

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.03.025 CSTR:32310.14.stbcb.2026.03.025

张婕,白晨赞,韩晓阳,等.黄土塬区土地利用方式对降雨条件下的土壤水文过程差异性调控[J].水土保持学报,2026,40(3):200-210.

ZHANG Jie, BAI Chenyan, HAN Xiaoyang, et al. Differential regulation of soil hydrological processes under rainfall conditions by land use types in loess tableland region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3):200-210.

黄土塬区土地利用方式对降雨条件下的 土壤水文过程差异性调控

张婕^{1,2,3}, 白晨赞⁴, 韩晓阳^{1,4}, 蔡伟祥⁴, 乔江波^{1,4}, 朱元骏^{1,2,3,4}

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西杨凌712100; 2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌712100; 3.中国科学院大学,北京100049; 4.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所),水土保持与荒漠化整治全国重点实验室,陕西杨凌712100)

摘要: [目的] 土壤水分是黄土塬区植物利用和地下水补给的重要来源。明确不同土地利用方式下土壤水分对降雨的响应过程与特征是区域有限水资源高效利用和生态系统可持续发展的关键。[方法] 选取黄土塬区典型的3种土地利用方式(塬面农田、草地和梯田),基于2020—2023年的30 min土壤含水量监测数据,分析3种土地利用方式0~300 cm土层土壤水分对降雨事件的响应差异及降雨入渗特征沿剖面的变化规律。[结果] 1)土壤水分响应速率(降雨入渗深度/响应时间)与最大入渗深度因土地利用方式差异显著,依次为塬面农田[(6.82±0.95) cm/h]>草地[(3.70±0.38) cm/h]>梯田[(3.24±0.32) cm/h],最大入渗深度为塬面农田(300 cm)>草地(200 cm)>梯田(160 cm)。塬面农田的降雨入渗深度和响应速率最大,且在大暴雨事件中响应速率高达35.29 cm/h;2)草地降雨储存效率(RSE)最高[(81.8±11.3)%],土壤储水量增加量(Δ SWS)也最大[(111.7±36.8) mm];梯田在大暴雨事件中RSE最低[(46.1±11.7)%];3)土壤水分响应受降雨量和降雨历时的显著影响($p<0.01$),响应幅度随土层深度增加而减弱,响应时间随土层深度增大而增加。[结论] 研究结果揭示黄土塬区典型土地利用方式下土壤水分对降雨的差异化响应特征,为区域水土资源的分异化管理、土地利用结构优化及生态系统的可持续发展提供科学依据。

关键词: 黄土塬区; 土地利用方式; 土壤水分响应; 降雨入渗; 优先流

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)03-0200-11

Differential Regulation of Soil Hydrological Processes under Rainfall Conditions by Land Use Types in Loess Tableland Region

ZHANG Jie^{1,2,3}, BAI Chenyan⁴, HAN Xiaoyang^{1,4}, CAI Weixiang⁴, QIAO Jiangbo^{1,4}, ZHU Yuanjun^{1,2,3,4}

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Soil moisture is a vital source for plant water use and groundwater recharge in the loess tableland region. Clarifying the response processes and characteristics of soil moisture to rainfall under different land use types is crucial for efficient utilization of limited water resources and sustainable development of regional ecosystems. [Methods] Three typical land use types (tableland farmland, grassland, and terraced fields) in the loess tableland region were selected. Based on 30-minute soil moisture monitoring data from 2020 to 2023, the

收稿日期: 2025-11-26 修回日期: 2025-12-29 录用日期: 2026-01-26 网络首发日期(www.cnki.net): 2026-04-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(42377316)

第一作者: 张婕(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事农田水文过程研究。E-mail: 15193381869@163.com

通信作者: 朱元骏(1978—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤水文过程及循环研究。E-mail: zhuyj@nwfau.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

response differences of soil moisture in the 0–300 cm soil layer to rainfall events and the variations in rainfall infiltration characteristics along the soil profile were analyzed for the three land use types. [Results] 1) Soil moisture response rate (infiltration depth/response time) and maximum infiltration depth differed significantly among land use types, following the order: tableland farmland [(6.82 ± 0.95) cm/h] > grassland [(3.70 ± 0.38) cm/h] > terraced fields [(3.24 ± 0.32) cm/h]. Maximum infiltration depth was: tableland farmland (300 cm) > grassland (200 cm) > terraced fields (160 cm). Tableland farmland exhibited the greatest infiltration depth and response rate, with the response rate reaching up to 35.29 cm/h during heavy rainstorm events. 2) Grassland had the highest rainfall storage efficiency (RSE) [$(81.8 \pm 11.3)\%$] and the largest increase in soil water storage (Δ SWS) [(111.7 ± 36.8) mm]. Terraced fields had the lowest RSE [$(46.1 \pm 11.7)\%$] during heavy rainstorm events. 3) Soil moisture response was significantly influenced by rainfall amount and duration ($p < 0.01$), and the response degree decreased while the response time increased with soil depth. [Conclusion] This study reveals the differential response characteristics of soil moisture to rainfall under typical land use types in the loess tableland region. The findings provide a scientific basis for differentiated management of regional water and soil resources, optimization of land use structure, and sustainable development of ecosystems.

Keywords: loess tableland region; land use type; soil moisture response; rainfall infiltration; preferential flow

Received: 2025-11-26

Revised: 2025-12-29

Accepted: 2026-01-26

Online(www.cnki.net): 2026-04-08

土壤水是连接降水、地表水与地下水中水分循环的纽带^[1],尤其是水资源短缺、地下水位深埋的黄土高原地区,降雨是土壤水分的主要补给来源,降雨入渗形成的土壤水决定着植被的生长、发育和演替^[2-3]。近些年,由于气候变化导致极端降雨事件频率和强度明显增加^[4],陆地水资源时空分布不均的现象更为严重^[5]。高强度、短历时强降雨事件,其水文效应具有双重风险与不确定性:一是降雨强度超过表层土壤的最大入渗能力,易引发水土流失,增加无效蒸发^[6];二是土壤大孔隙(优先流路径)可能在强降雨作用下,促使表层养分与污染物快速向深层淋失^[7]。因此,深入理解不同降雨条件下,降雨入渗过程及土壤水分动态响应,是量化土壤水资源和有效性的根本。

土地利用变化深刻影响着黄土高原地区土壤水分的补给、储存与消耗过程^[8-11]。然而,现有研究多集中于植被恢复背景下,探讨不同植被类型与地形条件下的降雨-土壤水分响应差异^[12-16]。针对黄土塬区不同土地利用方式之间降雨-土壤水分响应的对比研究较为缺乏。不同土地利用方式之间土壤体积质量、孔隙特征和垂直连通性的差异直接调控降雨入渗模式。黄土高原降雨入渗主要存在基质流和优先流两种形式:水分在土壤中均匀运动的形式为基质流,而优先流则是水分绕过大部分土壤基质而快速运移的现象。目前研究多基于人工模拟降雨或染色示踪实验,这些方法受限于浅层观测(<100 cm)和破坏性取样,难以捕捉持续性自然降雨(尤其是高强度

