



## 降雨诱发的浅表堆积层滑坡成因机理与稳定性预测模型

刘佳意, 陈春利, 付昱凯, 王晨兴, 李同录, 肖锐铧, 刘艳辉

### Mechanism of rainfall-induced shallow landslide and stability prediction model

LIU Jiayi, CHEN Chunli, FU Yukai, WANG Chenxing, LI Tonglu, XIAO Ruihua, and LIU Yanhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306051>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 湘西陈溪峪滑坡变形机理及稳定性评价

A study of deformation mechanism and stability evaluation of the Chenxiyu landslide in western Hunan

刘磊, 徐勇, 李远耀, 连志鹏, 王宁涛, 董仲岳 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 21–21

#### 舟曲江顶崖滑坡的早期判识及风险评估研究

A study of the early identification and risk assessment of the Jiangdingya landslide in Zhouqu county

韩旭东, 付杰, 李严严, 王高峰, 曹琛 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 180–186

#### 考虑非饱和土基质吸力的丁家坡滑坡变形机制及稳定性评价

Deformation mechanism and stability evaluation of Dingjiapo landslide considering the matric suction of unsaturated soil

石爱红, 李国庆, 丁德民, 苑权坤 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 141–151

#### 基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析

Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV

张欢, 巨能攀, 陆渊, 万勋, 蹇志权 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 171–179

#### 基于逻辑回归的四川青川县区域滑坡灾害预警模型

A early warning model of regional landslide in Qingchuan County, Sichuan Province based on logistic regression

方然可, 刘艳辉, 苏永超, 黄志全 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 181–187

#### 基于动态残余强度的不同含水率条件下滑坡稳定性研究

Research on landslide stability under different water content conditions based on the dynamic residual strength

魏占玺, 谢东武, 毋远召, 马文礼, 李元, 李万花 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 126–136



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306051](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306051)

刘佳意, 陈春利, 付昱凯, 等. 降雨诱发的浅表堆积层滑坡成因机理与稳定性预测模型 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(2): 183-191.

LIU Jiayi, CHEN Chunli, FU Yukai, et al. Mechanism of rainfall-induced shallow landslide and stability prediction model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 183-191.

## 降雨诱发的浅表堆积层滑坡成因机理与 稳定性预测模型

刘佳意<sup>1,2</sup>, 陈春利<sup>3</sup>, 付昱凯<sup>1,2</sup>, 王晨兴<sup>1</sup>, 李同录<sup>1,2</sup>, 肖锐铧<sup>3</sup>, 刘艳辉<sup>3</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 黄土高原水循环与地质环境野外科学  
观测研究站, 甘肃 正宁 745399; 3. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术  
指导中心), 北京 100081)

**摘要:** 强降雨引起的滑坡多以浅表堆积层滑移为主, 易群发、危害性大, 其地下水和土体内部含水率对降雨的水文响应机制复杂, 难以精准开展稳定性预测。为研究降雨引起的滑坡水文响应对稳定性的影响, 以四川省青川县后山里滑坡为例, 开展现场降雨入渗监测、相关性分析和力学分析。通过连续3年的降雨量、土体水分和地下水位等监测, 分析降雨入渗-土体体积含水率-地下水位的响应规律, 得到降雨量与地下水位的相关关系, 并基于无限斜坡稳定性计算公式构建基于降雨量和地下水位埋深的浅层滑坡稳定性预测模型。结果表明: (1)年内地下水呈周期性波动, 分为缓慢下降期、快速下降期和快速上升期三个阶段, 且降雨量与地下水埋深呈线性负相关, 与水位升幅相关性不显著; (2)根据稳定性预测模型确定了该滑坡失稳的临界降雨阈值为81.8 mm/d, 地下水埋深阈值为0.73 m。研究结果可为降雨诱发浅表堆积层滑坡的预警预报提供参考。

**关键词:** 堆积层滑坡; 降雨量; 地下水位; 滑坡稳定性; 预警

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)02-0183-09

## Mechanism of rainfall-induced shallow landslide and stability prediction model

LIU Jiayi<sup>1,2</sup>, CHEN Chunli<sup>3</sup>, FU Yukai<sup>1,2</sup>, WANG Chenxing<sup>1</sup>, LI Tonglu<sup>1,2</sup>, XIAO Ruihua<sup>3</sup>, LIU Yanhui<sup>3</sup>

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Observation and Research Station of Water Cycle and Geological Environment for the Chinese Loess

Plateau, Ministry of Education, Zhengning, Gansu 745399, China; 3. China Institute of Geo-Environment

Monitoring(Guide Center of Prevention Technology for Geo-hazards, MNR), Beijing 100081, China)

**Abstract:** The rainfall-induced shallow landslides are primarily debris landslides, which features simultaneity with significant hazard, and the hydrological response mechanism of water table and soil moisture content to precipitation of this type of landslide is sophisticated, which makes it difficult to predict the slope stability

收稿日期: 2023-06-28; 修訂日期: 2023-10-13

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0111900); 国家自然科学基金项目(42207213); 陕西省自然科学基础研究计划项目(2022JM-167)

第一作者: 刘佳意(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: [652042569@qq.com](mailto:652042569@qq.com)

通讯作者: 陈春利(1987—), 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: [jeychenchunli@mail.cgs.gov.cn](mailto:jeychenchunli@mail.cgs.gov.cn)

accurately. To further study the influence of the rainfall-triggered internal hydrological responses on slope-stability, on-site precipitation infiltration monitoring, correlation analysis and mechanical analysis were carried out on the Houshanli landslide in Qingchuan County, Sichuan Province. The relationship between precipitation and water table was proposed based on climate and hydrological monitoring data obtained within three year interval. The response of rainfall infiltration, soil volumetric water content and water table were analyzed. The results indicate that: (1) groundwater exhibits periodic fluctuations throughout the year, characterized by three phases of slow decline, rapid decline, and rapid ascent; a linear negative correlation between precipitation and water table was found, and no significant correlation was observed with the water table increment; (2) through the infinite slope model and the relationship between precipitation and water table, a prediction model for shallow landslide stability was constructed. The precipitation threshold (81.8 mm/d) and water table threshold (0.73 m) were determined which has good agreement with the actual situations. This provides an early warning method for rainfall-induced shallow landslides by monitoring these two factors.

