

陕西省宝鸡市渭滨区夏呀河滑坡风险评估

何淑军^{1,2}, 张春山^{1,3}, 陈志华⁴, 吴树仁^{1,3}, 辛 鹏^{1,3}, 叶思源^{1,3}

HE Shu-jun^{1,2}, ZHANG Chun-shan^{1,3}, CHEN Zhi-hua⁴,

WU Shu-ren^{1,3}, XIN Peng^{1,3}, YE Si-yuan^{1,3}

1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 2. 中化岩土工程股份有限公司, 北京 102600;
3. 中国地质科学院地壳变形地表过程实验室, 北京 100081; 4. 新疆时代石油工程有限公司, 新疆 克拉玛依 834000
1. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;
2. China Zhonghua Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 102600, China;
3. Key Laboratory of Crust Deformation and Precresses, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
4. Xinjiang Time Petroleum Engineering Co., Ltd., Keramay 834000, Xinjiang, China

摘要:为了探索多级潜在滑动面滑坡的定量化风险评估技术方法,以陕西省宝鸡市渭滨区夏呀河 4 级潜在滑动面滑坡为例,利用国际上通用的单体滑坡风险计算公式,在夏呀河滑坡野外大比例尺(1:10000)调查、工程勘探和室内测试分析的基础上,简述了夏呀河滑坡的基本特征和危险性,重点研究了不同潜在滑动面的危害性、影响范围、承灾体的时空概率、易损性和风险估算,详细论述了各个参数的影响因素,探讨了单体滑坡风险评估的一般模式和滑坡频率、时间概率、空间概率、承灾体易损性参数的确定方法,并初步估算了夏呀河各级滑坡在不同工况条件下潜在的经济损失和人员伤亡的总风险值,量化地表达了该滑坡所具有的潜在威胁。研究表明,夏呀河滑坡属于高风险滑坡,和国际上暂定的社会容许标准相比,其总风险值处于不可接受范围内,应该采取风险减缓措施进行风险管理。

关键词:滑坡;风险评估;时空概率;承灾体;易损性

中图分类号:P694 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2009)08-1064-13

He S J, Zhang C S, Chen Z H, Wu S R, Xin P, Ye S Y. Risk evaluation for Xiayahe landslide in Weibin District, Baoji City, Shaanxi Province, China. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8):1064-1076

Abstract: In order to research into quantitative risk assessment technique for multi-surface potential landslide, taking Xiayahe landslide which has four potential sliding surfaces in Weibin District, Baoji City, Shaanxi Province as an example, based on large scale(1:10000) field survey, geotechnical exploration, indoor analytic research and by using international single landslide risk calculation formula, fundamental characteristic and fatallness of Xiayahe landslide were briefly described and potential harmfulness, influence scope of every different potential sliding surface, time-spatial probability, vulnerability and risk were deeply researched. It's also primarily evaluated that under different civil condition the overall risk of potential economic loss and death which leads to a quantitative expression. It's indicated that Xiayahe landslide belongs to highly risky disaster-bearing body, compared to international risk tolerance standard., the risk value can't be accepted, and certain risk mitigation measures must be carried on.

Key words: landslide; risk assessment; space-time probability; risk-bearing body; vulnerability

自 20 世纪 70 年代以来,滑坡灾害风险评估在国内外已有较多的研究,并成为近年来的研究热点^[1-16]。从最早的滑坡灾害机理研究到滑坡风险评价

的定性研究,一直到近几十年来的滑坡风险评价定量化研究,不断深入。但大多文献集中于对区域滑坡灾害风险评价与风险管理研究的论述,对单体滑坡

收稿日期:2009-05-07;修订日期:2009-06-01

地调项目:国家“十一五”科技支撑课题(编号:2006BAC04B05,2008BAK47B04)和中国地质调查局项目(编号:1212010640401)资助

作者简介:何淑军(1974-),男,博士,国家注册土木(岩土)工程师,从事地质灾害和岩土工程生产、科研工作。E-mail:jshsjun@163.com

的风险评估研究比较少。单体滑坡的研究局限于滑坡的稳定性计算^[17-26],根据计算的稳定系数采取适当的措施进行工程治理,没有涉及对滑坡灾害可能造成的潜在人员伤亡和财产损失的预测评估研究。原因在于对单体滑坡的风险评价中,要求的量化程度较高、影响因素多,目前还没有系统完整的评价标准。但也提出了一些风险评估的计算表达式。

在定量风险的表达方面,不同学者提出了不同的表达式^[27]。如 Maskrey(1989)提出风险度(Risk)=危险度(Hazard)+易损度(Vulnerability);Smith(1996)提出风险度=概率(Probability)×损失(Loss);Deyle 等和 Hurst 分别在 1998 年提出风险度=危险度×结果(Consequence);Tobin 等(1997)提出风险度=概率+易损度等。刘希林等(2003)认为,1991 年联合国提出的表达式风险度=危险度×易损度较为全面地反映了风险的本质特征。

Morgan 等在 1992 年提出单个个体的生命死亡概率、财产损失分别用如下 2 个公式进行计算^[28]:

$$R(DI)=P(H) \times P(S|H) \times P(T|S) \times V(L|T) \quad (1)$$

$$R(PD)=P(H) \times P(S|H) \times V(P|S) \times E \quad (2)$$

式中: $R(DI)$ —每年的个体生命死亡概率; $P(H)$ —每年的滑坡发生概率; $P(S|H)$ —滑坡对承灾体的空间影响概率; $P(T|S)$ —滑坡对承灾体在空间影响上的时间概率; $V(L|T)$ —一个体的易损性; $R(PD)$ —每年财产损失的价值; $V(P|S)$ —承灾体的易损性; E —承灾体的价值。

参考上述提法,为了探索滑坡定量风险评估的一般模式和程序,本文对夏呀河单体滑坡的风险性采用如下表达式:

$$R=P_H \times P_L \times P_S \times V_{(D,T \text{ 或 } P,T)} \times E \quad (3)$$

式中: R —滑坡造成的潜在风险(财产损失或人口伤亡数); P_H —滑坡年发生概率; P_L —滑坡影响承灾体(人或财产)的空间概率; P_S —滑坡影响承灾体(人或财产)的时间概率; $V_{(D,T)}$ —承灾体的易损性(指人); $V_{(P,T)}$ —承灾体的易损性(指物或财产); E —承灾体的价值或人口数量。

但是,当承灾体受到滚石、滑坡、泥石流等一系列地质灾害的影响时,或在滑坡受到降雨、地震、人类活动多种因素驱动时,以及在承灾体同时受到同一类型但大小不同的滑坡的影响时,就应该给出一个风险的总和。在这种情况下可采用如下公式:

$$R_{(Total)} = \sum_{i=1}^n (P_H \times P_L \times P_S \times V_{(D,T \text{ 或 } P,T)} \times E) \quad (4)$$

