

文章编号: 1008-2786-(2016)4-460-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000151

金沙江干热河谷区泥石流易发性评价模型及应用

陈 剑¹ 黎 艳¹ 许 冲²

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 2. 中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室,北京 100029)

摘 要: 金沙江上游奔子栏-昌波河段属典型的干热河谷区,气候干热少雨,但泥石流灾害发生频繁。采用指标熵模型对干热河谷区泥石流的影响因子进行敏感性分析,最后筛选出流域地貌熵值、岩土类型、坡向、坡度、植被归一化指数、月均降雨量等 6 个因子作为泥石流的易发性评价因子。将研究区划分为 217 个小流域,以流域单元为评价单元,采用权重系数法建立了泥石流的易发性评价模型,并利用该模型制作易发性分区图。分区结果表明:研究区泥石流极高易发区和高易发区主要分布在北部的昌波-贡波段、中东部的徐龙-曲雅贡段和南部的金沙江沿岸。极高易发区和高易发区面积占研究区总面积的 36.4%,两区内的泥石流流域面积占泥石流总流域面积的 58%。经检验泥石流的预测成功率为 69.6%。

关键词: 流域单元;干热河谷区;泥石流;指标熵模型;易发性评价

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

泥石流灾害一直是国内外灾害科学研究的热点,国外对泥石流危险性评价研究较早,我国起步较晚^[1]。1988 年刘希林所著的“泥石流危险度判定的研究”一文^[2],被视为我国泥石流危险度研究的开始,首次提出了将定性分析与定量分析有效结合的多因子综合评判的模型。20 世纪 90 年代以来,3S 技术与其他学科的结合提供了多种泥石流的易发性定量评价方法^[3-7],常用的有:人工神经网络法、层次分析法、确定性系数法、逻辑回归法、模糊逻辑法、Bayes 条件概率模型、指标熵模型、信息量模型等。近年来,人类不合理经济活动的加剧给地质环境带来严重破坏,使得泥石流、滑坡等灾害日益增加,泥石流已成为影响山区工程建设活动的重要因素。

我国广大的西部山区,由于其独特的地域气候特点,泥石流灾害发生频繁,严重威胁当地居民的生命财产安全和山区工程建设^[8-9]。金沙江上游奔子栏-昌波河段属典型的干热河谷区^[11-14],气候干热

少雨,虽年平均降水量仅为 300~400 mm,但泥石流灾害发生频繁。本文通过现场调查及遥感解译,建立研究区的地质环境数据库,应用指标熵模型对该区泥石流的影响因子进行敏感性分析,筛选出影响该区泥石流发育的主控因子,基于小流域单元建立泥石流的易发性评价模型,并利用该评价模型对研究区未来可能遭受的泥石流灾害进行易发性评价,为该区的水利工程建设及城镇规划提供参考依据。

1 研究区概况

奔子栏-昌波河段位于四川与云南、西藏交接的金沙江上游,在地貌单元上,该区地处以“世界屋脊”著称的青藏高原南东缘、横断山脉中段(图 1),属于典型的干热河谷气候^[11]。研究区河谷两侧为海拔 4 000 m 以上的高山,两侧山地起伏达 1 500~2 000 m 以上,高山峡谷地形发育,纵贯南北的金沙

收稿日期(Received date): 2015-07-15; 改回日期(Accepted): 2015-08-27。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(41230743)、国家自然科学基金面上项目(41571012)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2652015060)。[Key Program of National Natural Science Foundation of China (41230743), General Program of National Natural Science Foundation of China (41571012), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2652015060).]

作者简介(Biography): 陈剑(1975-),男,副教授,主要从事灾害地貌学、工程地质与地质灾害防治研究。[Jian Chen (1975-), male, associate professor, specialized in hazard geomorphology, engineering geology and geological hazard prediction and control.] E-mail: jianchen@cugb.edu.cn

江干流,长约 150 km,宽度在 60 ~ 100 m 之间;另外,该段支沟众多,成羽状排列,主要支流有定曲河、中岩曲和麦曲河,支沟下游切割很深,为峡谷或嶂谷,沿江地势陡峻。研究区岸坡变形破坏强烈,崩滑松散堆积体分布广泛,为泥石流的发育提供良好的物源条件。区内泥石流沟发育众多,每到雨季泥石流从沟口冲出经常对沿线公路造成破坏。

