

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230313006

# 基于GIS与Scoops 3D的水动力型滑坡区域 稳定性分析\*

王伟<sup>1,2</sup>, 邹艺璇<sup>1,2</sup>, 李尧<sup>1,2</sup>, 邹丽芳<sup>3</sup>, 姜宇航<sup>1,2</sup>, 陈鸿杰<sup>4</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024; 3. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 4. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

**摘要:** 库岸边坡在库水位变动、降雨等水动力因素的作用下易发生水动力型滑坡, 进而威胁库区居民生命及财产安全。以某流域HD和DHQ库段为主要研究区段, 在对已有滑坡点进行地质调查和遥感解译的基础上, 将ArcGIS的空间分析与三维斜坡稳定性分析模型(Scoops 3D)相结合, 对研究区段的潜在滑面进行系统的三维搜索及识别, 并基于GIS数据与室内试验等确定计算参数, 对天然和暴雨两种工况下的区域滑坡稳定性进行评价比较。结果表明: (1) 研究区历史滑坡点分布与基础地质环境、岩土体强度指标参数有很强的相关性; (2) 天然工况下, 非稳定区主要分布在DHQ坝区、逸场、DH坝址、拉巴铁、宝塔河以及甸尾附近; (3) 暴雨工况下, 非稳定区面积较天然工况有显著的增大, DHQ坝址、营盘镇、甸尾、HD坝址附近有较为密集分布; (4) 暴雨工况下模型计算的非稳定区与历史滑坡点的分布特征基本一致。由此可见, 三维斜坡稳定性分析模型可以较为准确模拟不同工况下滑坡稳定性, 且易发程度区分明显, 稳定性评价结果在一定程度上反映了研究区段的稳定性时空分布。

**关键词:** 水动力型滑坡; GIS; Scoops 3D模型; 滑坡稳定性

**中图分类号:** P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0079-11

## Stability Analysis of Hydrodynamic Landslides in the Reservoir Area Based on GIS and Scoops 3D

WANG Wei<sup>1,2</sup>, ZOU Yixuan<sup>1,2</sup>, LI Yao<sup>1,2</sup>, ZOU Lifang<sup>3</sup>, JIANG Yuhang<sup>1,2</sup>, CHEN Hongjie<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 4. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

**Abstract:** Under the impact of hydrodynamic factors such as reservoir level fluctuations or rainfall, the slope in the reservoir area is prone to hydrodynamic landslides, thus threatening the life and property safety of residents in the reservoir area. Based on the geological investigations and remote sensing interpretations of the existing landslides in the research region, the spatial analysis of the ArcGIS was

\* 收稿日期: 2023-03-13; 修回日期: 2023-06-25

基金项目: 江苏省六大高峰人才项目(JZ-008)、江苏高校“青蓝工程”项目(苏教师[2020]10号)资助

作者简介: 王伟(1978—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土工程防灾减灾和岩石力学方面的研究。

E-mail: wwang@hhu.edu.cn

combined with the three-dimensional slope stability analysis model (Scoops 3D) to perform a systematic three-dimensional search and identification of potential landslides in the main study reservoir from the HD section to the DHQ section. The calculation parameters were determined based on the GIS data and laboratory tests. The regional landslide stability under natural and rainstorm conditions was evaluated and compared. The research results indicate that: (1) the distribution of historical landslides in the research region has a strong correlation with the geological conditions and the strength parameters of the rock and soil; (2) Under natural conditions, the unstable area is mainly distributed in DHQ section, Yichang, DH dam site, Labatie, Baota River and near Dianwei; (3) Under rainstorm conditions, the distribution range of unstable areas is significantly larger than that in the natural conditions, unstable areas are densely distributed near the DHQ dam site, Yingpan Town, Dianwei and HD dam site; (4) The distribution of unstable areas calculated by the model under the rainstorm conditions is basically consistent with the distribution characteristics of historical landslides. It can be seen that the three-dimensional slope stability analysis model can accurately simulate landslide stability under different working conditions, and the degree of susceptibility can be distinguished clearly. The calculation results reflect the spatiotemporal distribution of stability in the research region to a certain extent.

**Keywords:** hydrodynamic landslide; GIS; Scoops 3D model; landslide stability

## 0 引言

水动力型滑坡是指在冰川融雪、降雨、水位变动、地表径流及地下水活动等水动力因素驱动下而发生的斜坡岩土体失稳灾害<sup>[1]</sup>。根据我国国土资源部公布的数据<sup>[2]</sup>,2021年全国发生4 772起地质灾害,其中滑坡比例高达48.93%,超过90%的滑坡为水动力因素造成。我国西南地区高山峡谷密布,且建设有大型水电站。库区山体高差变化大、降雨丰富,加上人为调控库水位发生周期性涨落,为库区水动力型滑坡创造孕育条件。因此开展库区水动力型滑坡稳定性分析对于降低滑坡灾害所造成的损失具有重要意义。

库区边坡稳定性分析方法分不确定性分析方法和确定性分析方法两种。不确定性分析方法根据工程类比思想<sup>[3]</sup>,对库区边坡稳定性规律进行宏观研究,找出滑坡危险区。不要求详细的区域水文地质资料和岩土体强度参数资料,但分析结果仅适用于研究区,不具有普适性。确定性分析方法通过将边坡离散为不同类型的单元体,基于力学理论定量分析边坡稳定性,研究结果更贴切实际情况。在各类确定性分析方法中,极限平衡法<sup>[4]</sup>计算最为简单且在边坡稳定性分析中应用广泛<sup>[5]</sup>。

