

DOI: 10.11779/CJGE201809012

川西松潘上窑沟古滑坡复活特征及危险性预测研究

吴瑞安¹, 张永双^{*2}, 郭长宝¹, 杨志华¹, 任三绍¹, 陈鹏³

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

3. 四川省阿坝州松潘县国土局, 四川 阿坝 624000)

摘要: 随着近年来人类活动加剧和极端天气的频繁出现, 古滑坡复活问题日益突出, 严重威胁着工程设施和城镇安全。以青藏高原东缘松潘县上窑沟古滑坡为例, 在剖析古滑坡复活特征的基础上, 分析了不同重现期降雨条件下滑坡的破坏范围和失稳概率, 并采用 DAN^{3D} 软件模拟研究了滑坡运动过程和堆积范围, 开展了古滑坡复活的危险性预测评价。结果表明: ①受坡脚浸润侵蚀和强降雨的影响, 上窑沟古滑坡前缘局部 H1 已经复活, 呈现出多级序、多期次活动的特点, 目前地表宏观变形迹象清晰, 存在进一步失稳可能; ②H1 在 20 a 一遇的 10 d 连阴雨条件下处于不稳定状态, 失稳概率达 99.12%, 而后部的 H2 在 100 a 一遇 10 d 连阴雨条件下处于不稳定状态, 失稳概率达 96.36%, 可能和前部 H1 发生连续失稳下滑; ③仅前缘局部 H1 失稳时, 滑体最远运移距离约 350 m, 堆积体前缘不会抵达居民区; ④当后部 H2 和前部 H1 连续失稳时, 滑体最远运移距离达 550 m, 沟口居民区的排导槽首端至国道 G213 间半径约 150 m 的扇形区遭受滑坡-碎屑流的危险性大。

关键词: 古滑坡; 危险性预测; 复活特征; 失稳概率; 青藏高原东缘

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)09-1659-09

作者简介: 吴瑞安(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事工程地质与地质灾害方面的研究工作。E-mail: wuruian1991@126.com。

Reactivation characteristics and hazard prediction of Shangyaogou ancient landslide in Songpan County of Sichuan Province

WU Rui-an¹, ZHANG Yong-shuang², GUO Chang-bao¹, YANG Zhi-hua¹, REN San-shao¹, CHEN Peng³

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Tianjin Center, China Geological

Survey, Tianjin 300170, China; 3. Songpan Land and Resources Bureau, A'ba 624000, China)

Abstract: Affected by the intensifying human activities and frequent occurrence of extreme climate in recent years, the problem of ancient landslide reactivation is increasingly prominent, threatening the local engineering facilities and urban security. Based on the Shangyaogou ancient landslide in the east margin of the Tibetan Plateau, the reactivation characteristics are analyzed, and the instability probability of the landslide under different rainfall conditions for return period is calculated. In addition, DAN^{3D} software is used to simulate the movement process and accumulation scope of the sliding mass, and assess the landslide hazard. The results show that: (1) A local part H1 has been reactivated in the front of the ancient landslide due to heavy rainfall and foot erosion, presenting the activity characteristics of multi-stage and multi-period. At present, the deformations on the slope are obvious, and have a potential for further instability. (2) H1 is in an unstable state under the condition of 20 years of continuous rainfall in 10 days with the instability probability of 99.12%. The posterior part H2 is highly likely to follow H1 and move downslope under the condition of 100 years of continuous rainfall in 10 days with the instability probability of 96.36%. (3) The farthest movement distance is about 350 m when only the reactivated part H1 moves, and the forefront of the landslide deposits will not reach the residential areas. (4) When the posterior part H2 moves following the reactivated part H1, the farthest movement distance is about 550 m. For the residential areas, the fan area from the head of the drainage channel to the national road G213 with a radius of about 150 m is considered to have a high hazard risk of landslide-debris flow.

Key words: ancient landslide; hazard prediction; reactivation characteristic; instability probability; east margin of Tibetan Plateau

0 引言

古滑坡是斜坡长期复杂演化过程的产物。随着人

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41731287); 中国地质调查局项目(DD20160271)

收稿日期: 2017-10-11

*通讯作者(E-mail: zhys100@sohu.com)

类工程活动不断加剧和极端天气频繁出现,国内外发生了大量由古滑坡复活引起的交通、水电工程等重要设施毁坏和人员伤亡等灾难性事件,灾害风险日益严峻。青藏高原东缘作为中国大陆地形地貌陡度最大、内外动力作用最强烈、气候变化极端频繁的特殊区域,是古滑坡分布最为集中和复活危害最大的地区。例如,甘肃舟曲泄流坡滑坡自 1904 年复活后,沿断裂带形成的滑坡堆积体每年雨季都发生溜滑或倾泻,频繁阻断公路甚至堵塞白龙江^[1];四川省丹巴县甲居滑坡因强降雨和开挖坡脚发生复活,坡面出现宽大裂缝和断坎,每年汛期变形加剧,严重威胁滑坡上的藏寨村落及前缘公路安全^[2];云南省金沙江支流冲江河的螺蛳湾巨型古滑坡,因国道 G214 施工开挖坡脚和强降雨而出现局部复活,严重威胁国道和螺丝湾水电站的安全^[3]。因此,古滑坡复活问题的研究对防灾减灾、重大工程规划、新型城镇化建设安全等具有重要意义。

