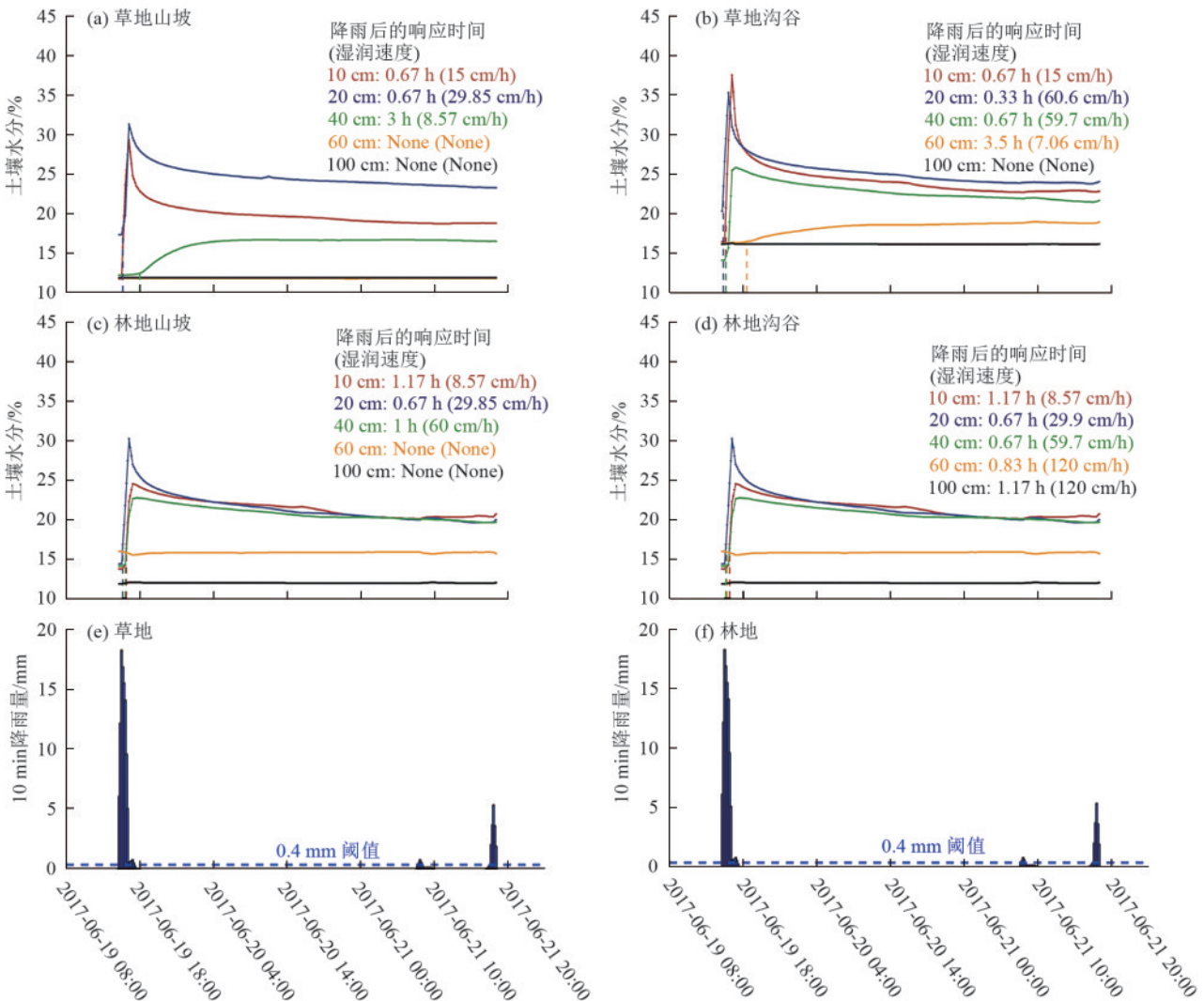


图 4 不同站点土壤水分对 P12(大雨)事件的响应

Fig.4 Soil moisture response to P12 (heavy rainfall) event at different sites

草地和林地的浅层土壤(10~20 cm)对降雨响应显著,水分迅速增加;随土层深度增加,响应减弱,部分深层(如 60、100 cm)无明显响应,尤其在草地山坡位置。林地沟谷的深层土壤湿润速度较高,表明其

