

层次分析法在泥石流危险度评价中的应用

——以北京市密云县为例

刘涛¹, 张洪江¹, 吴敬东², 侯旭峰², 郑国强¹, 叶芝菡²

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市水利科学研究所, 北京 100044)

摘要: 泥石流是山区常见的一种自然灾害,其危险度评价对实现区域防灾减灾具有重要意义。在深入分析密云县泥石流灾害的基础上,采用基于系统理论的层次分析法,从影响泥石流危险度的泥石流历史活动情况和潜在形成条件中选取 10 个指标作为背景参数进行量化研究,建立了密云县泥石流危险度评价模型。所建立的模型中,历史活动情况所占权重为 0.414,潜在形成条件所占权重为 0.586。利用该模型对当地泥石流沟道进行危险度评价,其结果与实际情况具有较好的一致性。研究表明,运用层次分析法进行密云县泥石流危险度评价是实用的和有效的,进一步工作应放在评价方法的可靠性研究上,从而为使用者提供更为准确的评价结果。

关键词: 泥石流; 危险度评价; 层次分析法; 判断矩阵

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)05-0006-05

中图分类号: P642.23

Application of Analytic Hierarchy Process in Debris Flow Risk Degree Assessment — A Case Study of Miyun County, Beijing City

LIU Tao¹, ZHANG Hong-jiang¹, WU Jing-dong², HOU Xu-feng², ZHENG Guo-qiang¹, YE Zhi-han²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Water Conservancy Science of Beijing, Beijing 100044, China)

Abstract: Debris flow is a natural disaster in mountainous areas, so estimation of its criticality is substantial in regional disaster prevention and reduction. Based on system theory and the analysis of the basic situation of debris flow disaster in Miyun County, this study uses analytic hierarchy process to quantify 10 factors which affect debris flow risk degree and construct a model for debris flow risk degree assessment. In the model, the percentage of inner factors is 41.4% and the percentage of external factors, 58.6%. The model is applied to assess the risk degree of local debris gullies. Result obtained has a high relativity to the real situation. The study indicates that this kind of assessment is feasible and veracious for the assessment of the debris flow risk degree. The future tasks should be the reliability research on study methods and thus provide the accurate evaluation result for users.

Keywords: debris flow; risk degree assessment; analytic hierarchy process; judgment matrix

泥石流是山区常见的一种自然灾害,对山区生态环境及经济建设有着重大影响。泥石流危险度评价是将产生泥石流的基础条件、引发泥石流的外界因素以及泥石流的综合特征通过数学模型进行分析,定量或半定量地评价区域内泥石流沟道的危险度等级。随着泥石流理论研究不断深入,泥石流危险度评价越来越多地引起了人们的重视^[1]。王礼先^[2]采用荒溪分类法对北京山区泥石流进行分类和危险区制图。孙广仁等^[3]以泥石流形成的地质环境背景为基础,应

用模糊数学综合评判法对泥石流沟进行判别与危险程度评价。刘希林等^[4]运用灰色系统理论中的灰色关联度分析,在各危险因子等级划分的基础上得出了泥石流危险度的定量计算公式。刘涌江等^[5]针对影响泥石流危险度的因素复杂且具有随机和模糊特性,建立了相应的评价泥石流危险度的神经网络模型。铁永波等^[6]运用层次分析法构建了单沟泥石流危险度评价的层次指标系统,建立起单沟泥石流危险度评价模型,较好地解决了泥石流危险度综合评价问题,

但仍存在一些不足:(1) 指标分类没有区分影响泥石流危险度的内在因子和环境因子;(2) 指标选取偏多,致使评价过于繁复;(3) 少数指标物理意义重复,如流域相对高差和形成区山坡平均坡度同属地形因子,均代表环境提供的泥石流势能;(4) 个别指标难以获取,降低了评价方法的可操作性,如松散固体物质储量。

本文采用基于系统理论的层次分析法(analytic hierarchy process,简称 AHP),针对已有文献中的不足,按照影响泥石流危险度的内在因子和环境因子将指标分为历史活动情况和潜在形成条件两类,去掉有重复意义的形成区山坡平均坡度和难以获取的松散固体物质储量,适当精简指标数量且结合区域特点,选取泥石流发生规模、泥石流活动频率、沟床比降等 10 个指标进行量化研究,建立起基于密云县的泥石流危险度评价模型。该评价方法将泥石流危险度定量评价和定性评价相结合,把复杂的泥石流危险度评价系统层次化,通过逐层比较各种关联指标的重要性来为当地泥石流危险度评价提供定量依据,可很好地解决泥石流危险度综合评价问题。

