

基于GIS的云南小江流域滑坡因子敏感性分析^{*}

兰恒星¹ 伍法权² 周成虎¹ 王思敬²

(¹中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室 北京 100101) (²中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

摘要 进行滑坡因子敏感性分析是滑坡研究的一个重要的步骤, 有利于研究滑坡的变形破坏机理及分析滑坡的空间分布规律。采用滑坡确定性系数的方法对云南小江流域进行了影响因子敏感性分析, 确定了有利于滑坡发育的岩性、结构、坡度、高程、断裂等影响因子。

关键词 滑坡稳定性, 滑坡确定性系数, 因子敏感性, 地理信息系统

分类号 P 642.22, P 208

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)10-1500-07

1 引言

确定诱发滑坡失稳的潜在因素是滑坡研究的一个重要的基本步骤。事实上, 滑坡的稳定性主要与岩体的不良岩土工程特性、水文地质岩组的渗透特性等因素有关。这些不稳因素及其空间相关关系可以在GIS系统中可以采用相应的图层表示(因子图层)^[1]。滑坡变形失稳危险性评价需要通过研究滑坡滑动历史上造成滑坡失稳的因素特征来预测滑坡将来的运动, 包括滑动的时间和部位。对于任何一种滑坡稳定性评价的方法, 必须对滑坡影响因子敏感性进行充分研究, 特别是过去滑坡失稳的机理的研究和将来滑坡可能失稳的触发性关键因素的研究。

可能造成边坡失稳的因素可以分为两组^[2]: 降低剪切强度, 增加下滑力的因素以及增加剪切强度和抗滑力的因素。根据各种因子的影响方式的不同又分为内在因素(静力要素)和外在因素(动力要素)。内部因素决定了滑坡分布的特征和规律, 外在因素与老(古)滑坡的再活动有关。在许多文献中涉及了滑坡诱发因素的研究^[3~6]。

云南小江流域是滑坡泥石流等地质灾害极为频繁的地区, 其中蒋家沟更有地质灾害博物馆之称^[7]。本文采用相关模型在GIS中对小江流域滑坡变形失稳的影响因子进行了详细的讨论, 以便对流域的治

理及灾害防治提供科学的依据。

2 研究区概况

小江流域位于滇东北, 地理坐标是北纬25°32'~26°35', 东经102°52'~103°22', 面积3 086 km², 主要属东川市管辖的小江流域(图1), 该区小江深大活动断裂纵贯南北, 新构造运动强烈, 地震活动频繁, 滑坡、泥石流等地质灾害严重, 斜坡稳定性差, 分布有众多级别不同的滑坡, 区域工程地质条件极为复杂。图1为小江流域的数字高程图, 根据高程范围的不同, 采用不同的色度表示。

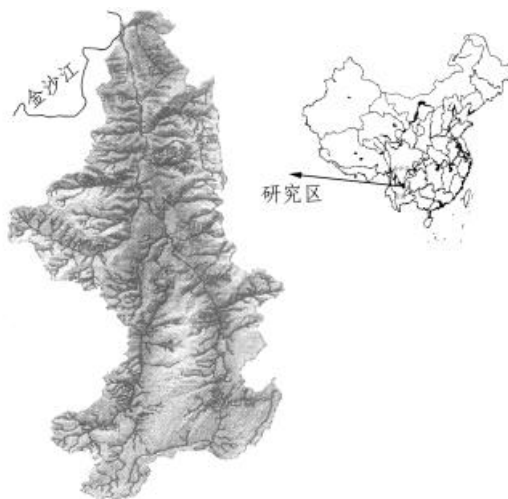


图1 研究区概况

Fig.1 Study area

2001年12月2日收到初稿, 2002年1月3日收到修改稿。

^{*} 中国科学院特别资助领域项目“山地灾害——滑坡泥石流基础研究”。

作者 兰恒星 简介: 男, 29岁, 博士, 1995年毕业于山东科技大学地球科学系, 现为中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室博士后, 主要从事地理信息系统及工程地质力学研究。