降雨)驱动下的深层土壤水分实时动态^[8,18-19]。对黄土塬区旱作农田而言(作物根系可达2 m以下^[17-18])缺乏高分辨率的连续监测,导致对高强度降雨下优先流发生过程与机制的认识不足,制约区域水文过程的模拟与预测精度。

本研究以黄土高原高塬沟壑区(黄土塬区)农田生态系统为研究对象。基于0~300 cm土层土壤含水量监测数据,研究区域3种典型土地利用方式(塬面农田、草地、梯田)的水分响应特征,揭示3种土地利用方式在不同降雨等级下的土壤水分的响应差异及可能机制。研究结果有助于更准确地理解和预测黄土塬区农田土壤水分动态,为区域农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在位于黄土塬区的中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(长武站)($35^{\circ}14'N, 107^{\circ}40'E$)进行(图1)。长武站所在区域属暖温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温为 $9.1^{\circ}C$,年平均降水量584 mm。雨季主要集中在7—9月,总降雨量占全年的50%以上。地貌属典型黄土塬区,塬面与沟壑分别占35%和65%,地带性土壤为黑垆土,母质是中壤质马兰黄土,剖面土质较为疏松,具有较好的透水性,土壤体积质量 $1.23 \sim 1.44 g/cm^3$ ^[20]。

1.2 样地选取与数据监测

本研究选取塬面农田、塬面草地和梯田3种典型土地利用类型,具体样地特征见表1。

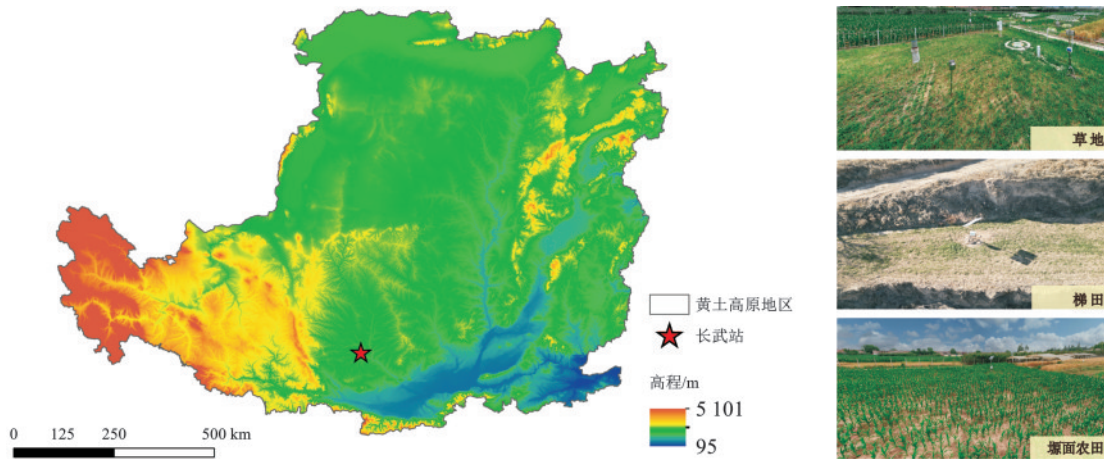


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of study plots

样地类型	样地情况
塬面农田	采用冬小麦-冬小麦-春玉米(<i>Triticum aestivum</i> L.- <i>Triticum aestivum</i> L.- <i>Zea mays</i> L.)轮作模式,播种前,施用尿素(180 kg/hm ²)和过磷酸钙(120 kg/hm ²)作为基肥,并进行常规翻耕
塬面草地	主要植被为狗尾巴草[<i>Setaria viridis</i> (L.) P. Beauv.]、白羊草[<i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng]和蒲公英(<i>Taraxacum mongolicum</i>),未进行任何人为管理干预
梯田	由坡面改造而成的水平梯田,采用冬小麦(<i>Triticum aestivum</i> L.)连作模式,播种时间为9月,收获时间为次年6月。播种密度为150 kg/hm ² ,行距为15 cm,播种深度为3 cm,田间管理方法与农田相似

降雨数据来自长武站自动气象站。3个样地土壤含水量数据则采用Campbell Scientific CR800数据采集系统,配套HydroProbe II土壤三参数传感器(Stevens,美国),每隔30 min连续记录监测土壤体积含水量,监测精度($\pm 0.003 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$),监测范围0~1 cm³/cm³。布设最大深度为300 cm,0~100 cm土层,间隔10 cm布设1个土壤水分传感器,100~300 cm土层间隔20 cm布设1个土壤水分传感器。

1.3 数据分析与指标计算

1) 选取降雨事件 本研究选取2020—2023年的数据,将2次降雨间隔时间>24 h定义为2次独立降雨事件。为确保土壤水分产生可观测的响应,筛选总降雨量>30 mm的持续性降雨事件进行分析^[21-22]。最终选取8场典型降雨事件,其中大雨(25.0~49.9 mm)3场,暴雨(50.0~99.9 mm)3场,大暴雨(100.0~249.9 mm)2场(表2)。

表 2 选取的持续性降雨事件特征

Table 2 Characteristics of selected persistent rainfall events

降雨类型	序号	降雨起止时间(年-月-日 T 时:分)	降雨历时/ h	降雨量/ mm	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	60 min最大雨强/ (mm·h ⁻¹)
大雨	1	2020-06-15T 07:00—2020-06-17T 12:00	49	45.8	0.9	3.6
	2	2022-07-11T 12:00—2022-07-13T 07:00	30	37.4	1.3	6.2
	3	2023-09-23T 01:00—2023-09-28T 14:00	45	35.7	0.8	8.5
暴雨	4	2020-08-14T 09:00—2020-08-19T 12:00	59	77.2	1.3	4.6
	5	2021-09-15T 11:00—2021-09-20T 18:00	54	64.0	1.2	3.4
	6	2021-09-24T 06:00—2021-09-28T 09:00	58	88.8	1.5	7.2
大暴雨	7	2021-10-03T 00:00—2021-10-06T 10:00	70	144.2	2.1	17.2
	8	2023-07-27T 11:00—2023-07-31T 12:00	64	202.1	3.2	13.0

2) 土壤水分响应特征 依据单次降雨事件特征,从土壤水分变化量、响应时间和响应速率分析土壤对降雨事件的响应规律。土壤水分响应的判定:在1次数据记录间隔内(30 min)土壤含水量的变化量达到至少 $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,并且持续增加,即判断土壤水发生响应,否则视为未产生可监测到的响应^[23]。响应深度/入渗深度为降雨所能入渗到的深度,即土壤水分发生响应的最深土层。响应大小,即土壤水分变化量(ΔSWC)为单次降雨事件后(降雨结束后48 h)的土壤含水量与降雨发生前1 h土壤含水量之差,表征土壤水分对降雨的响应幅度(大小)。降雨开始时间与剖面土壤水分响应时间差视为响应时间(T)。响应速率(V):即在土壤水分产生响应时间内土壤水分传感器所在深度发生响应的速度。土壤水分传感器布设深度视为土壤水分运移距离(L), $V=L/T$ 。