由于库区地质环境的复杂性和特殊性,确定性

研究方法是展开区域边坡稳定性分析的首选,即同时关注库区的地质环境以及水动力型因素。边坡发生失稳破坏时,滑动面通常呈现出三维形态<sup>[6]</sup>,而通常采用的二维方法描述滑坡地质环境因素结果相对保守<sup>[7]</sup>。因此,边坡稳定分析描述地质环境的方法逐渐从二维拓展到三维<sup>[8-10]</sup>。GIS作为空间数据数字化分析处理工具,在分析区域性滑坡稳定性问题上具有独特的优势,常与极限平衡法相结合,实现基于力学原理的区域滑坡三维稳定性定量计算。在GIS的研究现状中,C.V.Westen等<sup>[11]</sup>最早基于GIS建立了边坡稳定性分析评价模型,该模型能够分析计算边坡的安全系数;王旭春等<sup>[12-13]</sup>以三峡库区滑坡为例进行二次开发,将力学模型引入GIS软件中,实现了区域滑坡安全系数的定量计算。现有的大部分滑坡区域稳定分析仅考虑了地质环境条件和降雨诱发因素,对水库地区的水动力型滑坡区域预警缺乏针对性研究,有一定的局限性<sup>[14]</sup>。通常采用的物理确定性模型例如SINMAP模型<sup>[15]</sup>、TRIGRS模型<sup>[16]</sup>和LAPSUS模型<sup>[17]</sup>,将降水因素、景观因素考虑在内,得到了较好的模拟效果。但作为一种二维模型,没有充分考虑地层岩性、地下水以及孔隙水等因素对模型的影响<sup>[18]</sup>。由美国地质勘探局(USGS)开发的评价滑坡稳定状态的三维确定性模型Scoops 3D,可以耦合多种不同环境、力学等条件参数进行分析。充分考虑岩土性质、地层结

构三维空间差异性,并对水动力型因素(库水位、降雨、地下水)进行分析<sup>[19]</sup>,将复杂的水文条件纳入区域尺度的滑坡稳定性评价中,并得到较好的结果。刘磊等<sup>[20]</sup>基于 Scoops 3D 模型,综合考虑不同的库水位及降雨强度工况对三峡库区万州区段库岸边坡进行区域滑坡稳定性分析;文杰<sup>[21]</sup>利用 TRIGRS 模型和 Scoops 3D 模型对陇南武都区堆积层滑坡进行了降雨作用下的稳定性分析,并基于 GIS 平台呈现模拟结果。

为探索三维岸坡整体区域稳定性研究方法,本文以某流域干流 HD 和 DHQ 库段为主要研究区段,基于 ArcGIS 对研究区滑坡影响因子进行评价。在区域监测数据稀疏的情况下,基于 GIS 区域基础地质数据及室内试验等确定计算参数。将 ArcGIS 空间分析与三维斜坡稳定性分析模型(Scoops 3D)相结合,综合考虑降雨、库水位及地下水三个水动力环境影响因子,建立库区水动力型滑坡区域综合稳定性评价模型,在不同工况下模拟研究区域水动力型滑坡危险性区划结果,为库区的滑坡防控工作提供科学依据,同时为类似地区规避滑坡灾害提供借鉴。

## 1 区域边坡稳定性计算原理与方法

滑坡变形与其所处的地质环境密切相关。根据研究区地质环境特点,选取地形地貌类(高程、坡度、坡向)、地质条件类(地层岩性、堆积层厚度)、环境条件类(库水位调动、降水规律、地下水位变化)共 8 个水动力型滑坡影响因子以及研究区的历史滑坡进行统计分析。

### (1) 区域边坡稳定性分析研究尺度

根据李军等<sup>[22]</sup>在对香港大屿山滑坡进行风险评估研究时提出经验拟合公式,确定区域滑坡稳定性研究时适合的栅格尺寸:

$$G_s = 7.49 + 0.0006S - 2.0 \times 10^{-9}S^2 + 2.9 \times 10^{-15}S^3 \quad (1)$$

式中, $G_s$ 为适宜的栅格大小; $S$ 为原始等高线数据精度的分母。

将本文等高线图件的  $S$  代入式 (1) 中计算得到研究区适宜的  $G_s$  为 9.62,选取整数 10 作为栅格分辨率选择。通过 ArcGIS 将研究区域划分为 3 759 980 个 10 m × 10 m 栅格,构建 8 个滑坡敏感性因子的图层。

### (2) Scoops 3D 模型计算原理

Scoops 3D 模型是美国地质调查局在 2015 年使用 Fortran 90 语言开发的三维边坡稳定性模型<sup>[23]</sup>。其基于数字高程地图(DEM),假定潜在滑坡面为三维球面,通过计算大量潜在滑面的安全系数来表征研究区的稳定性大小<sup>[24]</sup>。主要过程为:首先在研究区数字高程模型范围上方布置合适阵列方式的球心,然后生成若干的搜索球体和潜在滑坡三维栅格柱体。球面和数字高程模型相交形成的所有三维栅格柱体构成潜在滑坡的滑体。

Scoops 3D 基于线性 Coulomb-Terzaghi 失稳准则计算滑面的抗剪强度,如 (2) 式:

$$s = c + (\sigma_n - u) \tan \varphi \quad (2)$$

式中, $s$ 为抗剪强度; $c$ 为土体的黏聚力; $\varphi$ 为土体的内摩擦角; $\sigma_n$ 为滑体所受的正应力; $u$ 为作用于滑面的孔隙水压力。

式 (2) 中的  $c$ 、 $\varphi$  和  $u$  值可由研究者根据具体情况选择,例如饱和区可选用有效黏聚力、有效内摩擦角,强度较高的弱风化基岩可采用峰值强度的黏聚力和内摩擦角。

非饱和土体的基底吸力为负值,由于吸应力效应,其发生剪切运动时,会提高岩土体的摩擦角。大量研究表明吸应力  $S_e$  可近似表示为有效饱和度的函数如下:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