古滑坡复活通常是一个涉及地貌、气候变化和人类活动等因素的复杂过程^[4],由于古滑坡的隐蔽性及其复活演变的复杂性和研究手段的局限性,目前对古滑坡复活问题的研究尚处于探索阶段^[5-10]。野外调查表明,青藏高原东缘古滑坡复活的特征主要表现在:①古滑坡的复活呈现多期次、多分区、多级滑带的变形特点,级序越低稳定性越差;②古滑坡有的沿着老滑面(滑带)重新滑动,有的孕育新的次级滑面,部分新滑面最终也迁就老滑面发育;③滑坡复活变形速率与外界影响因素密切相关,坡脚开挖容易造成古滑坡的局部迅速解体破坏,而水的入渗、河流侵蚀等则导致滑坡发生缓慢蠕滑复活;④古滑坡前缘出现复活迹象后,若得不到及时有效的抑制,容易出现后退式逐级破坏现象,甚至转化为滑坡-碎屑流灾害链。受构造活动、地形地貌和极端气候等影响,青藏高原东缘发育着许多大-中型古滑坡,在地震、强降雨、人类工程活动或河流侵蚀作用下,部分古滑坡出现复活变形,对山区交通干线和城镇安全构成严重威胁^[11-12]。本文以位于青藏高原东缘松潘县上窑沟古滑坡为例,在剖析古滑坡复活特征的基础上,采用 Geostudio 软件分析计算了不同重现期降雨条件下滑坡的失稳概率,并借助 DAN^{3D} 软件模拟了滑坡运动过程和堆积范围,开展了古滑坡复活的危险性预测评价,对有效防范滑坡-碎屑流灾害链、保障沟口附近基础设施和居民生命财产安全具有重要参考价值。

1 地质背景

松潘县位于青藏高原东缘的川西高原东北部(图 1),区内地形陡峻,以高-中山为主,岷江断裂在松潘

县城西侧大致沿岷江河谷右岸展布,具逆冲-走滑特征,为全新世活动断裂^[13]。区内基岩主要为三叠系侏倭组(T_{3zh})浅灰色钙质石英砂岩夹灰黑色薄-中层板岩、新都桥组(T_{3x})灰黑色粉砂岩和碳质板岩及罗空松多组(T_{3l})灰色薄-中层砂质板岩和薄层碳质板岩。此外,沿沟谷常分布有第四系冲洪积物(Q_4^{al+pl}),坡表上分布残坡积物(Q_4^{di+el})等。区内地下水以第四系松散堆积层孔隙水为主,基岩富水条件差,斜坡内一般无稳定地下水位。该区处于高寒山区,干雨季分明,雨季降水量占全年降水量的 72%以上,多年平均降水量约 708 mm。

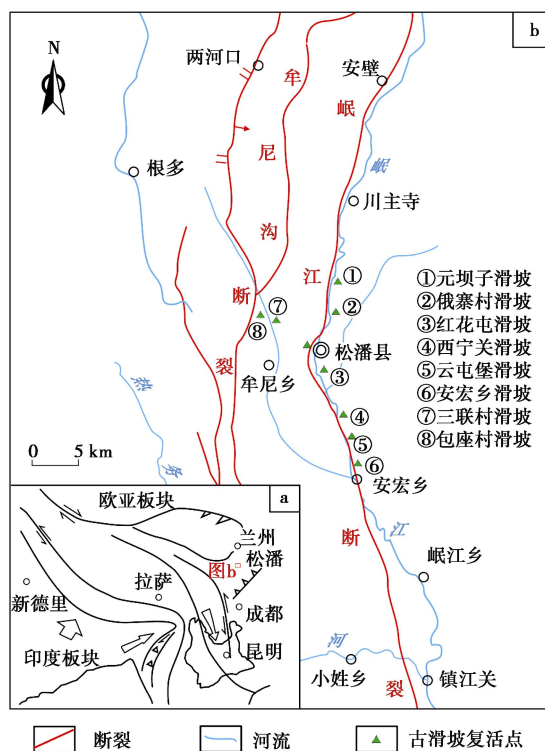


图 1 研究区构造背景图

Fig. 1 Tectonic setting of study area

2 上窑沟古滑坡发育特征

2.1 古滑坡特征

上窑沟古滑坡位于岷江右岸的上窑沟内,距下游沟口县城主城区约 450 m。上窑沟属季节性冲沟,沟道狭窄深切,主沟平均纵坡降达 300‰,两侧斜坡坡度一般为 $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 。沟域最高点的高程为 3515 m,沟道与岷江交汇处高程为 2853 m。古滑坡平面呈半圆形(图 2),后缘高程约 3110 m,前缘高程约 2920 m,平均坡度约 29° ,主滑方向 145° 。滑坡平均纵长约 260 m、横宽约 250 m,滑体平均厚约 15 m,体积约 $97.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑体主要由粉质黏土夹碎石构成,碎石岩性主要为碳质板岩和砂质板岩,含石量占 20%~

40%，粒径一般为 0.5~3 cm，最大达 15 cm。滑床为三叠系罗空松多组（ T_3l ）灰色薄-中层砂质板岩和薄层碳质板岩，岩层顺坡陡倾，产状 $240^\circ \angle 70^\circ$ （图 3）。岷江断裂的次级断裂从滑坡东侧经过，附近斜坡岩体碎裂化严重。古滑坡平面上大体分为左右两大独立亚区（图 2），二者以小山脊为界，滑坡右侧亚区（I）前缘局部复活，左侧亚区（II）目前稳定性良好，未见变形迹象，本文仅关注已经发生局部复活的 I 区。