式中: $R_{(Total)}$ — n 个滑坡影响下的总风险或不同类型承灾体的风险总和; n —滑坡的数量或不同承灾体类型的数量。

滑坡风险可以从定性和定量 2 个方面进行评价。根据可利用数据的多少、对评价结果期望的精确程度和对问题本身的理解程度,选择采用定性或定量的评价方法。一般来说,区域上可利用的数据很少,更适用于定性风险评价;而对于单体滑坡而言,数据比较丰富,应该采用详细的定量风险评估。

上述的有关论述为单体滑坡风险评估提供了一定的理论基础。本文以典型的单体滑坡——夏呀河滑坡为例进行滑坡定量风险评估,主要按照上述的程序和公式(3)或(4)进行。笔者试图通过对夏呀河单体滑坡定量风险评估的研究,探讨单体滑坡风险评价的一般方法、程序、定量评价模式,以及相关参数的确定,以期推动对单体滑坡风险评价的进一步研究。同时,通过对夏呀河单体滑坡最大风险的估算,为当地政府进行风险管理提供依据。但文中并不涉及评估以后风险程度在不可接受范围内时的风险管理研究。

1 夏呀河滑坡的基本概况

宝鸡市渭滨区位于秦岭造山带北麓,处于秦岭山区到渭河盆地的过渡带内,地势由南向北倾斜,高差大于 1200 m。区内分布多条河流,大多呈南北走向,普遍切割较深,边坡较陡,容易诱发滑坡,多数滑坡沿河流两岸分布。夏呀河滑坡发育于渭河的二级支流、清姜河一级支流夏呀河右岸的边坡上,属于宝鸡市渭滨区神农镇夏呀河村四、五、六组。

夏呀河滑坡在平面上呈马鞍形,宽度约 550 m,长度约 290 m,滑坡的相对高度约 90 m,平均坡度 20°,主滑动方向约为 322°。最大滑坡体厚度平均约为 30 m,体积达 4.8×10⁶m³,属于大型的黄土-粘土砂砾石混层滑坡。滑坡体表层多处有浅层滑体滑动、滑塌,钻探揭示该滑坡有 4 个滑动面,表明滑坡是多期活动形成的。夏呀河滑坡在渭滨区的位置及其平面形态见图 1。

夏呀河各级滑坡的基本特征、变形特征及其危害、稳定性计算、各级滑坡滑动概率分析等在参考文献[29]中有详细的论述。本文不再赘述,有些数据

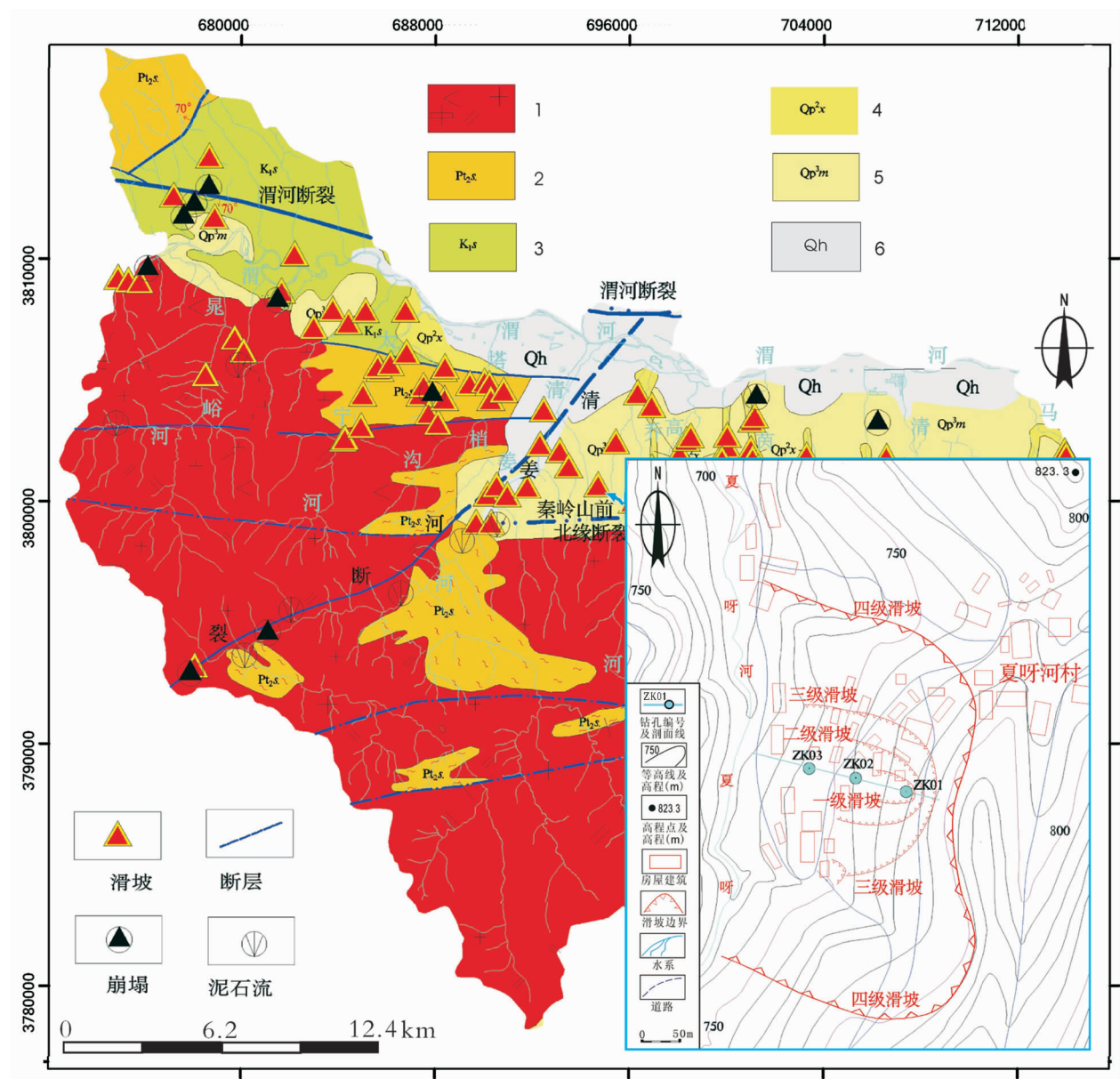


图 1 夏呀河滑坡位置及其平面图

Fig. 1 Location and layout of the Xiayahe landslide

- 1—三叠纪侵入岩体:花岗岩、角闪石英二长岩、二长花岗岩,含少量石英闪长岩、石英砂岩、页岩、煤层等;2—中元古界宽坪岩群四岔口岩组:云母石英片岩、绿片岩、大理岩、石英大理岩;3—下白垩统三桥组:复成分砾岩、砂砾岩、砾岩透镜体;
- 4—第四系中更新统洪湖组:浅棕黄色黄土,含钙质结核;5—第四系上更新统马兰组:浅黄色黄土夹浅棕色古土壤层;
- 6—第四系全新统:砂、砂砾石、砂质粘土、粘土,重力堆积的黄土、古土壤混杂体