较高的植被覆盖度和坡度有助于水分向深层渗透。此次降雨事件峰值雨强和平均雨强较高,分别达到 110.4、32.3 cm/h,导致土壤水分在降雨后的平均响应时间仅为 0.59 h,显著体现出优先流的早期作用。

部分土壤层的润湿速度超过 60 cm/h, 最高可达土壤剖面渗流流速的 14 倍。快速渗透特性不仅加速降雨入渗过程, 还显著增加土壤水分的运移通量。

相比 P12 事件, P22 为历时较长、雨强中等的降雨事件。由图 5 可知, 草地山坡和沟谷的土壤水分响应主要集中在 40 cm 及更深的土层, 浅层 (10~20 cm) 水分无显著变化。草地山坡的响应较为缓慢, 40、60 cm 深度分别在 19.33、38.83 h 后湿润, 湿润速

度分别为 2.07、1.03 cm/h; 草地沟谷的 40、60 cm 深度则分别在 7.5、34 h 后湿润, 速度略低。林地山坡的湿润响应较快, 40、60 cm 深度分别在 14.67、7 h 后湿润, 速度分别达 2.73、8.57 cm/h。林地沟谷的湿润更深, 40、60、100 cm 深度分别在 13.17、24.00、60.33 h 后湿润, 速度分别为 3.04、1.85、1.10 cm/h。表明林地沟谷深层土壤对降雨渗透性更强, 优先流显著促进水分迁移, 增强深层土壤的储水能力。