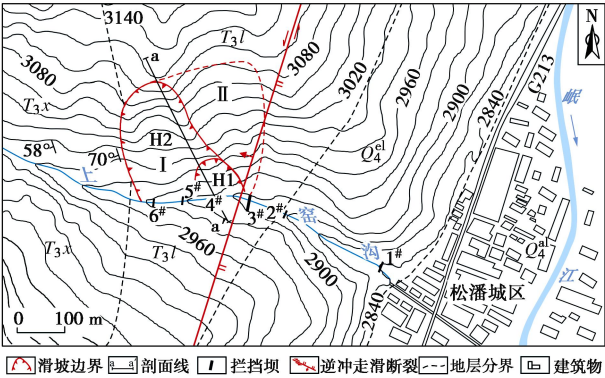


图 2 松潘县上窑沟滑坡平面图

Fig. 2 Topography of Shangyaogou landslide in Songpan County

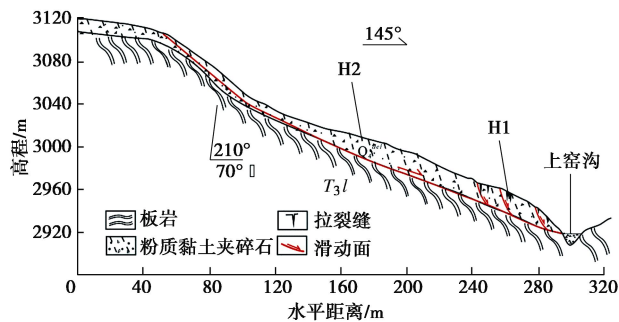


图 3 松潘县上窑沟滑坡剖面图

Fig. 3 Geological profile of Shangyaogou landslide in Songpan County

2.2 古滑坡复活特征

上窑沟古滑坡前缘局部 H1 已经发生复活，复活范围平均纵长约 80 m，宽约 60 m，滑体平均厚约 13 m，体积约 $6.24 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。现场调查表明，H1 已发生过数次滑动变形，因滑动距离小而未脱离滑床（图 4（a）），在 2978 m 处形成了高达 5.5 m 的下挫陡壁（图 4（b）），其侧壁陡坎也十分清晰（图 4（d））。坡表形成了 3 级相对较宽的平台，每级平台上发育有多条弧形拉裂缝（图 4（c）），延伸方向大体与坡体主滑方向垂直，并与两侧剪切裂缝连通。H1 后缘陡壁下为平台 I，宽 2~5 m。平台 II 宽约 10 m，上面发育 2 条长度大于 10 m，宽约 1 m，深 0.4~0.6 m 的拉裂槽。平台 II 外侧分布多条深 1.0~6.0 m 的裂缝，长 1~3 m，宽 0.5~1.5 m。平台 III 的表面裂缝密集发育，部分与

落水洞相连。在滑坡前缘沟道侧壁，可观察到滑动面位于基岩和上覆土体的界面附近。

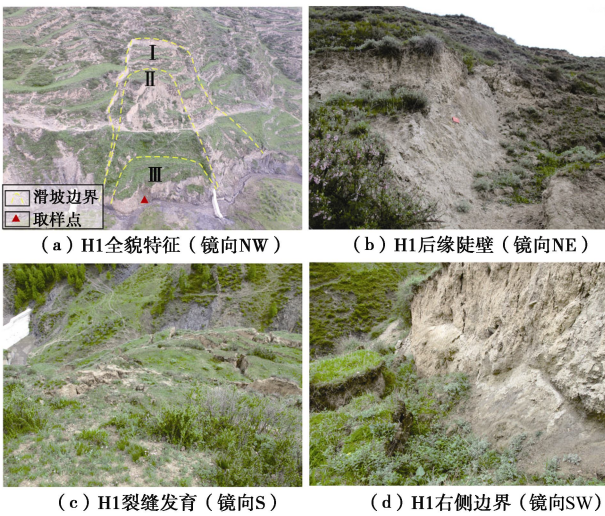


图 4 松潘县上窑沟滑坡前缘局部 H1 复活特征

Fig. 4 Reactivation characteristics of H1, a local part of Shangyaogou ancient landslide in Songpan County

2.3 滑坡复活机制

上窑沟古滑坡紧邻岷江断裂的次级断裂，断裂附近的岩体结构破碎，风化严重，力学性质较差。近年来，上窑沟滑坡下方的沟道中修建有 6 座拦挡坝，尤其是 #3 拦挡坝修建后，坝前淤积的堆积体增厚、排水能力减弱，坡脚遭到长时浸润软化和流水冲蚀，复活部分 H1 的前缘形成高陡临空面，滑坡前缘岩土体含水率增大，重力作用下发生蠕滑变形而形成坡表拉裂缝。拉裂缝利于地表水的汇流，缩短了雨水入渗路径，降雨沿裂缝下渗软化滑面并形成渗透压力，诱发其复活变形，呈后退式渐进变形破坏特点。

3 上窑沟滑坡失稳概率分析

上窑沟古滑坡前缘局部 H1 已复活，降雨作用下可能进一步变形破坏。当降雨强度较小时，可能仅有前缘 H1 发生滑动。而当降雨强度较大时，后部的滑体 H2 可能与 H1 连续滑入沟道中。目前上窑沟内 #1 和 #2 拦挡坝前已淤满，其他坝前也部分淤积，#3 和 #5 拦挡坝间的有效储淤量不足 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，已建的拦挡工程用于防治泥石流，未考虑滑坡大范围复活失稳问题。一旦上窑沟滑坡的 H1 和 H2 连续失稳，滑坡-碎屑流量远远超过拦挡坝的有效储淤空间而继续向下游运动，严重威胁着沟口附近国道 G213 和主城区居民的生命财产安全。因此，开展不同降雨条件下滑坡失稳概率分析对评价其潜在危险性非常必要。

3.1 岩土体物理力学参数

为获取滑坡稳定性计算所需的岩土体物理力学参

表 1 岩土体物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials

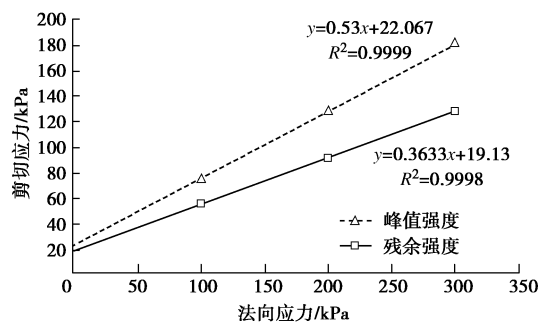
滑坡部位	天然重度	饱和重度	饱和体积	饱和渗透	天然峰值/天然残余		饱和峰值/饱和残余	
	/(kN·m ⁻³)	/(kN·m ⁻³)	含水率/%	系数/(m·s ⁻¹)	c/kPa	φ/(°)	c'/kPa	φ'/(°)
滑体	18.3	18.6	23	1.97×10 ⁻⁵	24/—	35/—	13/—	29/—
滑带	17.4	17.8	31	1.0×10 ⁻⁶	22/19	28/20	11/10	24/18

表 2 不同工况的滑坡稳定性系数计算结果

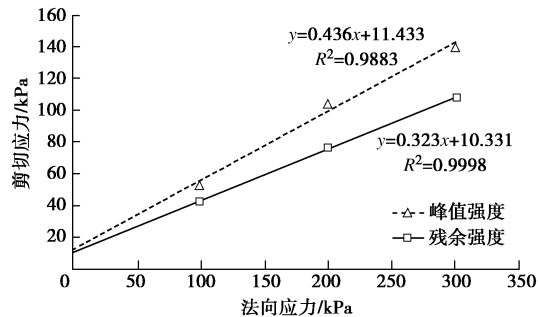
Table 2 Calculated results of landslide stability under different conditions

