陕西宝鸡地区胡家山滑坡风险性评价

孟庆华[1], 孙炜锋[1], 张春山[1], 王 涛[1], 辛 鹏[1], 李志科[2]
MENG Qing-hua[1], SUN Wei-feng[1], ZHANG Chun-shan[1],
WANG Tao[1], XIN Peng[1], LI Zhi-ke[2]

1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室/中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 中国地质大学(北京), 北京 100083
1. *Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources/ Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100081, *China;*
2. *China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*

摘要:在综合分析国内外滑坡风险评价方法的基础上,通过对野外地质灾害的调查、对胡家山滑坡的勘查和岩土物理力学参数的测试分析,利用 Geo-slope 软件和经验方法对滑坡多级潜在滑面进行稳定性分析、影响范围预测和失稳概率分析,开展了对滑坡在天然状态、10 年一遇降雨和 50 年一遇降雨 3 种工况条件下的危险性、承灾体易损性分析等,完成了胡家山滑坡风险性评价,探讨了单体滑坡风险评价的技术方法与流程。根据评价结果,胡家山滑坡财产最大风险为 113.71 万元/年,人口最大风险为 0.0648 人/年,其人口风险超过了社会可容许的风险标准。因此,应采取加强监测、搬迁避让、适当工程治理等方法进行风险控制,以达到防灾减灾的目的。

关键词:滑坡;危险性;易损性;风险评价;陕西宝鸡地区
中图分类号:P694 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2011)07-1155-11

Meng Q H, Sun W F, Zhang C S, Wang T, Xin P, Li Z K. Risk assessment of Hujiashan landslide in Baoji area, Shaanxi. *Geological Bulletin of China,* 2011, 30(7):1155–1165

Abstract: This paper studied the risk assessment of Hujiashan landslide by using Geo-slope software and experiential methods, forecasted the affected area, analyzed the unstable probability of the landslide´s multiple hidden sliding surfaces according to landslide risk assessment practice both in China and abroad, and made geo-hazards detailed field survey, reconnaissance and analysis of physical and mechanical parameters for samples collected from Hujiashan landslide. Meanwhile, the authors analyzed the landslide hazards and vulnerability of elements at risk under three different conditions: natural state, once-in-ten-years and once-in-fifty-years rainfall state, respectively. On such a basis, the authors completed the Hujiashan landslide risk assessment and discussed the single landslide risk evaluating methods and its work flow. The results indicate that the maximum property risk is 1137100 RMB per year, the maximum people risk is 0.0648 person per year, which is beyond the tolerable risk criterion of the society. Therefore, it is necessary for local governments to strengthen such work as monitoring, relocation of local inhabitants and avoiding risk, and take engineering stabilizing methods for control, avoidance and reduction of risk.

Key words: landslide; hazard; vulnerability; risk assessment; Baoji area of Shaanxi

滑坡风险评估与管理一直是国际上研究的热点问题,已成为滑坡防灾减灾战略的重要手段之一。欧美等国家滑坡风险评估的研究工作起步较早,并取得了较为显著的研究成果,如 Fell 等[1]提出了滑坡风

收稿日期:2010-05-19;**修订日期**:2010-09-16
资助项目:国家"十一五"科技支撑课题《地质灾害风险评估技术研究》(编号:2006BAC04B05)和中国地质调查局项目《陕西宝鸡地区地质灾害详细调查》(编号:1212010640401)
作者简介:孟庆华(1983-),女,博士,从事工程地质和地质灾害研究。E-mail:mengqh2201204@163.com
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

险管理理论框架，并且在国际上广泛应用；Van Westen 等[2]提出了滑坡风险评估技术框架，对 Fell 的理论框架的技术细节做了更加详细的补充，形成了较为完整的滑坡风险评估的主要层次和技术流程。国内在滑坡风险评估方面起步较晚，但也开展了一定的工作。殷坤龙等[3-6]对滑坡灾害危险性、斜坡不稳定性的空间预测与区划进行了系统研究，先后提出了定量评价的信息分析模型、多因素回归分析模型、模糊判别分析模型等，并在秦巴山区的旬阳县和三峡库区进行了滑坡灾害危险性分析与区划实践；吴树仁等[7-10]在滑坡机理、滑坡危险性评估、滑坡风险评价、地质灾害信息系统等方面进行了较深入的研究，开展了系统的 RS、GIS 技术在滑坡风险评价中的应用研究，初步提出了区域滑坡风险评价的指南。笔者通过对野外地质灾害的调查、对胡家山滑坡的勘查与岩土物理力学参数的测试分析，利用 Geo-slope 软件和经验方法对滑坡多级潜在滑面进行稳定性分析、影响范围预测和失稳概率分析，开展了滑坡在天然状态、10 年一遇降雨和 50 年一遇降雨 3 种工况条件下的危险性、承灾体易损性分析等，完成了胡家山滑坡风险性评价研究，探讨了单体滑坡风险评价的技术方法与流程，为大比例尺单体滑坡风险评估提供方法借鉴，并根据评估结果为当地大型单体滑坡预测预警等提供数据支持，提出了胡家山滑坡的防治建议。

1 胡家山滑坡概述

胡家山滑坡位于陕西省宝鸡市凤县凤州镇苍坪胡家山村，在嘉陵江和宝成铁路南侧，处于凤县近东西向的白垩系凤县-太白盆地与近南北向的嘉陵江深切河谷相交汇的位置（图 1），地理坐标为东经 106°31′49″、北纬 33°55′03″。

胡家山滑坡平面上总体呈舌形，后缘圈椅状地形明显，由 7 个次级滑体构成，长约 800m，宽约 400m，滑坡后缘高程为 1270m，坡脚高程为 1110m，整体高差 160m，平均厚度约 30m，体积约 $2\times10^6m^3$，主滑方向 280°，整体坡度为 23°（图 2）。

胡家山滑坡区主要为第四系中上更新统黄土和白垩系东河群组（K_1dh）砂砾岩与砂质泥岩互层，属黄土与基岩接触面型滑坡。上覆黄土厚 20~30m，土质疏松、多孔、易透水，为主要滑体部分，下伏白垩系砂砾岩与砂质泥岩互层，产状 250°∠21°，为顺向斜坡（图 3）。