式中, $\theta$ 为含水量; $\theta_s$ 为饱和含水量; $\theta_r$ 为残余含水量。

考虑有效饱和度作用后摩尔库伦强度准则得到非饱和岩土体的破坏准则为:

$$s = c + (\sigma_n - S_e u) \tan \varphi \quad (4)$$

Scoops 3D 在进行三维稳定性分析时,可采用不同方式考虑孔隙水压力对滑坡稳定性的影响。这使得研究者可根据已有的水文地质资料,灵活的选用不同的方式,孔隙水压力可表示为:

$$\mu = h\gamma_w \quad (5)$$

式中, $h$ 为水头; $\gamma_w$ 为水的比重。

Bishop 在 1995 年定义了孔隙水压力系数的概念,随后被广泛应用于边坡稳定性分析研究中。

$$r_u = \frac{u}{\int \gamma_i z dz} = \frac{u}{(W/Ah)} \quad (6)$$

式中, $\gamma_i$ 是覆盖在基岩上岩土体的总容重,Scoops 3D 假定孔隙水压力  $u$  与垂直深度  $Z_{pz}$  之间的关系可

以表示为:

$$u = Z_{PZ} \gamma_w \quad (7)$$

式中,  $Z_{PZ}$  为滑体地下水水位面以下的垂直深度。

Scoops 3D 模型采用极限平衡法计算安全系数  $F_s$ , 为抗剪强度  $s$  和剪切应力  $\tau$  的比值:

$$F_s = \frac{s}{\tau} \quad (8)$$

本文采用 Scoops 3D 中内置的简化 Bishop 法<sup>[25]</sup> 进行三维斜坡稳定性系数计算, 其稳定性计算公式为:

$$F_s = \frac{\sum R_{i,j} [c_{i,j} A_{i,j} + (W_{i,j} - u_{i,j} A_{i,j}) \tan \varphi_{i,j}]}{\sum W_{i,j} (R_{i,j} \sin \alpha_{i,j} + k_{i,j} e_{i,j}) F_s} \times (\cos \beta_{i,j} F_s + \sin \alpha_{i,j} \tan \varphi_{i,j}) \quad (9)$$

式中,  $R_{i,j}$  为栅格柱体底面到转动球心所在转动轴线的距离;  $i, j$  分别为栅格柱体的行和列编号;  $c_{i,j}, \varphi_{i,j}$  为三维柱体滑面的黏聚力和内摩擦角;  $A_{i,j}$  为栅格柱体的潜在滑面的面积;  $W_{i,j}$  为单个栅格柱体重力;  $u_{i,j}$  为栅格柱体作用在滑面的孔隙水压力;  $\beta_{i,j}$  为潜在滑面的倾角;  $\alpha_{i,j}$  为滑动方向上栅格柱体滑面的视倾角;  $k_{i,j}$  为第  $i$  行  $j$  列栅格柱体中心受到的水平的振动荷载;  $e_{i,j}$  为圆心到栅格柱体质心的距离。

### (3) 水动力型滑坡危险性指数计算

本文将库岸滑坡的危险性分析表示为由滑坡发生的空间概率、时间概率和相对应的滑坡作用强度三者乘积的函数, 如式(10):

$$H = P_s \times P_T \times M \quad (10)$$

式中,  $H$  为水动力型滑坡危险性等级;  $P_s$  为潜在水动力型滑坡发生的空间概率;  $P_T$  为潜在水动力型滑坡发生的时间概率;  $M$  为潜在水动力型滑坡相对应的作用强度。

本文通过库区栅格安全性系数表征滑坡易发性区划, 并将其作为潜在滑坡发生的空间概率。潜在滑坡发生的事件的概率为诱发滑坡发生的水动力因素的复现概率, 即极端降雨情况发生的时间概率。潜在滑坡相对应的作用强度可由 Scoops 3D 模型输出的潜在滑体体积计算得到。

## 2 研究区工程地质环境分析

### 2.1 研究区滑坡概况

HD 和 DHQ 库区位于我国云南省境怒江州兰坪县南部区域, HD 和 DHQ 水电站分别为某流域上游“一库七级”开发方案的第五和第六级水电站。

选取研究区时考虑库岸水动力型滑坡的影响范围, 忽略库岸分水岭另一侧滑坡以及同一分水岭但距离较远、影响甚微的滑坡作用, 如图 1 所示。提取研究区山谷线和山脊线并参考研究区历史滑坡前缘高程和后缘高程, 划定本文的研究区范围, 其范围呈条带状沿流域两侧延伸, 总合计面积为  $177 \text{ km}^2$ 。

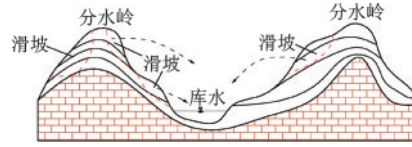


图 1 库岸滑坡影响范围示意

Fig.1 Landslide influence area in the research region

研究区为滇西纵谷中高山地貌单元, 山脉大致呈北西或近南北向展布, 河道呈南北向延伸, 河谷受深切影响, 主要为“V”型谷。属于亚热带山地季风气候, 降水量充足, 但年分配不均。基于库区的地质资料和卫星遥感影像, 对研究区域空间分布及滑坡体特征进行分析。通过 ArcGIS 将研究区滑坡体积大于 10 万方的历史滑坡逐个标记, 如图 2 所示。

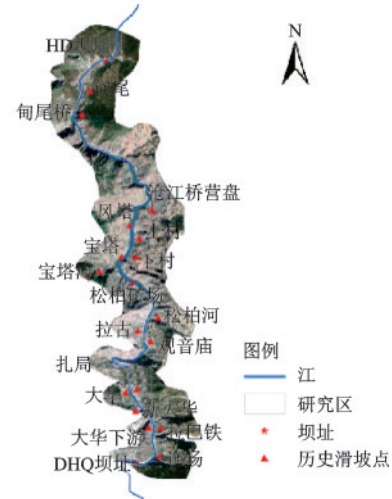


图 2 研究区历史滑坡点分布

Fig.2 Distribution map of historical landslides in the research region

### 2.2 地形环境因素

研究区两岸山顶高程为  $2700 \sim 3600 \text{ m}$ , 相对高差可达  $1300 \sim 2500 \text{ m}$ 。其中  $1410 \sim 2070 \text{ m}$  高程易发生水动力型滑坡。

