

改进 AHP 和 TOPSIS 法在滑坡灾害易发性评价中的应用*

——以贵州毕节地区为例

邵维懿, 赵翠薇

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要:滑坡易发性评价是一个涉及多种因素、多个目标的复杂问题,一些关键性指标数据不易采集,量化方面也存在尺度不一、标准不同的现象。本次研究采用改进的 AHP 法,建立滑坡灾害易发性评价矩阵;通过改进的 TOPSIS 法,引入卡方检验思想,研究了贵州毕节地区的滑坡灾害易发性,比较 8 个评价单元与最优方案(最易发等级)的贴近度,编制了该地滑坡灾害易发性等级图。研究结果显示,滑坡灾害极易发区包括毕节市($C_{毕节}=0.1108$)、纳雍县($C_{纳雍}=0.1242$);高易发区包括赫章县($C_{赫章}=0.0972$)、黔西县($C_{黔西}=0.0776$);中易发区包括织金县($C_{织金}=0.0419$)、大方县($C_{大方}=0.0344$)和金沙县($C_{金沙}=0.0557$);低易发区为威宁县($C_{威宁}=0.0271$)。研究结果与历史灾害统计数据较为吻合;将 AHP 和 TOPSIS 法组合应用于滑坡灾害易发性评价属于新的尝试,与传统算法相比,该组合法计算更加简便,评价结果较为准确。

关键词:AHP;TOPSIS;易发性;毕节地区;滑坡灾害

中图分类号:X43

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2013)03-0040-07

有研究表明,在一定的水、土条件作用下滑坡可以直接转化为泥石流,对受灾区域造成二次破坏^[1]。因此,进行区域滑坡易发性评价对灾害监测和防治具有重要参考价值。区域滑坡灾害易发性评价方法大体可以归纳为建立在分析滑坡灾害的机制基础之上的“白箱”型评价方法和建立在灾害监测数据进行挖掘基础之上的“黑箱”型评价方法。由于空间异质性的存在,模型本身与实际调查数据之间存在“不兼容性”,使得单独用一种模型进行区域地质灾害的评价往往难以获得理想结果。在一次评价过程中如采用多种评价方法相组合的形式,则不仅可以在继承各自优点的同时克服各方法自身的缺点,还可以大大提高资料的利用效率,以揭示更多更精细的地质灾害危险性信息^[2]。

目前国内外基于不同方法组合的评价模型在区域滑坡灾害易发性评价中的应用越来越广泛。例如 Sezer 等人使用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)将模糊推理法与神经网络模型相结合,选取了 5 大主控因素,对马来西亚巴生流域的滑坡灾害敏感性进行分析制图,结果显示准确率达 98%^[3];Aksoy 等人利用模糊数字动力学分析法(FUDIKA)将模糊逻辑模型和数字化动力学分析法进行组合,对土耳其首都安卡拉地区的非确定性边坡失稳的影响因素进行分析,结果证明 FUDIKA 法有较高的应用价值^[4];Goetz 等人在

加拿大哥伦比亚省 Klanawa 河流域的滑坡敏感性的研究分析中,使用了广义相加模型(GAM)和逻辑回归模型(GLM)并结合滑坡物理性质,利用安全系数法(FS)和浅稳定性模型(SHALSTAB)对地形属性及土地利用数据进阶分析,得出土地利用程度、坡度、平面(剖面)曲率、斜坡安全系数等变量因子对研究区滑坡稳定性起主导作用^[5];Vahidnia 等人在伊朗马赞德兰省的滑坡敏感性制图研究中,使用模糊推理系统(FIS)模拟专家经验,通过人工神经网络(ANN)分析滑坡历史数据等非线性问题,制图结果覆盖了总滑坡灾害点的 90.5%^[6];Gorsevski 等人利用模糊集理论将各种影响因子标准化,通过卡尔曼滤波模型将这些因子进行模糊聚类,相比传统的多指标评价理论(MCE)在滑坡敏感性预测方面更加准确,更能适应空间决策支持系统^[7]。近些年来,国内也出现了相关的研究和应用,如李秀珍等人利用最优加权组合理论建立了洒勒山滑坡的最优加权组合预测模型,将几种单一模型的预测结果选取恰当的权重进行加权平均,通过对比分析得出,组合模型的预测精度高于任何单一模型的预测精度^[8];薛新华等人基于遗传算法和模糊神经网络建立了评价模型,解决了非确定性的边坡稳定性问题^[9]。与国外研究相比,国内在评价模型及方法的选取上仍显单一,基本都是照搬国外的方法。在

* 收稿日期:2012-09-19 修回日期:2013-03-01 网络出版时间:2013-05-20 18:04

资助项目:贵州省软科学研究项目(No. 201201);贵州师范大学学生科研基金重点项目(自然科学类)(No. GZNU20120212)