将直接利用。

2 夏呀河滑坡的危险性

对滑坡进行危险性分析,一般需要对潜在滑坡或复活滑坡进行综合调查、工程钻探、物探、槽探、室内土工试验等勘查、测试工作,以了解滑坡的滑移过

程和不同滑移阶段的地形地貌、岩土结构、土层参数、水文地质、断裂与滑动机制、气候和植被状况,选择计算模型估算相应的发生频率。

2.1 滑坡频率(P_H)理论分析

单体滑坡的危险性(即滑坡发生滑动的可能性有多大)可以用滑坡频率(P_H)定量地确定。滑坡频率

表 1 夏呀河各级滑坡的几何特征及其可靠度

Table 1 Geometric features and reliability of slides at different layer

指标参数		长 /m	宽 /m	面积 /m ²	平均厚度 /m	体积 /10 ⁴ m ³	稳定性均值 (F_S)	可靠性指标 (β)	失稳概率 (P_F)
一级 滑坡	天然状态	42	45	2400	4	0.7	1.21	1.71	4.4%
	饱水状态						1.08	0.88	18.9%
二级 滑坡	天然状态	90	115	12400	7	7.4	1.51	1.57	5.8%
	饱水状态						1.06	0.69	24.5%
三级滑坡		115	250	32556	14	39.0	1.49	1.53	6.3%
四级滑坡		290	550	183165	30	480.0	1.54	1.81	3.5%

一般可根据以下 3 种情况计算：①研究区内具备一定特征的滑坡在一年内的发生数量；②在给定的期限内一定特征的边坡可能发生滑动的概率；③下滑力超过抗滑力的概率或可能性。

计算滑坡频率的方法有多种：①利用研究区或相似的(地质、地貌等特征)地区以往的数据资料；②基于边坡稳定性分级系统得出的相关经验方法；③运用地貌学证据加上以往数据或根据专家的判断；④将频率与诱发事件(降雨、地震等)的强度联系起来；⑤参考概念模型如利用断层树法,根据专家的判断直接评估；⑥模拟主要变量如孔隙水压力与诱发因素的关系并耦合各种级别的形态和剪切强度；⑦应用概率论方法,考虑边坡形态、剪切强度、破坏机制和孔隙水压力。既可以用可靠性分析,也可以用破坏频率等方法。可以根据实际情况选取一种方法或多种方法联合运用。

2.2 夏呀河滑坡危险性分析

基于上述理论和方法,对夏呀河滑坡进行危险性分析,按照下滑力超过抗滑力的概率或可能性,利用 MONTE-CARLO 模拟方法计算夏呀河各级滑坡的滑动概率。参考文献[29]对夏呀河各级滑坡的稳定性及其滑动概率进行了详细的计算(因三、四级滑动面处于地下水位以下,接近饱和状态,认为降雨对三、四级滑动面参数的影响不大,即在降雨条件下,三、四级滑坡的滑动概率不变)。滑坡滑动概率模拟计算结果见表 1。

由表 1 可知,夏呀河各级滑坡在天然条件下均是稳定的,但仍有滑动危险,只不过滑动概率很小,且滑动概率各不相同。三级滑坡滑动概率最大,为 6.3%,依次为二级滑坡、一级滑坡,最小的是四级滑坡,其滑动概率是 3.5%。而在强降雨或连阴雨的条件下,

当土体水饱和时对一级滑坡、二级滑坡的影响较大,一、二级滑坡由稳定变得不稳定,滑动概率也分别增大至 18.9%和 24.5%。但对三级、四级滑坡的稳定性及滑动概率影响不大。

因此,在一般情况下与在降雨或连阴雨条件下各级滑坡的危险性概率是不同的,各级滑坡的滑动概率值 P_H 与表 1 中的 P_F 对应。

3 夏呀河滑坡承灾体的易损性

滑坡危害分析包括识别承灾体的种类,对财产和人口等指标量化;估算承灾体受到滑坡威胁的时空概率(P_L)和(P_S);根据财产损失率(V_{RT})和生命损失率(V_{DT}),估算承灾体的易损性。

3.1 承灾体的识别

包括区域内受到滑坡灾害影响的人、建筑物、工程设施、基础设施、运输工具、土地、经济活动等,也就是滑坡上或滑坡体运动时所经过地区内的所有物体,还包括紧邻滑坡或滑坡上坡部受到滑动影响的物体。

3.2 滑坡危及承灾体的空间概率(P_L)

滑坡体危及承灾体的概率取决于滑坡体与承灾体各自的位置及滑坡体可能的运动路径。它是一个在 0 和 1 之间的条件概率。

确定 P_L 是比较复杂的,如对位于滑坡体下方和滑坡体滑移路径上的建筑或人来说, P_L 的估算应综合考虑滑坡体的运移距离、滑坡物源区的位置和承灾体的情况;对于交通工具及其中的人员,或是行走在滑坡下方滑坡路径上的人而言, P_L 的估算要综合考虑滑坡体的滑移距离、交通工具或者人员的行走路径。根据时间概率(P_S)来估算交通工具或人员是否在滑坡发生时的路线上。但对于坐落在滑坡体上

的建筑来说,一般可直接确定 $P_L=1$ 。

3.3 滑坡危及承灾体的时间概率(P_s)

时间概率是指灾害发生时承灾体在灾害影响区内的概率。它是一个条件概率,值介于 0 到 1 之间。 P_s 一般可以根据以下情况确定:①位于滑坡体上或滑动路径上的建筑物,其时间概率 $P_s=1$;②对于单个滑坡体影响范围内的交通工具,时间概率是其一年来在滑坡体上通行的时间;③对于所有的交通工具,时间概率是单个交通工具一年内在滑坡体上通行的时间总和;④对于建筑物中的人员来说,其时间概率是一年内这些人员呆在建筑物中的时间,对每一个人来说概率可能不同。

3.4 承灾体的易损性(V_{RT} 或 V_{DT})

承灾体的易损性就是在滑坡灾害影响的地区,一个对象或是多个对象受破坏或损害的程度。它是一个条件概率,条件是滑坡发生,且承灾体在滑坡体上或在滑坡路线上。财产的损失程度可以用 0(没有损失或破坏)到 1(完全损失或破坏)范围内的值来表示;滑坡或滑移路线上的人员的死亡概率可以用 0(无死亡)到 1(完全死亡)范围内的值来表示。

影响财产易损性的因素有:①与承灾体有关的滑坡体积;②承灾体所处的位置,如在滑坡体上还是滑坡体正下方;③滑坡位移量的大小,以及在滑坡体内的相对位移。

影响人员易损性的因素有:①滑坡滑动速度,快速滑坡比慢速滑坡更容易造成人员死亡;②滑坡体积,大的滑坡比小的滑坡更容易将人掩埋或挤压;③人员在露天或交通工具、建筑物内(人员的保护程度);④如果有建筑物,建筑物在滑坡影响下是否会坍塌及其坍塌的类型。

3.5 夏呀河滑坡承灾体易损性分析

基于上述滑坡灾害承灾体易损性的理论探讨,对夏呀河四级滑坡进行承灾体易损性分析。现场调查表明,该滑坡涉及到的承灾体类型主要为人口、房屋建筑、财产、部分农田、果林地、四级乡村水泥公路等。为了详细地确定各级滑坡影响范围内承灾体的分布情况及其数量、价值,对滑坡涉及到的四组、五组住户及其财产、人口进行了调查访问,统计结果见表 2。