研究区年平均气温 20 ~ 23℃,降水主要受来源于西南季风和东南暖湿气流的影响,由于两岸高山对峙,水汽很难进入,形成所谓的“雨影区”,为横断山区降水最稀少的地区,金沙江河谷的奔子栏到四川得荣一带,年降水量只有 300 mm 左右,巴塘至得荣间金沙江河谷年降水量少于 400 mm^[12-15]。同时降水季节分布极不均匀,存在明显的雨季和旱季,雨季 6—9 月,一般占全年降雨的 80% 以上^[12]。

研究区处于地壳强烈抬升阶段,构造活动强烈^[16-17],但地震活动性相对较弱,历史记录的地震震级都小于 6 级。研究区发育有多组断层构造(图 1),金沙江断裂为研究区的主断裂,是一条具压扭特征的逆冲断裂。研究区古生代、中生代、新生代地层均有不同程度的发育,主要出露的岩性为板岩、砂岩、片岩、灰岩及火山岩,下第三纪及第四纪松散冲洪积物零星分布。由于年、日以及垂直高度不同气温变化极大,地表植被覆盖稀少,岩石风化严重。

2 研究方法

2.1 流域单元划分

泥石流易发性评价单元可分为 5 类:栅格单元、地貌单元、均一条件单元、流域单元及地形单元。以往对泥石流易发性评价的相关研究中,多采用栅格单元,栅格单元在 GIS 软件中易于划分且计算便捷,但这种单元和地质、地貌及其他环境因子缺乏联系,同时忽略了泥石流的流域特性,无法体现泥石流发育的实际情况。

本文利用 ArcGIS10.0 中的水文分析模块,进行子流域划分,划分过程为洼地填充—计算汇流方向—分析汇流累积—提取河网—确定流域盆地—子流域划分。当集水阈值为 10 000 时,提取的河网与实际河网最为接近。检查划分的流域边界、河网、山脊和山谷线是否与图像匹配,对不恰当的地方进行修改,最终将研究区划分为 217 个子流域,平均流域面积为 14.47 km²,最大流域面积为 50.43 km²,最小

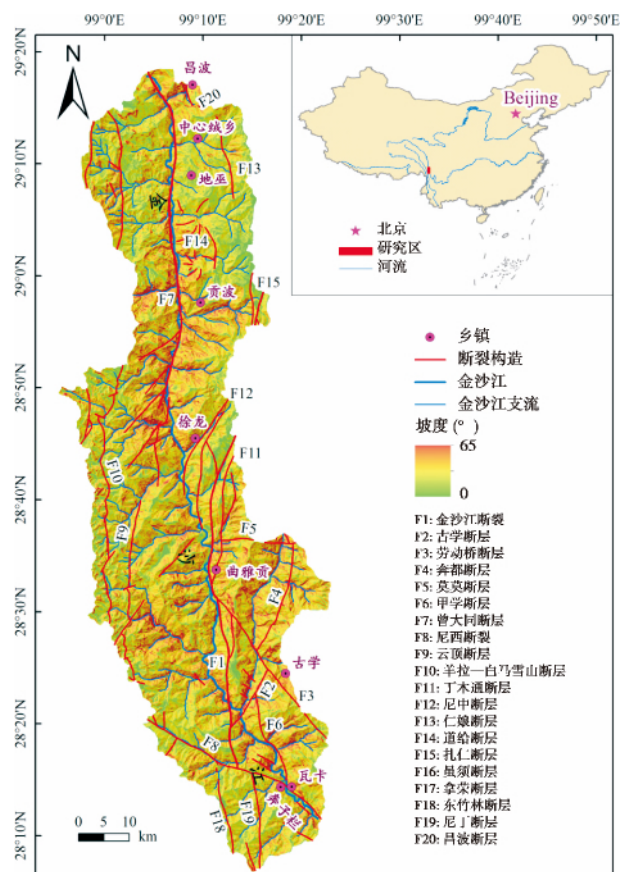


图1 研究区地理位置图

Fig. 1 Map showing the geographic location of the study area

流域面积为 0.71 km²。

2.2 数据获取

泥石流的形成是地貌、地质构造、水文气象等条件共同作用的结果。从干热河谷区泥石流的基本形成条件出发,通过野外地质地貌调查并结合遥感影像解译分析,选取 8 个影响因子作为该区泥石流的潜在易发性影响因子(表 1)。岩土类型反映了出露的岩性特征,断裂构造使地表破碎,因此都可作为物源条件的代表因子;地貌提供了泥石流发育的势能条件,坡度和相对高度因子反映斜坡的陡峻和地表的起伏,坡向因子影响岩体的风化及地表侵蚀的强烈程度,流域地貌熵值反映地貌的侵蚀发育程度及地貌演化阶段;短历时的强降雨能激发泥石流灾害,由于该区短历时的强降雨资料缺乏,因此采用现有的月均降雨量作为泥石流发育的水文条件因子;地表植被覆盖影响土壤的侵蚀及水土流失,选择植被归一化指数作为植被覆盖的代表因子。