作者简介:邵维懿,男,回族,硕士研究生,研究方向为地质灾害评价,E-mail: v1shao2011@gmail.com;通讯作者:赵翠薇,E-mail: zhaocuiwei@sohu.com

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20130520.1804.201303.40_007.html

模型的组合应用方面主要集中于以人工智能为主的“黑箱”型评价法;而这种方法往往需要海量的历史灾害数据以及研究人员充足的理论经验。中国的滑坡灾害集中发生在西部地区,这里经济社会发展相对落后,防灾减灾建设水平较低,部分地区还未建立灾害监测系统,显然“黑箱”型评价法在这些地区的应用会有较大困难。

因此,本研究采用了基于“三标度”的 AHP 法,考虑研究区的特殊地理环境,建立滑坡易发性矩阵,引入专家知识和经验进行定量分析,确定因素的权重值;再通过改进后的 TOPSIS 法进行不同研究单元等级的划分;从而将两种方法的结合应用于滑坡灾害易发性评价中,以期能取得良好效果。

1 改进的 AHP 法

1.1 传统 AHP 法的基本原理

AHP 法即层次分析法(Analytic hierarchy process),是一种由定性到定量的多目标决策评价方法^[10]。传统的 AHP 法采用九标度法来构造判断矩阵进行两两的比较分析,构造的过程一般是引入专家主观的经验,易造成片面性;而且九标度法在因素的差异性方面也体现不够明显;同时,由于判定方法的固有缺陷使得传统 AHP 法需要进行一致性检验,凭借个人经验来调整矩阵,即加大了运算量,又降低了整个评价过程的准确性。

1.2 改进的 AHP 法权重模型的建立

1.1.1 建立递阶层次结构模型 将滑坡灾害的影响因素分解为相互制约,相互隶属层次,自上而下形成支配关系,同一层之间相互联系并对上一层产生影响。递阶层次结构如图 1 所示。

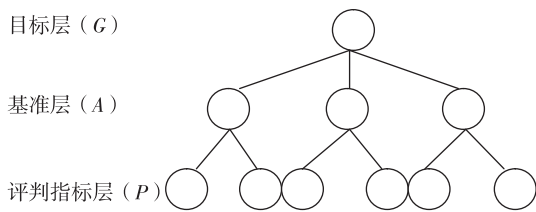


图 1 递阶层次结构示意图

Fig. 1 The picture of hierarchical structural

1.1.2 建立两两比较的判断矩阵 本研究采用三标度法(-1,0,1),对传统的层次分析进行改进,引入最优传递矩阵,最后求解拟优传递矩阵的最大特征值对应的特征向量,即可得到各影响因素的权重值,使判断矩阵自然满足一致性,无需对它进行检验和调整。引入三标度法的优点有:1)对于两两因素间的比较有一个较为鲜明的区分度,利于专家做出判断,最大限度的避免人为失误的产生;2)减少了迭代次数,简化了运算,提高了计算的精度;3)三标度法引入的最优传递矩阵自然满足一致性的要求,避免了传统层次分析法对矩

阵的二次调整。

1.3 三标度法的基本步骤

1)基于三标度法给出每一层各因素的重要程度的比较矩阵,有

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{表示 } i \text{ 比 } j \text{ 重要} \\ 0 & \text{表示 } i \text{ 和 } j \text{ 同等重要} \\ -1 & \text{表示 } i \text{ 不如 } j \text{ 重要} \end{cases}$$

2)计算矩阵 A 的最优传递矩阵 R,有

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} & \cdots & r_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nj} & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中 $r_{ik} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_{ik} - a_{jk})$

3)转换矩阵 R 为一致矩阵 D,有

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1j} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2j} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \cdots & d_{ij} & \cdots & d_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nj} & \cdots & d_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中 $d_{ik} = \exp(r_{ik})$ 。

4)层次单排序。层次单排序是指根据一致矩阵 D 计算该层要素关于相邻上一次要素的相对权重值。即为计算矩阵 D 的最大特征值所对应的特征向量,满足

$$DW = \lambda_{\max} W \quad (4)$$

其中,特征向量值 $W = [W_1, W_2, \dots, W_n]^T$ 作为该层要素的优先权重向量。一般用于计算特征向量的方法有方根法、幂法、和积法等。本文采用较为成熟的方根法计算特征向量值,即为:

$$W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T \quad (5)$$

其中

$$W_i = \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n d_{ik}} / \sum_{k=1}^n \sqrt[n]{\prod_{k=1}^n d_{ik}}$$

5)层次总排序。计算同一层所有元素对于最高层的相对重要性的排序权值,称为层次总排序。基准层(A)各要素 A_1, A_2, \dots, A_m 对于目标层(G)的单排序已经完成,其数值分别为 W_1, W_2, \dots, W_m ,且评判指标层(P)各要素 P_1, P_2, \dots, P_m 对 A_j 的层次单排序结果为