地层发育较齐全，从元古界昆阳群变质岩系到中生界侏罗系均有分布，尤以玄武岩、变质岩分布最为广泛。沟谷发育、岩层破碎。第四系主要分布在断陷及山间盆地和河谷区，以洪积相分布最广。根据地层岩性及年代特征，将地质年代相近、岩性类似的地层组合到一起，形成新的岩性岩石组合，每一种岩性组合具有相近的形成年代及相似的工程地质特性、水文地质特性，以利于进行有效的滑坡稳定性分析。其具体划分见表 1 和图 2。

表 1 岩性岩组划分

Table 1 Lithology formation classification		
代码	包括地层单元	岩性组合
Q	Q	第四系洪积、湖积砂、砾石
N	N	第三系泥岩
J	J	侏罗系泥岩、粉砂岩
T ₂₋₃	T _{2g} ¹ , T _{2g} ² , T _{3x}	三叠中上统灰岩、白云岩、砂岩
T ₁	T _{1f} , T _{1y}	三叠下统砂岩、泥岩、灰岩
P ₂	P ₂ , P _{2β}	二叠上统石英砂岩、玄武岩
P ₁	P _{1l} , P _{1q} , P _{1m}	二叠下统灰岩、白云岩粉砂岩
C-D ₃	C ₁ , C ₂ , C ₃ , D _{3gz}	石炭-泥盆系白云岩、灰岩砂岩、页岩
D ₂ -O	D ₂ , D ₁ , S, O	泥盆-奥陶系白云岩、灰岩、砂岩
	1, 2, 3	寒武系砂岩、粉砂岩夹灰岩、白云岩
Zz _{2d}	Zz _{2d} , Zz _{2dn}	震旦系白云岩
Zz ₁₋₂	Zz _{1c} , Zz _{2n}	震旦系砂岩、砾岩
P _{te}	P _{te}	昆阳群鹅头厂组板岩夹灰岩、白云岩
P _{tl}	P _{tl}	昆阳群落雪组硅化白云岩
P _{ty}	P _{ty}	昆阳群因民组绢云板岩、角砾岩夹白云岩
P _{tm}	P _{tm}	昆阳群美党组绢云石英板岩、绢云板岩
P _{td}	P _{td}	昆阳群大龙组白云岩、灰岩夹板岩
P _{th}	P _{th}	昆阳群黑头山-草岭组千枚岩、板岩、石英砂岩、白云岩

根据岩体的结构面特征及其物理力学性质对岩体结构类型进行详细划分，对整个流域的岩体结构类型划分为块状结构硬质岩岩组(II1)、层状结构硬质岩岩组(II1)、层状结构硬质岩夹软质岩岩组(II2)、层状结构硬质岩与软质岩互层岩组(II3)、镶嵌结构硬质岩组(III1)、层状碎裂结构岩组(III2)、碎裂结构岩组(III3)等 7 种类型，得到小江流域的结构岩组分布(图 3)。表 2 为碎裂结构岩组的主要分布区及其工程地质特性。