**Keywords:** debris landslide; precipitation; water table; landslide stability; early warning

降雨型滑坡以浅表堆积层滑移为主,我国这类滑坡主要发生在东南丘陵、西南高山峡谷和西北黄土高原等地区,在区域强降雨作用下常集群爆发,危害严重<sup>[1~3]</sup>。据全国地质灾害通报统计,2018—2022年全国共发生27 419起地质灾害,造成625人死亡,240人受伤,经济损失达到139.6亿元,其中滑坡灾害数量占我国地质灾害总数的61.69%,90%的滑坡与降雨直接或间接相关<sup>[4~5]</sup>。研究降雨引发的浅层滑坡灾害成因机理与分布规律,开展稳定性分析与预报预警,对防范降雨型浅表层滑坡灾害具有重要的意义<sup>[6~8]</sup>。

目前,对降雨浅层滑坡的研究集中在降雨入渗规律和滑坡稳定性评价方面,取得了一些共性的认识。Wang等<sup>[9]</sup>根据陕北延安地区的黄土滑坡和黄土流滑坡的野外调查发现,随着降雨入渗的进行,土体体积含水率和孔隙压力增加导致滑坡发生;Wei等<sup>[10]</sup>基于Horton方程推导了入渗速率与土体含水率的关系式,以此研究入渗速率与土体含水率的关系,结果表明入渗速率主要受土体初始含水率的影响,且入渗速率随土体含水率降低越快,入渗过程中“相对稳定入渗率”越低;王高峰等<sup>[11]</sup>以甘肃省白龙江流域的泻流坡滑坡为例,研究发现滑坡的多次滑动变形受降雨影响且对降雨的响应表现出明显的滞后性。基岩山区的降雨滑坡多为基岩面以上的堆积层沿基岩面的滑移,是由降雨入渗引起的地下水位抬升,孔隙水压力增高所致,因此降雨入渗规律成为研究降雨型滑坡的前提。

降雨从地表到地下水位是一个非饱和入渗过程,Richards方程是非饱和渗流的一般控制方程<sup>[12]</sup>,用于

斜坡入渗时,许多学者对其做了概化,因此产生了Green-Ampt<sup>[13~15]</sup>、Philip<sup>[16~17]</sup>、Mein-Larson<sup>[18~19]</sup>、Kostiakov<sup>[20]</sup>和Horton<sup>[21~22]</sup>等经典入渗模型。降雨型滑坡稳定性分析主要是基于无限边坡模型,利用建立在湿润锋深度下移条件下的Green-Ampt、Mein-Larson和Horton等<sup>[12~22]</sup>半经验入渗模型与无限边坡模型相结合计算滑坡稳定性。这些模型并未考虑降雨入渗过程中降雨强度非均匀性,一些学者在此基础上进行了拓展和完善。蔡征龙等<sup>[23]</sup>基于改进的Green-Ampt入渗模型,考虑不同降雨条件下土体初始含水率空间非均匀性,指出初始含水率的分布情况对滑坡稳定性有显著影响,指数分布最为稳定;李强等<sup>[24]</sup>提出改进的Green-Ampt入渗模型,考虑了土体含水率剖面分布形状和非饱和浸润区等效参数,消除了饱和区厚度和浸润区厚度的关系假设,提高了模型的精度和适用性;郭智辉等<sup>[25]</sup>通过对东南沿海台风暴雨区滑坡监测,分析了降雨入渗时空变化规律,考虑土体初始含水率的非均匀性和斜坡倾角对入渗模型进行了改进。这些研究将入渗模型推广到短时强降水、长历时弱降水条件及非均质土入渗过程,得到了广泛应用。目前的稳定性分析模型只考虑了降雨入渗湿润锋以上斜坡土体的稳定性,未考虑地表入渗对地下水的影响及地下水引起的斜坡稳定性变化。

我国西南山区是滑坡灾害高发区域,降雨诱发的浅表堆积层滑坡多发<sup>[26]</sup>。选取四川省青川县后山里滑坡设立监测点,自2019年起开展斜坡降雨入渗监测,通过降雨量、土体水分和地下水位等现场监测,建立了降雨量-地下水位的定量关系,结合无限边坡稳定性

计算公式,构建基于降雨量-地下水位的滑坡稳定性预测模型,为该滑坡实时预警提供依据。

## 1 现场监测

### 1.1 后山里滑坡概况

后山里滑坡位于四川省广元市青川县乐安寺乡通坝村。青川县为侵蚀中低山地貌,亚热带季风湿润性气候,雨量充沛,年均降雨量1021 mm,季节分配不均,冬欠夏丰,降雨过程具有长持时、高强度的特点,暴雨是诱发滑坡、泥石流等地质灾害的主要因素。

后山里滑坡周界清楚,后缘及侧缘基岩裸露,坡脚至一级阶地后缘,平面形态似一矩形。滑坡斜长约830 m,宽度约350 m,面积为 $21 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。滑体平均厚度约8 m,下部6~10 m,上部3~6 m,滑坡体积为 $168 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。前、后缘高程分别为701 m和935 m,高差为226 m,平均坡度约18°,主滑方向为269°(图1)。滑坡区上部松散层为全新统碎石土( $Q_h^d$ ),下部基岩为震旦系胡家寨组( $Zh$ )绢云母千枚岩,滑面则位于岩土分界处,属于浅表层滑坡。