近年来滑坡体前缘坡脚开挖、耕地和果园的大面积灌溉，导致滑坡前缘和中部地区多次出现裂缝。滑坡体在 1997 年经历长时间的连续降雨之后开始出现复活迹象，先后出现的主要裂缝有 7 条，自东至西（坡面自上而下）分别长 206m、50m、146m、70m、60m、20m 和 320m，缝宽分别为 15mm、50mm、50mm、11mm、5~20mm、10mm 和 20~150mm，缝间距 20m 左右，最大可见深度大于 2m（图 2、图 3）。目前，滑坡体上砖混结构房屋的墙体、水泥地面、道路、果园、田地等处已经陆续出现裂缝，且裂缝数量逐年增加、宽度增大（图 4）。

滑坡体上有 2 个村庄 74 户 282 人，房屋 383 间，小学 1 所（房屋 11 间）。另外，在滑坡体上还有 352km 的供电线路，果园与耕地约 $33hm^2$，滑坡体下方 1km 处即为宝成铁路和 312 国道。一旦发生滑坡将直接威胁这些地区居民的生命财产安全，并有阻断铁路、公路的可能，影响极大。

根据多年滑体裂缝监测结果分析，近几年滑坡体上裂缝的数量与宽度均有增长。滑体上局部低凹地段黄土落水洞发育，表明胡家山滑坡处于老滑坡的复活蠕动变形阶段。滑体黄土状土极为疏松，落水洞发育，坡面地表水流极易下渗，在雨季滑坡有大规模再次滑动的可能，因此开展危险性分析和风险评价对地方政府防灾减灾具有重要的参考意义。

2 滑坡危险性评价

滑坡危险性评价是对某一地区特定时间内现有滑坡或潜在滑坡及其扩展的破坏力、影响范围和滑坡概率的定性或定量评价，是在对现有滑坡的空间分布、体积、稳定性状态、可能的扩展及其影响范围进行分析评价的基础上，开展滑坡发生概率的分析评价[1]。

单体滑坡危险性评价过程主要包含 3 个方面的内容：①滑坡稳定性分析：估算滑坡在不同工况下发生滑动的可能性及可能的驱动机制；②滑坡影响范围分析：假如滑坡发生的话，推测其可能的运移距离、运移路径等，并估算滑坡可能的破坏范围；③失稳概率分析：不同工况条件下滑坡失稳的概率。在滑坡风险分析评价的各个阶段，都存在一定的不确定因素，例如滑坡稳定性分析中模型的简化、野外钻探取样的局限性、室内试验误差、滑坡影响范围预测模

