文章编号: 1004-4574(2009) 01-0008-06

基于模糊贴近度的岩溶塌陷易发性研究

何 书[1,2], 王家鼎[1], 朱 忠[2], 吴开兴[2]

(1. 西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069;
2 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 在综合分析岩溶塌陷特点及其影响因素的基础上, 参考大量实例及专家意见, 结合模糊贴近度理论, 建立了岩溶塌陷易发性评价模型。在模型的建立过程中, 讨论了岩溶塌陷评价指标隶属度的计算, 使用层次分析法确定了各评价指标的权重。以武山铜矿区上屋周地段岩溶塌陷评价为实例, 利用模型分别对该地段目前和 1994年的岩溶塌陷易发性进行了评价, 并进行了对比, 评价结果与实际情况基本一致。利用武山铜矿区多个已发生岩溶塌陷的地段对方法进行了验证, 并对整个碳酸岩覆盖区域进行评价, 均表明该评价模型效果良好。所提基于模糊贴近度的岩溶塌陷易发性评价模型原理直观, 计算方法简单、快速、实用, 为岩溶塌陷易发性评价提供了新的思路和方法。

关键词: 岩溶塌陷; 贴近度; 评价模型; 层次分析法; 武山矿区

中图分类号: P642. 26 文献标识码: A

Fuzzy approach degree-based research on occurrence of karstic collapse

HE Shu[1,2], WANG Jia-ding[1], ZHU Zhong[2], WU Kai-xing[2]

(1. Department of Geology/State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Department of Resource & Environmental Engineering, Jangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Based on analyzing major afecting factors of karst collapse and collecting a great deal of instances and expertises, we established a model to make an assessment of the occurrence of karst collapse by using fuzzy approach degree theory. The weighing of every assessment index will be defined by AHP. The occurrence of karst collapse in a section of Wushan copper mineral area was evaluated by using this model. The model was validated by many instances. These application instances explain that the evaluation result is credible, and the characteristics of the evaluation model are simple, fast and practical. This evaluation model based on fuzzy aporoach degree theory has favorable application value, so this paper offers a new method to evaluate the occurrence of karst collapse.

Key words: karst collapse; approach degree; evaluation model; AHP; Wushan mining area

在岩溶地区, 岩溶塌陷是一种危害较大的地质灾害。一般认为, 岩溶塌陷主要是由于在岩溶地区进行地下水的抽取或矿山排水所引起。目前对岩溶塌陷的预测主要从两个方面入手: 一是在预测地段建立力学平

收稿日期: 2007-03-22; 修订日期: 2007-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572157); 高等学校博士点专项科研基金资助项目(20050697013)。

作者简介: 何书(1978-), 男, 博士研究生, 助教, 主要从事地质灾害及其防治方面的研究. E-mail: gz-heshu@yahoo.com.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

衡模型[1-2]; 二是综合分析影响岩溶塌陷的各类因素, 进行定性分析[3~4]。由于岩溶塌陷产生的复杂性, 单纯的力学平衡模型难以在实际的评价工作中应用, 所以在实际的地质灾害评估中, 多采用多因素的综合评价方法。近几年来, 一些研究人员在利用模糊集相关理论对岩溶塌陷易发性的评价方面进行了有益的探索[5]。模糊贴近度方法是一种基于识别算法的模糊识别方法, 在理论研究[6-8]和实际应用方面一直受到广泛关注[9-11]。本文将首次应用模糊贴近度方法建立一种岩溶塌陷易发性分级评价模型, 以便应用于地质灾害危险性评估中岩溶塌陷的评价。

1　模糊贴近度的多特性择近原则

设在论域 $X = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$ 上有 n 个模糊子集 $A_1, A_2, \cdots, A_n$ 构成了一个标准模型库, 每个模型又由 m 个特性来刻划:

$$A_i = (A_{i1}, A_{i2}, \cdots, A_{im}), \quad i = 1, 2, \cdots, n,$$

待识别的模型 $B = (B_1, B_2, \cdots, B_m)$。

先求两个模糊向量集合族的贴近度, 然后作取小运算:

$$S_i = \wedge \{N(A_{ij}, B_j) \mid 1 \leqslant j \leqslant m\}, \quad i = 1, 2, \cdots, n,$$

