水文地質工程地質
HYDROGEOLOGY & ENGINEERING GEOLOGY
中文核心期刊 CSCD核心期刊
中科双效期刊 中国科技核心期刊
Caj-cd规范获奖期刊

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

陈林万，张晓超，裴向军，张　硕，龚伟翔，钟玉健

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

CHEN Linwan, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, ZHANG Shuo, GONG Weixiang, and ZHONG Yujian

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010041

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

土工格室加筋垫层路堤破坏模式和稳定性评价

Failure mode and stability evaluation of geocell-reinforced cushion embankment

金家庆, 徐超, 梁程, 刘若桐　水文地质工程地质. 2019, 46(1): 86-86

二元结构库岸边坡失稳机制试验研究

An experimental study of the bank slope instability mechanism of dual structure reservoir

张钧, 梁为邦, 林红, 苏东院, 田毅, 许万忠, 熊茹雪, 史丁康　水文地质工程地质. 2020, 47(3): 156-163

预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables

周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建　水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟

A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model

马文著, 徐衍, 李晓雷, 陈敏　水文地质工程地质. 2020, 47(5): 150-160

上浮极限状态下饱和土的浮力模型试验和理论分析

Model tests and theoretical analyses of buoyancy in saturated soils during the ultimate limit state of up-lifting

荣雪宁, 徐日庆, 冯苏阳, 朱亦弘, 伍璇　水文地质工程地质. 2019, 46(4): 90-96

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛　水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202010041

降雨诱发直线型黄土填方边坡失稳模型试验

陈林万[1]，张晓超[1]，裴向军[1]，张 硕[2]，龚伟翔[1]，钟玉健[1]
（1.成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，四川 成都 610059；
2. 华北水利水电大学地球科学与工程学院，河南 郑州 450045）

摘要：近年来，随着“治沟造地”和“固沟保塬”等工程在黄土高原的陆续开展，出现了许多直线型黄土填方边坡。降雨是诱发边坡失稳的重要因素，但对降雨诱发直线型黄土填方边坡变形演化特征和破坏模式的研究较少。以直线型黄土填方边坡为研究对象，通过传感器监测、三维激光扫描和人工降雨，开展室内降雨模型试验，记录了降雨入渗下边坡内部水文响应特征和边坡失稳破坏过程，并对湿润锋、土颗粒运移、坡体内部变形响应、裂缝演化特征及破坏模式进行了分析。试验结果表明：随着降雨入渗，湿润锋达到后，体积含水率增加，并在峰值后保持稳定，而基质吸力则减小，到达最低点后保持稳定。冲沟对填方边坡的影响较大，它的发育改变了坡体内含水率特征，同时也是控制边坡整体滑动的边界；边坡变形响应区域主要是以填方边坡前缘堆积区和后缘滑塌区为主；裂缝演化方向由边坡前缘向后缘发展，它的发育为雨水入渗提供优势通道，同时也加剧边坡的变形破坏；降雨形成的水动力驱使坡体中细颗粒从填方边坡后缘向前缘流失，减弱了土体颗粒之间的胶结能力，使其抗剪强度降低，进而使边坡失稳破坏。因此，在降雨入渗下，直线型黄土填方边坡的变形破坏模式为：坡顶冲沟破坏、坡脚软化→局部牵引坍塌、整体失稳→块体分割、流滑破坏。研究结果可为直线型黄土填方边坡的工程建设和滑坡灾害防治提供理论参考。

关键词：直线型黄土填方边坡；降雨入渗；破坏模式；模型试验
中图分类号：P642.22 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-3665(2021)06-0151-10

Model test of the linear loess fill slope instability induced by rainfall

CHEN Linwan[1], ZHANG Xiaochao[1], PEI Xiangjun[1], ZHANG Shuo[2], GONG Weixiang[1], ZHONG Yujian[1]
(*State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection*, *Chengdu University of Technology*, *Chengdu*, *Sichuan* 610059, *China*; 2. *College of Geosciences and Engineering*, *North China University of Water Resources and Electric Power*, *Zhengzhou*, *Henan* 450045, *China*)

Abstract: In recent years, many linear loess fill slopes have appeared with the continuous development of “Governing valleys” and “Retaining plateau” projects in the Loess Plateau. Slope instability is induced by rainfall, which is an important factor. However, there are few studies on the deformation evolution characteristics and failure modes of rainfall-induced linear loess fill slopes. In this paper, the linear loess fill slope is taken as the research object, and the indoor rainfall model test is carried out through sensor monitoring, three-dimensional laser scanning technology and artificial rainfall system. The hydrological response characteristics and failure process of slope under rainfall infiltration are recorded, and the wetting front, soil particle migration, internal deformation response, fracture evolution characteristics and failure mode are analyzed. The test results show that with the infiltration of rainfall, when the wetting front is reached, the volumetric moisture content increases and remains

收稿日期：2020-10-22；**修订日期：**2021-03-18
基金项目：国家自然科学基金项目(41790445)；国家重点研发计划项目(2018YFC1504702)
第一作者：陈林万(1996-)，男，硕士研究生，主要从事黄土填方边坡稳定性评价方面的学习和研究工作。E-mail: 1317783721@qq.com
通讯作者：张晓超(1978-)，女，副教授，主要从事黄土滑坡形成机理方面的研究工作。E-mail: 31685032@qq.com

stable at the maximum, while the matric suction decreases and remains stable at the minimum. The gully has a greater impact on the fill slope. The development of slope changes the characteristics of the water content in the slope, and at the same time it is the boundary that controls the overall sliding of the slope. The deformation response area of the slope is mainly the front accumulation area and the back slide area of the filling slope. The cracks evolve from the leading to the trailing edge, and its development offers preferential seepage channels for the infiltration of rainwater. At the same time, the cracks also intensifies the deformation and failure of the slope. The hydrodynamic force formed by rainfall drives the loss of fine particles in the slope from the rear edge of the fill slope to the front edge, weakens the cementation among the soil particles, reduces the shear strength, and causes the slope instability and failure. Therefore, under the rainfall infiltration, the deformation and failure modes of the linear loess fill slope are: gully failure at the top of slope and toe softening →local traction collapse and overall instability → block segmentation and at last the flow slip failure. The research results can provide a theoretical reference for the engineering construction of linear loess fill slope and the prevention and control of landslide disaster.

