第 58 卷 第 2 期 2025 年 (总 240 期)

Vol. 58 No. 2 2025(Sum240)



引文格式:王家政,辛鹏,曹生鸿,等.降雨诱发黄土滑坡-泥流的规律及阈值曲线研究[J].西北地质,2025,58(2): 102-110. DOI: 10.12401/j.nwg.2024120

Citation: WANG Jiazheng, XIN Peng, CAO Shenghong, et al. Study on Regularity and Threshold Curve of Rain-Induced Loess Landslide-Mudflow[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 102–110. DOI: 10.12401/j.nwg.2024120

降雨诱发黄土滑坡-泥流的规律及阈值曲线研究

王家政^{1,2},辛鹏^{2,*},曹生鸿³,李先臣¹,郭丹丹¹

(1. 邹城市住房和城乡建设局,山东 邹城 273500; 2. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;
3. 青海省环境地质勘查局,青海 西宁 810008)

摘 要:为研究降雨诱发黄土滑坡-泥流的规律,论文设计了6组室内模型试验,分析了降雨诱发 黄土滑坡-泥流的宏观变形过程、水文过程及位移变化规律,探讨了不同降雨强度、单次累计降雨 量及坡度对滑坡发展的影响,并建立了发生滑坡及泥流时的阈值曲线。研究表明:在极端降雨 条件下,黄土斜坡有滑动及滑动转流动两种破坏模式。当短时强降雨发生时,裂隙化斜坡内张 性结构面充水,滑面强度降低,滑体以块体形式滑动,整个滑动过程表现出在长期蠕动中叠加间 歇性加速滑动的特征,临界阈值曲线为:I=59D^{-0.67};当持续性降雨发生时,渐进滑动的斜坡体会出 现强裂隙化区域,此区域内孔隙水压力持续升高,富水斜坡体会液化流动,流动过程具有持续高 速流动的特征,临界阈值曲线为:E=200-2.5I。

关键词:降雨;黄土滑坡-泥流;模型试验;阈值曲线

中图分类号: P642.22; TU411

文章编号:1009-6248(2025)02-0102-09

Study on Regularity and Threshold Curve of Rain-Induced Loess Landslide-Mudflow

文献标志码:A

WANG Jiazheng^{1,2}, XIN Peng^{2,*}, CAO Shenghong³, LI Xianchen¹, GUO Dandan¹

 Zoucheng Bureau of Housing and Urban-Rural Development, Zoucheng, Shandong 273500, China;
Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
Qinghai Institute of Environmental Geology Survey, Xining, Qinghai 810008, China)

Abstract: In order to study the law of rain-induced loess landslide-mudflow, this paper designed six sets of laboratory model tests, analyzed the macroscopic deformation process, hydrological process and displacement change law of rain-induced loess landslide-mudflow, discussed the influence of different rainfall intensity, single cumulative rainfall and slope on landslide development, and established the threshold curve when landslide and mudflow occurred. The results show that there are two failure modes of loess slope under extreme rainfall conditions: sliding and sliding transflow. When short-term heavy rainfall occurs, the tensile structural surface of the fractured slope is filled with water, the strength of the sliding surface decreases, and the sliding body slides

收稿日期: 2024-04-24; 修回日期: 2024-12-06; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目:国家自然科学基金"水力作用下新近纪硬土/软岩质滑带结构重构的过程及效应(42077276)",中国地质调查局地 质调查项目"渭河中上游城镇地质灾害风险调查"(DD20190717)联合资助。

作者简介:王家政(1997-),男,硕士研究生,主要从事滑坡机制方面的研究。E-mail:x17806252143@163.com。

^{*}通讯作者:辛鹏(1984-),男,研究员,主要从事滑坡机制方面的研究。E-mail: xxiinnpp@126.com。

in the form of a block. The whole sliding process shows the characteristics of long-term creep superposition in-

termittent accelerated sliding, and the critical threshold curve is as follows: $I=59D^{-0.67}$. When continuous rainfall occurs, a strong fissure area will appear on the slope with progressive sliding, and pore water pressure in this area will continue to rise. The water-rich slope will experience liquefaction flow, which is characterized by continuous high speed. The critical threshold curve is E=200-2.5I.