通过矢量化 1:10 万的地质图获得地层岩性和断裂构造两个因子图层;从 DEM 上提取得到每个流

域单元的坡度、坡向、相对高度 3 个因子图层;通过侵蚀流域系统的地貌熵理论计算得到流域地貌熵值因子图层;月均降雨量图层通过巴塘、得荣、德钦、羊拉村、奔子栏等 5 个雨量监测站 2009—2013 年月平均降雨量插值获得;从 Landsat 8 遥感影像提取得到植被归一化指数图层。

表 1 泥石流的潜在易发性影响因素选取

Tab.1 Potential Impact factors of debris flows for susceptibility assessment

形成条件	影响因素	影响因素作用
地质	岩土类型	泥石流的物源条件
	与断裂的距离	断裂构造使地表破碎 加速岩体风化
	坡度	提供松散物质搬运的势能
地貌	坡向	影响岩体分化及土壤侵蚀的强烈程度
	相对高度	反映地表的相对起伏程度
	流域地貌熵值	判别流域地貌侵蚀发育程度和地貌演化阶段
水文气象	月均降雨量	泥石流的诱发因素、启动条件
地表植被覆盖	植被归一化指数	影响土壤侵蚀及水土流失

3 影响因素敏感性分析

指标熵模型是由 Vlčko 等 1980 年提出的一种二元统计模型^[18] ,应用这种模型可以计算泥石流在各影响因素各级别中的面积百分比 ,以及各影响因素的权重。经指标熵分级得到的权重参数近似服从正态概率分布 ,熵值指示自然条件下影响物源运动

发展的主控因子。影响因子权重 W_i 的计算流程如下:

$$P_{ij} = \frac{A_{sd}}{A_i} \tag{1}$$

$$(P_{ij}) = \frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^{S_j} P_{ij}} \tag{2}$$

式中 A_i 为各因子各级别的面积; A_{sd} 为各因子各级别中泥石流灾害的面积; P_{ij} 为各因子各级别中泥石流的面积百分比(概率密度); (P_{ij}) 为平均概率密度;

$$H_j = - \sum_{i=1}^{S_j} (P_{ij}) \log_2 (P_{ij}) \quad j=1, \cdots, n \tag{3}$$

$$H_{jmax} = \log_2 S_j \tag{4}$$

式中 H_j 及 H_{jmax} 都是熵值; S_j 为因子所分级数;

$$I_j = \frac{H_{jmax} - H_j}{H_{jmax}} \tag{5}$$

$$W_j = I_j \times P_{ij} \tag{6}$$

式中 I_j 为信息系数(information coefficient); W_i 为因子的总权重值。

最后计算得到的权重值范围为 0 ~ 1 ,权重值越接近 1 ,因子对泥石流发育的贡献越大。在 GIS 平台上将每个因子图层与泥石流分布数据图层叠加 ,计算各影响因素各级别中泥石流的面积百分比 ,然后运用指标熵模型计算各影响因素各级别的平均概率密度(P_{ij}) 及各影响因素的权重 W_i (表 2、3) ,从而确定各影响因素各级别的敏感性及各影响因素的敏感性 ,选出主控因子。

表 2 影响因素分级及敏感性计算统计表

Tab.2 Classification and sensitivity calculation of impact factors

影响因素	分级级别	各级面积百分比 /%	各级中泥石流流域面积百分比 /%	P_{ij}	(P_{ij})	赋值
岩土类型	第四系松散碎屑堆积物	0.041 7	0.022 9	0.550 1	0.125 8	1
	强风化的片岩及板岩岩组	0.345 5	0.508 1	1.470 5	0.336 4	5
	中等风化的灰岩及砂岩岩组	0.140 2	0.143 5	1.023 2	0.234 1	4
	弱风化的板岩及火山岩岩组	0.389 6	0.273 6	0.702 2	0.160 6	3
	侵入岩及岩脉	0.083 0	0.051 9	0.625 6	0.143 1	2
与断裂的距离 /m	0 ~ 100	0.046 4	0.043 5	0.937 3	0.166 0	4
	100 ~ 200	0.040 0	0.037 2	0.929 7	0.164 7	3
	200 ~ 300	0.045 3	0.041 7	0.920 2	0.163 0	2
	300 ~ 400	0.038 5	0.035 5	0.920 5	0.163 0	2
	400 ~ 500	0.040 8	0.037 4	0.917 8	0.162 6	1
	> 500	0.789 0	0.804 8	1.020 0	0.180 7	6