Keywords: linear loess fill slope；rainfall infiltration；failure mode；model test

黄土结构疏松，有着极强的水敏性，在降雨入渗下容易诱发黄土滑坡[1－2]。黄土地区年降雨量小，但空间和时间上分布极不均匀，导致黄土滑坡多发生在降雨量高的区域，且多发生在雨季[3]。兰州地区 2000—2015 年发生的重大黄土滑坡中，在 4—9 月由降雨诱发的滑坡占比达到 63%[4]。降雨型黄土滑坡危害性大，如 2013 年 7 月，延安地区遭受百年不遇持续性降雨，引发大量地质灾害，造成严重经济损失和大量人员伤亡[5]。此外，降雨诱发黄土填方边坡失稳也时有发生，如 2015 年 5 月 4 日，连续降雨诱发河南灵宝某直立型支挡填方边坡破坏产生滑塌，造成 3 户 20 间房屋掩埋，4 户 23 间受损[6]。

随着“治沟造地”“固沟保塬”“平山造城”等工程在黄土高原陆续开展，出现了许多黄土填方边坡。针对黄土填方边坡的研究，主要集中在填方边坡变形破坏机制[7－8]和失稳机理[6, 9]方面，也有学者对黄土填方边坡物理模拟过程中微观变形破坏[10]和支挡结构变形破坏进行分析[11]。目前，对于降雨诱发滑坡机理的研究方法主要是现场试验[12]、数值模拟[13]和模型试验。其中模型试验有着原位试验和数值模拟不可替代的优点。模型试验不仅试验现象直观，而且还能综合考虑模拟原位试验的边界条件，基本能反映滑坡体内外各种因素的相互影响。林鸿州等[14]通过降雨诱发土质边坡失稳的模型试验，探讨降雨特性对边坡失稳的影响，并提出降雨型滑坡存在“门槛累积雨量”；Wu 等[15]、周春梅等[16]基于模型试验，探讨了降雨作用下滑坡的变形破坏特征；周杨等[17]则探究了降雨条件下黄土滑坡的破坏模式；张钧等[18]、罗浩等[19]、李玉瑞等[20]研究了降雨作用下边坡失稳机制；Zhang 等[21]通过模型试验对黄土填方边坡进行研究，提出了降雨诱发边坡失稳的预警阈值模型和新的预警框架。

综上所述，研究人员对降雨诱发滑坡做了较深入的研究，对滑坡的破坏过程、破坏模式和形成机理已有较清晰的认识。然而对黄土填方边坡失稳研究较少，尤其是对直线型黄土填方边坡的变形破坏过程以及失稳模式研究欠缺。直线型填方边坡是指坡面形态为直线，高度小于 20 m、土质均匀的填方边坡[22－23]。基于此，本文以直线型黄土填方边坡为研究对象，采用室内模型试验方法，结合传感器监测和三维激光扫描，研究降雨条件下直线型黄土填方边坡的降雨入渗、变形响应、裂缝演化特征、土颗粒运移以及边坡变形破坏模式，以期为直线型黄土填方边坡的工程建设和滑坡地质灾害防治提供一定的理论参考。

1 模型试验设计

1.1 试验装置

本次试验在成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室进行。试验装置采用自主研制的降雨模拟试验系统，主要由模型槽、降雨装置、测量系统组成(图 1)，具体如下：

(1)模型槽：长 2.5 m、宽 1 m、高 1.5 m，三面是透明的有机玻璃，通过角钢连接，底面是不透水的高强度钢板。为观测湿润锋的运移和填方边坡的变形，在模型槽左侧有机玻璃上绘制 10 cm×10 cm 的网格，用于坐标参考和基准点的控制。在试验进行之前，先在模型槽内侧有机玻璃上涂抹凡士林，减小模型槽对填

图 1　试验仪器

Fig. 1　Experimental instruments

方边坡的边界效应。

(2)降雨装置: 主要由水箱、水表阀门、压力表、供水水管和低压超细雾化降雨喷头组成。低压超细雾化降雨喷头共有 16 个, 分 4 排 4 列布置, 相邻喷头间距 30 cm。试验时打开水表阀门, 调节压力表, 以此控制降雨强度, 然后水由压力表经供水水管到达降雨喷头, 模拟降雨。

(3)测量系统: 由基质吸力传感器、体积含水率传感器、数据采集仪、三维激光扫描仪和高清数码相机组成。基质吸力传感器和体积含水率传感器采用美国 Decagon 公司生产的 MPS-6 基质吸力传感器和 EC-5 体积含水率传感器; 数据采集系统采用 Em50 采集系统, 三维激光扫描仪采用奥地利 RIEGL 公司研制的 riegl 三维激光扫描仪。

1.2　试验材料

试验土样使用重塑黄土, 土样采自延安市安塞县南沟新鲜剖面的马兰黄土, 其颗粒级配曲线见图 2, 根据其粒径的百分含量(表 1)可知, 该试验用土为粉质黏土。通过击实试验得到土样的最大干密度为 1.73 g/cm^3, 最优含水率为 15.7%。其余基本物理指标见表 2。取回土样后将其晒干碾碎, 然后过 2 mm 的标准筛。

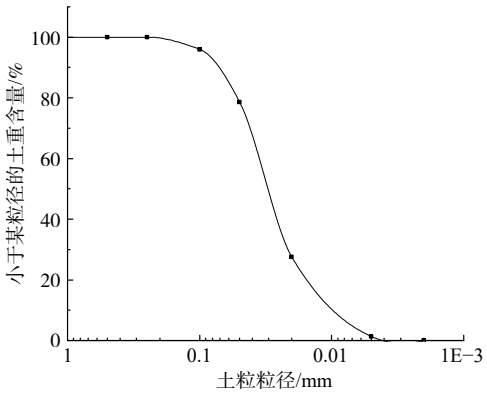


图 2　试验用土颗粒级配曲线

Fig. 2　Grading curve of the test soil

表 1　试验用土不同粒径体积百分比

Table 1　Volume percentage of different particle sizes in the test soils

成分	砂粒	粉粒	黏粒
粒径/mm	>0.075	0.005 ~ 0.075	<0.005
体积分数/%	8.64	90.00	1.36

表 2　试验用土的基本物理指标

Table 2　Basic physical indicators of the test soils

名称	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数	孔隙比	饱和渗透系数/(m·s^{-1})
延安黄土	2.70	30.6	21.4	9.2	0.853	1.26×10^{-6}