组别	计算部分	工况	稳定系数 F_s (M-P 法)	破坏概率 P_f /%	稳定状态
1	H1	天然状态	1.025	35.47	欠稳定
2		连阴雨 10 d (20 a 一遇)	0.887	99.12	不稳定
3	H2	天然状态	1.422	0.00	稳定
4		连阴雨 10 d (20 a 一遇)	1.156	17.63	稳定
5		连阴雨 10 d (50 a 一遇)	1.013	40.04	欠稳定
6		连阴雨 10 d (100 a 一遇)	0.969	96.36	不稳定

数,开展了现场重度试验、原位双环注水渗透试验、室内常规物理力学试验等。滑带土样品取自滑坡前缘剪出口,含石量(粒径≥2 mm)占15%~35%,属含砾粉质黏土。按照Kuenza等^[14]建议,当试样中含石量小于40%时,可采用粒径2 mm以下颗粒进行试验来表征滑带土的剪切强度。针对粒径2 mm以下的天然试样和饱和试样开展环剪试验,获取滑带土的峰值强度和残余强度(图5)。参考类似岩土体经验参数,确定各参数的综合取值(表1)。



(a) 滑带土天然试样



(b) 滑带土饱和试样

图 5 滑带土剪切强度参数

Fig. 5 Shear strength parameters of sliding zone soil

3.2 滑坡失稳概率分析

根据松潘县近 30 a 降雨资料可知,该区最大日降雨量为 50 mm (2002 年 6 月 23 日),最长连续降雨时

间达 22 d。由皮尔逊(P-III型)统计曲线分析不同重现期降雨极值情况,10 d 连阴雨(20, 50, 100 a 一遇)的雨量分别为 105, 113, 125 mm。采用有限元软件 Geo-studio^[15]的 Seep/w 和 Slope/w 模块分析天然状态、20, 50, 100 a 一遇的 10 d 连阴雨等 4 种工况下古滑坡体的稳定性,并基于蒙特卡洛方法^[16-17]分别计算黏聚力 c 标准差为 1 kPa,内摩擦角 ϕ 标准差为 1° 时的滑坡失稳概率^[18-19]。

根据《滑坡防治工程勘查规范》(GBT32864—2016)^[20],古滑坡前缘复活部分 H1 在天然状态下处于欠稳定状态(表 2),在 20 a 一遇的 10 d 连阴雨工况下处于不稳定状态,失稳概率达 99.12%。而 H2 在天然状态和 20 a 一遇的 10 d 连阴雨条件下的稳定性较好,在 50 a 一遇的 10 d 连阴雨条件下处于欠稳定状态,在 100 a 一遇的 10 d 连阴雨条件下处于不稳定状态,失稳概率达 96.36%。考虑滑坡的三维稳定性,同一降雨条件下,当滑坡 H1 失稳后,后部滑体 H2 受到的支撑力减小,失稳概率会有所增加。

4 滑坡灾害链运动过程模拟和危险性预测

基于不同降雨重现期条件下滑坡稳定性分析结果,采用 DAN^{3D} 软件^[21]分别对仅有 H1 复活失稳、H1 和后部 H2 连续复活失稳两种情况下的运动过程进行分析,并预测评价其危险性。

4.1 软件原理及建模过程

DAN^{3D} 软件是 McDougall 等^[22]在 DAN 软件基础上开发而成,将滑体视作等效流体,在拉格朗日坐标系中采用光滑质点流体动力学(SPH)的无网格插值方法,求解结合流体深度的圣维南方程,是一种连续介质力学模型^[23],可以较精确地模拟复杂三维地形条

件下滑坡的运动过程。与早期的 DAN 相比, DAN^{3D} 能够考虑三维地形对滑坡运动的影响, 模拟效果更真实。在建模过程中, 首先利用无人机航测 1:2000 的地形数据生成数字高程模型 (DEM), 然后设置滑坡失稳范围和滑体厚度信息。

4.2 流变模型和参数选取

DAN^{3D} 软件提供了多种流变关系模型, 包括 Frictional、Voellmy 和 Bingham 模型等。已有研究^[24-27]表明, Frictional 和 Voellmy 两种流变模型能较好反映滑坡运动行为, 二者对不同滑体材料、滑坡不同运动阶段的模拟结果有一定差异。Hung^[24]认为滑体运动速率和堆积特征受所选取模型的影响很大, Voellmy 模型比 Frictional 模型得到的速率小, 但堆积体前缘更凸出; 齐超等^[25]研究东河口滑坡运动过程时, 认为 Voellmy 模型对滑体运动距离模拟效果较好, 适用于碎屑流运动阶段, 而 Frictional 模型得到的运动距离小

于实际距离; Pirulli^[26]模拟意大利的 Thurwieser 岩崩运动过程时, 认为 Voellmy 模型更适用于模拟碎屑流的扩展过程、分布特征及运动速率; Salvatici 等^[21]反演意大利 Rotolon 滑坡在沟谷内转为泥石流运动全过程时, 采用 Voellmy 模型取得了较好的模拟效果。

上窑沟滑坡的滑体物质为粉质黏土夹碎石, 其性态和运动行为受水的影响较大, 在强降雨作用下失稳滑入沟道, 发生近流态运动。参考前人研究不同滑坡时建立的模型和参数库^[23-32] (表 3), 选取 Voellmy 模型, 并选用摩擦系数 $f=0.1$, 湍流系数 $\xi=300\text{ m/s}^2$ 。

4.3 滑坡运动过程模拟结果

由图 6 可知, 当仅有局部 (H1) 复活失稳时, 滑体滑入沟中碰撞对岸斜坡发生解体, 并向沟道两侧扩散, 一部分受拦挡坝的阻挡作用而停积于坝前, 一部分越过坝顶以碎屑流的形式顺沟道向下游运动。在 $t=5.6\text{ s}$ 时, 滑体刚进入沟道达到最大速率 19.13 m/s (图

表 3 Voellmy 和 Frictional 流变模型中相关参数统计表^[23-32]

