

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2018.03.009

引用格式:孙强,张泰丽,伍剑波,等. 基于 GIS 与层次分析法的龙溪流域滑坡风险评价[J]. 华东地质,2018,39(3):227-233.

基于 GIS 与层次分析法的龙溪流域滑坡风险评价

孙 强,张泰丽,伍剑波,王赫生

(中国地质调查局南京地质调查中心,南京 210016)

摘要:以浙江龙溪流域为例,基于 GIS 与层次分析法进行滑坡危险性和风险性评价。根据滑坡调查数据,选择坡度、坡向、地层岩性、地质构造、人类工程活动、降雨及灾害点分布密度 7 个评价因子,计算各评价单元滑坡危险性评价指数。通过分析滑坡危险性评价结果、人口及财产易损性等,对龙溪流域进行滑坡风险性评价。结果表明:龙溪流域极高危险区主要位于大岙镇樟坑、乌岩一带;易损人口、财产密度与地貌具有相关性,地形平坦的区域,人口和物质财富集中,易损人口和财产密度相对较高;滑坡极高危险区和高危险区主要分布在珊门村、店基坑、白门台及洞背村一带。滑坡风险评价结果与易损人口、财产密度分布差异较大,局部与危险性评价相似,通过结合自然属性和人文属性的滑坡风险评价更契合地方防灾减灾的管理需求。实地调研表明,本次滑坡风险评价结果基本符合龙溪流域滑坡造成的危害实际情况,可为龙溪流域城镇建设和人口分布再调整提供参考。

关键词:层次分析法;风险评价;滑坡;龙溪流域;浙江

中图分类号:P694

文献标识码:A

文章编号:2096-1871(2018)03-227-07

滑坡风险评价是提升防灾减灾效果的重要措施之一,近年来成为地质灾害领域的研究热点和难点。欧美国家的滑坡风险评价研究较早,在评价流程、方法、风险管理控制等方面比较成熟^[1-5]。我国滑坡风险评价起步较晚,但研究工作发展迅速,目前已形成一套完整的从定义^[6-7]、理论框架^[8]到技术流程^[9-10]的滑坡风险评价体系。比如,一些学者^[11-13]提出区域滑坡风险评价理论与技术;基于全国地质灾害调查数据库开展全国县域单元的风险评估^[14]。目前,滑坡风险评价已形成众多专业性的分析模型,如信息量模型、多因素回归分析模型、模糊判别分析模型、人工神经网络模型和层次分析法(简称 AHP)等^[15-18]。

在不同地区、不同数据量及精度条件下,选择合适的模型和分析方法才可获得满意的评价效果。层次分析法是国内滑坡易发性评价中广泛应用的一种模型,适合缺乏充足滑坡编目信息的情况,该模型可引入专家认知经验,逻辑性和实用性较

强^[19]。此外,基于土工材料特性和人口年龄组成进行区域人口及财产易损性分析,更符合东南沿海地区小规模滑坡危害的实际^[20]。

浙江龙溪流域地处我国东南沿海,受台风暴雨影响,滑坡频发。1:1 万地质灾害调查成果显示该区滑坡具有规模小、数量多、危害大等特点,传统的地质灾害管理方法已无法满足需求。本文依托 GIS 平台空间数据处理功能,通过层次分析法进行滑坡危险性评价,将滑坡危险性评价指数、人口和财产密度及易损性指数相乘迭加,进行龙溪流域的滑坡风险评价。本次滑坡风险评价,统筹考虑了该区地质灾害发生概率和承灾体属性,可为相关地区防灾减灾工作提供参考。