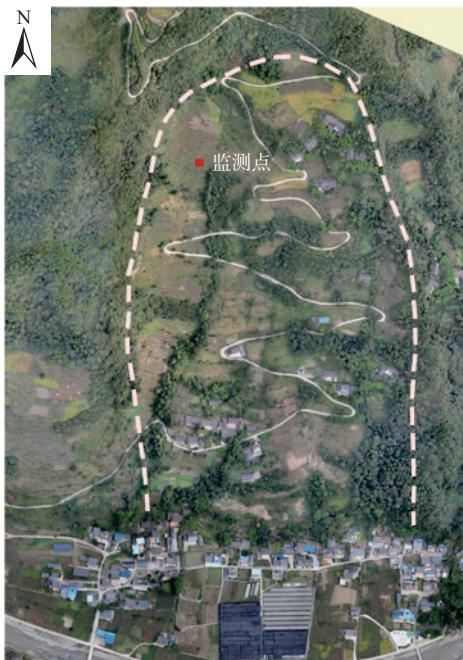


图1 四川青川后山里滑坡

Fig. 1 Houshanli landslide in Qingchuan County, Sichuan Province

自2008年以来,后山里滑坡在每年汛期间续发生不同规模的局部下错垮塌,部分区域出现明显的位移,直接威胁到坡脚位置处的居民区共43户171人的生命安全。当地自然资源部门于2019年对该滑坡的下部采用抗滑桩进行了治理,治理后的部分已经稳

定,解除了对下部居民区的直接威胁。由于滑坡厚度小而面积大,其上部仍然有潜在滑移的可能性。因此选择该滑坡上部继续进行监测,探索降雨诱发浅层滑坡的机理,并建立稳定性预测模型。

### 1.2 监测点概况

监测点位于变形较为强烈的滑坡西侧上部区域(图1),监测点位置处滑体厚5.8 m,常水位深2.0 m左右。现场人工开挖深5.8 m,口径1 m×1 m的方形监测井,开挖过程中从上往下间隔0.2 m依次固定直径50 mm的PVC管作为土壤温湿度计安装孔,并浇筑混凝土护壁,井深5.8 m处揭露到基面,停止开挖,在井壁固定一PVC管,上至井口,下至井底,用于监测地下水位。

土壤温湿度计采用YTDX0102型TDR电压传感器,精度为±2%;水位计采用YT-YL-0301型高精度压方式传感器,精度±0.1% FS;雨量计采用YT-FD-0100型翻斗式雨量计,分辨率为0.1 mm,降雨强度测量范围为0.01~4 mm/min,布设于地表以上2 m处,如图2所示。

在开挖监测井过程中,对滑体土取样进行了物理指标测试,测得滑体土的土粒比重2.71,天然密度和干密度分别为1.97 g/cm<sup>3</sup>和1.58 g/cm<sup>3</sup>,天然含水率24.3%,饱和度92.8%,孔隙比0.71,计算得出饱和密度为2.0 g/cm<sup>3</sup>。利用筛分法测量埋深1.0 m处土样粒径分布如图3所示,可以看出粒径大于2 mm的角砾含量占总质量的71.6%,砂粒(0.075~2.0 mm)占26.5%,黏粒含量仅占1.9%,滑体为碎石土。现场双环渗水试验测得饱和渗透系数为 $2.79 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ,大型直剪试验测得碎石土的饱和黏聚力为0 kPa,饱和内摩擦角为30°。

## 2 监测结果分析

已获得2020年1月—2022年12月共3个完整的水文年的监测数据,包括降雨量、土体含水率、地下水位等参数。

### 2.1 降雨-土体含水率-地下水位总体趋势分析

监测期间的降雨量、土体含水率及地下水位随时间的变化如图4所示。从地下水位长期变化趋势来看存在周年变化规律。一个年周期大致分为缓慢下降期、快速下降期和快速上升期3阶段。缓慢下降期时间段为当年10月初到次年3月底4月初,降雨量不大于6 mm/d,地下水位缓慢下降,波动较小,地下水埋深在2.0 m左右变化;快速下降期为4—7月,地下水



图2 后山里滑坡监测现场布置

Fig. 2 Monitoring site of the Houshanli landslide

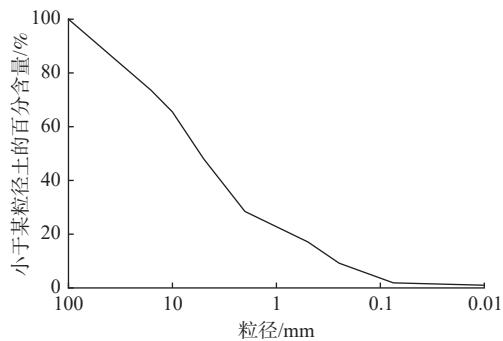


图3 粒径级配曲线

Fig. 3 Particle size distribution curve

位迅速降低,最低水位埋深不超过4 m;上升期为7月至10月初,降雨量大且频率高,地下水位随一次次降雨过程大幅上升,整体呈锯齿状逐级上升,此阶段地下水埋深较浅,地下水位上升对降雨产生响应的最低降雨量阈值为12 mm/d(2022年8月26日、2021年8月19日和2020年7月30日降雨引起水位响应,当日降雨量分别为12.0, 12.7, 13.4 mm/d),地下水位短期内迅速抬升的最低阈值为32 mm/d(2022年7月14日、2021年9月25日和2020年8月30日降雨引起水位迅速抬升,当日降雨量分别为50.4, 32, 44.1 mm/d)。

