

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.910>



单体库岸滑坡及其次生涌浪灾害风险分析

王芳¹, 殷坤龙^{1*}, 桂蕾¹, 陈丽霞²

1. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘要: 水库滑坡次生涌浪灾害是库水运营过程中重要的灾害类型, 开展滑坡及其次生涌浪灾害风险分析, 能够合理确定并评价滑坡及其次生涌浪灾害对生命及财产的影响程度, 从而为采取经济有效的减灾应急措施提供理论依据和技术支持. 以三峡库区万州区塘角1号滑坡为例, 探讨不同库水位降雨组合工况下, 考虑空间差异性的单体滑坡危险性分析方法; 确定滑坡次生涌浪灾害影响范围; 完善滑坡及其次生涌浪灾害承灾体易损性评价方法; 绘制最危险工况下塘角1号滑坡及其次生涌浪灾害经济风险和人口风险分布图, 得出: 塘角1号滑坡最危险工况为库水位175~145 m+3日100 mm降雨. 在该工况下, 塘角1号滑坡及其次生灾害总经济风险为2 239万元; 坡体上室内人口总风险为0.55人. 研究成果以期为指导该类滑坡减灾防灾提供思路和依据.

关键词: 滑坡; 涌浪; 风险分析; 库岸; 三峡库区.

中图分类号: P642.22

文章编号: 1000-2383(2018)03-0899-11

收稿日期: 2017-12-20

Risk Analysis on Individual Reservoir Bank Landslide and Its Generated Wave

Wang Fang¹, Yin Kunlong^{1*}, Gui Lei², Chen Lixia²

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The reservoir landslide and its generated surge are major disasters in the operation of reservoir water and their influence degree on life and property can be reasonably determined and evaluated by risk analysis, which shall provide theoretical basis and technical support for economical and effective emergency measures of disaster reduction. Tangjiao No.1 landslide, in Wanzhou District, Three Gorges Reservoir, was taken as an example in this study. Firstly, the method of hazard analysis on individual landslide by considering the spatial difference and different water levels and rainfall scenarios was discussed. Secondly, the impact range of landslide generated wave was determined. Thirdly, the methods of vulnerability analysis on the elements at risk in the impact range of landslide and its generated wave were studied. Finally, under the most dangerous scenario, economic risk map of Tangshan No. 1 landslide and its generated wave and population risk map of Tangshan No. 1 landslide were obtained. The results show that the most dangerous scenario for Tangshan No. 1 landslide was water level decreasing from 175 m to 145 m with a 3-day-rain of 100 mm daily rainfall. Under this scenario, the total economic risk of Tangshan No. 1 landslide and its generated wave was 22.39 million RMB; the total indoor population risk of the landslide was 0.55 person. The results of this study could be used in guiding reservoir bank landslide disaster prevention and mitigation.

Key words: landslides; landslide generated wave; risk analysis; reservoir bank; Three Gorges Reservoir.

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.41572292, 41601563, 41641012).

作者简介: 王芳(1977-), 女, 博士研究生, 主要从事地质灾害风险评估的研究. ORCID: 0000-0002-1447-4800. E-mail: fangwang@cug.edu.cn

*** 通信作者:** 殷坤龙, ORCID: 0000-0002-3547-1633. E-mail: yinkl@126.com

引用格式: 王芳, 殷坤龙, 桂蕾, 等, 2018. 单体库岸滑坡及其次生涌浪灾害风险分析. 地球科学, 43(3): 899-909.

0 引言

滑坡灾害风险研究是滑坡灾害研究领域的前沿和热点课题,开展滑坡灾害风险分析对指导滑坡灾害减灾防灾具有重要意义.单体滑坡风险分析理论已逐步由定性、半定量发展到量化,自 2005 年国际滑坡风险管理会议上 Fell *et al.* (2005) 提出单体滑坡灾害风险定量计算公式后,学者们围绕滑坡灾害风险,尤其是风险的核心内容,滑坡灾害危险性和承灾体易损性,开展了一系列有益探索.例如:滑坡灾害危险性方面,探讨了滑坡灾害破坏概率的计算方法 (Afungang and Bateira, 2016; Miao *et al.*, 2016; 邱海军等, 2016), 滑坡破坏后其影响范围的确定方法 (Hung and McDougall, 2009; Iverson *et al.*, 2015; 葛云峰等, 2016) 以及滑坡破坏后可作用于承灾体概率的计算方法 (Luna *et al.*, 2013; Nicolet *et al.*, 2016) 等; 滑坡灾害易损性方面,研究了易损性定量分析模型的表达方式 (Li *et al.*, 2010; Uzielli *et al.*, 2014), 滑坡对承灾体的作用强度 (吴越等, 2011; 杜娟, 2012) 和承灾体的抗灾能力 (Fotopoulou and Pitilakis, 2012; Zhang and Zhang, 2014) 的分析方法等. 尽管目前单体滑坡灾害风险研究取得了诸多重要成果,但是针对单体滑坡危险性的空间差异性还鲜有成果 (桂蕾, 2014).

同时,滑坡次生灾害风险 (例如:库岸滑坡涌浪灾害风险) 的研究仍处于初期探索阶段.纪虹和司鹄 (2013) 以定性半定量的评价方法,针对库岸滑坡涌浪灾害影响范围内的承灾体,建立了易损性评价指标体系及模型; Yin *et al.* (2015) 建立了流固耦合流体动力学数值模型,预测了潜在滑坡涌浪的影响范围,为潜在滑坡灾害风险评估和预警提供依据; Daniele *et al.* (2015) 通过遥感解译手段识别滑坡,并将滑坡涌浪作为评价指标之一,分析了库区大坝风险; Wood and Peters (2014) 利用各向异性的行人疏散模型来获得人员暴露在构造运动及滑坡涌浪灾害范围内的时间,指出滑坡引起的涌浪灾害风险较地震大.

本文以三峡库区万州区塘角 1 号滑坡为例,探讨考虑空间差异性的单体滑坡危险性分析方法、滑坡及其次生涌浪灾害承灾体易损性的分析方法以及单体库岸滑坡及其次生涌浪灾害经济风险和人口风险分布图的制图方法.研究成果以期为指导单体库岸滑坡减灾防灾提供思路和依据.

1 塘角 1 号滑坡概况

塘角 1 号滑坡位于重庆市万州区,为三峡库区长江右岸库岸滑坡.滑坡发育于逆向斜坡,地形整体坡度为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$,剖面上呈阶梯状,平面上呈箕形.滑坡前缘高程为 135~145 m,后缘高程为 327 m,平均厚度 20 m,面积 $133.62\times 10^4\text{ m}^2$,体积 $2\,672.4\times 10^4\text{ m}^3$,为特大型土质滑坡.滑体物质主要为粉质粘土夹碎块石;滑带土与滑体土物质组成无明显差异,部分地带断续见灰白色粘土,吸水后软化极快,粘性强;滑床为侏罗系中统上沙溪庙组紫红色泥岩、砂岩,产状为 $170^{\circ}\angle 5^{\circ}$.

