

朱怀朝. 基于模糊数学的风电场地质灾害危险性综合评价模型[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 51–54. [ZHU Huaizhao. Comprehensive evaluation model for geological disaster risk of wind farm based on fuzzy mathematics[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 51–54. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.011.]

# 基于模糊数学的风电场地质灾害危险性综合评价模型\*

朱怀朝

(绵阳职业技术学院, 四川 绵阳 621000)

**摘要:**提出一种基于模糊数学的风电场地质灾害危险性综合评价模型。该模型首先分析了灾害发育的特征, 根据风电场内地质环境条件、地质灾害的主要引发因素, 结合模糊数学理论按照灾害危险点和非危险点进行划分, 构建灾害危险性评价指标体系; 结合模糊最优识别理论建立危险性初步评价的模糊识别模型。利用该模型对某风电场地质灾害危险性进行了分析评价, 结果表明, 该模型给出的危险性等级与实际评估区域危险性等级接近相同, 评估误差较小, 具有很高的准确性。

**关键词:**模糊数学理论; 风电场; 地质灾害; 危险性评价

**中图分类号:** X43; X915.5; TV223

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-811X(2019)03-0051-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.03.011

地质灾害是很普遍的一种自然灾害。很多原因都有可能影响地质的平衡性导致地质环境日益恶化。这种地质恶化的情况会使人类生命财产、生命、社会资源和大自然的环境受到极大的破坏<sup>[1]</sup>。我们国家的地质灾害评估工作从1980年代开始, 经过了30多年的不断完善发展, 在理论和实践方面取得了很大的成就<sup>[2-3]</sup>。目前国内对于地质灾害危险性评价的方法主要有层次分析法、神经网络法以及主成分分析法等。这些评价方法从不同角度上评价了每个地质灾害危险性影响因子的权重以及不同危险性等级的信息量。但上述方法均依赖于客观数据, 忽略了专家经验在确定权重的重要性, 评价结果与实际结果相差太多。随着数理知识在不同领域中的应用, 提升地质灾害危险性评价精度的重要性不言而喻<sup>[4-5]</sup>。

目前国内相关研究人士提出了地质灾害危险性评价模型。易明华等人<sup>[6]</sup>提出一种地质灾害危险性评价模型。将地质灾害和环境的相互联系、地质灾害的隐性影响作为评价因子, 利用层次分析法来评定每个评价因子的重要程度, 由此来测量出地质灾害点的危险级别, 使用定性与定量结合的方式给出最终的评价结果。屈飞行等人<sup>[7]</sup>提出一种基于最优权重计算的灾害危险性评价模型。通过四种不同的比重测量方法对地质灾害危险性进行评价和对比, 采用边界法来对实际滑坡及崩塌面的评价成果进行证实, 将不同灾害危险性等级面积和实际的地质灾害危险性等级对比值作为评判危险性评价结果准确性的标准。

针对上述方法均存在评估精度低的问题。本文提出了基于模糊数学的地质灾害危险性评价模型。实验结果表明, 该评价模型评估误差较小, 同时灾害危险性分区的做法对后续灾害防治工作也具有指导意义。

## 1 地质灾害危险性评价模型

### 1.1 灾害发育特征

地质灾害发生的特点:

(1)地形、地貌直接影响风电场地质灾害程度的大小, 风电场内主要是中低山地及盆地地貌。工程区域内是地势平缓地带, 没有明显的灾害发育特征。除了工程区域外是待开发的山地, 地质运动活跃、河流的分支多, 形成中高部地势。一些部分呈现直立状态, 岩石露出部分较密切, 坡缓地带和坡脚堆积处比较容易发生灾害。

(2)松散堆积层较发育地质灾害。区域内北侧方向育有黄土滑坡、泥石流、崩塌等灾害较少, 主要存在河谷两岸。

(3)工程区地带灾害呈地域性分布。多存在于斜坡、陡坡公路的边线。

(4)灾害形成与地形的坡度、岩石与地面接触的倾斜度、岩石破碎程度、地下水活动活跃度等多种因素相关。除此之外, 还与自然降水、人类开发工程等因素有关。

(5)地质灾害有着周期性和群发性的规律。在连续降水周期时段, 滑坡、崩塌等地质灾害高于平常年份。一年中的7、8、9月份频发降雨, 是灾害发生的高峰期。河谷的两旁是地质灾害的主要分布区域, 此区域长期受流水切割而且还是人类长期活动的区域, 很容易发生滑坡、崩塌等地质灾害。