其中 $N(A_{ij}, B_j)$ 表示 B 中第 j 个特征值与 A 中第 i 个模型的第 j 个特征标准值之间的贴近度。

若有 $k \in \{1, 2, \cdots, n\}$, 使得 $S(A_k, B) = \vee \{S_i \mid 1 \leqslant i \leqslant n\}$, 则称 B 与 A_k 最贴近, 或者说把 B 归于 A_k 类。

以上就是模糊贴近度理论的多特性择近原则, 它是一种基于识别算法的模式识别方法。当被识别对象本身就是一种模糊子集的时候, 可以直接利用贴近度和择近原则来进行识别。

表 1　评价因子及分级标准

Table 1　Evaluation factors and standard for classification

因　　素	稳定	基本不塌	难塌	易塌	很易塌
基岩岩性	非碳酸盐岩 (1)	泥质灰岩 (2)	白云岩夹灰岩 (3)	灰岩夹白云岩 (4)	灰岩 (5)
浅部岩溶发育强度 (见洞率)	< 0.1 (1)	0.1~0.2(2)	0.2~0.3(3)	0.3~0.6(4)	> 0.6(5)
地下水埋深 /m	> 5 (1)	5~3 (2)	3~2 (3)	2~1 (4)	< 1 (5)
地下水径流强度	很弱 (1)	弱 (2)	中等 (3)	强 (4)	很强 (5)
覆盖层厚度 /m	> 30 (1)	20~30 (2)	10~20 (3)	5~10 (4)	5~0.5 (5)
地貌单元	中高山 (1)	岗丘或丘陵 (2)	残丘或台地 (3)	洼地或阶地 (4)	溶蚀平原 (5)
与抽排水中心距离 (R: 影响半径)	> 2.0R (1)	1.5~2.0R (2)	1.0~1.5R (3)	0~0.5R (4)	0.5~1.0R (5)
人工抽排水强度	很弱 (1)	弱 (2)	中等 (3)	强 (4)	很强 (5)
人工活动	无 (1)	弱 (2)	中等 (3)	较强 (4)	很强 (5)

注: 圆括号内的数字为分值。

2　构造岩溶塌陷易发性的模糊贴近度评价模型

2.1　评价指标的确定

岩溶塌陷产生取决于自然因素和人为因素两个大的方面: 其中自然因素包括岩溶条件、地下水条件、覆盖层条件及地形地貌条件; 人为因素主要包括人工抽排水及其他人工活动。在利用模糊贴近度进行模糊识别中, 并非选取的评价指标越多越好, 指标选取过多, 会给确定各指标在评价中的贡献带来困难。当然, 指标过少又难以达到评价目的。结合目前在实际评估中常用的评估指标、已有研究成果[4-5]及大量实例统计, 在众多的影响因素中选取了表 1中 9个主要的因素作为评价指标, 并分别给出了各指标相应于各评价级别的具体分值。指标选取中尽量保证了各指标间的相对独立性, 目的是尽可能避免在以后的计算过程中可能产生的相互干扰。为便于评价中对定性指标的把握, 本文给出了地下水径流强度、人工抽排水强度和人工活动强度三个指标相对于各评价级别的定性描述 (见表 2)。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2　岩溶塌陷易发性分级及评价指标特征

Table 2　Classification and evaluating indices of occurrence of karst collapse

易发程度	地下水径流强度	人工抽排水强度	人工活动
稳定	与相邻水文地质单元水力联系极差或没有联系, 地下水流动十分缓慢。	基本没有人工抽排水, 或很弱。	无人工活动
基本不塌	与相邻水文地质单元有一定水力联系, 但地下水流动较为缓慢。	人工抽排水流量很小, 对地下水位的变化影响甚微。	基本没有大的基础设施建设或勘探工程, 人工活动影响较弱。
难塌	与相邻水文地质单元有水力联系, 彼此间水头差不大, 地下水流速中等。	人工抽排水相对稳定, 没有大的集中式抽排水, 对地下水位的变化及地下水的运动影响不大。	有一定人工活动, 如小型的基础设施建设, 振动强度不大。
易塌	与相邻水文地质单元联系密切, 具有较大水量交换, 彼此间具导水通道, 地下水流速相对较快。	人工抽排水流量大, 影响半径向外扩展, 地下水位有明显的降低, 影响半径内的地下水运动增强。	人工活动较强, 区域内有基础设施建设, 如开挖、铺路、小型钻探工程或有铁路通过等。
很易塌	与相邻水文地质单元水力或地表水联系十分密切, 水量交换频繁, 地下水具有贯通的导水通道, 流速较快。	集中式的大流量抽排水, 地下水位迅速下降, 影响半径迅速向外扩展, 地下水迅速向抽排水地点集结。	存在强烈的人工活动, 如开山挖石、大规模的勘探工程活动等。

