

Risk evaluation of geologic hazard in the hydropower reservoir area based on GIS

XU Hui-xi

*Institute of Engineering Surveying, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang, China
scxhx_2001@yahoo.com.cn*

Abstract: Five evaluation factors, which are slopes structure, slope, formation & lithology, fault and river, are selected to forecast and evaluate the geologic hazard risk of landslides and landslips in the hydropower reservoir area by support of GIS, using analytic hierarchy process and the ordinal scale relative weighting-rating technique. Evaluation results are that, geologic hazard risk is moderate in all study area, but that is higher in frontal dam and near dam of reservoir than in the middle part and the tail part. In other words, after the hydropower station established, the probability that landslides and landslips are induced is comparatively bigger. So reservoir shore stability research need to be enhanced in order to ensure the reservoir safely operates after the hydropower station established.

Keywords: Risk evaluation of geologic hazard; Spatial analysis of GIS; Analytic hierarchy process; The ordinal scale relative weighting-rating technique; Map algebra

基于 GIS 的水电站库区地质灾害危险性评价

许辉熙

四川建筑职业技术学院. 测量工程研究所, 德阳, 中国, 618000
scxhx_2001@yahoo.com.cn

【摘要】选取斜坡结构、坡度、地层岩性、断层和河流水系 5 个评价因子, 利用层次分析和多因子分级加权, 基于 GIS 的空间分析功能, 对水电站库区崩塌和滑坡地质灾害危险性进行预测评价。结果表明: 整个研究区地质灾害危险性处于中等水平, 但坝前及近坝库区相对于库区中段和库尾段, 地质灾害危险性较高, 即水电站建成蓄水后诱发滑坡和崩塌的可能性较大, 需要加强该段库岸稳定性研究工作, 确保水库蓄水后安全运行。

【关键词】地质灾害危险性; GIS 空间分析; 层次分析法; 多因子分级加权; 地图代数

1 研究区概况

研究对象为黄河上游某拟建水电站。坝址位于青海省玛沁县拉军镇上游约 5km 的黄河干流上, 左岸为果洛州玛沁县, 右岸为海南州同德县, 设计正常蓄水位 3270m。西宁~果洛州省道(S101)通过下坝址右坝肩, 距西宁市公路里程约 363km。工程规模为 I 等大(1)型工程, 主要建筑物为 1 级, 次要建筑物为 3 级, 是一座以发电为主的大型水电工程, 目前处于预可研阶段。

坝址区地处青藏高原腹地, 为典型高原深切峡谷地貌。河谷弯曲, 总体西流, 深切 200~250m, 河道狭窄, 水流湍急, 多有跌坎, 岸坡陡峭, 部分直立, 基岩裸露较好, 河床覆盖浅, 冲沟支流发育, 多常年有水, 两岸高平台为黄河高阶地侵蚀堆积成因, 受局

部剥蚀, 呈不连续分布。场内勘察工作环境和条件如气候(多雨雪、大风)、交通、供水供电、水上作业等, 极为困难。

2 评价模型与方法

基于 GIS 进行地质灾害危险性预测模型分为确定性模型和非确定性模型^[1]。前者由于采用斜坡破坏的力学模型, 被认为是最有前途的评价方法, 但是由于它需要对力学模型和 GIS 进行高度耦合, 因而目前应用较少。后者先对地质灾害影响因子的空间分布进行定量评价, 然后利用数学模型和方法做出地质灾害危险性预测。目前, 常用的非确定性模型方法有: 模糊综合评判法, 信息量法, 神经网络法, 多元回归分析法, 多因子分级加权法等, 不同方法有各自优缺点及适用范围。