根据 ArcGIS 的表面分析功能提取研究区坡度和坡向, 得到研究区坡度分级图, 如图 3 所示。研究

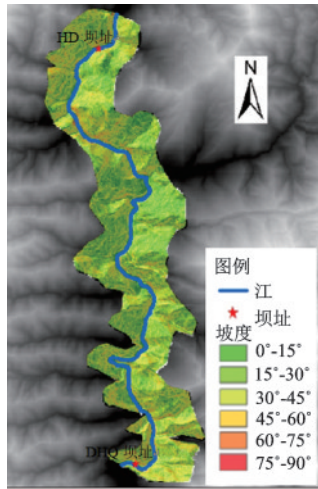


图3 研究区坡度分级

Fig.3 Slope angle classification map of the research region

区总体库岸坡度范围为 $25^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ,其中滑坡主要发生的坡度范围是 $13^{\circ}\sim 34^{\circ}$ 。划分库区坡向范围,得到10个坡向区间,得到研究区坡向分级图,如图4所示。研究区河道流向大体为由北向南,朝向岸坡,坡脚更容易受到库水的冲刷和侵蚀,导致坡向为东、西北和北的地区滑坡数量较其余坡向区间较多。

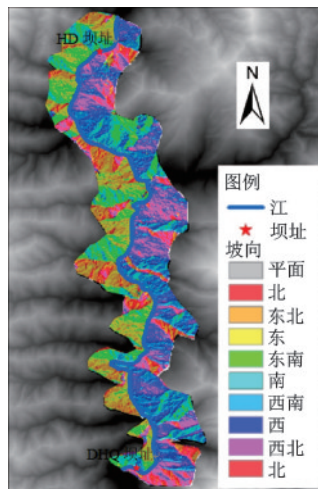


图4 研究区坡向分级

Fig.4 Slope inclination map of the research region

### 2.3 地层岩性因素

根据库区地质勘查报告可知,库区内,侏罗系上统坝注路组( $J_3b$ )和侏罗纪中统花开左组( $J_2h$ )出露范围最广,这两种地层主要由泥岩、板岩、细砂粉岩组成,风化后形成松散堆积体,强度差,渗透性强,易发生水动力型滑坡。结合库区历史滑坡记录,统计绘出研究区水动力型滑坡不同岩性地层占

比,有超过68.9%大型水动力型滑坡发生在这两种地层上。岩性分布如图5所示。研究区所有出露地层中,第四系堆积体发育,集中分布在所处流域沿岸岸坡,这类土石混合堆积体在各类因素作用下容易发生水动力型滑坡。

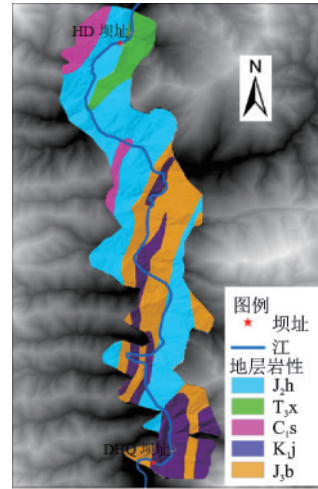


图5 研究区地层岩性分布

Fig.5 Lithology distribution of the research region

### 2.4 堆积层厚度因素

堆积层的厚度往往决定了水动力型滑坡滑体的体积和滑坡影响范围。由2.4可知,研究区堆积覆盖层最主要是第四系堆积层。本文选用反距离权重插值方法<sup>[26]</sup>对堆积层厚度进行估算,厚度估算结果如图6所示。对于具体滑坡分析,一般将边坡土层分为滑体、滑带土、基岩三层。实际工程中难以确定基岩与滑体的分界,为简化计算,本文仅考虑覆盖层和基岩两层。库区基岩高程由地表栅格的高程减去相应堆积层厚度得到,如图7所示。

根据已有参数及研究区出露的不同岩性对研究区进行分区,共划分为4个区。分区1和分区3主要出露地层侏罗系华开左组( $J_2h$ ),分区2主要出露地层为上统坝注路组( $J_3b$ )和白垩系景星组( $K_1j$ ),分区4的主要出露地层为上统坝注路组( $J_3b$ ),分区结果如图8所示。

### 2.5 水文地质

根据当地气象站多年记录的降雨监测资料,研究区年平均年降水量为973.8 mm,多集中于6~9月份,占全年降水量的70%以上。库区地下水类型为第四系松散堆积物孔隙水及基岩裂隙水。基岩裂

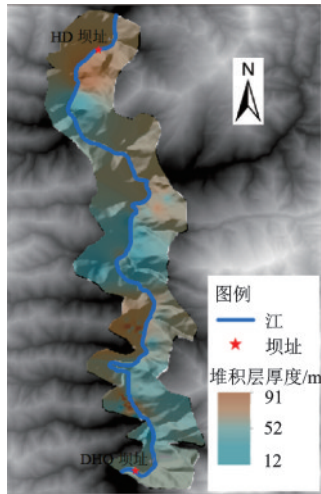


图6 研究区堆积层厚度分布

Fig.6 Deposits thickness distribution in the studied area

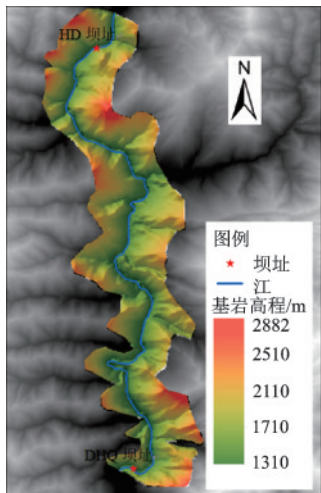


图7 研究区基岩高程

Fig.7 Bedrock elevation in the research area



图8 研究区岩体强度参数分区图

Fig.8 Rock mass strength parameters distribution in the studied area

隙水主要赋存于岩石的裂隙带中,主要接受降雨的补给;第四系松散堆积物孔隙水主要接受大气降水和库水的补给。取大华堆积体前缘测点UP1-1监测数据,得到该点地下水位与库区降雨量及库水位80个监测周次的变化时程曲线如图9所示。

随着水库蓄水完毕处于正常运行阶段,地下水位由波动趋于平稳状态,且受降雨影响较小。故本文对地下水位深度估算时做了简化处理,根据库水位1477 m时水位监测数据进行插值处理。对有地下水监测孔位的堆积体使用监测数据表征其地下水位,没有监测孔位的堆积体采用库水位1477 m作为其地下水浸润面,且规定地下水位高程不得高于地表高程,最终得到的库水位为1477 m时研究区地下水位埋深,如图10所示。