对于评价岩溶塌陷易发性的指标, 设 9个论域, 即: 基岩岩性; 浅部岩溶发育强度 (见洞率); 地下水埋深 (m); 地下水径流强度; 覆盖层厚度 (m); 地貌单元; 与抽排水中心距离 (R: 影响半径); 人工抽排水强度; 人工活动 (如振动)。

同理设岩溶塌陷易发性论域为: 稳定, 基本不塌, 难塌, 较易塌, 易塌。该论域各成员基本特征见表 3。

表 3　岩溶塌陷易发性分级及基本特征

Table 3　Classification and basic characters of occurrence of karst collapse

易发程度	基本特征
稳定	基岩岩性为非可溶岩; 可溶岩地区远离抽排水影响范围; 具有很厚的覆盖层, 土石界面不具有颗粒运移的垂直通道; 可溶岩地区浅部岩溶发育率很低; 地下水埋深较大, 基本没有抽排地下水活动。
基本不塌	基岩岩性以泥质灰岩为主, 岩溶发育较低; 覆盖层较厚, 人工抽排水强度较弱。
难塌	基岩以白云质灰岩为主, 岩溶发育较低, 见洞率较小; 覆盖层厚度相对较厚; 处于抽排水影响半径之外, 人工抽排水强度及其他人工活动中等。
易塌	基岩为灰岩, 岩溶发育, 见洞率较高; 覆盖层厚度较薄; 处于抽排水影响半径之内; 人工抽排水强度较强, 地下水位变化剧烈; 地势相对较低。
很易塌	基岩为比较纯的灰岩, 岩溶十分发育, 见洞率很高; 覆盖层厚度很薄, 有隐伏土洞存在; 处于抽排水影响半径之内; 人工抽排水强度很高, 且相对集中, 地下水位在较短时间内发生剧烈变化; 往往处于水塘、农田等地势平坦的地区; 人工活动强烈, 如开山、大规模的勘探工程等。

2 2　隶属函数的建立

隶书度函数的建立往往直接关系到整个的模糊计算, 是建立模型的关键。在本模型的建立过程中, 隶书度函数应尽量简单而又符合实际的原则。经过多种方法的试算后, 最终采用了下面的方法。

表 1中 9个指标评价指标中, 无论定量或定性指标, 为便于评价, 本文都给予了统一的赋值, 即根据岩溶塌陷易发性级别的不同而分别赋予相应的分值。如果对定量指标直接采用实际值进行以后的计算, 一方面将给隶书度函数的建立带来很大的困难, 另一方面在对贴近度的计算过程中又必须作正规化处理, 从而造成很大的计算误差。笔者在研究的初期曾试图直接利用实际值进行计算, 结果不是十分理想。所以在模糊理

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

论的应用过程中, 有时过分追求精确反而带来更大的误差。

我们给予这些指标的离散赋值是在 1~ 5之间变化, 且成等差数列, 其值越大越容易发生岩溶塌陷。结合这些指标在实际岩溶塌陷易发性评价中的特点及离散值的特殊性, 本文采取相邻隶属度减半的方法来计算隶属度:

$$U_{Si}(x) = (\frac{1}{2})^{|x_i - x|} \qquad (i = 1, 2, \cdots 5), \tag{1}$$

其中 x_i 表示岩溶塌陷易发性分级中对应的离散赋值, x 表示评价单元某一指标的实际值。例如, 某地段地下水径流强度为"强", 实际评价得分为 4分, 则根据隶属函数 (1), 可得关于该地段隶属于岩溶塌陷易发性分级的一个模糊集:

$$F \triangleq \frac{0.125}{s_1} + \frac{0.25}{s_2} + \frac{0.75}{s_3} + \frac{1.0}{s_4} + \frac{0.75}{s_5}.$$

2.3 评价指标权重的确定

选取的 9个评价指标对岩溶塌陷易发性所其作用各不相同, 其重要程度也有所差别, 所以需要对它们赋予不同的权重。

在权重的确定过程中, 分别采用了多种方法进行试算。经比较, 最终采用了层次分析法的计算结果。层次分析法是一种定量与定性相结合的决策方法。在解决问题时, 该方法首先对问题所涉及的各因素进行综合分析, 然后根据专家意见对各因素相互间的重要程度给出一个客观的定量判断, 进而建立数学模型求解各因素的权重。经过多次试算后, 最终各评价指标权重确定如表 4。