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

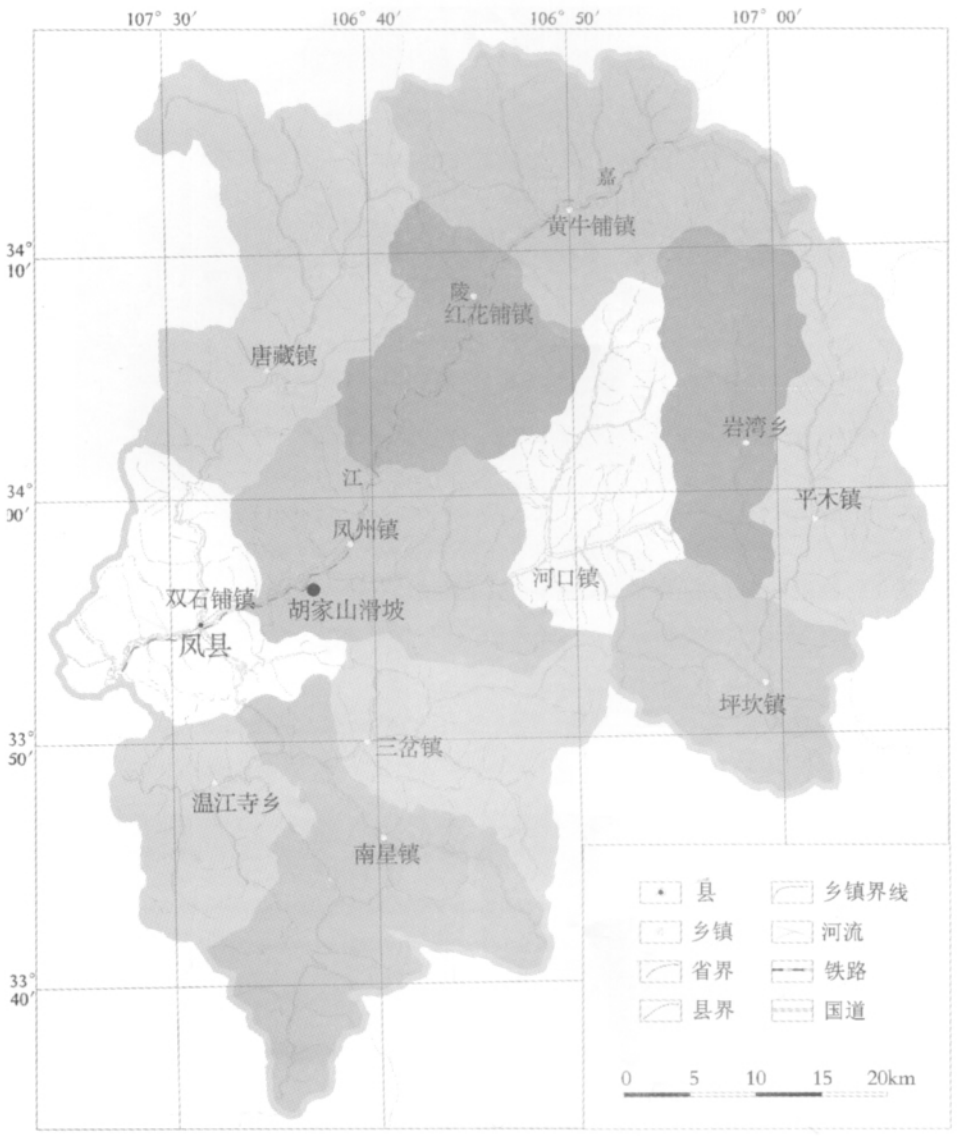


图 1　胡家山滑坡的位置

Fig. 1　Location of Hujiashan landslide

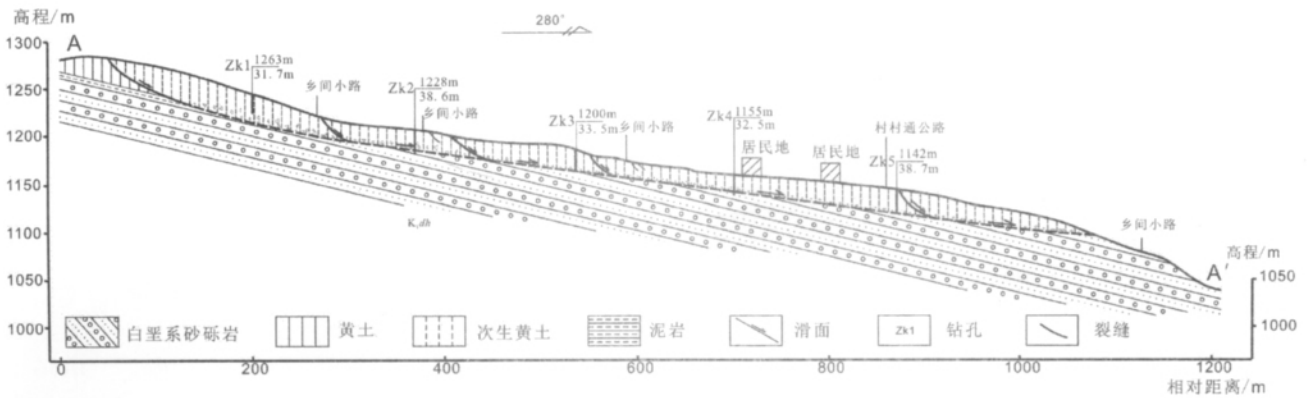


图 3　胡家山滑坡 A−A′ 剖面

Fig. 3　A−A′ cross section of Hujiashan landslide

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

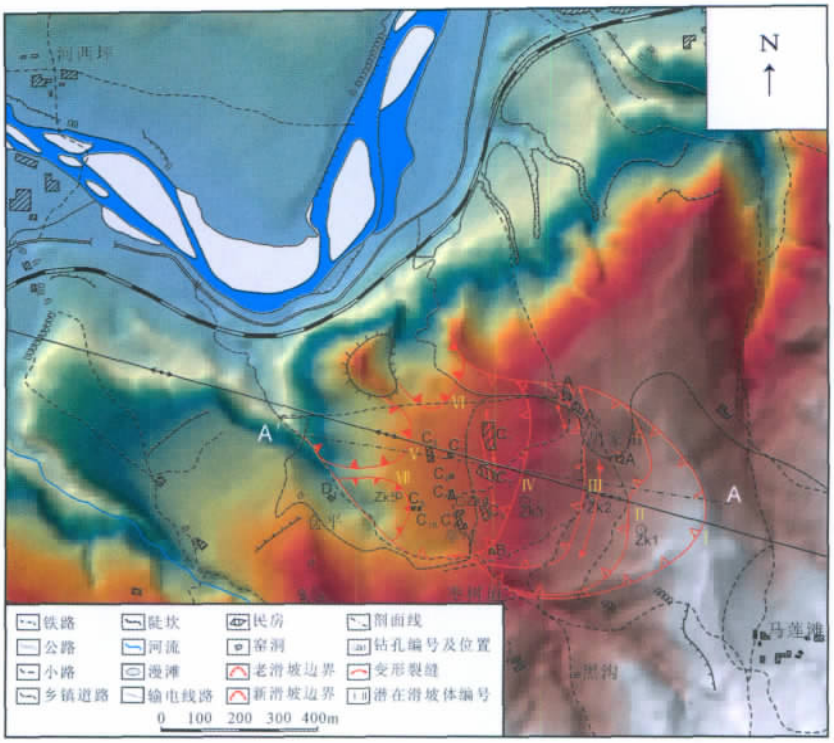


图 2 胡家山滑坡平面图 Fig. 2 Map of Hujiashan landslide



图 4 滑坡体上房屋出现裂缝 Fig. 4 Cracks in houses on the landslide body

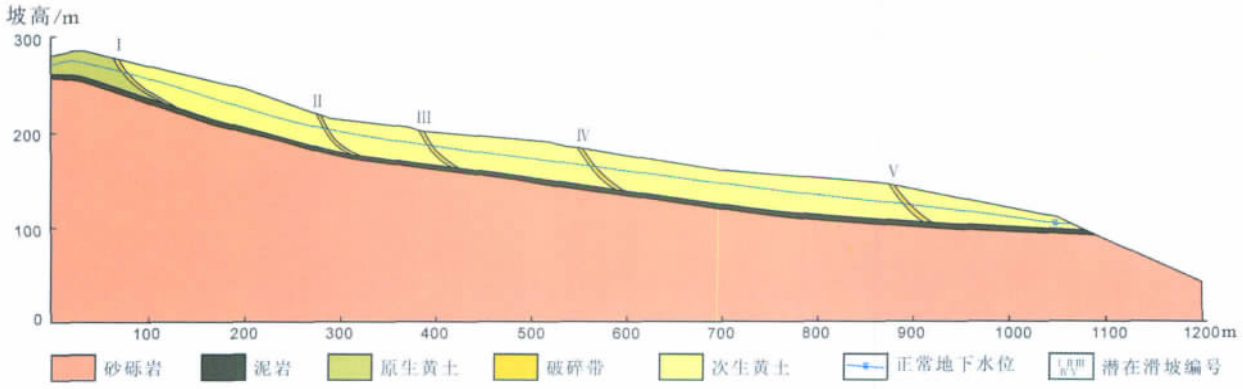


图 5 滑坡稳定性计算模型 Fig. 5 Landslide stability analyzing model

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

型在预测实际情况方面的局限性、失稳条件假设的极端性等。这些不确定因素的存在使评价结果并不是绝对精确的,只起到一定的指示性作用,但也具有一定的代表性。

2.1　滑坡稳定性分析

目前滑坡稳定性分析评价方法较多,总体可分为三大类:①自然历史分析法、工程地质类比法、监测试验法等;②物理模拟法;③数学力学模拟方法,主要包括极限分析法、刚体极限平衡法和数值力学方法。其中常用的刚体极限平衡法包括瑞典条分法、Janbu 法、Bishop 法、Morgenstern-Spencer 法、Spencer 法、剩余推力法等,常用的数值模拟方法包括有限单元法(ANSYS)、离散单元法(3DEC)、块体理论法(Key Block)、边界元法(BEM)、快速拉格朗日法(FLAC)、流形元法(MAP3D)等。

根据对胡家山滑坡的监测和工程地质类比分析,认为该滑坡具有在降雨条件下整体或局部活动的可能。因此稳定性分析采用刚体极限平衡法中的 Janbu 法,利用 Geoslope 软件工具开展稳定性分析计算。

根据滑坡地质剖面,计算模型简化如图 5 所示。胡家山滑坡失稳的主要诱发因素为降雨,一方面降雨入渗影响岩土体材料的强度参数,导致滑坡黄土含水量增加、容重增大,使黄土的强度下降;另一方面水化学作用改变了土体的矿物成分和微细观结构,影响土粒之间的连接力,甚至使土粒结构破坏,逐渐降低岩土体的强度;如果坡体表面不完整,降雨造成的坡面径流在经过裂缝或落水洞时,会迅速沿这些通道补给地下水,造成斜坡地区地下水位升高。