多因子分级加权法是实践应用中比较成熟的一种方法^[2]，在 GIS 中可以直接实现，而不需要进行二次开发相关功能模块，所以有很强的普适性。其用于地质灾害危险性评价的基本原理是：将地质灾害影响因子记做 C_i ，将各因子的影响权重记做 W_i ，用危险性指数 DI (Danger Index) 表示各评价单元的地质灾害危险性程度，则有：

$$DI = \sum_{i=1}^n C_i \times W_i \quad (1)$$

DI 为评价单元地质灾害危险性指数， DI 值越大，危险性越大； C_i 为评价因子 i 的量化值，根据对地质危险性的影响程度，由大到小取值； W_i 为评价因子 i 的权重； n 为评价因子个数， $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

基于 GIS，采用多因子分级加权法进行地质危险性预测评价的基本思路是：首先，根据评价对象的特点和要求，筛选地质灾害危险性影响因子，并确定各个影响因子的权重，建立地质灾害危险性评价指标体系。其次，根据对地质灾害危险性的不同“贡献”程度，给影响因子赋予不同数值进行量化，编制影响因子栅格数据图层。然后，基于 GIS 的空间叠置分析工具，对各个影响因子图层进行加权叠加分析，得到地质灾害危险性指数图。最后，将地质灾害危险性指数图，按照一定原则和分类标准，划分为若干危险性等级，得到地质灾害危险性等级空间区划图，并对评价结果进行评述。

3 评价实施过程

3.1 评价指标选取与 GIS 数据库构建

经综合分析已知研究区内泥石流不发育。水库蓄水后，危害最大的是崩塌和滑坡灾害，重点对崩塌和

滑坡的危险性进行预测评价。由于两者在成灾机理和致灾因子上基本相同，此处将地质灾害作为一个整体，不考虑灾害的类别，选用相同的评价指标。

地质灾害发生的因素可以分为内因和外因^[3]。地形地貌、地层岩性和地质构造是崩塌滑坡等地质灾害形成的三大内因^[4]。内因实际上是灾害发生的地质背景条件。外因是灾害发育过程中起诱发作用的外部因素，外因又可以分为自然因素和人为因素。自然因素有地震、降雨等；人为因素人类活动引起的，如地下水开采、土木工程边坡开挖、土地利用方式的改变等。内因是地质灾害发生的必要条件，而自然与人为因素的诱发作用是地质灾害发生的充分条件。

充分考虑资料的可获得性、空间尺度的大小，综合参考已有研究成果，经过反复征求专家意见，最终确定斜坡结构、坡度、地层岩性、断层和河流水系五个因子作为水电站库区地质灾害危险性预测评价的因子。因为只是预测目前天然状态下的潜在危险性，即只考虑区域内在地质背景条件下的稳定性，所以在指标的选取时，只考虑地质背景的孕灾条件。对于外在的诱发因素，如地震、降雨以及人类活动影响不予考虑。采用栅格单元作为测评价基本单元，单元大小和研究区 1: 1 万 DEM 单元大小一致，即 $2m \times 2m$ 。建立五个评价因子 GIS 栅格图层后，利用多因子分级加权模型，进行地质灾害的危险性预测评价。

(1) 斜坡结构

斜坡结构是指在层状岩体组成的斜坡中，由坡面、岩层产状、河流或沟谷流向三者之间特定的组合方式决定的斜坡形态^[5]。

表 1. 斜坡结构类型及危险性分级量化标准

Table 1. Types of slopes structure and their quantitative criteria classification of risk