Keywords: rainfall; loess landslide-mudflow; model test; threshold curve

在中国西北地区,降雨是诱发黄土滑坡的主要因 素之一(张茂省等, 2011; 辛鹏等, 2015)。为防灾减灾, 许多学者开展了对黄土滑坡类型及破坏机制的系统 研究(许领等, 2008; 李同录等, 2022)和易发性评价 (孟晓捷等, 2022, 2024; 张林梵, 2023; 付泉等, 2024)。 滑坡--泥流是其中常见的运动破坏形式(刘德仁等, 2017; 张琪等, 2024; 唐然等, 2024; 王豪等, 2024)。在 雨水作用下,滑坡-泥流的快速运动使土体由摩擦型 向粘性型转变,从而产生流态破坏过程,其流态变形 的临界条件可以用致滑层土体的临界含水率确定(贾 俊等,2019)。从滑动阶段到流动阶段的转变主要是 由于降雨过程中完全或部分不排水条件的发展造成 的,由不排水试验得到的破坏面和平面形状态边界面 所界定的区域被定义为饱和黄土的潜在不稳定区,当 土体状态位于潜在不稳定区域内时,液化就可能发生 (金艳丽等,2008)。而滑坡引起的泥流规模大小,主 要取决于滑体的厚度和滑坡速度对饱和黄土液化程 度的影响(王家鼎等, 1992)。模型试验及现场试验能 重现降雨诱发黄土滑坡的破坏过程(陈伟等, 2013; 武 彩萍等, 2013; 曾昌禄等, 2020; 孟振江等, 2022), 可以 对人工降雨条件下黄土滑坡形态变化及不同雨强条 件下降雨入渗特性进行研究。但目前尚缺少对不同 类型降雨及坡度诱发黄土滑坡-泥流过程的研究。

对于滑坡--泥流启动的研究是监测预警的核心内 容(唐亚明等,2013; 亓星等,2014)。一部分学者基于 黄土坡体内部参数的变化来预警,将土体饱和度和孔 隙水压力的临界值作为滑坡和泥流的启动判据(黄志 全等,2007; 陈海霞等,2013)。另一部分学者基于降 雨诱发滑坡的历史数据,通过分析已有的资料建立相 同或相似区域内诱发滑坡的降雨阈值模型(Fausto et al., 2008; 李明等,2010)。Peng等(2015)对连续强降 雨引发甘肃省天水地区大面积滑坡--泥流的形成及移 动特征进行了定量研究,量化了触发滑坡泥流的前期 有效雨量及临界雨强,并提出了流动阶段的峰值速度。 而 Wang 等(2021)通过多组离心模型试验,量化了降 雨入渗作用下导致非饱和边坡破坏的临界条件。Sun 等(2024)提出了基于支持向量机(SVM)的概率性降 雨阈值算法,用于量化降雨事件和滑坡发生之间的不 确定性,发现概率性阈值曲线能较全面地反映降雨与 滑坡之间的关系。以上分别研究了滑坡发生时坡体 内部参数及外部降雨条件的阈值,但未能建立发生不 同破坏模式时的降雨阈值曲线。

为研究降雨诱发黄土滑坡-泥流的滑流规律及阈 值曲线,文中设计了6组室内模型试验,分析了黄土 滑坡的宏观破坏过程、水文过程及位移变化规律,并 讨论了不同降雨强度、单次累计降雨量及坡度对破坏 启动时间及滑流转化过程的影响,最后通过分析模型 试验的结果来量化降雨入渗作用下滑坡-泥流滑流状 态的临界条件。

1 模型试验

1.1 试验设计

本试验目的是为了模拟降雨诱发秦岭山前陕西 宝鸡地区的黄土滑坡-泥流灾害,研究不同降雨强度、 单次累计降雨量及坡度条件下的变形破坏过程及破 坏机理,因此设计6组模型试验。为达到较好的入渗 效果,模拟极端降雨条件下斜坡的破坏模式,设计试 验工况如表1所示。由高清数码相机与摄像机精确 记录斜坡体在降雨条件下的变形破坏情况,在坡体内

表1 试验工况

Tab. 1 Test condition

试验	边坡	降雨	单次累计	初始	
编号	角度	强度(mm·h)	降雨量(mm)	孔隙比	
E1	30°	6.19	61.9	0.965	
E2	30°	5.04	80.71	0.983	
E3	60°	6.19	55.7	0.965	
E4	60°	5.04	80.71	0.983	
E5	60°	17.89	148.5	0.965	
E6	60°	16.12	145.1	0.983	