该滑坡自上世纪 90 年代初开始变形,2000 年、2001 年局部发现变形迹象,2003 年滑坡变形加剧,2007 年滑坡前部形成众多长大贯通裂缝,2008 年、2009 年在库区退水和暴雨作用下,滑坡前缘局部发生次级滑动,且变形向坡体后部发展,2013 年、2014 年变形进一步加剧,滑坡前缘均有塌岸形成.

2 滑坡及其次生涌浪灾害危险性

2.1 滑坡稳定性分区

基于 2007—2012 年塘角 1 号滑坡地表位移 GPS 监测数据及相应时段库水位调度和降雨数据分析,塘角 1 号滑坡处于整体上基本稳定、局部阶跃式缓慢变形状态中,具有牵引式滑坡的变形特征.该滑坡局部稳定性差异较大:滑坡前部欠稳定,变形明显,受库水位和降雨联合作用,尤以库水位下降对滑坡稳定性影响较大,前缘中部最大累积位移达 21 m;滑坡中后部为基本稳定,其稳定性状态主要受降雨影响,最大累积位移均在 150 mm 以下.

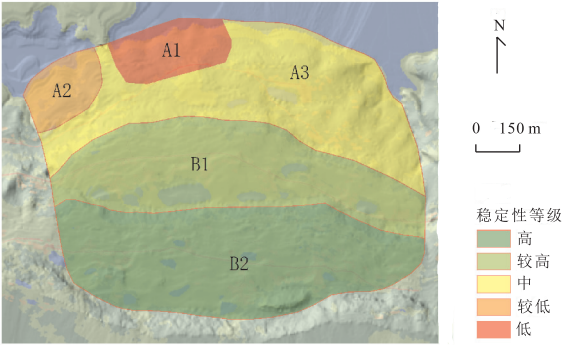


图 1 塘角 1 号滑坡稳定性分区图

Fig.1 Stability classification map of Tangjiao No.1 landslide

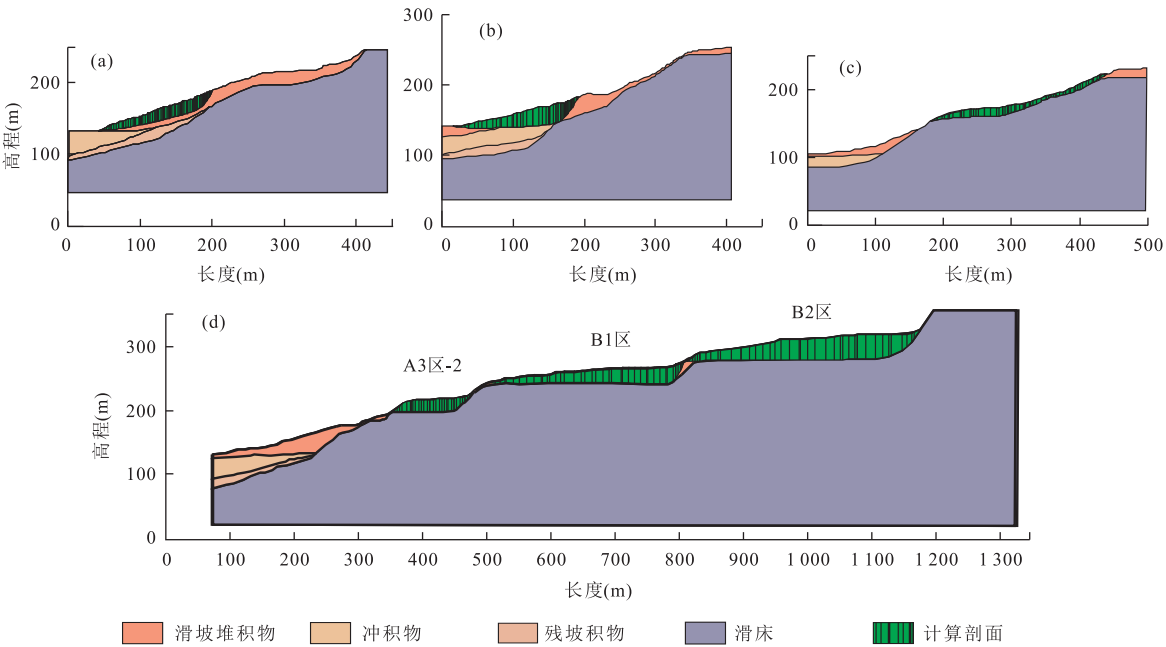


图 2 塘角 1 号滑坡各分区剖面计算模型

Fig.2 Profile calculation model of each part of Tangjiao No.1 landslide

a.A1 区剖面;b.A2 区剖面;c.A3 区-1 剖面;d.A3 区-2、B1 区、B2 区剖面

表 1 塘角 1 号滑坡计算工况

Table 1 Calculation scenarios of Tangjiao No.1 landslide

工况	库水位	降雨
工况 1	175 m 降至 145 m	单日 0 mm
工况 2	175 m 降至 145 m	单日 100 mm
工况 3	175 m 降至 145 m	3 日 50 mm
工况 4	175 m 降至 145 m	3 日 100 mm

表 2 塘角 1 号滑坡材料参数(曹颖,2016)

Table 2 Material parameters of Tangjiao No.1 landslide

参数	状态	滑体	滑床
重度(kN/m³)	天然	19.8	25.3
	饱和	20.6	25.7
内聚力 C(kPa)	天然	26.3	220
	饱和	18.2	205
内摩擦角 φ(°)	天然	14.2	35.9
	饱和	9.4	35.6
渗透系数(m/s)	天然	2.10E-06	/
	饱和	5.50E-07	/
体积含水量(m³/m³)	天然	0.301	/
	饱和	0.305	/

为了考虑空间差异性对塘角 1 号滑坡危险性的影响,依据滑坡局部变形情况,划分滑坡不同稳定性区域(图 1)。塘角 1 号滑坡共划分为 5 个区域,分别对应 5 个稳定性等级。其中 A1、A2、A3 为涉水区域、B1、B2 为非涉水区域。A 区域稳定性等级较 B 区域