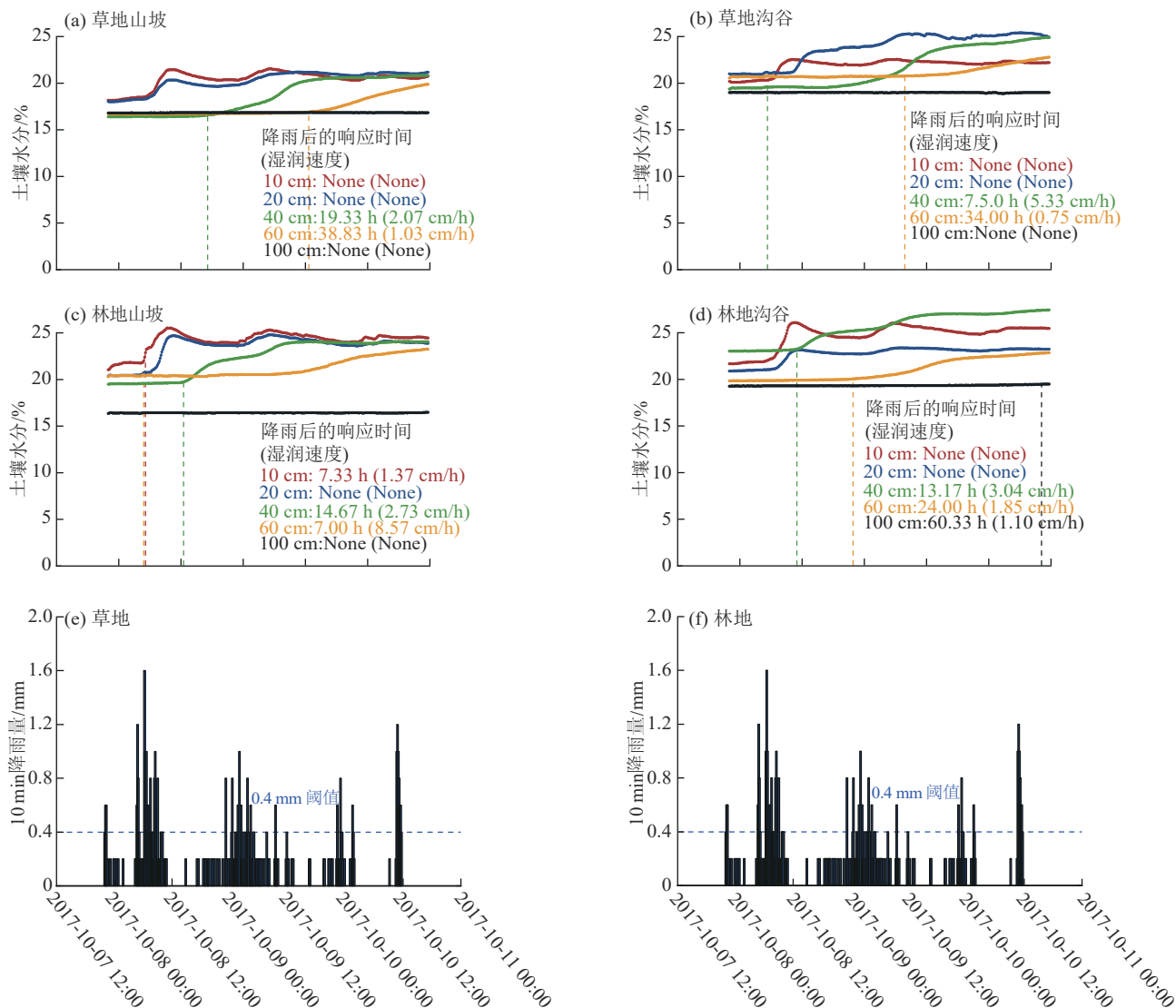


图 5 不同站点土壤水分对中雨 (P22) 事件的响应

Fig. 5 Soil moisture response to P22 (intermediate rainfall) event at different sites

在 P6 降雨事件中, 由于降雨持续时间长且雨强较低, 4 个站点的土壤水分变化总体较小。由图 6 可知, 浅层土壤水分主要受大气水分交换的影响, 在 10、20 cm 土层深度表现出昼夜波动, 但未触发明显的降雨响应。草地沟谷首先在 40 cm 深度产生优先流, 响应时间为 13.33 h, 湿润速度达 3.01 cm/h。草地山坡的响应则相对较迟, 40、60 cm 土层深度分别在 53.67、103.33 h 后湿润, 湿润速度分别为 0.75、

0.40 cm/h。在林地山坡, 土壤水分响应同样集中于深层, 40、60 cm 土层深度分别在 43.33、45.17 h 后湿润, 湿润速度分别为 0.92、0.91 cm/h。林地沟谷的深层湿润则更为延迟, 直到降雨事件开始 175 h 后, 100 cm 深度才出现湿润, 湿润速度为 0.57 cm/h。长时间滞后的深层湿润与坡位影响有关, 是降雨后山坡入渗水分通过侧向流汇集到沟谷洼地的结果。