灾害类型	Frictional 模型		Voellmy 模型	
	动摩擦角 $\phi/(\text{^\circ})$	单元块体摩擦角 $\phi_b/(\text{^\circ})$	摩擦系数 f	湍流系数 $\xi/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
岩质崩塌	35~40	10~30	0.1~0.35	450~1000
碎屑流	35	23~30	0.07~0.1	200~250
岩崩-碎屑流	35	8~31	0.05~0.2	200~400
岩体-冰屑崩滑	20~35	10~20	0.03~0.1	1000
泥石流	35	22~29	0.05~0.2	200~500
火山岩崩	30~35	9~13	0.05~0.1	100~140

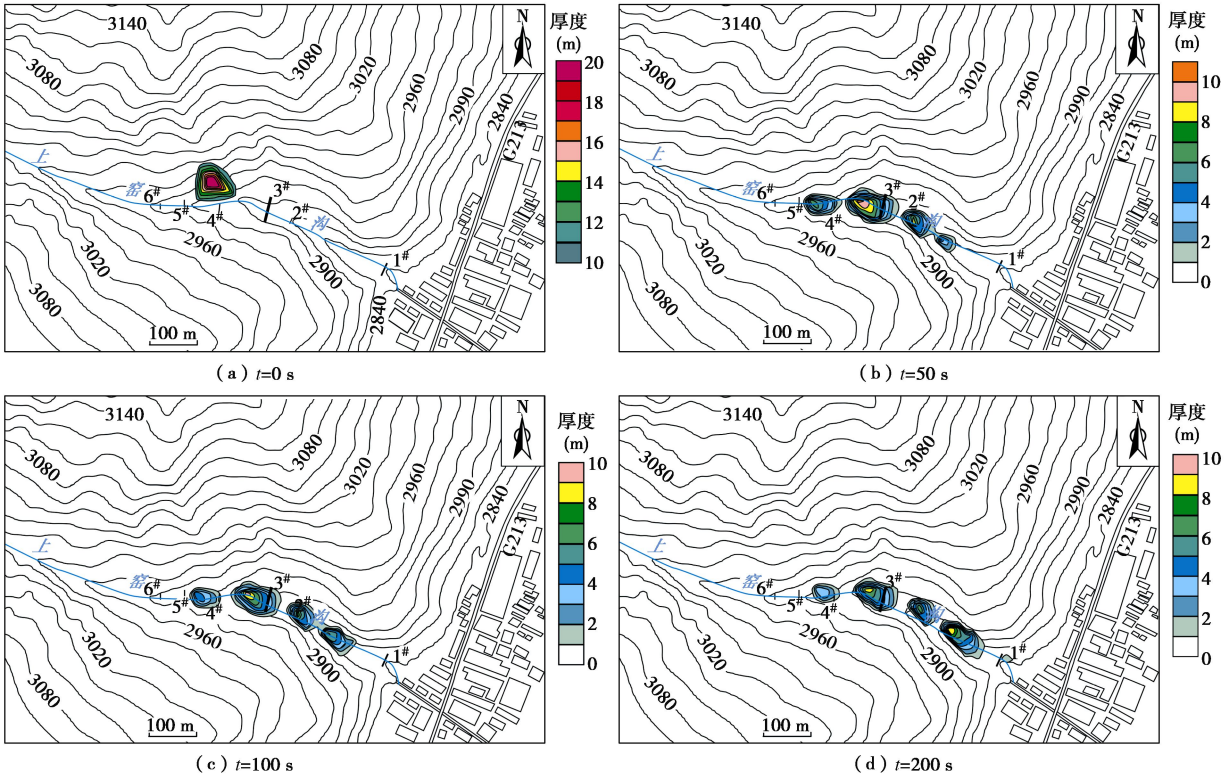


图 6 局部复活 (H1) 失稳运动过程中滑体厚度分布图

Fig. 6 Distribution of depth of accumulation during movement process of H1

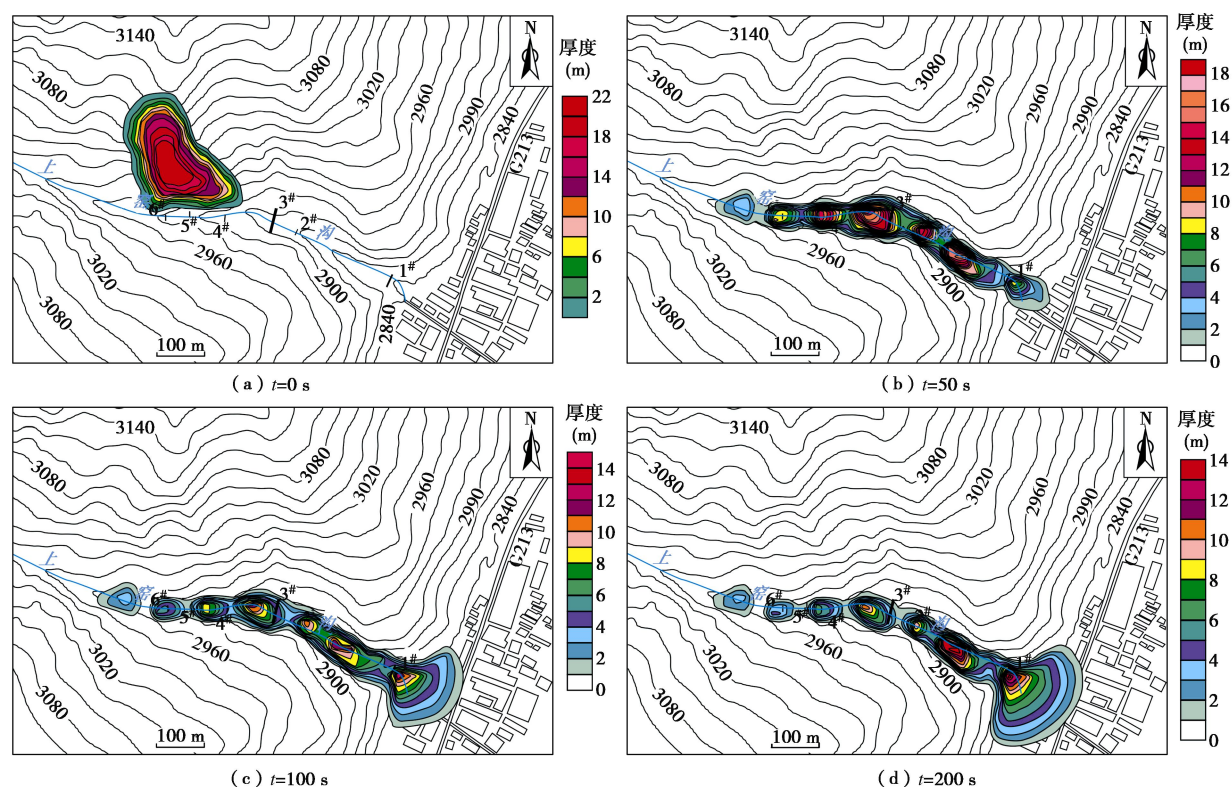


图7 H1 和 H2 连续复活失稳运动过程中滑体厚度分布图

Fig. 7 Distribution of thickness of sliding mass during continuous movement process of H1 and H2

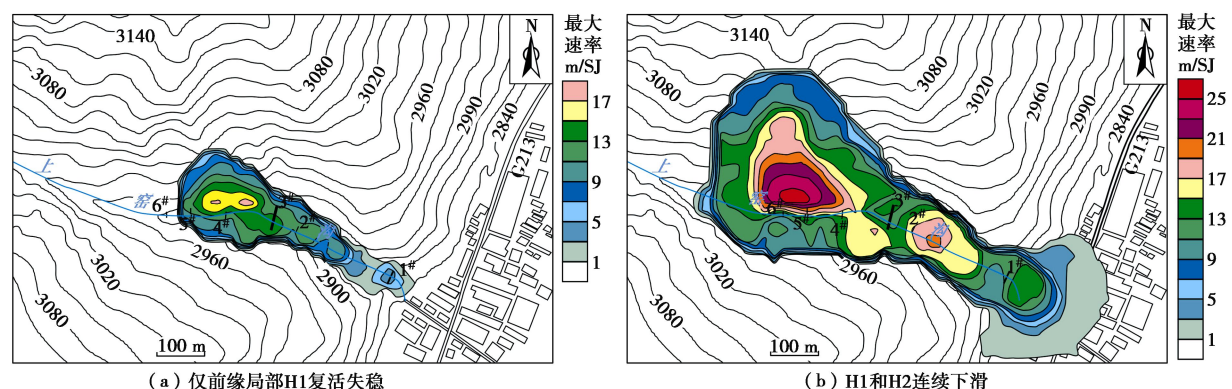


图8 滑体运动过程最大速率分布图

Fig. 8 Distribution of maximum velocity during movement of landslide

