融雪后间歇性降雨对伊犁黄土边坡水分入渗的影响

翟高阳[1], 张紫昭[1], 刘 涛[1,2], 张淑淇[1], 刘培志[1], 高 敏[1]

(1.新疆大学, 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;
2.新疆地质局水文环境地质调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830091)

摘 要: [目的] 分析新疆伊犁地区黄土边坡融雪后间歇性降雨条件下黄土水分入渗特征,为区域边坡稳定性评价与滑坡预警指标选取提供依据。[方法] 以巩留县库尔德宁镇阿拉尔村滑坡为例,采用一维原状土柱模型试验,设置降雨强度10,20,30 mm/h共3种工况,在累计降雨量120 mm一致的条件下进行4次“降雨-间歇”循环;在10,20,30,50,70 cm处布设传感器,同步监测体积含水率、基质吸力与孔隙水压力。[结果] 融雪阶段仅影响浅层区域,体积含水率增幅<2%,20 cm及以下未出现明显响应。间歇性降雨阶段湿润锋由浅向深推进,表现为浅层先响应,深层后响应。在雨强10 mm/h工况下,含水率显著升高的影响深度可达50 cm,而20~30 mm/h工况下未达到50 cm。表层10 cm处体积含水率峰值随雨强增大呈现略微降低的趋势。降雨期间表层10 cm处基质吸力快速衰减并可降至0 kPa。间歇期表层10 cm处传感器基质吸力增大值有随雨强增大而降低的趋势。孔隙水压力响应主要集中于10 cm处,峰值随雨强由18.82 kPa升至19.69 kPa,深部传感器始终保持负孔压。[结论] 融雪后间歇性降雨工况下,伊犁黄土的入渗过程具有明显的阶段性与记忆效应,前期降雨对后续入渗具有促进作用。低雨强降雨更利于水分向深部迁移,而较高雨强更易诱发表层快速增湿与孔压升高但限制有效入渗深度。

关键词: 降雨入渗; 间歇性降雨; 伊犁黄土; 土柱试验; 体积含水率; 基质吸力

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)04-0020-10 **中图分类号:** P642.22

文献参数: 翟高阳, 张紫昭, 刘涛, 等.融雪后间歇性降雨对伊犁黄土边坡水分入渗的影响[J].水土保持通报,2026,46(4):20-29. Zhai Gaoyang, Zhang Zizhao, Liu Tao, et al. Effects of post-snowmelt intermittent rainfall on water infiltration on loess slopes of Ili Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):20-29.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.020 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.020**

Effects of post-snowmelt intermittent rainfall on water infiltration on loess slopes of Ili Region

Zhai Gaoyang[1], Zhang Zizhao[1], Liu Tao[1,2], Zhang Shuqi[1], Liu Peizhi[1], Gao Min[1]

(1.*School of Geology and Mining Engineering*, *Xinjiang University*, *Urumqi* 830047, *Xinjiang*, *China*;
2.*Hydrogeology and Environmental Geology Survey Center*, *Xinjiang Geological Bureau*, *Urumqi* 830091, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: [Objective] The water infiltration characteristics on loess slopes of the Ili region, Xinjiang, under intermittent rainfall conditions after snowmelt were analyzed in order to provide a basis for regional slope stability assessment and the selection of landslide early warning indicators. [Methods] Using the landslide at Alar village, Kurdinin Town, Gongliu County, as a representative case, one-dimensional infiltration experiments were conducted with undisturbed loess columns. Three rainfall intensities: 10, 20 and 30 mm/h, were set. Under a constant cumulative rainfall of 120 mm, four “rainfall-pause” cycles were conducted. Sensors installed at depths of 10, 20, 30, 50, and 70 cm continuously monitored volumetric water content, matric suction, and pore water

收稿日期:2025-10-10 **修回日期:**2026-01-31 **采用日期:**2026-02-01
资助项目:国家自然科学基金项目“伊犁谷地冰雪融水叠加降雨入渗黄土滑坡形成机理与预警判据”(42367021)
第一作者:翟高阳(1999—),男(汉族),陕西省咸阳市人,硕士研究生,研究方向为地质灾害。Email:1260351927@qq.com。
通信作者:张紫昭(1981—),男(汉族),山东省威海市人,博士,教授,博士生导师,主要从事地质灾害与矿山地质方面的科研。Email:zhangzizhao@xju.edu.cn。

pressure. [Results] The snowmelt stage affected only the shallow subsurface, with volumetric water content increasing by less than 2%, and no discernible response was observed at depths of 20 cm or greater. During the intermittent rainfall stage, the wetting front propagated progressively downward, with shallow layers responding earlier than deeper layers. Under the 10 mm/h treatment, the depth affected by a marked increase in water content reached 50 cm, whereas under the treatments of 20 and 30 mm/h, the response did not reach 50 cm. At 10 cm depth, the peak volumetric water content showed a slight decline with increasing rainfall intensity. During rainfall, matric suction at 10 cm decreased rapidly and could fall to 0 kPa. During the pauses, the increase in matric suction at the same depth tended to diminish as rainfall intensity increased. Pore water pressure responses were concentrated mainly at 10 cm depth, where peak values rose from 18.82 to 19.69 kPa with increasing rainfall intensity, whereas deeper sensors remained under negative pore water pressure throughout. [Conclusion] Under intermittent rainfall after snowmelt, infiltration in Ili loess exhibits clear stage dependence and a pronounced hydrological memory effect, such that antecedent rainfall facilitates subsequent infiltration. Lower-intensity rainfall is more conducive to deeper downward water migration, whereas higher-intensity rainfall more readily induces rapid wetting and pore pressure increase near the surface while constraining effective infiltration depth.