本文考虑降雨造成地下水位的抬升对滑坡稳定性的影响,采用以下 3 种工况:天然状态、10 年一遇的降雨和 50 年一遇的降雨。根据凤县的历史降雨资料(图 6),凤县在 1981 年 6~9 月累计降雨量达到 840.2mm,是当年全年降雨总量的 86.4%,尤其是 8 月份,降雨量达 410.4mm,是全年降雨总量的 42%,造成全县范围的地质灾害群发事件。另外,凤县降雨量在 10 年左右出现一个高峰值,6~9 月的降雨量峰值为 600.0mm。由于凤县滑坡灾害主要为降雨诱发,设定 1981 年遇到的 840.2mm 的累积降雨量的重现区间为 50 年,则 10 年和 50 年一遇降雨概率的 6~9 月累积降雨量值分别为 600.0mm 和 840.2mm。由于胡家山滑坡地下水的主要补给源为降雨入渗,做极端处理,假设降雨量全部入渗或沿通道等补给地下水,造成地下水位抬升,黄土的饱和体积含水量为 0.203[11],根据滑坡勘查的现有地下水位为 8.4m,以地下水位分别抬升 0.4m(10 年一遇降雨)或 0.7(50 年一遇降雨)来进行稳定性分析(图 5 上部所示为滑坡体正常水位)。

根据岩土样品的物理力学参数测试结果选取模型参数(表 1),其中在地下水位以下的参数为饱和条件下的参数。

利用 Geoslope 软件,选取 Janbu 法,开展天然状

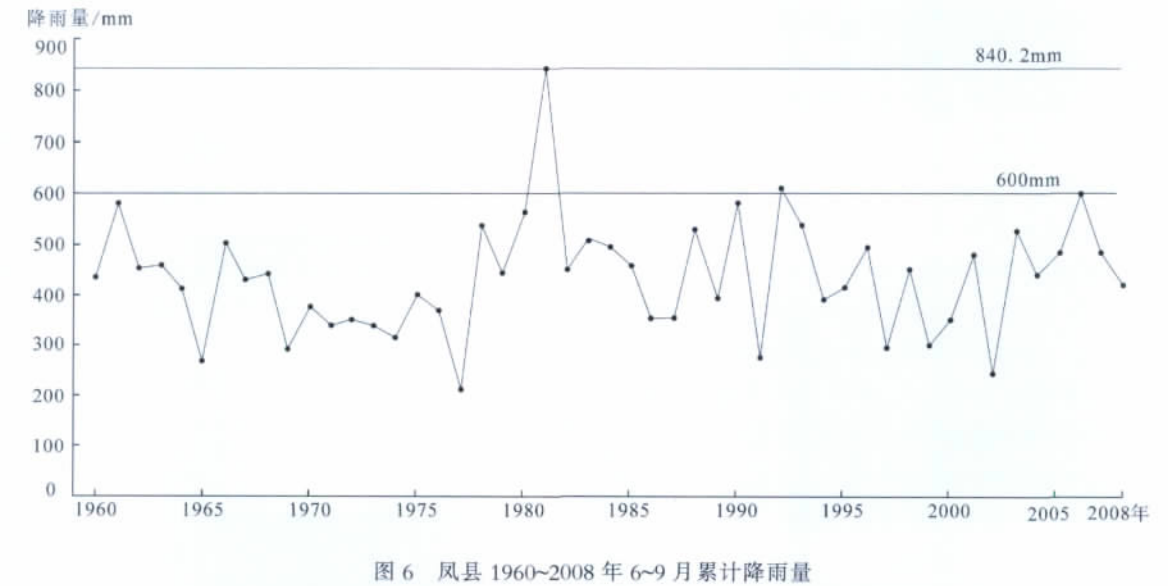


图 6　凤县 1960~2008 年 6~9 月累计降雨量

Fig. 6　Cumulative precipitation in June-September, 1960-2008, Fengxian County

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1 模型物理力学参数

Table 1 Physical mechanical parameters of the model

岩性	天然容重/kN·m^{-3}	C/kPa	ϕ/°
原生黄土	20	27	14
次生黄土	20	19	10
破碎带	18	13	6
泥岩	24	16	8
砂砾岩	29	98	32

态、10 年一遇降雨和 50 年一遇降雨 3 种工况的胡家山滑坡稳定性分析,计算结果见表 2。

根据徐邦栋等①的滑坡稳定性系数表,将滑坡的稳定性系数(F_s)划分为 4 个等级:F_s>1.2 为稳定状态,1.1<F_s<1.2 为基本稳定状态,1.0<F_s<1.1 为欠稳定状态,F_s<1.0 为不稳定状态。根据计算结果(表 2),Ⅰ号滑坡的稳定性系数极高,在 3 种工况条件下都处于稳定状态,不会发生滑动;Ⅱ号滑坡在天然状态和 10 年一遇的降雨情况下均处于稳定状态,但是在 50 年一遇的极端暴雨情况下就处于不稳定状态,易发生滑动;Ⅲ号滑坡在天然状态下处于稳定状态,当遇到 10 年一遇的暴雨时处于基本稳定状态,此时有可能发生滑动,当遇到 50 年一遇的降雨时就会处于不稳定状态,易发生滑动;Ⅳ号滑坡在天然状态下处于基本稳定状态,有可能发生滑动,当遇到 10 年或 50 年一遇的暴雨情况时就处于不稳定状态,极易发生滑动;Ⅴ号、Ⅵ号和Ⅶ号滑坡在天然状态下处于欠稳定状态,在 10 年或 50 年一遇的降雨条件下均处于不稳定状态,极易发生滑动。

2.2 滑坡影响范围分析

从胡家山滑坡基本地质特征分析,前缘剪出口较高,滑体前缘中部有基岩山体阻挡(图 2、图 3),使滑体剪出口分为 2 个。从滑坡变形特征和发展趋势分析,向西北方向的剪出口是滑体的主要变形剪出方向,如果滑体大规模快速剪出,可能威胁(危害)坡体下部的铁路和公路安全,为此,需要在滑坡变形特征定性分析的基础上,利用定量化模型估算滑体快速滑动的最大距离。