从剖面分析,浅层土的含水率对降雨强度的变化响应敏感。但不同阶段土体水分对降雨响应的敏感性是不同的。10月至次年6月末、7月初水位下降阶段,当降雨量不超过65 mm/d时,浅层土(0.2~0.8 m)的含水率上升幅度微小,偶尔有单次降雨引起含水率增加,且随着深度增加波动逐渐减弱,其响应时间随

深度增加有滞后。此时的地下水位仅有趋势性变化,对降雨没有明显的响应,这说明降雨量较小时,降水被浅层土吸收。

在6月末至10月初强降雨阶段,土体含水率对降雨响应强烈,随降雨入渗快速增加,雨停后又缓慢下降。土体含水率波动幅度随深度减弱,若长时间无降雨或少降雨时,含水率降至一个相对稳定值。此阶段地下水也有剧烈响应。在没有降雨时,地下水呈趋势性下降,强降雨时,水位在短期内大幅度抬升;降雨停止后,地下水位随即下降,但下降速率比上升速率小。地下水位上升幅度越大,其下降速度也越快。

## 2.2 典型降雨事件分析

选取6次典型降雨事件分析降雨强度与地下水位的关系(图5),可以看出,单次降雨时间集中且强度大可引起地下水位快速上升,降雨强度减小或降雨停止时,水位开始下降,下降速率小于上升速率。当降雨量相同时,降雨强度越集中,水位升幅也越大。整体来讲,地下水位抬升时间滞后于降雨序列,滞后降雨强度峰值时间约2~18 h。同时,地下水位升幅不仅与降雨强度相关,还取决于降雨前期地下水位,当前期地下水位越低,降雨强度越大,水位升幅也越大。

## 3 降雨量与地下水位相关性分析

以上分析表明,每年7—8月的降雨集中期,地下水对降雨有显著的响应,地下水位与降雨量有密切的相关性。降雨集中期地下水位快速上升,对滑坡稳定性最为不利;而其他时期地下水位缓慢下降或快速下

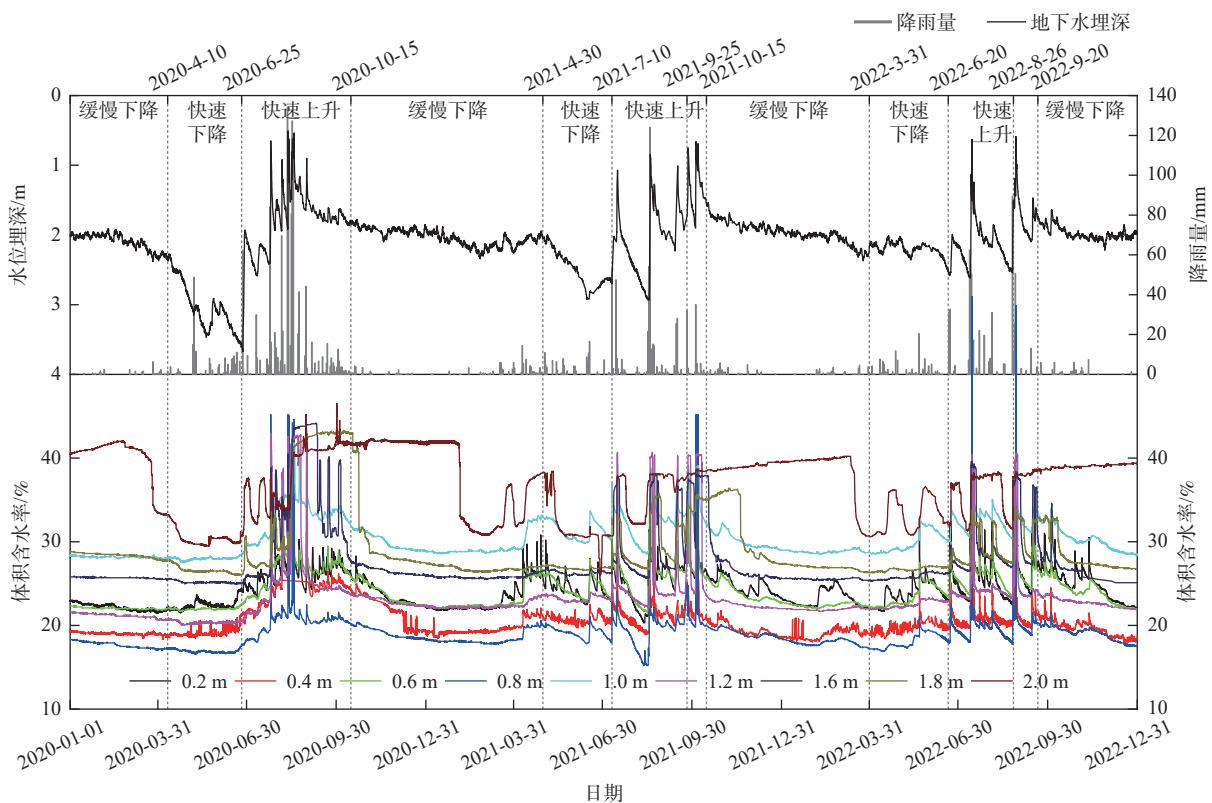


图4 降雨-土体体积含水率-地下水位的对应关系

Fig. 4 Corresponding relationships among rainfall, volumetric water content and water level