Keywords: rainfall infiltration; intermittent rainfall; Ili loess; soil column test; volumetric water content; matric suction

黄土是一种第四纪时期由风力搬运堆积形成的粉砂质沉积物,具有多孔隙、弱胶结的特点,广泛分布于中国的伊犁地区以及黄土高原等地区[1-3]。天然黄土多处于非饱和状态,其强度与变形不仅受内部结构控制,也与土体含水状态密切耦合:当水分沿孔隙进入其内部结构,含水率升高将导致基质吸力衰减,进而诱发湿陷性增强,抗剪强度降低等一系列水敏响应[4-6]。伊犁谷地受西风带水汽与天山地形抬升共同影响,降雪与降雨均较为频繁,春季融雪水入渗可提高浅层含水率并削弱基质吸力,为随后降雨入渗与变形提供不利的初始水分条件[7-8]。因此,揭示融雪后间歇性降雨条件下黄土入渗过程与水力响应特征,对伊犁地区滑坡灾害预警与防治具有重要的工程实践意义。

降雨和融雪入渗是非饱和边坡水分运移和有效应力演化的关键环节。渗透系数、土体结构和降雨历时共同控制湿润锋推进速率、基质吸力衰减以及孔隙水压力的变化规律,从而影响边坡的抗剪强度与稳定性[9-13]。因此在伊犁地区黄土工程设计中,黄土的水分入渗规律有助于对工程进行科学、经济合理的设计,避免建筑物因水分入渗发生不均匀沉降及湿陷变形等危害。

室内土柱试验能够在可控边界条件下连续监测含水率、基质吸力和孔隙水压力等指标,兼具可重复性与可对比性,是研究非饱和土入渗规律的重要方法[14-15]。国内外关于间歇性降雨与非饱和黄土入渗的研究主要集中在降雨历时、雨强与前期含水率对湿润锋推进及力学性质的影响。覃小华等[16]通过不同降雨强度的土柱试验,发现非饱和黄土的渗透系数随基质吸力的增加快速降低;彭柳君等[17]模拟了不同降雨条件下土柱中水分的运移规律,发现初始含水量和基质吸力对湿润锋下移速率影响较大,并采用HYDRUS软件模拟了水分运移过程,进而通过反分析方法得到土体的水理性质参数。Zhao Zhiqiang等[18]基于现场入渗试验探讨了厚层黄土中的入渗与湿润锋演化;Xian Yu等[7]和Zhang Zhiyong等[19]从融雪入渗与冻融过程出发,指出春季融雪可改变黄土微结构与保水强度特性,使边坡对后续降雨更敏感;Wulamu等[8]强调了融雪和降雨耦合情形下深部含水率与孔压等内部指标对预警的重要性。

近年来间歇性降雨对边坡稳定性的影响逐渐成为研究热点,Zhong Wei等[20]通过物理模型试验发现,缓倾堆积层边坡在间歇性强降雨作用下呈现阶段性后退式破坏,且失稳多发生于降雨间歇期,与土体蠕变及滑动带液化密切相关;Liu Jinwen等[21]在间歇降雨模型试验中发现非饱和—饱和交替过程会使水力响应呈周期波动并促使浅层失稳。谢梅香等[22]通过室内土槽与人工模拟降雨试验,系统研究了单次降雨与间歇性多次降雨对紫色土坡地中硝态氮迁移与流失的影响,从间歇性降雨视角揭示了硝态氮迁移的动态过程;朱元甲等[23]以樱桃沟滑坡为例,开展了间歇性降雨作用下缓倾堆积层斜坡的物理模型试验。研究发现降雨入渗易在基覆界面形成暂态饱和区,导致土体软化、抗剪强度降低,滑坡多在降雨间歇期发生;苏永华等[24]则提出考虑干湿循环的改进Green-Ampt模型,为间歇降雨入渗与边坡稳定评价提供了新方法。

然而，现有研究多关注单一降雨事件或连续降雨作用下的入渗过程，对伊犁地区融雪后间歇性降雨工况的定量对比研究仍然有限。同时，少有研究在累计降雨量一致的条件下分离降雨强度对入渗深度与水力响应的影响，并对含水率、基质吸力、孔压的协同变化进行统计归纳。因此，本文以伊犁哈萨克自治州巩留县典型黄土滑坡为背景，开展原状土柱融雪后间歇性降雨模拟试验。在累计降雨量相同条件下设置3种雨强，系统分析不同水源阶段的湿润锋推进、响应时滞与变化特征，并分析其对边坡浅层暂态饱和带形成及潜在失稳的启示，旨在为区域边坡稳定性评价与滑坡预警指标选取提供依据。

1 研究区背景

研究区位于新疆伊犁哈萨克自治州巩留县莫乎尔乡阿拉尔村南侧小莫乎尔沟南岸，地理坐标为82°42′01.38″—82°42′45.81″E和43°14′03.15″—43°15′10.27″N。该研究区地处莫乎尔河谷山区，属于大陆性北温带气候，冬暖夏凉，气候特征为温和湿润，昼夜温差大。研究区内小莫乎尔沟作为北侧边界流经研究区，属大吉尔格朗河的支流，流域面积210 km^2，河水主要接受冰雪融水和降雨补给，其多年均径流量约6.00×10^7 m^3，年内水文特征呈现显著季节性变化：枯水时段始于10月并持续至次年3月；随着春季升温，3月末至4月初冰雪消融及降雨增强导致河水流量逐步增多；洪水期集中于5月至8月，其洪峰出现在6月下半月至7月初；而在进入11月后，水量不断减少。

巩留县库尔德宁镇阿拉尔村滑坡专业监测点的地貌单元属低山丘陵。地势地形起伏较大，斜坡坡向26°，斜坡高约300 m，坡度25°～40°，整体表现出东高西低，南高北低的规律，海拔高度为1 138～1 522 m，而最低点位于研究对象北侧小莫乎河的河床位置。地貌单元细分可归纳为4大类：南部为低山，中部为黄土台地，同时存在滑坡堆积地貌特征，还包括缓倾斜冲积平原地貌。上覆地层为第四系上更新统黄土，厚度约为38～90 m，主要岩性为风积黄土，含少量卵石、细砂、粉土、砾砂、亚砂土；下伏新近系泥岩、浅灰色泥质半胶结砂砾石。

2 试验条件及入渗方案

2.1 样品性质

本研究区的试验土样取自新疆伊犁地区巩留县上更新统风积层（Q^3eol）黄土，颜色为土黄至灰黄色风成黄土，呈稍密—中密状，孔隙发育，具有湿陷性。取样深度控制在3 m，取样时间为2024年6月。为确保土样在运输过程中免受外界扰动而遭结构破坏，取样后采用保鲜膜与泡沫膜进行多层包裹，继而送至实验室。随后对原状土样依次经过风干与粉碎处理，并开展室内基本物理性质试验以测定相关参数。根据《土工试验方法标准》（GB/T 50123—2019）进行基本物理指标测定，得到研究区黄土的基本物理力学参数如表1所示。

表1 土壤基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical properties of soil

岩土名称	天然密度/（$g\cdot cm^{-3}$）	天然含水率/%	渗透系数/（$m\cdot s^{-1}$）	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	塑限/%	液限/%
黄土	1.47	10.92	7.55×10^{-6}	28.4	24.5	17.34	32.09

粒径分布试验设置3组颗粒平行试验并记录数据如下。伊犁黄土中粉粒含量占比（0.075～0.005 mm）最大，约为52%～60%；细砂（0.25～0.075 mm）占比约为25%～35%；黏粒（<0.005 mm）占比约为9%～15%。

