

# 正负矩阵权重分析法在西藏泥石流危险性分区中的应用

耿学勇<sup>1</sup>, 程尊兰<sup>1</sup>, 李泳<sup>1</sup>, 党超<sup>1</sup>, 曾榕彬<sup>2</sup>, 刘晶晶<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 重庆交通大学, 重庆 400074)

**摘要:** 介绍了正负矩阵权重分析法的基本原理和分析过程。结合西藏地区泥石流发育分布规律, 建立了泥石流危险性区划判别模型。模型中选取地质构造、地貌和气候条件(包括降水强度、年均地温和冰川水文)为影响因子, 同时考虑到研究区内基础资料少的限制, 再选取既能表征影响因子强度又能直接获得因子参数进行研究。通过对各影响因子的分区赋值, 利用GIS空间分析技术, 对西藏地区泥石流危险性分区进行了研究。结果表明, 西藏东南部泥石流危险度最强, 从整个西藏地区来看危险等级由东南向西北递减。

**关键词:** 泥石流危险性分区; GIS; 正负矩阵; 西藏

**中图分类号:** P624.23.X43

**文献标识码:** A

泥石流危险性分区, 是泥石流研究中的重要工作之一。目前这方面的研究很多<sup>[1-3]</sup>, 其方法主要分为直接指标法和间接指标法<sup>[2]</sup>, 或者两者相结合<sup>[4]</sup>, 而在为这些指标确定权重时又常用统计分析<sup>[3,5]</sup>或专家直接打分的方法<sup>[3]</sup>。这些方法或者需要大量数据, 或者要求同时去比较多个因子的权重。本文中采用的正负矩阵分析法通过成对比较各因子对泥石流的影响力, 就可确定各因子权重, 这种方法可以降低专家评判的难度, 有更优的可操作性。另外, 本文选取既可以代表影响因子影响力又便于获取的因子参数进行评判, 增加了研究的可行性。

## 1 正负矩阵权重分析法

### 1.1 正负矩阵权重分析法基本原理

正负矩阵分析法是一种为具有不同量纲的影响因子确定权重的综合分析方法。在为一组因子确定权重的分析中, 有些因素(指标)之间尽管无可比性, 但他们对目标都有影响。因此它们对目标影响力之比就表征了它们的相对权系数大小。正负矩

阵分析法就是通过成对比较各因素对目标的影响力, 建立判断矩阵, 而这个矩阵中就包含了各影响因子对目标影响力相对大小的全部信息。通过对这个矩阵的分析便可以得到各因子的权重值。该方法在基本数学原理上与因素分析法<sup>[2,6]</sup>有相通之处。

### 1.2 正负矩阵权重分析法分析过程

#### 1.2.1 选取影响因子确定判断等级

影响因子的选取, 一方面要考虑其对目标的影响力, 要求各因子于目标相关性大。同时各因子之间相关性小。另一方面, 要考虑到人成对比较各因子的能力, 即因子不能太多。

人们在估计成对事物差别时通常用5种判断等级, 即相等、较强、强、极强、绝对强。为了定量表示这些判别等级, 不失一般性的分别给这些等级赋值为1, 3, 5, 7, 9。则如果有 $n$ 个因素时, 各因子 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 对目标 $J$ 的影响力比较 $x_i/x_j$ 可分为1~9个指标级(见表1)。其中2, 4, 6, 8可以表示过渡比较等级。如果 $x_i$ 的影响力比 $x_j$ 弱, 则用相应 $x_j/x_i$ 的倒数表示, 如较弱等级用1/3表示。

收稿日期(Received date): 2006-03-11; 改回日期(Accepted): 2006-08-25.

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(40371016); 交通部西部交通建设科技项目(2004 318 792 55). [This research is supported by China National Science Foundation(40371016), The Ministry of Communications(2004 318 792 55)]

作者简介(Biography): 耿学勇(1980-), 男, 硕士, 主要从事泥石流等山地灾害的研究。[Geng Xueyong(1980-), male, graduate. Be engaged in research on debris flow]