斜坡结构类型划分			危险性等级	量化值
I	平缓层状岸坡 ($\alpha < 10^\circ$; $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$)	I ₁ : 平缓倾内层状岸坡	较低	2
		I ₂ : 平缓倾外层状岸坡		
II	横向岸坡 ($60^\circ \leq \beta \leq 120^\circ$; $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$)		低	1
III	顺向层状岸坡 ($0^\circ < \beta \leq 30^\circ$)	III ₁ : 缓倾外顺向层状岸坡 ($10^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$)	较高	3
		III ₂ : 中倾外顺向层状岸坡 ($20^\circ < \alpha \leq 45^\circ$)	高	4
		III ₃ : 陡倾外顺向层状岸坡 ($\alpha > 45^\circ$)	高	4
		IV ₁ : 缓倾内逆向层状岸坡 ($10^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$)	较低	2
IV	逆向层状岸坡 ($150^\circ < \beta \leq 180^\circ$)	IV ₂ : 中倾内逆向层状岸坡 ($20^\circ < \alpha \leq 45^\circ$)	较低	2
		IV ₃ : 陡倾内逆向层状岸坡 ($\alpha > 45^\circ$)	较高	3
		V ₁ : 斜向倾内层状岸坡 ($120^\circ < \beta < 150^\circ$)	较低	2
V	斜向层状岸坡 ($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$)	V ₂ : 斜向倾外层状岸坡 ($30^\circ < \beta < 60^\circ$)	较高	3

斜坡结构类型对坡体稳定性具有控制作用。大量野外滑坡调查表明,在河流两岸地区,斜坡结构类型不同,坡体变形发展乃至最终破坏的形式完全不同。其中,岩层走向和河流走向之间的关系对斜坡稳定性的影响尤为突出,一般来说,横向直交坡最为稳定,斜向坡次之,而顺向坡对坡体的稳定性尤为不利。斜坡结构类型划分标准见表1,表中 α 为岩层倾角, β 为岩层倾向与岸坡坡向间的夹角。

计算斜坡结构类型的关键是要知道岩层倾角(α)和岩层倾向与岸坡坡向间的夹角(β)。根据数字高程模型(DEM)可直接派生出区域岸坡单元的坡向,所以求解区域斜坡结构的关键就是求解单元格中岩层倾角和岩层倾向。由于地质图上提供了岩层产状要素,因此只要确定现有地质图上标识的每个岩层产状的影响范围,即可认为这个影响范围内的所有评价单元的岩层倾角值和岩层倾向值就是由该产状要素决定的。根据地质图岩层产状确定其影响范围需遵循如下原则:取两个相邻产状的中点,按两个相邻产状的平均倾向的延伸线的圈闭范围就是一个产状的影响范围;断裂构造线直接作为分界线;遇到背斜或向斜,以其轴线为分界线。

按照上述原则,圈定研究区范围内每个产状的影响范围,在GIS中将每个影响区域赋予岩层倾角和岩层倾向两个属性值。然后在ArcGIS中分别根据倾向和倾角值,将矢量图层数据栅格化,得到研究区岩层倾向栅格图层和岩层倾角栅格图层。然后在ArcGIS的空间分析模块的Map Algebra(地图代数)中,先计算坡向与岩层倾向间的夹角 β ,再按照表1中斜坡结构的划分标准,利用岩层倾角 α 和 β 作条件运算,得到研究区斜坡结构类型,并按斜坡类型危险性等级进行量化打分。本文中,评价指标的稳定性等级划分为危险性高、危险性较高、危险性较低、危险性低四级,并对评价因子做半定量处理,采用4、3、2、1度量危险性由高到低四个等级。各评价因子的危险性等级划分及量化标准主要结合专家意见和经验值确定。

(2) 坡度

随着坡度的增加,包括重力在内的剪切力增大,相应的滑坡发生概率也会增大。但是,也并不是坡度越大越有利于滑坡的发生。滑坡和崩塌而发生的“最有利”坡度有一定差异性,一般情况下,滑坡一般发生在 $15\sim 50^\circ$,而崩塌则多发生在坡度大于 50° 区域。目前,绝大多数地质灾害危险性评价都要充分考虑坡度的影响。本文将坡度划分为四个等级,各等级危险性及其分级量化标准见表2。利用研究区数字高程模型