部埋设基质吸力传感器,分析降雨诱发黄土滑坡的水 文过程,在坡面布设位移监测点,研究滑坡位移规律, 综合试验结果探讨降雨强度、单次累计降雨量及坡度 对滑坡—泥流的影响,最后根据获得的滑坡失稳时的 数据点,提出新的阈值曲线,以期为黄土边坡监测预 警提供参考。

1.2 试验样品

本项试验用土取自陕西宝鸡某均质黄土斜坡,采

用联合液塑限仪、烘箱和重型击实等方法进行了有关 指标的测定,土的参数如表2所示。采集足量土样, 自然风干10~15天,然后对其进行粉碎(直径0.5 mm), 过筛。采用自动喷雾器配置土壤初始含水量,控制土 壤初始质量含水率(15%)。为保证模型土样填筑均匀, 则根据黄土干密度(1.44 g/cm³)每2 cm进行一轮击实, 然后再进行下一高度土样填充,整个土样击实过程中 均采用人工击实方法进行。

表	2	马	兰	黄	±	的	基	本	物	理	参	数	5
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Pasia physical parameters of Malan losss

	140.2	Dasie physical p	arameters of Warah loess	
液限(%)	塑限(%)	湿陷系数	初始质量含水率(%)	初始干密度(g/cm ³)
33.5	20.3	0.058	15	1 44

以陕西宝鸡地区某均质黄土斜坡为原型进行试 验模型设计。为降低制样难度,模型与原型的相似比 取值如下:初始干密度1:1;几何尺寸1:10;降雨及 相关物理量(降雨量、降雨历时、降雨强度、渗透系数、 渗流速度)1:1。

1.3 试验装置

本次试验场地位于长江水利委员会长江科学院, 实验装置由模型箱、降雨模拟器和监测系统等组成。

(1)模型箱:模型箱为一长方体,其尺寸为长

100 cm、宽 80 cm、高 100 cm,模型主体材料为 12 mm 厚钢板,但有一侧为 30 mm 厚度有机玻璃观测窗。右 侧为厚 10 cm、长 100 cm、高 100 cm 的排水槽,与模型 主体接触面采用多孔钢板(厚度为 12 mm)。模型上 方为自然边界,接受大气降雨。斜坡体未进行任何防 护处理措施,模拟自然降雨侵蚀-入渗现象。下边界和 左侧边界(斜坡潜在滑动方向定义为左侧边界)均为 自由排水边界,且两边界可各分别收集排水,右侧边 界为隔水边界。物理模型装置实物如图 1a 所示。



图1 物理模型装置和负压计埋设位置

Fig. 1 Buried location of physical model device and negative pressure gauge

(2)降雨模拟器:在模型正上方 50 cm 高度, 放置 一个降雨模拟器。该降雨模拟器尺寸为长 100 cm, 宽 80 cm, 高度 15 cm。降雨模拟器采用针头进行模拟。 在降雨模拟器底部均匀布置 320 个直径 0.5 mm 的医 用针头, 针头间距为 5 cm。通过控制降雨模拟器腔体 内水位模拟不同强度的降雨。在腔体中预设一系列 不同高度的溢流排水孔控制腔体内水位, 以保证试验 过程中获得稳定的降雨强度。为防止降雨模拟中针 头被降雨中杂质淤堵,则采用桶装纯净水进行降雨模 型试验。

(3)监测系统:主要包括水文监测和变形监测两部分,水文监测装置由采用水银式负压计系统动态监测土壤剖面负压,负压计埋设位置如图 1b、图 1c 所示, 变形监测装置由高清数码相机与摄像机精确记录斜 坡体在降雨条件下的滑动-流动情况,并在斜坡体上均 匀布置位移监测点。

1.4 试验流程

首先建立试验模型,同时埋设监测仪器。每组试 验开始前,先对基质吸力传感器分别进行标定,并将 填筑好的模型覆膜静置 24 h,待仪器读数稳定后开始 降雨试验。在降雨期间对典型试验现象及破坏时间 进行拍摄与记录,直至斜坡发生大规模破坏,详细降 雨方案见表 3。