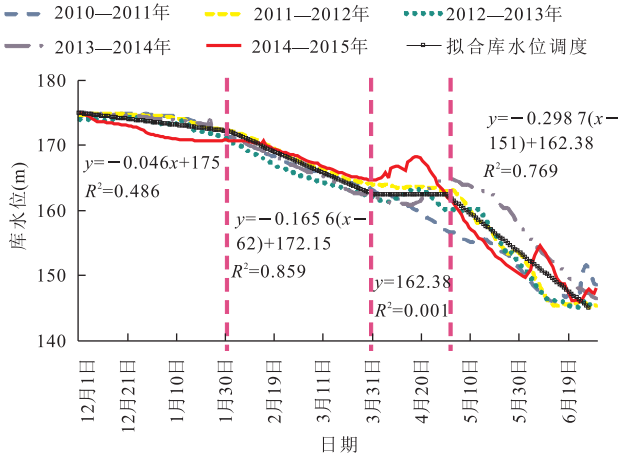


图 3 塘角 1 号滑坡前缘库水位 175~145 m 调度图

Fig. 3 Scheduling of the water level decreasing from 175 m to 145 m in front of Tangjiao No.1 landslide

低,其中 A1 区域稳定性最差,A3 区域稳定性相对较好;B2 区域较 B1 区域稳定性稍高。

2.2 滑坡破坏概率计算

单体滑坡危险性通常以概率来表征,此处为涉水滑坡,不考虑滑坡远程运移概率,仅以滑坡破坏概率表示其危险性。此处,选择滑坡各稳定性分区典型计算剖面(如图 2),基于 Geostudio 数值模拟平台,模拟计算各分区滑坡破坏概率。

2.2.1 数值模拟计算工况 根据塘角1号滑坡变

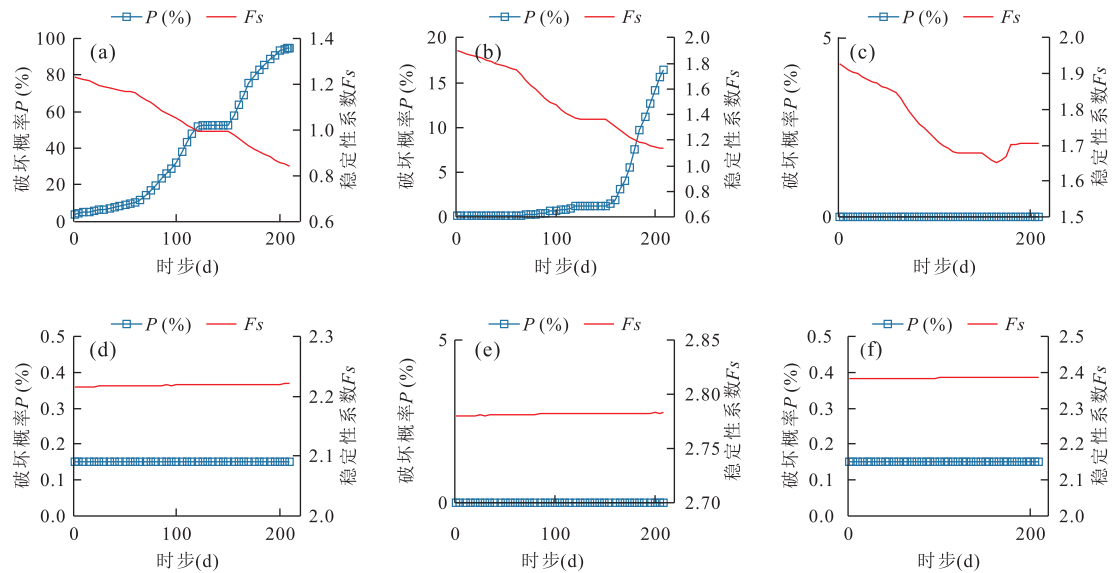


图 4 塘角 1 号滑坡工况 1 下各分区破坏概率及稳定性曲线

Fig.4 Failure probability and safety factor curve of Tangjiao No.1 landslide under Scenario No.1
a.A1 区;b.A2 区;c.A3 区-1;d.A3 区-2;e.B1 区;f.B2 区

表 3 塘角 1 号滑坡各工况下破坏概率及稳定性计算结果

Table 3 Failure probability and safety factor of Tangjiao No.1 landslide under all the Scenarios

工况	时步	破坏概率 $P(\%)$						稳定性系数 F_s					
		A1	A2	A3-1	A3-2	B1	B2	A1	A2	A3-1	A3-2	B1	B2
工况 1	207	94.55	16.05	0.00	0.15	0.00	0.15	0.846	1.138	1.705	2.221	2.783	2.385
	208	94.70	16.20	0.00	0.15	0.00	0.15	0.844	1.137	1.706	2.221	2.783	2.385
	209	95.00	16.40	0.00	0.15	0.00	0.15	0.843	1.135	1.706	2.221	2.783	2.385
工况 2	207	94.95	16.05	0.00	0.15	0.00	0.15	0.843	1.138	1.703	2.171	2.781	2.383
	208	95.10	16.25	0.00	0.15	0.00	0.15	0.841	1.136	1.703	2.171	2.805	2.384
	209	95.25	16.55	0.00	0.15	0.00	0.15	0.840	1.135	1.703	2.171	2.805	2.384
工况 3	207	94.95	16.05	0.00	0.15	0.00	0.15	0.843	1.138	1.704	2.171	2.781	2.385
	208	95.10	16.25	0.00	0.15	0.00	0.15	0.841	1.136	1.703	2.171	2.781	2.385
	209	95.25	16.70	0.00	0.15	0.00	0.15	0.839	1.134	1.703	2.171	2.781	2.385
工况 4	207	94.95	16.05	0.00	0.15	0.00	0.15	0.843	1.138	1.703	2.171	2.781	2.383
	208	95.10	16.30	0.00	0.15	0.00	0.15	0.841	1.136	1.702	2.171	2.781	2.383
	209	95.25	16.70	0.00	0.15	0.00	0.15	0.839	1.134	1.702	2.171	2.781	2.383

形与库水位、降雨监测曲线,选择滑坡变形较为敏感的库水位下降段和降雨联合作用作为本次计算工况,如表 1 所示。

库水位调度按照 2010—2015 年 5 个水位年中库水位从 175 m 降至 145 m 的实际工况拟合得到,如图 3 所示。

拟合所得库水位 175~145 m 调度曲线共分为 4 个阶段,历时 209 d(时步);降雨日根据 2010—2015 年最大降雨日、3 日连续降雨日的统计以及工况 1 下滑坡稳定性计算结果综合确定。

滑坡数值模拟所需参数如表 2 所示。

2.2.2 数值模拟计算结果 如图 4 所示,工况 1 下,

各分区稳定性计算结果与前述定性评价基本一致,其中,A1 区稳定性最差、A2 区次之,A3、B1 和 B2 区较稳定.同时,对于涉水的 A1、A2 和 A3-1 区,滑坡稳定性(破坏概率)总体随库水位的降低(时步增加)而降低(增大),其中,A3-1 区稳定性在库水位下降末期有小幅抬升,分析其主要原因在该抬升区段,库水位已降至滑坡前缘剪出口以下,对滑坡稳定性影响减小所致.而不涉水的 B1、B2 和 A3-2 区,受库水位下降工况影响较小,稳定性和破坏概率随时步的推移变化甚微,此结果与实际情况相符。