1.3　试验方案

(1)传感器埋设

本次试验传感器埋设共 2 个断面, 体积含水率和基质吸力各一个断面, 两相邻传感器之间的间距不小于 6R(R 为传感器直径), 以减小传感器之间的相互影响。传感器布置时要远离模型槽边界, 防止雨水沿着模型槽边界下渗, 对试验造成干扰。

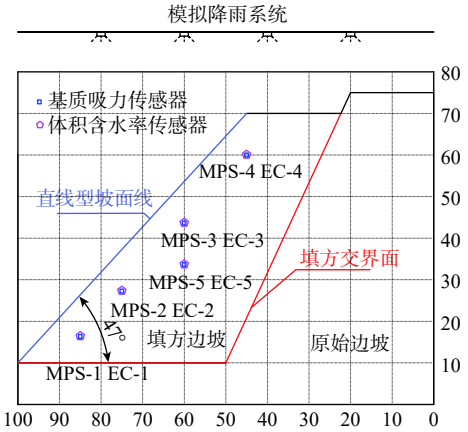
本次试验传感器布置 2 个深度, 第一深度距坡面垂直距离 10 cm, 共 4 个基质吸力和 4 个体积含水率传感器; 第二深度距坡面垂直距离 20 cm, 1 个基质吸力和 1 个体积含水率传感器, 见图 3。每层基质吸力和体积含水率传感器间隔 20 cm。

(2)模型制作

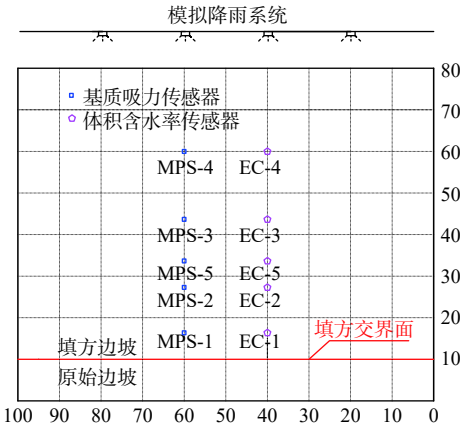
模型制作分原始边坡和填方边坡, 制作流程相同。原始边坡制作过程中对每层土体尽可能的压实, 确保密实度大于填方边坡, 模拟天然黄土边坡。填方边坡分 6 层填筑, 每层高度为 10 cm, 每填筑完一层土体进行下一层填筑之前, 需将该层土体表面刮毛, 使两层土体充分接触, 尽可能的使填方边坡均匀。并且每填筑完成一层时, 都要采用 6.18 cm×2.0 cm 的环刀取样, 测其含水率和密度, 用于换算密实度(表 3), 如果密实度没有达到预定值 0.9, 则继续压实。填筑完成后按 47°坡角切坡, 之后在其表面铺上塑料薄膜, 养护 24 h。

(3)降雨方案

降雨强度的设置是根据研究区极端降雨和试验的均匀度共同确定的。根据延安气象局 2013 年降雨资料, 最大的降雨强度为 22.8 mm/h。在进行室内降雨试验



(a) 传感器埋设剖面图/cm



(b) 传感器埋设平面图/cm

图 3　试验传感器布设

Fig. 3　Sensor arrangement for the test

表 3　模型填筑后不同层位的密实度

Table 3　Density of different layers after model filling

填筑层号	含水率/%	密度/(g·cm^{-3})	干密度/(g·cm^{-3})	压实度
1	14.5	1.79	1.56	0.90
2	15.6	1.79	1.55	0.89
3	16.4	1.81	1.55	0.89
4	15.2	1.80	1.56	0.90
5	15.6	1.79	1.54	0.89
6	14.2	1.77	1.55	0.89

时，要求降雨的均匀度大于 80%。当降雨强度为 18 mm/h 时降雨强度均匀度为 87.5%，满足试验要求。所以试验的降雨强度设置为 18 mm/h。降雨类型采用间隙型降雨，降雨方案如表 4 所示。

(4)数据采集与分析

试验过程中自动采集体积含水率和基质吸力，采集频率均为 1 次/min。采用 riegl 三维激光扫描仪监测填方坡面的变形，该仪器具有高速度、高密度、高精度的特点。填方边坡每出现一次显著变形就扫描一次。

表 4　降雨方案

Table 4　Rainfall schemes

降雨次数	起止时刻	降雨时间/min	降雨强度/(mm·h^{-1})
第1次	14:24—15:34	70	18
第2次	16:14—16:24	10	18
第3次	16:34—16:44	10	18
第4次	16:54—17:04	10	18
第5次	17:14—17:29	15	18
第6次	17:44—18:04	20	18
第7次	18:24—18:44	20	18
第8次	18:59—19:14	15	18
第9次	19:29—19:39	10	18
第10次	19:49—22:29	160	18

2　直线型黄土填方边坡变形破坏过程分析

基于坡体内含水率及基质吸力的监测，得到降雨入渗过程中含水率、基质吸力随时间变化关系如图 4、图 5 所示，不同埋设深度的传感器响应时间见表 5、表 6 所示，并采用如图 6 的示意图计算湿润锋运移速率[17]。湿润锋平均运移速率等于水分运移深度除以水分运移的时间，计算公式为：