表 4　评价指标权重计算结果

Table 4　Calculated weights of evaluating indices

评价指标	权重
岩性	0.1023
浅部岩溶发育强度 (见洞率)	0.1608
地下水埋深 /m	0.1089
地下水径流强度	0.0458
厚度 /m	0.0458
地貌单元	0.0366
与抽排水中心距离 (*R*: 影响半径)	0.1900
人工抽排水强度	0.2800
人工活动 (如振动)	0.0299

2.4 模糊贴近度的计算

将各指标中 5个等级标准中对应的分值代入隶属度函数 (1), 可得 5个标准模糊子集, 记为

$$A = (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5).$$

每个模糊子集由 9个指标来描述:

$$A_n = (A_{1n}, A_{2n}, \cdots A_{9n}) \quad (n = 1, 2, \cdots, 5),$$

其中 A_{mn} $(n = 1, 2, \cdots, 5;\ m = 1, 2, \cdots, 9)$为一个包含 5个隶属度的模糊集。

若已知某地段实际情况, 由各指标及相应的隶属度函数可计算相应的隶属度。各单项指标隶属度组成的模糊集记为

$$B = (B_1, B_2, \cdots, B_9),$$

其中 B_m $(m = 1, 2, \cdots, 9)$为一个包含 5个隶属度的模糊集, 每一个隶属度对应于该项指标属于某一个岩溶塌陷易发性级别的程度。

有了 A 和 B 两个模糊集后, 就可以计算贴近度。经过大量实际数据的试算, 本文最终采取相对欧氏距离来计算贴近度, 于是

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$N(A_{mn}, B_m) = 1 - \delta(A_{mn}, B_m) \quad (n = 1, 2, \cdots, 5; m = 1, 2, \cdots, 9), \tag{2}$$

$$\delta(A_{mn}, B_m) = \frac{1}{\sqrt{5}} \sqrt{\sum_{n=1}^{5} (\mu_{Am}(u_n) - \mu_{Bm}(u_n))^2}, \tag{3}$$

其中 $\mu_{Am}(u_n)$和 $\mu_{Bm}(u_n)$分别表示标准模型和实测值中第 m 个指标相对第 n级岩溶塌陷易发性的隶属度。

2.5 岩溶塌陷易发性程度的确定

由以上方法可计算出 45个贴近度, 构成一个 9×5维的贴近度矩阵。根据模糊理论, 先对这个贴近度矩阵各列进行取小计算。在岩溶塌陷易发性的各评估指标中, 由于各指标的重要性不同, 所以必须对其各自权重加以考虑。由表 - 4, 令 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_9)$, 于是有

$$S_n = \wedge \{\omega_m * N(A_{mn}, B_m) \mid 1 \leqslant m \leqslant 9\}, \quad n = 1, 2, \cdots, 5$$

$S_n(i = 1, 2, \cdots, 5)$即表示评估地段各评估指标最贴近第 n级 (其中稳定区为第 1级, 很易塌区为第 5级)的程度。

最后, 对 S_n 进行取大计算便可确定评估地段的岩溶塌陷易发性程度, 有

$$S(A_k, B) = \vee \{S_n \mid 1 \leqslant n \leqslant 5\}, \quad k = 1, 2, \cdots 5$$

于是判定评估地段岩溶塌陷易发程度属于第 k级。

3 应用实例

位于江西瑞昌市的武山铜矿区是一个岩溶极其发育的地区。现利用模糊贴近度法对该区域内大屋周地段作岩溶塌陷易发性评估。

大屋周地段地层岩性为灰白色中厚层夹薄层灰岩, 常夹泥质条带, 岩溶极其发育, 见洞率在 33.75% 左右。灰岩层以上为第四系粘土所覆盖, 厚度在 5~ 10m左右。该地段地势相对平坦, 有多处农田。目前矿坑排水强度较弱, 随着矿坑的不断排水, 其影响半径已在 2km以上, 该地段距离矿坑约 1km, 地下水位已下降到基岩以下。根据大屋周地段的这些特征, 结合表 - 1, 可得各评估指标的数值向量 $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9\} = \{5, 4, 5, 3, 4, 5, 4, 2, 1\}$。