3 滑坡发生确定性系数

采用确定性系数 CF 进行滑坡的危险性区划的假定，是指滑坡的危险性可以根据过去滑坡与确定

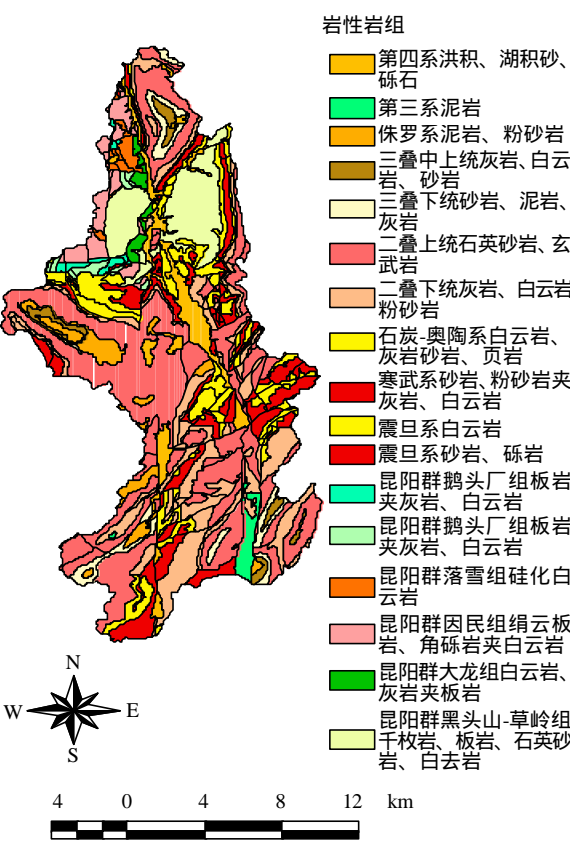


图 2 小江流域岩性岩组分布

Fig.2 Lithology formation distribution

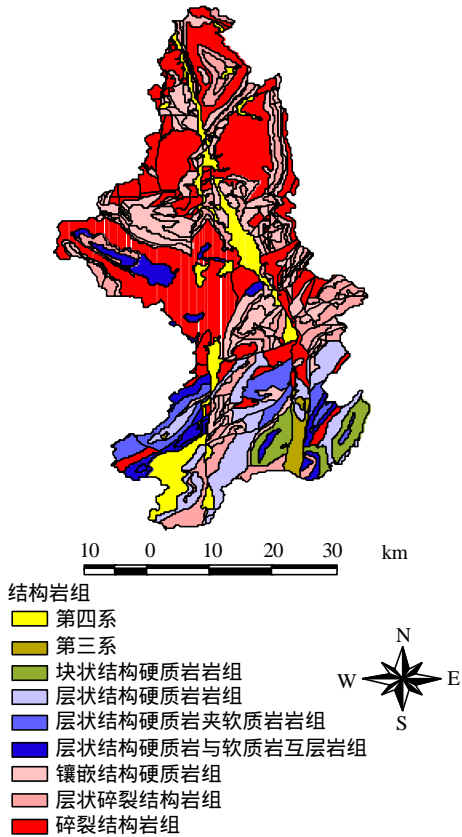


图 3 小江流域结构岩组

Fig.3 Structure formation in Xiaojiang watershed

表 2 碎裂结构岩组(3)划分表

Table 2 Classification of structure formation(3)

地层 代号	主要分 布地区	工程地质特性
P _{th}	板岩为主, 夹少量白云岩砂岩, 裂隙发育, 岩体破碎, 结构面间距小于 30 cm, 崩塌发育, 侵蚀强烈,	
P _{hs}	汤舟和绿	
P _m	茂以北	是大多数泥石流沟物质的主要补给源。R _c =109.64
P _{te}		MPa, R _s =3.5 MPa, j=37°18', E=24.32×10 ³ MPa
P _{2β}	玄武岩夹凝灰岩, 表层受构造、风化作用多呈碎石, 小江流域 侵蚀强烈, 局部受凝灰岩控制形成滑坡, 是泥石流广大地区 沟固体物质的另一重要补给源。R _c =145.46 MPa, R _s =15.54 MPa, j=43°40', E=84.2×10 ³ MPa	

注: R_c—抗压强度平均值(MPa), R_s—抗剪强度平均值(MPa), E—静弹性模量平均值(MPa)。

为诱发因素的数据集(地质、地形等)之间的统计关系进行确定。即未来滑坡在达到与自己或相似条件地区的其他滑坡发生时所处的相似的环境条件时, 将发生滑动。这些类比的滑坡可以是位于研究区, 也可以位于研究者已经掌握了滑坡发生与诱发因素之间相关关系的类似条件地区。其适用的模型单元类型为网格单元和均一条件单元。

CF 作为一个概率函数, 最早由 Shortliffe 和 Buchanan(1975)提出, 由 Heckerman(1986)进行改进, 表示为下式^[8]:

$$CF = \begin{cases} \frac{PP_a - PP_s}{PP_a(1 - PP_s)} & \text{if } PP_a > PP_s \\ \frac{PP_a - PP_s}{PP_s(1 - PP_a)} & \text{if } PP_a < PP_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: PP_a 为事件(滑坡)在数据类 a 中发生的条件概率, 在实际滑坡应用时可以表示为代表数据类 a 的单元中存在的滑坡面积与单元面积的比值; PP_s 为事件在整个研究区 A 中发生的先验概率, 可以表示为整个研究区的滑坡的面积与研究区面积的比值。