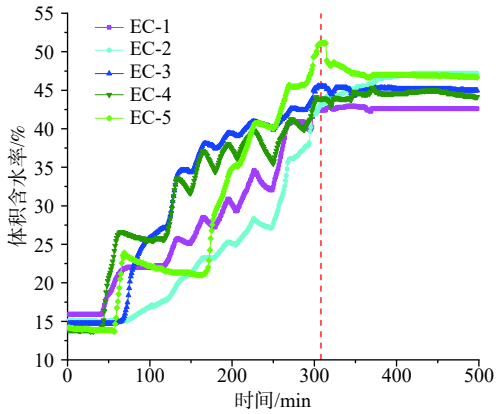


图 4　降雨过程中填方边坡不同位置的含水率变化曲线

Fig. 4　Variation curve of water content in different positions of the fill slope during rainfall

$$v_{湿润锋} = \frac{H}{t} \tag{1}$$

对于斜坡，湿润锋平行于斜面，此时水分运移速率需转化成传感器到斜坡的垂直距离除以水分运移到传感器位置的时间，计算公式为：

$$v_{湿润锋} = \frac{H\cos\alpha}{t} \tag{2}$$

式中：$v_{湿润锋}$——湿润锋平均运移速率/(m·s^{-1})；

H——仪器埋设深度/m；

t——水分运移到传感器所用时间/s；

α——坡度/(°)。

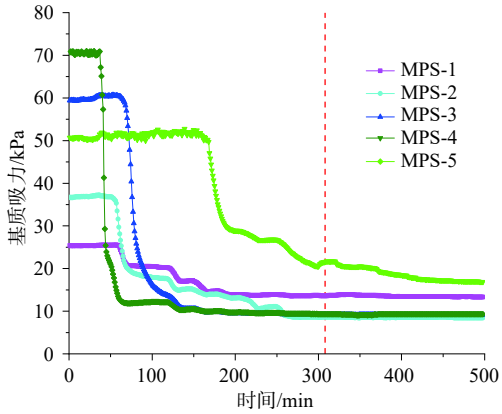


图 5　降雨过程中填方边坡不同位置基质吸力变化曲线

Fig. 5　Variation curve of matric suction at different positions of the fill slope during rainfall

表 5　降雨过程中不同监测点含水率响应时间

Table 5　Response time of water content at different monitoring points during rainfall

传感器编号	EC-1	EC-2	EC-3	EC-4	EC-5
埋设深度/cm	10	10	10	10	20
响应时间/min	43	74	72	33	59

表 6　降雨过程中不同监测点基质吸力响应时间

Table 6　Response time of matric suction at different monitoring points during rainfall

传感器编号	MPS-1	MPS-2	MPS-3	MPS-4	MPS-5
埋设深度/cm	10	10	10	10	20
响应时间/min	63	54	66	40	158

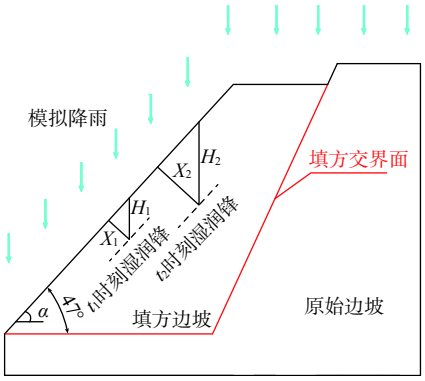


图 6　湿润锋运移示意图

Fig. 6　Schematic diagram of wet front migration

根据降雨入渗条件下边坡的变形破坏特征不同，将黄土填方边坡的变形破坏过程分为四个阶段，分别为降雨入渗阶段、坡顶冲沟破坏及坡脚局部破坏、边坡整体失稳破坏和边坡块体分割及流滑破坏。

2.1　降雨入渗阶段

试验前期，边坡入渗率大于降雨强度，雨水以入渗为主，边坡无明显的变形破坏现象。

2.2　坡顶冲沟破坏及坡脚局部破坏

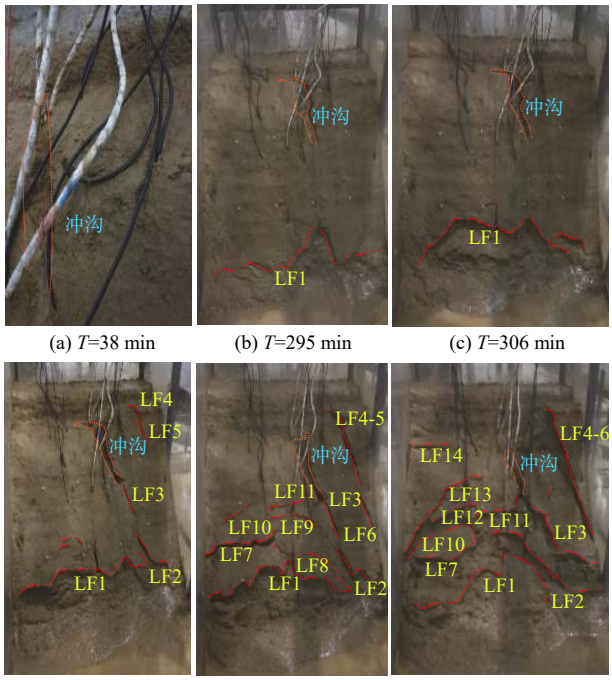
随着降雨的持续入渗，湿润锋的下移，各监测点的传感器开始对降雨产生响应。含水率最先响应的是位于坡顶 10 cm 深处的 EC-4，响应时间 33 min(表 5)，读数为 13.95%。EC-4 最先响应是由于该监测点位于坡顶。来自原始边坡的雨水在填方边坡坡顶富集，增大了雨水的入渗量；坡顶是以垂直入渗为主，坡顶的湿润锋运移速率大于坡面其他地方(表 7)。含水率其次响应的是位于坡脚 10 cm 深处的 EC-1，响应时间 43 min(表 5)，读数为 15.99%。EC-1 其次响应是因为随着降雨持续，土体饱和度增加使其入渗能力减弱，产生坡面径流，雨水在坡脚处汇集，湿润锋下移。降雨历时 59 min 时，位于坡面20 cm 深的 EC-5 开始响应，读数为 14.65%。EC-5 较 EC-3 先响应是因为在降雨进行到 38 min 时，在离 EC-4 传感器 3 cm 处雨水汇集并侵蚀边坡导致细沟发育(图 7a)，为雨水下渗提供优势通道，雨水沿着细沟向下入渗侵蚀。随着降雨的持续和原始坡面的雨水在此富集，在水流的冲击下向下侵蚀，细沟逐渐从坡顶向坡脚发展形成冲沟，冲沟的发育加快了雨水入渗，从表 5 可以看出 EC-5 监测点的湿润锋较 2#、3#含水率监测点都要快，最终导致 EC-5 较先响应，这表明填方边坡坡顶冲沟的发育对其内部含水率变化有着极大的影响，在实际填方边坡中要做好坡顶的排水措施，防止坡顶冲沟的产生。降雨历时在 72 min、74 min时，位于坡面 10 cm 深处的监测点 EC-3 和 EC-2 分别响应，读数分别为 16.41%、15.14%。各传感器响应后，总体上读数都呈上升趋势，到达峰值后逐渐趋于平稳。