3) 土壤储水指标 土壤储水量(SWS)指一定土壤深度范围内存储的水分。某层的土壤储水量计算公式为:

$$\text{SWS}_i = \sum_{i=1}^n (\theta_i \times h_i) \quad (1)$$

式中: SWS_i 为第 i 层土壤储水量,mm; θ_i 为第 i 层土壤含水量, cm^3/cm^3 ; h_i 为第 i 层的厚度,mm。

土壤储水量变化量(ΔSWS)指某个时间段内土壤储水量的变化。针对某层土壤, ΔSWS 计算公式为:

$$\Delta\text{SWS} = \text{SWS}_{\text{end},i} - \text{SWS}_{\text{start},i} \quad (2)$$

式中: ΔSWS_i 为第 i 土层土壤储水量在一段时间内的变化量,mm; $\text{SWS}_{\text{end},i}$ 为第 i 层土壤,结束时刻的土壤储水量,mm; $\text{SWS}_{\text{start},i}$ 为第 i 层土壤,开始时刻的土壤储水量,mm。

降雨储存效率(RSE)反映土壤在单次降雨事件中,能够实际储存的雨水量与同期总降雨量之间的比例,某土层的RSE计算公式为:

$$\text{RSE} = \frac{\Delta\text{SWS}_i}{P} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ΔSWS_i 为第 i 层土壤储水量变化量,mm; P 为单次降雨事件的降雨量,mm。

4) 优先流识别与频率计算 基于研究区高分辨率土壤水分监测数据,采用“时间同步性”与“响应速率阈值”2种间接指标联合识别,以指示优先流的存在^[24]:

时间同步性判定:在单次降雨事件中,若相邻土层(≥ 2)的土壤水分对降雨产生同步响应(即在30 min间隔内同时响应),则视为优先流存在的依据之一;

响应速率阈值判定:若土壤水分对降雨的响应速率超过特定阈值(6 cm/h),可作为优先流存在的另一项依据。该阈值参考黄土高原地区饱和导水率的相关研究^[25]确定,具体以大规模采样得出的该区域饱和导水率最大值(6 cm/h)作为判定标准。

为避免重复统计,当某土层同时满足上述2个条件,仅记为1次优先流指示结果。基于多场独立降雨事件的优先流识别结果,定义2个频率指标:

优先流发生频率(%):识别到优先流的降雨事件次数/总降雨事件次数 $\times 100\%$;

优先流事件平均发生频率(次/场):8场降雨中累计识别到优先流事件总次数/总降雨事件次数。

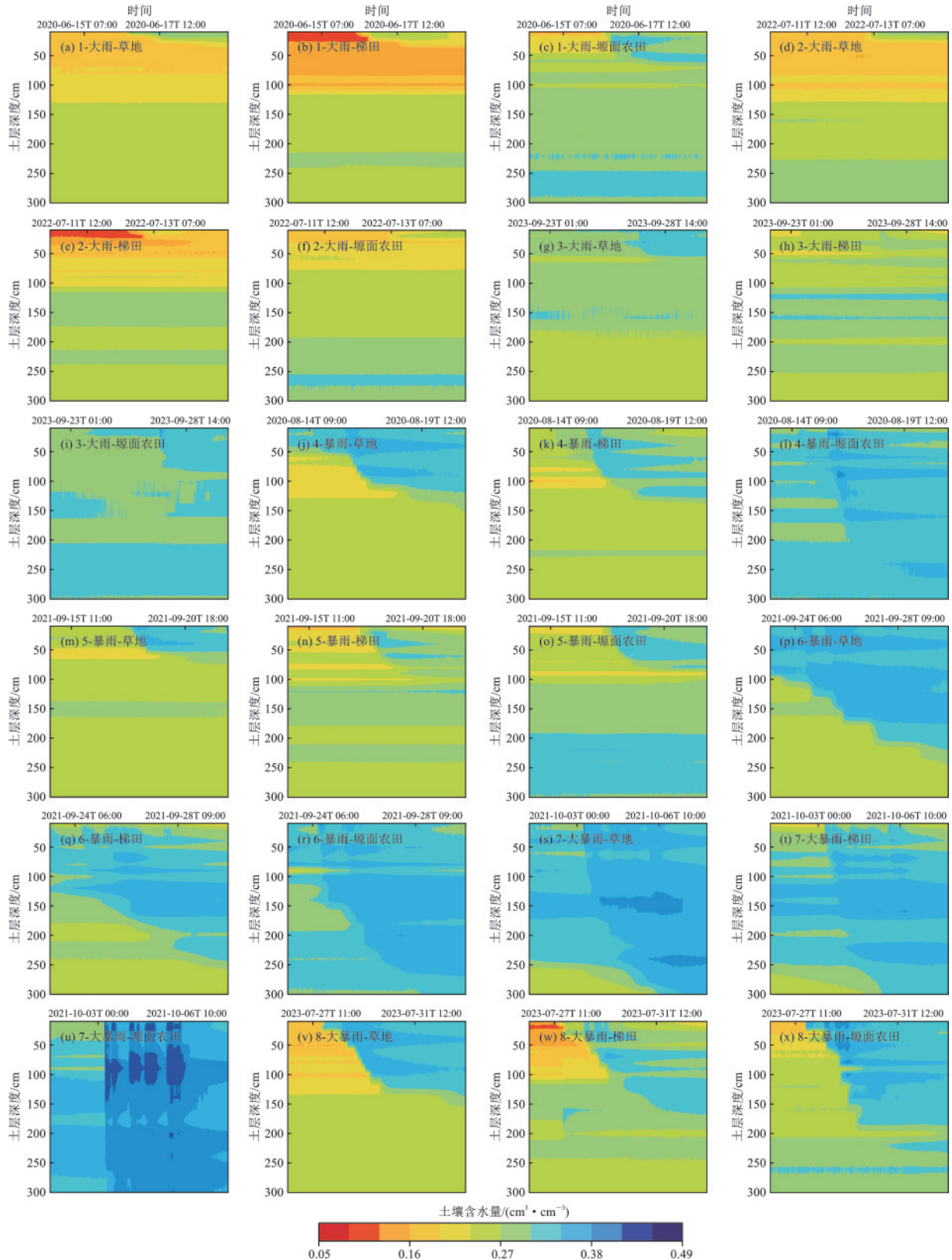
5) 数据处理 本研究所有数值结论以平均值±标准误差表示。本文使用Excel 2019、SPSS 23和R 4.4.2软件对研究数据进行统计分析,绘图在Origin 2024和R 4.4.2软件中完成。以土地利用类型和降雨等级作为主效应,进行双因素方差分析(two-way ANOVA),通过Duncan多重比较检验组间差异($p < 0.05$)。随机森林分析指标重要性排序在R 4.4.2软件中使用“rfPermute”包实现,设置1 000棵决策树(ntree=1 000)及500次置换检验,以量化土层深度、降雨性质和土壤性质等因子对降雨储存效率(RSE)、入渗深度及响应速率的贡献率(%IncMSE)。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用下土壤含水量和入渗深度变化