2.2 试验仪器

本次试验的土柱垂直入渗系统由两部分组成，分别为土柱装置和数据采集系统。土柱装置高度为120 cm，直径为28 cm，由于在降雨入渗过程中，水分有自上而下的垂向运移特性，土体含水率的空间分布呈现非均匀变化特征，近地表的上部土层直接接收降水补给，其含水率变化幅度显著大于深部土层。相关研究表明，湿润锋在入渗初期下移速率较快，当湿润锋到达一定深度时，浅层土体的含水状态会发生急剧变化，从非饱和状态迅速达到饱和[18,25]。因此本次传感器的埋设按照上密下疏的原则来布置，在距离土柱装置顶端的10，20，30，50，70 cm处埋设传感器，并由上至下分别命名为传感器1，传感器2，传感器3，传感器4，传感器5。在降雨入渗过程中，基质吸力、孔隙水压力和体积含水率是分析非饱和土水-力耦合过程的核心参数，可以为边坡稳定性分析以及滑坡的监测预警提供重要依据[26]，因此本次试验采用能够监测基质吸力、孔隙水压力、体积含水率的3类传感器，追踪土柱模型在入渗过程中各指标演化规律。

数据采集系统由以下仪器组成:①高精度静态应变测试仪(DH3818);②含水率数据采集器(CR1000);③含水率传感器〔量程为0～100%,精度为(0%～50%),±3%;50%～100%,±5%〕;④孔隙水压力传感器(量程为－0.01～5 MPa,精度≤0.1%FS);⑤基质吸力传感器(量程为－100～－10 MPa;精度±0.5 kPa)。将传感器与数据采集仪连接后埋入土体内部。

降雨系统由NLJY-10型人工模拟降雨系统,淋浴装置、水箱以及增压机组成,该降雨系统有效降雨面积为0～20 m^2,精度为±5%,降雨强度调节范围为0～100 mm/h。通过人工模拟降雨系统控制增压机将水箱中的水从顶部淋浴装置模拟降雨,并利用人工模拟降雨系统的控制面板调节降雨强度、降雨时间等参数来模拟不同工况下的降雨情况。

2.3　试验方案

在天然状态下,土壤水分入渗特征受土壤质地结构、降雨强度和降雨量的综合影响,而原状土柱能够更准确地保持原位土体的孔隙结构和渗透特性。研究表明,土壤水分入渗过程主要由降雨强度和降雨历时这两个关键因素共同决定[14]。为探究研究区融雪后间歇性降雨条件下黄土的入渗速率及土体内部参数变化规律,本文开展了土柱模型试验。试验于2024年6—7月在新疆大学地质与矿业工程学院国家重点实验室进行。试验土壤采用研究区原状黄土,并将其含水率配置为该地区天然含水率10.92%,密度控制为1.47 g/cm^3。根据现场资料,伊犁哈萨克自治州巩留县库尔德宁镇2024年4—5月平均降雨量约为120 mm。为在累计降雨量一致的条件下,研究不同降雨强度对入渗规律的影响,设置了3组试验,降雨强度分别为10,20,30 mm/h,对应降雨时长分别为12,6,4 h。为模拟融雪过程,每组试验起始时均在土柱顶部铺设30 cm厚的积雪层。该厚度的设定依据为该地区冬季平均积雪厚度约30 cm,结合试验所采用的几何相似比1∶5,换算得到模型试验中积雪厚度应为6 cm;综合考虑融雪过程中的实际入渗效率与模拟可行性,最终统一采用6 cm积雪厚度进行试验,积雪来自冬季室外自然收集后冷藏保存,以真实反映融雪水源特征。每组试验设计循环4次,每次以24 h为一个循环,因此单次降雨时间分别为3,1.5,1 h,间歇时长为21,22.5,23 h。本次试验的相似比为1∶5,根据相似比设计实施的试验方案如表2所示。

为直观体现间歇性降雨边界条件,进一步补充各试验组降雨历时与间歇方案,该方案以24 h为1个循环(见表3)。

表2　土柱入渗模拟试验方案

Table 2　Experimental design for soil-column infiltration simulation

试验组	积雪厚度/cm		降雨强度/(mm·h^{-1})		累计降雨量/mm		总降雨时长/h		单次降雨时长/h		单次间歇时长/h		循环次数
	实际	相似比5	实际	相似比$\sqrt{5}$	实际	相似比5	实际	相似比$\sqrt{5}$	实际	相似比$\sqrt{5}$	实际	相似比$\sqrt{5}$	
T_1	30	6	10	4.47	120	24	12	5.37	3	1.34	21	9.39	4
T_2	30	6	20	8.94	120	24	6	2.68	1.5	0.67	22.5	10.06	4
T_3	30	6	30	13.42	120	24	4	1.79	1	0.45	23	10.28	4

表3　间歇性降雨历时过程

Table 3　Temporal process of intermittent rainfall events

试验组	降雨强度/(mm·h^{-1})	单次降雨历时/h	单次间歇历时/h	单次降雨量/mm	循环次数	累计降雨量/mm
T_1	10	3	21	30	4	120
T_2	20	1.5	22.5	30	4	120
T_3	30	1	23	30	4	120

3　结果与分析

本文将试验全过程按水源输入方式划分为两段:0—120 min为积雪融化阶段(低强度、近连续入渗),120 min之后为间歇性降雨阶段(多次恒定降雨强度降雨与间歇交替)。以下分别从体积含水率、基质吸力与孔隙水压力3种参数对两个阶段的变化特征进行分析,并以体积含水率出现显著升高的最深传感器埋深表示湿润锋影响深度。

3.1　间歇性降雨下体积含水率的变化规律分析

为探究融雪后间歇性降雨的复杂工况及不同降雨强度下,伊犁地区黄土的体积含水率变化规律,利用一维土柱装置模拟降雨过程,得到10,20,30,50,70 cm处不同埋深的含水率随时间变化规律如图1所示。