1 密云县泥石流灾害概况

密云县山区泥石流活动频繁,是我国泥石流灾害较严重的地区之一,泥石流面积占全县总面积的 27.9%^[7]。据不完全统计,建国以来,密云县发生 11 次较大的泥石流,灾害最重的是 1976 年 7 月 23 日,冲毁房屋 3 574 间,死亡牲畜 4 000 余头,死亡人口 105 人,冲毁耕地 1 833.3 hm²。1991 年 6 月 10 日四合堂、冯家峪、番字牌、石城 4 乡遭受特大暴雨洪水袭击,灾情严重,死亡 10 人,冲毁冲淤耕地 900 hm²,冲毁房屋 342 间,倒塌 998 间,冲走牲畜 16 768 头(只),损失粮食 1.19 × 10⁵ kg,冲毁果树 13.5 万棵,柴树 52.31 万棵,坝阶 3 141 道,约 6 000 m,冲毁渠道 365 km,机电井 104 眼,扬水站 29 处,小电站 1 座,乡村公路 212 km,桥涵 38 座,高低压线 115 km,通讯线路 214 km,直接经济损失 7 924.6 万元^[8]。泥石流发生后造成水质污染,直接影响到北京市的饮用水质量^[9-10]。

2 层次分析法原理及步骤

层次分析法是 20 世纪 70 年代由美国运筹学家 T L Saaty 首次提出的,经多年发展现已成为一种较为成熟的决策方法。其原理是根据具体问题的实质及决策要求达到的目标,将问题划分为不同的组成指标,按照指标之间的相互影响及隶属关系进行组合,形成一个多层次的递阶结构,在此基础上进行定性和

定量分析。这种方法的特点是在对复杂决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析基础上,利用较少的定量信息把决策者的决策思维过程数学化,从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策手段^[11]。

层次分析法,大体可按以下 4 个步骤。(1) 分析系统中各指标之间关系,建立系统的递阶层次结构;(2) 对同一层次各指标关于上一层次中某一准则的重要性进行两两比较,构造两两比较判断矩阵;(3) 由判断矩阵计算被比较指标对于该准则的相对权重,并进行判断矩阵的一致性检验;(4) 计算各指标对于系统的总排序权重并进行排序。

3 泥石流危险度评价指标体系

泥石流是一种较为复杂的自然灾害,可用于泥石流危险度评价的指标众多,且不同地区相同指标的影响程度不同。根据国内相关文献及密云县泥石流研究成果,对其评价指标进行频度统计分析^[12-14],选择区域性规律明显,并能代表泥石流历史活动情况和潜在形成条件的泥石流发生规模、泥石流活动频率、沟床比降、24 h 最大降雨量、流域面积、植被覆盖率、流域内人口密度、流域切割密度、流域最大相对高差、泥砂补给段长度比等 10 项指标,构成密云县泥石流危险度评价指标体系。

3.1 递阶层次结构建立

对密云县泥石流相关资料进行分析,确定将密云县泥石流危险度评价作为递阶层次结构的目标层(A 层),提取与泥石流发生有关的历史活动情况和潜在形成条件作为递阶层次结构的准则层(B 层),选择泥石流发生规模、泥石流活动频率、沟床比降等 10 项指标作为递阶层次结构的指标层(C 层)。建立密云县泥石流危险度评价递阶层次结构见图 1。

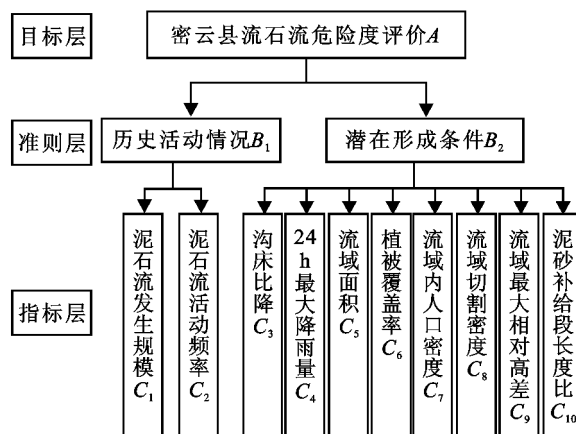


图 1 密云县泥石流危险度评价递阶层次结构

3.2 判断矩阵构造

由于递阶层次结构确定了目标层、准则层与指标层之间的隶属关系,这样就可以对历史活动情况、潜在形成条件两准则关于密云县泥石流危险度评价这一目标及泥石流发生规模、泥石流活动频率、沟床比降等指标关于历史活动情况、潜在形成条件两准则的相对重要性进行两两比较判断。根据 T L Saaty 建议采用的标度方法^[15],构造两两比较判断矩阵。标度即不同指标关于某一准则相对重要性判断的数值表达形式,标度的大小反应了各指标之间的相对重要性,具体含义见表 1。