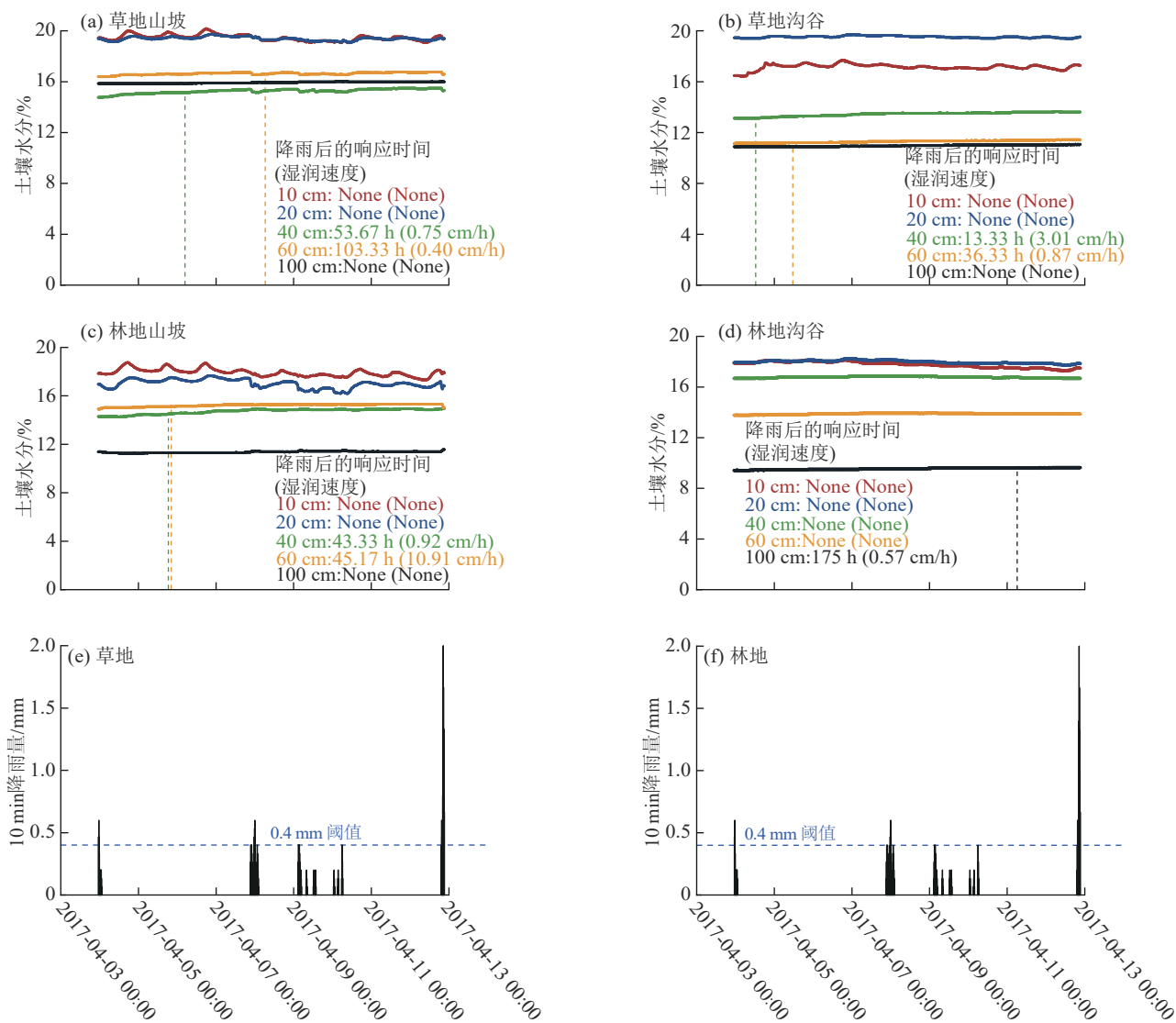


图6 不同站点土壤水分对连续雨(P6)事件的响应

Fig.6 Soil moisture response to continuous rainfall (P6) events at different sites

3 讨论

3.1 降雨条件对入渗规律的影响

大气降雨是黄土高原土壤水分补给的主要来源,同时也是决定土壤水分入渗规律的关键驱动因素^[17]。降雨的持续时间、总量和强度在决定土壤水分响应特征方面起着重要作用^[18]。大雨(I组)因总量大、强度高,能够显著触发深层土壤响应(图2)。其湿润速度在各土层均显著高于其他降雨类型,特别是在深层土壤中突破优先流阈值,表现出显著的深层渗透效应(表3)。JIN等^[13]研究表明,持续时间较短、降水量较大且峰值强度较高的暴雨有助于促进雨水的深层渗透,进一步证实在黄土高原地区,强降雨是深层土壤水分变化的主要触发因素。中雨(II组)由于降雨总量和强度适中,湿润深度主要集中在60 cm土层以内,更多影响表层和中层土壤,对深层渗透能力有限。土壤水分的明显变化通常需要