(6)滑坡是最常见的地质灾害, 其中堆积层滑坡在滑坡灾害中最为普遍; 厚度一般、灾害规模属于中小型、稳定性比较好。

\* 收稿日期: 2019-01-15 修回日期: 2019-04-11

基金项目: 自然科学基金项目(40631002)

作者简介: 朱怀朝(1986-), 陕西西安人, 讲师, 硕士, 研究方向为应用数学建模. E-mail: zz356398632@163.com

评论区域内发生灾害点有 63 处，分别在 4 个单项工程中体现。其中滑坡有 55 处，崩塌有 4 处，泥石流有 4 处。结合地质危害的程度对其危险性作出评价，结果如表 1 所示。

表 1 地质灾害危险性评价表

对象	滑坡 55 处		崩塌 4 处		泥石流 4 处	
	特征	数量/个	特征	数量/个	特征	数量/个
岩性	黄土	6	积物	1	弃渣	4
	岩质	5	岩质	3	沟谷	4
	积层	44	-	-	-	-
规模	中型	30	中型	1	-	-
	小型	25	小型	3	小型	4
稳定性	好	40	好	1	-	-
	较差	13	较差	3	-	-
	差	2	-	-	低发	4
危险性	中等	12	中等	3	中等	1
	小	43	小	1	小	3

1.2 灾害危险性评价指标体系

在分析灾害发育特征后，根据灾害危险性评估因素、风电场内地质环境条件、地质灾害的主要引发因素，采用模糊数学理论按照灾害危险点和非危险点进行划分，构建灾害危险性评价指标体系，评估具体步骤如下。

- (1)以单元工程为测量标准进行评价估量。
- (2)风电场是否按灾害点来区分，风电场建设过程中可能发生的灾害也算作灾害点；风电场按轴线 500 m 为一个单位划分；按站址的位置向外延伸 1 000 m 或者按照一级边坡划分。
- (3)将搭建的工程地质灾害危险程度级别分为不同等级(分别为小、中等、大)。
- (4)评价因素集( $U$ )、评价结果集( $V$ )及权重向量( $A$ )的确定。

给出因素集  $U = \{u_1, u_2, \cdots, u_n\}$ 。土地地貌、岩土、斜坡的构造、流水切割坡脚、地质发育状况、隧道的断层和地质本身发育的灾害等因素都会影响地质灾害的危险性，可构建因素集  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\}$ 。通过地质环境条件对地质灾害的影响情况，将风电场建设会遭受、加强和引发地质灾害的危险性作为主体，隧道工程以断层为主，选择统一适合的权值分配。评价指标是评价模型中的一种地质变量，需要进行量化。可将其划分为两类，第一类是定量指标，把地质灾害发育的线密度做适当数值的替换即可直接使用；第二类是定性指标，将所有地形状况分为几个标准等级，按照不同等级的贡献来选择标准值<sup>[8]</sup>。假设，评价结果集为  $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_m\}$ ，建造工程地质灾害危险性可分为三级，评价结果集为  $V = \{v_1, v_2, v_3\} = \{\text{危险性小(Ⅰ级)}, \text{危险性中等(Ⅱ级)}, \text{危险性大(Ⅲ级)}\}$ 。

- (5)找到一个隶属标准，构建一个因素判定矩阵( $R$ )。

利用工程地质类比法和建造工程特征得出评价指标的隶属度值，通过隶属度对因素集( $U$ )中各个因素的评价判断，得出模糊评判矩阵<sup>[9]</sup>。

选取地形地貌、岩土体类型以及其斜坡结构等作为地质灾害危险性分区评价指标，其中所研究区域地形为盆地时危险性较小，岩土类型呈坚

硬块状，往往会冲刷积土。斜坡结构是单层结构，岩石坚硬无比，没有柔弱结构面存在。并且此区域基本没有河流冲刷痕迹，侵蚀坡脚断层发育不完善，有破碎带，危险性较小。盆地和山地的过渡区域岩石类型达到中硬程度，是软硬中厚层岩类；斜坡是单层或双层结构，岩石具有节理裂缝；河流冲刷呈季节性、侵蚀坡脚；断层较多，分布密集，破碎带较宽，危险性中等。中低山地有大量的松散堆积物陷入黄土中；斜坡结构是双层和多层结构；河流长期冲刷，侵蚀坡脚；断层较多，侵蚀坡脚，危险性极大。