续表 2

坡度 /°	< 10°	0.038 7	0.023 3	0.603 5	0.105 0	2
	10° ~ 20°	0.124 0	0.121 0	0.976 1	0.169 8	4
	20° ~ 30°	0.308 1	0.311 6	1.011 5	0.176 0	5
	30° ~ 40°	0.399 7	0.405 4	1.014 2	0.176 4	6
	40° ~ 50°	0.119 9	0.130 9	1.091 7	0.189 9	7
	50° ~ 60°	0.009 5	0.007 7	0.811 2	0.141 1	3
	> 60°	0.000 1	0.000 0	0.240 1	0.041 8	1
坡向	(Flat)	0.003 5	0.000 4	0.112 5	0.013 7	1
	North	0.122 2	0.115 8	0.947 8	0.115 1	5
	Northeast	0.125 7	0.077 9	0.620 0	0.075 3	2
	East	0.133 6	0.087 3	0.653 8	0.079 4	3
	Southeast	0.129 1	0.148 8	1.152 4	0.139 9	8
	South	0.112 8	0.163 7	1.451 4	0.176 2	10
	Southwest	0.115 7	0.162 3	1.402 3	0.170 3	9
	West	0.132 3	0.121 8	0.920 7	0.111 8	4
	Northwest	0.125 0	0.121 9	0.975 1	0.118 4	7
	North	0.061 1	0.064 7	1.058 9	0.115 3	6
相对高度 /m	< 350	0.089 2	0.060 2	0.674 7	0.101 0	1
	350 ~ 450	0.204 1	0.190 5	0.933 4	0.139 8	3
	450 ~ 550	0.267 2	0.291 4	1.090 5	0.163 3	7
	550 ~ 600	0.124 0	0.130 4	1.051 7	0.157 5	5
	600 ~ 700	0.188 9	0.204 8	1.083 8	0.162 3	6
	700 ~ 800	0.091 8	0.094 4	1.027 7	0.153 9	4
	> 800	0.034 7	0.028 3	0.816 4	0.122 2	2
流域地貌熵值	< 0.01	0.005 0	0.007 3	1.470 4	0.164 8	8
	0.01 ~ 0.05	0.012 5	0.013 1	1.053 1	0.118 0	5
	0.05 ~ 0.111	0.215 5	0.255 3	1.184 9	0.132 8	6
	0.111 ~ 0.15	0.161 9	0.256 6	1.585 1	0.177 7	9
	0.15 ~ 0.2	0.165 6	0.125 7	0.758 9	0.085 1	3
	0.2 ~ 0.25	0.191 7	0.259 5	1.353 9	0.151 8	7
	0.25 ~ 0.30	0.139 2	0.044 9	0.322 4	0.036 1	2
	0.3 ~ 0.35	0.086 6	0.015 1	0.174 6	0.019 6	1
	> 0.35	0.022 0	0.022 5	1.018 7	0.114 2	4
月均降雨量 /mm	< 80	0.048 9	0.051 8	1.057 8	0.262 0	3
	80 ~ 83	0.470 9	0.611 6	1.298 9	0.321 7	5
	83 ~ 86	0.142 3	0.064 0	0.449 9	0.111 4	2
	86 ~ 89	0.223 5	0.270 0	1.207 9	0.299 2	4
	> 89	0.114 4	0.002 6	0.023 1	0.005 7	1
植被归一化指数	0 ~ 0.1	0.066 5	0.057 4	0.862 8	0.181 3	2
	0.1 ~ 0.3	0.102 9	0.122 2	1.187 9	0.249 6	4
	0.3 ~ 0.5	0.302 4	0.389 8	1.289 2	0.270 9	5
	0.5 ~ 0.6	0.358 1	0.360 5	1.006 6	0.211 5	3
	> 0.6	0.170 1	0.070 1	0.411 9	0.086 6	1

表 3 影响因子权重计算统计表
Tab.3 The weight of influence factors

影响因子	H_j	H_{jmax}	I_j	W_j
岩土类型	2.220 54	2.321 93	0.043 66	0.038 18
与断裂的距离	2.583 93	2.584 96	0.000 40	0.000 38
坡度	2.703 62	2.807 35	0.036 95	0.030 34
坡向	3.005 73	3.169 93	0.051 80	0.047 40
相对高度	2.789 71	2.807 35	0.006 28	0.006 00
流域地貌熵值	2.979 14	3.169 90	0.060 18	0.059 66
月均降雨量	2.277 20	2.321 93	0.019 28	0.016 78
植被归一化指数	2.236 55	2.321 93	0.036 77	0.034 99