由上文建立的模糊贴近度评价模型, 评估结果为: $S = \{0.1845, 0.2801, 0.1798, 0.1900, 0.1252\}$。结果非常清晰, 由择近原则可知该地段属于岩溶塌陷易发性的第 2级别, 为基本不塌。事实证明, 该地段近几年没有任何可能发生塌陷的迹象。

为了进一步检验方法的可行性, 下面对该地段 1994年的情况进行评价, 并加以对比。结合当时实际状态, 我们对各项指标分别赋值为: {5, 4, 1, 5, 5, 5, 5, 3, 1}。利用以上模糊贴近度评价模型, 评估结果为: S= {0.1089, 0.1098, 0.1372, 0.1845, 0.2801}。由择近原则, 该地段在当时处于岩溶塌陷易塌区。实际情况表明, 在 1994年该地段发生了大规模的岩溶塌陷, 使得多处农田遭受破坏。可见, 该模型对上屋周地段的评价是符合实际的。

根据本文建立的评价模型, 笔者对武山铜矿区内灰岩覆盖分布区域进行了模糊贴近度计算, 得到的结果与实际基本符合, 评价效果良好。

由实例可看出, 模糊贴近度法在岩溶塌陷易发性的评估是十分有效的。通过对模糊贴近度模型的建立, 也说明在对岩溶地区进行岩溶塌陷评价时不能忽略动态的指标 (如影响半径与抽排水强度), 否则没有实用价值。比如上例, 如果不考虑动态指标, 1994年和现在的评价结果应该是一样, 这与实际显然不符。利用该模型进行评价时, 其评价结果可靠性很大程度上取决于我们对实际资料的掌握情况。

4 结论

根据本文对岩溶塌陷易发性模糊贴近度评价模型的建立以及在实际中的应用, 可得出以下几点结论:

(1)模糊贴近度模型对岩溶地区岩溶塌陷易发性的评价十分有效, 且方法简单便于掌握, 为大规模岩溶塌陷的评价提供了新的方法。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2)在本模型中, 将影响岩溶塌陷的动态指标直接参与模型的建立, 使得模型计算结果更加符合实际情况。

(3)模型的建立过程表明, 隶书度函数的建立与贴近度计算方法的选择是模型可靠与否的关键, 这取决于模糊集理论及其岩溶塌陷形成机理研究的进一步深入。

致谢: 在本文的撰写过程中, 江西铜业公司武山铜矿相关部门提供了宝贵的资料和意见, 在此表示感谢。

参考文献:

[1] Roberto Salvati and Ira D. Sasowsky. Development of collapse *sin*kholes in areas of groundwater discharge. Journal of H• ro*log*y, Volume 264, Issues 1–4, 30 July 2002, Pages 1–11.

[2] Deborah J. Goodings and Waleed A. Abdulla, Stability charts for predicting *sin*kholes in weakly cemented sand over karst limestone, Engineering Geo*log*y, Volume 65, Issues 2–3, August 2002, Pages 179–184.

[3] 程 星, 黄润秋. 岩溶塌陷的地质概化模型[J]. 水文地质与工程地质, 2002, 29(6): 30–34.

[4] 冯佐少, 梁金城等. 桂林市岩溶塌陷成因类型与时空分布特征, 自然灾害学报, 2002, 10(3): 92–97.

[5] 包惠明, 胡长顺. 岩溶塌陷两级模糊综合评判[J]. 水文地质工程地质, 2001, 28(3): 49–52.

[6] S. K. Samanta, Fuzzy nearness structure. Fuzzy Sets and Systems, Volume 44, Issue 2, 25 November 1991, Pages 295–302.

[7] Mark Burgin and Martin Kalina, Fuzzy conditional convergence and nearness relations, Fuzzy Sets and Systems, Volume 149, Issue 3, 1 February 2005, Pages 383–398.

[8] Vladimir Janis, Resemblance is a nearness, Fuzzy Sets and Systems, Volume 133, Issue 2, 16 January 2003, Pages 171–173.

[9] 张文鸽, 管新建, 徐清山等. 水环境质量评价的模糊贴近度方法[J]. 水资源保护, 2006, 22(2): 19–22.

[10] 祝云舫, 王忠彬等. 城市环境风险程度排序的模糊分析方法, 自然灾害学报, 2006, 15(1): 155–158.

[11] 孙伯涛, 胡少卿. 基于已有震害矩阵模拟得群体震害预测方法研究, 地震工程与工程振动, 2005, 25(6): 102–108.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net