关于滑坡滑移距离的预测,许多学者和工程技术人员通过实测资料的统计分析,建立了多种预测模型。其中包括利用滑坡后缘高程和前缘高程为参数的经验公式[11];奥地利学者 Scheidegger(谢德格尔)[12]通过统计的方法提出以滑坡垂直滑落高度、水平距离和滑坡体积为参数的预测模型,该方法具有一定的针对性,但是在实际工作中难以准确预测;日本学者森·胁宽[13]通过分析不同体积的滑坡资料,提出以滑坡垂直滑落高度、水平滑移距离与滑坡体积之间的关系为参数的滑移距离预测模型;王思敬等[14]、王靖泰等②、王念秦等[11]针对黄土滑坡的特性也分别提出了相应的滑移距离预测模型。

针对胡家山滑坡的特点,选取以下 3 个模型进行滑移距离预测,模型介绍如下。

模型 1:基于前后缘高程的经验公式方法

$$S=2(H_1-H_2)$$

其中:S—滑距(m);H_1—滑坡后缘高程(m);H_2—滑坡前缘高程(m)。

模型 2:基于滑坡体积的模型[14]

$$\log(H/L)=-0.094\ \log(V)+0.1$$

其中:H—滑体垂直滑落高度(滑坡前后缘高差,m);L—水平滑移距离(m);V—滑动体的体积(m^3)。

模型 3:基于滑坡物理力学参数的模型②

$$L=n\times\Delta H/(0.5\ \tan\varphi)$$

其中,L—滑坡体最大水平滑移距离(m);ΔH—滑坡前、后缘高差(m);n—滑坡滑出条件系数,根据经验取 0.2;φ—黄土的内摩擦角(°)。

根据上述计算方法,计算结果见表 3。

胡家山滑坡属于前缘牵引式滑坡,且在滑坡体前缘的 2 个出口中央存在 1 个孤立的山峰,对滑坡体的滑动起到一定的阻挡作用,一般不会造成很大的水平位移。根据滑坡水平位移的计算结果并结合当地的地形地貌,修正滑坡影响范围(图 7),滑坡发生整体滑动最大影响范围为 0.55km^2。

2.3 滑坡失稳概率分析

滑坡的失稳概率即滑坡发生的频率,是预测评价滑坡危险性的重要依据之一。根据 IUGS[15]的建

表 2 胡家山滑坡稳定性计算结果

Table 2 Stability analyzing results of Hujiashan landslide

滑坡体编号		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ
工况一	天然状态	8.73	1.41	1.39	1.15	1.02	1.07	1.09
工况二	10 年一遇降雨	7.51	1.38	1.18	0.98	0.81	0.85	0.88
工况三	50 年一遇降雨	7.28	0.90	0.89	0.76	0.66	0.68	0.70

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3　滑坡失稳滑移距离计算结果

Table 3　Estimated sliding distance of landslides

滑坡体编号	$-H$ /m	θ /°	V /10^4m^3	L /m		
				L_1 /m	L_2 /m	L_3 /m
Ⅱ	130	15	235	260	411	306
Ⅲ	105	1.0	169	210	324	247
Ⅳ	80	10	111	160	236	188
Ⅴ	45	15	14	90	109	106
Ⅵ	50	19	8	100	115	118
Ⅶ	40	15	3	80	83	94

议，主要采用 3 种形式来表达：①在一定时间段内(一般指每年,也可以根据需要修改时限)研究区内某种特定滑坡累计发生的数量；②在一定的时间段内某种特定边坡发生滑动的概率；③根据特定量级的诱发因素(例如考虑临界孔隙水压力等)的年超越概率来确定滑坡发生的概率。

本文采用计算滑坡诱发因素的年超越概率的方法进行失稳概率分析，调查结果显示胡家山滑坡的主要诱发因素是降雨。根据降雨资料统计,凤县 50 年一遇降雨量时 6~9 月 4 个月累计降雨量达到 840.2mm,一年内由 50 年一遇降雨诱发滑坡概率为 0.02。另外,凤县 10 年一遇降雨量时 6~9 月的降雨量累计为 500.0mm,其发生概率设为 10 年,则在 1 年内由 10 年一遇降雨造成滑坡的概率为 0.1。