降雨次数(次)	降雨持续时间(h)	总降雨量(mm)
9	10	557.1
9	16	726.39
9	9	501.3
5	16	403.55
2	8.3	297
4	9	580.4
	降雨次数(次) 9 9 9 5 2 4	降雨次数(次)降雨持续时间(h)9109169951628.349

表 3 降雨方案 Tab. 3 Rainfall scheme

2 试验结果

2.1 破坏模式

模型试验结果表明,黄土滑坡有滑动及滑动转流 动两种破坏模式。6组试验滑坡破坏模式如表4所示。 选取 E5 和 E1 两个模型试验来展现两种破坏模式的 基本特征。E5 试验在 60°斜坡 17.89 mm/h 的高雨强 条件下进行,E1 试验在 30°斜坡 6.19 mm/h 的低雨强 条件下进行。

表 4 模型试验破坏模式 Tab. 4 Failure mode of model test

试验编号	破坏模式	降雨强度(mm/h)
E1	滑动转流动	6.19
E2	未发生明显破坏	5.04
E3	滑动	6.19
E4	滑动转流动	5.04
E5	滑动	17.89
E6	滑动转流动	16.12

图 2 显示了 E5 试验的滑动破坏过程,由于坡度 较陡,当短时强降雨发生时,雨水一部分入渗坡体内 部,一部分形成坡面径流,径流的冲刷作用与强降雨 的侵蚀作用使冲刷区发生局部流土(图 2b),坡体在降 雨入渗下,含水量增大,表层土体水解软化、弱化,强 度迅速降低,导致内聚力和摩擦阻力逐步丧失,坡体 内部不断发生应力重分布,坡顶处产生数条拉张裂隙 (图 2c、图 2e),雨水沿拉张裂隙等优势通道入渗坡体, 裂隙化坡体内张性结构面水分汇聚,滑动面强度降低, 坡体内部滑动面贯通,滑体沿着滑动面以块体形式滑 动(图 2d、图 2f)。



a.初始状态; b.局部流土(第一次降雨 130 min); c.拉张裂隙(第一次降雨 200 min); d.局部滑动(第一次降雨 213 min); e.裂隙扩展
(第一次降雨 300 min); f.滑动破坏(第一次降雨 350 min)

图2 E5 试验滑动破坏过程 Fig. 2 Sliding failure process of E5 test

图 3 显示了 E1 试验的滑动转流动破坏过程,当 持续性降雨发生时,坡体在雨水侵蚀下发生蠕动,表 面产生数条拉张裂隙(图 3b),破坏从坡脚处的局部侵 蚀逐步扩展(图 3c),直至发生大范围的坡体滑动 (图 3d),渐进滑动的坡体会出现局部强裂隙化区域 (图 3e),此区域内水分入渗量高且易积水形成压力水 头加速水分入渗,使得孔隙水压力持续升高,强裂隙 化区域富水液化,出现塑性流动现象(图 3f)。

2.2 水文过程

以 E1 试验模型剖面 2 为例分析降雨入渗过程中 基质吸力变化情况。如图 4 所示,在降雨湿润锋迁移 过程中,位于坡体浅层的 2-1 传感器在降雨 150 min 后 最先对降雨产生响应,湿润锋土壤吸力下降显著。当 湿润锋到达 2-2 处时,湿润锋以上区域(如 2-1 传感器) 土壤吸力继续下降,但其下降幅度逐渐降低,第一次 降雨结束基质吸力稳定在 2.5 kPa。在第一次降雨停 止后,由于蒸发作用,浅层 2-1、2-2 处土壤吸力分别增 加约 10 kPa、9 kPa,但深部土壤水在总势能的控制作 用下,继续向下运动, 2-3 处土壤吸力持续减小。第二



a.初始状态; b.裂隙发育(第三次降雨 110 min); c.局部侵蚀(第四次降雨 150 min); d.渐进滑动(第五次降雨 300 min); e.强裂隙化区域(第五次降雨 490 min); f.流动破坏(第六次降雨 300 min)



Fig. 3 Failure process of sliding flow in E1 test



图4 E1 模型剖面 2 土壤基质吸力随时间变化关系曲线 Fig. 4 Relation curve of soil matric suction with time in E1 model section 2

次降雨开始后,由于降雨入渗补给,浅层土壤吸力继 续减小,而深部土壤水持续向下迁移导致土壤吸力减 小。直到整个湿润锋全部运移至模型底部后,深部土 壤的吸力变化规律基本上与表层土壤同步,即降雨期 间土壤吸力减小,降雨停止后吸力增加。降雨后期, 滑坡发生大规模破坏时,在滑坡影响区内的土体基质 吸力均在最低值。