表 1 判断矩阵标度及其含义

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有同等重要性
3	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素很重要
9	表示两个因素相比,一个因素比另一个因素绝对重要
2,4,6,8	处于上述两相邻标度之中值
1, 1/3, 1/5, 1/7	若因素 I 与 J 相比较的判断值为 a_{ij} , 则因素 J 与 I 相比较的判断值为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

运用表 1 所示的判断矩阵标度,逐项就任意 2 个评价指标进行比较,同时参考该领域中已有文献的研究成果^[16-19]及实地调查结果,确定它们的相对重要性并赋以相应的标度,分别得到目标层与准则层的判断矩阵 A—B,准则层与指标层的判断矩阵 B₁—C 和 B₂—C。

$$A-B = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad B-C = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_2-C = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 & 1 & 5 & 1 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1/7 & 1/2 & 1 & 1/5 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & 7 & 1 & 2 & 3 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 1/2 & 1 & 1 & 1/2 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 1 & 1 & 1/3 & 1 & 1 \\ 1 & 5 & 1 & 2 & 3 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 1/2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

3.3 层次单排序及其一致性检验

根据矩阵理论,求出判断矩阵的最大特征根 λ_{max} 及其相应的特征向量,对特征向量进行归一化处理表示为 W,即为同一层次各指标对于上一层次某一准则相对重要性的排序权值。为保证应用层次分析法分析得到的结论基本合理,必须对构造的判断矩阵进行一致性检验。当判断矩阵阶数为 1 或 2 时,判断矩阵总是一致的,故判断矩阵 A—B 和 B₁—C 具有满意的一致性。当判断矩阵阶数大于 2 时,计算一致性指标 C_I 为

$$C_I = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

引入判断矩阵的平均随机一致性指标 R_I 值,对于 1—8 阶判断矩阵的 R_I 值如表 2 所示。

表 2 平均随机一致性指标 R_I 值

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
R_I	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41

计算判断矩阵的一致性比率 C_R 为

$$C_R = C_I / R_I \quad (2)$$

当 $C_R < 0.1$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则需要调整判断矩阵的取值。

按照以上方法,对判断矩阵 A—B, B₁—C 和 B₂—C 进行层次单排序并对判断矩阵 B₂—C 进行一致性检验,结果如下。

判断矩阵 A—B: $W = (0.414, 0.586)^T, \lambda_{max} = 2.061$
 判断矩阵 B₁—C: $W = (0.500, 0.500)^T, \lambda_{max} = 2.000$
 判断矩阵 B₂—C: $W = (0.179, 0.017, 0.276, 0.077, 0.013, 0.254, 0.108, 0.077)^T, \lambda_{max} = 8.202, C_I = 0.029, R_I = 1.41, C_R = 0.021 < 0.1$ 。

根据矩阵理论,表明潜在形成条件与其指标的层次单排序具有满意的一致性。

3.4 层次总排序及其一致性检验

计算指标层(最低层)所有指标对于目标层(最高层)相对重要性的排序权值,这一过程是从高到低逐层进行的。若准则层包含 m 个准则 B_1, B_2, \dots, B_m , 其层次单排序的权值分别为 b_1, b_2, \dots, b_m ; 指标层包含 n 个指标 C_1, C_2, \dots, C_n , 它们对于准则 B_j 的层次单排序权值分别为 $c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{nj}$, 则指标层总排序权值 P_i 的计算式为

$$P_i = \sum_{j=1}^m b_j c_{ij} \quad (3)$$

层次总排序的一致性检验也是从高到低逐层进行的。如果指标层各指标对于准则 B_j 单排序的一致性指标为 C_{Ij} , 相应的平均随机一致性指标为 R_{Ij} , 则指标层总排序随机一致性比率 C_R 为

$$C_R = \frac{\sum_{j=1}^m b_j C_{ij}}{\sum_{j=1}^m b_j R_{ij}} \quad (4)$$

当 $C_R < 0.1$ 时,认为层次总排序结果具有满意的一致性,否则需要重新调整判断矩阵的取值。

按照以上方法,进行密云县泥石流危险度评价层次总排序及其一致性检验,结果如下:

指标层总排序一致性比率 $C_R = 0.021 < 0.1$,表明密云县泥石流危险度评价层次总排序结果具有满意的一致性,可以接受其总排序权重。

由层次总排序结果可知,在密云县泥石流评价指标体系中,历史活动情况所占的权重为 0.414,潜在形成条件所占的权重为 0.586,其中,各指标相对于密云县泥石流危险度评价总目标所占的权重值见表 3。

4 危险度评价模型及其检验

4.1 评价模型

参照野外调查结果和该领域已有的研究^[20-22],根据当地情况适当调整了评价指标分级标准(表 4),

使其更符合实际情况。将指标实测数据代入表 4 中得到指标赋值,通过层次分析法确定指标权重,将各指标赋值及相应其权重相乘并累加即可求出泥石流危险度。

表 3 密云县泥石流危险度评价指标体系

指 标	历史活动情况	潜在形成条件	指标权重
权 重	0.414	0.586	—
泥石流发生规模	0.5	0	0.207
泥石流活动频率	0.5	0	0.207
沟床比降	0	0.179	0.105
24 h 最大降雨量	0	0.017	0.010
流域面积	0	0.276	0.162
植被覆盖率	0	0.077	0.045
流域内人口密度	0	0.013	0.008
流域切割密度	0	0.254	0.149
流域最大相对高差	0	0.108	0.063
泥砂补给段长度比	0	0.077	0.045

表 4 密云县泥石流危险度评价指标分级标准及赋值

影响因素	指 标	分级标准及赋值			
		小	中	大	特大
历史 活动 情况	泥石流发生规模/ 10^4 m^3	1	1~10	10~50	50
	泥石流活动频率/[次·(100 a)]	3	3~10	10~50	50
	赋 值	0	0.3	0.7	1
潜在 形成 条件	沟床比降/‰	175	175~200	200~225	225
	24 h 最大降雨量/mm	25	25~50	50~100	100
	流域面积/ km^2	0.3	0.3~1	1~10	10
	植被覆盖率/%	80	70~80	60~70	60
	流域内人口密度/(人· km^{-2})	50	50~150	150~250	250
	流域切割密度/($\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$)	5	5~10	10~20	20
	流域最大相对高差/m	200	200~500	500~1 000	1 000
	泥砂补给段长度比	0.1	0.1~0.3	0.3~0.6	0.6
	赋 值	0	0.3	0.7	1

密云县泥石流危险度评价模型如下

$$R_d = \sum_{i=1}^n i_i \quad (5)$$

式中: R_d ——泥石流危险度; i_i ——泥石流危险度评价指标赋值; i ——泥石流危险度评价指标权重。

结合密云县泥石流野外实际调查资料及对密云县多条已知泥石流活动特点的沟谷进行危险度评价,将密云县泥石流危险度分为极度危险($R_d > 0.85$)、高度危险($0.60 < R_d < 0.85$)、中度危险($0.35 < R_d < 0.60$)和轻度危险($R_d < 0.35$)4个基本级别。

4.2 模型检验

选取密云县冯家峪镇西白莲峪、黄梁根北沟和太

师屯镇石门沟为例,对所建立的评价模型进行检验。根据西白莲峪、黄梁根北沟和石门沟泥石流危险度评价相关指标的实测数据,查表 4 确定其指标等级及赋值,通过层次分析法确定密云县泥石流危险度评价指标权重,将指标赋值及指标权重代入式(5)计算泥石流危险度。按照上述方法,计算得石门沟泥石流危险度 R_d 为 0.33,黄梁根北沟泥石流危险度 R_d 为 0.47,西白莲峪泥石流危险度 R_d 为 0.66。根据密云县泥石流危险度判别表,石门沟、黄梁根北沟和西白莲峪泥石流危险度分别处于 $R_d < 0.35$, $0.35 < R_d < 0.60$ 和 $0.60 < R_d < 0.85$ 这 3 个范围内,以上 3 条沟道的