8 个影响因子按权重大小排序为: 流域地貌熵值 > 坡向 > 岩土类型 > 植被归一化指数 > 坡度 > 月均降雨量 > 相对高度 > 与断裂的距离, 与断裂的距离和相对高度两个因子的权重值远小于其他 6 个因子的权重, 对该区泥石流发育的影响很小。因此, 流域地貌熵值、岩土类型、坡向、坡度、植被归一化指数、月均降雨量等 6 个因子是金沙江干热河谷区泥石流发育的主控因子, 选取这 6 个因子作为研究区泥石流易发性评价的评价因子。

4 泥石流易发性评价

借助 ArcGIS10.0 中的区统计功能分别对 6 个因子进行基于流域单元的统计, 得到 6 个影响因子的流域单元专题图, 岩土类型和坡向两个因子取子流域中出现频率最多的岩性和坡向作为子流域的岩性单位和坡向单位; 坡度、流域地貌熵值、月均降雨量、植被归一化指数 4 个因子取平均值作为子流域的值。由于各影响因子的量纲不统一, 不能进行叠加计算, 需要进行归一化处理, 根据表 2 中 (P_{ij}) 的

相对大小对 6 个影响因子的流域单元专题图分级赋值, 得到了各影响因子基于流域单元的赋值专题图层。将 6 个影响因子专题图层分别与其权重结合, 采用权重系数法^[19-20]建立泥石流的易发性评价模型, 计算公式如下:

$$S = Reclass_{lithology} \times 0.03818 + Reclass_{slope} \times 0.03034 + Reclass_{Aspect} \times 0.04740 + Reclass_{Entropy} \times 0.05966 + Reclass_{Rain} \times 0.01678 + Reclass_{Ndi} \times 0.03499$$

式中 S 为易发性指数; $Reclass_{lithology}$ 为岩土类型因子的赋值专题图层; $Reclass_{slope}$ 为坡度因子的赋值专题图层; $Reclass_{Aspect}$ 为坡向因子的赋值专题图层; $Reclass_{Entropy}$ 为流域地貌熵值因子的赋值专题图层; $Reclass_{Rain}$ 为月均降雨量因子的赋值专题图层; $Reclass_{Ndi}$ 为植被归一化指数因子的赋值专题图层。

按上式计算得到泥石流易发性指数值的范围为: 0.56 ~ 1.59, 按自然断点法将易发性指数图层分为不易发区、低易发区、中等易发区、高易发区、极高易发区 5 个级别, 得到研究区基于流域单元的泥石流易发性评价分区图 (图 2), 对评价结果进行统计 (表 4)。

分区结果表明: 研究区泥石流极高易发区和高易发区主要分布在北部的昌波 - 贡波段、中东部的徐龙 - 曲雅贡段和南部的金沙江沿岸。研究区 217 个子流域中, 极高易发区和高易发区的流域个数占流域总数的 42.8%, 两区面积占研究区总面积的 36.4%, 两区内实际发育的泥石流流域面积百分比为 58.0%, 其中极高易发区面积为 487.6 km², 区内实际发育的泥石流百分比为 37.4%; 高易发区的面积为 650.5 km², 区内实际发育的泥石流面积百分比为 20.6%。中等易发区、低易发区内发育的泥石流较少, 不易发区内发育的泥石流百分比仅为 4.8%。

表 4 泥石流易发性评价结果统计
Tab.4 Statistics of result of debris flow susceptibility

易发区分级	流域数目 /个	易发区面积 /km ²	易发区面积 百分比/%	泥石流流域面积 /km ²	泥石流流域面积 百分比/%	易发区内实际泥石流 百分比/%
极高易发区	37	487.6	15.6%	182.5	39.6%	37.4%
高易发区	56	650.5	20.8%	133.9	29.1%	20.6%
中等易发区	64	804.5	25.9%	60.2	13.1%	7.5%
低易发区	39	647.4	20.7%	58.2	12.6%	9.0%
不易发区	21	531.2	17.0%	25.6	5.6%	4.8%