(DEM),在ArcGIS的空间分析模块,自动生成坡度图,然后再按照表2的分级标准对坡度图重分类,得到坡度因子栅格图层。

表2 斜坡坡度危险性分级量化标准

Table 2.Scope of slope and their quantitative criteria classification of risk

坡度区间	0~15°	15~25°	25~35°	>35°
危险性	低	较低	较高	高
量化值	1	2	3	4

(3) 断层

地质构造对斜坡的稳定性有明显的影响,尤其是断层的存在,使得岩体的破碎度增加,降低了坡体的完整性程度,造成残积、崩坡积碎石土层增厚,为崩塌、滑坡提供了丰富的物质来源。

断层主要根据地质构造遥感解译结果获取。断层规模等级和活动性不同,对地质灾害的影响程度不同。断层影响通过距离断层远近刻画、GIS缓冲区分析实现。断层影响范围及分级量化标准见表3。

表3 断层影响范围及危险性分级量化标准

Table 3. Affected scope of fault and their quantitative criteria classification of risk

断层性质	影响范围(m)	危险性等级	量化值
一般断层	>500	低	1
	>300, ≤500	较低	2
	>100, ≤300	较高	3
	≤100	高	4
	>2000	低	1
活动性	>1000, ≤2000	较低	2
断层	>500, ≤1000	较高	3
	≤1500	高	4

(4) 河流水系

发生崩滑灾害的一个重要条件就是前方要有足够的临空面。水流不断冲刷岸坡,淘蚀坡脚、削弱斜坡支撑力,形成临空面。当下滑力增大到大于抗滑力时,斜坡就会产生滑动,坡度较陡时形成崩塌。

库区两岸为高山峡谷,黄河冲刷、侵蚀两岸岸坡,形成有效临空面,大大降低了岸坡的稳定性。综合以上因素考虑,因子选取时,要充分考虑河流水系的影响。河流水系的影响通过距离河流远近刻画、GIS缓冲区分析实现。

结合研究区的 Quick Bird 遥感影像与地形图可以提取水系分布位置, 根据河流宽度, 将水系分为三级, 一级水系为黄河干流, 二级水系为黄河的面状支流, 三级为黄河的线状支流, 根据河流等级不同, 设置不同等级的缓冲距离。河流水系影响范围及危险性分级量化标准见表 4。

表 4 河流水系影响范围及危险性分级量化标准
Table 4. Affected scope of river and their quantitative criteria classification of risk

河流规模	影响范围(m)	危险性等级	量化值
一级水系 (黄河干流)	>200	低	1
	>150, ≤200	较低	2
	>100, ≤150	较高	3
	≤100	高	4
二级水系 (黄河支流, 面状)	>100	低	1
	>70, ≤100	较低	2
	>40, ≤70	较高	3
	≤140	高	4
三级水系 (黄河支流, 线状)	>50	低	1
	>30, ≤50	较低	2
	>10, ≤30	较高	3
	≤10	高	4

(5) 地层岩性

地层岩性对崩塌滑坡等地质灾害起着明显的控制作用。地层内的软弱岩层的存在是滑坡产生和发育的必要条件, 只有当这些岩体中含有向坡外倾斜的软弱

夹层、软弱结构面, 崩滑灾害才易于发生。而在坚硬完整岩体构成的斜坡, 则不容易发生。表 5 为地层岩性指标统计及危险性分级量化标准。根据地层岩性 GIS 数据库进行分级量化。

3.2 评价指标权重确定

不同指标对地质灾害的“贡献率”是不同的, 因此不能把它们等效处理和平权处理, 而用权重来体现这种重要程度的差异性。层次分析方法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 是评价指标权重确定的常用方法。经层次分析方法计算, 即斜坡结构对地质灾害危险性影响的“贡献”权重是 0.254, 坡度是 0.413, 断层是 0.105, 河流水系是 0.065, 地层岩性是 0.163。