依据工况 1,综合选取其中最危险工况叠加降雨,即:工况 2 中单日 100 mm 降雨设置于时步 207;

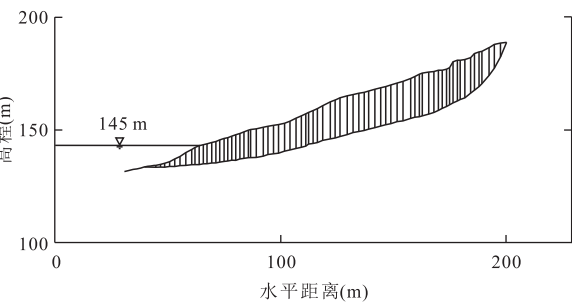


图 5 塘角 1 号滑坡 A1 区剖面条分图

Fig.5 Slices of A1 part of Tangjiao No.1 landslide

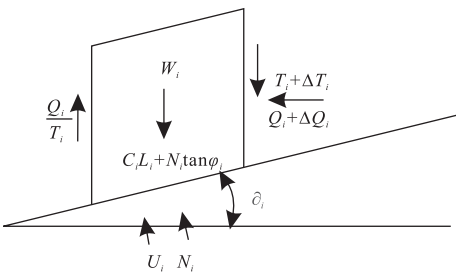


图 6 条块受力分布图

Fig.6 Forces of block

工况 3 和 4 中的 3 日降雨设置于时步 207~209,四种工况末 3 天的模拟计算结果如表 3.受降雨影响,滑坡各剖面稳定性普遍降低,总体而言,降雨强度越大、降雨持时越长,滑坡稳定性降低越明显,同时,各剖面稳定性对降雨强度和降雨时长的敏感性存在差异.降雨对各剖面滑坡破坏概率的影响相对较小,尤其是 A3、B1 和 B2 区,不同降雨工况下破坏概率几乎不变.综上,选择最危险工况(工况 4 时步 209)的破坏概率表征塘角 1 号滑坡危险性.

2.3 滑坡次生灾害涌浪影响范围分析

基于前述滑坡稳定性及破坏概率分析结果,选择破坏概率最大的 A1 区,分析其在最危险工况,即:库水位 145 m+大暴雨,可能产生的滑坡次生灾害涌浪的影响范围.采用条分法计算滑坡入江速度及方量.首先对 A1 区滑坡计算剖面进行垂直分块,共划分为 76 个条块,如图 5 所示.分析每一条块在水平方向和竖直方向的受力情况,见图 6.假设条块发生位移时为刚体运动,根据牛顿第二定律:

水平方向:

$$\Delta T_i - (C_i L_i + N_i \tan \varphi) \cos \partial_i + (U_i + N_i) \sin \partial_i = M_i a_{ix}, \tag{1}$$

竖直方向:

$$W_i + \Delta Q_i - (C_i L_i + N_i \tan \varphi_i) \sin \alpha_i - (U_i + N_i) \cos \alpha_i = M_i a_{iy}, \tag{2}$$

表 4 塘角 1 号滑坡涌浪计算参数

Table 4 Calculation parameters for Tangjiao No.1 landslide generated wave

滑坡参数		河道参数	
长度 l (m)	66.93	对岸岸坡坡角 $\beta(^{\circ})$	15
宽度 w (m)	349.94	河道宽度 b (m)	975.8
厚度 t (m)	12.99	水深 h (m)	58.31
滑面倾角 $\alpha(^{\circ})$	4		
平均速度 v (m/s)	4.55		

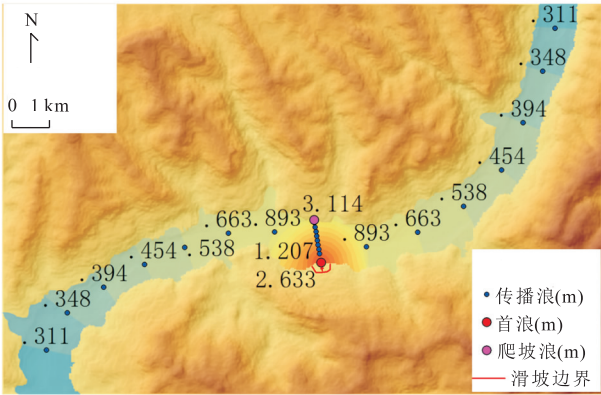


图 7 塘角 1 号滑坡 A1 区涌浪高度及传播范围

Fig.7 Height and propagation range of landslide generated wave of A1 part of Tangjiao No.1 landslide

根据所有块体内力和为 0 即可求出每一块体在各段滑面运动的加速度.进而运用运动学的关系可求出每一块体入水时的速度(汪洋和殷坤龙,2003).采用 Fortran 语言程序可快速实施运算.

计算得到库水位 145 m+大暴雨工况下,滑坡原水下条块 13 个,运动滑入水下条块 30 个,入江方量为 30.42 万方,入江平均速度为 4.55 m/s.

依据公式(3)至(6)(刘艺梁,2013;三峡库区地质灾害防治工作指挥部,2014)计算 A1 区滑坡可能产生涌浪的最大首浪高度,沿程传播浪高度,沿对岸传播浪高度以及爬坡浪高度.计算所需滑坡及河道参数如表 4 所示,计算结果如图 7 所示.

$$\frac{H_{\max}}{h} = 1.17 \frac{v}{\sqrt{gh}} (\sin^2 \alpha + 0.6 \cos^2 \alpha) \left(\frac{lt}{bh} \right)^{0.15} \left(\frac{w}{b} \right), \tag{3}$$

式中: $H_{\max}$ 为滑坡最大首浪高度(m); l 、 w 、 t 分别为滑坡的入水长度、入水宽度和入水厚度(m); v 为滑坡入水速度(m/s); h 为滑坡入水处最大水深(m); α 为滑动面倾角($^{\circ}$); b 为滑坡入水断面的河道宽度(m).

$$\frac{H_{rx}}{h} = \frac{H_{\max}}{h} e^{-0.4 \left(\frac{x}{h} \right)^{0.35}}, \tag{4}$$

式中: H_{rx} 为河道沿程某处传播浪高度(m); x 为沿程某处至滑坡点的距离(m); h 为滑坡入水处的最大水深(m).

$$\frac{H_{ry}}{h}=1.47\frac{H_{\max}}{h}\left(\frac{y}{h}\right)^{-0.5}\left(\frac{y}{h}>2.13\right),\quad(5)$$

式中: H_{ry} 为河道横向某处传播浪高度(m); y 为本岸向对岸的传播距离(m).

$$\frac{H_p}{h}=2.3\frac{H_c}{h}\left(\frac{90}{\beta}\right)^{0.2},\quad(6)$$

式中: H_p 为正对岸爬坡浪高度(m); H_c 为正对岸岸坡前浪高度(m); β 为对岸岸坡坡脚($^{\circ}$).