为了预测滑坡滑动的影响范围,采用式(5)和(6)预测滑坡的滑移距离,即覆盖范围^[30]。预测结果见表 3。

数学模型 1——与前缘坡角有关的滑动距离:

$$H/L=0.73\tan\varphi-0.07 \quad (5)$$

式中: H —滑坡体前后缘标高之差(m), L —水平滑动距离(m), φ —滑动前缘坡角(°)。

数学模型 2——与滑坡体体积有关的滑动距离:

$$\log(H/L)=0.1-0.09\log V \quad (6)$$

式中: V —滑坡体体积(m^3),其余同上。

以下对夏呀河各级滑坡涉及到的承灾体分别进行易损性评价。

(1) 一级滑坡承灾体易损性分析

夏呀河一级滑坡涉及到的承灾体有建筑 6 处共 12 家农户、43 口人、109 万元财产,滑坡体上的 0.06 亩林地和下方 50 m 的四级乡村水泥公路。详细分布见图 2。

由表 3 的计算结果分析预测,一级滑坡可能涉及到的承灾体为房屋 A、B、C、D、E、F,道路 e,滑坡体上的果林和滑坡体涉及到的果林 f。其中 A、B 栋房屋位于滑坡边界上,滑坡一旦启动,这 2 栋房屋将被摧毁而不能使用,即其空间概率 $P_L(A)=P_L(B)=1$;根据滑坡滑移距离和经验方法,估算滑坡体达到 C、D、E、F 建筑的 $P_L(C)=P_L(F)=0.75$; $P_L(D)=0.4$; $P_L(E)=0.1$;道路 e 的 $P_L(e)=0.5$;同样滑坡体上的果林及其下部滑坡体涉及到的林地 f,综合判断其 $P_L(f)=0.7$ 。

承灾体时间概率的确定:对于滑坡体影响的建筑 A、B、C、D、E、F,道路 e,滑坡体上的果林和滑坡体涉及到的果林 f 等,因其静止不动,故其时间概率 $P_s=1$;夏呀河二、三、四级滑坡上的承灾体(指物)的时间概率 P_s 均为 1。

对于建筑物中的人员,调查显示,春节前后 2 个月所有人员基本在家,其余 10 个月约 70% 的人员外出,在家的人员按 1/3 的时间呆于建筑内计。可以综合得出该滑坡影响范围内人员的时间概率 $P_s=\frac{60}{360}$

$\times \frac{1}{3} + \frac{300}{360} \times (1 - \frac{70}{100}) \times \frac{1}{3} = 0.1389$ 。一个小区域的人员每年活动的时间一般变化不大,其时间概率一般不变。因此,夏呀河二、三、四级滑坡上的人员的时间概率 P_s 也为 0.1389。

承灾体易损性的确定:滑坡边界上的建筑 A、B,考虑到滑坡滑动时房屋开裂,部分倒塌,即使完全破坏,部分砖混结构的材料也可以重复利用,结合

表 2 夏呀河村村民的财产、人口统计

Table 2 Statistics results of population and property of Xiayahe Villagers

序号	姓名	各级滑坡上的 建筑物编号	砖木结构 房屋/间	土木结构 房屋/间	灶房 /间	其他 财产	价值 /万元	人口 /人	合计价 值/万元	合计人口 /人
1	杨新建	A	7		1		13	4	13	4
2	刘万忠		3		2	20 只鸡	6	2		
3	荣招斜		3		3	20 只鸡	12	4	28	10
4	冯新科	B	4		1		10	4		
5	陈万仓		4		2		11	4		
6	陈桂琴		3		1		6	4	17	8
7	古大毛	C	3		1		9	3		
8	陈 超			3			4	2	13	5
9	陈凤明		3		2		9	4	9	4
10	程晓林	D	4		1		10	4		
11	陈林军		4		2		12	4	29	12
12	车改香		3		1		7	4		
13	冯小科	E	4		2	10 只鸡	8	3	15	7
14	包连奎		3		2		7	4		
15	冯盈科		4	3	2		16	4	16	4
16	杨香翠	F	4		3		10	4	10	4
17	冯新亮		4				10	4		
18	冯洪亮			3			3	4	13	8
19	陈红才	G		4	1		5	8		
20	杨建强		3	3			8	5	13	13
21	杨 华		5		1		10	4		
22	杨亚娟	H	3		1		14	4	44	13
23	杨 佩		4	5	1		20	5		
24	杨海林			3	2		5	6	5	6
25	杨满林	I	3		2		8	4		
26	杨招科		4		2		16	6	34	14
27	杨建平		4	3			10	4		
28	杨碎斗	J	3		2		10	4	10	4
29	杨永平		2	3	2		9	6	9	6
30	杨义豆		3		2		10	4	10	4
31	张宝利	K	4	3	2		15	4	15	4
32	张晓林			3	1		5	6	5	6
33	杨拴虎		3	4	1		12	7		
34	冯米成	L	3		3	1 头牛	10	4	22	11
35	张宝成		5	1	2	2 头牛	15	4	15	4
36	杨登科		5	3			15	7	15	7
37	杨宝莲	M	4		1		15	4	15	4
38	杨然斗		3		2		5	4	5	4
39	包小鹏		3		3		10	6	10	6
40	王玉琴	N			2		12	6	12	6
41	杨晓红		3		2		13	5	13	5
42	杨晓银		3		2		12	4	12	4
43	杨银生	O	4		1	1 座门	15	5		
44	杨 志		4		3		20	4	35	9
45	杨米虎		4		2		15	4	15	4
46	陈传娥	P	3		1	1 座门	8	2	8	2
47	杨乖平		3		2	1 座门	16	4	16	4
48	杨忙生		6	1	1	1 座门	20	3		
49	包召莲	K4		4	1		7	2	27	5

经验给出其 $V_{PT}(A)=V_{PT}(B)=0.7$ 。滑坡下方的建筑 C、D、E、F 可能因滑坡滑动遭到掩埋，可利用性很小，取其易损性 $V_{RT}(C、D、E、F)=0.95$ 。由于滑坡滑动将导致道路被掩埋，线路移位，道路基本不可再利用，因此其 $V_{PT}(e)=1$ 。滑坡体上的果林及坡下影响范围内的田地，若滑坡滑动则基本被毁，考虑其可利