3.3 GIS 与数学模型的耦合分析

将地质灾害危险性的五个影响因子分级量化后, 根据层次分析法确定的各因子权重, 在 ArcGIS 的 Spatial Analysis Tool 工具中, 进行多因子分级加权运算, 得到地质灾害危险性指数 (DI) 图。根据地质灾害危险性指数图, 采用直方图分割法, 划分危险性等级, 得到分区预测评价图, 即假定 DI 值随机分布, 根据 DI 的标准差确定直方图分割区间的阈值, 具体参见表 6。表中, max 为危险性指数 DI 的最大值, min 为最小值, mean 为均值, c 为标准差, 以上各值均可以通过察看 DI 的直方图直接得到。

表 5 地层岩性指标统计及危险性分级量化标准
Table 5. Formation & lithology in study area and their quantitative criteria classification of risk

地层岩性				危险性等级	量化值
符号	名称	岩性	软硬程度		
R ^b	第三系	紫红色粉砂岩、砂岩夹泥岩	软弱岩体	高	4
R ^a	第三系	紫红色砾岩、角砾岩	中等坚硬岩体	较低	2
T ₂ ^a	三叠系中统	薄层状长石砂岩、长石石英砂岩夹粉砂质、泥质板岩、局部夹薄层灰岩	中等坚硬岩体	较高	3
π Y ₅		印支期侵入岩: 灰白色似斑状中粒黑云母花岗岩	坚硬岩	低	1

表 6 地质灾害危险性分区参数
Table 6. Zoning parameter geological hazard risk

等级	危险性低	危险性较低	危险性较高	危险性高
分区标准	[min, mean-c)	[mean-c, mean]	(mean, mean+c]	(mean+c, max]
分区	<1.56	≥1.56, ≤2.25	>2.25, ≤2.94	>2.94