坡体在天然状态下基本处于稳定状态，没有发生滑动的可能,即不存在危险性,也就不存在承灾体

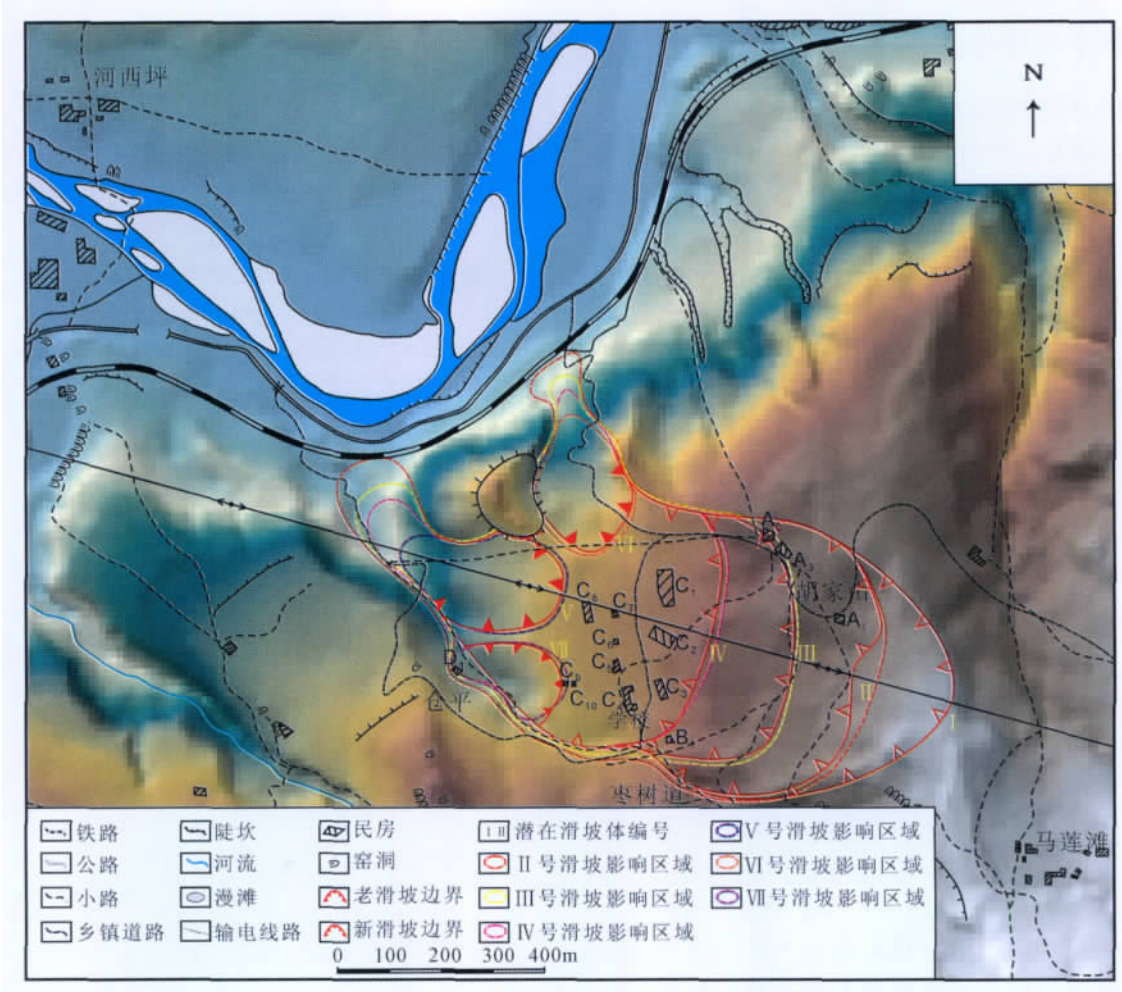


图 7　滑坡影响范围示意图

Fig. 7　Sketch map of landslide run-out

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

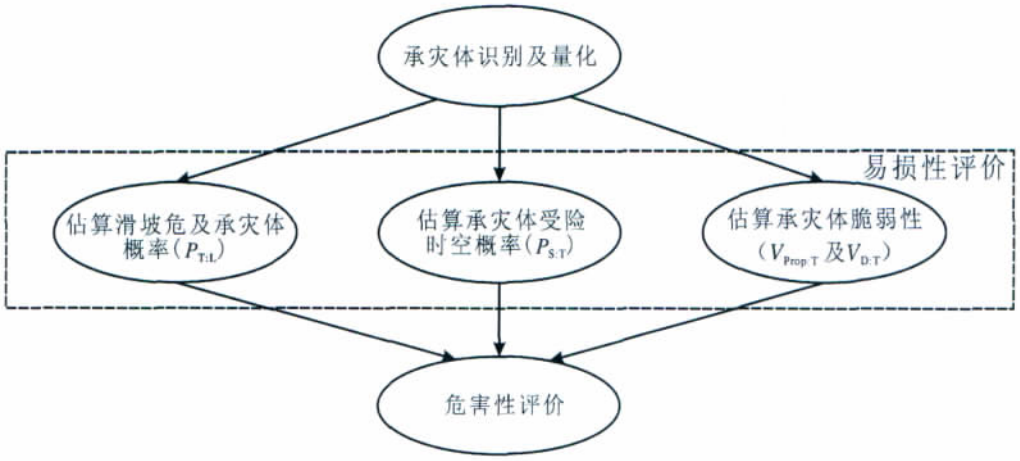


图 8 滑坡潜在危害性评价流程(香港土木工程办公室,1998)

Fig. 8 Flow chart of landslide consequences assessment

的易损性和滑坡的风险。

3 滑坡承灾体易损性评价

3.1 承灾体易损性评价方法

承灾体是指滑坡影响区域内所有的人、建筑物、工程设施、运输工具、土地、各种人类工程经济活动等。易损性是承灾体的属性,表示滑坡影响区内单个或一系列承灾体损失的程度,用 0(没有损失)到 1(总损失)之间的数字来表征。对于财产,易损性是损坏的价值和财产总值的比率,对于人员则是在滑坡影响范围内作为承灾体的人的死亡概率[3]。目前国际上运用比较普遍的承灾体易损性评价主要包括以下几方面[3](图 8)。

3.2 承灾体易损性评价

根据上文讨论的承灾体易损性评价方法,对胡家山滑坡上不同级别的潜在滑坡分别进行承灾体易损性评价。根据现场调查,该滑坡所涉及的承灾体类型主要包括人口、房屋建筑、农田、果园、乡村公路、铁路等。为了详细确定滑坡影响范围内承灾体的具体情况,对滑坡体所涉及的住户及其财产进行了调查访问,统计结果见表 4。

公路、铁路、输电线路等基础设施的价值均以当地民政部门的统计建造报价为准, 以不同影响范围内的数量进行总价值核算; 而果园与耕地的价值损失主要体现在滑坡发生后,土地的复垦费用稍高,果园的复垦费用稍高相对较低,因为即使滑坡发生,果树依然可部分地保存完好,继续生长。

不同类型的承灾体, 其易损性评价特点各不相同,简述如下。

(1)人员的易损性:当人员处于受滑坡影响的区域内时,滑坡危及人员的概率为 1。调查结果显示,

表 4 胡家山滑坡影响区财产、人口统计

Table 4 Data of population and property in the affected area of Hujiashan landslide

建筑物编号	人口/人	户数/户	房屋/间	牲口/头	财产合计/万元
A_1	21	5	26	17	37.1
A_2	25	7	35	17	50.7
A_3	27	7	37	18	51.6
B_1	18	4	21	13	29.7
C_1	38	9	43	22	64.4
C_2	29	8	39	28	58.4
C_3	20	6	29	28	44.4
C_4(学校)	/	/	11	/	4.4
C_5	22	5	27	10	36.8
C_6	14	5	23	7	34.9
C_7	13	4	26	10	31.4
C_8	20	6	32	11	43.9
C_9	19	4	19	10	28.6
C_{10}	16	4	15	9	26.9
D_1	15	5	12	12	31.0
合计	297	79	395	212	574.2

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

除春节前后的 1 个月基本上所有人员都在家里,且每天呆在建筑物内的时间约为 1/2 外,另外的11 个月约 60%的人外出打工或上学,其余人员每天约 1/3 的时间呆在建筑物中,那么滑坡影响区域内的人员呆在建筑物中的概率为 $\left(\frac{30}{360}\times\frac{1}{2}+\frac{300}{360}\times(1-0.6)\times\frac{2}{3}\right)\times0.5=0.132$。当人员处于建筑物中时,他们的受险概率、受险的时空概率与建筑物相同。假设当人员处在屋子外面但仍然在滑坡影响范围内的概率为 0.5,那么此时的受险时空概率为 $\left(\frac{30}{360}\times\frac{1}{2}+\frac{300}{360}\times(1-0.6)\times\frac{2}{3}\right)\times0.5=0.132$。另外根据调查,该区域内老人、小孩占人口总数的 1/3,他们对滑坡的防御能力较差,因此假定他们的脆弱性为 0.02,成年人的脆弱性为 0.005,则此区域内人员的整体脆弱性为 0.02×1/3+0.005×2/3=0.01。对于小区域来说,人员的人口结构、知识层次等一般变化不大,因此整个区域内人口的易损性基本一致。胡家山滑坡所处的位置并非旅游景区,乡间公路及乡间小路上行走的人员基本都为常住人口,因此不考虑流动人口的易损性。