表 7　湿润锋平均运移速率

Table 7　Average velocity of the wetting front

传感器编号	EC-1	EC-2	EC-3	EC-4	EC-5
湿润锋运移速率/(10^{-6} m·s^{-1})	26.43	15.36	15.79	50.51	38.53

从图 5 中可将基质吸力的变化分为 3 个阶段：平稳期、下降期和稳定期。降雨前期雨水还未下渗到各监测点，都保持着初始值不变，即平稳期。随着降雨的持续，不同位置处的监测点先后响应，响应顺序为 MPS-4、MPS-2、MPS-1、MPS-3、MPS-5(表 6)，响应后读数开始下降，即下降期。前半部分急剧下降，下降速度快；后半部分较缓，下降速度较慢。在降雨前期，填方边坡表面的水势梯度较陡，降雨入渗较快，但随



(a) T=38 min　(b) T=295 min　(c) T=306 min

(d) T=315 min　(e) T=330 min　(f) T=370 min

图 7　降雨过程中填方边坡裂缝演化特征

Fig. 7　Crack evolution characteristics of the fill slope during rainfall

注: 红色线代表裂缝; LF 代表裂缝名称; 橙色线代表冲沟边界。

着降雨的进行，雨水在填方边坡内部的影响区逐渐增大，水势梯度随之减小，基质吸力也不断降低，入渗速率也随之减慢。此外，降雨前期填方边坡处于非饱和状态，填方坡面不会产生坡面径流，全部入渗到填方体内，但随着雨水的入渗，土体逐渐达到饱和状态后，孔隙因存在许多气泡而减小过水断面，甚至堵塞细小流水通道致使水分运移减弱，基质吸力下降速率也随之减弱。最后随含水率增加，基质吸力降到最低并保持稳定，即稳定期。

当降雨进行到 295 min 时，坡脚出现鼓胀裂缝，形状呈“几”字型的裂缝 LF1，长 40 cm，如图 7(b)所示。但边坡变形量没有发生变化，只是在坡顶可见冲沟发育，表明此时边坡内部并未产生变形破坏，如图 8(a)所示。填方边坡前缘是雨水最集中的地方，加之受填方边坡坡顶冲沟影响，致使边坡前缘土体遇水软化。从含水率和基质吸力随降雨入渗变化(图 4、图 5)都可以看出，土体随含水率增大，基质吸力减小到接近最低值。基质吸力对非饱和土的抗剪强度有一定贡献，它的减小将导致抗剪强度降低，边坡前缘土体容易破坏。

2.3　边坡整体失稳破坏

裂缝发育初期，随着雨水持续入渗，含水率在不断增大的同时基质吸力减小，导致土体孔隙水压力增大，间接地使偏应力增加。虽然偏应力的增加会使应力路径有向破坏方向发展的趋势，但是由于裂缝排水条件较好，雨水主要以径流为主，入渗率减弱，不会在坡体内汇集产生局部饱水带，土体的孔隙水压力就不会快速上升致使非饱和土在较短时间内达到饱和状态，非饱和土体的有效应力也不会快速减小，应力路径达不到破坏线，填方边坡便不会发生整体破坏[24]，如图 7(c)所示。随着降雨的持续，冲沟和裂缝为雨水入渗提供优势通道，雨水能快速入渗到坡体内，致使坡体内的渗流场、变形场以及应力场发生改变。在 308 min 时，位于坡体 20 cm 深的 EC-5 含水率的监测数达到峰值 51.09%(图 4)，基质吸力除 MPS-5 外都已经达到最低值(图 5)，它的降低导致孔隙水压力增大，滑动面剪切力学性质劣化，塑性区逐渐贯通，最后边坡以冲沟和填方交界面为滑坡边界整体向临空面滑出，填方边坡整体失稳。此时边坡变形量突然变大，在边坡后缘滑塌区的变形量从 0 cm 骤增到 10 cm，边坡中前缘的堆积区的变形量也从 0 cm 骤增到 8 cm，如图 8(b)所示。变形量的突然增大表明填方边坡内部已经发生破坏，并且该破坏过程用时较短，边坡整体滑动有突发性的特征。边坡失稳后在左侧坡肩产生剪切裂缝 LF4 和 LF5，长度分别为 3 cm 和 4 cm，如图 8(d)所示。它的产生表明在此处剪切应力集中。并且边坡的变形范围和变形量都有进一步发展的趋势，如图 8(c)所示。

2.4　边坡块体分割及流滑破坏

边坡整体失稳后裂缝开始演化，并且有坡脚向坡顶发展的趋势，如图 7(e)所示。裂缝在静水压力和动水压力共同作用下朝着更宽更长的方向发展，且在边坡后缘产生张拉裂缝 LF14,张开度 2 cm，下错 3 cm，表明在此区域边坡拉应力集中。最后各裂缝延伸贯通并分割填方坡体，如图 7(f)所示，使边坡成块体状。随后雨水沿着裂缝向填方边坡内入渗，在边坡内出现暂态滞水，降低边坡内部土体的抗剪强度，随着雨水不断充填裂缝，产生顺坡向的扩张力，使裂缝不断增大，逐渐加剧填方边坡的变形破坏[25]。边坡滑塌区和堆积区的范围和变形量都在不断增加，表明边坡仍在持续滑动，如图 8(d)(e)所示。在 420 min 时填方边坡土体已呈泥流状态，在土-水协同作用下发生流滑破坏，滑体的运动距离更远、堆积区和滑塌区的变形量也达到最大，堆积的最大厚度达到 15 cm，滑塌区最大变形量有 17 cm，如图 8(f)所示。