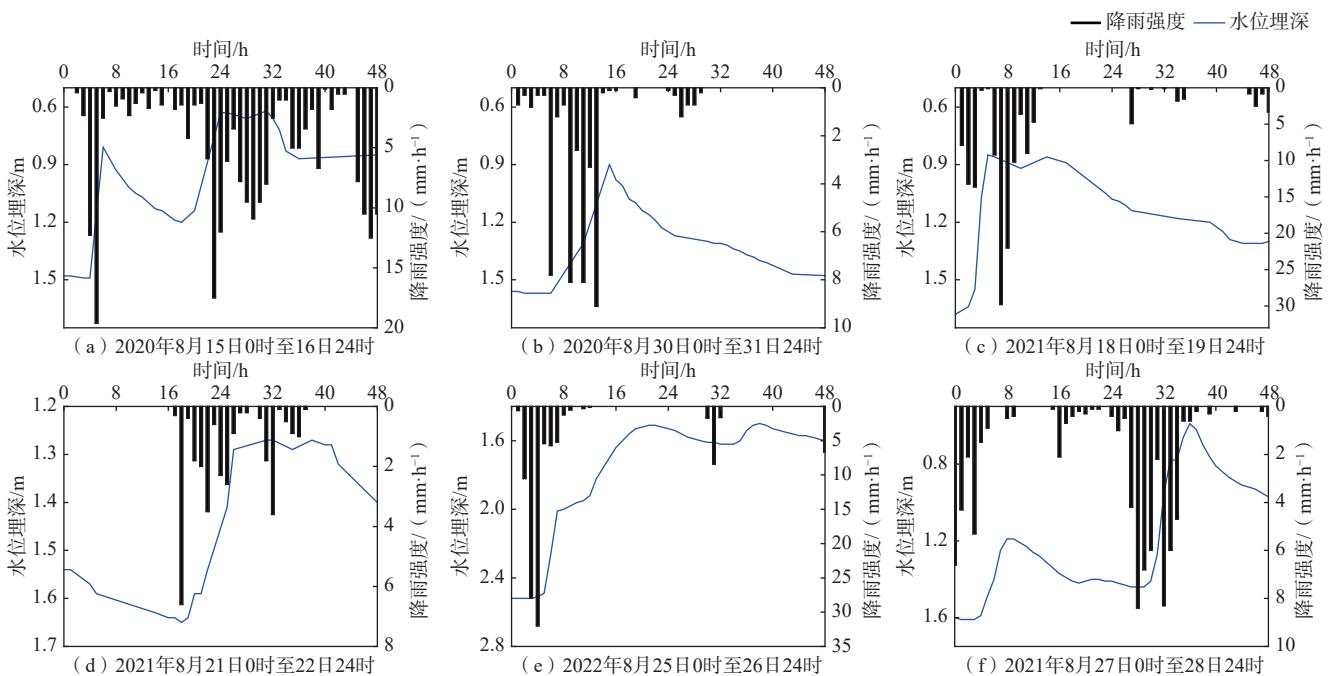


图5 降雨强度-地下水位深度的关系

Fig. 5 Corresponding relationships among rainfall and groundwater level

降,滑坡稳定性不变或小幅提高。因此,只需要分析7—8月的间降雨和滑坡稳定性之间的关系。选取降雨集中期主要降雨事件的日降雨量、降雨前地下水位

初始深度、最大上升幅度和相应的地下水埋深列于表1。根据表中的数据,考虑降雨量大而降雨强度小时,降雨持时长,地下水补给率较低,地下水位响应不

显著,因此剔除降雨强度小于10 mm/h的数据,同时剔除水位低于常年平均地下水位(2 m)的数据,做出引起水位显著上升的当日降雨量或前日降雨量与地下水位升幅的点图(图6),可以看出,日降雨量和地下水位升幅相关性不明显;而日降雨量和地下埋深具有较为明显的线性负相关趋势,即降雨量越大,地下埋深越浅,如图7所示,其拟合公式如下:

$$d_w = 1387 - 7.2p \quad (1)$$

表1 7—8月主要降雨事件中降雨量及其引起的地下水位变化参数

Table 1 Daily precipitation and the related groundwater level variations in July and August

日期	水位升幅 当日降雨量/mm	降雨前初始 水位埋深/m	降雨截止最高 水位深度/m	水位升幅/m
2020-07-10*	29.9	2.59	2.55	0.04
2020-07-24*	83.9	2.40	0.65	1.75
2020-07-25*	16.3	1.32	0.97	0.35
2020-07-29*	21.0	1.93	1.64	0.29
2020-07-30	13.4	1.65	1.50	0.15
2020-08-05*	69.6	1.94	0.92	1.02
2020-08-06	21.8	1.41	1.20	0.21
2020-08-11	134.2	1.92	0.51	1.41
2020-08-12	103.7	1.24	0.62	0.62
2020-08-14	14.4	1.46	1.36	0.10
2020-08-15	80.6	1.49	0.81	0.68
2020-08-16	127.3	0.87	0.62	0.25
2020-08-17	111.2	0.90	0.54	0.36
2020-08-22	20.4	1.36	1.25	0.11
2020-08-23*	41.5	1.19	1.16	0.03
2020-08-30	44.1	1.57	0.90	0.67
2021-07-10*	52.6	2.68*	2.44	0.24
2021-07-14	47.5	2.10	1.88	0.22
2021-08-16*	21.6	2.93	2.91	0.02
2021-08-17*	54.2	2.93	1.74	1.19
2021-08-18*	124.1	1.68	0.85	0.83
2021-08-19*	12.7	1.31	1.08	0.23
2021-08-21*	15.2	1.65	1.54	0.11
2021-08-22	14.6	1.41	1.30	0.11
2022-07-12*	62.4	2.62	2.45	0.17
2022-07-13*	54.9	2.42	1.13	1.29
2022-07-14*	50.4	1.51	0.63	0.88
2022-07-16	17.2	1.70	1.28	0.42
2022-07-22*	22.1	2.00	1.81	0.19
2022-07-27*	19.6	2.12	2.04	0.08
2022-08-04*	31.1	2.17	1.91	0.26
2022-08-25*	89.4	2.52	1.51	1.01
2022-08-26	11.7	1.62	1.50	0.12
2022-08-27	25.6	1.61	1.19	0.42
2022-08-28*	50.6	1.44	0.59	0.85