表 1 判别矩阵标度表

Table 1 Graduation of judgment matrix

标度	相等	较强	强	极强	绝对强
$x_i/x_j$	1	3	5	7	9

### 1.2.2 建立判断矩阵

为了减少构造矩阵时的人为主观影响,在评价中选定多名对泥石流形成运动机理熟知的专家,组成专家组,讨论构造判断矩阵。每次取两个因子  $x_i$  和  $x_j$ , 以  $a_{ij}$  表示  $x_i$  与  $x_j$  对目标影响力大小之比,建立判断矩阵

$$\text{判断矩阵为 } A = \begin{Bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

显然应有  $a_{ij} > 0$ ,  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ,  $a_{ii} = 1$ 。这种矩阵称为正负反矩阵。如果决策人对  $n$  个决策因子比较是绝对客观的,即应有  $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$ 。我们称这种正反负矩阵有一致性。如果  $A$  具有一致性,则它的最大正特征根对应的正特征向量的标准化形式就是各因子的权重向量<sup>[7]</sup>。

### 1.2.3 一致性检验

决策人在比较过程中不可避免会产生偏差,使  $a_{ij} \times a_{jk} \neq a_{ik}$ , 即  $A$  不能完全一致。所以在利用正反负矩阵确定权重时,要先检验判别矩阵的一致性程度。具体方法:先令  $\lambda_{\max}(A)$  为矩阵  $A$  的最大特征根,用一致性指标

$$CI = (\lambda_{\max}(A) - n) / (n - 1) \quad (2)$$

来衡量矩阵  $A$  的不一致性程度。为了量度不一致性,还必须使用平均随机一致性指标  $RI$ 。

$$RI = (\lambda_{\max}(A) - n) / (n - 1) \quad (3)$$

采用萨蒂算法相对于各阶判别矩阵其对应的  $RI$  值如表 2。

利用随机一致性比率  $CR = CI/RI$  来判别因子。当  $CR < 0.1$  时,判断矩阵具有满意一致性。

## 2 在西藏的应用

### 2.1 模型建立

#### 2.1.1 影响因子选择

从泥石流的发育来看,众多专家一致认为,它必须具备三个基本条件。一是有利的地貌基础,二是

有丰富的松散固体碎屑作为补给物质,三是适当的降雨水源激发<sup>[8-9]</sup>。所以在本文中把地貌条件、地质构造(直接或间接影响补给物质条件)和降水强度作为危险区划的影响因子。同时,还要考虑西藏特殊的自然地理环境下,冰川活动和冻土融化作用也影响泥石流的发育。

最终,我们选取地质构造条件、地貌条件、年降水量、冰川水文活动和年均地温五个因子作为分区判别因子。

### 2.1.2 建立判别矩阵

几十年来,大量科研工作者对西藏地区泥石流的分布特征和发育规律进行了研究,并取得了巨大成就。经过对西藏泥石流分布图<sup>[9]</sup>和大量已由西藏地区泥石流资料的研究<sup>[8-9]</sup>,分析总结前人经验,最终确定了影响因子影响力对比表如(表 3)。

表 2 平均随机一致性指标表

Table 2 The value for the average random consistency indicator

矩阵阶数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
平均随机一致性指标 ( $RI$ )	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

表 3 影响力对比表

Table 3 Compare of correlative factors influence

矩阵	地质构造	降水强度	地貌	冰川水文	年均地温
地质构造	1	3/4	4/5	2	3
降水强度	4/3	1	6/5	3	4
地貌	5/4	5/6	1	5/2	4
冰川水文	1/2	1/3	2/5	1	2
年均地温	1/3	1/4	1/4	1/2	1

则判断矩阵为

$$A = \begin{Bmatrix} 1 & 3/4 & 4/5 & 2 & 3 \\ 4/3 & 1 & 6/5 & 3 & 4 \\ 5/4 & 5/6 & 1 & 5/2 & 4 \\ 1/2 & 1/3 & 2/5 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/4 & 1/4 & 1/2 & 1 \end{Bmatrix} \quad \text{最大正特征向}$$

$$\text{量标准化后: } w = \begin{Bmatrix} 0.223784157 \\ 0.313455657 \\ 0.276709086 \\ 0.116257275 \\ 0.069793825 \end{Bmatrix}$$