A1 区滑坡在 145 m+大暴雨工况下所产生的最大首浪浪高为 2.633 m,对岸爬坡浪浪高为 3.114 m,沿长江上下游传播 7 km 时,涌浪浪高衰减为 0.311 m.由于 A1 区滑坡产生的涌浪浪高最大为对岸爬坡浪(<3.5 m),且计算工况为低水位 145 m,因此,该工况下,A1 区滑坡涌浪的影响范围主要包括长江河道及沿岸码头,对高程分布相对较高的建筑物影响较小.

3 灾害影响范围内承灾体易损性

根据现场调查,塘角 1 号滑坡坡体范围内承灾体主要考虑为:经济承灾体(建筑、道路和土地)和室内人员.

3.1 坡体范围内承灾体易损性

3.1.1 滑坡致灾强度 I 以滑坡变形速度、滑体厚度与建筑物基础埋深之比两个指标作为此处滑坡对承灾体致灾强度的评价指标,评价标准如表 5 所示.

塘角 1 号滑坡变形速度基于滑坡地表位移监测资料分析,除前缘中部处监测点滑坡变形速度位于 $5\times10^{-5}\sim5\times10^{-3}$ mm/s 外,其余监测点滑坡变形速度均为 $5\times10^{-7}\sim5\times10^{-5}$ mm/s 量级.塘角 1 号滑体厚度分布基于勘察资料获得,滑坡建筑物下最

表 5 塘角 1 号滑坡致灾强度评价标准(杜娟,2012;曹颖 2016)
Table 5 Standard for landslide intensity evaluation of Tangjiao No.1 landslide

滑坡致灾强度 变形速度(mm/s)	滑体厚度/建筑物基础埋深(m)				
	<0.4	0.4~0.8	0.8~1.2	1.2~1.6	>1.6
$<5\times10^{-7}$	0.30	0.80	1	0.70	0.20
$5\times10^{-7}\sim5\times10^{-5}$	0.37	0.82	1	0.73	0.28
$5\times10^{-5}\sim5\times10^{-3}$	0.44	0.84	1	0.76	0.36
$5\times10^{-3}\sim5\times10^{-1}$	0.65	0.90	1	0.85	0.60
$>5\times10^{-1}$	1	1	1	1	1

表 6 塘角 1 号滑坡土地道路抗灾能力评价标准(桂蕾,2014)
Table 6 Standard for resistance evaluation on land and road on Tangjiao No.1 landslide

承灾体类型	耕地	林地	水域	乡村街道
抗灾能力	0.3	0.5	0.3	0.1

表 7 塘角 1 号滑坡房屋建筑抗灾能力评价标准
Table 7 Standard for resistance evaluation on buildings on Tangjiao No.1 landslide

抗灾能力 修筑年代	农村居民建筑	
	土木结构	砖混结构
≤1980	0.01	0.1
≤1990	0.03	0.2
≤2000	0.05	0.3
≤2010	0.05	0.5
>2010	0.1	0.5

表 8 塘角 1 号滑坡室内人员抗灾能力评价标准
Table 8 Standard for resistance evaluation on indoor person-nel on Tangjiao No.1 landslide

抗灾能力 修筑年代	室内人员			
	老人小孩		青年	
	土木结构	砖混结构	土木结构	砖混结构
≤1980	0.1	0.3	0.3	0.5
≤1990	0.1	0.3	0.3	0.5
≤2000	0.1	0.5	0.3	0.7
≤2010	0.1	0.5	0.5	0.7
>2010	0.1	0.5	0.5	0.7

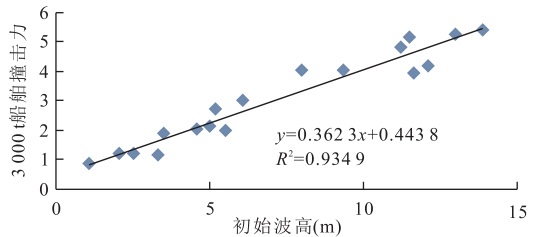


图 8 船舶(3 000 t)撞击力与码头前初始涌浪高度关系图
Fig.8 Relationship between ship (3 000 t) impact force and wave height in front of the wharf
数据来源王平义等(2016)

小滑体厚度为 5.7 m,同时,建筑物主要为砖混结构、条形基础,基础埋深约 0.5 m,经计算,建筑物下滑体厚度与建筑基础埋深比均大于 1.6.因此该滑坡致灾强度为两个梯度,即:前缘中部区为 0.36,其他区域为 0.28.

3.1.2 承灾体抗灾能力 R 塘角 1 号滑坡坡体范围内土地利用类型主要为耕地和林地,其中耕地以常见的果蔬及粮食作物为主,林地以果树林为主;道路为乡级公路;建筑物以居民房屋为主.其中,建筑物主要

表 9 塘角 1 号 A1 区滑坡涌浪范围内码头易损性

Table 9 Vulnerability of wharfs in the range of A1 part of Tangjiao No.1 landslide generated wave

码头编号	码头类型	初始波高(m)	撞击力(MN)	涌浪对码头致灾强度 <i>I</i>	码头抗灾能力 <i>R</i>	易损性
1	客运	0.31	0.56	0.16	0.9	0.07
2	货运	0.33	0.56	0.17	0.8	0.09
3	煤	0.45	0.61	0.18	0.9	0.08
4	矿石	0.76	0.72	0.21	0.8	0.14
5	货运	0.89	0.77	0.23	0.7	0.21
6	客运	0.99	0.80	0.24	0.5	0.44

表 10 塘角 1 号 A1 区滑坡涌浪范围内河道驳船航行易损性

Table 10 Vulnerability of barges in the range of A1 part of Tangjiao No.1 landslide generated wave