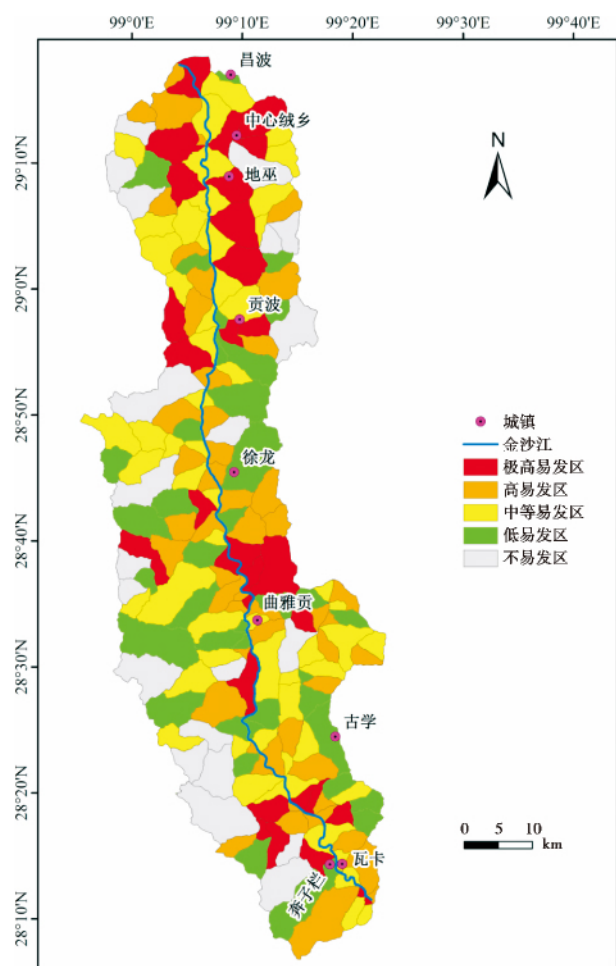


图2 金沙江上游奔子栏-昌波河段泥石流易发性评价分区图

Fig. 2 Debris flow susceptibility map of the Benzilan - Changbo segment of the upper Jinsha River

5 评价结果检验

通过泥石流的分布图和泥石流易发性评价分区图的对比,以预测泥石流面积累计百分比(易发区面积累计百分比)作为横坐标,以实际泥石流流域面积累计百分比为纵坐标,构建检验曲线对易发性评价结果进行检验(图3)。检验曲线下的面积(AUC)可以用来定量表示易发性预测的成功率,可以评价预测模型与实际泥石流的拟合优度^[21]。检验曲线呈“凸型”,检测曲线下的面积(AUC)越接近1,易发性评价的结果越好^[22-24]。

计算得到图3中检验曲线下的面积为0.696,即泥石流的预测成功率为69.6%,表明泥石流预测的准确率较高。分析误差出现的原因有:①研究区面积较大,加上受流域单元比例尺的精度限制,存在较大的尺寸效应,导致各评价因子的定量化的精度

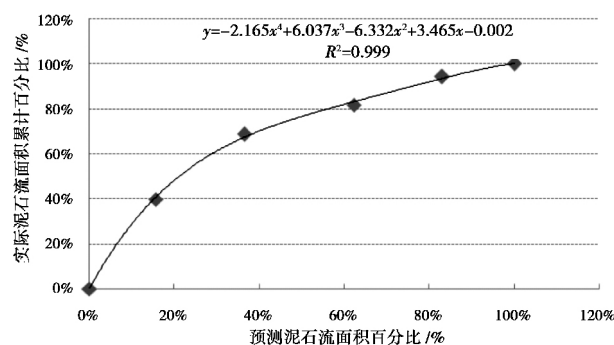


图3 泥石流易发性评价结果检验曲线

Fig. 3 Check graph for debris flow susceptibility map

受到影响;②地质图的比例尺偏小,导致地层岩性的划分存在一定的误差,进而可能对岩土类型因子的权重值产生影响。

6 结论

干热河谷区植被覆盖稀少,岩石风化强烈,泥石流活动频繁。基于野外调查及遥感解译建立研究区的地质环境数据库,选取影响泥石流发育程度的8个代表性因子,并利用指标熵模型对选取的代表性因子进行敏感性分析,筛选出流域地貌熵值、岩土类型、坡向、坡度、植被归一化指数、月均降雨量等6个因子作为金沙江干热河谷区泥石流易发性评价的影响因子。

指标熵模型是一种二元统计模型,利用此模型不仅能计算单个因子对泥石流发育的敏感性(权重),还能计算单个因子中各个分级对泥石流发育的敏感性,使各影响因子的量化及赋值有据可依。单因子各分级的敏感性分析结果显示:奔子栏-昌波河段可能发生泥石流灾害的区域分布在:①强风化的片岩及板岩岩组,中等风化的灰岩及砂岩岩组,特别是强风化的片岩及板岩岩组;②坡度在20°~50°的区域;③坡向为South、Southwest的区域;④流域地貌熵值为<0.01、0.111~0.15、0.2~0.25的区域;⑤月均降雨量在80~83 mm的区域;⑥植被归一化指数为0.1~0.5的区域;⑦8个影响因子的权重排序为:流域地貌熵值>坡向>岩土类型>植被归一化指数>坡度>月均降雨量>相对高度>构造断裂,因此,可以判定地貌、岩土类型、植被是金沙江干热河谷区泥石流发育的重要影响因素。