$W_1^i, W_2^i, \dots, W_m^i$, 则层次总排序为

$$V = W^j W = \begin{bmatrix} W_1^1 & W_1^2 & \dots & W_1^j & \dots & W_1^m \\ W_2^1 & W_2^2 & \dots & W_2^j & \dots & W_2^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_n^1 & W_n^2 & \dots & W_n^j & \dots & W_n^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

以此作为评价权重系数。

2 改进的 TOPSIS 评价模型

TOPSIS 即逼近理想解排序法(Technique for order preference by similarity to an ideal solution), 是一种求解多目标决策问题的方法。传统的 TOPSIS 法通常建立一个最优的理想解和一个最差的负理想解, 计算一个研究方案与理想解之间的距离, 由此得到该方案与最好方案的接近程度, 以此作为评价标准。现在普遍采用“欧式距离”计算研究方案与理想解之间接近程度^[11]。但是通过“欧氏距离”计算得到的评价方案在与理想解近的同时, 也可能会与负理想解距离也近^[12]。相关学者也对传统的 TOPSIS 进行了改进研究, 本研究引入卡方检验思想, 假设方案集与理想解处于同一集合中, 并求解其期望值, 比较期望值与方案的偏差程度来确定两个方案集的一致性^[13]。

改进的 TOPSIS 法的基本步骤如下。

1) 加权评价矩阵的建立。设多指标评价问题的评价单元集为 $M = (M_1, M_2, \dots, M_m)$, 评价指标集为 $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$, 评价单元集 M_i 对应的评价指标集 P_j 的值为 x_{ij} , 由于不同评价指标存在不同的纲量, 为了方便评价, 需要对比较矩阵做标准化处理, 带入权重向量 V , 得到加权评价矩阵 X 为

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ij} & \dots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中增益型指标为

$$X(i, j) = \frac{X(i, j) - X_{\min}(j)}{X_{\max}(j) - X_{\min}(j)} \quad (8)$$

减益型指标为

$$X(i, j) = \frac{X_{\max}(i, j) - X(i, j)}{X_{\max}(j) - X_{\min}(j)} \quad (9)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

2) 确定评价区理想解与负理想解的距离。本研究采用“卡方距离”公式, 假设评价区的评价结果与理想解的距离为 D_i^+ , 与负理想解的距离为 D_i^- , 使用“卡方距离”代替“欧式距离”, 具体公式如下

$$D_i^+ = \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{[r(i, j) - e^+(i, j)]^2}{e^+(i, j)} + \right.$$

$$\left. \frac{[r(\max, j) - e(\max, j)]^2}{e(\max, j)} \right\} \quad (10)$$

$$D_i^- = \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{[r(i, j) - e^-(i, j)]^2}{e^-(i, j)} + \frac{[r(\min, j) - e(\min, j)]^2}{e(\min, j)} \right\} \quad (11)$$

$$e^+(i, j) = \frac{r(i, j) * \sum_{i=1}^n r(i, j)}{\sum_{j=1}^m r(i, j) + \sum_{j=1}^m r(\max, j)}$$

$$e^-(i, j) = \frac{r(i, j) * \sum_{i=1}^n r(i, j)}{\sum_{j=1}^m r(i, j) + \sum_{j=1}^m r(\min, j)}$$

$$e(\max, j) = \frac{r(\max, j) * \sum_{i=1}^n r(i, j)}{\sum_{j=1}^m r(i, j) + \sum_{j=1}^m r(\max, j)}$$

$$e(\min, j) = \frac{r(\min, j) * \sum_{i=1}^n r(i, j)}{\sum_{j=1}^m r(i, j) + \sum_{j=1}^m r(\min, j)}$$

3) 确定各评价单元的相对贴近度指数 C_i 为

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (12)$$

得到评价单元的易发性评价排名。

4) 计算评价单元 $M(i)$ 的评价等级。假设 d 表示评价单元与评价等级间的趋近度, 则有

$$d = \left| \frac{C(k) - C(k-1)}{C(k) - C(k+1)} \right| \quad (13)$$

其中, k 表示评价单元贴近度指数(C_i)的排名; 当 $d > 1$ 时, 评价单元的等级为 k ; 当 $d < 1$ 时, 评价单元的等价为 $k-1$;

3 应用实例

3.1 指标体系与模型层次关系的建立

毕节地区位于贵州省西北部, 地理坐标为东经 $105^{\circ}36'$ ~ 东经 $106^{\circ}43'$, 北纬 $26^{\circ}21'$ ~ 北纬 $27^{\circ}46'$; 土地面积为 $26\ 900\ \text{km}^2$ 。当地地貌以喀斯特岩溶地貌为主, 地形切割较深。年降水量 $848 \sim 1\ 394\ \text{mm}$, 降水集中, 多暴雨。毕节地区是贵州省受滑坡灾害影响较为严重的地区。据近 50 年的不完全统计, 毕节地区出现成规模的滑坡点 734 个, 大型和超大型滑坡有 60 个。滑坡灾害对当地村民的生命财产安全造成严重影响^[14]。