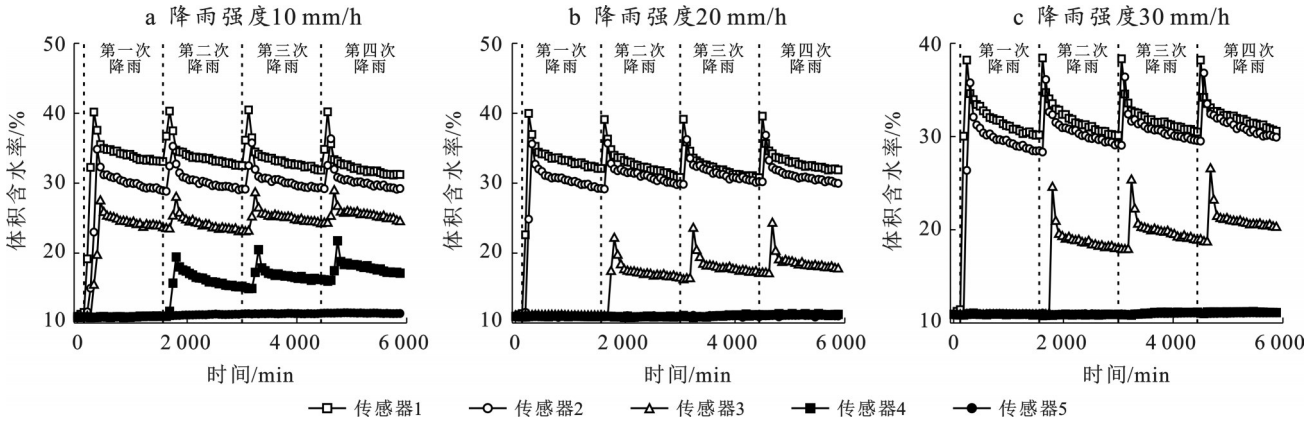


图1 不同降雨强度下土壤体积含水率变化情况

Fig.1 Variations in soil volumetric water content under different rainfall intensities

通过对图1中3组试验数据的分析,可以将体积含水率响应阶段划分为积雪融化阶段和间歇性降雨阶段。3组试验在融雪阶段的含水率增量由表4可知,在每次试验的初始120 min的融雪阶段,积雪逐渐融化,形成低强度、持续性的非饱和入渗。在融雪阶段,仅10 cm处传感器1的体积含水率出现轻微上升,增长幅度均<2%;而传感器2与传感器3在此期间几乎未出现变化,因此融雪入渗锋面尚未达到20 cm以下深度,且融雪水量较为有限,主要影响浅层,湿润锋仅在浅层10 cm以内发育,深层土体未受明显影响。因此,融雪阶段本质上是一个缓慢、浅层、非饱和的入渗过程,其主要作用是为后续降雨提供一定的初始湿润条件,而未形成深层湿润锋。

表4 融雪阶段各埋深土壤体积含水率增量

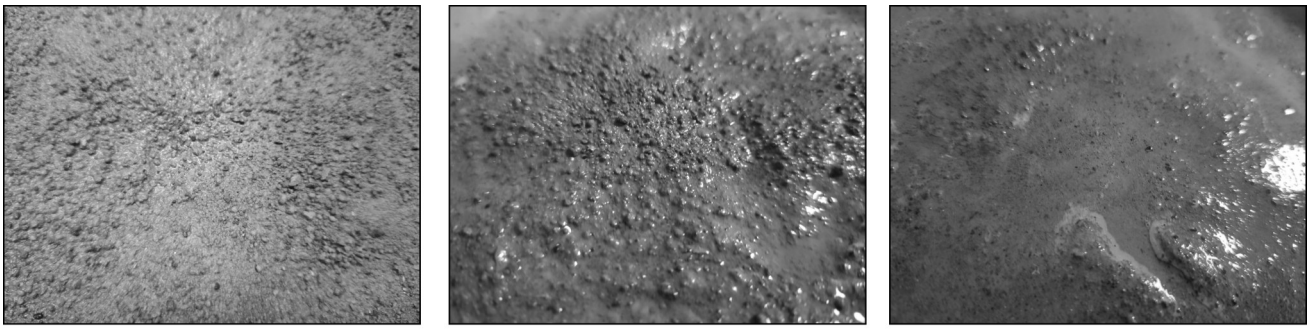
Table 4 Increments in soil volumetric water content at different burial depths during snowmelt stage

埋深/cm	不同雨强下土壤体积含水率		
	T_1(10 mm/h)	T_2(20 mm/h)	T_3(30 mm/h)
10	0.57	0.47	0.52
20	0.04	0.00	−0.01
30	0.03	0.02	−0.05
50	0.04	−0.06	−0.06
70	−0.03	−0.02	−0.02

进入间歇性降雨阶段后,每次降雨均引发湿润锋的向下运移,体积含水率曲线呈现典型的脉冲式变化,降雨期间快速上升、间歇期缓慢回落或趋于稳定。湿润锋推进有显著的深度滞后特征,浅层传感器响应迅速,且曲线呈现陡峭的峰值,而深层传感器对降雨过程的响应存在明显延迟,其含水率上升过程更为平缓,峰值幅度随深度增加而显著衰减。由于前期降雨对土壤剖面进行预先湿润,提高了土壤的导水能力,使得后续降雨时入渗效率与湿润锋推进深度得以增强,呈现出湿润锋逐次深化的规律。

在3组试验中,传感器1均最先对降雨作出响应,通常在降雨开始后立即出现显著变化。在第一组试验中,传感器1在降雨开始后约120 min达到峰值,而在第二组和第三组试验中,该时间缩短至60 min以内,表明降雨强度越大,表层土壤的响应越迅速,当降雨强度超过20 mm/h时,水分可在极短时间内影响20 cm深度。相比之下,传感器3与传感器4的响应显著滞后,通常在入渗开始后600—1 200 min才出现含水率上升,反映出湿润锋推进至深层所需时间较长,进一步印证了非饱和土入渗过程中上快下慢的基本特征。在降雨间歇期间,各埋深传感器的体积含水率均呈现下降趋势,浅层含水率下降主要与供水停止后继续向下排水有关,表面少量蒸发可能加速该过程[27-28];深层回落则以重力势驱动水分的向下迁移为主。