通过式(1)函数变换, CF 的变化区间为[-1, 1]。正值代表事件发生确定性的增长, 即滑坡变形失稳的确定性高, 此单元为滑坡易发区; 负值代表确定性的降低, 表示滑坡变形失稳的确定性低, 不易发生滑坡; 接近于 0 值代表先验概率与条件概率十分接近, 事件发生的确定性不可能进行确定, 即此单元不能确定是否为滑坡易发区。

计算出每一数据层的 CF 后, 需要将不同数据层的 CF 进行合并。假定要合并 2 个数据层的 CF 分别为 x 和 y, 合并后的结果为 z, 合并公式如下式:

$$z = \begin{cases} x + y - xy & x, y \geq 0 \\ \frac{x + y}{1 - \min(|x|, |y|)} & x, y \text{ 符号相反} \\ x + y + xy & x, y < 0 \end{cases} \quad (2)$$

每个因子数据层的 CF 计算及合并均在 GIS 中完成。首先将因子数据层按一定规则进行划分为不同的数据类别, 然后在 GIS 中将每个因子数据层与滑坡层进行叠加, 计算因子层中每一数据类中滑坡的面积, 滑坡的面积与数据类的面积相比得到滑坡在此数据类中发生的频度。根据公式(1)进行 CF 的计算, 从而确定因子层的每一数据类对于滑坡发生的影响程度, 进行因子的敏感性分析。将因子数据层的 CF 值按式(2)两两进行合并, 按一定规则对合并后的 CF 值进行重新划分, 得到滑坡变形失稳危险性区划结果。通过与新的滑坡数据的对比, 可以确定每一种影响因子对滑坡发生的影响程度, 确定滑坡发生的关键因子。

4 滑坡因子敏感性分析

小江流域滑坡灾害分析选取的滑坡影响因子主要包括岩性、结构、断裂、坡度、坡向和高程、岩土工程参数分区等 7 个主要因子。对每个因子进行分组, 具体的分组结果见表 3。

表 3 滑坡因子选取及分类

Table 3 Landslide factor selection and group

滑坡因子	分 组
岩性	Q, N, J, T ₁ , T ₂₋₃ , P ₂ , P ₁ , C-O, Z _{z2d} , Z _{z1-2} , P _{te} , P _{tl} , P _{ty} , P _m , P _{td} , P _{th}
结构	II, III1, III2, III3, III1, III2, III3, N, Q
断裂	0, 11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 33, 41, 42, 43
坡度/(°)	0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60, 60~70, >70
坡向	北, 北东, 东, 东南, 南, 南西, 西, 西北
高程/m	300~500, 500~1000, 1000~1500, 1500~2000, 2000~2500, 2500~3000, 3000~3500, 3500~4000, >4000
岩土工程参数	根据数值相同间隔分为 5 类

将小江流域所有的因子在 GIS 中进行叠加分析, 得到进行统计计算的近 2×10⁵ 个均一条件单元。对于那些没有实际意义的小多边形、畸形多边形予以删除。每个均一条件单元均包含每一个影响因子