涌浪类型	涌浪距滑坡点距离(km)	涌浪高度(m)	涌浪对船只致灾强度 <i>I</i>	驳船抗灾能力 <i>R</i>	易损性 <i>V</i>
最大首浪	0.00	2.63	1.00	0.70	1.00
沿程传播浪	1.00	0.89	0.60	0.70	0.96
沿程传播浪	2.00	0.66	0.44	0.70	0.73
沿程传播浪	3.00	0.54	0.36	0.70	0.52
沿程传播浪	4.00	0.45	0.30	0.70	0.37
沿程传播浪	5.00	0.39	0.26	0.70	0.28
沿程传播浪	6.00	0.35	0.23	0.70	0.22
沿程传播浪	7.00	0.31	0.21	0.70	0.18
沿对岸传播浪	0.20	2.09	1.00	0.70	1.00
沿对岸传播浪	0.30	1.71	1.00	0.70	1.00
沿对岸传播浪	0.40	1.48	0.99	0.70	1.00
沿对岸传播浪	0.50	1.32	0.88	0.70	1.00
沿对岸传播浪	0.60	1.21	0.80	0.70	1.00
沿对岸传播浪	0.70	1.12	0.74	0.70	1.00
沿对岸传播浪	0.80	1.04	0.70	0.70	1.00
沿对岸传播浪	0.90	0.99	0.66	0.70	0.99
沿对岸传播浪	0.98	0.95	0.63	0.70	0.98

表 11 塘角 1 号滑坡及其次生涌浪灾害影响范围内承灾体经济价值标准

Table 11 Economic standards of elements at risk in the range of Tangjiao No.1 landslide and the generated wave

承灾体类型	房屋建筑(元/m ²)	道路(元/m ²)	耕地(元/m ²)	林地(元/m ²)	码头(万元)						驳船(万元)
					1	2	3	4	5	6	
单价	2 000	60	5	15	40	80	20	20	10	10	300

修筑于 2000 年及以前,以砖混结构为主;室内人员数量共计 711 人,平均每栋房 2.5 人,且由不同年龄结构组成,老人小孩与青年人数比例为 1.00 : 1.14.各类承灾体抗灾能力评价标准如表 6~表 8 所示。

3.1.3 承灾体易损性 基于上述分析,按照 Li *et al.* (2010)提出的承灾体易损性计算公式(7),求得塘角 1 号滑坡坡体范围内承灾体易损性.经计算,经济类承灾体易损性较大,均大于 0.5;室内人员易损性从 0.1 至 1.0 均有分布.此处,室内人员易损性计算时,其致灾强度取建筑物所受滑坡致灾强度,结果偏保守,后续风险分析时,应考虑建筑物的实际破坏程度进一步调整室内人员实际风险大小。

$$V = f(I,R) = \begin{cases} 2 \frac{I^2}{R^2}, & \frac{I}{R} \leqslant 0.5, \\ 1.0 - 2 \left(1 - \frac{I}{R}\right)^2, & 0.5 < \frac{I}{R} \leqslant 1.0, \\ 1.0, & \frac{I}{R} > 1.0, \end{cases} \quad (7)$$

式中:*V* 表示滑坡灾害承载体易损性,取值为 0~1;*I* 表示滑坡灾害致灾强度;*R* 表示承灾体抗灾害能力.在 *I* 和 *R* 无实际相同量纲指标时,参数的取值范围均为 0~1;否则取实际值。

3.2 次生涌浪灾害影响范围内承灾体易损性

根据塘角 1 号滑坡 A1 区次生灾害涌浪影响范

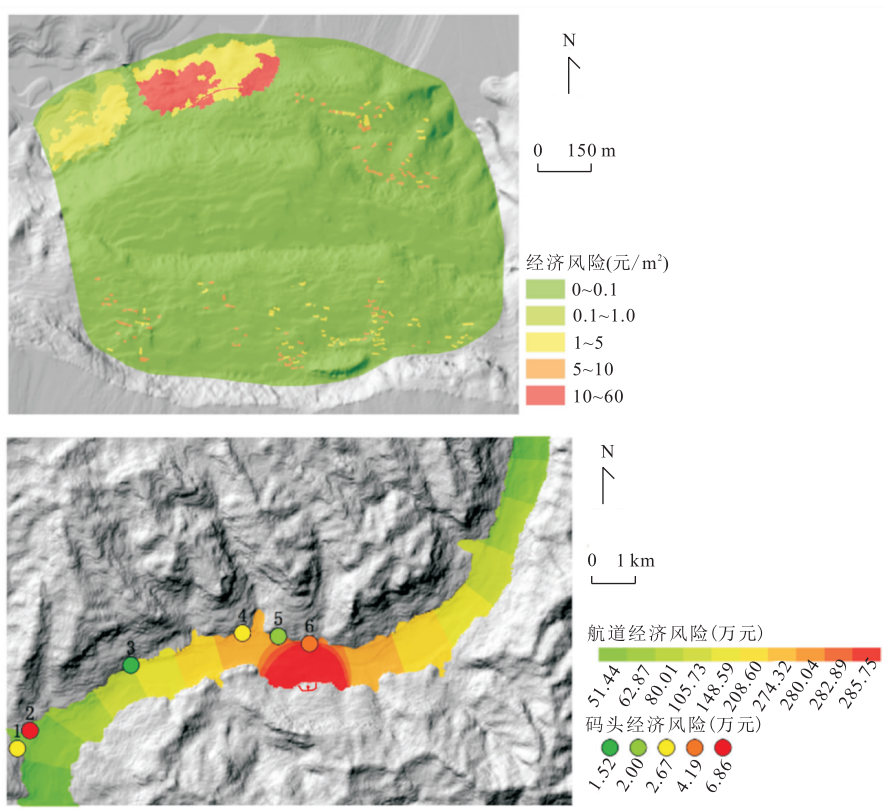


图 9 最危险工况下塘角 1 号滑坡及其次生灾害经济风险分布图

Fig.9 Economic risk map of Tangjiao No.1 landslide and its generated wave under the most dangerous scenario

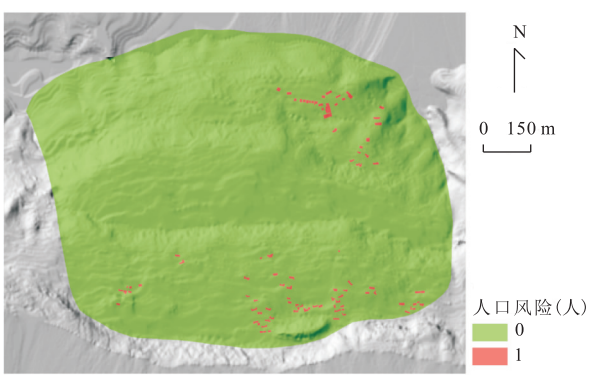


图 10 最危险工况下塘角 1 号滑坡坡体上风险分布图
(风险小于 1 人均取 1)

Fig.10 Indoor population risk map of Tangjiao No.1 landslide under the most dangerous scenario (if risk<1, take 1)

围计算结果, 次生涌浪灾害影响范围内承灾体主要考虑码头和河道内船只, 为简化分析, 此处不考虑人员.

