

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.01.022

# 模糊数学在地质灾害危险性分区中的应用

## ——以九甸峡水利枢纽为例

宋丹青, 鲍春

(兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 九甸峡水利枢纽区地质环境复杂, 地质灾害点繁多, 水库蓄水前应对地质灾害危险性进行分区, 为工程的顺利建成及地质灾害的防治提供合理依据。基于对九甸峡水利枢纽区地质分析的基础上, 通过定性分析和类比方法, 选取地形地貌、地质构造、地层岩性类型等6个方面作为评价因子。引入灰色关联度确定评价因子权重, 利用半梯形分布模型获取影响因子的隶属度, 利用模糊数学方法将九甸峡水利枢纽区按地质灾害危险性划分为三个区: 地质灾害危险性较小(Ⅲ区)、地质灾害危险性较大(Ⅱ区)和地质灾害危险性大(Ⅰ区), 即Ⅰ区分布于坝址区(不含坝址区)下游段、Ⅱ区主要分布在洮砚以上的库尾段及主坝下游宗石—柳林段、Ⅲ区分布于洮砚—古马窝洮河两岸及两侧支沟流域。

**关键词:** 模糊数学方法; 地质灾害; 危险性分区; 九甸峡水库

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)01-0104-05

## Application of Fuzzy Mathematics in Division of Geological Disasters Based on Risk Degree

### ——A Case Study of Jiudianxia Reservoir

SONG Dan-qing, BAO Chun

(School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** There are a lot of areas afflicted by geological disasters in Jiudianxia reservoir region due to its complex geological conditions. Accordingly, this region should be classified into different disaster afflicted zones based on the geological conditions before the reservoir is put into use. This will provide some theoretical basis for the successful completion of the projects as well as the prevention and control of geological disasters. Based on the geological analysis of Jiulongxia reservoir region, topography and landform, geological structure, stratum lithology types etc. were selected to be the evaluation factors through qualitative analysis and analogy method. Grey correlation degree was introduced to determine the weight of each factor, and half trapezoidal distribution model was adopted to obtain the membership of the factors, and then fuzzy mathematics was used to classify the disaster afflicted areas in Jiudianxia reservoir region into 3 zones, which were minor geological hazard zone (Ⅲ zone), medium geological hazard zone (Ⅱ zone) and major geological hazard zone (Ⅰ zone). Namely Ⅰ zone is located in the downstream of the dam area (excluding the dam area), Ⅱ zone is mainly distributed in the tail section of the reservoir above Taoyan and between Zongshi and Liulin of the main dam downstream, Ⅲ zone is located in the banks of Taohe and its basins of the branches between Taoyan and Gumawo.

**Keywords:** fuzzy mathematics; geological disasters; classification of hazard zones; Jiudianxia reservoir

我国地质灾害的风险评估工作自20世纪80年代开始兴起, 经过30多年的发展, 在实践和理论方面都取得了丰硕成果<sup>[1]</sup>。目前, 评价地质灾害危险

性分区的方法主要有神经网络建模、成因历史分析法、层次分析法、地理信息系统(GIS)预测、模糊数学综合评判等, 各有其优缺点<sup>[2]</sup>。目前, 国内进行

地质灾害危险性评价的方法种类繁多,传统的方法包括统计分析方法和成因机理分析,其他主要还有易损性评价、风险性评价、破坏损失评价、危险性评价、防治工程效益评价等方法,其评价过程逐渐由定性评价向半定量评价或定量评价转化<sup>[3-5]</sup>。在地质灾害评估中,模糊数学综合评判应用已经较为成熟。由于地质灾害评估因子存在模糊性或不确定性,用隶属度描述模糊界限,运用模糊数学方法可降低模糊性等对地质灾害评价结果的影响,但其精度需建立在人为对界限值的设定是否合理和信息量是否充足的基础上<sup>[6]</sup>。

地质灾害区划及综合评估在地质灾害评估中占据重要位置,但由于影响地质灾害综合评估的因素繁多,关系十分复杂,导致地质灾害综合预测及评估比较困难<sup>[7]</sup>。地质灾害危险性综合评估是以拟建工程的评估区内地质灾害危险性预测评估、现状评估、潜在的地质灾害点危及工程的程度和地质环境条件的差异为基础,并在此基础上确定判别区段危险性的量化指标,采用定性半定量分析法进行地质灾害危险性等级分区<sup>[8]</sup>。在地质灾害危险性评价中,影响因素众多,各影响因素相互关联,为使这项复杂的系统问题得到合理解决,本文以九甸峡水利枢纽为例,运用模糊数学方法对地质环境进行地质灾害危险性分区。