注: \* 剔除降雨强度<10 mm/h和地下水位埋深>2 m的数据。

式中:  $d_w$ ——地下水位埋深/mm;

$p$ ——引起水位上升的当日降雨量/mm。

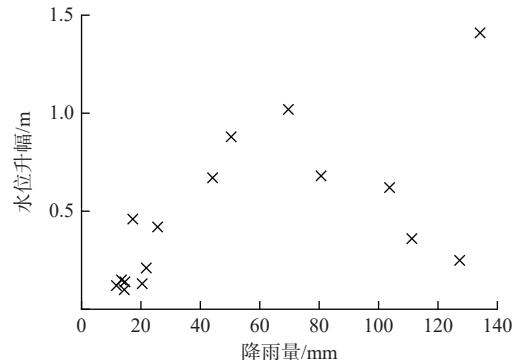


图6 地下水位升幅随日降雨量的关系变化

Fig. 6 Groundwater level rising vs. daily precipitation

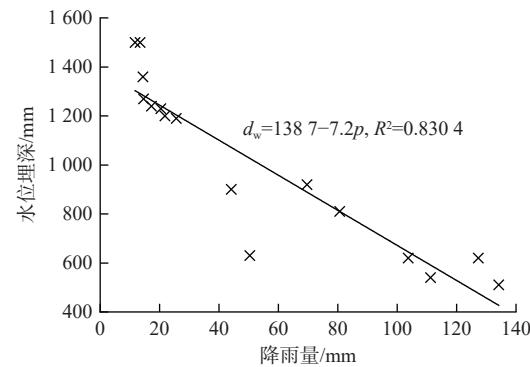


图7 地下水埋深随日降雨量变化

Fig. 7 Groundwater depth vs. daily precipitation

## 4 滑坡稳定性的预测模型

### 4.1 稳定性预测模型

根据降雨量与地下水位的关系,可构建无限滑坡稳定性预测模型。如图8所示,首先将滑坡概化为无限滑坡,即滑面位于基岩面上,地下水位位于基岩面以上,且平行于滑面,则稳定性计算公式为<sup>[27-28]</sup>:

$$F_s = \frac{c' + [\gamma d_w + \gamma'(H - d_w)] \cos^2 \beta \tan \varphi'}{[\gamma_w \gamma + \gamma_{sat} (H - d_w)] \sin \beta \cos \beta \tan \beta} \quad (2)$$

式中:  $\gamma$ ——土的天然重度/(kN·m<sup>-3</sup>);

$\gamma'$ ——土的浮容重/(kN·m<sup>-3</sup>);

$\gamma_{sat}$ ——土的饱和重度/(kN·m<sup>-3</sup>);

$H$ ——滑体厚度/m;

$d_w$ ——地下水位深度/m;

$\beta$ ——滑动面倾角(°)。

根据现场地下水、土体体积含水率监测分析,当降雨引起地下水位上升时,可认为地下水位以上的土接近饱和,对于无黏性土而言,有效黏聚力 $c'$ 可取0,

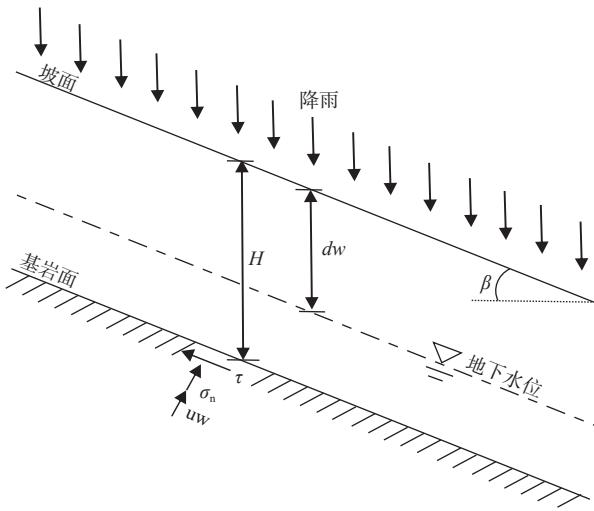


图 8 无限边坡模型

Fig. 8 Infinite slope model

则上式可简化为:

$$F_s = \frac{[\gamma d_w + \gamma'(H - d_w)] \cos^2 \beta \tan \varphi'}{[d_w \gamma + \gamma_{\text{sat}}(H - d_w)] \sin \beta \cos \beta \tan \beta} \quad (3)$$

引入地下水位深度系数  $k$ ,  $k = d_w/H$ , 则式(3)可变为如下形式:

$$F_s = \frac{k \gamma' + \gamma(1-k)}{k \gamma_{\text{sat}} + \gamma(1-k)} \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta} \quad (4)$$

当斜坡处于临界状态时, 斜坡的稳定系数为  $F_s =$

1.0, 据此推导可得地下水的临界深度系数  $k_{\text{cr}}$  为:

$$k_{\text{cr}} = \frac{\gamma_{\text{sat}}}{\gamma_w} \left( 1 - \frac{\tan \beta}{\tan \varphi'} \right) \quad (5)$$