3.2.1 涌浪致灾强度分析 涌浪致灾强度将按照承灾对象类型选择评价指标. 对于沿岸码头, 主要考虑系泊船舶在涌浪作用下对码头的冲击破坏作用,

因此选择船舶撞击力作为评价指标. 根据王平义等 (2016) 模型试验结果, 3 000 t 系泊船舶在涌浪作用下, 产生的对对岸码头的撞击力与码头前初始涌浪高度成正比, 如图 8 所示.

同时, 王建超 (2010) 统计得出轻型码头 3 种不同类型, 超级鼓型护舷船舶靠泊的撞击力主要集中在 3.4 MN、3.6 MN 和 4.7 MN; 波浪作用下系泊船舶的撞击力主要集中在 1 MN. 张颖 (2010) 提出船舶靠泊撞击力主要受撞击速度影响, 受船舶吨位的影响较小. 因此, 基于图 8 中的拟合公式, 确定不同码头前初始涌浪高度下船舶对对岸码头的撞击力, 同时从偏安全的角度考虑, 以 3.4 MN 作为最大撞击力标准, 评价涌浪对码头的致灾强度, 如表 9 所示. 根据《内规》(中华人民共和国海事局, 2011), 涪陵李渡长江大桥至江阴长江大桥长江河道为 B 级航区, 该区船舶结构设计时, 波高范围为 0.5~1.5 m, 且通常取半波高 0.75 m. 因此, 以 1.5 m 波高作为最大波高标准, 评价涌浪对船只的致灾强度, 如表 9 所示. 对比船舶类型, 定性一半定量评价塘角 1 号滑坡 A1 区涌浪影响范围河道内驳船抗灾能力, 取值如表 10 所示.

3.2.2 涌浪影响范围内承灾体抗灾能力分析 塘

角 1 号滑坡 A1 区涌浪影响范围内,共计码头 6 个,其中包括 2 个客运码头,4 个专用码头(2 个货运码头、1 个煤码头和 1 个矿石码头);航道内航行的船只主要为驳船.按照各类码头的规模、成新度,判断各码头的抗灾能力,如表 9 所示.

3.2.3 涌浪范围内承灾体易损性分析 基于承灾体易损性计算公式(7),各类承灾体易损性计算结果如表 9 和表 10 所示.码头易损性与距离滑坡涌浪发生地的距离成反比,驳船航行易损性与距离涌浪发生地距离亦成反比.

4 滑坡及其次生涌浪灾害风险

根据现场调查,塘角 1 号滑坡坡体范围内承灾体主要考虑为:经济承灾体(建筑、道路和土地)和室内人员.

4.1 承灾体经济价值标准

塘角 1 号滑坡及其涌浪灾害承灾体经济价值标准如表 11 所示.其中,房屋建筑价值估算时需按照建筑物的修筑年限折旧,并叠加室内经济财产调查数据;码头经济价值考虑为各码头系泊墩损失或趸船损失;驳船考虑为每公里各有 1 艘,1 500 t 型,且在研究范围内沿河道均匀分布.

4.2 滑坡及其次生涌浪灾害总风险分析

对于单体库岸滑坡,Yin *et al.* (2016)提出了考虑滑坡次生涌浪灾害的风险定量计算公式(8):

$$R = H \times V \times E + R_{sec}, \tag{8}$$

式中: R 为单体库岸滑坡风险; H (Hazard)为滑坡危险性; V (Vulnerability)为承灾体易损性; E (Elements at risk)为承灾体数目或价值; R_{sec} 为滑坡灾害次生风险,包括滑坡次生灾害直接作用的风险和防治管理过程中社会经济可能存在的潜在风险.

基于此公式,分析最危险工况下塘角 1 号滑坡及其次生涌浪灾害总风险,总经济风险分布如图 9 所示.坡体上室内人口风险如图 10 所示.在最危险工况,即,库水位 175~145 m+3 日 100 mm 降雨工况下,塘角 1 号滑坡坡体上承灾体经济风险为 70.3 万元,沿岸码头经济风险为 19.9 万元,驳船 15 艘经济风险为 2 148.8 万元,则:塘角 1 号滑坡及其次生灾害总经济风险为 2 239 万元;坡体上室内人口总风险为 0.55 人.

5 结论

论文以三峡库区万州区塘角 1 号滑坡为例,系

统开展了单体库岸滑坡灾害及其次生涌浪灾害风险研究,得出结论如下:

(1)单体滑坡危险性分析时,需考虑滑坡空间差异性,因而提出了基于滑坡稳定性分区的单体滑坡危险性分析方法.

(2)对于库岸滑坡,滑坡次生涌浪灾害是滑坡风险的重要组成部分,因而探讨了滑坡及其次生涌浪灾害承灾体危险性的分析方法,并绘制滑坡及其次生涌浪灾害总经济风险分布图和室内人口风险分布图.

(3)塘角 1 号滑坡变形受库水位下降和降雨影响较大.滑坡前部稳定性(破坏概率)总体随库水位的降低(时步增加)而降低(增大),中后部受库水位下降影响较小,稳定性和破坏概率随时步的推移变化甚微.受降雨作用影响,滑坡各部位稳定性普遍降低,总体而言,降雨强度越大、降雨持时越长,滑坡稳定性降低越明显,同时,各部位稳定性对降雨强度和降雨时长的敏感性存在差异.但是降雨对各部位滑坡破坏概率的影响相对较小.

(4)塘角 1 号滑坡最危险工况为库水位 175~145 m+3 日 100 mm 降雨.在该工况下,塘角 1 号滑坡及其次生灾害总经济风险为 2 239 万元;坡体上室内人口总风险为 0.55 人.

References

Afungang, R. N., Bateira, C. V., 2016. Temporal Probability Analysis of Landslides Triggered by Intense Rainfall in the Bamenda Mountain Region, Cameroon. *Environmental Earth Sciences*, 75 (12): 1–12. <https://doi.org/10.13039/501100000780>

Cao, Y., 2016. Risk Assessment and Early Warning of Individual Landslide—Case Study of the Tangjiao Landslide in Wanzhou (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).

Daniele, B., Tazio, S., Alberto, B., 2015. Landslide Hazard: Risk Zonation and Impact Wave Analysis for the Bum-buma Dam-Sierra Leone. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2: 1129–1134.

Du, J., 2012. Risk Assessment of Individual Landslide (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).

Fell, R., Ho, K. K. S., Lacasse, S., et al., 2005. A Framework for Landslide Risk Assessment and Management. *International Conference on Landslide Risk Management*, 599–600.