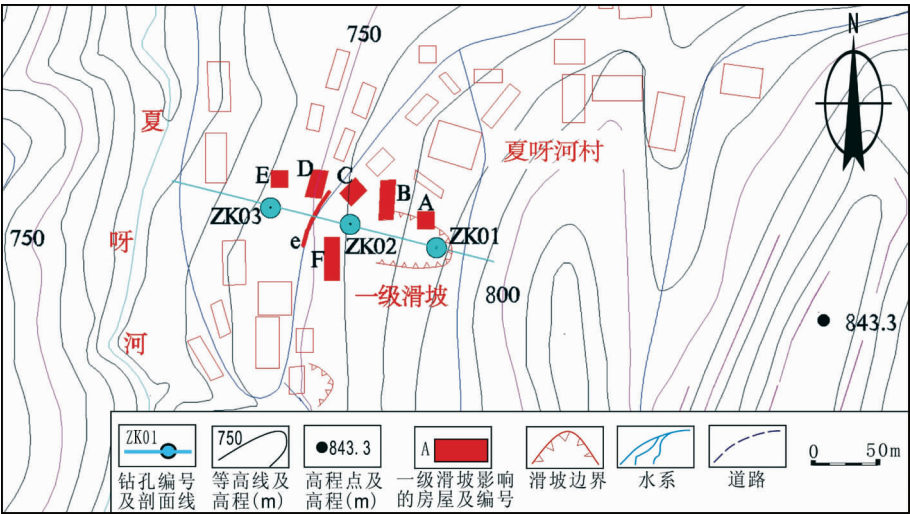


图 2 夏呀河一级滑坡承灾体平面分布图

Fig. 2 Plain map of the first layer landslide in Xiaoyahe

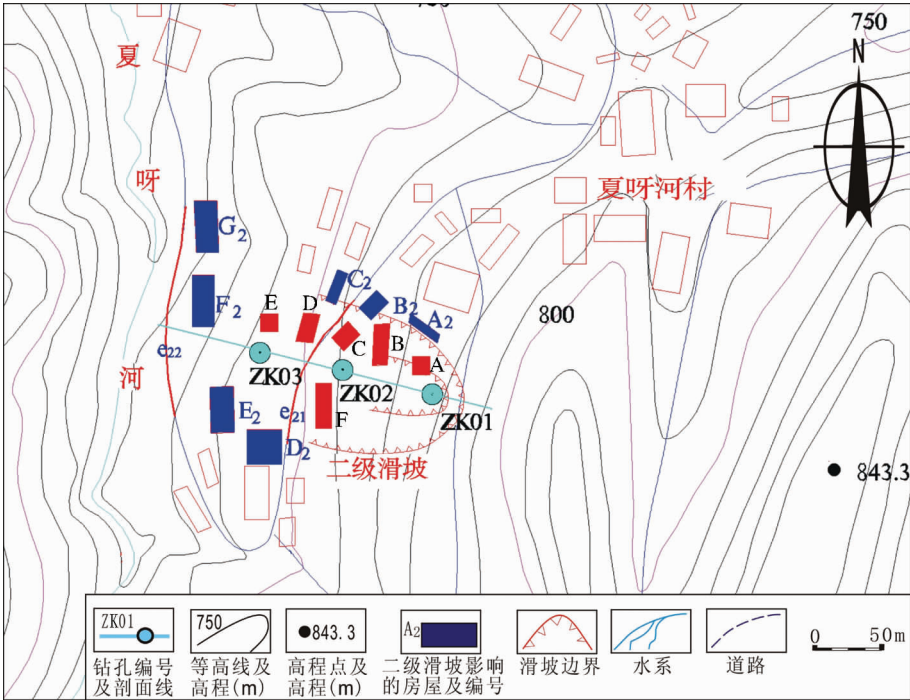


图 3 夏呀河二级滑坡承灾体平面分布图

Fig. 3 Plain map of the second layer landslide in Xiaiyahe

用性,则 $V_{PT}(f)=0.80$ 。

人员的易损性:调查显示该滑坡区老人、儿童约占 0.3,他们对滑坡灾害的防御性较差,成年人对滑坡的防御性较好,分别赋值 $V_{DT}=0.02$ 和 $V_{DT}=0.005$,则该滑坡影响范围内人员的易损性 $V_{DT}=0.3\times 0.02+$

$0.7\times 0.005=0.0095$ 。对于一个小区域的人员来说,人口结构、风险意识、知识层次一般变化不大,故其人口易损性一般是相同的。因此,夏呀河二、三、四级滑坡上的人口易损性 V_{DT} 也是 0.0095。

滑坡体涉及到的承灾体价值和各住户人口可以

表 5 夏呀河二级滑坡易损性分析及风险评估

Table 5 Datasheet of risk evaluation and vulnerability analysis of the second layer landslide in Xiayahe

承灾体 类别	财产价值 E/万元	人口数 量E/人	空间概率 P_L	时间概率 P_S	易损性 V_{PT} 或 V_{DT}	滑坡滑动 频率 P_H	财产风险 值R/万元	人口风险 值R/人
建筑物A~F、 A ₂ ~D ₂	154	62	1	1	0.7		6.2524	
建筑物 E、E ₂	22	17	0.8	1	0.95		0.9698	0.00475
建筑物 F ₂ 、G ₂	49	19	0.3	1	0.95	0.058	0.8099	0.00100
公路e ₂₁	3.9		0.99	1	1		0.2239	0.00044
公路e ₂₂	5.1		0.2	1	1		0.0592	
农地、果林f ₂	0.3		0.7	1	0.8		0.0097	
二 级 滑 坡 总 风 险							8.325	0.0062

与一级滑坡分析相同, $V_{DT}=0.0095$ 。

滑坡体涉及到的承灾体价值和各住户人口可以根据表 2 确定。滑坡体涉及到的其他的主要承灾体,如四级水泥公路 e_{21} 、 e_{22} 总价值分别为 3.9 万元和 5.1 万元,农地及果林约 0.4 亩,涉及资产价值 0.3 万元。据此可以得到二级滑坡承灾体易损性分析的数据(表 5)。

(3)三级滑坡承灾体易损性分析

夏呀河三级滑坡范围涉及到的承灾体除了一、二级滑坡所包含的承灾体外,还影响到建筑 7 处共计 12 家农户、60 口人、135 万元财产,滑坡体上的林地 0.7 亩、四级乡村水泥公路在坡体上 $e_{31}=290$ m,在坡体下 $e_{32}=310$ m。详细分布见图 4。

由表 3 的计算结果分析预测三级滑坡的滑移距离及影响范围,可判定三级滑坡涉及到的承灾体包括一、二级滑坡涉及的承灾体 A~F、A₂~G₂、A₃~I₃,道路 e_{31} 、 e_{32} ,滑坡体上的果林、农田 f_3 。根据承灾体的空间位置,确定滑坡到达各承灾体的空间概率如下: P_L (A~F、A₂~C₂、A₃、C₃~F₃)=1, P_L (D₂、B₃、G₃)=0.96, P_L (E₂、H₃、I₃)=0.9, P_L (F₂、G₂)=0.8, P_L (e_{31})=1, P_L (e_{32})=0.75, P_L (f_3)=1。

承灾体时间概率的确定:与一级滑坡分析类似,三级滑坡体涉及到的承灾体(物)的时间概率 $P_S=1$,人员的时间概率 $P_S=0.1389$ 。

承灾体易损性的确定:滑坡体及边界上的建筑,考虑到滑坡滑动时房屋开裂、部分倒塌,但即使完全破坏,部分砖混结构的材料也可以重复利用,结合经

验给出其 V_{PT} (A~F、A₂~C₂、A₃、C₃~F₃)=0.8。滑坡下方的建筑因滑坡滑动可能遭到掩埋,可利用性很小,取其易损性 V_{PT} (D₂、E₂、F₂、G₂、B₃、G₃、H₃、I₃)=0.95。由于滑坡滑动将导致道路被掩埋,线路移位,基本不可再利用,因此道路易损性 $V_{PT}(e_{31}, e_{32})=1$ 。对本级滑坡而言,林地、农田均处于滑坡体上,若滑坡滑动则基本被毁,考虑其可利用性, $V_{PT}=0.70$ 。人员的易损性与一级滑坡分析相同, $V_{DT}=0.0095$ 。