(2)建筑物和财产的易损性:建筑物大多坐落于滑坡体上,此时滑坡危及建筑物的概率和建筑物的受险概率均为 1,建筑物在受到损坏后部分建筑材料可重复使用,其脆弱性一般小于 1。

(3)农田和果园的易损性:由于调查精度的原因,本文将农田和果园作为统一对象处理,因其静止不动,所以其受灾概率和受险的时空概率均为 1,其脆弱性取 0.5。

(4)基础设施的易损性:滑坡可能影响到的基础设施包括输电线路、乡间公路、乡间小路等。因其坐落在滑坡体上,因此受灾概率和受险的时空概率均为 1。滑坡发生时将导致输电中断、输电线路

表 5　承灾体易损性评价结果

Table 5　Vulnerability assessment of elements at risk

滑坡编号	工况		滑动概率	人口				财产				农田				基础设施							
				总数/人	$P_{T.L}$	$P_{S.T}$	$V_{D.T}$	总数/万元	$P_{T.L}$	$P_{S.T}$	$V_{Prop.T}$	总数/hm²	$P_{T.L}$	$P_{S.T}$	$V_{Prop.T}$	输电线路	乡村公路	乡村小路	$P_{T.L}$	$P_{S.T}$	$V_{Prop.T}$
II	工况 2	10 年一遇降雨	0.1	297	1	0.153	0.01	574.2	0.75	0.75	0.65	31.3	1	1	0.6	950m	1622m	2380m	1	1	1
	工况 3	50 年一遇降雨	0.02			/0.132			0.80	0.95	0.70				0.7	14.25 万元	486.6 万元	285.6 万元			
III	工况 2	10 年一遇降雨	0.1	276	1	0.153	0.01	537.0	0.75	0.75	0.65	25.8	1	1	0.6	790m	1287m	1780m	1	1	1
	工况 3	50 年一遇降雨	0.02			/0.132			0.80	0.80	0.70				0.7	11.85 万元	386.1 万元	213.6 万元			
IV	工况 2	10 年一遇降雨	0.1	224	1	0.153	0.01	405.1	0.75	0.75	0.65	15.8	1	1	0.6	635m	1160m	1080m	1	1	1
	工况 3	50 年一遇降雨	0.02			/0.131			0.80	0.80	0.70				0.7	9.53 万元	348 万元	129.6 万元			
V	工况 2	10 年一遇降雨	0.1	/	/	/	/	/	/	/	/	4.3	1	1	0.6	350m	140m	300m	1	1	1
	工况 3	50 年一遇降雨	0.02												0.7	5.25 万元	42 万元	36 万元			
VI	工况 2	10 年一遇降雨	0.1	/	/	/	/	/	/	/	/	3.6	1	1	0.6	/	380m	/	1	1	1
	工况 3	50 年一遇降雨	0.02												0.7		114 万元				
VII	工况 2	10 年一遇降雨	0.1	34	1	0.153	0.01	59.6	0.75	0.75	0.65	2.0	1	1	0.6	/	/	200m	1	1	1
	工况 3	50 年一遇降雨	0.02			/0.132			0.80	0.80	0.70				0.7			24 万元			

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

摧毁、道路掩埋或线路移位等，设施基本不可再利用，因此其脆弱性取 1。

由于不同潜在滑面的承灾体不同，具体的易损性评价结果也不同(表 5)。

4 滑坡风险评价

4.1 滑坡风险计算方法

滑坡风险是指滑坡对生命、健康、财产或环境产生的不利影响的概率和严重程度的度量，定量的表达为：风险=灾害×潜在的价值损失[3]。也可以表达为：如果滑坡发生的话，它的发生概率乘上滑坡发生后的结果。为方便统计，笔者将财产损失与生命损失分别进行计算，则风险计算的基本公式如下：

$$R=P_{(L)}\times P_{(T:L)}\times P_{(S:T)}\times V_{(D:T\ or\ Prop:S)}\times E$$

其中：R—滑坡风险(财产损失或潜在的死亡人数)；$P_{(L)}$—滑坡的发生概率；$P_{(T:L)}$—滑坡到达承灾体(财产或人员)的概率；$P_{(S:T)}$—滑坡影响承灾体(财产或人员)的时空概率；$V_{(D:T\ or\ Prop:S)}$—承灾体(人员)的脆弱性；$V_{(Prop:S)}$—承灾体(财产)的脆弱性；E—承灾体的价值或人口数量。

当承灾体承受不只一个滑坡影响或承灾体不唯一时，需要计算滑坡的总风险，此时可采用下面的计算公式：

$$R_T=\sum_{i=1}^{n}(P_{(L)}\times P_{(T:L)}\times P_{(S:T)}\times V_{(D:T\ or\ Prop:S)}\times E)$$

其中：R_T—总风险；i—不同滑坡或不同承灾体的类型；n—滑坡或承灾体的数量。

4.2 滑坡风险评价

根据上述评价过程和滑坡风险计算公式，得到胡家山滑坡在不同工况下各级潜在滑动面发生滑动时的风险(表 6)。

根据计算结果分析，滑坡最大风险不是出现在 50 年一遇的暴雨情况，而是 10 年一遇的暴雨条件，主要原因是其发生概率相对较大。由此可见，小概率事件的发生虽然影响较大，但对人们的日常生活并无特大的风险，相反大概率事件所造成的影响风险较大。胡家山滑坡的财产最大风险为 113.71 万元/年，人口最大风险为 0.0648 人/年。

本文从公益性评价基点出发，根据 1998 年香港岩土工程办公室颁布的临时性的滑坡灾害社会风险容许标准[16](图 9)，对胡家山滑坡进行了风险评价。图 9 中 A 点所示为胡家山滑坡的最小风险，已经处于不可接受的区域范围内，因此胡家山滑坡的人口社会风险已经处于不可接受区。建议当地政府及有关部门加强滑坡监测，设法筹集多方资金，进行住房、学校搬迁避让或利用工程治理等方法进行风险控制，达到防灾减灾的目的。