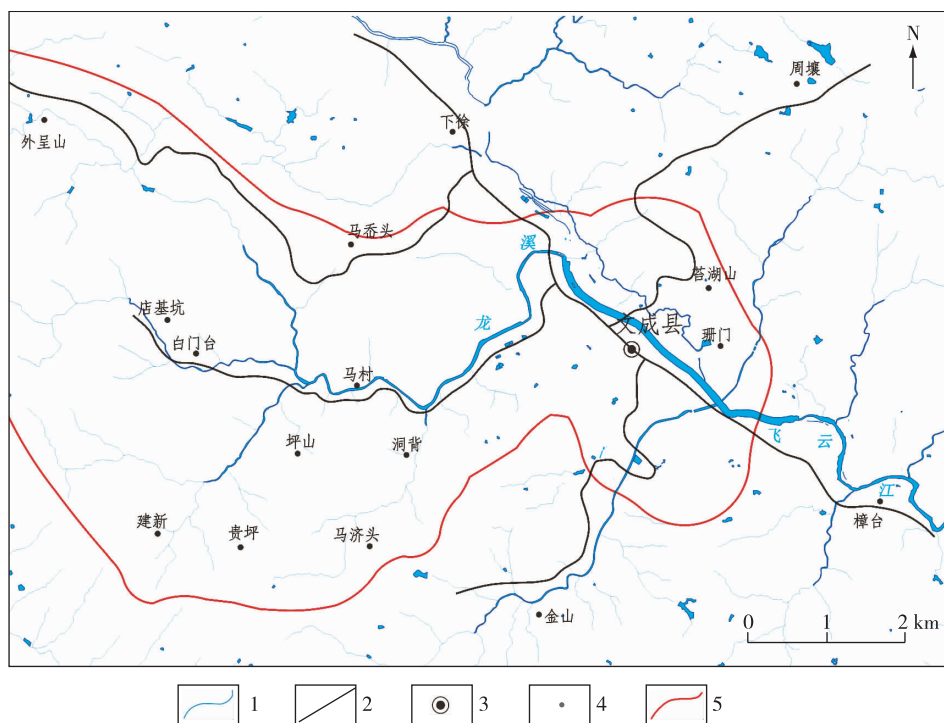
1 研究区概况

龙溪流域位于浙江省文成县中部,在文成县城北侧汇入飞云江(图 1),流域面积为 44 km²。流域内微地貌多为陡坡,具有梁窄谷深、坡长沟多等特

* 收稿日期:2017-07-10 修订日期:2017-09-10 责任编辑:谭桂丽

基金项目:中国地质调查局“浙江飞云江流域地质灾害调查(编号:DD20160282)”项目资助。

第一作者简介:孙强,1983 年生,男,工程师,主要从事环境地质调查、地质灾害勘察及防治工作。



1. 水系; 2. 公路; 3. 文成县; 4. 行政村; 5. 流域范围。

图 1 龙溪流域地理位置图^[21]

Fig. 1 Geographical location of the Longxi river basin

点。地形地貌条件复杂,地质构造发育,坡表风化层和坡积层厚度大,为滑坡发育提供了基础地质条件。龙溪流域下游为文成盆地,盆地内人口密度大。随着城镇化的发展,区内居民建房、多条省道以及村村通公路建设时进行边坡开挖,强烈的人类工程活动以及近年来极端降雨频发,诱发了大量滑坡。2014 年开展的 1:1 万地质灾害调查,发现该区发育滑坡 30 处,灾害点密度为 $0.71 \text{ 处}/\text{km}^2$ 。

2 滑坡危险性评价

地质因素是形成滑坡的基础,非地质因素是形成滑坡的触发条件^[22]。根据研究区滑坡发育特征,将评价因子分为滑坡发育情况、地质背景和诱发因素 3 类。滑坡发育情况主要指滑坡密度;地质因子包括坡度、坡向、地层岩性、地质构造等;诱发因素主要包括降雨、人类工程活动等。由于各因子计量单位不同,将各因子进行归一化后,按照 1~9 标度各因子值。采用层次分析法(AHP)确定各因子权重,通过 GIS 进行评价单元迭加分析,获得区域滑坡危险性评价结果。

2.1 参评因子权重

根据模型确定的评价指标,建立判别因子比较矩阵,确定各指标评价权重,对每个评价单元进行评价因子赋值,通过 ArcGIS 进行因子迭加分析,计算区域滑坡危险性评价指数。

2.1.1 构建评价层次模型

选取评价因子,建立滑坡危险性指标评价体系(图 2)。

按照评价因子之间的相互关系,构建系统层次,主要有基础层(A 层)、准则层(B 层)和目标层(C 层)。A 层为滑坡危险性评价综合指数,B 层由诱发因素、地质背景和滑坡发育现状组成,C 层由人类工程活动、降雨、坡度、坡向、地层岩性、地质构造及灾点分布密度等因子构建。

2.1.2 构建判断矩阵

选择多个影响因子参与滑坡危险性评价,这些影响因子的相对重要性(即权值)不同。本次利用层次分析法(AHP)确定评价指标权值,将评价指标两两对比时,利用 1~9 标度表示各评价因子对评价结果的影响程度(表 1)。