地貌地形：盆地一级隶属度为 0.8，二级隶属度为 0.3，三级隶属度为 0.2；盆地山地过渡区一级隶属度为 0.4，二级隶属度为 0.6，三级隶属度为 0.3；中、低山地一级隶属度为 0.2，二级隶属度为 0.4，三级隶属度为 0.7。

岩土体：坚硬块状岩类一级隶属度为 0.6，二级隶属度为 0.4，三级隶属度为 0.3；中硬岩类一级隶属度为 0.3，二级隶属度为 0.6，三级隶属度为 0.4；松散堆积物一级隶属度为 0.2，二级隶属度为 0.5，三级隶属度为 0.6。

斜坡结构：单层结构岩石类整体性好，没有软弱岩石，一级隶属度为 0.8，二级隶属度为 0.3，三级隶属度为 0.2；单层或双层结构岩石有一定的裂缝，一级隶属度为 0.4，二级隶属度为 0.6，三级隶属度为 0.3；双层或多层结构一级隶属度为 0.1，二级隶属度为 0.3，三级隶属度为 0.9。

河流冲刷、侵蚀坡脚：无河流冲刷、侵蚀坡脚一级隶属度为 0.9，二级隶属度为 0.3，三级隶属度为 0.0；河流季节性冲刷、侵蚀坡脚：一级隶属度为 0.2，二级隶属度为 0.7，三级隶属度为 0.4；河流长期冲刷、侵蚀坡脚：一级隶属度为 0.3，二级隶属度为 0.4，三级隶属度为 0.6。

线、面密度<2 的一级隶属度为 0.7，二级隶属度为 0.4，三级隶属度为 0.2；线、面密度 2~3 的一级隶属度为 0.4，二级隶属度为 0.6，三级隶属度为 0.3；线、面密度>3 的一级隶属度为 0.2，二级隶属度为 0.3，三级隶属度为 0.8。

判定矩阵  $R$  为：

$$R = \{R_I, R_{II}, R_{III}\} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} \end{bmatrix}.$$

(1)

1.3 基于最优识别理论的灾害危险性评价模型

结合风电场地质灾害的发育特点，以确定的灾害危险性评价体系为基础，结合模糊最优识别理论构建了危险性初步评价的模糊识别模型。利用该模型对某风电场地质灾害危险性进行分析评价，具体过程为：通过建立影响泥石流危险性的各单项指标评价标准对各项指标值进行规格化的处理，获得不同评价指标值相应的隶属度，通过标准的隶属度值确定指标权向量。将指标权向量代入危险性初步评价的模糊识别模型中，对地质灾害文献性进行分类。将分类问题表示为：依据地质灾害危险性分类基准隶属度矩阵  $S$  对  $m$  个评价指标隶属度描述的样本  $j$  进行评判。正常状态下，地质材料样本  $j$  的第  $m$  个评价指标的隶属度不会均处于标准指标隶属度  $S$  相同指标隶属度基准范围内。例如样品处于标准评价指标隶属度矩阵  $S$  不同类别的上、下限为  $a_1$ 、 $a_2$ ，会出现  $1 \leq a_2 < a_1 \leq$

c。样品对各个分类的隶属度构成向量为：

$$u_j = (u_{1j}, u_{2j}, \cdots, u_{cj}), \sum_{h=1}^c u_{hj} = 1。$$
 (2)

地质灾害危险性的样本  $j$  的  $m$  个指标的权向量为：

$$w_j = (w_{1j}, w_{2j}, \cdots, w_{mj}), \sum_{i=1}^m w_{ij} = 1。$$
 (3)

利用欧式距离计算样本  $j$  与第  $h$  分类之间的差异，即：

$$d_{hj} = \sqrt{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^2}。$$
 (4)

为了凸显  $j$  与第  $h$  分类之间的差异，利用公式(1)中样本  $j$  对第  $h$  个分类的隶属度  $u_{hj}$  来计算加权后的欧式距离：

$$D(r_j, s_h) = u_{hj} \sqrt{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^2}。$$
 (5)

在计算欧式距离前需要求解最优类别隶属度向量，分类优化问题的目标函数可设定为：使地质灾害危险性描述样本  $j$  对于类别上下限是  $a_1、a_2$  的加权广义欧式距离平方和为最小，即：

$$\min = \left\{ F(u_{hj}) = \sum_{h=a_1}^{a_2} \left[ u_{hi} \sqrt{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^2} \right] \right\}。$$
 (6)

地质灾害危险性类别的最优化问题的约束条件为：

$$\sum_{h=a_1}^{a_2} u_{hj} = 1。$$
 (7)