本研究通过监测8次降雨事件发现,不同土地利用类型下土壤含水量与入渗深度呈现显著差异性动态响应(图2)。雨前观测数据显示,塬面农田与草地的初始土壤含水分别为 0.29 、 $0.27 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,均显著高于梯田($0.24 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)($p < 0.05$)。降雨发生后,表层土壤(0~20 cm)率先响应,雨后塬面农田土壤含水量始终保持较高水平,显著高于草地和梯田。

降雨等级与土地利用方式共同调控着雨后土壤水分的入渗深度,其中降雨等级的影响更为显著。随降雨等级提升,各土地利用类型入渗深度均值呈递增趋势,暴雨及大暴雨等级下的入渗深度分布在60~300 cm,显著高于大雨等级的20~60 cm($p < 0.05$)。就土地利用方式而言,塬面农田平均入渗深度(138.75 cm)高于草地(93.75 cm)与梯田(81.25 cm),但未达显著差异水平($p > 0.05$)。值得注意的是,在降雨量为144.2 mm的大暴雨事件中(7-大暴雨),塬面农田的降雨入渗深度可达300 cm土层。



注:图中横轴表示范围为雨前 24 h 至雨后 48 h,标注的时间为降雨起止时间。

图 2 8 次降雨事件土壤含水量随降雨动态变化

Fig.2 Dynamic changes of soil moisture content with rainfall during 8 rainfall events

剖面土壤含水量对降雨的响应呈垂直异质性:在最大入渗深度范围内,各土地利用类型的土壤含水量总体随土层深度增加而递增。然而,同一

降雨等级内的不同场次降雨中,入渗深度存在波动:如在监测的 3 次大雨事件中,塍面农田的入渗深度分别为 60、20、50 cm;在选取的 3 次暴雨事件

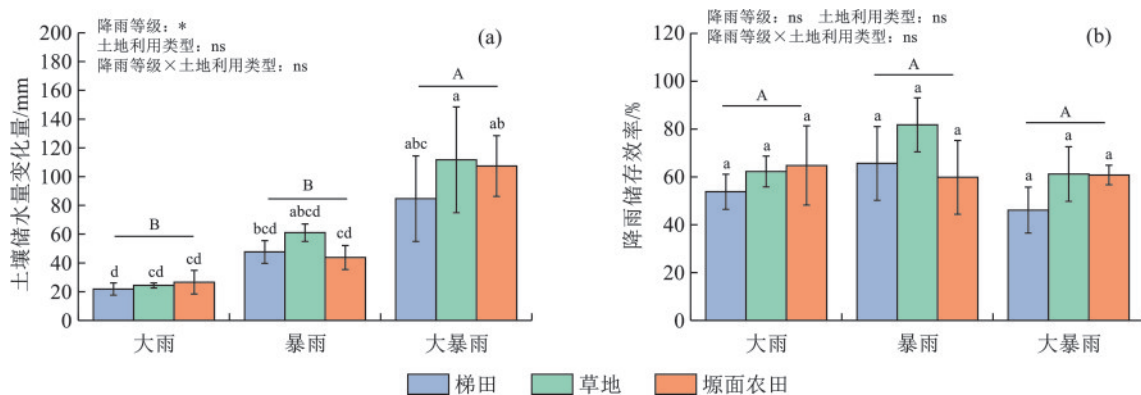
中,各土地利用方式入渗深度均随雨量增大总体呈增加趋势,但在部分大雨与大暴雨等级的降雨事件对比中,观测到“低雨量深入渗,高雨量浅入渗”现象。

2.2 土壤储水量变化量(ΔSWS)和降雨储存效率(RSE)变化特征

在大暴雨等级下,3种土地利用类型0~300 cm土层的土壤储水量变化量(ΔSWS)均显著高于大雨和暴雨等级($p < 0.05$)。梯田、草地和塬面农田的ΔSWS在大雨等级下分别为(21.80±4.30)、(24.40±1.70)、(26.60±8.20) mm,在暴雨等级下分别为(47.60±7.90)、(61.00±6.10)、(43.80±8.40) mm,在大暴雨等级下变化幅度最大,分别为(84.70±29.80)、(111.70±36.80)、(107.40±21.10) mm。就不同土地利用方式而言,草地的ΔSWS高于塬面农田和梯田,但未达到显著水平($p > 0.05$)。随降雨等级提升,3种土地利用方式的平均ΔSWS呈现递增趋势,特别是在大暴雨等级下,草地和塬面农田的ΔSWS响应最为突出,其值分别为(111.70±36.80)、

(107.40±21.01) mm。相比之下,梯田在同等降雨条件下的ΔSWS增幅较小,为(84.70±29.80) mm。同一降雨等级内,不同土地利用类型间ΔSWS差异不显著。以上结果表明,ΔSWS对降雨事件的响应特征受降雨等级和土地利用类型的共同影响,降雨等级提升对ΔSWS的增加具有显著主导作用,而土地利用类型虽在一定程度上影响ΔSWS的变化幅度,但在同一降雨等级下其效应并不显著。

土地利用方式与降雨等级共同影响降雨储存效率(RSE)(图3),尽管不同处理间统计学差异不显著($p > 0.05$),但数据呈现出明确数值规律:草地RSE为3种土地利用类型中最高,且在各降雨等级下均高于梯田。具体而言,草地RSE在暴雨事件中达到最高值(81.8±11.3)%,而大雨与大暴雨事件中效率值相近且均低于暴雨事件。梯田RSE则随降雨等级提升呈下降趋势。数值对比显示,暴雨事件中,草地RSE较梯田高出16.1%;综合所有降雨事件,草地平均RSE(68.4%)分别较梯田(55.2%)和塬面农田(61.8%)高13.2%和6.6%。



注:图柱上不同小写字母表示不同降雨等级,土地利用类型间显著性差异;不同大写字母表示不同降雨等级间的差异性显著,图中大小写字母的组合是分2步完成的显著性分析结果标记; *表示 $p < 0.05$ 。

图3 不同土地利用类型的土壤储水量变化量和降雨储存效率

Fig.3 Changes in soil water storage and rainfall storage efficiency under different land use types

2.3 不同土地利用方式土壤水分的响应幅度与过程

随着土层加深,土壤水分的响应幅度(ΔSWC)递减且滞后时间延长。表3为不同土地利用类型下不同土层土壤水分对降雨响应幅度。土壤水分变化量分布范围为0.01~0.20 cm³/cm³,同一降雨等级下,土壤水分对降雨的响应幅度总体上随土层深度增加而减少,且在暴雨和大暴雨情景下,梯田和塬面农田0~20 cm土层的响应显著高于20~200 cm土层。草地和塬面农田在所有降雨等级下均表现出对降雨更明显的响应,土壤水分变化量平均值从大到小依次为草地(0.08 cm³/cm³)>塬面农田(0.07 cm³/cm³)>梯田(0.06 cm³/cm³)。不同土地利用方式在大雨和