2.3 滑坡位移变化特征

不同条件下滑坡位移变化特征不同,通过电脑解 析的位移观测点变化,得到滑坡破坏过程中的位移曲 线。图 5、图 6、图 7 分别为 E1、E3、E6 边坡破坏过程 中典型时刻坡面位移路径,不同条件下的位移图表现 出不同的时间尺度。



图5 E3 试验1号点位移随时间变化曲线





图6 E1 试验 4 号点位移随时间变化曲线









E3 试验发生的滑坡以块体形式滑动,在初次滑坡 过程中,靠近坡顶的土体变形最大,取位移标记点1 作为位移特征观测点。如图5所示,破坏初期滑体沿 剪切面整体滑动,并以稳定速率发生长时间的蠕动, 随后出现间歇性加速滑动现象,并在加速过程中不断 解体,整个滑动过程表现出在长期蠕动中叠加间歇性 加速滑动的特征。

E1、E6试验发生了滑坡及泥流现象,其运动特征 具有滑动及流动两个阶段。E1试验由坡脚逐渐向上 发生破坏,取位移监测点4作为位移特征观测点,如 图6所示,在滑动阶段,滑体滑动速度较慢,移动距离 较短,但滑动时间较长,随着土体的饱和以及含水率 的增大,滑体由滑动转为流动,流动过程具有速度快、 移动距离长的特点,滑转流的过程具有渐进性。取位 移监测点3作为E6试验滑坡位移特征观测点,如图7 所示,滑体首先发生长时间的蠕动,随后在极小的时 间尺度内发生短距离的加速滑动,加速滑动过程中块 体逐渐解体导致流动性增强,随后位移路径以指数方 式增加,滑转流的过程具有突发性。所以在水-土耦 合作用的初级滑动阶段,坡体呈现出小位移、低速滑 动特征,而在流动阶段则表现出高速流动的特征。

3 试验结果分析

在6个降雨诱发黄土滑坡的模型试验中,有5个 模型试验在降雨作用下发生了破坏。通过对高速摄 像机拍摄的图像进行分析,得出了发生滑动及流动破 坏的初始时间(图8)。

由图 8 可知, E1、E3、E4、E5、E6 的初始破坏时 间分别为 42 h, 30 h, 43 h, 8 h, 9 h。对比 E1、E3、E4 可 知, 在降雨强度较小时, 坡度对滑坡初始破坏时间的 影响较小; 对比 E3、E4、E5、E6 可知, 坡度相同时, 降 雨强度差别较大, 初始破坏时间差距较大。由此可以 发现, 相比坡度的增加, 降雨强度的显著增加更能促



图8 降雨期间滑动及流动破坏初始时间

Fig. 8 Initial time of sliding and flow failure during rainfall 进滑坡的发生。

除了降雨强度对初始破坏时间的影响外,单次累计降雨量对滑坡的破坏模式影响显著。通过对比 E3 和 E4 试验可以发现,E3 试验在单次累计降雨量为 55 mm 左右时滑坡未达到流动状态,而 E4 试验单次累计降雨量为 80 mm,在第五次降雨过程中滑坡由滑动转为流动,所以单次降雨量的显著增加能促进滑坡由滑动向流动的转变。

图 7 为 E4、E5 试验坡体破坏过程。通过观察 E5 试验发现,强降雨条件下,坡面后缘处的土体能在强 降雨的冲蚀下轻易沿剪切面滑移至坡脚 1(图 9a),破 坏面较深,坡体破坏面积较广,坡面滑体不易堆积 (图 9b)。而对于 E4 试验,由于降雨强度较小,使得部 分滑体在坡面沉积形成微型"堰塞塘"(图 9d),伴随 着雨水不断人渗,"堰塞塘"突然溃决流动至坡脚, 在较低降雨强度下,破坏面较浅,坡体破坏面积较小, 坡面滑体易堆积并容易发生溃决性破坏。



a. E5 初始滑动; b. E5 滑体滑落坡脚; c. E4 初始滑动; d. E4 滑体堆积坡面

图9 E5、E4 滑动转流动过程

Fig. 9 Sliding and transforming flow processes of E5 and E4

4 阈值曲线

雨强度与降雨历时的关系,建立了 ID 阈值模型,此模型被国内外学者用于建立针对不同区域降雨诱发滑坡的阈值曲线。ID 阈值曲线表达式为:

短时强降雨易引起浅层滑坡, Caine(1980)根据降

 $I = \alpha D^{-\beta} \tag{1}$

根据试验结果可以看出,黄土滑坡的流态化运动 和持续性降雨密切相关,前期有效降雨量越多,土体 含水量越大,发生黄土泥流的可能性越大,因此本文 采用有效前期降雨量(E)与降雨强度(I)的关系对黄 土泥流进行预警。由于诱发滑坡发生的降雨量并不 是完全由当天的降雨引起,所以要考虑滑坡发生前几 日的降雨量,但由于水分蒸发及入渗土壤更深层等原 因,前期降雨对诱发滑坡的作用随着天数的增多而降 低。因此,需要考虑前期有效降雨对滑坡的影响。利 用 Bruce 等(1969)提出的方程来估计有效的前期降雨 量,他们认为前期的有效降雨量通常是递减指数和时 间的函数:

$$R_e = \sum_{i=1}^n R_i K^i \tag{2}$$

式中: *R_e* 为滑坡或泥流发生前*i* 天的有效前期降雨, mm; *n* 为有效降雨天数; *K* 为递减指数; *R_i* 是事件发生前*i* 天的总降雨量, mm。

根据 Zhuang 等(2014)研究发现,由于蒸发、渗流 等因素,7天前的降雨量对黄土浅层区域的含水量没 有影响,因此,式(2)中n的上限为7。根据孙建中等 (2012)的研究发现,陕西黄土地区递减指数(K)采用 0.78。在试验的基础上,结合黄森(2021)收集的黄土 地区发生滑坡及泥流时的降水数据,提出了适用于陕 西宝鸡地区诱发黄土滑坡的阈值曲线:I=59D^{-0.67},其中, 5 mm/h≤I≤23 mm/h(图 10)。此外,相比滑坡的滑动 破坏模式,流动破坏模式产生的致灾性更强。因此, 笔者通过记录滑坡开始发生流动的时间,制作了陕西



图10 滑动阈值曲线 Fig. 10 Sliding threshold curve

宝鸡地区诱发黄土泥流的阈值曲线: E=200-2.5I, 其中, 5 mm/h≤I≤25 mm/h(图 11)。



Fig. 11 Mudflow threshold curve

5 结论

(1)降雨诱发黄土滑坡—泥流的破坏模式分为滑 动及滑动转流动两大类。当短时强降雨发生时,裂隙 化斜坡内张性结构面充水,滑面强度降低,滑体以块 体形式滑动;当持续降雨发生时,渐进滑动的斜坡体 会出现强裂隙化区域,孔隙水压力持续升高,富水斜 坡体会液化流动。

(2)滑坡滑动阶段表现出长期蠕动中叠加间歇性加速滑动的特征,流动阶段表现出持续高速流动的特征。低坡度低雨强的滑转流过程具有渐进性,而高坡度高雨强的滑转流过程具有突发性。

(3)陕西宝鸡地区降雨诱发黄土滑坡时的阈值 曲线: I=59D⁻⁰⁶⁷,及诱发黄土泥流的一级阈值曲线: E=200-2.51。

参考文献(References):

- 陈海霞, 王家鼎. 降雨影响黄土泥流起动的试验研究[J]. 西北 大学学报(自然科学版), 2013, 43(3): 447-450.
- CHEN Haixia, WANG Jiading. Experimental research about the rainfall's effects on mudflow initiation[J]. Journal of Northwest UniversityNatural Science Edition, 2013, 43(3): 447–450.
- 陈伟, 骆亚生, 武彩萍. 人工降雨作用下黄土边坡的室内模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(5): 100-104.
- CHEN Wei, LUO Yasheng, WU Caiping. The laboratory model test study of loess slope under the artificial rainfall[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(5): 100–104.