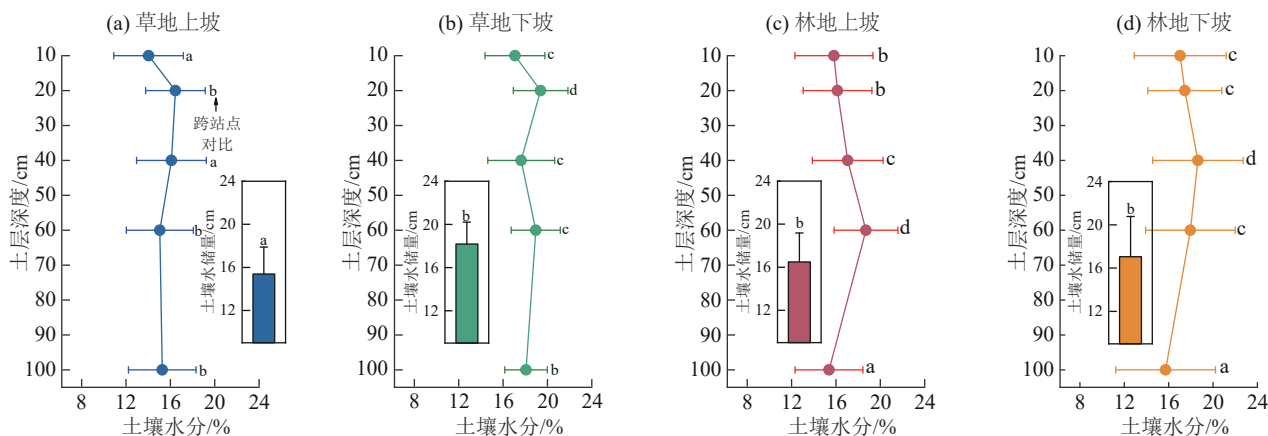
降雨量超过一定的临界值(表2)。连续雨(III组)虽强度较低,但因持续时间较长,能有效累计降雨量,对深层土壤水分补给产生一定作用。HE等^[19]研究指出,降雨强度增大不同土地覆盖类型间的地表入渗差异。本研究进一步验证此结论,认为林地和草地在湿润深度和湿润速度等方面的差异在大雨条件下比在中雨或连续降雨条件下更显著(图4~图6),凸显降雨强度对土壤水分入渗的影响。当降雨强度和总量不足时,浅层土壤水分更多受大气交换主导,未能形成有效入渗以驱动深层土壤湿润(图6)。短时、少量、低强度小雨(IV组)土壤水分响应仅限于表层,深层无明显响应。与本研究结果一致,陈伟等^[20]研究表明,小雨和中雨影响土壤水分深度为20 cm,大雨和暴雨则达60 cm,小雨补给作用有限,进一步验证小雨在深层土壤水分补给上的局限性,同时也加深对不同降水类型对土壤水分深度影响的理解。

3.2 植被与地形对入渗规律的影响

植被通过冠层截留和根系分布,显著改变降雨的再分配模式,同时改善土壤结构和水分动态,从而有效调控降雨的入渗过程^[21-22]。JIN 等^[13]强调植被对降雨入渗和土壤蓄水的重要影响。在此基础上,本研究进一步探究植被对于优先流发生的影响。林地冠层截留明显减少地表可用降雨量,从而抑制浅层土壤对降雨的快速响应(图 6)。在植被覆盖度较高的林地沟谷,其表层湿润速度较低(图 4),土壤触发响应的最小降雨量显著高于其他站点(表 2),并且限制优先流的发生(图 3)。林地发达的根系系统显著促进深层水分的渗透(图 2),同时改善土壤孔隙结构,进一步推动优先流的形成(图 3)。林地的整体湿润速度普遍高于草地(表 3)。深根系还加强对深层土壤水分的消耗,导致林地深层土壤水分体积分数

显著低于草地(图 7)。与邵明安等^[23]研究结果一致,黄土高原深根系植被的深层土壤水分体积分数显著低于浅根系植被,并且长期种植深根系植被更容易导致土壤干层的形成。表明深根系植被在促进深层水分渗透的同时,也可能加速深层土壤水分的消耗,进而影响土壤水分的长期动态平衡^[23]。因此,植被覆盖度和根系深度的变化需要在黄土高原水资源管理中得到充分考虑。

地形对植被的水分调控起到重要的辅助作用^[24]。沟谷区域更易汇集降雨,显著增强深层渗透的可能性(图 2)。与山坡区域相比,沟谷区域的优先流发生频率更高(图 3),湿润深度和湿润速度均较大(表 3)。地形通过影响太阳辐射分布,间接调节了蒸散率和土壤的蓄水能力^[25]。总体上,无论植被类型如何,沟谷区域的土壤储水能力均高于山坡区域(图 7)。



注:不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

图 7 不同站点土壤水分的垂直分布特征及土壤水储量

Fig. 7 Vertical distribution characteristics of soil moisture and soil water storage at different sites

3.3 植被恢复工程对黄土高原水文过程的影响

大规模植被恢复工程显著改变黄土高原的土壤水文特性、降雨入渗产流过程和水文动态响应^[26-28]。本研究表明,植被恢复能够显著增强降雨对土壤湿度的响应能力,但不同植被类型和坡位的作用机制存在显著差异。草地在降低触发土壤湿度响应的降雨阈值方面具有显著优势(表 2),但在湿润深度和湿润速度上相对较弱(表 3)。表明在黄土高原的水文调节中,林地恢复在促进降雨入渗深度和维持水分动态方面更具优势^[10]。由于黄土高原降雨具有显著的时空变异性,降雨事件对深层土壤的补给能力有限(图 2)。JIA 等^[29]研究表明,植被恢复导致深层土壤水分的下降,对地下径流和深层土壤水分产生显著影响。而在本研究中,尤其在林地深层(60~100 cm),土壤水分体积分数显著低于草地(图 7),此现象在林地沟谷尤为突出。对比结果表明,高强度林地恢复抑制深层土壤水分的长期积累,从而潜在引发