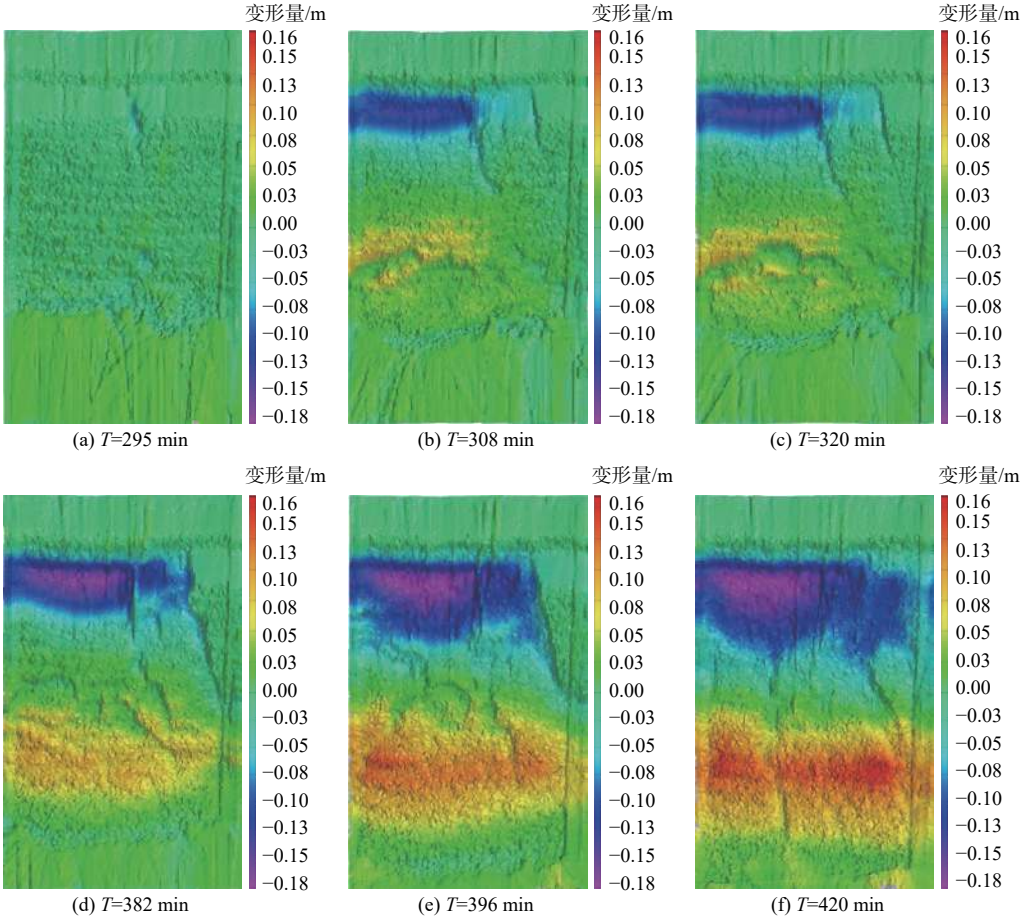


图 8　降雨入渗过程中填方边坡变形响应云图

Fig. 8　Cloud image of deformation response of the fill slope during rainfall infiltration

注：正值代表方向是垂直地面向上，表示坡脚堆积；负值代表方向是垂直地面向下，表示坡顶滑塌。

3　填方边坡土颗粒运移分析

试验结束后，分别从坡顶、坡中、坡脚和堆积体上采样进行颗分试验，得到不同位置处颗粒级配曲线。降雨过程中填方边坡土颗粒的运移如图 9 和表 8 所示。

随着降雨的持续，在填方坡面形成径流，地表水径流带着填方边坡后缘的细颗粒向前缘运移，在填方边坡前缘堆积，最后造成填方边坡后缘粗颗粒多，前缘细颗粒多的情形。坡顶的有效粒径 D_{10} 均大于坡中、坡脚和堆积体，颗粒大小从 0.012 mm 降低到 0.006 mm，说明土体颗粒在降雨过程中从坡顶向坡脚流失；控制粒径 D_{60}坡顶大于堆积体，颗粒大小从 0.040 mm 降低到 0.035 mm；坡顶的中值粒径 D_{30} 均大于坡中、坡脚和堆积体，颗粒大小从 0.025 mm 降低到 0.016 mm。

土颗粒运移对填方边坡变形破坏的影响主要有两方面：①填方边坡受降雨入渗和地表水的影响，后缘细小颗粒在降雨入渗和地表水径流过程中被带出，

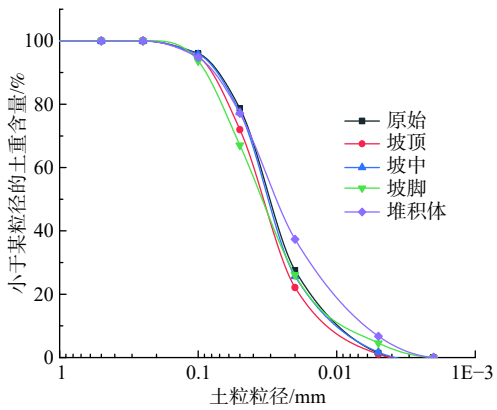


图 9　填方边坡不同位置处颗粒级配曲线

Fig. 9　Particle gradation curve at different positions of the fill slope

然后在坡脚堆积。细颗粒越多的边坡前缘渗透系数越小，雨水更容易在坡脚汇集，致使坡脚孔隙水压力增加，降低了土体的有效应力，导致土体的抗剪强度降低，进而影响填方坡体的变形破坏。②随着土颗粒的流失土体孔隙不断扩大，抗渗能力减弱，渗流速度

表 8　填方边坡不同位置处颗粒级配参数

Table 8　Gradation parameters of particles at different positions of the fill slope

取土位置	D_{10}/mm	D_{60}/mm	D_{30}/mm	C_c	C_u
原始	0.009	0.037	0.022	1.453	4.111
坡顶	0.012	0.040	0.025	1.302	3.333
坡中	0.010	0.038	0.023	1.392	3.800
坡脚	0.008	0.044	0.023	1.503	5.500
堆积体	0.006	0.035	0.016	1.219	5.833