一致性检验:  $CI = (5.0145 - 5) / (5 - 1) = 0.00362$

$$RI = 1.12$$

$$CR=0.003273<0.1$$

所以 A 满足一致性,  $w$  为权重向量。

2.1.3 建立判别公式

考虑到泥石流分区中的特殊性,即地貌条件对发生泥石流的影响。如果没有足够的地貌指标,区域内是不能发生泥石流的。经过适当调整,可以得到如下判别模型

$$H=\begin{cases} =0 & (\text{当 } X_3 \leq 1 \text{ 时}) \\ =0.22x_1 + 0.31x_2 + 0.28x_3 + 0.12x_4 + 0.07x_5 & \end{cases}$$

(4)

其中  $H$  为分区指标,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$  和  $X_5$  分别代表地质构造强度指标、年降水强度指标、地貌强度指标、冰川水文强度指标和年均温强度指标。模型中,当  $X_3 \leq 1$  时  $H = 0$  表明当地貌强度指标极小的时候,可以认为不可能发生泥石流。如在地势平坦的草原地区。

2.2 各影响因子强度评价

为了定量评价不同地区各影响因子的强度,我们采用半定量化方法。事先为五个因子的强度定级,并为每一强度等级对应的指标赋值。这里为了评价中便于把握,我们把因子强度分为五个等级,各等级对应的指标值依次从 0~10 排列(这样赋值可以使分区指标  $H$  的值也在 0~10 范围内,便于分区),如表 4。其中在 0.2、5、8、10 之间的 1、3、4、6、7、9 为过渡级。

表 4 影响因子强度等级赋值表

Table 4 Evaluation of correlative factor intensity

级别:	绝对不强	较强	强烈	极强烈	绝对强烈
指标值:	0	2	5	8	10

2.2.1 地质构造

泥石流的发育与地表松散堆积物的分布有直接关系,从整个西藏地区来讲,这种详细资料是无法得到的。但是,地质构造的发育情况直接或间接的影响了地表松散堆积物的分布,所以地质构造强度分布基本上可以代表地表松散堆积物的分布。通过分析已有的大尺度区域地质构造资料,可将西藏高原的大地构造由北向南依划分为:南昆仑—巴颜喀拉板片、若拉岗日—金沙江缝合带、羌塘—三江复合板片、班公错—怒江缝合带、冈底斯—念青唐古拉板片、雅鲁藏布江缝合带、喜马拉雅板片、西藏南部边界的西瓦里克 A 型俯冲带。按各构造带对泥石流

发育的适宜性强度对各构造带赋值,赋值标准参照表 4 得到地质构造强度指标分布见图 1。

2.2.2 降水强度分布

根据对泥石流发育特点的多年研究,发现泥石流发生于 24 h 雨强和 10 min 最大雨强有密切关系。但是西藏地区水文观察站数量太少,而且分布不合理,大多位于人口密集地区。所以西藏大部分地区属于无观测资料或资料不全区,用 24 h 雨强或 10 min 最大雨强作为分区因子不现实。考虑到雨强与雨量的关系,地区降雨量基本上可以代表该地区降雨强度,所以采用年均降雨量来作为西藏泥石流分区的评价因子。

西藏绝大部分地区年降水量 < 1 000 mm,总的分布趋势是由东南向西北逐渐减少。其中藏东南靠近边境部分地区年降水量最高,可 > 4 500 mm;阿里地区最少,班公错以北地区年降水量 < 50 mm,是西藏高原上降水最少的地区。按降水对泥石流的影响结合表 4 对西藏地区降雨量分区赋值。年降水量强度分布见图 2。

2.2.3 地貌

西藏地貌形态多样。其中地貌组合的格局是高原周围群山环抱;南部和东部河流深切,山高谷深;北部高原辽阔坦荡;中部山地宽谷和盐湖相间排列。根据西藏境内地势变迁、地貌形态和地貌类型组合特点,将西藏地区划分为 6 个地貌区。结合其对泥石流的影响,参照表 4 对每个地貌区分别赋予不同强度指标。具体划分和分布情况如表 5,图 3。

表 5 地貌分区赋值表

Table 5 Zone and evaluate for form land

区号	地貌类型描述	强度指标值
	藏东极大、大起伏高山区	8
	喜马拉雅极大、大起伏高山及高山区	9
	怒江上游大起伏高山地区	6
	那曲东部丘状高原区	4
	羌塘高原湖盆地	3
	昆仑大起伏、极大起伏高山区	7