- 付泉,党光普,李致博,等.基于分形维数耦合支持向量机和熵 权模型的滑坡易发性研究[J].西北地质,2024,57(6): 255-267.
- FU Quan, DANG Guangpu, LI Zhibo, et al. Study of Landslide Susceptibility Mapping Based on Fractal Dimension Integrating Support Vector Machine with Index of Entropy Model[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 255–267.
- 黄森.天水市"7.25"群发性降雨滑坡灾害预警模型研究 [D]. 西安:西北大学, 2021.
- HUANG Sen. Study on the early warning model of "7.25" mass rainfall landslide disaster in Tianshui City[D]. Xi'an:Northwest University, 2021.
- 黄志全,何鹏.用有效降雨量监测黄土边坡稳定性的研究[J]. 华北水利水电学院学报,2007,28(6):53-55.
- HUANG Zhiquan, HE Peng. Research of slope stability on effective rainfall[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2007, 28(6); 53–55.
- 贾俊,张茂省,冯立,等.流态破坏型黄土滑坡滑带土临界特征[J].西北地质,2019,52(2):136-147.
- JIA Jun, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Critical characteristics of slip zone soil in loess landslide with flow failure pattern[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(2): 136–147.
- 金艳丽, 戴福初. 饱和黄土的静态液化特性试验研究[J]. 岩土 力学, 2008, 29(12): 3293-3298.
- JIN Yanli, DAI Fuchu. Experimental investigation of static liquefaction of saturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3293–3298.
- 李明,高维英,杜继稳.陕西黄土高原诱发地质灾害降雨临界值研究[J].陕西气象,2010,(5):1-5.
- LI Ming, GAO Weiying, DU Jiwen. Study on the critical value of rainfall induced geological disasters in Loess Plateau of Shaanxi Province[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2010,(5): 1–5.
- 李同录,李颖喆,赵丹旗,等.对水致黄土斜坡破坏模式及稳定 性分析原则的思考[J].中国地质灾害与防治学报,2022, 33(2):25-32.
- LI Tonglu, LI Yingzhe, ZHAO Danqi, et al. Thoughts on modes of loess slope failure triggered by water infiltration and the principals for stability analysis[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 25–32.
- 刘德仁,张文清,黄新智,等.非饱和黄土边坡水热变化过程室 内模型试验研究[J].岩土力学,2017,38(S2):236-240.
- LIU Deren, ZHANG Wenqing, HUANG Xinzhi, et al. Laboratory model test on water and heat variation process of unsaturated loess slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S2): 236– 240.

孟振江,张凡,彭建兵,等.预设节理条件下降雨型黄土滑坡模

型试验研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1528-1537.

- MENG Zhenjiang, ZHANG Fan, PENG Jianbing, et al. Model test research on rainfall-type loess landslide under preset joint conditions.[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1528–1537.
- 亓星, 许强, 孙亮, 等. 降雨型黄土滑坡预警研究现状综述[J]. 地质科技情报, 2014, 33(6): 219-225.
- QI Xing, XU Qiang, SUN Liang, et al. Research overview on early warning of precipitation-induced loess landslides[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(6): 219– 225.
- 孟晓捷,郭小鹏,薛强,等.黄土地质灾害评价因子地形起伏度 提取最佳尺度研究:以榆林市米脂县为例[J].西北地质, 2024,57(6):234-243.
- MENG Xiaojie, GUO Xiaopeng, XUE Qiang, et al. Research on Optimal Scale for Extraction of Relief Amplitude in Loess Geological Hazards Assessment Factors: a Case Study of Mizhi County, Yulin City[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 234–243.
- 孙建中,王兰民,门玉明,等.黄土学(第3册)[M].香港:香港考 古学会,2012.
- SUN Jianzhong, WANG Lanmin, MEN Yuming, et al. Loessology (Vol. 3)[M]. Hongkong: Hongkong Archaeological Society, 2012.
- 孟晓捷,张新社,曾庆铭,等.基于加权信息量法的黄土滑坡易 发性评价——以1:5万天水市麦积幅为例[J].西北地质, 2022,55(2):249-259.
- MENG Xiaojie, ZHANG Xinshe, ZENG Qingming, et al. The Susceptibility Evaluation of Loess Landslide Based on Weighted Information Value Method: Taking 1: 50 000 Map of Maiji District of Tianshui City As an Example[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 249–259.
- 唐亚明, 薛强, 毕俊擘, 等. 降雨入渗诱发黄土滑塌的模式及临 界值初探[J]. 地质论评, 2013, 59(1): 97-106.
- TANG Yaming, XUE Qiang, BI Junbo, et al. Preliminary study on loess landslide rainfall triggering modes and thresholds[J]. Geological Review, 2013, 59(1): 97–106.
- 唐然,任穗川,范宣梅,等.大型红层缓倾岩层滑坡形成机制——以川北断渠滑坡为例[J].成都理工大学学报(自然科学版),2024,51(4):673-686.
- TANG Ran, REN Suichuan, FAN Xuanmei, et al. Formation mechanism of large-scale red bed gently inclined strata landslide: Taking Duangu landslide in north Sichuan as an example[J].Journal of Chengdu University of Technology (Science &Technology Edition), 2024, 51(4): 673–686.
- 王家鼎.高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化[J]. 地质论评, 1992, 38(6): 532-539.