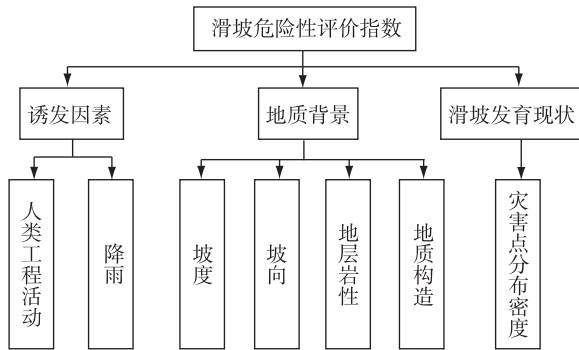


图 2 龙溪流域滑坡危险性评价体系

Fig. 2 Evaluation system of landslide susceptibility in the Longxi river basin

表 1 判断矩阵 1~9 标度的意义

Table 1 The meaning of 1~9 scales in judgment matrix

标度	意义
1	表示 2 个因素相比,具有相同的重要度
3	表示 2 个因素相比,前者比后者稍重要
5	表示 2 个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示 2 个因素相比,前者比后者强烈重要
9	表示 2 个因素相比,前者比后者极度重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 a_i 与因素 a_j 的重要性之比为 a_{ij} ,那么因素 b 与因素 a 的重要性之比 $a_{ji}=1/a_{ij}$

按照构建层序逐层构建判断矩阵。首先构建基础层对准则层的判断矩阵,评价系统层次中的准则层只有 1 层,因此直接构建 C 层对 B 层的判断矩阵。准则层一共有 3 个因素,但 B_3 (滑坡发育现状) 相应的 C 层均只有 1 个因素,无需构建判断矩阵,只需构建 B_1 和 B_2 判断矩阵。

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/4 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1/7 & 1/2 \\ 4 & 7 & 1 & 4 \\ 1 & 2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix},$$

计算矩阵 B_1 和 B_2 的特征向量并进行归一化,得到 C 层对 B 层的权重向量,

$$W_{b1} = (0.500, 0.500)^T; W_{b2} = (0.167, 0.083, 0.583, 0.167)^T.$$

其中 W_{b1} 对应的最大特征根 $\lambda_{\max} = 2$, $CR = (\lambda_{\max} - n)/(n-1)/RI = 0$ 。通过一致性检验,建立的判断矩阵 B_1 有效。 W_{b2} 对应最大特征根 $\lambda_{\max} =$

4.11, $CR = (\lambda_{\max} - n)/(n-1)/RI = 0.009 < 0.1$, 通过一致性检验,建立的判断矩阵 B_2 有效。

在建立基础层对准则层的判断矩阵完成验算后,进一步建立准则层对目标层的判断矩阵 A ,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/6 & 1/3 \\ 6 & 1 & 2 \\ 3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}.$$

计算矩阵 B_1 和 B_2 的特征向量并进行归一化,得到 B 层对 A 层的权重向量,

$W_b = (0.100, 0.600, 0.300)^T$, 其对应的最大特征根 $\lambda_{\max} = 3$, $CR = (\lambda_{\max} - n)/(n-1)/RI = 0$, 通过一致性检验,建立的判断矩阵 A 有效。

根据层次总排序表,自上而下将单准则下的权重合成,得到 C 层对 A 层的因子权重,计算结果如下,

$$W = (0.050 \ 0, 0.050 \ 0, 0.100 \ 2, 0.049 \ 8, 0.349 \ 8, 0.100 \ 2, 0.300 \ 0)^T.$$

各单元格危险性评价指数为

$$E = X \times W,$$

$$X = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7),$$

式中: X_1 , 人类工程活动; X_2 , 降雨; X_3 , 坡度; X_4 , 坡向; X_5 , 地层岩性; X_6 , 地质构造; X_7 , 灾害点分布密度。

2.2 危险性分区

经调试、试运算,按照等值间距将危险性分为 3 级:高危险性 > 0.67 , 中危险性 $0.34 \sim 0.67$, 低危险性 ≤ 0.34 。将滑坡危险性综合评价结果与实际滑坡发育程度对比,发现滑坡密度高的区域与滑坡高危险区、中危险区一致。