构造拉格朗日函数：

$$L(u_{hi}, \lambda) = \sum_{h=a_1}^{a_2} u_{hj}^2 \times \sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^2 - \lambda \left( \sum_{h=a_1}^{a_2} u_{hi} - 1 \right)。$$
 (8)

令  $\frac{\partial L(u_{hi}, \lambda)}{\partial u_{hj}} = 0, \frac{\partial L(u_{hj}, \lambda)}{\partial \lambda} = 0$ ，则分别可得到：

$$u_{hi} = \frac{\lambda}{2 \sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^2}；$$
 (9)

$$\sum_{h=a_1}^{a_2} u_{hi} - 1 = 0。$$
 (10)

由公式(8)得到：

$$\sum_{h=a_1}^{a_2} u_{hj} = \frac{\lambda}{2} \sum_{h=a_1}^{a_2} \frac{1}{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^2}。$$
 (11)

联立式(9)和式(10)可得：

$$\lambda = \frac{2}{\sum_{h=a_1}^{a_2} \frac{1}{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^2}}。$$
 (12)

将公式(11)代入公式(8)中可获得：

$$u_{hj} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^2 \sum_{h=a_1}^{a_2} \frac{1}{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^2}} = \frac{1}{d_{hi}^2 \times \sum_{k=a_1}^{a_2} d_{ki}^{-2}}。$$
 (13)

式中： $h = a_1, a_1 + 1, \cdots, a_2$ ；序号  $k$  可以间断。

2 评价模型验证

为了验证评价模型的综合有效性，以某风电场为例，采用 Arc GIS 软件的空间叠加模块将上述评价因子叠加，对地质灾害危险性类型进行划分。分类结果如图 1 和表 2 所示。

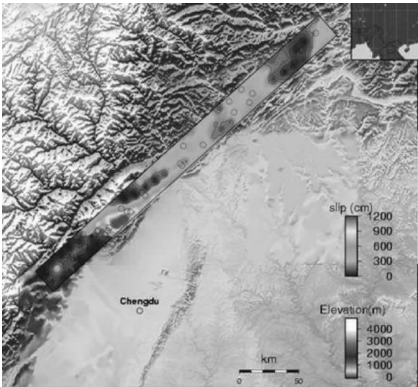


图 1 某风电场地质灾害危险性划分

表 2 某风电场地质灾害危险性划分统计

危险性 分级	地质灾 害数	灾害比 例/%	分区面 积/km <sup>2</sup>	分区比 例/%	地质灾害 密度/%
极高 危险区	1260	47.88	675.8	2.8	65.08
高危 危险区	752	28.57	2629.5	11.1	19.67
中危 危险区	542	20.59	7146.7	30.1	7.94
低危 危险区	73	2.77	8684.7	36.5	1.00
极低 危险区	5	0.19	4629.9	19.5	0.14

本文对某风电场地质灾害危险性进行划分，划分结果为极高危险区、高危险区、中危险区、低危险区、极低危险区这 5 类。

(1)极高危险区所占面积为 675.8 km<sup>2</sup>，占总研究区面积的 2.8%。区域内河流侵蚀比较严重，地形起伏程度较大，周围岩体易破碎，此区域内人口较为密集，同时也是风电机组、公路等分布较为密集的区域，此区域内分布地质灾害 1 260 处。

(2)高危险区所占面积为 2 629.5 km<sup>2</sup>，占总研究区面积 11.1%，区域内河流侵蚀比较严重，地形的起伏程度较大，岩体易破碎，这个地带也是人类活动较为频繁的地带，也存在着耕地、公路、桥梁等密集区域。区域内分布地质灾害有 752 处。

(3)中危险区所占面积为 7 146.7 km<sup>2</sup>，是总研究区面积的 30.1%，此地区地形起伏程度较大、有较长的水系主干和河道，人们利用区域土地发展农业，人类活动频繁破坏地区严重，区域内分布地质灾害有 542 处。

(4)低危险区所占面积是 8 684.7 km<sup>2</sup>，是总研

究区面积的 36.5%，区域内主要以林地、草地和耕地等半农半牧为主。地形较为平缓，人类活动影响不严重，区域内分布地质灾害有 73 处。

(5) 极低危险区所占地面积是 4 629.9 km<sup>2</sup>，是总研究区面积的 19.5%。该区域以林业和高山草地、河流源头，植被覆盖较茂盛。人类活动大多以牧业为主要劳动力，人类活动影响微弱。