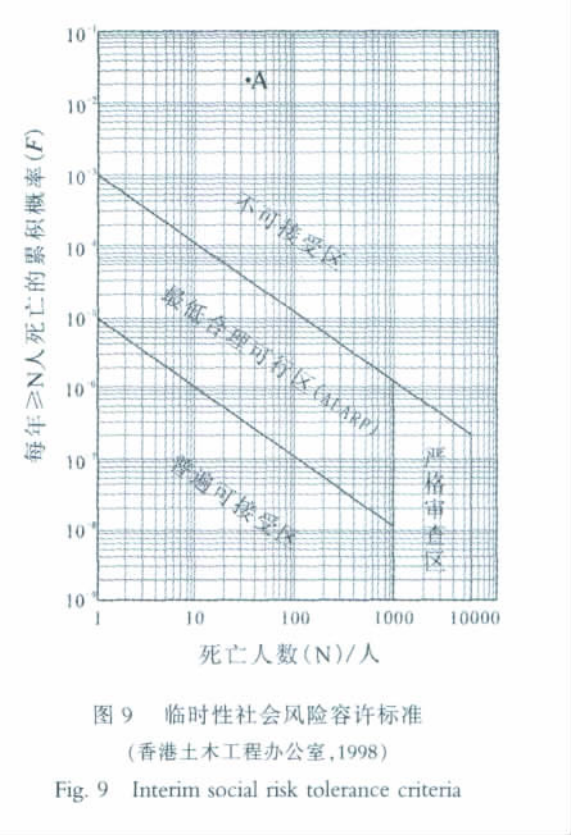


图 9 临时性社会风险容许标准
(香港土木工程办公室,1998)
Fig. 9 Interim social risk tolerance criteria

表 6 胡家山滑坡风险计算结果
Table 6 Calculated risk of Hujiashan landslide

滑坡编号		降雨 10 年一遇	降雨 50 年一遇
Ⅱ	财产总风险（万元/年）	113.71	25.12
	人口总风险（人/年）	0.0648	0.0147
Ⅲ	财产总风险（万元/年）	92.40	19.75
	人口总风险（人/年）	0.0602	0.0127
Ⅳ	财产总风险（万元/年）	70.63	15.03
	人口总风险（人/年）	0.0488	0.0103
Ⅴ	财产总风险（万元/年）	10.28	2.12
	人口总风险（人/年）	/	/
Ⅵ	财产总风险（万元/年）	13.02	2.66
	人口总风险（人/年）	/	/
Ⅶ	财产总风险（万元/年）	5.48	1.22
	人口总风险（人/年）	0.0074	0.0016

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在评价过程中,滑坡对铁路有一定的威胁,但是滑坡风险概率很小,除非在极端降雨且滑坡发生整体滑动的情况下才会造成,同时,铁路相关部门在铁路建设过程中也采取了相应的防护措施,例如在滑坡前部采用隧道通过,在冲沟沟口位置设置重力挡墙等,降低铁路遭受胡家山滑坡危害的风险。

5 结 论

(1)本文分别利用 Geo-slope 软件、建模、统计分析等方法对滑坡多级潜在滑面进行稳定性分析、影响范围预测和失稳概率分析,分析滑坡在天然状态、10 年一遇降雨和 50 年一遇降雨 3 种工况条件下的危险性。结果显示:滑坡在天然状态下处于稳定和欠稳定状态,基本不会发生滑动,因此滑坡风险主要考虑 10 年一遇降雨和 50 年一遇降雨 2 种工况条件;滑坡在 50 年一遇暴雨条件下最不稳定,中部和下部滑体最易滑动;滑坡最大影响范围可达 0.55km^2;滑坡 1 年内在 10 年一遇降雨和 50 年一遇降雨条件下可能发生局部滑动的概率分别为 0.1 和 0.02。

(2)本文对承灾体易损性和滑坡风险评价方法进行探讨,得出胡家山滑坡财产最大风险为 113.71 万元/年,人口最大风险为 0.0648 人/年。其中人口风险超过了社会可容许风险标准,应采取加强监测、搬迁避让或适当工程治理等方法进行风险控制,以达到防灾减灾的目的。

致谢:在文章编写过程中,得到吴树仁研究员、张永双研究员、石菊松博士、李滨博士、孙萍博士的诸多指导,在此表示衷心的感谢。

参考文献

[1]Fell R, Ho K K S, Lacasse S, et al. A framework for landslide risk assessment and management[C]//Hungr O, et al. Landslide Risk Management. London: Taylor and Francis, 2005: 3-26.

[2]Van Westen C, Van Asch T W J, Soeters R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2005, 65(2):167-184.

[3]殷坤龙,晏同珍. 滑坡预测及相关模型[J]. 岩石力学与工程学报, 1996,(1):1-8.

[4]朱良峰,殷坤龙. 基于 GIS 技术的区域地质灾害信息分析系统研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2001, 12(3):428-433.

[5]殷坤龙,朱良峰. 滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(2):279-284.

[6]朱良峰,吴信才,殷坤龙,等. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3):52-56.

[7]吴树仁,董诚,石菊松,等. 地质灾害信息系统研究——以重庆市丰都县为例[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6):683-691.

[8]吴树仁,张永双,石菊松,等. 三峡库区重庆市丰都县滑坡危险性评价[J]. 地质通报, 2007, 26(5):574-582.

[9]吴树仁,石菊松,张春山,等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 2009, 28(8):995-1005.

[10]石菊松,石玲,吴树仁,等. 滑坡风险评估实践中的难点与对策[J]. 地质通报, 2009, 28(8):1020-1030.

[11]王念秦,张倬元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 兰州:兰州大学出版社, 2005.

[12]Adrian E Scheidegger. On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides[J]. Rock Mechanics, 1973,(5):231-236.

[13]森·胁宽. 滑坡滑距的地貌预测(王念秦译)[J]. 铁路地质与路基, 1989,3(3):42-47.

[14]王思敬,王效宁. 大型高速滑坡的能量分析及其灾害预测[C]//1987 年全国滑坡学术讨论会滑坡论文选集. 成都:四川科学技术出版社, 1989:117-124.

[15]IUGS. Quantitative risk assessment for slopes and landslides—the state of the art[C]//Landslide Risk Assessment. Balkema: Rotterdam, 1997:3-12.

[16]Geotechnical Engineering Office. Landslides and boulder falls from natural terrain: interim risk guidelines[R]. GEO Report No.75, The government of the Hong Kong Special Administrative Region, 1998.

① 徐邦栋,王恭先. 几类滑坡的发生机理及有效防治措施. 铁路崩坍滑坡论文报告集,西安 1982 年全路崩坍滑坡科技攻关会议,1982.

② 王靖泰, 等. 中国西部厚层黄土滑坡形成机理与减轻灾害. 兰州:甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所,1996.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net