## 1 模糊综合评判模型

综合评判模型分为一级模型和多级模型,由于本文选取一个层次,6个方面作为评价因子,因此采用一级模型进行评判。综合评判步骤如下<sup>[9]</sup>:

### (1) 单因素评判

首先确定评判对象的因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ , 并给出评判集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ , 从而建立一个从  $U$  到  $V$  的模糊映射  $f: U \rightarrow f(V)$ ,

$$x_i \rightarrow \frac{r_{i1}}{v_1} + \frac{r_{i2}}{v_2} + \dots + \frac{r_{im}}{v_m}$$

其中,  $0 \leq r_{ij} \leq 1, i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m$ 。

### (2) 综合评判

可用  $B = A \times R$  模式描述,  $B$  为一个  $r \times n$  阶行矩阵,称为评价矩阵;  $A$  为权重集,是因素集  $X$  上的一个模糊子集的向量表示,为  $r \times m$  阶行矩阵;  $R$  是由各单因子评价行矩阵组成  $m \times n$  阶矩阵,即模糊变换器;  $n$  为评价级别数,  $m$  为参评因子总数。

## 1.1 建立模糊综合评判因素集

构建模型是对灾情区进行地质灾害区划与评估的前提<sup>[10]</sup>,根据评估区不同类地质信息如地形地貌、岩土体性质、地质构造等,将评估区分为等级不同的地质灾害危险性区域。由于各区的地质灾害危险性等级不同,在对各个区域地质背景等特点进行统计分析的基础上,赋予各区地质信息不同的权重,得出各区地质灾害危险性的相应隶属度,最后基于最大隶属度原则对评估区内的地质灾害危险性进行分区<sup>[11]</sup>。

本文根据灾害类型、分布特征、发育程度对工程建筑物的影响程度,结合地质灾害危险性评估标准,对全区进行地质灾害危险性综合分区。在控制评估区地质环境条件的因素中,通过类比方法和定性分析,选取水文地质条件、地层岩性、地形地貌、地质构造、岩土体工程地质类型和地质灾害作为评价因子,建立因素集  $U = \{\text{地形地貌, 地质构造, 岩土体工程地质类型, 水文地质条件, 地质灾害, 危害对象}\}$ , 本文将 6 个参评因子定性量化成 3 个离散数据。

## 1.2 建立评价集

在各因子指标评价分级的前提下对参评因子进行分级标准取值,采用对评估区进行相关分析和打分的方法确定各参评因子的评价标准。采用规范标准确定评价集对评估结果影响很大,并且因素集中的参评指标都具有相应的评价标准。根据灾害类型、分布特征、发育程度对工程建筑物的影响,结合地质灾害危险性评估标准(表 1),将地质灾害危险性按等级分为 3 级,即建立评价集  $B = \{\text{地质灾害危险性小(III区)、地质灾害危险性较大(II区)、地质灾害危险性大(I区)}\}$ 。

表 1 地质灾害危险性评估标准

危险性等级	稳定状态	危害对象	损失情况
危险性大(I区)	大	城镇及主体建筑物	大
危险性中等(II区)	较大	有居民及主体建筑物	较大
危险性小(III区)	小	无居民及主体建筑物	小

## 1.3 确定隶属函数

运用模糊数学方法,用隶属度  $U(x)$  来表示事件与模糊概念之间的联系与制约,隶属度与隶属资格成正比关系,采用隶属函数表示隶属度<sup>[12]</sup>。确定隶属函数的方法很多,主要有三分法、模糊统计法和德尔菲法等。本文选用半梯形分布与梯形分布原理确定隶属函数,即偏大型:

$$u_1(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a_{1j} \\ \frac{x - a_{1j}}{a_{2j} - a_{1j}}, & a_{1j} \leq x \leq a_{2j} \\ 1, & x \geq a_{2j} \end{cases} \quad (1)$$

中间型:

$$u_1(x) = \begin{cases} \frac{x - a_{1j}}{a_{2j} - a_{1j}}, & a_{1j} < x \leq a_{2j} \\ 0, & x \leq a_{1j}, x \geq a_{3j} \\ \frac{a_{3j} - x}{a_{3j} - a_{2j}}, & a_{2j} < x < a_{3j} \end{cases} \quad (2)$$