的单一条件分组(见图 4 和表 4, 表中“断裂分段缓冲”的含义见 4.2 节), 从而可以认为单元之间是相互独立的, 有利于进行统计分析。

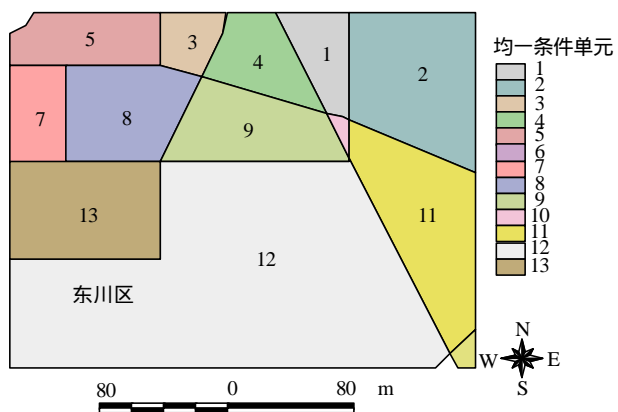


图 4 小江流域均一条件单元划分示例
Fig.4 Unique condition unit classification

表 4 部分均一条件单元属性
Table 4 Attribute of unique condition units

代 号	结 构 类 型	坡度范围 /(°)	坡 向	高程范围 /m	断裂分 段缓冲	凝聚力范围 /kPa
1	III2	10~20	西	1 000~1 500	缓冲区以外	22.2~27.6
2	III2	20~30	西	1 000~1 500	缓冲区以外	22.2~27.6
3	III2	0~10	西	1 000~1 500	达朵-阿旺 2~4 km	22.2~27.6

根据滑坡因子各分类的滑坡发生频率(条件概率: 分类中滑坡面积/分类面积)与整个研究区滑坡发生频率(先验概率: 滑坡总面积/流域面积)计算每个滑坡因子的滑坡失稳确定性系数 CF , 分析各滑坡因子对滑坡发生的影响作用及程度, 并确定影响滑坡发生的关键性因子。

4.1 岩性岩组与结构岩组

斜坡岩土体岩性及其结构特征对于滑坡变形失稳的影响是显而易见的, 它们是决定斜坡岩土体强度、应力分布、变形破坏特征的基础, 同时是滑坡等地质灾害的物质基础。应指出的是岩体结构特征对滑坡稳定性的影响在于地质结构面特别是软弱结构面的控制作用, 这些软弱结构面往往构成滑坡体的滑动面和滑坡体的切割面。

小江流域的岩性岩组与结构岩组的滑坡发生确定性系数 CF 的计算结果分别列于表 5 和表 6 中。从岩性岩组各个分类的 CF 值可以看出: 元古界的昆阳群、震旦系、寒武系及第四系的松散沉积物均提供了有利于滑坡发生的岩性特征, 特别是昆阳群

的鹅头厂组、大龙组、黑头山-草岭组、震旦系及寒武系的白云岩、砂岩等的滑坡发生确定性系数大于或接近于 0.5(图 5), 对于滑坡的变形失稳具有显著的影响作用。其他岩性的地层相对来讲比较稳定。

结构岩组中 CF 值大于 0 的结构类型无一例外地落入 III 类结构岩组中, 说明小江流域的岩土体的碎裂结构对滑坡的发生有至关重要的影响和控制作用。然而, 最具显著影响作用的并非通常认为的层状碎裂结构, 而是镶嵌结构(CF 值接近于 0.5)。这就决定了小江流域的滑坡以中小型滑坡为主, 而较少见巨型及大型滑坡。

表 5 岩性岩组分级及 CF 值确定
Table 5 CF of lithology formation

代码	面积 / km ²	滑坡面积 / km ²	滑坡频率 / %	CF
Q	173.137	9.729	5.619	0.279
N	37.828	0.000	0.000	- 1.000
J	94.111	0.935	0.993	- 0.766
T ₁	88.851	2.817	3.171	- 0.237
T ₂₋₃	48.396	1.186	2.450	- 0.415
P ₂	949.676	28.737	3.026	- 0.273
P ₁	408.498	15.839	3.877	- 0.061
C-O	90.012	5.827	6.474	0.379
	299.271	26.086	8.717	0.550
Z _{z2d}	225.093	36.295	16.124	0.777
Z _{z1-2}	18.250	0.829	4.545	0.098
P _{te}	21.708	1.609	7.412	0.464
P _{tl}	25.582	0.892	3.485	- 0.159
P _{ty}	29.720	1.346	4.530	0.009
P _{tm}	125.657	4.839	3.851	- 0.067
P _{td}	26.623	3.747	14.075	0.608
P _{th}	224.429	30.836	13.741	0.730