滑坡高危险区主要分布于大岷镇珊门、樟坑、乌岩、坪山、洞背、马济头、马岙以及花园—马岙头段,总面积为 4.29 km^2 , 约占全区面积的 10.1% (图 3)。区内微地貌以陡坡为主,相对高差约 300 m ,主要出露早白垩世晚期朝川组紫红色凝灰质粉砂岩,岩层风化强烈,发育厚度较大的全风化层,遇水软化。该区共发育滑坡 19 处,滑坡密度为 4.43 处/km^2 , 威胁 150 户 391 人,资产 2 113 万元。

滑坡中危险区主要分布在 S 330 省道沿线以及樟坑、马坪村一带,总面积 16.23 km^2 , 占全区面积的 36.9% 。靠近河谷的区域地势平缓,以缓坡为主;南北两侧流域分水岭地势陡峭,以陡坡为主,局部发育陡崖。区内相对高差约为 500 m , 主要出露

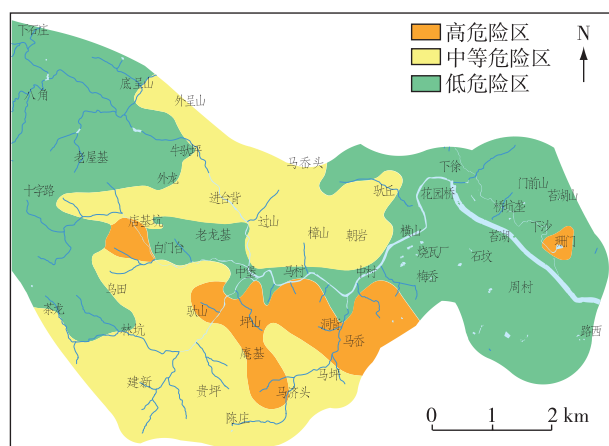


图3 滑坡危险性区划图

Fig. 3 Division map of landslide susceptibility

早白垩世早期九里坪组流纹质玻屑凝灰岩和凝灰质粉砂岩。该区共发育滑坡 10 处,灾害点密度达 0.61 处/ km^2 ,共威胁 76 户 297 人,资产 946 万元。

滑坡低危险区主要位于百丈漈镇东部以及文成盆地,总面积 23.67 km^2 ,占全区面积的 53.0% 。百丈漈镇东部为低山台地边缘,地形切割强烈,斜坡陡峭,相对高差约为 700 m ,主要出露早白垩世早期九里坪组流纹质玻屑凝灰岩。文成盆地地势平缓开阔,相对高差约为 200 m ,主要出露早白垩世晚期朝川组紫红色凝灰质粉砂岩。该区滑坡不发育,居民生命财产基本不受威胁。

综上,滑坡危险性与区域地层岩性、工程活动以及地形地貌密切相关。流域内地形陡峭、分布凝灰质粉砂岩等易风化岩类且人类工程活动强烈的区域,滑坡发育,为滑坡高危险区。河谷区、文成盆地地形平缓,流域西侧虽地形陡峭,但岩质坚硬,抗风化能力强,人类工程活动微弱,为滑坡低危险区。

3 易损性评价

由于涉及因素众多,信息提取难度大,易损性分析至今仍处于探索阶段,尚无普遍采用的分析方法。根据龙溪流域自然和社会经济特点,结合区内滑坡造成的主要损失组成,经过实地调查,选取人口和房屋 2 个指标作为龙溪流域滑坡易损性评价因子。因需要财产结构组成详细资料,基于土工材料特性进行易损性评价是有效但较少使用的方法^[23]。通过收集资料和实地调查,详细统计龙溪流域建筑物结构和人员年龄组成等信息。规模小的滑坡对

平房和简易结构构筑物造成的危害较大,但对框架及砖混结构房屋造成的损坏有限。老年人自我保护能力较差,且流域范围内老年人较多,因此,财产易损性主要考虑平房、简易构筑物的价值占比,人口易损性考虑人口结构老年人的比例。

由龙溪流域易损财产及易损人口密度分级图(图 4,图 5)可知,区域人口和物质财富的易损区域主要分布在文成盆地及龙溪干流河谷区的居民区,主要有下徐、花园、季马村、中堡村、樟坑村和乌田村等。该区为文成县城的建成区和建设区,人口密度大,物质财富集中。在区域西南部有零星斑块分布的人口和物质财富易损区,主要包括陈庄、贵坪村、建新村等,户籍人口较多,但多为外出务工