通过 Matlab 平台进行仿真，本文的模型评估曲线与实际曲线如图 2 所示。从图 2 可知，基于模糊数学的地质灾害危险性评估模型给出的危险性等级与实际评估区域危险性等级接近相同，评估误差较小；以确定的灾害危险性评价体系为基础，结合模糊最优识别理论构建了危险性初步评价的模糊识别模型，根据该模型评估某风电场地质灾害危险性，使得最终的评估结果更准确，能够从大量的评估结果中去除一些不可信的评估数据，保证了最终的评估精度。

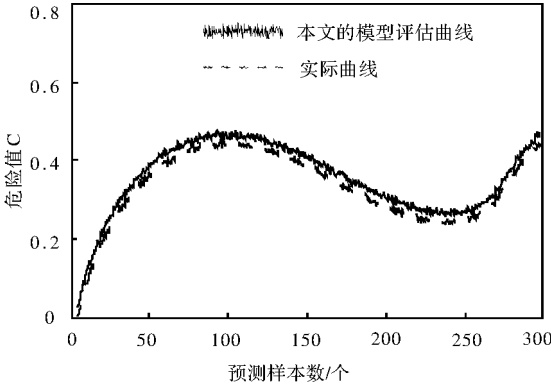


图2 模型评价精度

3 结论及其讨论

针对传统评估模型均依赖于客观数据，忽略了专家经验在确定权重的重要性，导致评价精度低的问题，本文提出一种基于模糊数学的风电场地质灾害危险性评价模型。对某风电场地貌和人

类活动范围等众多影响因素进行分析，以坡的幅度、岩石的稳定性、地震、降水、河流域为评价因子，采用模糊数学理论给出灾害危险性评价体系，接着结合模糊最优识别理论分类某风电场地质灾害危险性。最终的数据结果显示，该风电场的地质灾害主要分布在人口密集区域，地质灾害较为集中，危害性比较大。中、高山地的地质灾害则较少，危险性较小。由此来看，人口密集地是极高和高危险地带，灾害比率较高，高达 76%，分区面积较小，是总研究区面积 14%，地质灾害密度为 42 处。中、高山地的农牧业区，地质灾害是中-低-极低分布，地质灾害数是 620 处，灾害比率较低，为 24%，分区面积较大，是全区面积的 86%。

通过上述实例结果表明，本文的评价模型评估精度相对较高，简便实用。

参考文献：

[1] 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.

[2] 李金夫, 虞先国, 刘勇, 等. 关于整车物流运输车辆路径优化设计的研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(4): 184-188.

[3] 杨冬冬, 胡胜, 邱海军, 等. 基于模糊层次分析法对“一带一路”重要区域地质灾害危险性评价——以关中经济区为例[J]. 第四纪研究, 2017, 37(3): 633-644.

[4] 雷崇利, 刘翔, LEIChongli, 等. 基于地质灾害危险性的煤层气项目经济评价[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(3): 75-79.

[5] 陈维治, 付保红. 基于地质灾害危险性区划的盈江县农村居民点空间布局优化[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 320-324.

[6] 易明华, 吴辉, 叶柯. 地理国情的地质灾害危险性评价[J]. 测绘科学, 2017, 42(8): 40-43.

[7] 屈飞行, 汤明高, 王自高, 等. 地质灾害危险性区划中不同权重计算方法的对比分析[J]. 水利水电技术, 2016, 47(11): 136-140.

[8] 詹威威, 黄润秋, 裴向军, 等. 沟道型滑坡-碎屑流运动距离经验预测模型研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 154-163.

[9] 毛硕, 王运生, 曹水合. 基于可拓和组合赋权的泥石流危险性评价[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(1): 56-60.

Comprehensive Evaluation Model for Geological Disaster Risk of Wind Farm Based on Fuzzy Mathematics

ZHU Huaizhao  
(Mianyang Polytechnic, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** A comprehensive evaluation model for geological hazard of wind farms based on fuzzy mathematics is proposed. The model first analyzes the characteristics of disaster development. According to the geological environment conditions in the wind farm and the main triggering factors of geological disasters, combined with fuzzy mathematics theory to divide the disaster risk points and non-hazardous points to construct a disaster risk assessment index system; The optimal recognition theory establishes a fuzzy identification model for preliminary assessment of risk. The design experiment uses this model to analyze and evaluate the geological hazard of a wind farm. The results show that the hazard level given by the model is close to the hazard level of the actual assessment area, and the evaluation error is small and has high accuracy.

**Key words:** fuzzy mathematics theory; wind farm; geological disaster; risk assessment