影响滑坡发生的因素众多, 文献常用的因素有 50 多种^[15]。本研究根据毕节地区自然地理条件和滑坡灾害分布及形成规律, 选取了地质条件、地形地貌作为主控因素, 人类工程活动、气候植被条件作为诱发因素, 建立了毕节地区滑坡灾害易发性评价递阶矩阵模型(图 2)。

3.2 基于“三标度”法各层比较矩阵的建立

本研究构建了基准层、评价指标层对于上层每一因素的比较矩阵, 同时向 30 位相关专家独立进行了主要因素的重要程度比较并建立比较矩阵。

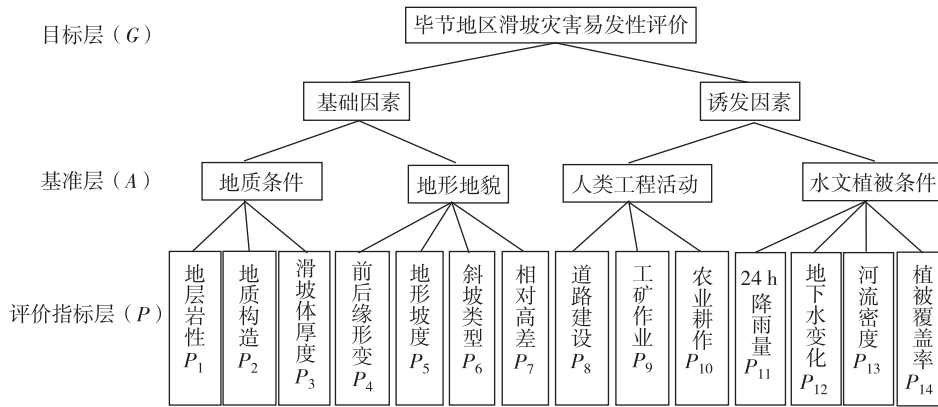


图 2 毕节地区滑坡灾害易发性评价递阶矩阵模型

Fig. 2 The hierarchical matrix model landslide hazard susceptibility assessment of Bijie area

1) 建立目标层 G 与基准层 A 的比较矩阵(表 1)。

表 1 G-A 比较矩阵

Tab. 1 Compare matrix of G-A tier

G-A	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	0	-1	1	-1
A ₂	1	0	1	1
A ₃	-1	-1	0	-1
A ₄	1	-1	1	0

2) 建立基准层 A 与指标评价层 P 的比较矩阵(表 2~表 5)。

3) 单层次排序。以 G-A 比较矩阵为例,它的最优传递矩阵有

$$R = \begin{bmatrix} 0 & -1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & 0 & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{3}{2} & 0 & -1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

将矩阵 R 转换为一致比较矩阵 D, 有

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0.368 & 1.649 & 0.607 \\ 2.718 & 1 & 4.482 & 1.649 \\ 0.607 & 0.223 & 1 & 0.368 \\ 1.649 & 0.607 & 2.718 & 1 \end{bmatrix}$$

采用方根法可求得特征向量为 $W = (0.167, 0.455, 0.102, 0.276)^T$ 。采用同样的算法,可求出比较矩阵 $A_1-P, A_2-P, A_3-P, A_4-P$ 的特征向量分别为

$$W^1 = (0.563, 0.148, 0.289)^T$$

$$W^2 = (0.455, 0.276, 0.167, 0.102)^T$$

$$W^3 = (0.289, 0.563, 0.148)^T$$

$$W^4 = (0.455, 0.102, 0.276, 0.167)^T$$

4) 层次总排序。由 $V = (0.094, 0.024, 0.048, 0.207, 0.125, 0.076, 0.046, 0.029, 0.057, 0.015, 0.125, 0.028, 0.076, 0.046, 0.1)^T$ 得到研究区滑坡灾害的影响因素的综合权重,以此作为 TOPSIS 评价的权重系数。

0.015, 0.125, 0.028, 0.076, 0.046, 0.1)^T 得到研究区滑坡灾害的影响因素的综合权重,以此作为 TOPSIS 评价的权重系数。

3.3 运用改进的 TOPSIS 法进行评价

3.3.1 滑坡灾害易发性等级划分 滑坡灾害的易发性评价是一个多指标评价的问题。本次研究向相关领域的专家学者发放调查问卷 60 份,收回问卷 55 份,回收率为 96.67%。最终有效统计问卷为 52 份,占回收卷的 94.55%。在结合专家经验的基础上参考《中国地质调查局地质调查技术标准》、《贵州省地质灾害调查技术要求》、《贵州省地质灾害防治工程设计技术要求》等文献资料,结合研究区的自然社会环境,将滑坡灾害的易发性划分为 4 个等级:极易发性、高易发性、中易发性和低易发性。具体的影响因素对应的等级见表 6,其中前后缘变形、斜坡类型、地下水变化为定性指标([0,1]),根据专家打分确定。