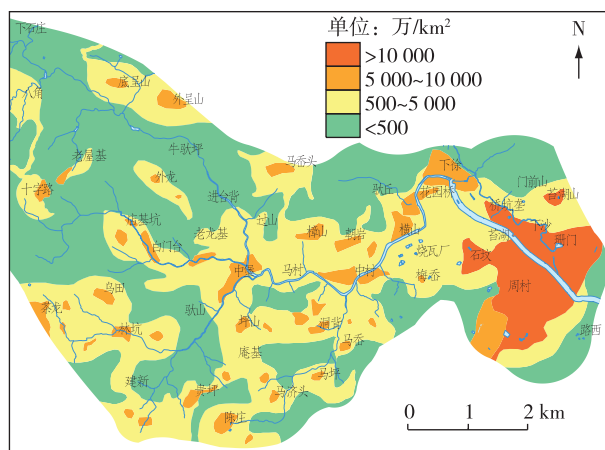


图4 调查区易损财产密度分级

Fig. 4 Density classification map of vulnerable property in the survey area

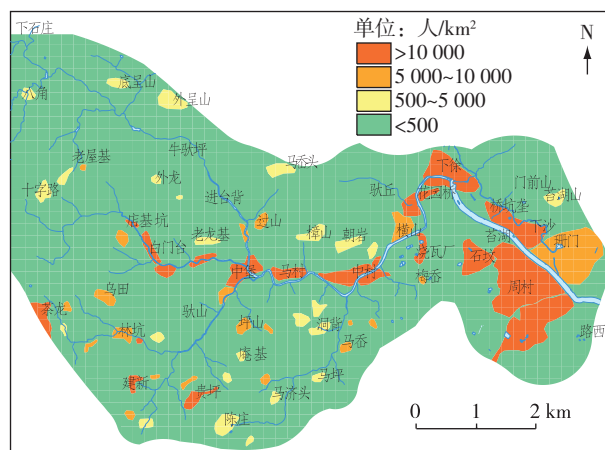


图5 调查区易损人口密度分级

Fig. 5 Density classification map of vulnerable population in the survey area

相结合”的原则,不同等级地质灾害风险区的防治对策不同。根据滑坡稳定性、威胁人员及财产密度等,实施搬迁避让、监测、工程治理等控制措施。滑坡的工程治理措施以坡面排水、坡脚支护为主。

针对龙溪流域内滑坡规模小、受切坡控制、降雨诱发等特点,认为在滑坡极高风险区和高风险区应严格控制边坡开挖,限制废弃土石中的任意堆放,限制陡坡垦殖等工程活动;在滑坡中风险区应控制边坡开挖高度和坡度,对废弃土石堆放、坡地垦殖区进行合理规划;滑坡低风险区、极低风险区应实施规划优先、宣传教育等控制措施。实施地质环境保护、宣传教育等风险控制措施的同时,建立完善的地质灾害群测群防体系,降低地质灾害风险。

6 结 论

(1)龙溪流域滑坡高风险区主要位于大岙镇樟坑、乌岩一带,低风险区主要位于盆地及河流谷地。滑坡危险性与地层岩性、工程活动及地形地貌密切相关,地形陡峭、分布易风化岩类且人类工程活动强烈的区域,滑坡危险性较高。