泥石流危险度分别属于轻度危险、中度危险和高度危险。此评价结果与当地实际情况及已有的研究成果^[23-25]相吻合。

5 结论

运用层次分析法对影响密云县泥石流危险度的相关指标进行定量化分析,根据当地实际情况,调整了评价指标分级标准并重新分配了指标权重,重点突出了泥石流发生规模和活动频率在泥石流危险度评价中的主导地位,建立了基于密云县的泥石流危险度评价模型。选取密云县西白莲峪、黄梁根北沟和石门沟 3 条泥石流沟的实测数据代入模型,进行泥石流危险度评价,评价结果与实际情况相吻合。研究表明,基于系统理论的层次分析法所建立的评价模型能较好地应用于密云县泥石流危险度评价中,该评价方法是实用和有效的,进一步工作应放在评价方法的可靠性研究上,从而为使用者提供更为准确的评价结果。

层次分析法虽然是判别泥石流危险度的一种比较好的方法,但在实际评价过程中仍存在一些不足。首先,由于原始资料缺乏等问题的存在,限制了该方法的应用。其次,应用该方法进行密云县泥石流危险度评价的研究刚刚开始,理论和方法还应不断完善,在泥石流危险度评价中起重要作用的评价指标的选取及其权重大小的确定都有待进一步探讨。

[参 考 文 献]

- [1] 刘希林. 我国泥石流危险度评价研究: 回顾与展望[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(4): 1—8.
- [2] 王礼先. 北京山区荒溪分类与危险区制图[J]. 山地研究, 1995, 13(3): 141—146.
- [3] 孙广仁, 毕海良. 模糊数学综合评判法在泥石流沟判别与危险度评价中的应用[J]. 青海环境, 1997, 7(2): 72—77.
- [4] 刘希林, 张松林, 唐川, 等. 沟谷泥石流危险度评价研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 20—25.
- [5] 刘涌江, 胡厚田, 白志勇. 泥石流危险度评价的神经网络法[J]. 地质与勘探, 2001, 37(2): 84—87.
- [6] 铁永波, 唐川. 层次分析法在单沟泥石流危险度评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 79—84.
- [7] 杜涛. 北京地质灾害概况[J]. 北京地质, 2000(4): 21—23.
- [8] 耿智慧. 密云县泥石流灾害及其防治措施[J]. 北京水利, 1995(4): 7—11.
- [9] 谢洪, 钟敦伦, 靳怀成. 北京山区泥石流与滑坡防治研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(6): 37—39.
- [10] 秦永胜, 余新晓, 陈丽华, 等. 北京密云水库流域水源保护区径流空间尺度效应的研究[J]. 生态学报, 2001, 21(6): 913—918.
- [11] 樊晓一, 乔建平, 陈永波. 层次分析法在典型滑坡危险度评价中的应用[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(1): 72—76.
- [12] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究[J]. 灾害学, 1988, 3(3): 10—15.
- [13] 陈冶, 郑永胜, 王莹. 泥石流危险度的分类评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1997, 8(1): 27—31.
- [14] 刘涌江, 胡厚田, 白志勇. 泥石流危险度评价[J]. 水土保持学报, 2000, 8(1): 84—87.
- [15] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 145—165.
- [16] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判[J]. 水土保持通报, 1986, 6(1): 51—57.
- [17] 刘希林, 唐川, 张松林. 中国山区沟谷泥石流危险度的定量判定法[J]. 灾害学, 1993, 8(2): 1—7.
- [18] 刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 5—19.
- [19] 张春山. 北京地区泥石流灾害危险性评价[J]. 地质灾害与环境保护, 1995, 6(3): 33—40.
- [20] 刘希林, 唐川, 张松林. 中国山区沟谷泥石流危险度的定量判定法[J]. 灾害学, 1993, 8(2): 1—7.
- [21] 朱静. 泥石流沟判别与危险度评价研究[J]. 干旱区地理, 1995, 18(3): 64—67.
- [22] 张春山. 北京北山地区泥石流灾害危险性评价[J]. 北京地质, 1996(2): 11—20.
- [23] 谢又予, 伍永秋. 北京密云县泥石流危险区及沟谷危险度的初步研究[C]//北京市科学技术协会. 首都圈自然灾害与减灾对策. 北京: 气象出版社, 1991: 166—170.
- [24] 钟敦伦, 谢洪, 王士革, 等. 北京山区泥石流[M]. 北京: 商务印书馆, 2004: 99—101.
- [25] 李正国, 吴健生, 李卫峰. 密云县地质灾害危险性评价[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 78—81.