基于 GIS 和多因子分级加权模型预测评价地质灾害危险性的实施过程如图 1 所示。图 2 为计算分析得到的地质灾害危险性分区预测评价图。

4 评价结果分析

根据地质灾害危险性划分的等级, 先对各等级定性描述。

(1) 危险性低：表示区域稳定，发生崩塌和滑坡的可能性不大。

(2) 危险性较低：表示区域稳定，发生崩塌和滑坡的可能性一般，不会发生大型的崩塌和滑坡。

(3) 危险性较高：表示发生崩塌和滑坡的可能性较大，可能会发生中小规模的崩塌和滑坡。

(4) 危险性高：表示发生崩塌和滑坡的可能性比较大，需要高度关注。

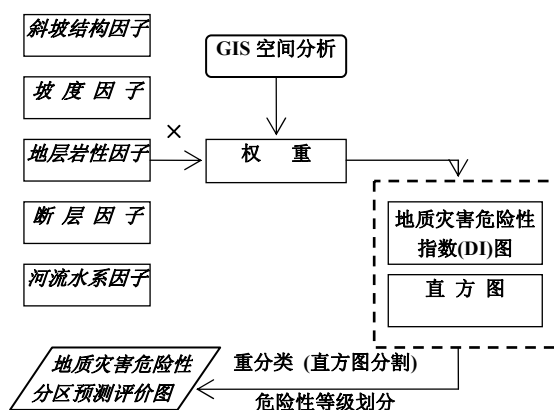


图 1. 地质灾害危险性评价实施过程
Figure 1. Workflow of risk evaluation of geologic hazard

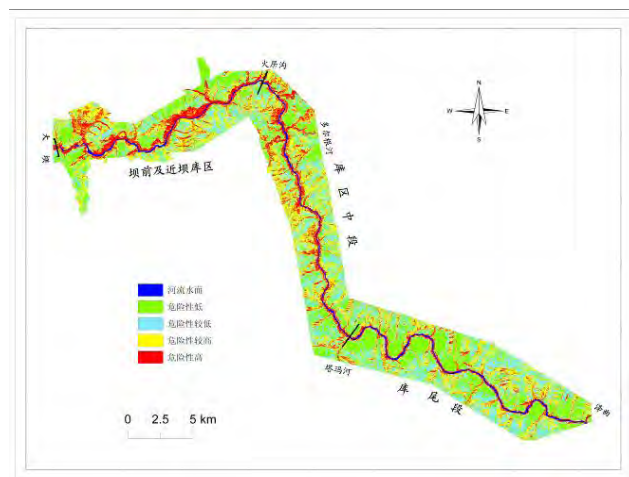


图 2 地质灾害危险性预测评价图
Figure 2. Map of risk evaluation of geologic hazard

图 2 反映了水电站水库区地质灾害危险性的空间差异。从图上来看，危险性高的区域主要集中在黄河干流的两岸地区。从水库分段来讲，危险性高低的空间分布情况是：坝前及近坝库区 > 库区中段 > 库尾段。据此可以推断，水库建成蓄水后，库尾段发生崩塌、

滑坡的可能性不大，库岸是相对稳定的；而坝前及近坝库区，发生地质灾害的可能性很大。该段范围内的不稳定因素主要受坡度因子和断层因子控制，此段范围内的地质灾害对工程影响较大，需进一步加强岸坡稳定性评价研究。库区中段发生崩塌和滑坡的可能性也较大，尤其是从火居沟口以上约 10km 范围内，但是由于离水库大坝相对较远，所以对工程的影响不大。

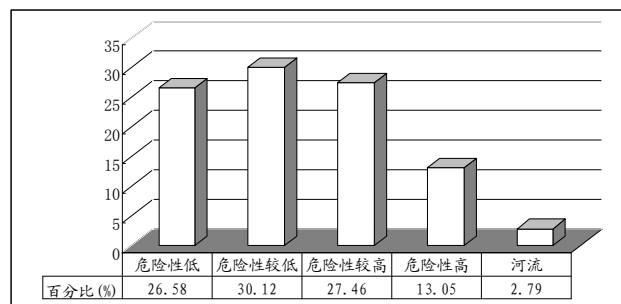


图 3 地质灾害危险性不同等级面积百分比
Figure 3. Area percentage of different risk grades of geologic hazard

通过对各个等级栅格单元数统计，得到不同危险性等级的面积比例(图 3)。从各个危险性等级的面积统计图来看，危险性较高和危险性高的面积占研究区面积的 40.51%。整个研究区地质灾害危险性处于中等水平。

References(参考文献)

- [1] SHI Bin, WANG Bao-jun, ZHOU Guo-yun. GIS in Environmental Geology[M].Beijing: Science Press,2006.152-186 (in Chinese)
施斌,王宝军,周国云.环境地质学中的 GIS[M].北京:科学出版社,2006.152-186
- [2] QIA Jian-ping. Research of Landslide Risk Zoning in Upper Reaches of the Yangtze- Landslide Research & prevention[M].Chengdu: Sichuan Science Press,1996. 78-89 (in Chinese)
乔建平.长江上游滑坡危险度区划及分区研究-滑坡研究与防治[M].成都:四川科学出版社,1996. 78-89
- [3] TANG Bang-xing. Mountain Torrents, Debris Flow and Landslide and Prevention[M].Beijing: Science Press,1995. 112-125 (in Chinese)
唐邦兴.山洪泥石流滑坡灾害及防治[M].科学出版社:北京,1995.112-125
- [4] ZHUO Bao-xi. Engineering Geology Interpretation by Remote Sensing and Application. [M].Beijing: China Railway Press,2002. 265-286 (in Chinese)
卓宝熙.工程地质遥感判释与应用[M].北京:中国铁道出版社,2002.265-286
- [5] YANG Wei-zhong, CHEN Hai-yang, SHI Chang-bai. The Classification of Bank Slope Based on GIS [J].Resources Environment and Engineering. 2007, 21(1):62-64.
杨卫中,陈海洋,石长柏.基于 GIS 的岸坡类型划分[J].资源环境与工程,2007,21(1):62-64.