### 3 滑坡稳定性分析

#### 3.1 岩土体强度指标取值

根据研究区部分滑坡堆积体现场、室内土工试验,统计得到各分区内代表性滑坡点的主要强度参数范围,见表1。

根据DHQ库区各历史滑坡点的强度参数的建议取值,综合考虑滑坡点所处的地层岩性的影响,由表2给出各分区堆积层强度参数建议值,见表2。

#### 3.2 计算工况及模型参数设定

Scoops 3D主要通过孔隙水压力的三维分布、地下潜水面高程、以及孔压系数 $r_u$ 来考虑水动力因素对滑坡稳定性的影响。本文仅考虑天然工况、天然工况+暴雨条件两种工况对研究区库岸边坡的稳定性进行评价。天然工况下设定库水位为正常蓄水位1477 m,将图10转化成数字栅格,作为Scoops 3D计算采用的地下潜水面;暴雨或连续降雨工况下,给定堆积层孔压系数 $r_u=0.1$ ,以孔压形式及水头形式作用在滑面上,从而来模拟暴雨和持续降雨对滑坡堆积体稳定性的影响。两种计算工况具体设定见表3。

#### 3.3 Scoops 3D搜索参数

研究区采用 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 分辨率的DEM,共形成 $3514\times 1070$ 个栅格。使用ArcGIS将上文详细分析图件转化为数字栅格形式,分辨率均设置为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 且保持地理坐标系一致,导入Scoops 3D进行区域稳定性分析。

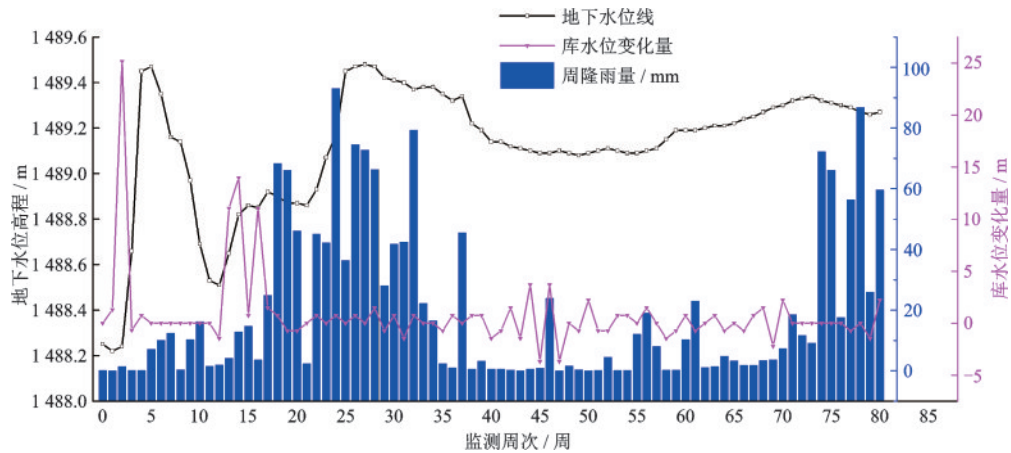


图9 地下水水位与降雨量及库水位变化

Fig.9 Record of the groundwater level, rainfall and reservoir water level

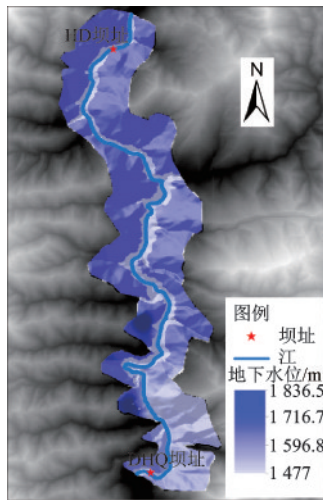


图10 库水位为1477 m时地下水埋深分布

Fig.10 Distribution of groundwater depth in bank at the reservoir water level of 1477 m

除了外部输入图件,还需要根据实际情况设置内部参数及潜在滑面搜索参数。参数选取过程中,需建立不同的球面与DEM相交,形成众多滑动面,寻求安全稳定性系数最小的滑动面作为潜在滑动面,球心的搜索范围为三维搜索矩阵<sup>[27]</sup>。参考研究区历史滑坡资料,设定 $5 \times 10^4 \sim 500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 作为搜索潜在滑体的主要尺寸控制参数,同时设定滑

坡面积为次要尺寸控制参数。研究区最高海拔为2 916 m,设定滑面搜索矩阵的最低高度为3 000 m,球心矩阵的高度为200 m,矩阵的垂直与水平间距均为10 m。详细的滑面搜索点阵的参数,见表4。

### 3.4 计算成果分析

#### (1) 水动力型滑坡易发性分析

将研究区各类数字栅格数据导入Scoops 3D模型,并进行参数设置,得到天然、暴雨工况下研究区库岸边坡安全系数分布。考虑到本文采用的Bishop条分法计算安全系数,该方法所得结果偏保守,参考滑坡稳定性分级相关标准<sup>[28]</sup>,将相应的稳定性等级作为库区水动力型滑坡易发性等级,分级标准见表5。得到研究区易发性区划图,如图11所示。

图11可知,在天然工况下研究区大部分地区为较低易发区和低易发区,面积共占整个大研究区面积的78.6%,潜在滑坡易发性等级高和较高的区域主要集中在甸尾村和大华坝址附近,潜在滑坡易发性等级为中等的区域较为均匀的分布在研究区两岸;在暴雨工况下属于较低易发区和低易发区的区域仍占大多数,面积共占研究区面积的58.69%,但

表1 各分区代表性滑坡点及其参数

Table 1 Representative landslides and their parameter range in each section

分区	代表滑坡点	堆积层强度参数范围		
		容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^\circ$ )
1	甸尾、甸尾桥	18.5~26.0	20.0~40.0	19.0~32.0
2	沧江桥营盘、大华、拉古	21.0~23.0	18.0~27.0	20.0~30.0
3	扎局、松柏河	20.0~23.5	18.6~40.0	19.0~32.0
4	大华左岸、拉巴铁、迳场	16.0~26.8	10.0~50.0	21.0~27.0