2.2.4 冰川水文

西藏冰川可分为大陆性冰川(冷冰川)和海洋性冰川(暖冰川)两大类。藏东南一带的冰川多属海洋性冰川,其他地区的冰川多属大陆冰川。海洋性冰川具有气候温和,降水丰沛,消融强烈等特点。大陆性冰川具有降水少、气温低、雪线高、消融弱等特点。为定量描述冰川水文活动的强度,我们选取

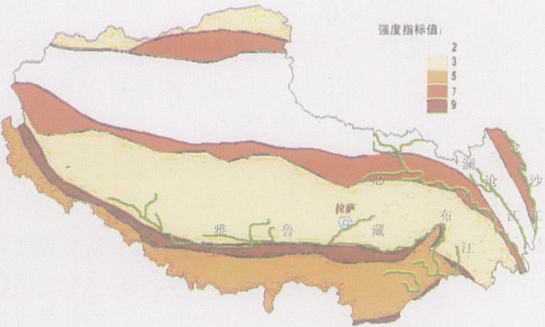


图 1 地质构造强度指标分布图  
Fig. 1 Map of evaluation to geology

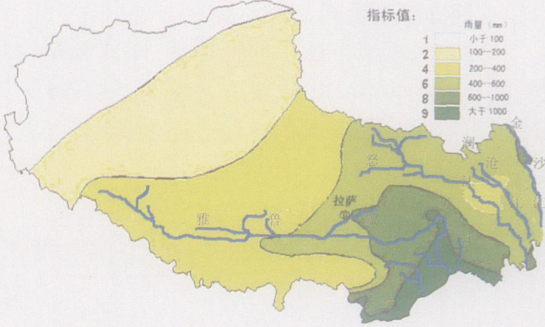


图 2 年降水量强度分布图  
Fig. 2 Map of evaluation to the annual precipitation

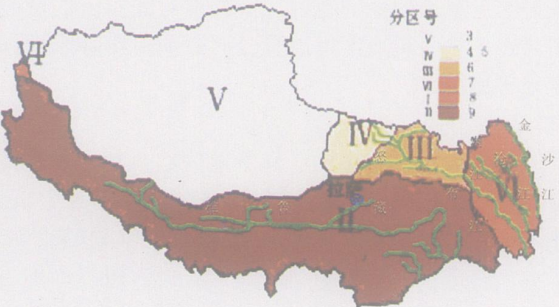


图 3 地貌分区赋值图  
Fig. 3 Map of evaluation to the landform

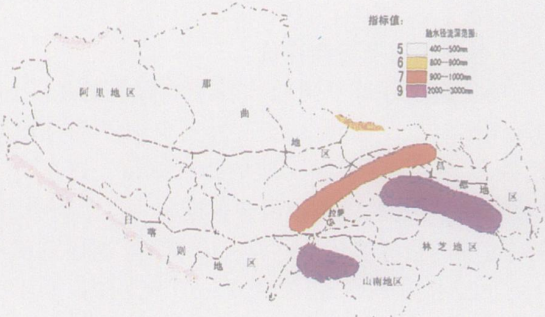


图 4 冰川水文活动强度分区赋值图  
Fig. 4 Map of evaluation to the intensity of glacier thaw

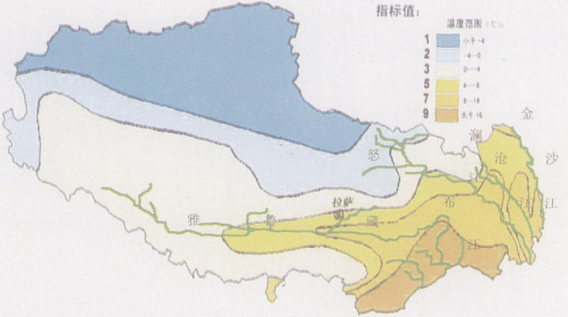


图 5 平均温分区赋值图  
Fig. 5 Map of evaluation to the annual temperature

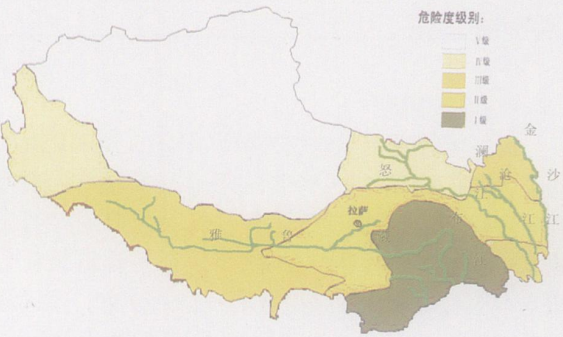


图 6 西藏泥石流危险度分布图  
Fig. 6 Map of evaluation to the hazard degree of debris flow in Tibet