偏小型:

$$u_1(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a_{1j} \\ \frac{a_{2j} - x}{a_{2j} - a_{1j}}, & a_{1j} < x < a_{2j} \\ 0, & x \geq a_{2j} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $u_i(x)$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 表示第  $x$  个评价因子对库区地质灾害危险性评价的隶属度;  $a_{ij}$  表示地质灾害危险性分级标准, ( $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6; i = 1, 2, 3$ );  $x$  为各参评因子的实际值。

#### 1.4 建立模糊关系矩阵

建立各自的模糊关系矩阵  $R$ , 如下:

$$R = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} \end{bmatrix} \quad (4)$$

#### 1.5 建立权重集

本文关于影响地质灾害危险性分区的 6 个因子, 在危险性评价过程中的影响权重是不同的, 进行模糊综合评价时, 权重的确定对评价结果会造成很大的影响。根据各个参评因子对库区地质灾害危险性影响目的和程度等不同, 应对各参评因子在地质灾害评估中给予相应的权重。权重的确定方法有多种, 如专家估计法、层次分析法等, 无论采用何种方法, 权重确定的合理与否主要取决于对地质灾害赋存环境调查了解的详细程度和专家的经验<sup>[13]</sup>。笔者采用灰色关联方法来确定评价因子的权重<sup>[14]</sup>, 得到水文地质条件、地质构造、岩土工程地质类型、地形地貌、地质灾害和危害对象的关联度。

利用灰色关联方法确定因素集权重<sup>[15]</sup>, 步骤如下:

(1) 设参考数列为  $X_0$ , 被比较数列(因素数列)

为,  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots, n$ , 其中:  $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$ 。

(2)  $X_i$  与  $X_0$  灰色关联度为:

$$r(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(x_0(k), x_i(k)) \quad (5)$$

其中: 定义数列  $X_0$  与  $X_i$  在  $k$  点的关联系数为:

$$r(x_0(k), x_i(k)) =$$

$$\frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (6)$$

其中,  $\rho$  为分辨系数,  $\rho \in [0, 1]$ ,  $\rho$  的取值不影响关联序, 只影响关联系数的大小, 一般取中间值 0.5。

两个因子绝对差分别为:

$$\begin{cases} \Delta_{\max} = \min \min |x_0(k) - x_i(k)| \\ \Delta_{\min} = \max \max |x_0(k) - x_i(k)| \\ \Delta = |x_0(k) - x_i(k)| \end{cases} \quad (7)$$

(3) 经计算得出关联度:  $r(X_0, X_i) = \{r_1 r_2 r_3 r_4 r_5 r_6\}$ , 确定权重集  $A = (a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6)$ , 利用以下公式进行权重计算:

$$W_i = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (8)$$

其中:  $r_{ij}$  为参评因子的实际权重。

#### 1.6 综合评判模型及单元划分

在模糊数学方法中, 综合评价是求矩阵  $B$  与  $A$  的合成。选用因素突出型“ $M(Y)$ ”作为矩阵合成的方法:  $B = A \times R = \{b_1, b_2, b_3\}$ 。其中,  $B$  为模糊关系矩阵,  $A$  为权重矩阵。

## 2 九甸峡水利枢纽地质灾害危险性评价

本文以九甸峡 H-28 滑坡附近区域为例(图 1), H-28 滑坡分布高程 2 095 m ~ 2 360 m, 相对高差小于 500 m; 位于洮河下游主干断裂带, 临近  $F_5$ 、 $F_6$ ; 区域下部以黄土类为主, 含块石、碎石和砂砾石; 地下水补给主要源于远处基岩山区的裂隙水, 埋藏深度小于 15m, 矿化度大于 1 g/L; 区域内发育有 H-28 滑坡、X-14 和 X-15 潜在崩塌; 滑坡距坝轴线 960 m, 危害主坝及附近居民。结合九甸峡水库地质灾害危险性评价的因素集化表(表 2), 将其量化处理成离散原始数据矩阵, 量化值越大工程地环境越不利:

$$X = \{1.5 \quad 3.5 \quad 4 \quad 4 \quad 3.5 \quad 2\} \quad (9)$$



图 1 九甸峡水利枢纽断层分布图

表 2 因素集量化值

参评因子	分区特征	量化值
地形地貌条件	中高山亚区位于燕子坪下游段,属莲花山—白石山山脉主峰区,海拔大于 3 500 m,相对高差大于 1 000 m。	4
	中高山亚区位于洮砚—燕子坪广大区域,海拔大于 3 000 m,相对高差 500 m~1 000 m。	3
	低中山亚区位于马连滩—洮砚,多为高程 2 000 m~3 000 m 的山岭,相对高差小于 500 m。	1
地质构造	洮河下游主干断裂带(F <sub>1</sub> , F <sub>2</sub> , F <sub>3</sub> , F <sub>4</sub> , F <sub>5</sub> , F <sub>6</sub> 断层)	4
	洮河中游断裂带(F <sub>7</sub> , F <sub>8</sub> , F <sub>9</sub> 断层)	3
	洮河上游次级断裂带(F <sub>10</sub> , F <sub>11</sub> , F <sub>12</sub> 断层)	2
岩土体工程地质类型	黄土类、粉土和砾卵石类,结构松散、湿陷性、空隙较大的地层	5
	地层岩性为二叠系(P)及三叠系(T)的灰岩、砂砾岩、板岩、砂质页岩和碳质页岩,层理明显,岩层软硬相间。	3
	岩性多致密坚硬,耐风化,物理力学性质好。	1
水文地质条件	矿化度大于 1 g/L,且埋藏深度小于 15 m 的地下水。	4
	矿化度在 0.5 g/L~1 g/L,且埋藏深度 15 m~30 m 的地下水。	3
	矿化度小于 0.5 g/L,且埋藏深度大于 30 m 的地下水。	1
地质灾害	发育有滑坡、泥石流和崩塌的区域	5
	发育有其中两种地质灾害的区域	3
	发育有其中一种地质灾害的区域	1
危害对象	将有城镇及主体建筑物的区段	4
	有居民及主体建筑物的区段	2
	无居民及主体建筑物的区段	0.5

2.1 确定权重集

(1) 对数据采用无因次化方法进行处理,这样可使数列间具有可公度。其处理方式有多种,如有

均值化变换、线性变换标准化和初值化变换等<sup>[16]</sup>。本文采用均值化变换,其公式为:

$$X'_i(k) = \frac{X_i(k)}{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m X_i(k)} \quad (10)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n; k = 1, 2, 3, \dots, m$$

经均值化计算: $X = (0.08 \ 0.19 \ 0.22 \ 0.22 \ 0.19 \ 0.10)$ 。

(2) 由式(7),计算两个因子绝对差分别为:

$$\Delta = (0.11 \ 0.14 \ 0.14 \ 0.11 \ 0.02), \Delta_{\min} = 0, \Delta_{\max} = 0.14。$$

(3) 由式(6),关联系数为: $r(x_0(k), x_i(k)) = \{0.39 \ 0.33 \ 0.33 \ 0.39 \ 0.11\}$ 。

(4) 由式(5),灰色关联度为:

$$\{r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4 \ r_5 \ r_6\} = \{1 \ 0.7 \ 0.57 \ 0.51 \ 0.49 \ 0.43\}。$$

(5) 由式(8),权重集  $A = \{0.28 \ 0.19 \ 0.15 \ 0.14 \ 0.13 \ 0.11\}$ 。

2.2 隶属度计算

由式(9):地形地貌隶属度  $a_{1j} = 1 \leq x = 1.5 < a_{2j} = 3$ 。由式(3)算得地形地貌隶属度: $u(x) = (0.25 \ 0.75 \ 0)$ 。类似有地质构造隶属度: $u(x) = (0 \ 0.5 \ 0.5)$ 。岩土工程地质条件隶属度: $u(x) = (0 \ 0.5 \ 0.5)$ 。水文地质条件隶属度: $u(x) = (0 \ 1 \ 0)$ 。地质灾害隶属度: $u(x) = (0 \ 0.75 \ 0.25)$ 。危害对象隶属度: $u(x) = (0 \ 1 \ 0)$ 。

2.3 建立模糊数学关系矩阵

根据上述各隶属度的计算值,按各参评因子隶属度次序排列成模糊数学关系矩阵  $R_{5 \times 3}$ :

$$R = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0.75 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

2.4 确定权重值

为综合考虑各种因素的影响,必须进行二级模糊近似推论: $B = (0.07 \ 0.20 \ 0.73)$ ,按最大隶属度原则,将该单元划归为地质灾害危险性较小(Ⅲ区)。九甸峡水利枢纽区地质灾害危险性分区见图 2。