由式(3)或式(5)可知, 稳定系数与滑带抗剪强度、滑体厚度、地下水位埋深以及斜坡坡度有关。将地下水位深度系数定义式  $k = d_w/H$ , 代入式(1)可得出由临界深度系数  $k_{\text{cr}}$  表示的临界降雨量的公式:

$$p_{\text{cr}} = \frac{1}{7.2} (1387 - k_{\text{cr}} H) \quad (6)$$

## 4.2 验证分析

采用该滑坡实测参数(饱和重度  $\gamma_{\text{sat}}$  取  $20.0 \text{ g/cm}^3$ , 有效黏聚力  $c'$  取  $0 \text{ kPa}$ , 有效内摩擦角  $\varphi'$  取  $30^\circ$ , 滑体厚度  $H$  为  $5.8 \text{ m}$ ), 根据式(5)和式(6), 得到滑坡处于临界状态时的临界水位埋深  $d_{w\text{cr}}$  为  $0.73 \text{ m}$ , 降雨阈值  $p_{\text{cr}}$  为  $81.8 \text{ mm/d}$ 。分别将 2020—2022 年降雨集中期的 7—9 月, 监测点的降雨量、地下水位及其阈值表示为图 9。可以看出, 在降雨集中期, 降雨量和地下水位频频超过阈值, 意味着滑坡稳定性低于临界状态, 但由于持续时间短, 雨后又恢复稳定, 与实际滑坡偶尔有间歇性变形一致。在 7—8 月的降雨集中期降雨量超过阈值后, 后山里滑坡发生缓慢滑移, 出现公路开裂和滑体裂缝发展的现象(图 10)。

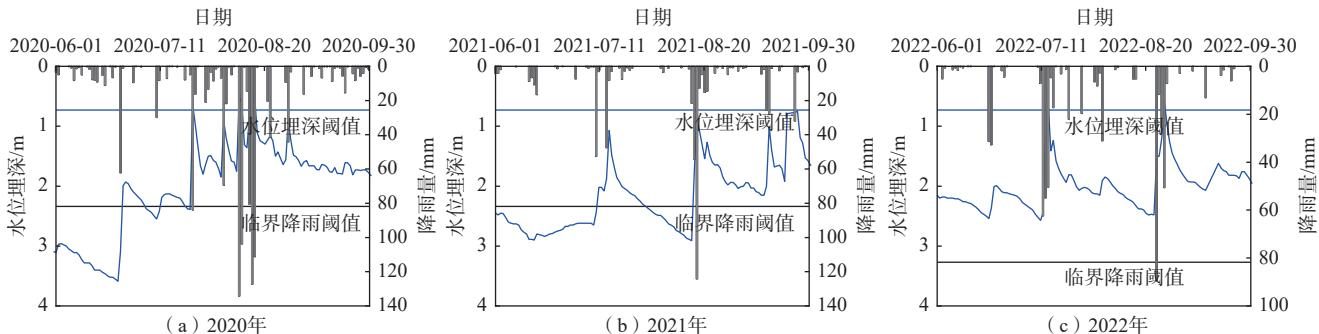


图 9 2020—2022 年降雨集中期降雨量与地下水位埋深及其阈值

Fig. 9 Precipitation and water depth during raining period from 2020 to 2022 and their thresholds

降雨后偶有间歇性变形, 而日常却很少有大幅变形也是大部分堆积层滑坡在整体滑动前的变形特点, 多年变形积累, 可能导致最终滑移。因此根据降雨和地下水位变化, 采用稳定性计算模型(式 6), 实时监控和预测滑坡稳定性变化, 可对降雨诱发浅层滑坡进行预警, 有效防范其造成灾害。

## 5 结论

(1) 对青川后山里滑坡监测结果表明, 年内地下

水位波动呈周期性变化, 可以分为缓慢下降期(10月到次年3月底至4月初), 快速下降期(4—7月)、快速上升期(7—10月初), 缓慢和快速下降期的暴雨不会引起地下水位迅速回升, 快速上升期降雨会引起地下水位在短时间内快速上升, 引起地下水位抬升和大幅度上升的最低降雨阈值分别为  $12 \text{ mm/d}$ 、 $32 \text{ mm/d}$ 。同时, 降雨量还与水位埋深明显呈线性负相关, 与水位升幅相关性不强。

(2) 基于降雨量与水位埋深的相关关系, 建立了



图 10 2020—2022 年降雨集中期后山里滑坡滑移现象

**Fig. 10 Sliding of HouShanli landslide during raining period from 2020 to 2022**

降雨引起斜坡浅层滑移的稳定性预测模型,确定了青川后山里滑坡的临界降雨阈值为  $81.8 \text{ mm/d}$  和地下水埋深临界阈值为  $0.73 \text{ m}$ ,即当降雨强度超过  $81.8 \text{ mm/d}$ ,水位埋深抬升超过  $0.73 \text{ m}$ ,斜坡稳定性低于临界状态,对其可发出预警。