泥石流灾害具有明显的流域特征,以栅格作为评价单元则忽略了泥石流的流域特性。本文将研究

区划分为 217 个小流域,以小流域为评价单元进行单因子图层的量化,建立干热河谷区泥石流易发性评价模型,制作该区基于流域单元的泥石流易发性分区图。这种划分更符合泥石流发育的实际情况,可以提高泥石流易发性评价的可靠性。

该区泥石流易发性的评价结果表明:泥石流极高易发区和高易发区主要分布在北部的昌波-贡波段、中东部的徐龙-曲雅贡段和南部的金沙江沿岸。经检验泥石流易发性的预测成功率为 69.6%,预测结果良好。由于本文泥石流的易发性评价模型是基于权重系数法获得,统计方法的精度会产生偏差,同时也没有考虑到泥石流自身的形成机理,因此评价因子的合理性及评价结果都可能存在一定的误差。如何选择更加合理的评价因子并建立基于机理分析的泥石流易发性评价模型将是今后研究的重点。

参考文献(References)

- [1] 李阔,唐川. 泥石流危险性评价研究进展[J]. 灾害学,2007,22(1):106-111 [Li Kuo, Tang Chuan. Progress in research on debris flow hazard assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(1): 106-111]
- [2] 刘希林. 泥石流危险度判定的研究[J]. 灾害学,1988,3(3):10-15 [Liu Xilin. Study on the hazard degree of debris flow [J]. Journal of Catastrophology, 1988, 3(3): 10-15]
- [3] 王琼. 基于流域尺度的汶川县震后泥石流危险性评价[D]. 成都: 成都理工大学,2012: 3-6 [Wang Qiong. Potential Debris Flow Hazard Assessment after Earthquake in Wenchuan City Based on Watershed Scale [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012: 3-6]
- [4] 邹强,崔鹏,张建强,等. 长江上游地区泥石流灾害敏感性量化评价研究[J]. 环境科学与技术,2012,35(3):159-163 [Zou Qiang, Cui Peng, Zhang Jiangqiang, et al. Quantitative Evaluation for Susceptibility of Debris Flow in Upper Yangtze River Basin [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(3): 159-163]
- [5] 王学良,李建一. 基于层次分析法的泥石流危险性评价体系研究[J]. 北京: 中国矿业学报,2011,20(10):108-117 [Wang Xueliang, Li Jianyi. Study on indexes system for assessing debris flow risk based on AHP [J]. China Mining Magazine, 2011, 20(10): 108-117]
- [6] 付奇,何政伟,薛东剑. 层次分析法在炉霍县泥石流易发性评价中的应用[J]. 地理空间信息,2012,10(6):139-141 [Fu Qi, He Zhengwei, Xue Dongjian. Application of analytic hierarchy process in evaluating the easy eruption of debris flow disaster in Lu-huo country [J]. Geospatial Information, 2012, 10(6): 139-141]
- [7] 王钧,欧国强,杨顺,等. 地貌信息熵在地震后泥石流危险性评价中的应用[J]. 山地学报,2013,31(1):83-91 [Wang Jun, Ou Guoqiang, Yang Shun, et al. Applicability of geomorphic information entropy in the post-earthquake debris flow risk assessment [J]. Mountain Research, 2013, 31(1): 83-91]
- [8] 谭万沛,王成华,姚令侃,等. 暴雨泥石流滑坡的区域预测和预报——以攀西地区为例[M]. 成都: 四川科学技术出版社,1994: 186-191 [Tan Wanpei, Wang Chenghua, Yao Lingkan, et al. Regional prediction and forecast on the rainfall induced debris flows and soil slides: a case from the Panxi region [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994: 186-191]
- [9] Xu Wenbo, Yu Wenjuan, Jing Shaocai, et al. Debris flow susceptibility assessment by GIS and information value model in a large-scale region, Sichuan Province (China) [J]. Natural Hazards, 2013, 65: 1379-1392
- [11] 张荣祖. 横断山区干旱河谷[M]. 北京: 科学出版社,1998: 1-7 [Zhang Rongzu. Dry valleys in the Hengduan mountains region [M]. Beijing: Science Press, 1998: 1-7]
- [12] 陈剑,崔之久,戴福初,等. 金沙江奔子栏-达日河段大型泥石流堆积扇的成因机制[J]. 山地学报,2011,29(3):312-319 [Chen Jian, Cui Zhijiu, Dai Fuchu, et al. Genetic mechanism of the major debris-flow deposits at Benzilan-Dari segment, the Upper Jinsha River [J]. Mountain Research, 2011, 29(3): 312-319]
- [13] 姚鑫,戴福初,陈剑. 金沙江干热河谷区地质灾害遥感研究[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(5):655-660 [Yao X, Dai FC, Chen J. Analysis of geological disasters in drought-heat vale of Jinsha River by remote sensing [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(5): 655-660]
- [14] Chen J, Dai F C, Yao X. Holocene debris-flow deposits and their implications on climate in the upper Jinsha River valley, China [J]. Geomorphology, 2008, 93: 493-500
- [15] Wang Pengfei, Chen Jian, Dai Fuchu, et al. Chronology of relict lake deposits around the Suwalong paleolandslide in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau: Implications to Holocene tectonic perturbations [J]. Geomorphology, 2014, 217: 193-203
- [16] 徐锡伟,张培震,闻学泽,等. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. 地震地质,2005,27(3):446-454 [Xu Xiwei, Zhang Peizhen, Wen Xueze, et al. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the western Sichuan province and its adjacent regions [J]. Seismology and Geology, 2005, 27(3): 446-454]
- [17] 伍先国,蔡长星. 金沙江断裂带新活动和巴塘6.5级地震震中的确定[J]. 地震研究,1992,15(4):401-409 [Wu Xianguo, Cai Changxing. The neotectonic Activity along the central segment of Jinshajiang fault zone and the epicentral determination of Batang M6.5 earthquake [J]. Journal of Seismological Research, 1992, 15(4): 401-409]
- [18] Vlčko J, Wagner P, Rychlíková Z. Evaluation of regional slope stability [J]. Mineralia Slovaca, 1980, 2(3): 275-283
- [19] Yalcin A. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. Catena, 2008,