8)。受拦挡坝阻挡,滑体在坝前运动速率减小,而翻越拦挡坝后,重力势能转化为动能,速率又稍有增加,之后在沟道中运动时速率逐渐减小直至最终停止。滑体运动 200 s 后,堆积体分布范围基本稳定,最远运移距离约 350 m,前缘未抵达居民区。在运动过程中,堆积体厚度随沟道微地貌改变而变化,最终呈现出沿中轴线中间厚两边薄的分布特征,最厚达 9 m。

由图 7 可知,当前缘 H1 和后部滑体 H2 连续下滑时,经过 200 s 后堆积体分布范围基本稳定,最远运移距离达 550 m。除拦挡坝后残留小部分外,滑体一部分堆积在下游沟道中,另一大部分溢出排导槽并向居民区呈扇形散开,并在居民区形成平均厚度约 5 m

的堆积体。滑体运动 9.9 s 时达到最大速率 27.09 m/s,冲入沟口居民区后最大速率达 13.84 m/s。

4.4 滑坡危险性评价

滑坡危险性评价实际上是对触发因素作用下产生滑坡灾害的可能性预判,结合静态环境因素和动态触发因素进行的危险程度预测。通过分析不同诱发因素重现期条件下滑坡失稳概率,综合考虑滑坡堆积体分布范围、堆积厚度和冲击速率等,按滑坡-碎屑流潜在危险程度将滑坡影响区划分为高危险区、中危险区和低危险区(图 9)。在 20 a 一遇的 10 d 连阴雨条件下,仅有前缘复活部分 H1 失稳,滑体最终停积在沟道内,对沟口居民区的危险性小;而在 100 a 一遇的 10 d 连

阴雨时, H2 跟随 H1 连续失稳下滑, 滑体可以抵达国道 G213, 直接威胁着沟口附近居民区和公路安全。滑坡危险程度高的区域为拦挡坝下游的沟道两侧和排导槽首端至国道 G213 间半径约 150 m 的扇形区, 该区滑体堆积厚, 冲击能量大; 危险程度中等的区域主要分布于滑坡体波及范围内高危险区的外侧, 沟口居民区附近的中危险区主要位于高危险区外围的内、外径分别为约 150 m 和 200 m 的环形区域内, 堆积体厚度相对较小且冲击能量低; 国道 G213 东侧的大部分范围和距排导槽 200 m 以外的区域遭受滑坡-碎屑流的危险程度低。