(2)易损人口及财产密度较高的区域主要为文成盆地(县城建成区),与地貌具有相关性,地形平坦的区域人口密度大,物质财富集中,易损人口和财产密度相对较高。

(3)滑坡极高风险区和高风险区主要分布在珊门村、店基坑、白门台及洞背村等,滑坡极低风险区主要为封山育林区,人口及财产密度较小。

参考文献

- [1] Fell R, Corominas J, Bonnard C, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning [J]. Engineering Geology, 2008, 102 (3/4): 85-98.
- [2] Westen C J V, Asch T W J V, Soeters R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? [J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2006, 65(2): 167-184.
- [3] Galve J P, Cevalco A, Brandolini P, et al. Cost-based analysis of mitigation measures for shallow-landslide risk reduction strategies [J]. Engineering Geology, 2016, 21(3): 142-157.
- [4] Huang J, Lyamin A V, Griffiths D V, et al. Quantitative risk assessment of landslide by limit analysis and random fields[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 53 (3): 60-67.
- [5] Martha T R, Westen C J V, Kerle N, et al. Landslide hazard and risk assessment using semi-automatically created landslide inventories [J]. Geomorphology, 2013, 184(3): 39-150.
- [6] 唐亚明, 张茂省. 滑坡风险评价难点及方法综述[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(2): 130-135.
- [7] 殷跃平, 李媛. 区域地质灾害趋势预测理论与方法[J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 75-79.
- [8] 向喜琼, 黄润秋. 地质灾害风险评价与风险管理[J]. 地质灾害与环境保护, 2000, 11(1): 38-41.
- [9] 殷坤龙, 张桂荣. 滑坡风险区划与综合防治对策[J]. 安全与环境工程, 2003, 10(1): 32-35.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 滑坡风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 995-1005.
- [13] 吴树仁, 石菊松, 张春山, 等. 滑坡风险评估理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 134-153.
- [14] 李春燕, 孟晖, 张若琳, 等. 中国县域单元地质灾害风险评估[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 160-166.
- [15] 沈玲玲, 刘连友, 许冲, 等. 基于多模型的滑坡易发性评价——以甘肃岷县地震滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 20-29.
- [16] 许冲, 戴福初, 姚鑫, 等. GIS支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(Z): 3978-3985.
- [17] 周光红, 裴勇军, 吴彩燕. 基于贡献率模型与GIS的滑坡地质灾害风险评价——以沐川县为例[J]. 金属矿山, 2013, 42(11): 130-134.
- [18] 范强, 巨能攀, 向喜琼, 等. 证据权法在区域滑坡危险性评价中的应用——以贵州省为例[J]. 工程地质学报, 2014, 22(3): 474-481.
- [19] 刘宇恒, 邓辉, 熊倩莹. 基于层次分析法的茂县斜坡地质灾害易发性评价[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(5): 31-35.
- [20] 孙强, 张泰丽, 伍剑波, 等. 堆积体滑坡的成因及稳定性分析——以黔县林川滑坡为例[J]. 资源调查与环境, 2015, 3(1): 73-78.
- [21] 中国地质调查局南京地质调查中心. 1:50 000文成幅地质灾害调查说明书[R]. 南京: 中国地质调查局南京地质调查中心, 2015.
- [22] Vega J A, Hidalgo C A. Quantitative risk assessment

of landslides triggered by earthquakes and rainfall based on direct costs of urban buildings [J]. *Geomorphology*, 2016, 273(15): 217-235.

[23] 邓有平,王荣明,李坚. 江西某核电站选址地质灾害研究及防治对策[J]. *资源调查与环境*, 2008, 29(1): 61-68.

Landslide risk assessment of the Longxi river basin based on GIS and AHP

SUN Qiang, ZHANG Tai-li, WU Jian-bo, WANG He-sheng
(*Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China*)

Abstract: This paper reports landslide hazard and risk assessment of the Longxi river basin in Zhejiang Province based on GIS and AHP methods. Seven evaluation factors, including slope, aspect, lithology, structure, rainfall, human engineering activities and density of landslides, were extracted from the survey data to calculate landslide hazard assessment index of each evaluation unit. Landslide risk assessment of the Longxi river basin was undertaken using landslide hazard assessment results, population and property vulnerability. The results show that the high hazard zones of landslides are mainly located in Zhangkeng village and Wuyuan village of Daxue Town, and the densities of vulnerable population and property are related to local topography. In flat areas, where population and material wealth are relatively concentrated, occurrences of vulnerable population and property are also high. High risk zones and extremely high risk zones are mainly distributed in Shanmen village, Dianjikeng village, Baimentai village and Dongbei village. The assessment results of landslide risks vary greatly with the densities of vulnerable population and property but similar to zoning of landslide hazards, suggesting that landslide risk assessment is more suitable for the management needs of disaster prevention and mitigation through the combination of the characteristics of natural and human attributes. The field survey has proved that the assessment results of landslides risks accord basically with the actual situation of landslide disaster in the Longxi river basin, and can provide reference for construction and planning of the city and readjusting of population distribution in this area.

Key words: analytic hierarchy process (AHP); risk assessment; landslide; Longxi river basin; Zhejiang Province