- 72: 1 – 12
- [20] Xu C , Xu XW , Yao Q , Wang YY. GIS – based bivariate statistical modelling for earthquake triggered landslides susceptibility mapping related to the 2008 Wenchuan earthquake , China. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology ,2013 ,46: 221 – 236
- [21] Jadda M , Shafri HZM , Mansor SB , et al. Landslide susceptibility evaluation and factor effect analysis using probabilistic frequency ratio model[J]. European Journal of Scientific Research ,2009 ,33 (4) 654 – 668
- [22] Kamp U , Growley BJ , Khattak GA , et al. GIS – based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region [J]. Geomorphology ,2008 ,101 (4) : 631 – 642
- [23] Zezere JL , Garcia RAC , Oliveira SC , et al. Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal) [J]. Geomorphology ,2008 ,94 (3 /4) : 467 – 495
- [24] Li CJ , Ma TH , Sun LL , et al. Application and verification of a fractal approach to landslide susceptibility mapping [J]. Natural Hazards ,2012 ,61: 169 – 185

Susceptibility Assessment Model of Debris Flows in the Dry-hot Valley of the Jinsha River and Its Application

CHEN Jian¹ , LI Yan¹ , XU Chong²

(1. School of Engineering and Technology , China University of Geosciences (Beijing) , Beijing 100083

2. Key Laboratory of Active tectonics and the volcano , Institute of Geology , China Earthquake Administration , Beijing 100029)

Abstract: The Benzilan – Changbo segment of the upper Jinsha River belongs to a typical dry-hot valley area , where it is characterized by a dry-hot climate with little rain and debris flows occur frequently. The sensitivity of impact factors on debris flows in dry-hot valley was analyzed using the index entropy model. A total of 6 factors were served as impact factors for debris flow susceptibility assessment , namely geomorphologic entropy in catchment , lithology , slope aspect , slope gradient , average monthly rainfall and normalized vegetation index. Considering watershed characteristics of debris flow , the study area is divided into 217 small catchments. Taking the small catchments as unit for susceptibility assessment of debris flow , and a susceptibility division map was made using weighted coefficient method. The results show that very high and high susceptibility area mainly are distributed in the Changbo – Gongbo segment of the north , Xulong – Quyangong segment of the east-central and along the banks of the Jinsha River of the south. The area with very high and high susceptibility accounts for 36.4% of the total area of the study area , and the area of debris flow in these two areas was 58% . The success rate of the debris flow susceptibility assessment was 69.6% .

Key words: catchment unit; dry-hot valley; debris flow; entropy of index; susceptibility assessment