融水径流深作为其表征参数。西藏冰川融水径流深在 400~3 000 mm 间, 分布趋势是由藏东南向藏北、藏西逐渐减少。参照表 4 以西藏冰川融水径流深度为标准, 对西藏冰川水文活动强度分区赋值, 如图 4。

## 2.2.5 地温

西藏地区冻土发育广泛, 由地温变化引起的冻土融冻作用对泥石流、滑坡地质灾害有重要影响。因此, 地温非常重要。但是整个西藏区域的地温资料非常有限, 同时地温与气温有很好的相关性, 因此我们选取年均气温分布代替地温作为考虑因子。受地理因子和环流条件的影响, 西藏地区年平均气温由东南向西北逐渐递减。年平均气温变化范围由 18℃ 递减到 -4℃ 以下。从气温分布图看, 藏东南、三江和雅鲁藏布江河谷形成三个明显的暖区。高原西部改则—狮泉河一带的宽谷也为明显的暖区。依据年均温分布图参照表 4 对西藏地区年均温分区赋值, 如图 5。

## 2.3 综合分析

在 GIS 技术支持下, 利用判别公式 4 综合分析 5 个影响因子的强度分布, 经过运算, 可以得到危险度强度指数  $H$  的分布。这里  $H$  只具有相对意义, 它只代表西藏地区内部不同区域泥石流灾害的相对危险性。根据  $H$  大小, 可将危险度分为 5 级 (以突出重点、各等级区域面积在同一数量级为分级原则):

级, 极严重危险区  $> 7.5$  级, 严重危险区  $7.5 \sim 6.5$  级, 较严重危险区  $6.5 \sim 4.5$  级, 较轻危险区  $4.5 \sim 1.5$  级, 极轻危险区  $< 1.5$ 。经计算调整可以得到西藏泥石流危险度分布图 (图 6)。

## 3 结论

1 通过判断模型的建立和分析计算, 将西藏按泥石流危险度分为五级危险区, 极严重危险区面积占西藏总面积 11.23%, 大约  $13.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 严重危险区占 12.92%, 大约  $15.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 较严重危险区占 19.86%, 大约  $24.22 \times 10^4 \text{ km}^2$ ; 较轻危险区占 13.45%, 大约  $16.41 \text{ km}^2$ ; 极轻危险区占 42.54%, 大约  $51.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2 西藏泥石流危险度总体上由东南向西北递减, 但由于冰川水文活动分布影响, 局部地区部分加强。西藏东南部为泥石流高发区, 其中尤以山南地区和林芝地区米林、墨脱县的为重。

3 本文建立的模型优点在于, 仅仅利用西藏地区有限的地质构造、地貌和气候资料, 就较好的模拟出了西藏地区泥石流的危险度分布。但也存在很多不足, 笔者在在各影响因子的相关性和层次性上没有深入研究。