#### 参考文献 ( References ) :

- [ 1 ] 李艳杰, 唐亚明, 邓亚虹, 等. 降雨型浅层黄土滑坡危险性评价与区划——以山西柳林县为例 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(2): 105 – 114. [ LI Yanjie, TANG Yaming, DENG Yahong, et al. Hazard assessment of shallow loess landslides induced by rainfall: A case study of Liulin County of Shanxi Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 105 – 114. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] 常金源, 包含, 伍法权, 等. 降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(4): 995 – 1001. [ CHANG Jinyuan, BAO Han, WU Faquan, et al. Discussion on stability of shallow landslide under rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 995 – 1001. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 3 ] 沈佳, 董岩松, 简文彬, 等. 台风暴雨型土质滑坡演化过程研究 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28(6): 1290 – 1299. [ SHEN Jia, DONG Yansong, JIAN Wenbin, et al. Study on evolution process of landslides triggered by typhoon rainstorm[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(6): 1290 – 1299. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 自然资源部. 全国地质灾害通报 [R]. 北京: 中国地质环境监测院. 2023. [ Ministry of Land and Resources, PRC. *China Geological Hazard Bulletin*[R]. Beijing: China Institute of Geological Environment Monitoring. 2023. (in Chinese) ]. ]
- [ 5 ] 李媛, 孟晖, 董颖, 等. 中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004, 15(2): 29 – 34. [ LI Yuan, MENG Hui, DONG Ying, et al. Main Types and characteristics of geo-hazard in China: Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(2): 29 – 34. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 李绍红, 朱建东, 王少阳, 等. 考虑降雨类型的基岩型浅层边坡稳定性分析方法 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(2): 131 – 135. [ LI Shaohong, ZHU Jiandong, WANG Shaoyang, et al. Stability analysis methods for the bedrock shallow slope considering rainfall types[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(2): 131 – 135. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 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) ]
- [ 8 ] 石振明, 赵思奕, 苏越. 降雨作用下堆积层滑坡的模型试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(4): 135 – 140. [ SHI Zhenming, ZHAO Siyi, SU Yue. An experimental study of the deposit slope failure caused by rainfall[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 135 – 140. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] WANG Genlong, LI Tonglu, XING Xianli, et al. Research on loess flow-slides induced by rainfall in July 2013 in Yan'an, NW China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(12): 7933 – 7944.
- [ 10 ] WEI Ling, YANG Moyuan, LI Zhu, et al. Experimental investigation of relationship between infiltration rate and soil moisture under rainfall conditions[J]. *Water*, 2022, 14(9): 1347.

- [11] 王高峰,李浩,田运涛,等.甘肃省白龙江流域典型高位堆积层滑坡成因机制研究及其危险性预测[J].岩石力学与工程学报,2023,42(4):1003–1018. [WANG Gaofeng, LI Hao, TIAN Yuntao, et al. Study on the formation mechanism and risk prediction of high-level accumulation landslides in Bailongjiang River Basin, Gansu Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(4): 1003 – 1018. (in Chinese with English abstract) ]
- [12] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous media[J]. Physics, 1931, 1(5): 318 – 333.
- [13] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics[J]. The Journal of Agricultural Science, 1911, 4(1): 1 – 24.
- [14] SURYAKANT B T, PALLERLA V. Comparative performance of different infiltration models for prediction of infiltration rate under different land-use conditions[J]. Environmental Earth Sciences, 2023, 82(4): 112.
- [15] 宋宜祥,尹子航,黄达.基于Green-Ampt模型的多层结构边坡降雨入渗改进计算方法及稳定性影响研究[J].水文地质工程地质,2022,49(6):162–170. [ SONG Yixiang, YIN Zihang, HUANG Da. Rainfall infiltration process of multi-layer slope based on improved Green-Ampt model stability analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 162 – 170. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] PHILIP J R. The theory of infiltration[J]. Soil Science, 1957, 83(5): 345 – 358.
- [17] ALBALASMEH A A, ALGHZAWI M Z, GHARAIBEH M A, et al. Assessment of the effect of irrigation with treated wastewater on soil properties and on the performance of infiltration models[J]. Water, 2022, 14(9): 1520.
- [18] MEIN R G, LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 384 – 394.
- [19] 胡庆,吴益平,苗发盛,等.基于Mein-Larson入渗模型的凹形边坡稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(6):26–35. [ HU Qing, WU Yiping, MIAO Fasheng, et al. Stability analysis of concave slope based on Mein-Larson infiltration model[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(6): 26 – 35. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] KOSTIakov A N. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[C]//Transactions of the Sixth Commission of the International Society of Soil Science, Part A. Russia, 1932: 17 – 21.
- [21] HORTON R E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity[J]. Soil Science Society of America Journal, 1941, 5(C): 399 – 417.
- [22] DAHAK A, BOUTAGHANE H, MERABTENE T. Parameter estimation and assessment of infiltration models for madjez ressoul catchment, Algeria[J]. Water, 2022, 14(8): 1185.
- [23] 蔡征龙,孟永东,秦毅,等.基于改进Green-Ampt模型的滑坡稳定时变可靠度分析[J].岩土力学,2022,43(1):268–276. [ CAI Zhenglong, MENG Yongdong, QIN Yi, et al. Time-varying reliability of landslide stability based on improved Green-Ampt model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1): 268 – 276. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 李强,贾森,李鑫,等.考虑非饱和浸润区的改进Green-Ampt模型[J].岩土力学,2022,43(12):3484 – 3492. [ LI Qiang, JIA Sen, LI Xin, et al. An improved Green-Ampt model considering unsaturated infiltration zone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12): 3484 – 3492. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 郭智辉,简文彬,刘青灵,等.基于现场原型试验的斜坡降雨入渗分析及入渗模型研究[J].岩土力学,2021,42(6):1635 – 1647. [ GUO Zhihui, JIAN Wenbin, LIU Qingling, et al. Rainfall infiltration analysis and infiltration model of slope based on in-situ tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1635 – 1647. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 李滨,冯振,赵瑞欣,等.三峡地区“14·9”极端暴雨型滑坡泥石流成灾机理分析[J].水文地质工程地质,2016,43(4):118 – 127. [ LI Bin, FENG Zhen, ZHAO Ruixin, et al. Mechanism of “14·9”rainstorm triggered landslides and debris-flows in the Three Gorges area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 118 – 127. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313 – 321.
- [28] BIONDI G, CASCONE E, MAUGERI M, et al. Seismic response of saturated cohesionless slopes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 20(1/2/3/4): 209 – 215.