表2 各分区堆积层强度参数

分区	容重建议值/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力建议值/ kPa	内摩擦角建 议值/( $^{\circ}$ )
1	21.5	25.0	24.0
2	23.0	22.1	25.0
3	23.0	20.0	25.0
4	19.25	19.0	24.25

表3 Scoops 3D模型计算工况设定

计算工况	设定
天然工况	库水位为正常蓄水位1477 m
暴雨工况	库水位为正常蓄水位1477 m+暴雨( $r_a=0.1$ )

表4 Scoops3D搜索参数

单位:m					
滑面搜	起始	结束	最低点	最高点	垂直
索参数	栅格	栅格	高程	高程	间隔
参数值	(1,1)	(3 514,1 070)	3 000	3 200	10

表5 滑坡易发性等级分级标准

易发性等级	分级标准	易发性等级取值
高	$F_s < 0.9$	1
较高	$0.9 < F_s < 1.05$	0.8
中	$1.05 < F_s < 1.25$	0.6
较低	$1.25 < F_s < 1.5$	0.4
低	$F_s > 1.5$	0.2

易发性为较高和高的区域面积占比明显变高,由8.06%变为23.94%,暴雨工况与天然工况相比较高和高易发性区域位置高度重合,可以明显看出易发性等级由低到高的变化。

(2) 水动力型滑坡作用强度分析

滑坡作用强度一般采用滑坡规模(滑坡面积和滑体体积)、滑体滑动速度、滑动距离、滑体入水产生的涌浪高度等作为评价指标<sup>[29]</sup>。考虑到研究区内历史滑坡多为深层滑坡,且主要滑坡体深部水平深部位移速度极低,因此本文直接采用滑体体积来估算潜在滑坡作用强度。使用Scoops 3D模型计算潜在滑坡滑体体积,在ArcGIS中选用几何间隔法对潜在滑体体积进行重分类,如图12所示。

(3) 由图12可知,暴雨工况相较于天然工况滑

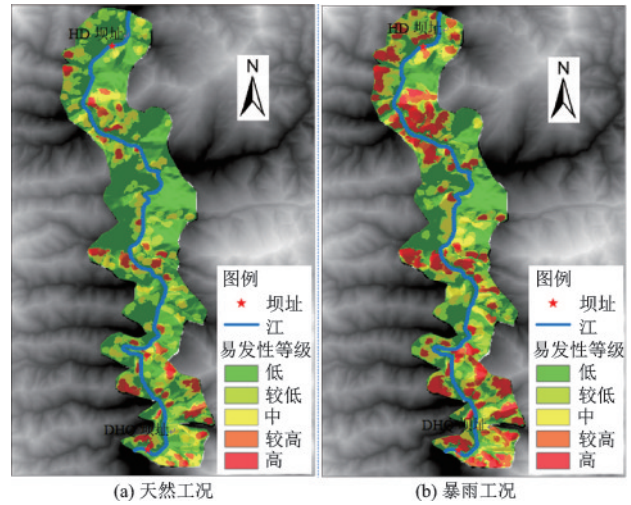


图11 研究区滑坡易发性区划

Fig.11 Landslide susceptibility mapping of the research region

坡作用强度明显增强较多,且暴雨工况下研究区大部分滑坡作用强度都较高,潜在滑坡的体积较大。水动力型滑坡危险性区划

天然状况下不考虑降雨这一随机事件。由于研究库区已建成并正常运行,库水位高程变化受严格调控,具有一定的规律性,不存在某特定水位值复现概率的问题。因此将库水位复现的时间概率看作1。暴雨工况是通过已有的降雨统计资料,对未来可能发生的极端降雨进行预测,改时间频率为未来极端降雨出现的概率,本文中取0.02,即发生50年一遇暴雨(年概率为2%)。

根据式(10)计算所得的水动力型滑坡危险性指数来评价研究区水动力型滑坡危险性的大小,并采用ArcGIS对研究区的危险性进行分区,得到研究区危险性等级区划图见图13。

统计图13中两种工况危险性等级区域面积占比,如表6所示。由表6可知,暴雨工况相对于天然工况,危险性等级为极高的区域面积增加明显,面积占比由3.2%增加至9.4%,危险性等级为高的区域面积占比基本不变,危险等级为中等的区域面积增加明显,面积占比由15.2%增加至19.7%。由此可见,降雨对研究区滑坡危险性的影响较大。本文选取暴雨工况下的危险性区划结果对研究区进行水动力型滑坡风险评价研究。并选取暴雨工况模型预测结果与历史滑坡分布进行对比分析,见表7。