在不同降雨强度条件下,水分入渗情况与含水率变化呈现明显差异。10 mm/h工况中,50 cm处4号传感器记录到体积含水率持续升高,说明湿润锋在试验观测时间尺度内可推进至50 cm;而当降雨强度增至20~30 mm/h时,4号传感器未监测到明显变化,其含水状态始终维持初始水平说明有效入渗深度反而小于低雨强工况。并且对应浅层传感器1的体积含水率峰值存在如下现象:T_1试验(10 mm/h)的体积含水率峰值介于39%~41%,T_2试验(20 mm/h)为38%~40%,T_3试验(30 mm/h)为38%~39%,整体表现出雨强越大含水率峰值略低。此外,本试验为垂直土柱入渗试验,土柱底部封闭且顶部为水平边界,未设置径流外排通道,因此试验过程中不存在坡面径流。试验过程中不同工况下降雨结束后的间歇期末期土柱表面积水情况如图2所示,在低雨强10 mm/h工况下,土柱表层整体呈湿润状态,但基本未见可辨识的浅表积水;而在高雨强时尤其是30 mm/h工况下,表面仍可见连续水膜并伴随局部浅表积水。



a 降雨强度10 mm/h　　b 降雨强度20 mm/h　　c 降雨强度30 mm/h

图2　不同降雨强度下浅层土壤积水情况

Fig.2　Water accumulation in shallow soil under different rainfall intensities

对于上述现象可从高雨强条件下的入渗状态来解释:在20～30 mm/h工况下,降雨初期的供水强度短时超过非饱和黄土表层的入渗能力,使土柱顶部出现表层积水或地表短时饱和。高雨强条件下,供水强度短时间内超过表层瞬时入渗能力,雨滴所具有的较大动能会破坏表层土壤的结构,促使细颗粒堵塞孔隙,最终在浅层形成一层导水率显著降低的土壤阻滞层,该层对水分下渗构成明显的阻滞作用[29-30];因此高雨强工况更易出现地表积水,导致在相同间歇时长内的有效入渗量偏小,水分更集中于表层并限制水分入渗。新增的水分更容易先滞留在0—10 cm的浅层和浅表积水里,10 cm与20 cm附近含水率往往更快升至较高水平并逐渐趋于平缓,而30—50 cm的水分的持续补给又同时受到表层渗透能力下降与降雨历时较短的共同限制,50 cm处含水率传感器难以出现明显的变化。因此,在累计降雨量相同条件下,高雨强条件下单位时间内的供水总量较大,更易造成浅层水分暂存、深部补给不足,水分的实际入渗深度反而较浅,而低雨强更有利于水分持续向深部推进。

3.2　间歇性降雨下基质吸力的变化规律分析

通过对图3中3种不同降雨强度下基质吸力动态变化过程的系统分析,可以揭示融雪后间歇性降雨条件下非饱和黄土的水力响应机理。在0—120 min的融雪阶段,各埋深传感器记录的基质吸力变化幅度均极为有限,波动范围基本维持在±0.1 kPa以内。这一结果表明,此阶段融雪水通量较低,短时间内不足以显著改变剖面整体的非饱和状态,因此无法形成具有显著梯度的湿润锋。

进入降雨阶段后,每次降雨事件均诱发基质吸力的急剧下降。且位于最浅层的1号传感器其基质吸力多次下降至0 kPa,该现象标志着该深度处的土体已由非饱和状态过渡至饱和状态。在这种状态过渡时刻,孔隙水压力取代基质吸力成为控制土体强度的主导因素,根据有效应力原理,孔隙水压力的升高将直接导致有效应力降低,土体骨架所承受的荷载相应减小,进而引发抗剪强度的显著丧失。这意味着土体已从一个相对稳定的状态,进入了潜在的失稳阶段。

为进一步分析同一降雨强度下基质吸力的特征,以试验T_1为例,从1号到5号传感器,其初始基质吸力依次为79.13,77.23,74.43,71.88,68.85 kPa,呈现出随埋深增加而逐渐减小的趋势。该特征与土柱初始阶段的水势平衡状态有关。试验开始前土柱经过静置,剖面内不存在渗流,可近似认为处于静水或准静态状态,且初始含水率一致。在这种状态下,各深度点的总水势趋于一致。总水势由重力势与孔隙水压力共同构成,从而导致孔隙水压力与重力相互补偿。对于埋深较浅的传感器,其重力势相对较大,为维持总水势的恒定,则需要孔隙水压力与重力势相互补偿,孔隙水压力则越小,而基质吸力在非饱和土中表示负孔隙水压力的大小,因此负孔隙水压力越小与之对应的基质吸力正值越大;反之,埋深较大的传感器因其重力势较低,其孔隙水压力则相对较高,在非饱和土中与其对应的基质吸力则越低。因此,观测到初始基质吸力随深度增加而降低的现象,实质上是重力势与孔隙水压力在垂直剖面上相互补偿的结果。

为探究降雨强度对间歇期间基质吸力升高能力的影响,1号传感器因其埋在最上层,对基质吸力的变化最为敏感,因此重点分析了3组试验的表层1号传感器在降雨间歇期的基质吸力升高情况。统计了1号传感器在4次降雨间歇期末的基质吸力增大值(表5)。总体上,每次间歇期间基质吸力的增大值随雨强增大而降低,说明高雨强条件下浅层更易维持高含水状态,基质吸力增大值相对较低。

这种现象本质上是不同降雨强度下水分入渗机制与土壤孔隙结构差异性共同作用的结果。在低降

雨强度条件下,供水较缓,水分主要通过基质孔隙逐步入渗并推动湿润锋向深部迁移,降雨停止后,浅层含水率更容易回落,间歇阶段在重力与蒸发共同作用下土壤水势下降较快,从而使基质吸力更早进入明显增大阶段并趋于较高的稳定水平。反之,在高降雨强度条件下,浅层含水率在降雨初期上升更快,短时间内即可达到较高的含水率范围,降雨结束后,高雨强工况土柱表层往往存在少量积水,需要先经历浅层积水入渗,基质吸力在较低水平维持时间更长,进入快速增大阶段相对滞后。同时,高强度降雨对表层结构的扰动可能使表层更致密、渗透能力下降,从而削弱后续水分向上迁移补充的能力并降低蒸发维持能力。此后的升高过程须经历一个重力排水阶段,方能进入基质吸力增大的阶段。综合以上因素,高降雨强度降雨后的基质吸力增加速率及最终稳定值整体低于低降雨强度工况。

表5 不同雨强条件下1号传感器间歇期基质吸力增大值

Table 5 Increase in matric suction during rainfall intervals at sensor 1 under different rainfall intensities

降雨事件	不同雨强基质吸力增大值/kPa		
	T_1(10 mm/h)	T_2(20 mm/h)	T_3(30 mm/h)
第一次	5.50	4.71	3.91
第二次	5.31	4.83	4.00
第三次	5.25	4.49	3.98
第四次	4.68	4.26	3.67