暴雨等级下,0~40 cm土层对降雨的响应差异小,大暴雨等级下,在100~200 cm土层,梯田[(0.011±0.003) cm³/cm³]对降雨的响应显著低于塬面农田[(0.07±0.01) cm³/cm³]和草地[(0.05±0.02) cm³/cm³]对降雨的响应。在暴雨和大暴雨等级下的部分样地识别到40~200 cm土层的响应大小高于0~40 cm土层的情况。

所有降雨等级中,各土地利用方式土壤水分响应时间为2.00~104.67 h,从整体平均响应时间来看,塬面农田的响应最为迅速[(29.04±2.87) h],略快于草地[(32.84±3.74) h]与梯田[(33.66±3.57) h]。

响应时间在土壤垂直剖面上呈明确的分布模式

(图4)。在所有土地利用类型与降雨等级条件下,浅层土壤(10、20 cm)因无中间土层阻隔,可快速响应降雨,响应时间最短,且浅层土壤水分达峰时间随降雨等级升高逐渐缩短。随着土层加深,响应时间普遍延长,存在垂直传递延迟。但观测到2种特殊现象,如相邻土层响应时间相近,以及大暴雨等级下塬面农田的深层土壤(200、300 cm)出现短于中层土壤(40、100 cm)的响应时间。

2.4 不同土地利用方式土壤水分响应速率的差异

土壤水分响应速率与降雨等级呈正相关,并表现出强变异性。图5显示不同降雨等级不同土地利用类型的响应速率沿剖面的变化模式。整体上,响应速率变化范围为0.18~35.29 cm/h。从土地利用类型的响应速率平均值来看,塬面农田的响应速率最快[(6.82±0.95) cm/h],显著高于草地[(3.70±0.38) cm/h]和梯田[(3.24±0.32) cm/h]。土壤水分响应速率的平均值与变异性均随降雨等级提升而增加。大雨等级下,各土层响应速率普遍较低(平均值低于1 cm/h),且垂直剖面上无显著规律。暴雨等级下,响应速率在垂直剖面上呈现先增后减的单峰模式,其峰值出现深度因土地利用方式而异:梯田、草地和塬面农田的峰值分别出现在20~40、40~100、100~200 cm土层。大暴雨等级下,响应速率达到最大值,且所

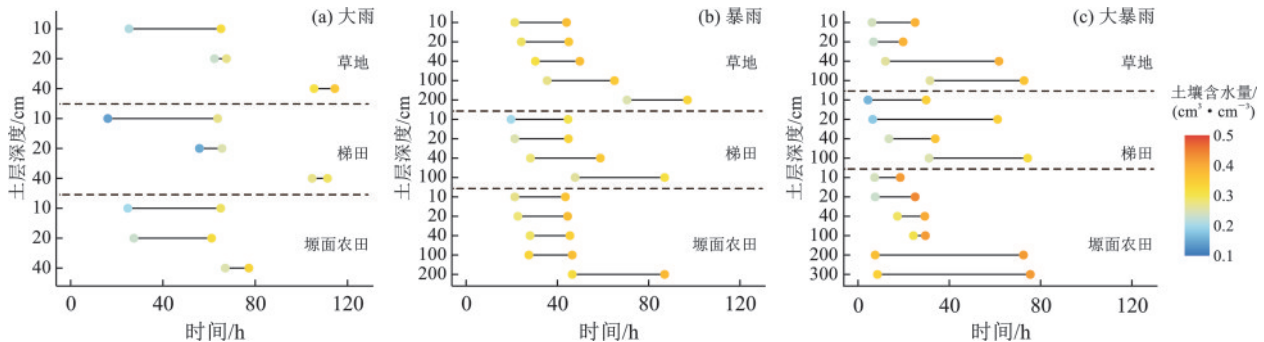
有样地响应速率均随着土层深度的增加而持续增加,在100~300 cm土层中表现出最强的变异性。

表 3 不同土地利用方式剖面土壤水分的响应大小

Table 3 Response intensities of soil moisture along profile under different land use types

降雨等级	土层深度/cm	草地	梯田	塬面农田
大雨	0~20	0.06±0.02Aa	0.08±0.02Aa	0.06±0.02Aa
	20~40	0.03±0.01Aa	0.02±0.01Aa	0.07±0.02Aa
	40~100	—	—	—
	100~200	—	—	—
	200~300	—	—	—
暴雨	0~20	0.06±0.01Aa	0.06±0.01Aa	0.07±0.01Aa
	20~40	0.05±0.01Aa	0.05±0.01Aa	0.04±0.01Aab
	40~100	0.06±0.01Aa	0.04±0.01Aa	0.04±0.01Ab
	100~200	0.08±0.01Aa	0.03±0.02Ba	0.04±0.01ABab
	200~300	—	—	0.03±0.01b
大暴雨	0~20	0.13±0.02ABa	0.12±0.01Ba	0.18±0.02Aa
	20~40	0.12±0.04Aa	0.07±0.03Ab	0.11±0.02Ab
	40~100	0.10±0.02ABa	0.07±0.01Bb	0.13±0.01Ab
	100~200	0.05±0.02Aa	0.01±0.01Bc	0.07±0.01Ac
	200~300	—	—	0.04±0.01c

注:表中数据为平均值±标准误差;因部分降雨事件下,土壤水分未入渗到对应土层,在表中用“—”标记;同列不同小写字母表示同一降雨等级内,相同土地利用类型,不同土层深度间差异显著;同行不同大写字母表示同一降雨等级内,相同土层深度,不同土地利用类型差异显著($p < 0.05$)。



注:线段左端点表示土壤含水量首次响应时间,右端点表示土壤含水量达到峰值的时间,点的颜色与响应时的土壤含水量和最大土壤含水量相关;连接2点的线段表示土壤含水量达到峰值的滞后时间。

图 4 土壤含水量开始响应和达到峰值的时间

Fig.4 Onset and peak times of soil moisture response

大暴雨事件触发100~300 cm土层土壤水分的快速响应,且其响应特征因土地利用方式而异。该降雨等级下,所有土地利用方式均在100~300 cm土层响应速率平均值达到最大,塬面农田的平均响应速率[(32.85±1.06) cm/h]远高于草地[(7.05±1.73) cm/h]和梯田[(5.41±1.40) cm/h]。值得注意的是,观测期内所有>10 cm/h的响应速率值仅出现在塬面农田的200~300 cm土层,其峰值高达35.29 cm/h。

2.5 影响土壤水分响应的主导因子

剖面土壤水分对降雨的响应是一个复杂过程,除受降雨特性(降雨量和降雨历时)的影响外,还与土壤性质(如土壤有机质)、土层深度及初始含水量等因素有关。随机森林模型的分析结果(图6)揭示各因子对入渗深度、降雨存储效率(RSE)和响应速率的影响。模型方差解释率(R^2)表明,该模型对响应速率(0.89)和入渗深度(0.66)的解释能力较好。