由表7可知,暴雨工况下,处于低危险区及较低危险区(稳定区)的面积约占研究区总面积的58.9%,在该区段内分布历史滑坡点约3处,滑坡密

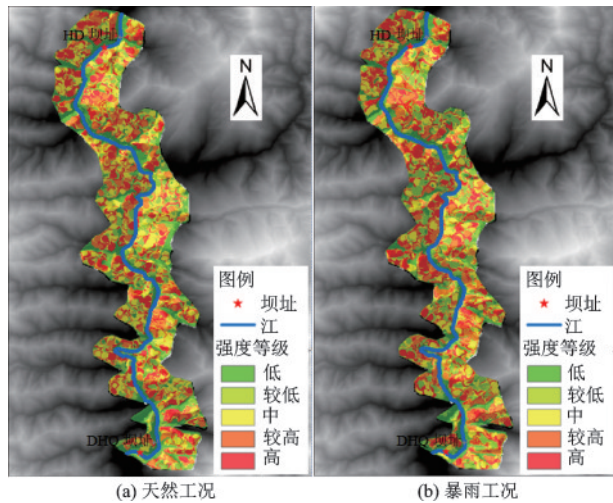


图12 研究区滑坡作用强度分布

Fig.12 Distribution of landslide intensity in the research region

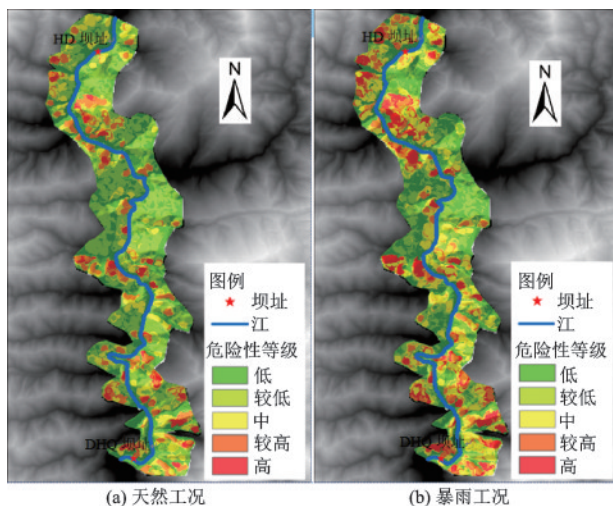


图13 研究区危险性等级区划

Fig.13 Classification of risk in the research region

度为0.029 86处/ km<sup>2</sup>;处于中危险区(潜在滑坡区)的面积约占19.7%,在该区段内分布历史滑坡点约4处,滑坡密度为0.119 23处/ km<sup>2</sup>;处于高危险区(非稳定区)的面积约占11.9%,在该区段内分布历史滑坡点约5处,滑坡密度为0.246 91处/ km<sup>2</sup>;处于极高危险区(非稳定区)的面积约占9.4%,在该区段内分布历史滑坡点约5处,滑坡密度为0.310 56处/ km<sup>2</sup>。

表6 研究区 Scoops 3D 稳定性计算结果统计

Table 6 Statistics of stability calculation results of Scoops3D model in the study area

单位: %

危险性等级	极高危险区 面积百分比	高危险区 面积百分比	中危险区 面积百分比	较低危险区 面积百分比	低危险区 面积百分比
天然工况	3.2	11.7	15.2	36.7	33.1
暴雨工况	9.4	11.9	19.7	24.4	34.5

且研究区历史发生大型滑坡如大华滑坡、拉古滑坡、迳场堆积体、沧江桥营盘滑坡、风塔滑坡均处于高危险区及极高危险区域。由此可见,82.35%的历史滑坡点与预测模型在滑坡分布位置一致,潜在滑坡区滑坡灾害的分布数量、密度均明显高于稳定区滑坡灾害的分布数量和分布密度,模型计算结果与研究区历史滑坡点分布特征基本一致。

## 4 结论

本文以HD和DHQ库段为研究对象进行水动力型滑坡区域稳定性研究。将ArcGIS的空间分析与三维斜坡稳定性分析模型(Scoops 3D)相结合,在数据稀疏的情况下,获取研究区基础地质数据及强度参数,选取不同工况对研究区稳定性进行评价比较,并将模型计算结果与历史滑坡点分布进行比较。结论如下:

(1)HD和DHQ库区段区历史滑坡点的分布和边坡基础地质条件、强度参数的分布具有很强的相关性,滑坡易发的坡度为13°~34°,坡向为东、西北和北,易发地层岩性为侏罗系上统坝注路组(J<sub>3</sub>b)和侏罗纪中统花开左组(J<sub>2</sub>h)。

(2)基于三维斜坡稳定性分析模型可以较好的识别区域内不同工况下的滑坡稳定性,不同易发程度区分明显。天然工况下,低危险区、中危险区、高危险区、极高危险区面积占比分别为69.8%、51.2%、11.7%、3.2%。中危险及以上危险区主要分布在DHQ坝区、迳场、DH坝址、拉巴铁、宝塔河以及甸尾附近;低危险区及较低危险区主要分布在库区中段沧江桥上游到下村沿岸及附近。

(3)暴雨工况下,低危险区、中危险区、高危险区、极高危险区面积占比分别为58.9%、19.7%、11.9%、9.4%。极高危险区和中危险区面积占比有明显的增加,约为天然工况的2.94及1.30倍。非稳定区在DHQ坝址、营盘镇、甸尾、HD坝址附近有较为密集分布。

(4)暴雨工况下,模型计算的非稳定区分布结

表7 暴雨工况下模型计算结果与历史滑坡分布特征对比分析

Table 7 Comparison of model calculation results and historical landslide characteristics under rainfall conditions

危险性等级	模型计算分区面积占比/%	历史滑坡数量/处	历史滑坡分布密度/(处·km <sup>-2</sup> )
低危险区+较低危险区	58.9	3	0.029 86
中危险区	19.7	4	0.119 23
高危险区	11.9	5	0.246 91
极高危险区	9.4	5	0.310 56

果与历史滑坡点分布特征基本一致。非稳定区域内滑坡灾害的分布密度明显高于稳定区滑坡灾害的分布数量和分布密度。稳定性评价结果在一定程度上反映了研究区段的稳定性时空分布。

参考文献:

[1] 周家文, 陈明亮, 李海波, 等. 水动力型滑坡形成运动机理与防控减灾技术[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1131-1145.  
Zhou J W, Chen M L, Li H B, et al. Formation and movement mechanisms of water-induced landslides and hazard prevention and mitigation technologies[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1131-1145. (in Chinese)

[2] 中华人民共和国国土资源部. 全国地质灾害通报[R]. 北京: 国土资源部地质灾害应急技术指导中心, 2021. Ministry of Land and Resources, RC. The national geological disaster bulletin[R]. Beijing: Geological Disaster Emergency Technical Guidance Center, Ministry of Land and Resources, 2021. (in Chinese)

[3] Carrara A. Multivariate models for landslide hazard evaluation[J]. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 1983, 15: 403-426.