表 2 A₁-P 比较矩阵

Tab. 2 Compare matrix A₁-P tier

A ₁ -P	P ₁	P ₂	P ₃
P ₁	0	1	1
P ₂	-1	0	-1
P ₃	-1	1	0

表 3 A₂-P 比较矩阵

Tab. 3 Compare matrix A₂-P tier

A ₂ -P	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
P ₄	0	1	1	1
P ₅	-1	0	1	1
P ₆	-1	-1	0	1
P ₇	-1	-1	-1	0

表 4 A₃-P 比较矩阵

Tab. 4 Compare matrix A₃-P tier

A ₃ -P	P ₈	P ₉	P ₁₀
P ₈	0	-1	1
P ₉	1	0	1
P ₁₀	-1	-1	0

表 5 A₄-P 比较矩阵

Tab. 5 Compare matrix A₄-P tier

A ₄ -P	P ₁₁	P ₁₂	P ₁₃	P ₁₄
P ₁₁	0	1	1	1
P ₁₂	-1	0	-1	-1
P ₁₃	-1	1	0	1
P ₁₄	-1	1	-1	0

3.3.2 毕节地区滑坡灾害易发性评价 毕节市辖“一市七县”,分别为毕节市、织金县、金沙县、大方县、黔西县、纳雍县、赫章县和威宁彝族回族苗族自治县。本研究以金沙县为例,进行数据分析。参考《毕节地区水利志(2009)》、《金沙县统计年鉴(2009)》、《金沙县统计公报(2009)》、《金沙县山洪灾害普查表(2009)》以及金沙县国土资源局、金沙县气象局等提供的相关数据,结合专家打分意见,得到金沙县滑坡灾害各个评价指标的

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0.875 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.877 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.75 & 0.625 & 0.5 & 0.625 & 0.6 & 0.714 & 0.667 & 0.667 & 0.526 & 0.75 & 0.425 & 0.714 & 0.6 & 0.6 \\ 0.5 & 0.375 & 0.2 & 0.375 & 0.4 & 0.429 & 0.333 & 0.333 & 0.175 & 0.5 & 0.2 & 0.429 & 0.2 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.388 & 0.35 & 1 & 0.644 & 0.857 & 0.885 & 0.433 & 1 & 0.711 & 0.635 & 0.857 & 0.52 & 0.29 \end{bmatrix}$$

然后进行矩阵归一化及加权矩阵的建立。将 AHP 法计算得到指标权重向量 V 带入归一化矩阵 X

$$Z = \begin{bmatrix} 0.094 & 0.0247 & 0.0483 & 0.1811 & 0.1256 & 0.076 & 0.0464 & 0.0295 & 0.0503 & 0.0151 & 0.1256 & 0.0282 & 0.0762 & 0.0461 \\ 0.0705 & 0.0154 & 0.0242 & 0.1294 & 0.0754 & 0.0543 & 0.0309 & 0.0197 & 0.0302 & 0.0113 & 0.0534 & 0.0201 & 0.0457 & 0.0277 \\ 0.047 & 0.0093 & 0.0097 & 0.0776 & 0.0502 & 0.0326 & 0.0155 & 0.0098 & 0.01 & 0.0076 & 0.0251 & 0.0121 & 0.0152 & 0.0138 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.67 & 0.388 & 0.35 & 1 & 0.644 & 0.857 & 0.885 & 0.433 & 1 & 0.711 & 0.635 & 0.857 & 0.52 & 0.29 \end{bmatrix}$$

根据式得到评价单元 M_i 与最优方案的(最易发等级)的趋近程度 $C(i)$: $C(1)=0.1262, C(2)=0.0917, C(3)=0.0557, C(4)=0, C(5)=0.0656$. 因此按贴进度由大到小排列得到: $C(1) > C(2) > C(5) > C(3) > C(4)$. 由本文 2.1 部分可知 $k=3$, 根据(13)式, 得 $d=2.6363 > 1$, 所以可知金沙县的滑坡评价等级为“中度易发性”。

通过以上算法计算得到毕节地区其他县市的滑坡易发性贴进度指标分别为: $C_{纳雍}=0.1242, C_{毕节}=0.1108, C_{赫章}=0.0972, C_{黔西}=0.0776, C_{织金}=$

数值(表 7)。由于部分评价指标属于定性指标, 需由专家打分确定, 故本研究选取的数值基本为该指标在研究区域的总体平均值。

首先为比较矩阵指标归一化及加权矩阵的建立。选取每个评价等级区间内评价指标数值较小的建立样本并进行归一化处理, 其中地层岩性和植被覆盖为减益型指标, 需要利用(9)式进行归一化处理, 其他指标采用(8)式进行归一化, 则有