深层土壤干化的问题^[30]。JIN 等^[5]研究表明,相比于植被自然恢复,人工植树造林改变土壤的水分状况,显著抑制径流生成。因此,未来黄土高原的植被恢复应着重协调生态效益与水资源平衡^[31]。建议根据区域水文特性选择适宜的植被类型,并结合坡位差异进行合理配置^[32]。对于陡坡,应优先种植草地或低矮灌木,以其较强的渗透性减少径流、促进雨水入渗;而在平缓坡面,则应推广深根系乔木或灌木,增强土壤水分的稳定性和蓄水能力。同时,应强化对深层土壤水分的监测,防止高强度植被恢复引发土壤干化问题。通过科学规划植被类型与分布,结合不同植被的水分需求与土壤特性,避免单一植被种类的依赖,从而实现植被恢复在提升生态功能的同时,保障水资源的可持续利用。

4 结论

1)在不同降雨属性下,土壤水分对降雨的响应呈

显著差异。小雨事件(Ⅳ组)中,浅层(10~20 cm)与深层(40~100 cm)土壤均无明显响应,湿润速度均较低;连续雨事件(Ⅲ组)湿润深度主要集中在40~60 cm土层,中雨事件(Ⅱ组)湿润深度集中在60~100 cm土层,大雨事件(Ⅰ组)湿润深度多超过100 cm土层,暴雨事件湿润深度达到土壤剖面最大深度,湿润速度在深层显著超过优先流阈值。

2)不同植被类型显著影响土壤水分的响应与优先流特征。林地优先流发生频率为22.92%,明显高于草地的14.58%;深层土壤水分的响应在林地更加明显,林地沟谷湿润深度、湿润速度与储水能力均显著高于草地,暴雨事件中林地沟谷100 cm土层土壤湿润事件比例达到45.5%,而草地仅为4.5%。

3)地形因素决定坡位间土壤水分响应和优先流的空间分布特征。林地山坡优先流发生频率最高,而草地山坡最低;在降雨响应滞后性方面,草地山坡滞后时间最长(23.7 h),而林地沟谷滞后时间最短(11.0 h);沟谷站点的湿润速度显著高于山坡站点。总体上,沟谷区域的土壤湿润深度与响应能力优于山坡区域。

参考文献:

- [1] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
LI Z S, YANG L, WANG G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [2] ZHAO G, MU X, WEN Z, et al. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the Loess Plateau of China[J]. Land Degradation and Development, 2013, 24(5): 499-510.
- [3] WANG S, FU B J, GAO G Y, et al. Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2883-2892.
- [4] CHEN H, ZHANG X P, ABLA M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2018, 170: 141-149.
- [5] JIN Z, GUO L, YU Y L, et al. Storm runoff generation in headwater catchments on the Chinese Loess Plateau after long-term vegetation rehabilitation[J]. Science of the Total Environment, 2020, 748: e141375.
- [6] DALY E, PORPORATO A. A review of soil moisture dynamics: From rainfall infiltration to ecosystem response[J]. Environmental Engineering Science, 2005, 22(1): 9-24.
- [7] WANG S, FU B J, GAO G Y, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2013, 101: 122-128.
- [8] MEI X M, ZHU Q K, MA L, et al. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a loess hillslope[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(5): 1353-1365.
- [9] 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 B C, ZHU Y, SHEN X J, 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.
- [10] 马耘秀,夏露,范毅,等.不同土地利用和地形条件对黄土丘陵区土壤水分的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(9):77-84.
MA Y X, XIA L, FAN Y, et al. The combined effects of land usage and topography on soil moisture change in a loess area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(9): 77-84.
- [11] 牛凤娇,潘成忠,崔永生,等.晋西黄土区土地利用对降雨入渗产流模式和优先流分布的影响试验研究[J].生态学报,2023,43(10):4154-4166.
NIU F J, PAN C Z, CUI Y S, et al. Experimental investigation to the effect of different land-use on rainfall infiltration runoff patterns and preferential flow distribution in the loess area of western Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(10): 4154-4166.
- [12] YAN R, CAI Y P, LI C H, et al. Hydrological responses to climate and land use changes in a watershed of the Loess Plateau, China[J]. Sustainability, 2019, 11(5): e1443.
- [13] JIN Z, GUO L, LIN H, et al. Soil moisture response to rainfall on the Chinese Loess Plateau after a long-term vegetation rehabilitation[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(12): 1738-1754.
- [14] 夏露,宋孝玉,符娜,等.黄土高原沟壑区绿水对土地利用和气候变化的响应研究:以南小河沟流域为例[J].水利学报,2017,48(6):678-688.
XIA L, SONG X Y, FU N, et al. Impacts of land use change and climate variation on green water in the Loess Plateau Gully Region: A case study of Nanxiaohegou basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 678-688.
- [15] 刘斌,常文哲,许晓梅.杨家沟流域水土保持措施对产流产沙的影响[J].人民黄河,2008,30(11):77-78.
LIU B, CHANG W Z, XU X M. Effects of soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in Yangjiagou watershed[J]. Yellow River, 2008, 30(11): 77-78.