## 参考文献 (References)

- [1] Liu Xilin. Discuss on the zoning of debris flow hazard degree [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1989, 4(4): 18~21 [刘希林, 泥石流危险区划的探讨 [J], 灾害学, 1989, 4(4): 18~21]
- [2] Zhong Dunhua, Xie Hong, Wei Fangqiang. Principle and indexes of the regionalization of debris flow danger degree in the upper reaches of Changjiang River [J]. *Mountain Research (New's Journal of Mountain Science)*, 1994, 12(2): 78~83 [钟敦伦, 韦方强, 谢洪. 长江上游泥石流危险度区划的原则与指标 [J], 山地研究 (现山地学报, 下同), 1994, 12(2): 78~83]
- [3] Liu Xilin, Tang Chuan. Estimate Hazard of Debris Flow [M]. Beijing: Science Press, 1995. 150~107 [刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价 [M], 北京: 科学出版社, 1995 105~107]
- [4] Wei Fangqiang, Xie Hong, Zhong Dunhua. Risk factors zoning of debris flow in Sichuan Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 14(1): 59~63 [韦方强, 谢洪, 钟敦伦. 四川省泥石流危险度区划 [J], 水土保持学报, 2004, 14(1): 59~63]
- [5] Liu Xilin. A method to determine the distributive of density of debris flow [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(1): 54~59 [刘希林, 泥石流相对分布密度的确定方法 [J], 水土保持学报, 1992, 6(1): 54~59]
- [6] Wei Fangqiang, Zhong Dunhua, Xie Hong. Some steps of the regionalization of debris flow danger degree in the upper reaches of Changjiang River [J]. *Mountain Research*, 1994, 12(2): 84~93 [韦方强, 钟敦伦, 谢洪. 长江上游泥石流危险度区划的步骤 [J], 山地研究, 1994, 12(2): 84~93]
- [7] Chen Lirong. Introduction of Mathematical Module found [M]. Beijing: Publishing House of Beijing University of Post and Telecommunications, 1999. 107~110 [陈理荣. 数学建模导论 [M]. 北京邮电大学出版社, 1999 107~110]
- [8] Institute of Mountain Hazards and Environment. CAS. Debris Flow and Environment in Tibet [M]. Chengdu: Science Technology University Publishing House, 1999. 121~125 [中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 西藏泥石流与环境 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999. 121~125]
- [9] Institute of Mountain Hazards and Environment. Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy. Institute of the Traffic Science. The Traffic Department of the Tibet Autonomous Region. A Study of Typical Mountain Hazards Along Sichuan-Tibet Highway [M]. Chengdu: Science and Technology University Publishing House, 1999. 25~52 [中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 西藏自治区交通科学研究所. 川藏公路典型山地灾害研究 [M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999. 25~52]

# Application of Matrix Analysis to Zoning Hazard Degree of Debris Flow in Tibet

GENG Xueyong<sup>1</sup>, CHENG Zunlan<sup>1</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, DANG Chao<sup>1</sup>, ZENG Rongbin<sup>2</sup>, LU Jingjing<sup>1</sup>

(1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Water Conservancy Ministry, Chengdu 610041, China;

2 Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract** This paper has introduced the principle of matrix analysis to determine the weights of correlative factors involved in debris flows. And on the basis of investigating debris flow in Tibet with the limitation of data, we choose landform, geology, climate as influence factors including annual rainfall, annual average ground temperature (and represented by air temperature in practice) and intensity of glacier thaw. Then, supported by GIS, we have studied the hazard zoning of debris flow in Tibet. The result shows that the Southeast of Tibet is the most dangerous region and the hazard degree descends from Southeast to Northwest.

**Key words** debris flow; hazard; Tibet; GIS; matrix

## 《山地学报》征稿简则

《山地学报》是专门报道山地科学研究理论与山区开发、整治、建设实践相结合等内容的综合性科技期刊,内容涵盖自然科学与人文科学两大门类中与山地研究、开发有关的多学科知识,重点报道山地资源开发与山地生态环境演变、山区工程建设与山地灾害(崩塌、滑坡、泥石流、水土流失、山洪等)防治、山区社会发展与城镇规划、山区持续发展与产业结构调整等领域的理论文章、应用技术、研究和实验方法等。同时设有学术动态、新书介绍和书评等不固定栏目,近期还特设了青藏高原等专题栏目。

投稿者请注意:

- 1 严格遵守国家保密规定,涉及国家和地区名称、界线、保密等政治及等敏感问题须认真核实,与我国政府口径一致。
- 2 严格按照来稿要求投稿,凡未按要求投稿的一律作退稿处理。
- 3 稿件文责自负。本刊对来稿有修改权,如不同意请事先声明。勿一稿多投。本刊审稿周期为3个月左右,作者在投出稿件100天后未收到稿件处理意见,可另行处理。由于人手有限,稿件刊用与否均不退还原件,请自留底稿。本刊对刊用稿件酌收版面费和审稿费。如需抽印,请事先声明数量,酌收成本费。
- 4 本刊所刊载稿件将进入各大检索数据源并上网,作者若有异议请预先申明。
- 5 来稿请寄:成都市一环路南二段10号中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所《山地学报》编辑部,邮政编码610041; E-mail: hyfeng@indec.ac.cn; 电话: (028) 85223826。作者投稿时务必附上联系电话。