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & 0.877 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0.877 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.667 & 0.526 & 0.75 & 0.425 & 0.714 & 0.6 & 0.6 & 0.667 & 0.526 & 0.75 & 0.425 & 0.714 & 0.6 & 0.6 \\ 0.333 & 0.175 & 0.5 & 0.2 & 0.429 & 0.2 & 0.3 & 0.333 & 0.175 & 0.5 & 0.2 & 0.429 & 0.2 & 0.3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.433 & 1 & 0.711 & 0.635 & 0.857 & 0.52 & 0.29 & 0.433 & 1 & 0.711 & 0.635 & 0.857 & 0.52 & 0.29 \end{bmatrix}$$

中, 得到加权矩阵 Z 。

$0.0419, C_{大方}=0.0344, C_{威宁}=0.0271$. 最终得到毕节地区滑坡易发性等级区划图(封三彩图 3)。

1) 极度易发区。本区包括毕节市、纳雍县, 位于毕节地区中部, 滇东高原向黔中山区丘陵过渡的倾斜地带, 平均相对高差大于 700 m。地质构造活跃, 地层岩性多以砂页岩、泥灰岩及粘土岩为主。这些岩性多属软岩类, 岩性结构松散, 抗剪强度和抗风化侵蚀能力较低, 易发生滑坡。两地降雨量大且集中, 多年平均降水量均大于 1 300 mm, 其中 70% 都集中于 6~9 月。本区矿产资源丰富, 煤矿开采区超过 300 处, 加上道路修筑, 水利设施建设必然造成斜坡前缘形变严重, 斜坡失稳, 岩体松动, 边坡稳定性造成破坏, 极易发生滑坡灾害。

2) 高度易发区。本区包括赫章县和黔西县。赫章县处于滇东高原向黔中山地丘陵过渡的乌蒙山区倾斜地带, 地形切割较深, 纵坡降大, 河流深切。赫章县超过 50% 面积为 $15^\circ \sim 35^\circ$ 的坡度, 这些因素为滑坡发生的提供了极佳的地形条件。赫章县铅锌储量居贵州首位, 矿山开掘活动频繁, 地质环境破坏严重。黔西县是毕节的东大门, 地层岩性主要以三叠系的砂质粘土岩, 砾屑灰岩及砂页岩为主, 岩性属于软岩类, 抗压强度和抗剪强度都偏弱。黔西县煤炭资源丰富, 煤矿开采区共有 200 处以上; 加之黔西是贵州中部通往毕节地区

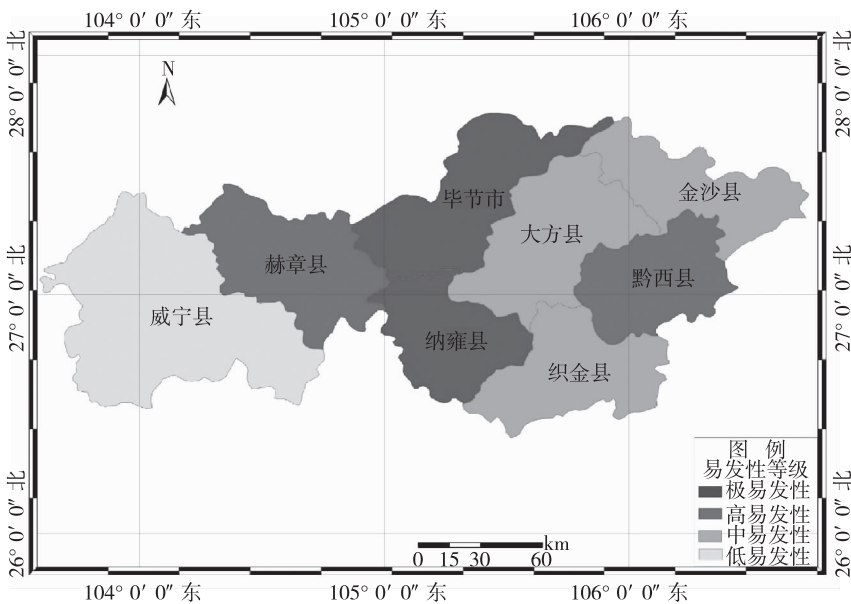


图 3 毕节地区滑坡易发性等级区划图

Fig. 3 The landslide hazard susceptibility assessment level mapping of Bijie areas