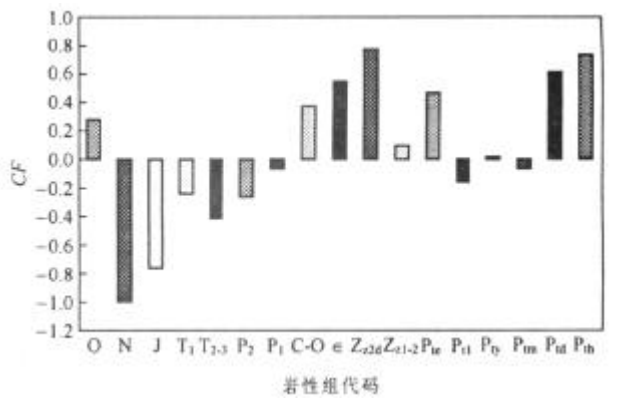


图 5 岩性岩组 CF 值
Fig.5 CF of lithology formation

表 6 结构岩组 CF 值

Table 6 CF of structure formation

结构类型	面积 / Km ²	滑坡面积 / Km ²	滑坡频率 / %	CF
II	91.075	0.000	0.000	- 1.000
III1	240.692	0.208	0.087	- 0.978
II2	132.895	0.268	0.202	- 0.953
II3	217.058	0.749	0.345	- 0.919
III1	583.086	39.768	6.820	0.410
III2	372.154	17.868	4.801	0.173
III3	1 038.917	52.002	5.005	0.185
N	37.828	0.000	0.000	- 1.000
Q	173.137	3.765	2.175	0.279

4.2 断 裂

小江流域的断裂活动以小江深大断裂带最为重要。小江断裂带的新构造运动和地震活动强烈，而且具有明显的继承性，主要表现为区域性隆起、局部掀斜、老断裂复活及高原面解体等。小江断裂带构成了强烈的地震带，据史料记载，每百年发生一次大地震，小震几乎年年都有发生。新构造运动加速山体抬升和河谷下切，地震则直接破坏山体稳定，降低岩石强度，增加了固体物质的来源，加剧了滑坡、坍塌、泥石流等不良地质现象的活动过程。

北北西-近南北向的小江断裂在几何结构上呈现复杂的分段特征，不同段之间存在明显的差异(李坪，1993)。为在 GIS 中定量分析小江断裂对于滑坡的控制作用，对小江断裂进行了分段，并作了不同距离的缓冲分析，得到不同的断裂影响分区。根据小江断裂空间分布的几何特征，将其分为 4 段，即江口至达朵段、达朵至小清河道、达朵至阿旺段、阿旺至功山段。对小江断裂每一段分别进行距离为 500，2 000，4 000 m 的缓冲分析，将小江流域分为断裂不同的影响区(表 7、图 6 及前表 3)。

对每一分区进行了滑坡发生确定性系数 CF 值的计算，结果如表 8 所示。从表中可见：小江流域的滑坡分布明显受断裂活动控制，但小江断裂不同分段对于滑坡的影响程度不同，其中以江口 - 达朵段，达朵 - 阿旺段的影响最为显著，达朵至清水海段次之，阿旺至功山段影响最小。

4.3 坡 度

斜坡的坡度一直被认为是影响滑坡稳定性的重要因素，它从几何特征上决定了滑坡的分布；同时，坡度直接决定斜坡的应力分布，控制着滑坡的稳定性。

表 7 小江断裂分段缓冲

Table 7 Buffer analysis of Xiaojiang fault

代码	小江断裂分段	缓冲距离 / m
11	江口 - 达朵	500
12	江口 - 达朵	2 000
13	江口 - 达朵	4 000
21	达朵 - 清水海	500
22	达朵 - 清水海	2 000
23	达朵 - 清水海	4 000
31	达朵 - 阿旺	500
32	达朵 - 阿旺	2 000
33	达朵 - 阿旺	4 000
41	阿旺 - 功山	500
42	阿旺 - 功山	2 000
43	阿旺 - 功山	4 000
0	缓冲区以外	> 4 000