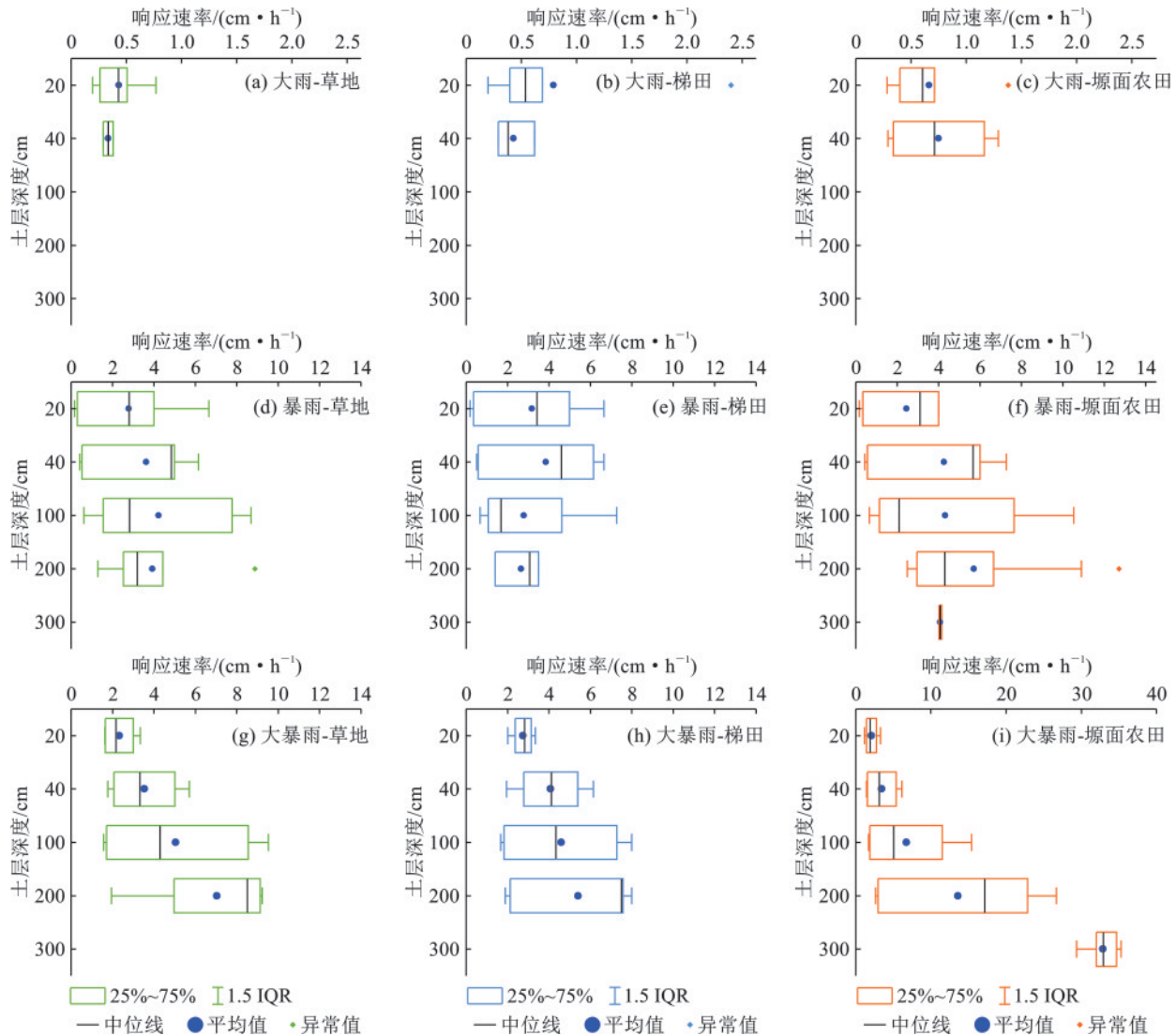


图 5 不同土地利用方式剖面土壤水分响应速率

Fig.5 Soil moisture response rate along profile under different land use types

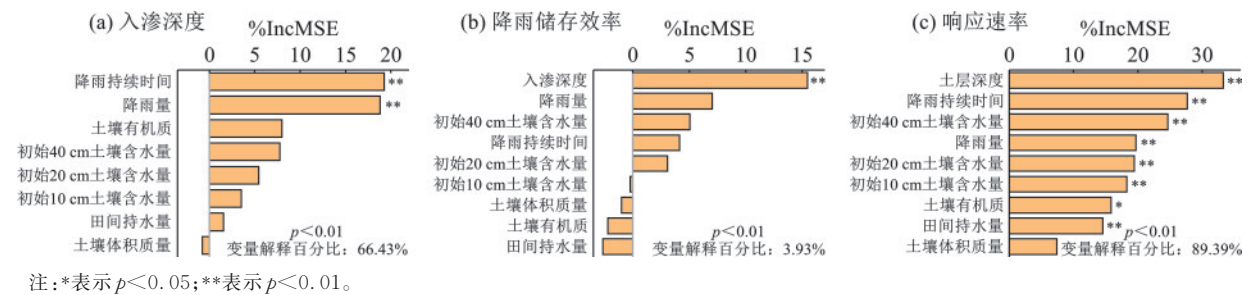


图 6 随机森林方法揭示单个因子对入渗深度、降雨储存效率(RSE)和响应速率的影响

Fig.6 Effects of individual factors on infiltration depth, rainfall storage efficiency (RSE), and response rate revealed by random forest method

变量重要性分析(%IncMSE)显示,对于入渗深度,降雨特性起主导作用。降雨历时(19.3%)与降雨量(18.8%)是其主要影响因子($p < 0.01$),二者均与入渗深度呈显著正相关(皮尔逊相关系数 r 分别为 0.78 和 0.64)。对于 RSE,入渗深度是其最重要的解释变量,贡献率为 15.5% ($p < 0.01$),但二者呈负相关 ($r = -0.23$)。土层深度对响应速率影响最强

(33.3%),且表现为正向影响($r = 0.62$),降雨持续时间、不同深度的初始含水量及田间持水量均对响应速率表现出显著促进作用($p < 0.01$)。

3 讨论

3.1 降雨等级对入渗过程的驱动及降雨储存效率的响应特征

随机森林模型分析表明,降雨历时与降雨量是

影响入渗深度的关键外部驱动因子($p < 0.01$),而土壤性质(如土壤有机质、初始含水量、田间持水量和土壤体积质量)的影响相对较弱。可能是由于研究区内土壤本底性质相对均一,影响入渗的关键土壤结构属性(如大孔隙、团聚体)可能未被所选指标完全表征。本研究观察到入渗深度并未简单随降雨量增大而线性增加,在选取的大雨和大暴雨事件中出现“低雨量深入渗,高雨量浅入渗”的现象,证实入渗过程受外部降雨特性与内部土壤性质的协同调控。降雨是研究期间土壤水分的唯一补给来源,强降雨是深层土壤水分变化的主要触发因素^[13]。研究区大暴雨事件发生频率低,虽然显著补充土壤储水量,对作物生长至关重要,但降雨储存效率(RSE)并未随降雨等级提升而同步增加,表明降雨对土壤水分的有效补给存在“阈值效应”。当降雨超出此阈值,表层土壤逐渐饱和,后续塬面的雨水经无效蒸发损失,而梯田雨水因地表径流流失^[6,26-28]。这种失水路径的差异导致不同土地利用方式下降雨储存效率的分异:草地表现出最高的RSE,这可能归因于草本植物的季节性覆盖及密集根系增强土壤团聚体稳定性,从而提升土壤持水能力^[15,29-30];而梯田在强降雨下RSE最低,表明其产流阈值较低,可能与其工程结构改变微地形和孔隙连通性有关。