表 6 滑坡影响因子等级划分
Tab. 6 Hierarchies of landslide hazard factor

影响因子	评价等级			
	极易发性	高易发性	中易发性	低易发性
地层岩性 P_1 /MPa	<15	15~30	30~60	>60
地质构造 P_2 /(km/km ²)	>0.8	0.5~0.8	0.5~0.3	<0.3
滑坡体厚度 P_3 /m	>50	25~50	10~25	<10
前后缘形 变程度 P_4	大 (>0.7)	较大 (0.5~0.7)	一般 (0.3~0.5)	较小 (<0.3)
地形坡度 P_5 (°)	25~40	40~60	15~25	>60 或 <15
斜坡类型 P_6	凸型 (>0.7)	直线型 (0.5~0.7)	阶梯型 (0.3~0.5)	凹型 (<0.3)
相对高差 P_7 /m	>600	400~600	200~400	<200
道路建设 P_8 /(km/km ²)	>0.6	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2
工矿作业 P_9 /(个/km ²)	>0.05	0.03~0.05	0.01~0.03	<0.01
农业耕作 P_{10} / %	>20	15~20	10~15	<10
24 h 最大降 雨量 P_{11} /mm	>200	85~200	40~85	<40
地下水 变化 P_{12}	隔水层充 分出露 (>0.7)	隔水层局 部出露 (0.5~0.7)	隔水层较 少出露 (0.3~0.5)	隔水层基 本不出露 (<0.3)
河流密度 P_{13} /(km/km ²)	>0.5	0.3~0.5	0.1~0.3	<0.1
植被覆盖率 P_{14} /%	<20	20~35	35~50	>50

注:地层岩性量化采用饱和单轴抗压强度(单位:MPa)表示,农业耕作量化采用区域总面积与耕作面积百分比表示。

表 7 织金县滑坡影响因子的评价指标
Tab. 7 The evaluating indicator of landslide hazard factor in zhijin county

研究区域	评价指标						
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7
金沙县	25	0.31	17.5	0.8	16.2	0.6	531

研究区域	评价指标						
	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
金沙县	0.26	0.057	14.22	127	0.6	0.26	35.5

注: $P_1 \sim P_{14}$ 具体定义见表 6。

的交通要塞,贵毕高速贯穿全区,路网面积约为 0.76 km/km²,超过全省平均水平,可见人类工程活动对本区的影响特别突出。

3)中度易发区。本区包括织金县、金沙县和大方县,大部分位于毕节地区的东部,处于黔西山区丘陵地带,平均相对高差约为 500 m,本区坡度 5°~25°面积

占全区总面积的 60%以上。从地质性质来看,该区岩性多为二叠系和奥陶系的石灰岩、白云岩及玄武岩,岩性坚硬,内摩擦力大,不易产生形变,完整性较好。本区河网密度低于全省平均水平,织金,大方河网密度约为 0.157 km/km²;从植被覆盖状况方面,3 个县的植被覆盖率均大于 35%,植被覆盖状况良好。

4)低度易发区。本区包括威宁县。该区地处云贵高原的中部的乌蒙山区,地势中高周低,中部为起伏较缓的高原面,相对高差在 200 m 以内。地层岩性以碳酸盐岩类为主,占全区的 53.24%。全区坡度多为 5°~15°的缓坡,占全区的 46.12%。境内多年平均降雨量为 876 mm,属于低降雨区,河网密度为 0.164 km/km²,较全省属低密度区。本区滑坡灾害发生率较低,属于低度易发区。

4 结论与讨论

滑坡易发性评价涉及到多种因素、多个目标的复杂问题,往往一些关键性指标数据不易采集,量化方面也存在尺度不一、标准不同的现象。本研究实证表明,所用方法在评价的效果和准确度方面与实际情况达到了较高的一致性。本研究在因素权重的确定和方案优选方面都采用了较新的改进算法,与传统算法相比计算更加简便,评价准确性有所提高。但是在评价中也存在一些问题。首先,在确定滑坡影响因素的权重过程中需要通过专家打分的方式得出,对专家知识提出了较高的要求,仍然存在主观性问题;其次虽然利用“三标度”法替换“九标度”法能提升专家的判断准确率、减少迭代次数、加快收敛速度等,但是“三标度”法较难准确定位两两比较因素之间的具体区别度,辨识影响因素的重要性方面较为粗略和笼统。此外,将 AHP 和 TOPSIS 法组合应用于滑坡灾害易发性评价属于一种新的尝试,该方法的准确度和适用度究竟如何、是否可以在小比例尺度的研究区应用等问题仍需要在今后加以研究和改进。

参考文献:

[1] 冯自立,崔鹏,何思明. 滑坡转化为泥石流机理研究综述[J]. 自然灾害学报,2005,14(3):8-14.
Feng Z L, Cui P, He S M. Mechanism of conversion of landslides to debris flows[J]. Journal of Natural Disasters, 2005,14(3):8-14.

[2] 朱吉祥,张礼中,周小元,等. 不同区域地质灾害评价方法的组合效应分析[J]. 地质科技情报,2012,31(1):100-105.
Zhu J X, Zhang L Z, Zhou X Y, et al. Analysis about different regional geological hazard assessment applications[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(1):100-105.