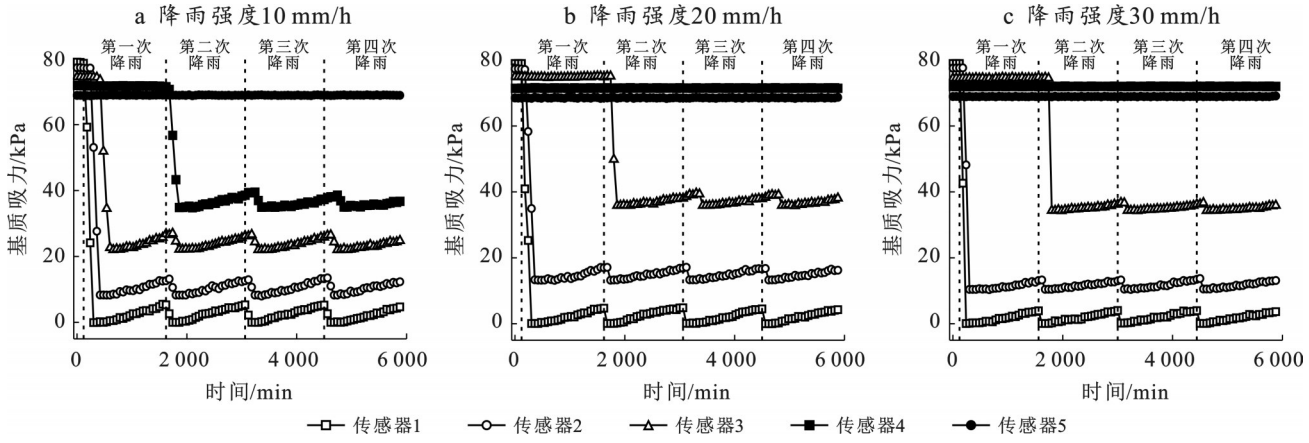


图3 不同降雨强度下基质吸力变化情况

Fig.3 Variations in matric suction under different rainfall intensities

3.3 间歇性降雨下孔隙水压力的变化规律分析

图4为3种不同降雨强度条件下孔隙水压力随时间的变化情况,总体来看每组试验的降雨阶段,位于表层的1号传感器均表现出孔隙水压力的快速上升,其响应时间与降雨开始时刻基本同步,表明表层土体对降雨入渗极为敏感。在随后的降雨间歇期内,由于表层水分的蒸发作用以及持续向下的重力入渗,该位置的孔隙水压力呈现逐渐回落的趋势。而埋深较深的2—5号传感器在整个试验过程中的孔隙水压力始终维持在负值,且在整个试验过程中未发生显著波动,由此说明深部土体未形成连续的饱和水柱,入渗影响具有明显的浅层集中性。

这种深度差异性主要源于不同位置土体的饱和状态差异。1号传感器由于埋深较浅,在降雨过程中直接受到入渗水体的影响,当降雨强度超过土壤入渗能力时,土柱表层会形成临时饱和区,从而使该传感器处于饱和带范围内。在此饱和状态下,孔隙水压力表现为正压,并随着供水条件的变化而产生明显波动。相比之下,2—5号传感器所处的深度位置,湿润锋要么未能稳定抵达,要么仅受到轻微影响,使得这些深度的土体始终处于非饱和状态,因此其孔隙水压力持续表现为负值。通过控制降雨强度这一变量,进一步揭示了降雨强度对孔隙水压力响应特征的规律。如表6所示,当降雨强度从10 mm/h增加到30 mm/h时,1号传感器监测到的孔隙水压力峰值也随之增加,呈现出明显的正相关关系。

这一现象的内在机理在于,较高的降雨强度促使表层土体在更短时间内达到饱和状态,并形成更厚的瞬态饱和区。根据静水压力分布原理,在该饱和区内,孔隙水压力与饱和水柱的高度成正比,因此随着降雨强度的增加,饱和带发育更加充分,相应的孔隙水压力峰值也随之升高。

进一步分析孔隙水压力的剖面分布特征发现,3组试验的初始孔隙水压力均呈现出规律性的垂向分布模式。由表7可知,孔隙水压力随着埋深增加而逐步增大的明显趋势。

表 6　不同雨强条件下 1 号传感器孔隙水压力峰值

Table 6　Peak pore-water pressure at sensor 1 under different rainfall intensities

降雨事件/次	不同雨强孔隙水压力峰值/kPa		
	T_1(10 mm/h)	T_2(20 mm/h)	T_3(30 mm/h)
第 1 次	18.80	19.35	19.69
第 2 次	18.61	19.35	19.55
第 3 次	18.68	19.37	19.59
第 4 次	18.82	19.36	19.58
平均值	18.73	19.36	19.60

这种规律性分布是非饱和土体在重力作用与孔隙水压力共同作用下趋于静态水力平衡的典型表现。土柱在试验开始前经过 3 d 静置,至传感器读数稳定后开始试验,内部不存在垂向渗流,因此各深度的水势状态应当较为接近。由于浅层位置更高,其重力势相对更大,静置阶段在土水势驱动下水分发生缓慢迁移与调整,浅层需要更小的孔隙水压力来进行补偿,同时也表现为较大的基质吸力,随着埋深增加,位置降低,重力势减小,所需的孔隙水压力补偿逐渐增大,因此深部孔隙水压力相对更高,基质吸力随之减小。这一发现与前述初始基质吸力随深度增加而不断降低的观测结果相互印证,共同揭示了非饱和土体中水分势能平衡的内在机制,为深入理解黄土边坡在水力作用下的稳定性变化提供了重要的理论依据。

表 7　不同埋深下初始孔隙水压力分布

Table 7　Initial pore-water pressure distribution at different burial depths

埋深/cm	不同雨强初始孔隙水压力/kPa		
	T_1(10 mm/h)	T_2(20 mm/h)	T_3(30 mm/h)
10	−0.127	−0.119	−0.118
20	−0.099	−0.091	−0.086
30	−0.075	−0.071	−0.070
50	−0.048	−0.040	−0.048
70	−0.024	−0.023	−0.025