Fotopoulou, S. D., Pitilakis, K. D., 2012. Vulnerability Assessment of Reinforced Concrete Buildings Subjected to

- Seismically Triggered Slow-Moving Earth Slides. *Land-slides*, 10 (5): 563 — 582. <https://doi.org/10.1007/s10346-012-0345-5>
- Ge, Y.F., Tang, H.M., Li, W., et al., 2016, Evaluation for Deposit Areas of Rock Avalanche Based on Features of Rock Mass Structure. *Earth Science*, 41(9): 1583—1592 (in Chinese with English abstract).
- Gui, L., 2014, Research on Landslide Development Regularities and Risk in Wan Zhou District, Three Gorges Reservoir (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Hungr, O., McDougall, S., 2009, Two Numerical Models for Landslide Dynamic Analysis. *Computers & Geosciences*, 35 (5): 978 — 992. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.12.003>
- Iverson, R.M., George, D.L., Allstadt, K., et al., 2015, Landslide Mobility and Hazards; Implications of the 2014 Oso Disaster. *Earth and Planetary Science Letters*, 412: 197 — 208. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.12.020>
- Ji, H., Si, H., 2013, Visualized Analysis of Surge Vulnerability by Landslides Based on GIS in Three Gorges Reservoirs. *China Safety Science Journal*, 23(9): 166 — 171 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z.H., Nadim, F., Huang, H.W., et al., 2010, Quantitative Vulnerability Estimation for Scenario-Based Landslide Hazards. *Landslides*, 7 (2): 125 — 134. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0190-3>
- Liu, Y.L., 2013, Research on Landslide-Induced Surge in Three Gorges Reservoir Area (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Luna, B.Q., Cepeda, J., Stumpf, A., et al., 2013, Analysis and Uncertainty Quantification of Dynamic Run-out Model Parameters for Landslides. Springer Berlin Heidelberg, 315—318.
- Maritime Administration of the People's Republic of China, 2011, Technical Rules for Statutory Inspection of Inland Waterways. People's Communications Press, Beijing (in Chinese).
- Miao, F.S., Wu, Y.P., Xie, Y.H., et al., 2016, Research on Progressive Failure Process of Baishuihe Landslide Based on Monte Carlo Model. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31 (7): 1683 — 1696. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Nicolet, P., Jaboyedoff, M., Cloutier, C., et al., 2016, Brief Communication; On Direct Impact Probability of Landslides on Vehicles. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16 (4): 995 — 1004. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-995-2016>
- Qiu, H.J., Cui, P., Hu, S., et al., 2016, Size-Frequency Distribution of Landslides in Different Landforms on the Loess Plateau of Northern Shaanxi. *Earth Science*, 41(2): 343—350 (in Chinese with English abstract).
- Three Gorges Reservoir Area Geological Disaster Prevention and Control Work Command, 2014, Three Gorges Reservoir Area Geological Disaster Prevention Engineering Geological Prospecting Technical Requirements. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Uzielli, M., Catani, F., Tofani, V., et al., 2014, Risk Analysis for the Ancona Landslide-II: Estimation of Risk to Buildings. *Landslides*, 12(1): 83—100. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0477-x>
- Wang, J.C., 2010, Research on Load Standard and Reliability of Light Wharf Structures (Dissertation). Dalian University of Technology, Dalian (in Chinese with English abstract).
- Wang, P.Y., Han, L.F., Yu, T., et al., 2016, Effects of Landslide Generated Impulse Waves on Ship Impact Force for Pile Wharf. *Journal of Harbin Engineering University*, 37(6): 878—884 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Yin, K.L., 2003, Analysis of Movement Process of Landslide in Reservoir and Calculation of Its Initial Surge Height. *Earth Science*, 28(5): 579—582 (in Chinese with English abstract).
- Wood, N.J., Peters, J., 2014, Variations in Population Vulnerability to Tectonic and Landslide-Related Tsunami Hazards in Alaska. *Natural Hazards*, 75(2): 1811—1831. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1399-6>
- Wu, Y., Liu, D.S., Li, M.J., 2011, Impact Energy Calculation for Rock Slope and Quantitative Assessment of Vulnerability for Element at Risk. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(5): 901—909 (in Chinese with English abstract).
- Yin, K.L., Chen, L., Ma, F.X., et al., 2016, Practice and Thinking of Landslide Risk Management Considering Their Secondary Consequences in the Three-Gorges Reservoir, China. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, 3: 2097—2105.
- Yin, Y.P., Huang, B.L., Liu, G.N., et al., 2015, Potential Risk Analysis on a Jianchuandong Dangerous Rockmass-Generated Impulse Wave in the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Earth Sciences*, 74 (3): 2595—2607. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4278-x>
- Zhang, S., Zhang, L.M., 2014, Human Vulnerability to Quick Shallow Landslides along Road: Fleeing Process and Modeling. *Landslides*, 11(6): 1115—1129. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0468-y>

Zhang, Y., 2010. Dynamic Analysis to Ship Impact of Piling Wharf (Dissertation). Tianjin University, Tianjin (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹颖, 2016. 单体滑坡灾害风险评价与预警预报——以万州区塘角 1 号滑坡为例(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.

杜娟, 2012. 单体滑坡灾害风险评价研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.

葛云峰, 唐辉明, 李伟, 等, 2016. 基于岩体结构特征的高速远程滑坡致灾范围评价. 地球科学, 41(9): 1583—1592.

桂蕾, 2014. 三峡库区万州区滑坡发育规律及风险研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.

纪虹, 司鹄, 2013. 基于 GIS 技术的三峡库区滑坡涌浪灾害易损性可视化研究. 中国安全科学学报, 23(9): 166—171.

刘艺梁, 2013. 三峡库区库岸滑坡涌浪灾害研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.

邱海军, 崔鹏, 胡胜, 等, 2016. 陕北黄土高原不同地貌类型区黄土滑坡频率分布. 地球科学, 41(2): 343—350.

三峡库区地质灾害防治工作指挥部, 2014. 三峡库区地质灾害防治工程地质勘查技术要求. 武汉: 中国地质大学出版社.

王建超, 2010. 轻型码头结构荷载标准与可靠度研究. 大连: 大连理工大学.

王平义, 韩林峰, 喻涛, 等, 2016. 滑坡涌浪对高桩码头船舶撞击力的影响. 哈尔滨工程大学学报, 37(6): 878—884.

汪洋, 殷坤龙, 2003. 水库库岸滑坡的运动过程分析及初始涌浪计算. 地球科学, 28(5): 579—582.

吴越, 刘东升, 李明军, 2011. 岩体滑坡冲击能计算及受灾体易损性定量评估. 岩石力学与工程学报, 30(5): 901—909.

张颖, 2010. 高桩码头船舶撞击力的动力分析(硕士学位论文). 天津: 天津大学.

中华人民共和国海事局, 2011. 内河船舶法定检查技术规则. 北京: 人民交通出版社.