[3] Sezer E A, Pradhan B, Gokceoglu C. Manifestation of an adaptive neuro-fuzzy model on landslide susceptibility map-

- ping: Klang valley, Malaysia[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(7): 8208-8219.
- [4] Aksoy H, Ercanoglu M. Fuzzified kinematic analysis of discontinuity-controlled rock slope instabilities[J]. *Engineering Geology*, 2007, 89(4): 206-219.
- [5] Goetz J N, Guthrie R H, Brenning A. Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models[J]. *Geomorphology*, 2011, 129(3/4): 376-386.
- [6] Vahidnia M H, Alesheikh A A, Alimohammadi A, et al. A GIS-based neuro-fuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping[J]. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(9): 1101-1114.
- [7] Gorsevski P V, Jankowski P. An optimized solution of multi-criteria evaluation analysis of landslide susceptibility using fuzzy sets and Kalman filter[J]. *Computers & Geosciences*, 2010, 36(8): 1005-1020.
- [8] 李秀珍, 王成华, 孔纪名. 基于最优加权组合模型及高斯-牛顿法的滑坡变形预测研究[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(4): 538-544.
Li X Z, Wang C H, Kong J M. Actual case based prediction models for landslide deformation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(4): 538-544.
- [9] 薛新华, 张我华, 刘红军. 基于遗传算法和模糊神经网络的边坡稳定性评价[J]. *岩土力学*, 2007, 12(28): 2643-2648.
Xue X H, Zhang W H, Liu H J. Evaluation of slope stability based on genetic algorithm and fuzzy neural network[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 12(28): 2643-2648.
- [10] Saaty T L, Wong M M. Projective average family size in rural India by the analytic hierarchy process[J]. *Journal of Mathematical Sociology*, 1983(9): 181-209.
- [11] 罗新星, 彭素华. 绿色供应链中基于 AHP 和 TOPSIS 的供应商评价与选择研究[J]. *软科学*, 2011, 25(2): 53-56.
Luo X X, Peng S H. Research on the vendor evaluation and selection based on AHP and TOPSIS in green supply chain[J]. *Soft Science*, 2011, 25(2): 53-56.
- [12] 张先起, 梁川, 刘慧卿, 等. 改进的 TOPSIS 模型及其在黄河置换水量分配中的应用[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2006, 38(1): 30-33.
Zhang X Q, Liang C, Liu H Q, et al. Improved TOPSIS model and its application to allocation of replaced water from Yellow River[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2006, 38(1): 30-33.
- [13] 李晓峰, 刘宗鑫, 彭清娥. TOPSIS 模型的改进算法及其在河流健康评价中的应用[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2011, 43(2): 15-21.
Li X F, Liu Z X, Peng Q E. Improved algorithm of TOPSIS model and its application in river health assessment[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2011, 43(2): 15-21.
- [14] 吴长敏, 周亚驰. 毕节地区滑坡的原因及防治措施探讨[J]. *陕西水利*, 2009(5): 89-92.
Wu C M, Zhou Y C. Discussing causes and prevention measures of landslide in Bijie city[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2009(5): 89-92.
- [15] Lin Y H. Application of neural networks to landslide susceptibility analysis[D]. Taiwan: National Central University, 2003.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Application of Combination to Landslide Hazard Susceptibility Assessment Based on Improved AHP and TOPSIS Method: A Case of Bijie, Guizhou Province

SHAO Wei-yi, ZHAO Cui-wei

(School of Geography and Environment Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Landslide susceptibility evaluation is a complex issue about multiple factor and multiple . Some of the key indicators or data is not easy to capture, there are also different scales and different standards on quantization. The paper based on the improved AHP method to establish landslide hazard susceptibility assessment matrix. Through the improved TOPSIS method, selecting a chi-square test ideas and comparing the close degree about 8 evaluation with the optimal solution (the most prone level). It has completed landslide hazard of liability and its liability level mapping in Bijie area of Guizhou province. The results showed that the most susceptible areas includes Bijie ($C_{Bj} = 0.1108$) and Nayong county ($C_{NY} = 0.1242$); he high susceptible areas includes Hezhang county ($C_{HZ} = 0.0972$) and Qianxi county ($C_{QX} = 0.0776$); he middle susceptible areas includes Zhijin county ($C_{ZJ} = 0.0419$), Dafang county ($C_{DF} = 0.0344$) and Jinsha county ($C_{JS} = 0.0557$); he low susceptible areas includes Weining county ($C_{WN} = 0.0271$). The results of the study fit with the historical disaster statistics. It's new that application of combination to landslide hazard susceptibility assessment based on improved AHP and TOPSIS method. Compared with the traditional method, this calculation is simpler and more convenient, evaluation result is more accurate.

Key words: AHP; TOPSIS; susceptibility; Bijie area

(责任编辑 方 兴)