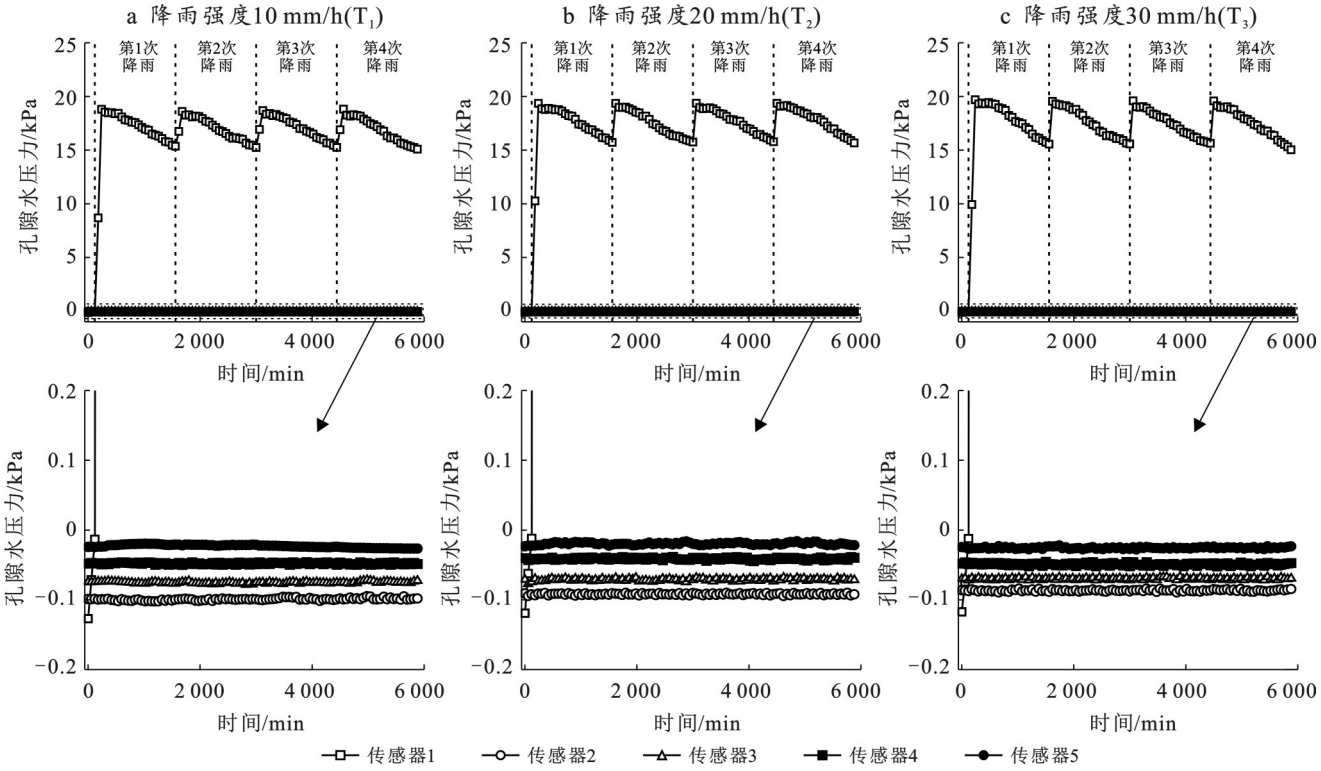


图 4　不同降雨强度下孔隙水压力变化情况

Fig.4　Variations in pore-water pressure under different rainfall intensities

4　讨　论

(1) 融雪与降雨入渗阶段的差异。试验表明融雪阶段入渗通量较低,主要影响 10 cm 以内浅层含水状态,但可显著降低表层基质吸力并改变后续降雨的初始边界条件。这与伊犁地区春季融雪和降雨交替背景下诱发浅层失稳的情况类似。

(2) 高雨强可使表层更快达到接近饱和并提高孔压峰值,但并未带来更深的湿润锋影响深度;相反,10 mm/h 工况下湿润锋可推进至 50 cm。其可能原因在于高雨强增强雨滴有较大动能并且更利于细颗粒迁移,易在表层形成更致密的阻滞层,使入渗能力下

降,并在本试验中表现为水膜与浅表积水,从而削弱对深部的持续补给;而低雨强更有利于较均匀、持续的入渗过程,在多次循环中逐步向深部迁移。

(3)对边坡稳定性与预警指标的启示。基质吸力衰减与浅层孔压上升直接导致有效应力降低,是非饱和黄土强度快速软化的重要表现。试验中10 cm处孔压与基质吸力对降雨响应最敏感,且间歇期结束后基质吸力恢复到初始值的能力随雨强增大而减弱,在工程监测中可将浅层吸力、孔压的快速衰减和上升特征作为反映暂态饱和带形成与浅层失稳风险的敏感指标。

(4)研究局限与后续工作。本研究采用一维土柱装置,未考虑坡面径流、侧向渗流及温度循环等现场复杂条件;后续可结合冻融循环、二维或三维物理模型及数值模拟开展耦合研究,并通过多组重复试验提高统计可靠性,从而更好服务于伊犁黄土边坡的稳定性评价与防灾减灾。

5 结 论

(1)融雪入渗阶段为浅层非饱和入渗过程:0—120 min内仅10 cm处体积含水率出现轻微上升,20 cm及以下无显著变化。融雪主要通过改变浅层初始含水状态与基质吸力条件,对后续降雨入渗的初始水势条件有一定影响。

(2)间歇性降雨阶段湿润锋推进呈深层变化滞后于浅层的现象,且浅层对雨强变化更为敏感。10 cm处峰值出现时间由T_1约120 min缩短至T_2和T_3的小于60 min;在10 mm/h工况下湿润锋影响深度可达50 cm,而20~30 mm/h工况下未达到50 cm,表现为高雨强"增湿快,影响浅"的特征。

(3)浅层基质吸力与孔压响应具有明显循环性。10 cm处基质吸力在降雨期间可降至0 kPa,间歇期逐步增大;间歇期末的吸力增大值随雨强增大而降低。10 cm处孔隙水压力平均峰值也随雨强的增加而变大,而深部传感器始终维持负孔压,说明暂态饱和主要局限于浅层。

(4)从工程实践角度看,低雨强,长历时,多次循环的间歇性降雨更易诱发深部湿润带,应作为融雪期黄土边坡中长期软化与延迟失稳的重要情景;高雨强,短历时降雨则主要增加浅层近饱和孔压峰值,对浅表滑塌具有更直接的触发作用。上述认识可为伊犁地区相关工程的降雨入渗分析和滑坡防治提供参考依据。

参考文献(References)

[1] 彭建兵,林鸿州,王启耀,等.黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J].工程地质学报,2014,22(4):684-691.
Peng Jianbing, Lin Hongzhou, Wang Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2014,22(4):684-691.

[2] Peng Jianbing, Sun Ping, Igwe O, et al. Loess caves, a special kind of geo-hazard on Loess Plateau, northwestern China [J]. Engineering Geology, 2018,236:79-88.

[3] 曹小红,孟和,尚彦军,等.伊犁谷地黄土滑坡发育分布规律及成因[J].新疆地质,2020,38(3):405-411.
Cao Xiaohong, Meng He, Shang Yanjun, et al. The development and distribution of loess landslides in Yili valley and its causes [J]. Xinjiang Geology, 2020, 38(3):405-411.