- [16] GRAHAM C B, LIN H S. Controls and frequency of preferential flow occurrence: A 175-event analysis [J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(3): 816-831.
- [17] LI Y S, HUANG M B. Pasture yield and soil water depletion of continuous growing alfalfa in the Loess Plateau of China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 124(1/2): 24-32.
- [18] ZHU P Z, ZHANG G H, WANG H X, et al. Soil moisture variations in response to precipitation properties and plant communities on steep gully slope on the Loess Plateau [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 256: e107086.
- [19] HE Z M, JIA G D, LIU Z Q, 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.
- [20] 陈伟, 李亚新, 王红阳, 等. 黄土丘陵区坡耕地与撂荒地土壤水分对降雨的响应特征 [J]. *生态学报*, 2022, 42(1): 332-339.
- CHEN W, LI Y X, WANG H Y, et al. Dynamic response characteristics of soil moisture on slope cultivated land and abandoned land to different rainfall intensities in loess hilly region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1): 332-339.
- [21] ZHU P Z, ZHANG G H, WANG H X, et al. Soil infiltration properties affected by typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: e125535.
- [22] 方书敏, 赵传燕, 荐圣淇, 等. 陇中黄土高原油松人工林林冠截留特征及模拟 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1509-1516.
- FANG S M, ZHAO C Y, JIAN S Q, et al. Canopy interception of pinus tabulaeformis plantation on Longzhong Loess Plateau, northwest China: Characteristics and simulation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(6): 1509-1516.
- [23] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 14-22.
- SHAO M A, JIA X X, WANG Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau [J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 14-22.
- [24] 熊雪婷, 李传华, 陈佳豪. 植被对气候变化响应的地形调控作用 [J]. *地理学报*, 2023, 78(9): 2256-2270.
- XIONG X T, LI C H, CHEN J H. Topographic regulatory role of vegetation response to climate change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(9): 2256-2270.
- [25] AGUILAR C, HERRERO J, POLO M J. Topographic effects on solar radiation distribution in mountainous watersheds and their influence on reference evapotranspiration estimates at watershed scale [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(12): 2479-2494.
- [26] FENG X M, FU B J, PIAO S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 1019-1022.
- [27] GE J, PITMAN A J, GUO W D, et al. Impact of revegetation of the Loess Plateau of China on the regional growing season water balance [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(2): 515-533.
- [28] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 等. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值 [J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 949-960.
- ZHANG K, LYU Y H, FU B J, et al. The effects of vegetation coverage changes on ecosystem service and their threshold in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(5): 949-960.
- [29] 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.
- [30] YANG L, WEI W, CHEN L D, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 475: 111-122.
- [31] LI Y R, ZHANG X C, CAO Z, et al. Towards the progress of ecological restoration and economic development in China's Loess Plateau and strategy for more sustainable development [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: e143676.
- [32] JIANG C, ZHANG H Y, WANG X C, et al. Challenging the land degradation in China's Loess Plateau: Benefits, limitations, sustainability, and adaptive strategies of soil and water conservation [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 127: 135-150.