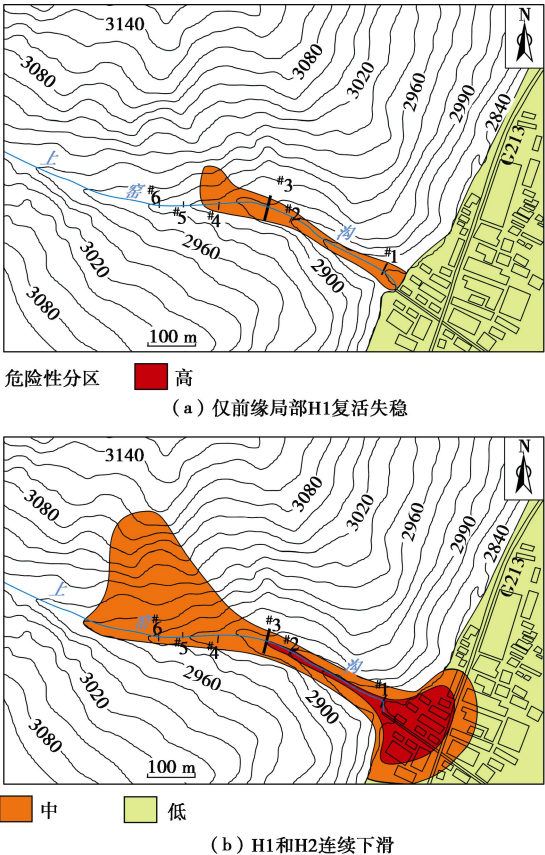


图 9 滑坡-碎屑流危险性分区图

Fig. 9 Hazard zoning map of landslide-debris flow

需要指出, 本次研究中仅考虑了滑坡失稳的两种简单情况, 真实的滑坡失稳过程可能更为复杂。在前缘 H1 失稳后, 后续块体的失稳破坏可能在时间上出现间断性和延滞性, 如果每次失稳破坏的滑体方量较小, 形成灾害的危险性也较小。若在计算过程中去掉前缘 H1 的支撑作用而仅考虑后部 H2 失稳后的运动, 由于前缘 H1 方量相对较小, 堆积体的运动速率和分布范围等计算结果受到的影响不大。

另外, 泥石流拦挡坝截留住了一部分滑体, 同时也降低了滑体的动能, 对滑坡-碎屑流灾害链起到一定的抑制作用。因此, 有必要及时清理坝前堆积体, 以

保证足够的储淤空间。同时, 针对上窑沟滑坡前缘局部复活的现状, 应及时对滑体上的拉裂缝、落水洞进行填土压实, 对前缘坡脚适当加固, 避免其逐级解体后堆积于沟道中。

5 结 论

本文以青藏高原东缘四川松潘县上窑沟古滑坡为研究对象, 在剖析古滑坡复活特征的基础上, 分析其不同重现期降雨条件下的破坏范围和失稳概率, 并采用 DAN^{3D} 软件模拟研究了滑坡运动过程和堆积范围, 开展了古滑坡复活的危险性预测评价, 得到以下 4 点主要结论。

(1) 受坡脚浸润侵蚀和强降雨的影响, 上窑沟古滑坡前缘局部 H1 已经复活, 呈现出多级序、多期次活动的特点, 目前地表宏观变形迹象清晰, 存在进一步失稳可能。

(2) 前缘局部 H1 在天然状态下处于欠稳定状态, 在 20 a 一遇的 10 d 连阴雨条件下处于不稳定状态, 失稳概率达 99.12%, 而 H2 在天然状态和 20 a 一遇的 10 d 连阴雨条件下的稳定性较好, 在 100 a 一遇的 10 d 连阴雨条件下处于不稳定状态, 失稳概率达 96.36%, 可能出现古滑坡后部 H2 与前部 H1 连续失稳下滑。

(3) 仅前缘局部 H1 失稳时, 滑体最远运移距离约 350 m, 堆积体最前缘不会抵达居民区; 而当后部 H2 和前部 H1 连续失稳时, 滑体最远运移距离可达 550 m, 最大运动速率达 27.09 m/s, 并可能在居民区形成平均厚度约 5 m 的堆积体。

(4) 对沟口居民区而言, 排导槽首端至国道 G213 间半径约 150 m 的扇形区遭受滑坡-碎屑流的危险性高, 高危险区外围的内、外径分别为 150 m 和 200 m 的环形区遭受滑坡-碎屑流的危险性中等, 国道 G213 东侧的大部分范围和距排导槽 200 m 以外的区域遭受滑坡-碎屑流的危险性低。

致 谢: 松潘县气象局提供了研究区降雨数据, 中国地质科学院地质力学研究所汪西海教授级高工、刘筱怡博士、宿方睿硕士、郭桥桥硕士和川建勘察设计院王献礼工程师等参与了野外工作, 一并深表谢意。

参考文献:

[1] 杨为民, 黄 晓, 张永双, 等. 甘肃南部坪定—化马断裂带滑坡变形特征及其防治[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 1925 - 1935. (YANG Wei-ming, HUANG Xiao, ZHANG Yong-shuang, et al. The deformation characteristics of the landslide along Pingding-Huama active fault zone and its prevention and control[J]. Geological Bulletin of China, 2013,