[4] 许健,任畅,高靖寓,等.干湿循环效应下Na_2SO_4盐渍原状黄土渗透特性与细观机制[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(5):1644-1654.
Xu Jian, Ren Chang, Gao Jingyu, et al. Influence of dry-wet cycles on hydraulic conductivity and microstructure of saline undisturbed loess with sodium sulfate [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021,52(5):1644-1654.

[5] 叶万军,强艳红,景宏君,等.基于核磁共振的不同含水率黄土古土壤冻融循环试验研究[J].工程地质学报,2022,30(1):144-153.
Ye Wanjun, Qiang Yanhong, Jing Hongjun, et al. Freeze-thaw cycle experiment of loess paleosol with different water content based on nuclear magnetic resonance [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(1):144-153.

[6] 李永勤,王鹏,李琛,等.极端强降雨诱发临汾黄土地区公路灾害分布特征和影响因素分析[J].公路工程,2024,49(1):112-117.
Li Yongqin, Wang Peng, Li Chen, et al. Analysis on distribution characteristics and influencing factors of highway disasters induced by extreme heavy rainfall in the loess area of Linfen [J]. Highway Engineering, 2024,49(1):112-117.

[7] Xian Yu, Wei Xueli, Zhou Haibo, et al. Snowmelt-triggered reactivation of a loess landslide in Yili, Xinjiang, China: Mode and mechanism [J]. Landslides, 2022, 19(8):1843-1860.

[8] Wulamu K, Zhang Zizhao, Lv Qianli, et al. Triggering mechanics and early warning for snowmelt-rainfall-induced loess landslide [J]. Scientific Reports, 2024,14:26787.

[9] 高燕燕,钱会,杨佳,等.重塑马兰黄土渗透性的室内试验研究[J].南水北调与水利科技,2016(5):130-136.
Gao Yanyan, Qian Hui, Yang Jia, et al. Indoor experi-

mental study on permeability characteristics of remolded Malan Loess [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016(5):130-136.

[10] Li Peiyue, Qian Hui, Wu Jianhua. Conjunctive use of groundwater and surface water to reduce soil salinization in the Yinchuan Plain, north-west China [J]. International Journal of Water Resources Development, 2018, 34(3):337-353.

[11] Gao Yanyan, Qian Hui, Li Xinyan, et al. Effects of lime treatment on the hydraulic conductivity and microstructure of loess [J]. Environmental Earth Sciences, 2018,77(14):529.

[12] Ma Fuli, Yang Jing, Bai Xiaohong. Water sensitivity and microstructure of compacted loess [J]. Transportation Geotechnics, 2017,11:41-56.

[13] Wang J, Ma Yan, Guo Qianyi, et al. Influence of pressure and water content on loess collapsibility of the Xixian New Area in Shaanxi Province, China [J]. Earth Sciences Research Journal, 2017,21(4):197-202.

[14] 申继先,赵本超,王探宇,等.强降雨作用下原状黄土土柱入渗试验[J].南水北调与水利科技(中英文),2025,23(4):997-1006.
Shen Jixian, Zhao Benchao, Wang Tanyu, et al. Experiment on the infiltration of undisturbed loess soil column due to heavy rainfall [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(4):997-1006.

[15] 姚志华,陈正汉,黄雪峰,等.非饱和原状和重塑Q_3黄土渗水特性研究[J].岩土工程学报,2012,34(6):1020-1027.
Yao Zhihua, Chen Zhenghan, Huang Xuefeng, et al. Hydraulic conductivity of unsaturated undisturbed and remolded Q_3 loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(6):1020-1027.

[16] 覃小华,刘东升,宋强辉,等.降雨条件下一维土柱垂直入渗模型试验研究及其渗透系数求解[J].岩石力学与工程学报,2017,36(2):475-484.
Qin Xiaohua, Liu Dongsheng, Song Qianghui, et al. Experimental study on one-dimensional vertical infiltration in soil column under rainfall and the derivation of permeability coefficient [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017,36(2):475-484.

[17] 彭柳君.水在原状黄土中的入渗过程研究[D].北京:北京工业大学,2016.
Peng Liujun. Study on infiltration process of water in undisturbed loess [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.

[18] Zhao Zhiqiang, Dai Fuchu, Min Hong, et al. Field infiltration of artificial irrigation into thick loess [J]. Engineering Geology, 2021,294:106388.

[19] Zhang Zhiyong, Bao Weixing, Li Zhuo, et al. Experimental study on the failure process of loess slopes in Ili under freeze-thaw and rainfall [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2025,29(3):100100.

[20] Zhong Wei, Zhu Yuanjia, He Na. Physical model study of an intermittent rainfall-induced gently dipping accumulation landslide [J]. Water, 2022,14(11):1770.

[21] Liu Jinwen, Shen Zhaolong, Hu Bowen, et al. Experimental analysis of rainfall-induced shallow landslides: A case study of a loess slope in Gaolan County, China [J]. Frontiers in Earth Science, 2025,13:1613118.

[22] 谢梅香,洪大林,付静,等.单次和间歇性降雨下紫色土坡地壤中硝氮迁移特征[J].水土保持学报,2022,36(1):24-29.
Xie Meixiang, Hong Dalin, Fu Jing, et al. Characteristics of nitrate nitrogen transport of purple sloped soils in response to single and intermittent rainfalls [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):24-29.

[23] 朱元甲,贺拿,钟卫,等.间歇型降雨对堆积层斜坡变形破坏的物理模拟研究[J].岩土力学,2020,41(12):4035-4044.
Zhu Yuanjia, He Na, Zhong Wei, et al. Physical simulation study of deformation and failure accumulation layer slope caused by intermittent rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020,41(12):4035-4044.

[24] 苏永华,李诚诚.间歇性强降雨下基于Green-Ampt入渗模型的边坡稳定性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(3):28-36.
Su Yonghua, Li Chengcheng. Slope stability analysis based on green-ampt infiltration model under intermittent heavy rainfall [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020,47(3):28-36.

[25] 张琳琳,崔亚莉,梁桂星,等.SWAT-MODFLOW耦合模型在地下水量均衡分析中的应用[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):176-183.
Zhang Linlin, Cui Yali, Liang Guixing, et al. Application of SWAT-MODFLOW coupling model in groundwater balance analysis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6):176-183.

[26] 孟生勇,江兴元,杨义,等.降雨诱发堆积体滑坡水土响应与稳定性时空演化试验研究[J].水文地质工程地质,2023,50(1):104-112.
Meng Shengyong, Jiang Xingyuan, Yang Yi, et al. An experimental study of spatial-temporal evolution of water-soil response and stability of a rainfall-induced accumulation landslide [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2023,50(1):104-112.

(下转第 39 页)