滑坡体涉及的承灾体价值和各住户人口可以根据表 2 确定,滑坡体涉及到的其他的主要承灾体,如四级水泥公路 e_{31} 、 e_{32} 总价值分别为 8.7 万元和 9.3 万元,农地及果林约 0.7 亩,涉及资产价值 0.525 万元。据此可以得到三级滑坡承灾体的易损性分析的数据(表 6)。

(4)四级滑坡承灾体易损性分析

夏呀河四级滑坡所涉及到的承灾体除了一、二、三级滑坡所包含的承灾体外,还影响到建筑 11 处共计 13 家农户、53 口人、168 万元财产,滑坡体上的林地 2.5 亩、坡体上的四级乡村水泥公路 $e_4=1040$ m。详细分布见图 5。

由表 3 的计算结果分析预测四级滑坡的滑移距离及影响范围,可判定四级滑坡涉及的承灾体包括一、二、三级滑坡涉及的承灾体 A~F、A₂~G₂、A₃~I₃、A₄~K₄,道路 e_4 ,滑坡体上的果林、农田 f_4 。根据承灾体的空间位置,确定滑坡到达各承灾体的空间概率如下: P_L (A~F、A₂~G₂、A₃~I₃、B₄~H₄)=1, P_L (A₄)=0.95, P_L (I₄、J₄、K₄)=0.9, P_L (e_4)=1, P_L (f_4)=1。

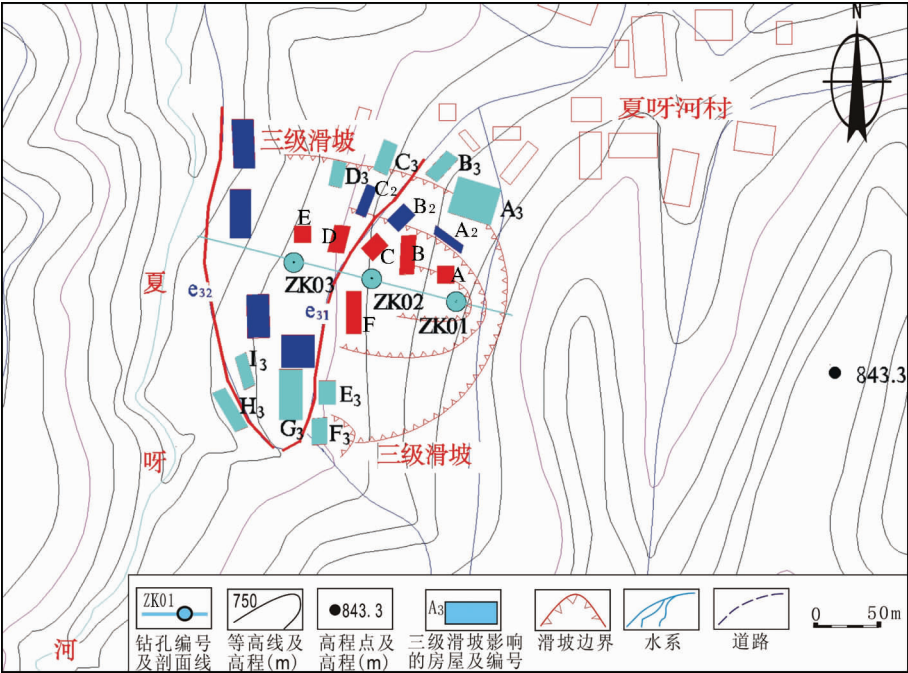


图 4 夏呀河三级滑坡承灾体平面分布图 Fig. 4 Plain map of the third layer landslide in Xiaayehe

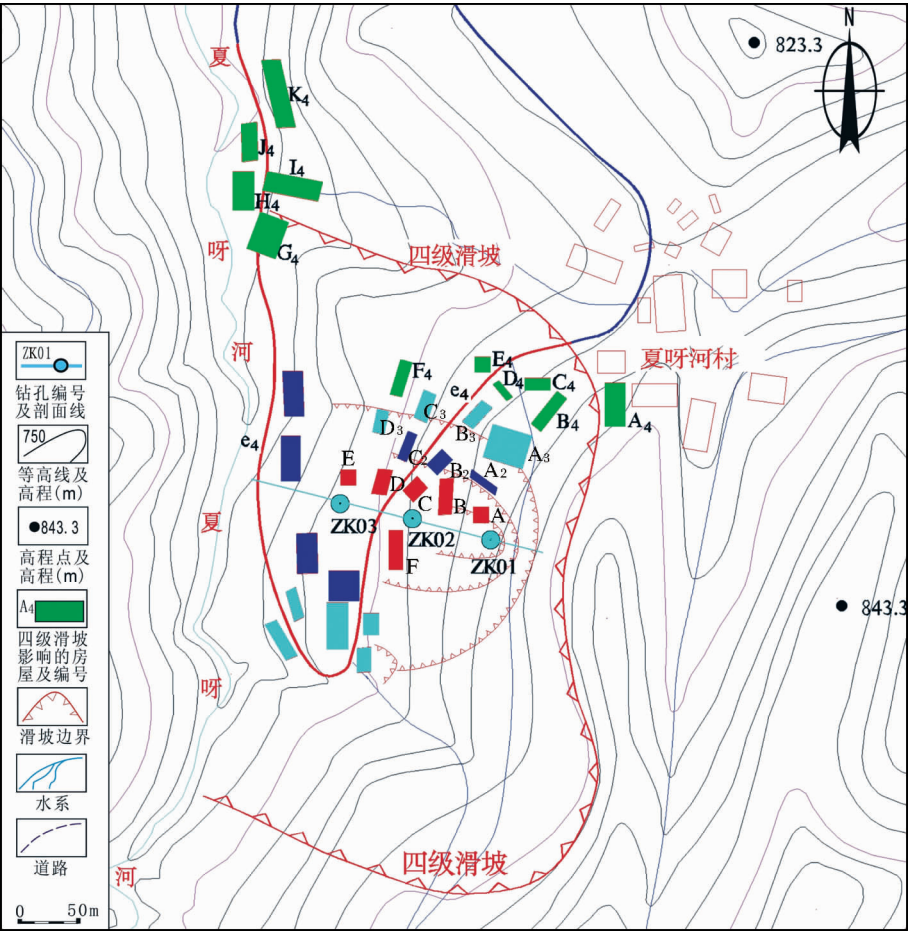


图 5 夏呀河四级滑坡承灾体平面分布图 Fig. 5 Plain map of the fourth layer landslide in Xiayahe

表 6 夏呀河三级滑坡易损性分析及风险评估

Table 6 Datasheet of risk evaluation and vulnerability analysis of the third layer landslide in Xiayahe