[4] 李世海, 刘天莘, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2): 3309-3324.  
Li S H, Liu T P, Liu X Y. Analysis method for landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Sup2): 3309-3324. (in Chinese)

[5] 高玉峰, 万愉快, 张飞. 三维非对称边坡稳定性分析极限平衡法[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(12): 1819-1830.  
Gao Y F, Wan Y K, Zhang F. Three-dimensional limit equilibrium method for asymmetrical slope stability analysis[J]. Scientia Sinica Technologica, 2022, 52(12): 1819-1830. (in Chinese)

[6] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525-529.  
Chen Z Y, Mi H L, Wang X G. A three-dimensional

limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 23(5): 525-529. (in Chinese)

[7] Hungr O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions[J]. Geotechnique, 1987, 37(1): 113-117.

[8] Huang C C, Tsai C C. New method for 3D and asymmetrical slope stability analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(10): 917-927.

[9] 冯树仁, 丰定祥, 葛修润, 等. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 657-661.  
Feng S R, Feng D X, Ge X R, et al. 3D limit equilibrium method for slope stability and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 21(6): 657-661. (in Chinese)

[10] Di Traglia F, Nolesini T, Solari L, et al. Lava delta deformation as a proxy for submarine slope instability[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 488: 46-58.

[11] Van Westen C J, Bonilla J B A. Mountain hazard analysis using a PC-based GIS[C]//Proceedings 6th international congress international association of engineering geology (IAEG): 6-10 August 1990, Amsterdam, The Netherlands/ed. by DG Price, International Association for Engineering Geology and the Environment, 1990: 265-271.

[12] 王旭春, 蒋宇静, 赵月, 等. 滑坡GIS可视化研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2): 2511-2514.  
Wang X C, Jiang Y J, Zhao Y, et al. Study and application on the visualization of geological information system in landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (Sup2): 2511-2514. (in Chinese)

[13] 王旭春, 何满潮, 蒋宇静, 等. 在GIS中实现基于力学原理的滑坡稳定性计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 977-980.  
Wang X C, He M C, Jiang Y J, et al. Implement the landslide stability calculation based on mechanical princi-

- ple in GIS[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(6): 977-980. (in Chinese)
- [14] 王伟, 袁雯宇, 邹丽芳, 等. 基于滑坡敏感性评价的库区水动力型滑坡区域综合预警研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(3): 479-491.  
Wang W, Yuan W Y, Zou L F, et al. Comprehensive regional-scale early warning of water-induced landslides in reservoir areas based on landslide susceptibility assessment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(3): 479-491. (in Chinese)
- [15] Keles F, Nefeslioglu H A. Infinite slope stability model and steady-state hydrology-based shallow landslide susceptibility evaluations: The Guneyisu catchment area (Rize, Turkey)[J]. Catena, 2021, 200: 105161.
- [16] Schilirò L, Cepeda J, Devoli G, et al. Regional analyses of rainfall-induced landslide initiation in upper gudbrandsdalen (South-eastern Norway) using TRIGRS model[J]. Geosciences, 2021, 11(1): 35.
- [17] De Sy V, School J M, Keesstra S D, et al. Landslide model performance in a high resolution small-scale landscape[J]. Geomorphology, 2013, 190: 73-81.
- [18] 孙何生, 邱海军, 朱亚茹, 等. 黄河上游典型流域滑坡稳定性预测及模型应用[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 380-390.  
Sun H S, Qiu H J, Zhu Y R, et al. Landslide stability prediction and model application in typical watersheds of the upper Yellow River[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(3): 380-390. (in Chinese)
- [19] 辛星, 张帆宇. 三维确定性模型在浅层黄土滑坡稳定性预测中的应用[J]. 工程科学学报, 2018, 40(4): 397-406.  
Xin X, Zhang F Y. Application of a 3D deterministic model for predicting shallow loess landslide stability[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(4): 397-406. (in Chinese)
- [20] 刘磊, 殷坤龙, 徐勇, 等. 考虑降雨及库水位变动的区域滑坡灾害稳定性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(2): 403-414.  
Liu L, Yin K L, Xu Y, et al. Evaluation of regional landslide stability considering rainfall and variation of water level of reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(2): 403-414. (in Chinese)
- [21] 文杰. 基于 SCOOPS3D 和 TRIGRS 模型的区域性降雨滑坡危险性评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- Wen J. Regional rainfall landslide risk assessment based on SCOOPS3D and TRIGRS models[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2019. (in Chinese)
- [22] 李军, 周成虎. 基于栅格 GIS 滑坡风险评价方法中网格大小选取分析[J]. 遥感学报, 2003, 7(2): 86-92.  
Li J, Zhou C H. Appropriate grid size for terrain based landslide risk assessment in Lantau island, Hong Kong[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(2): 86-92. (in Chinese)
- [23] Reid M E, Christian S B, Brien D L, et al. Scoops3D—software to analyze three-dimensional slope stability throughout a digital landscape[J]. US Geological Survey Techniques and Methods, book, 2015, 14.
- [24] 崔志杰. 灌溉条件下黄土阶地斜坡区域稳定性评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.  
Cui Z J. Slope stability assessment of irrigated loess terraces[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese)
- [25] 刘磊. 三峡水库万州区库岸滑坡灾害风险评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.  
Liu L. Assessment of landslide risk along Wanzhou area in three gorges reservoir[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese)
- [26] 赵庶旭, 屈睿涛, 王婧雯. 基于改进的反距离权重插值的车辆轨迹重构方法[J]. 公路交通科技, 2018, 35(10): 133-139.  
Zhao S X, Qu R T, Wang J W. A vehicle trajectory reconstruction method based on improved inverse distance weighted interpolation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(10): 133-139. (in Chinese)
- [27] 赵志阳, 杨雪琪, 宋扬, 等. 基于 Scoops 3D 模型的区域库岸边坡稳定性分析[J]. 人民黄河, 2020, 42(4): 135-139.  
Zhao Z Y, Yang X Q, Yang S, et al. Analysis of regional bank slope stability based on Scoops 3D model[J]. Yellow River, 2020, 42(4): 135-139. (in Chinese)
- [28] 滑坡防治工程设计与施工技术规范: DZ/T 0219—2006[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2006.
- [29] 曹颖. 单体滑坡灾害风险评价与预警预报[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.  
Cao Y. Risk assessment and early warning of individual landslide[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)