随降雨的持续不断增大，土体颗粒将被水流持续带走，致使填方坡体局部坍塌破坏。

4　降雨诱发直线型黄土填方边坡变形破坏模式

降雨诱发直线型黄土填方边坡变形破坏模式如图 10 所示，可将其变形破坏模式分为三个阶段。

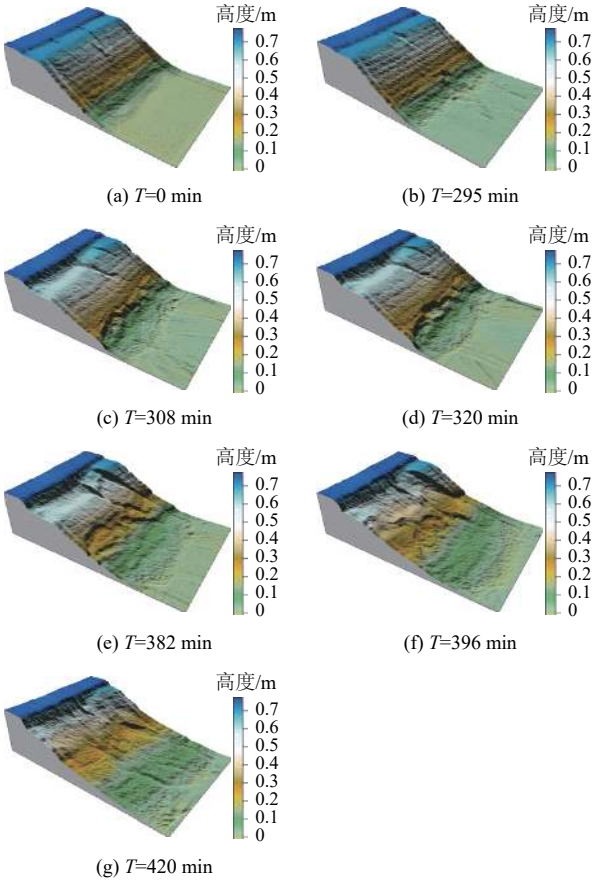


图 10　降雨过程中填方边坡变形破坏模式图

Fig. 10　Deformation and failure mode of the fill slope during rainfall

（1）坡顶冲沟破坏-坡脚软化阶段：降雨初期填方边坡入渗能力大于降雨强度，坡面无径流产生。随着降雨的持续，湿润区不断增大，雨水入渗能力减弱产生坡面径流，坡体表面细小颗粒被雨水带走，在坡顶逐渐形成细沟侵蚀。细沟长时间被雨水冲刷，形成冲沟破坏。填方边坡前缘是剪切应力集中区，加之填方边坡后缘侵蚀形成冲沟后，雨水在填方边坡前缘富集，土体湿润锋下移，含水率增加而基质吸力下降产生孔隙水压力，使土体抗剪强度降低，填方边坡前缘增湿软化，且逐渐向后缘发展，前缘逐渐形成临空面，如图 10(a)(b)所示。

（2）局部牵引坍塌-整体失稳阶段：在自重和降雨入渗的共同作用下，填方边坡前缘向临空面发展，形成局部的坍塌和剥落，如图 10(c)所示。体积含水率和基质吸力监测表明，土体从非饱和状态到饱和状态，滑面软化产生塑性变形，最终在填方边坡深部体积含水率到达峰值时，滑动面塑性区贯通，边坡沿着填方边坡交界面和冲沟边界向临空面整体滑动，在填方边坡前缘软化处滑出，如图 10(d)所示。

（3）块体分割-流滑破坏阶段：随着雨水的累积，在鼓胀裂缝、剪切裂缝和冲沟的共同作用下将填方边坡块体分割，如图 10(e)所示。裂缝和冲沟以及滑坡后壁为雨水提供了优势入渗通道，坡面径流转化成地下水径流，雨水在坡体内部富集，改变坡体内部的渗流场并产生渗透力。渗透力的产生改变了其应力环境，加之降雨的累积增加了土体重度，下滑力增大，这些因素共同作用下加速填方边坡变形破坏。最后边坡土体呈泥流状态，在雨水驱动下土体向填方边坡前缘运动，表现出流滑破坏，如图 10(f)(g)所示。

5　结论

（1）降雨条件下直线型黄土填方边坡裂缝演化特征为：填方边坡中前缘以鼓胀裂缝为主，后缘发育剪切裂缝和张拉裂缝，总体发展方向由边坡前缘向边坡后缘发展。裂缝的发育不仅为雨水入渗提供优势通道，还加剧填方边坡变形破坏。

（2）降雨形成的水动力驱使填方边坡细小颗粒由填方边坡后缘向前缘运移并在此堆积。细颗粒多的地方土体渗透性差，容易产生孔隙水压力，最后导致土体有效应力减小并降低土体抗剪强度，进而使填方边坡失稳破坏。

（3）在降雨作用下，直线型黄土填方边坡的变形破坏模式可分为三个阶段：坡顶冲沟破坏-坡脚软化阶段→局部牵引坍塌-整体失稳阶段→块体分割-流滑破坏阶段。

（4）原始边坡的雨水容易在填方边坡坡顶富集，

在侵蚀作用下坡顶形成冲沟破坏，冲沟的发育不仅改变坡体的水文力学特性，还是填方边坡整体滑动的边界。在实际工程中要做好坡顶排水措施，避免冲沟发育加剧填方边坡破坏。

参考文献（References）：

［1］ 张茂省，李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究［J］. 工程地质学报，2011，19(4)：530 − 540.［ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides［J］. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4)：530 − 540.（in Chinese with English abstract）］

［2］ 张茂省，胡炜，孙萍萍，等. 黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望［J］. 地球环境学报，2016，7(4)：323 − 334.［ZHANG Maosheng, HU Wei, SUN Pingping, et al. Advances and prospects of water sensitivity of loess and the induced loess landslides［J］. Journal of Earth Environment, 2016, 7(4)：323 − 334.（in Chinese with English abstract）］

［3］ 吴玮江，王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州：兰州大学出版社，2006.［WU Weijiang, WANG Nianqin. Landslide hazards in Gansu[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. (in Chinese)］

［4］ 朱晓霞，张力，杨树文. 降雨引发的兰州黄土滑坡时空规律分析和临界降雨量预测［J］. 中国地质灾害与防治学报，2019，30(4)：24 − 31.［ZHU Xiaoxia, ZHANG Li, YANG Shuwen. Characteristics of rainfall-induced loess landslides and their threshold rainfall in Lanzhou［J］. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(4)：24 − 31.（in Chinese with English abstract）］

［5］ 黄玉华，武文英，冯卫，等. 陕北延安“7.3暴雨”诱发地质灾害主要类型与特征［J］. 西北地质，2014，47(3)：140 − 146.［HUANG Yuhua, WU Wenying, FENG Wei, et al. Main types and characteristics of the geo-hazards triggered by heavy rain on July 3 in Yan'an, Shaanxi［J］. Northwestern Geology, 2014, 47(3)：140 − 146.（in Chinese with English abstract）］