- WANG Jiading. A mechanism of high-speed loess landslides-saturated loess creeping liquefaction[J]. Geological Review, 1992, 38(6): 532–539.
- 王豪,何朝阳,巨能攀,等.多设备多参数联动的滑坡预警方法 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2024,51(6): 1057-1069.
- WANG Hao, HE Chaoyang, JU Nengpan, et al. A linked multidevice and multi parameter landslide early warning method[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science &Technology Edition), 2024, 51(6): 1057–1069.
- 武彩萍,骆亚生,陈伟,等.降雨对黄土裸坡坡面形态影响的室 内模型试验[J].水土保持通报,2013,33(1):115-119.
- WU Caiping, LUO Yasheng, CHEN Wei, et al. Indoor model experiment for rainfall effects on bare loess slope shape [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1): 115–119.
- 辛鹏, 吴树仁, 石菊松, 等. 降雨诱发浅层黄土泥流的研究进展、 存在问题与对策思考[J]. 地质论评, 2015, 61(3): 485-493.
- XIN Peng, WU Shuren, SHI Jusong, et al. Comment on the progress in, problems and countermeasure on mudflow induced by rainfall[J]. Geological Review, 2015, 61(3): 485–493.
- 许领,戴福初,闵弘.黄土滑坡研究现状与设想[J].地球科学进展,2008,23(3):236-242.
- XU Ling, DAI Fuchu, MIN Hong. Research progress and some thoughts on loess landslides[J]. Advance in Earth Sciences, 2008, 23(3); 236–242.
- 张林梵. 基于时序 InSAR 的黄土滑坡隐患早期识别—以白鹿塬 西南区为例[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 250-257.
- ZHANG Linfan. Early Identification of Hidden Dangers of Loess Landslide Based on Time Series InSAR: A Case Study of Southwest Bailuyuan[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 250–257.
- 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.

- 张琪, 巨能攀, 张成强, 等. 库水位变化时陡倾软弱顺层岩质滑 坡变形机制[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2023, 50(2): 206-217.
- ZHANG Qi, JU Nengpan, ZHANG Chengqiang, et al. Landslide deformation mechanism of steep weak bedding rock under the variation of reservoir water level[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science &Technology Edition), 2023, 50(2): 206–217.
- 曾昌禄,李荣建,关晓迪,等.不同雨强条件下黄土边坡降雨入 渗特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(S1): 111-115.
- ZENG Changlu, LI Rongjian, GUAN Xiaodi, et al. Experimental study on rainfall infiltration characteristics of loess slopes under different rainfall intensities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S1): 111–115.
- Bruce J P, Clark R H. Introduction to Hydrometeorology[M]. London: Pergamon Press, 1969.
- Fausto, Guzzetti, Silvia, et al. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update[J]. Landslides, 2008, 5(1); 3–17.
- Caine N. The Rainfall Intensity-Duration Control of ShallowLandslides and Debris Flows[J]. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 1980, 62: 1–2, 23–27.
- Peng J B, Fan Z J, Wu D Z, et al. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China [J]. Engineering Geology, 2015, 186(Null).
- Sun Y, Zhang J, Wang H A, et al. Probabilistic thresholds for regional rainfall induced landslides[J]. Computers and geotechnics, 2024, 166(Feb.): 106040.1–106040.9.
- Wang S, Gregor I, Wu W. Centrifuge modelling of rainfall-induced slope failure in variably saturated soil[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(9): 2899–2916.
- Zhuang J Q, Iqbal J, Peng J B, et al. Probability prediction model for landslide occurrences in Xi'an, Shaanxi Province, China[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(2): 345–359.