- 32(12): 1925 – 1935. (in Chinese))
- [2] 李明辉, 郑万模, 石胜伟, 等. 丹巴县甲居滑坡复活机制及其稳定性分析[J]. 山地学报, 2008, 26(5): 577 – 582. (LI Ming-hui, ZHENG Wan-mo, SHI Sheng-wei, et al. The revival mechanism and stability analysis to Jiayu landslide of Danba county in Sichuan province[J]. Journal of Mountain Science, 2008, 26(5): 577 – 582. (in Chinese))
- [3] 张永双, 郭长宝, 周能娟. 金沙江支流冲江河巨型滑坡及其局部复活机理研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 445 – 453. (ZHANG Yong-shuang, GUO Chang-bao, ZHOU Neng-juan. Characteristics of Chongjianghe landslide at a branch of Jinsha River and its local reactivation mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 445 – 453. (in Chinese))
- [4] CRUDEN D M, VARNES D J. Landslide types and processes, special report, transportation research board[J]. National Academy of Sciences, 1996, 247: 36 – 75.
- [5] BURDA J, HARTVICH F, VALENTA J, et al. Climate-induced landslide reactivation at the edge of the Most Basin (Czech Republic): progress towards better landslide prediction[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2013, 13: 361 – 374.
- [6] NEGI I S, KUMAR K, KATHAIT A, et al. Cost assessment of losses due to recent reactivation of Kaliasaur landslide on National Highway 58 in Garhwal Himalaya[J]. Natural Hazards, 2013, 68: 901 – 914.
- [7] RONCHETTI F, BORGATTI L, CERVI F, et al. The Valoria landslide reactivation in 2005–2006 (Northern Apennines, Italy)[J]. Landslides, 2007, 4: 189 – 195.
- [8] DENG H, WU L Z, HUANG R Q, et al. Formation of the Siwanli ancient landslide in the Dadu River, China[J]. Landslides, 2016: 1 – 10.
- [9] 邓建辉, 陈菲, 尹虎, 等. 泸定县四湾村滑坡的地质成因与稳定评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 1945 – 1950. (DENG Jian-hui, CHEN Fei, YIN Hu, et al. Geological origin and stability evaluation of siwancun landslide in luding county[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 1945 – 1950. (in Chinese))
- [10] 郭健, 许模, 赵勇, 等. 黑水河库区某古滑坡形成及复活机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(6): 721 – 728. (GUO Jian, XU Mo, ZHAO Yong, et al. Formation and reactivation mechanism of an ancient landslide in Heishui reservoir of Minjiang River, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2013, 40(6): 721 – 728. (in Chinese))
- [11] 李明辉, 李浩然, 王东辉. 大渡河上游亚喀则滑坡复活变形机理及发展趋势分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 305 – 309. (LI Ming-hui, LI Hao-ran, WANG Dong-hui. The revival mechanism and development tendency of Yakaze landslide in the upper reaches of Dadu River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 305 – 309. (in Chinese))
- [12] 付博, 严明, 李波, 等. 岷江某水电站库区#1滑坡复活机制分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(1): 11 – 16. (FU Bo, YAN Ming, LI Bo, et al. Analysis of revivification mechanism for a landslide on a hydropower station reservoir in Minjiang[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(1): 11 – 16. (in Chinese))
- [13] 司建涛, 刘顺. 青藏高原东缘岷江断裂构造特征、变形序列和演化历史[J]. 四川地质学报, 2008, 28(1): 1 – 5. (SI Jian-tao, LIU Shun. Geological features, deformation sequence and evolution of the Minjiang fault on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Geologica Sichuan, 2008, 28(1): 1 – 5. (in Chinese))
- [14] KUENZA K, TOWHATA I, ORENSE R P, et al. Undrained torsional shear tests on gravelly soils[J]. Landslides, 2004, 1(3): 185 – 194.
- [15] GEO-SLOPE International Ltd. Seepage modeling with SEEP/W 2007 version: an engineering methodology[M]. 3rd ed. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd, 2008.
- [16] 李强, 管昌生, 周武. 基于 Monte-Carlo 法的滑坡稳定可靠性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增刊): 1674 – 1676. (LI Qiang, GUAN Chang-sheng, ZHOU Wu. Reliability analysis of landslide stability by Monte-Carlo method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(S0): 1674 – 1676. (in Chinese))
- [17] 邓志平, 李典庆, 曹子君, 等. 考虑地层变异性和土体参数变异性的边坡可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 986 – 996. (DENG Zhi-ping, LI Dian-qing, CAO Zi-jun, et al. Slope reliability analysis considering geological uncertainty and spatial variability of soil parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 986 – 996. (in Chinese))
- [18] 吴迪, 简文彬, 徐超. 残积土抗剪强度的环剪试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2045 – 2050. (WU Di, JIAN Wen-bin, XU Chao. Research on shear strength of residual soils by ring shear tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,

- 32(7): 2045 – 2050. (in Chinese))
- [19] 李小伟, 吴益平, 张 荣, 等. 滑带土抗剪强度特性的环剪试验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(27): 273 – 277. (LI Xiao-wei, WU Yi-ping, ZHANG Rong, et al. Research on shear strength behavior of slide zone soil in ring shear tests[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(27): 273 – 277. (in Chinese))
- [20] GB/T 32864—2016 滑坡防治工程勘查规范[S]. 2016. (GB/T 32864—2016 Code for geological investigation of landslide prevention[S]. 2016. (in Chinese))
- [21] SALVATICI T, MORELLI S, PAZZI V, et al. Debris flow hazard assessment by means of numerical simulations: implications for the Rotolon creek valley (Northern Italy)[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(4): 636 – 648.
- [22] MCDOUGALL S, HUNGR H. A model for the analysis of rapid landslide motion across three-dimensional terrain[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41: 1084 – 1097.
- [23] HUNGR O, EVANS S G. Rock avalanche runout prediction using a dynamic model[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides. Rotterdam, 1996.
- [24] 王国章, 李 滨, 冯 振, 等. 重庆武隆鸡冠岭岩质崩滑-碎屑流过程模拟[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5): 101 – 106. (WANG Guo-zhang, LI Bin, FENG Zhen, et al. Simulation of the process of the Jiguanling rock avalanche in Wulong of Chongqing[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(5): 101 – 106. (in Chinese))
- [25] 齐 超, 邢爱国, 殷跃平, 等. 东河口高速远程滑坡-碎屑流全程动力特性模拟[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 334 – 339. (QI Chao, XING Ai-guo, YIN Yue-ping, et al. Numerical simulation of dynamic behavior of Donghekou rockslide-debris avalanche[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(3): 334 – 339. (in Chinese))
- [26] PIRULLI M. The Thurwieser rock avalanche (Italian Alps): Description and dynamic analysis[J]. Engineering Geology, 2009, 109(1/2): 80 – 92.
- [27] PIRULLI M, SCAVIA C, HUNGR O. Determination of rock avalanche run-out parameters through back analyses[C]// Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides. London, 2004: 1361 – 1366.
- [28] CROSTA G B, CHEN H, FRATTINI P. Forecasting hazard scenarios and implications for the evaluation of countermeasure efficiency for large debris avalanches[J]. Engineering Geology, 2006, 83: 236 – 253.
- [29] SOSIO R, CROSTA G B, HUNGR O. Complete dynamic modeling calibration for the Thurwieser rock avalanche (Italian Central Alps)[J]. Engineering Geology, 2008, 100(1/2): 11 – 26.
- [30] YIN Y P, CHENG Y L, LIANG J T, et al. Heavy-rainfall-induced catastrophic rockslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Landslides, 2015, 13(1): 9 – 23.
- [31] 王 磊, 李 滨, 高 杨, 等. 大型厚层崩滑体运动特征模拟研究: 以重庆武隆县羊角场镇大巷危岩为例[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 251 – 259. (WANG Lei, LI Bin, GAO Yang, et al. Run-out prediction of large thick-bedded unstable rock: a case study of Daxiang unstable rock in Yangjiao town, Wulong county, Chongqing[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 251 – 259. (in Chinese))
- [32] HUNGR O. A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(4): 610 – 623.