［6］ 张硕，裴向军，黄润秋，等. 降雨诱发黄土高填方支挡边坡失稳机理研究［J］. 工程地质学报，2017，25(4)：1094 − 1104.［ZHANG Shuo, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Rainfall induced instability mechanism of high embankment retaining loess slope［J］. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4)：1094 − 1104.（in Chinese with English abstract）］

［7］ 宋焱勋，彭建兵，张骏. 黄土填方高边坡变形破坏机制分析［J］. 工程地质学报，2008，16(5)：620 − 624.［SONG Yanxun, PENG Jianbing, ZHANG Jun. Deformation mechanism of high loess embankment slope［J］. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5)：620 − 624.（in Chinese with English abstract）］

［8］ 张硕，裴向军，黄润秋，等. 黄土填方边坡降雨入渗特征及变形破坏模式的模型试验［J］. 中国公路学报，2019，32(9)：32 − 41.［ZHANG Shuo, PEI Xiangjun, HUANG Runqiu, et al. Model test on seepage characteristics and deformation failure modes of loess fill slope under rainfall［J］. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(9)：32 − 41.（in Chinese with English abstract）］

［9］ 高岳权. 黄土地区高填方路堤滑坡机理及控制措施研究［J］. 地下空间与工程学报，2016，12(增刊 1)：393 − 399.［GAO Yuequan. Study on the landslide mechanism and control measures of high embankment in loess area［J］. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(Sup 1)：393 − 399.（in Chinese with English abstract）］

［10］ 曹从伍，许强，亓星，等. 黄土填方边坡物理模拟过程中微结构变形破坏特征［J］. 科学技术与工程，2017，17(33)：225 − 231.［CAO Congwu, XU Qiang, QI Xing, et al. Research on the deformation and failure of microstructure during the physical simulation of loess landslides［J］. Science Technology and Engineering, 2017, 17(33)：225 − 231.（in Chinese with English abstract）］

［11］ 魏恺泓，裴向军，张世殊，等. 基于IBIS-L的某黄土高填方边坡支护结构变形特征［J］. 吉林大学学报(地球科学版)，2018，48(5)：1556 − 1565.［WEI Kaihong, PEI Xiangjun, ZHANG Shishu, et al. Deformation characteristics of loess high fill slope support structure based on IBIS-L［J］. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(5)：1556 − 1565.（in Chinese with English abstract）］

［12］ 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制［J］. 岩石力学与工程学报，2007，26(3)：433 − 454.［HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3)：433 − 454.（in Chinese with English abstract）］

［13］ 吴宏伟，陈守义，庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究［J］. 岩土力学，1999，20(1)：1 − 14.［Ng Wang-wai Charles, Chen Shou-yi, Pang Yue-wai. Parametric study of effects of rain infiltration on

unsaturated slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(1): 1 − 14. (in Chinese with English abstract)]

[14] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 降雨特性对土质边坡失稳的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 198 − 204. [LIN Hungchou, YU Yuzhen, LI Guangxin, et al. Influence of rainfall characteristics on soil slope failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 198 − 204. (in Chinese with English abstract)]

[15] WU L Z, ZHOU Y, SUN P, et al. Laboratory characterization of rainfall-induced loess slope failure[J]. CATENA, 2017, 150: 1 − 8.

[16] 周春梅, 王宇, 吕雷, 等. 雨滴溅蚀下压实黄土变形破坏规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 93 − 98. [ZHOU Chunmei, WANG Yu, LYU Lei, et al. Research on deformation of compacted loess under raindrop splash erosion[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(6): 93 − 98. (in Chinese with English abstract)]

[17] 周杨, 刘果果, 白兰英, 等. 降雨诱发黄土边坡失稳室内试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(6): 838 − 843. [ZHOU Yang, LIU Guoguo, BAI Lanying, et al. Model test study of loess slope instability induced by rainfall[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(6): 838 − 843. (in Chinese with English abstract)]

[18] 张钧, 梁为邦, 林红, 等. 二元结构库岸边坡失稳机制试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(3): 156 − 163. [ZHANG Jun, LIANG Weibang, LIN Hong, et al. An experimental study of the bank slope instability mechanism of dual structure reservoir[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(3): 156 − 163. (in Chinese with English abstract)]

[19] 罗浩, 霍宇翔, 巨能攀, 等. 弃渣场边坡的粒径分布特征及其失稳机制研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(1): 69 − 79. [LUO Hao, HUO Yuxiang, JU Nengpan, et al. A study of the particle size distribution characteristics and instability mechanism of the slope of an abandoned slag yard[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 69 − 79. (in Chinese with English abstract)]

[20] 李玉瑞, 程晓伟, 赖天文, 等. 延安北连接线黄土滑坡变形机制地质分析与模型试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 35 − 42. [LI Yurui, CHENG Xiaowei, LAI Tianwen, et al. Geological analysis and model test study on the deformation mechanism of loess landslide in the North connection line of Yan'an[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(2): 35 − 42. (in Chinese with English abstract)]

[21] ZHANG Shuo, ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, et al. Model test study on the hydrological mechanisms and early warning thresholds for loess fill slope failure induced by rainfall[J]. Engineering Geology, 2019, 258: 105135.

[22] 乔平定, 增钧. 黄土地区工程地质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990. [QIAO Pingding, LI Zengjun. Engineering Geology in Loess area [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990. (in Chinese)]

[23] 孙萍萍. 黄土水敏性与降雨诱发浅层黄土滑坡预测[D]. 西安: 西北大学, 2020. [SUN Pingping. Water sensitivity of loess and prediction of rainfall induced shallow loess landslides[D]. Xi'an: Northwest University, 2020. (in Chinese with English abstract)]

[24] 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 台缘裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 85 − 90. [Xu Ling, Dai Fuchu, A. K. L. KWONG, et al. Characteristics and forming mechanisms of the plateau-edge cracks and their significance to loess landslides[J]. Geological Review, 2009, 55(1): 85 − 90. (in Chinese with English abstract)]

[25] 吴火珍, 冯美果, 焦玉勇, 等. 降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 324 − 329. [WU Huozhen, FENG Meiguo, JIAO Yuyong, et al. Analysis of sliding mechanism of accumulation horizon landslide under rainfall condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup 1): 324 − 329. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华