承灾体 类别	财产价值 $E/\text{万元}$	人口数量 $E/\text{人}$	空间概率 P_L	时间概率 P_S	易损性 V_{F-T} 或 V_{D-T}	滑坡滑动 频率 P_H	财产风险 值 $R/\text{万元}$	人口风险 值 $R/\text{人}$
建筑物 A~F、 A ₂ ~C ₂ A ₃ 、C ₃ ~F ₃	211	92	1	1	0.8	0.063	10.6344	0.00765
建筑物 D ₂ 、B ₃ 、G ₃	45		0.96	1	0.95		2.5855	
建筑物 E ₃ 、H ₃ 、I ₃	43	23	0.96	0.1389	0.0095		2.3162	0.00184
		24	0.9	1	0.95			0.00180
建筑物 F ₂ 、G ₂	49	19	0.8	1	0.95	2.3461	0.00126	
			0.8	0.1389	0.0095			
公路 e ₃₁	8.7		1	1	1		0.5481	
公路 e ₃₂	9.3		0.75	1	1		0.4394	
农地、果林 f ₃	0.525		1	1	0.70		0.0232	
三 级 滑 坡 总 风 险							18.893	0.01254

表 7 夏呀河四级滑坡易损性分析及风险评估

Table 7 Datasheet of risk evaluation and vulnerability analysis of the fourth layer landslide in Xiayahe

承灾体 类别	财产价值 $E/\text{万元}$	人口数 量 $E/\text{人}$	空间概 率 P_L	时间概 率 P_S	易损性 $V_{P,T}$ 或 $V_{D,T}$	滑坡滑动 频率 P_H	财产风险值 $R/\text{万元}$	人口风险值 $R/\text{人}$
建筑物 A-F、A ₂ -G ₂ 、 A ₃ -I ₃ 、B ₄ -H ₄	462		1	1	0.98		15.8466	
		198	1	0.1389	0.0095			0.00915
建筑物 A ₄	15		0.95	1	0.9		0.4489	
		4	0.95	0.1389	0.0095	0.035		0.00018
建筑物 I ₄ 、J ₄ 、K ₄	51		0.9	1	0.96		1.5422	
		9	0.9	0.1389	0.0095			0.00037
公路 e ₄	31.2		1	1	1		1.092	
农地、果林 f ₄	1.875		1	1	0.8		0.0525	
四 级 滑 坡 总 风 险							18.982	0.09694

承灾体时间概率的确定:与一级滑坡分析类似,四级滑坡体涉及到的承灾体(物)的时间概率 $P_S=1$,人员的时间概率 $P_S=0.1389$ 。

承灾体易损性的确定:滑坡体上的建筑,考虑到滑坡滑动时房屋倒塌,基本丧失使用功能,结合经验给出其 $V_{FT}(A\sim F、A_2\sim G_2、A_3\sim I_3、B_4\sim H_4)=0.98$ 。滑坡下方冲沟内影响的建筑及滑坡后缘的建筑因滑坡滑动可能被掩埋、滑塌,可利用性很小,取其易损性 $V_{FT}(A_4)=0.90、V_{FT}(I_4、J_4、K_4)=0.96$ 。道路 e_4 完全处于滑坡体上,滑坡滑动将导致其被掩埋,线路移位,不可再利用,因此 $V_{FT}(e_4)=1$ 。对本级滑坡而言,林地、农田均处于滑坡体上,若滑坡滑动则基本被毁,考虑其可利用性, $V_{FT}=0.80$ 。人员的易损性与一级滑坡分析

相同, $V_{DT}=0.0095$ 。

滑坡体涉及到的承灾体价值和各住户人口可以根据表 2 确定,滑坡体涉及到的其他的主要承灾体,如四级水泥公路 e_4 总价值为 31.2 万元,农地及果林 f_4 约 2.5 亩,涉及资产价值 1.875 万元。据此可得到四级滑坡承灾体的易损性分析数据(表 7)。

4 夏呀河滑坡风险估算

根据上述过程分析及相关参数的确定,采用式(3)和(4)进行计算,可得夏呀河滑坡在一般条件下的各级滑坡总风险值(表 4~表 7)。

同样,在降雨或连阴雨条件下,一级滑坡的滑动概率 $P_H=0.189$ 、二级滑坡的滑动概率 $P_H=0.245$,经计

表 8 夏呀河各级滑坡在不同工况条件下的总风险

Table 8 Overall risk evaluation datasheet of different layer landslide under different civil working condition in Xiayahe

工况条件	滑坡级别	滑动概率 P_H	财产总风险值 R /万元	人口总风险值 R /人
一般情况	一级滑坡	0.044	2.994	0.0018
	二级滑坡	0.058	8.325	0.0062
	三级滑坡	0.063	18.893	0.0125
	四级滑坡	0.035	18.982	0.0969
强降雨或连阴雨	一级滑坡	0.189	12.861	0.0783
	二级滑坡	0.245	35.166	0.2628
	三级滑坡	0.063	18.893	0.0125
	四级滑坡	0.035	18.982	0.0969

算可得一、二级滑坡总风险,降雨对三、四级滑坡的滑动概率影响不大,按一般条件对待。各级滑坡在不同工况条件下的总风险结果见表 8。

根据计算结果(表 8)分析,在一般情况下,夏呀河滑坡滑动概率最大的是三级滑坡,其财产潜在损失的总风险为 18.89 万元,人员潜在伤亡的总风险为 0.0125 人,即滑坡发生,人员生命潜在死亡数不到 1 个人。同时对比一般情况下四级滑坡的总风险,可以发现夏呀河滑坡由四级到一级潜在的财产损失、人口伤亡逐渐减少。虽然四级滑坡滑动概率最小,但由于滑坡涉及的承灾体数量多、价值大、人口多,计算结果显示其风险仍然是最大的。

在强降雨或连阴雨条件下,夏呀河滑坡一、二级滑坡的滑动概率成倍增加,相应的潜在财产损失、人口伤亡也成倍增加,滑动概率最大的二级滑坡潜在财产损失的总风险达 35.17 万元,潜在人员伤亡的总风险达 0.2628 人。但由于降雨对三、四级滑坡滑动概率的影响不大,故其财产潜在损失、人口潜在伤亡基本不变。

根据上述估算,在滑坡影响最大的范围内人口数量为 211 人,其易损性为 0.0095,死亡人数约 2 个人(其他滑坡影响范围均小于 1 人),死亡的年概率为 10^{-2} 数量级,降雨情况下死亡的年概率可达 10^{-1} 数量级,与目前国际上暂定的社会容许标准 10^{-3} 相比^[28],均处于风险不可接受区,应该采取减缓风险的措施。

但是,当地政府及其财政部门可以根据实际情况确定采取可接受的风险值标准,与夏呀河各级滑

坡的潜在财产损失和潜在人员伤亡的总风险对比是否可接受,决定是否采取适合的措施如避让、搬迁、工程治理等来进行滑坡风险管理。

5 结论与讨论

(1)通过对夏呀河各级滑坡的风险评估,探索了单体滑坡定量化风险评估的一般模式,本文的研究案例为该方面的研究提供了很好的借鉴。对于承灾体种类少、分布简单、影响因素单一的单体滑坡,一般都可以按照这一模式进行定量的风险评估。