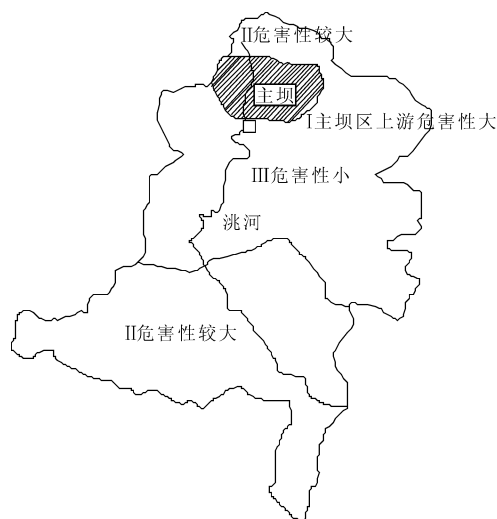


图 2 九甸峡水利枢纽区地质灾害危险性分区图

### 3 结 论

(1) 九甸峡水库蓄水前地质灾害危险性大 (I 区) 分布于坝址区下游段 (不包括坝址区), 该区是九甸峡水利枢纽工程的主要施工建设区, 所分布的滑坡和工程建设诱发的泥石流、崩塌, 直接危害水利枢纽的主体工程区, 对工程运行构成威胁。

(2) 九甸峡水库蓄水前地质灾害危险性较大 (II 区) 主要分布在洮砚以上的库尾段及主坝下游宗石—柳林段。库尾段沟谷密集, 岩性软硬相间, 岩体破碎, 风化强烈, 滑坡和泥石流发育, 是评估区内滑坡和泥石流灾害高发区, 也是水库主要的塌岸区。区内分布的危岩, 危石可能对工程运行造成威胁。

(3) 九甸峡水库蓄水前地质灾害危险性小 (III 区) 分布于洮砚至古马窝洮河两岸及两侧支沟流域。该区段内地质灾害数量少, 规模小, 沿洮河两岸主要分布一些危岩松动体、崩塌体及少量泥石流沟, 但现状危险性小, 水库蓄水后可能会造成一些沟段形成塌岸, 但规模很小, 该区适合建设大型工程。

(4) 模糊数学在山区地质灾害危险性评价中, 引入灰色关联度确定评价因子权重, 利用半梯形分布模型获取影响因子的隶属度, 利用模糊数学方法将九甸峡水利枢纽区按地质灾害危险性进行分区, 量化研究提高了可信度。目前九甸峡水库已经正

常运行多年, 通过对蓄水对库区进行地质灾害危险性进行分区 (图 2), 可为其他工程建设和运营提供可靠的依据。

### 参考文献:

- [1] 刘传正. 重大地质灾害防治理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 曹炳元. 应用模糊数学与系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] Devogele T, Parent C, Spaccapietra S. On spatial database integration [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(4): 335-352.
- [4] Majia Navarro M, Garcia L A. Nature hazard and risk assessment using decision support system application in Glenwood Springs, Colorado [J]. Environment & Engineering Geoscience, 1996, 2(3): 299-324.
- [5] 冯利华. 基于神经网络的洪水预报研究 [J]. 自然灾害学报, 2000, 9(2): 45-48.
- [6] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.
- [7] 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
- [8] 中华人民共和国国土资源部. 地质灾害危险性评估技术要求 (试行) [S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2004.
- [9] 梁保松, 曹殿立. 模糊数学及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] 章伟民. 对地质灾害危险性评估中几个问题的探讨 [J]. 甘肃科学学报, 2003, 15(S1): 38-41.
- [11] 鲁光银, 韩旭里, 朱自强, 等. 地质灾害综合评估与区划模型 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(5): 878-879.
- [12] 陈力, 梁海安, 张文娟, 等. 模糊数学方法在城市工程地质环境区划中的应用—以抚顺市城区为例 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(5): 838-839.
- [13] 霍张丽, 梁收运. 模糊数学方法在滑坡稳定性评价中的应用 [J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 35-39.
- [14] 王家鼎, 李震. 饱和土震动液化势影响因素的灰色理论分析 [J]. 甘肃科学, 1990, (2): 42-47.
- [15] 张绍良, 张国良. 灰色关联度计算方法比较及其存在问题分析 [J]. 系统工程, 1996, 14(3): 45-46.
- [16] 眭素刚, 范柱国. 模糊综合评判在大水窖泥石流危险度评价中的应用 [J]. 地质学刊, 2010, 34(1): 24-25.