表 4 初始土壤含水量与土壤水分响应特征值的线性回归方程
Table 4 Linear regression equations between initial soil moisture content and soil moisture response characteristic values

相关性分析	土地利用类型	回归方程	R^2
初始土壤含水量(x)和响应速率(y)	草地	$y = 35.22x - 5.76$	0.51
	梯田	$y = 24.33x - 2.64$	0.42
	塬面农田	$y = 104.08x - 23.08$	0.37
初始土壤含水量(x)和响应大小 ΔSWC (y)	草地	$y = -0.66x + 0.25$	0.58
	梯田	$y = -0.39x + 0.15$	0.47
	塬面农田	$y = -0.42x + 0.19$	0.20

注: $p < 0.001$ 。

3.2 土地利用方式对剖面土壤水分响应特征的影响

土地利用方式通过土壤孔隙结构的差异,显著改变降雨入渗的路径。本研究观测到大暴雨中塬面农田表现出高达 35.29 cm/h 的极端响应速率,极端值排除深层土壤水分再分配的可能,强有力地指示优先流的存在。定量分析进一步揭示不同土地利用方式下的响应差异,塬面农田的优先流事件平均发生频率(1.75 次/场)和发生频率(62.5%)均高于草地

(1.13 次/场, 50%)和梯田(0.75 次/场, 37.5%)。表明并非所有降雨事件都会触发优先流,但在强降雨条件下,塬面农田长期耕作形成的连通性大孔隙与土壤动物洞穴共同构成独立优势通道^[31],实现水分在深层的快速入渗,这是土地利用方式和极端降雨协同驱动的结果。相比之下,梯田中优先流发生频率最低,可能源于梯田在修建过程中土壤结构被整改,削弱孔隙的垂直连通性^[32]。虽然已有研究^[33-34]表明,所有梯田类型均能不同程度提高土壤水分,但本研究的水平梯田的土壤水分提升率仅为中等水平(16.1%),因此,在评估梯田水文效益时,需要综合考虑降雨、入渗、梯田结构和种植模式等关键因素。

土地利用方式的初始土壤含水量差异对土壤水分响应速率与响应大小产生差异化驱动。随机森林模型(图 6)显示,初始土壤含水量不是入渗深度的影响因子,却是调控响应速率的关键驱动力($p < 0.01$)。进一步对 0~300 cm 土层数据的相关分析(表 4)表明,各样地响应速率随初始土壤含水量的升高呈显著线性递增趋势($p < 0.001$),但其敏感性存在差异:塬面农田的回归斜率高达 104.08,约为草地(35.22)的 3 倍、梯田(24.33)的 4 倍以上。值得注意的是,初始土壤含水量与土壤水分响应大小(ΔSWC)呈显著负相关,表明较高的初始土壤水分条件虽然通过提升土壤导水性能加速入渗,但土壤水分增加量有限。

综上所述,土地利用方式对黄土塬区土壤水文过程具有双重的差异性调控,主要体现在土壤孔隙结构和初始水分状况。一方面,土地利用方式决定优先流通道的发育程度,使塬面农田具备深层快速入渗的通道;另一方面,土地利用方式间初始水分条件的差异调控响应速率和大小。塬面农田因土壤孔隙结构和高初始土壤含水量而表现出高渗透性。梯田因其工程结构易产生径流,而草地凭借密集根系表现出更强的持水能力。因此,不同土地利用方式下土壤孔隙结构和初始水分条件共同塑造差异化的响应模式,降雨等级则作为外部驱动因子,进一步放大这些差异。然而,本研究主要关注降雨入渗过程,未来的研究需进一步整合作物耗水机制的对照分析,并结合区域尺度遥感反演,以期更全面地揭示黄土塬区旱作农业土壤水分补给的动态过程及空间异质性。

4 结论

1) 土壤含水量与入渗深度随降雨量增加而增大,其中塬面农田的含水量和入渗深度高于草地和梯田。3 种土地利用方式最大入渗深度表现为塬面农田(300 cm) > 草地(200 cm) > 梯田(160 cm)。大

雨、暴雨和大暴雨对应的入渗深度分别为20~60、60~240、100~300 cm。

2) 土壤储水量变化量(ΔSWS)随降雨等级增大而增加,但降雨储存效率(RSE)未同步提高。梯田和草地的RSE在暴雨时达到峰值,分别为 $(65.7 \pm 15.4)\%$ 和 $(81.8 \pm 11.3)\%$;塬面农田的RSE在大雨等级下最高,为 $(64.8 \pm 16.6)\%$ 。

3) 土壤水分响应受降雨强度、土层深度和土地利用方式的共同调控。响应幅度随土层深度增加而减弱,草地和塬面农田的响应更明显。塬面农田的响应速率最快,达 (6.82 ± 0.95) cm/h,其在大暴雨下200~300 cm土层响应速率峰值达35.29 cm/h,指示优先流的存在,证实深层优先流是研究区土壤水分补给的关键路径。

利用塬面农田的优先流优势储蓄水分,补充深层土壤水,并结合降雨特征,发挥草地的浅层持水作用,从而减少地表雨水的无效蒸发。通过这种深浅功能的侧重,可最大程度提升降水储存效率,增强旱作农业生态系统的抗旱韧性,保障其可持续发展。

参考文献:

- [1] 张俊娥,陆垂裕,秦大庸,等.基于分布式水文模型的区域“四水”转化[J].水科学进展,2011,22(5):595-604.
ZHANG J E, LU C Y, QIN D Y, et al. Regional "four-water" transformation based on distributed hydrological model[J].Advances in Water Science,2011,22(5):595-604.
- [2] HUANG L M, SHAO M A. Advances and perspectives on soil water research in China's Loess Plateau[J].Earth-Science Reviews,2019,199:e102962.
- [3] WANG Y Q, SHAO M A, SUN H, et al. Response of deep soil drought to precipitation, land use and topography across a semiarid watershed [J]. Agricultural and Forest Meteorology,2020,282:e107866.
- [4] DONAT M G, LOWRY A L, ALEXANDER L V, et al. More extreme precipitation in the world's dry and wet regions[J].Nature Climate Change,2016,6(5):508-513.
- [5] CUI J P, LIAN X, HUNTINGFORD C, et al. Global water availability boosted by vegetation-driven changes in atmospheric moisture transport [J]. Nature Geoscience,2022,15(12):982-988.
- [6] FELDMAN F, FENG X, FELTON J, et al. Plant responses to changing rainfall frequency and intensity[J]. Nature Reviews Earth and Environment,2024,5(4):276-294.
- [7] 张中彬,彭新华.土壤裂隙及其优先流研究进展[J].土壤学报,2015,52(3):477-488.
ZHANG Z B, PENG X H. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow [J].Acta Pedologica Sinica,2015,52(3):477-488.
- [8] 程立平,刘文兆,李志,等.长武黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响[J].水科学进展,2016,27(5):670-678.
CHENG L P, LIU W Z, LI Z, et al. Land use change affects groundwater recharge in the Changwu Loess tableland of China [J].Advances in Water Science,2016,27(5):670-678.
- [9] 王中琦,汤晓迪,杜康,等.黄土塬区不同土地利用方式10 m剖面土壤水分年际和季节动态特征[J].生态学报,2024,44(20):9329-9341.
WANG Z Q, TANG X D, DU K, et al. Annual-seasonal dynamics of soil water content in 10 m soil profiles under different land use types in the loess tableland region [J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(20):9329-9341.
- [10] CHEN J S, CHEN Y P, WANG K B, et al. Differences in soil water storage, consumption, and use efficiency of typical vegetation types and their responses to precipitation in the Loess Plateau, China [J].Science of the Total Environment,2023,869:e161710.
- [11] DU Y N, WEI Y J, WANG Y D, et al. Impact of land use conversion patterns on vertical hydrological connectivity in intensive orchards [J]. Soil and Tillage Research,2025,253:e106631.
- [12] YU Y, WEI W, CHEN L D, et al. Responses of vertical soil moisture to rainfall pulses and land uses in a typical loess hilly area, China [J].Solid Earth,2015,6(2):595-608.
- [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] 李若萱,范碧航,林珂,等.黄土高原沟壑区不同植被恢复方式对降雨入渗的影响[J].水土保持学报,2025,39(4):60-70.
LI R X, FAN B H, LIN K, et al. Effects of different vegetation restoration on rainfall infiltration in the Loess Plateau gully region [J].Journal of Soil and Water Conservation,2025,39(4):60-70.
- [15] 王佩佩.黄土高原典型草本植物根系对土壤入渗的影响及空间差异[D].西安:陕西师范大学,2021.
WANG P P. The effect and spatial variability of typical herbaceous plant roots on soil infiltration in the Loess Plateau [D].Xi'an: Shaanxi Normal University,2021.
- [16] GE F C, XU M X, GONG C, et al. Land cover changes the soil moisture response to rainfall on the Loess Plateau [J].Hydrological Processes,2022,36(11):ee14714.
- [17] 马响,孟晨,岳健敏,等.宁夏荒漠草原不同林龄人工柠条林地土壤优先流研究[J].生态学报,2022,42(3):895-903.
MA Y, MENG C, YUE J M, et al. Study on preferen-

- tial flow of soil of artificially planted caragana korshinskii shrubland in different years of desert grassland in Ningxia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3):895-903.
- [18] 郑双科, 司炳成, 张志强, 等. 黄土塬区苹果园降雨入渗机制[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(9):2870-2878.
ZHENG S K, SI B C, ZHANG Z Q, et al. Mechanism of rainfall infiltration in apple orchards on loess tableland, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(9):2870-2878.
- [19] 韩晓阳, 刘文兆, 程立平. 黄土塬区深剖面土壤水分垂直分布特征及其时间稳定性[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2):430-438.
HAN X Y, LIU W Z, CHENG L P. Vertical distribution characteristics and temporal stability of soil water in deep profile on the loess tableland, northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2):430-438.
- [20] 程立平, 刘文兆, 李志. 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(8):1975-1983.
CHENG L P, LIU W Z, LI Z. Soil water in deep layers under different land use patterns on the loess tableland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(8):1975-1983.
- [21] 鲁睿, 张明军, 张宇, 等. 不同降雨量及雨强条件下兰州南山人工侧柏林土壤水分入渗规律[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(2):364-376.
LU R, ZHANG M J, ZHANG Y, et al. Soil water infiltration of artificial platycladus orientalis of Nanshan Mountain in Lanzhou under different rainfall and rainfall intensity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2):364-376.
- [22] 李慧, 周顺武, 陆尔, 等. 1961—2010年中国华南地区夏季降水结构变化分析[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(3):247-256.
LI H, ZHOU S W, LU E, et al. Changes in the structure of summertime precipitation in south China during 1961—2010 [J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(3):247-256.
- [23] 张轩铭. 三峡库区山地小流域典型土地利用下土壤水分对降雨的响应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
ZHANG X M. Study on the response of soil moisture to rainfall under typical land use in mountain watershed of three gorges reservoir area [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [24] NIMMO J R, WIEKENKAMP I, ARAKI R, et al. Identifying preferential flow from soil moisture time series: Review of methodologies [J]. *Vadose Zone Journal*, 2025, 24(2):e70017.
- [25] BAI X, SHAO M A, JIA X X, et al. Prediction of the van Genuchten model soil hydraulic parameters for the 5-m soil profile in China's Loess Plateau [J]. *Catena*, 2022, 210:e105889.
- [26] BETTONI M, MAERKER M, BOSINO A, et al. Land use effects on surface runoff and soil erosion in a southern alpine valley [J]. *Geoderma*, 2023, 435:e116505.
- [27] HIRMAS D R, GIMÉNEZ D, NEMES A, et al. Climate-induced changes in continental-scale soil macroporosity may intensify water cycle [J]. *Nature*, 2018, 561(7721):100-103.
- [28] MC COLL K A, ALEMOHAMMAD S H, AKBAR R, et al. The global distribution and dynamics of surface soil moisture [J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(2):100-104.
- [29] 张智勇, 艾宁, 刘广全, 等. 陕北黄土区退耕还林(草)地土壤质量特征及其对降水的响应[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(24):73-80.
ZHANG Z Y, AIN, LIU G Q, et al. Soil quality characteristics of forests and grasslands returned from farmland and their responses to precipitation in the loess region of northern Shaanxi, China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(24):73-80.
- [30] 王璞, 任宗萍, 马晓妮, 等. 黄土坡面溶解性碳流失特征及其对水土保持措施响应[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(2):48-56.
WANG P, REN Z P, MA X N, et al. Characteristics of dissolved carbon loss on loess slopes and its response to soil and water conservation measures [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2):48-56.
- [31] 马莉, 景璇璇, 李同川, 等. 蚯蚓活动对不同土地利用类型土壤水分入渗特征影响的研究[J]. *土壤通报*, 2024, 55(3):644-650.
MA L, JING X X, LI T C, et al. Influence of earthworm activity on soil water infiltration characteristics of soils under different land uses [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(3):644-650.
- [32] 余佳峻, 付智勇, 方荣杰, 等. 桂北喀斯特峰丛洼地橘园土壤入渗特征[J]. *农业现代化研究*, 2023, 44(1):161-172.
YU J J, FU Z Y, FANG R J, et al. Soil infiltration characteristics of citrus orchards in the cluster depression of karst peaks in northern Guangxi [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2023, 44(1):161-172.
- [33] LÜ H S, ZHU Y H, SKAGGS T H, et al. Comparison of measured and simulated water storage in dryland terraces of the Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(2):299-306.
- [34] CHEN D, WEI W, CHEN L D. How can terracing impact on soil moisture variation in China: A meta-analysis [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 227:e105849.