(2)对比夏呀河各级滑坡的风险评估和参数定量化过程可以发现,单体滑坡风险评估之所以难,在于其涉及的影响因素较多,参数定量化难度较大。不同的滑坡因滑动机制、速度、距离、路径等不同,影响承灾体的范围、种类、数量也不相同,其参数的定量化必须具体问题具体对待。在承灾体的选取上也要做到选取主要的承灾体,忽略次要的承灾体;参数的定量化过程中也要选取主要的影响因素,舍弃次要的影响因素,否则定量化的风险评估将变得极其复杂而难以进行。

(3)对夏呀河各级滑坡的风险估算分析表明,和国际上暂定的社会容许标准相比,夏呀河滑坡属于高风险滑坡,其总风险值处于不可接受的范围内,应该采取风险减缓措施进行风险管理。

(4)对夏呀河单体滑坡进行了风险评估,估算了各级滑坡在不同工况条件下潜在经济损失和潜在人员伤亡的总风险值,量化地表达了该滑坡所具有的潜在威胁,为当地政府对该滑坡进行灾害风险管理提供了科学依据。当地政府及其财政部门可以据此确定可否接受这一风险评估值,决定是否采取适合的措施如避让、搬迁、工程治理等来进行滑坡风险管理。

(5)文中风险评估中各参数的定量赋值多是在实地调查、综合研究的基础上给出的,有的是直接调查获得的,是客观实在的,如人口数量、房屋价值等,有的受人为主观因素的影响,如承灾体(物)的空间概率、人员的时间概率。如何使这些量化参数真实可靠,是单体滑坡风险评估要进一步研究的问题。

另外,对各级滑坡风险估算结果的对比发现,单体多级滑坡由于各级滑坡滑动的频率不同,涉及的承灾体数量也不同,风险评估的潜在损失和滑坡频率的大小也非一一对应的关系。那么,最终是以潜在

风险值的大小还是以滑坡滑动频率大的滑坡造成的风险值为依据进行风险管理,还是值得进一步商榷的。本文倾向于以滑动频率大的滑坡造成的潜在风险值为依据进行风险管理。

致谢: 长安大学李滨博士参与了野外的钻探工作,宝鸡渭滨区国土局梁峰参与了社会、经济、人口的调查工作,在此一并表示感谢!

参考文献

- [1] 吴树仁,张永双,石菊松,等.三峡库区丰都县滑坡灾害危险性评价[J].地质通报,2007,26(5):574-582.
- [2] 曾忠平,汪华斌,张志,等.地理信息系统/遥感技术支持下三峡库区青干河流域滑坡危险性评价[J].岩石力学与工程学报,2006, 25(sup1): 2677-2684.
- [3] 刘传正,温铭生,李铁峰,等.长江三峡库区地质灾害成因与评价研究[M].北京:地质出版社,2007: 51-133.
- [4] 丛威青,潘懋,李铁峰,等.基于 GIS 的滑坡、泥石流灾害危险性区划关键问题研究[J].地学前缘,2006,13(1):185-190.
- [5] 石菊松,张永双,董诚,等.基于 GIS 技术的巴东新城区滑坡灾害危险性区划[J].地球学报,2005,26(3):265-282.
- [6] 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.
- [7] 刘传正,李媛,杨冰.长江三峡库区地质灾害空间评价预警研究[J].水文地质工程地质,2004,31(4):9-19.
- [8] 赵建华,陈汉林,杨树锋.滑坡灾害危险性评价模型比较[J].自然灾害学报,2006,15(1):128-134.
- [9] Wong H N. Landslide risk assessment for individual facilities [C]//Landslide Risk Management, Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management. Canada:Vancouver, 2005: 237-296.
- [10] WU Shuren, SHI Ling, WANG Ruijiang, et al. Zonation of the landslides hazards in the forerservoir region of the Three Gorges Project on the Yangtze River[J]. Engineering Geology, 2001, 59: 51-58.
- [11] Van Westen C J, Soeters R, Sijmons K. Digital geomorphological landslide hazard mapping of the Alpago area, Italy [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2000, 2 (1): 51-60.
- [12] WU Shuren, JIN Yimin, ZHANG Yongshuang, et al. Investigations and assessment of the landslide hazards of Fengdu county in the reservoir region of the Three Gorges Project on the Yangtze River [J]. Environmental Geology, 2004,45: 560-566.
- [13] Fell R H K, Lacasse S, Leroi E. A framework for landslide risk assessment and management [C]//The International Conference on Landslide Risk Management. Canada: Vancouver, Balkema A A Publishers,2005.
- [14] L Cascini C B. Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development[C]//Oldrich Hungr R F.Landslide Risk Management. A.A.BALKEMA, 2005:199-235.
- [15] van C J, Westen T W J, van Asch, et al. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? [J] Bull.Eng.Geol.Env.,2005,64: 5-23.
- [16] Metternicht G, Hurni L, Gogu R. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(2/3):284-303.
- [17] 朱传刚.边坡稳定分析的萨尔玛模式及其应用[J].公路工程,2007,32 (4):174-177.
- [18] 苏永堂.斜坡稳定性不平衡推力分析模式的可靠度计算方法[J].中南公路工程,2007,32(3):72-75.
- [19] 陈新民,罗国煜,夏佳.边坡稳定性类比评价的定量实现[J].工程地质学报,2000,8(2):244-248.
- [20] 黄润秋,吴礼舟.非饱和膨胀土边坡稳定性分析[J].地学前缘,2007,14 (6):129-133.
- [21] 李承海,罗庆锋.降雨对土质边坡稳定性影响分析[J].岩土工程技术,2007,21(6):313-314.
- [22] 徐青,陈士军,陈胜宏.滑坡稳定性分析与安全系数取值研究[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(3):58-62.
- [23] 陈祖煜.土质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [24] 朱大勇,钱七虎,周早生,等.基于剩余推力法的边坡临界滑动场[J].岩石力学与工程学报,1999,18(6):667-670.
- [25] 徐青,陈士军,陈胜宏.滑坡稳定分析剩余推力法的改进研究[J].岩土力学,2005,26(3):465-470.
- [26] YANG H HUANG 著.包承纲等译.土坡稳定分析[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [27] 黄崇福.自然灾害风险评价理论与实践[M].北京:科学出版社, 2005.
- [28] Rell R, Ho K K S, Leroi E. 滑坡风险评估与管理框架[C]//滑坡风险管理.国际滑坡风险管理会议论文集选译,加拿大温哥华, 2005.
- [29] 何淑军,张春山,吴树仁,等.基于蒙特卡罗法的多级黄土滑坡可靠性分析[J].地质通报,2008,27(11):1822-1831.
- [30] 殷跃平,张作辰,黎志恒,等.兰州皋兰山黄土滑坡特征及灾度评估研究[J].第四纪研究,2004,24(3):302-310.