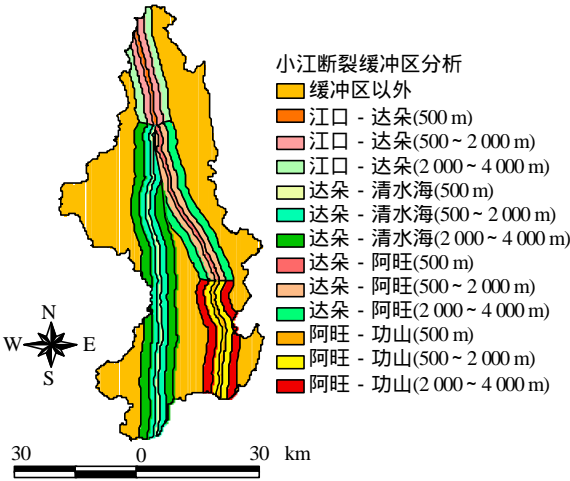


图 6 小江断裂分段缓冲

Fig.6 Buffer analysis of Xiaojiang fault

表 8 小江断裂 CF 值确定

Table 8 CF of Xiaojiang fault

代码	缓冲区距离 / m	缓冲区面积 / km ²	滑坡面积 / km ²	滑坡频率 / %	CF
11	500	26.794	0.923	3.446	- 0.169
12	2 000	77.906	5.539	7.110	0.439
13	4 000	97.273	8.953	9.204	0.576
21	500	82.886	2.407	2.905	- 0.302
22	2 000	237.175	12.003	5.061	0.194
23	4 000	267.063	10.544	3.948	- 0.043
31	500	44.043	0.517	1.173	- 0.590
32	2 000	121.726	8.499	6.982	0.427
33	4 000	136.644	13.059	9.557	0.594
41	500	31.987	1.212	3.788	- 0.010
42	2 000	94.920	0.763	0.803	- 0.980
43	4 000	116.835	1.814	1.553	- 0.632
0	> 4 000	1 450.175	48.395	3.337	- 0.196

小江流域的斜坡以中缓坡为主, 低于 40° 的斜坡占了流域的绝大部分面积(图 7), 尤以 10°~30° 范围内的低缓坡居多。对于不同坡度范围内的斜坡单元进行 CF 系数计算的结果(图 8)表明, 小江流域最利于滑坡发育的坡度范围为 30°~40° 和 40°~50°。

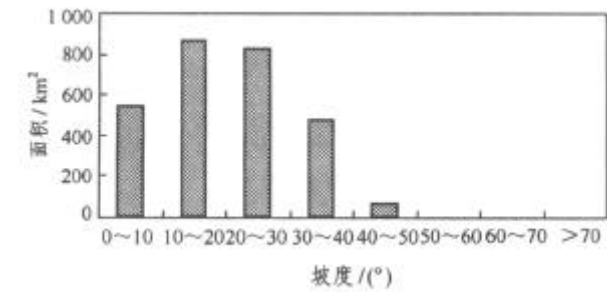


图 7 不同坡度区间所占面积

Fig.7 Area of slope angle group

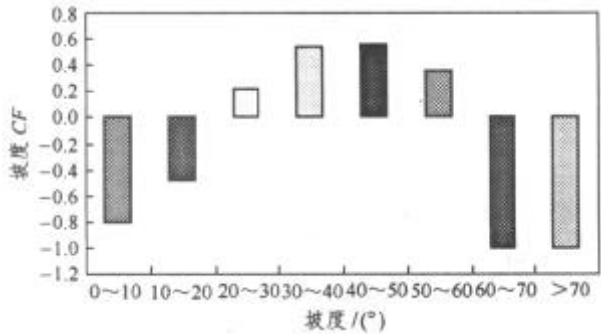


图 8 坡度 CF 值

Fig.8 CF of slope

4.4 高 程

高程与滑坡的变形失稳之间似乎无直接的关系。然而, 从对不同高程范围的 CF 系数的计算结果可以发现(图 9), 小江流域的滑坡发育较有利的高程范围位于 500~1 500 m 和 1 500~2 000 m 的范围之内, 主要集中于小江流域的中下流区域。

高程对滑坡的分布产生影响一个原因是不同的高程范围具有不同的植被类型和植被覆盖率。然而, 更重要的原因在于高程与地区的降雨之间具有很好的相关性。虽然小江流域的降雨量与高程的总体规律是高程高的地方, 降雨量较大, 但由于真正对滑坡的稳定性起作用的是由于降雨所引起的地下水位的变化, 从而造成孔隙水压力的变化。降雨过程导致了地表和地下径流, 进而地形控制着径流的分布。在地下水容易聚集的部位, 会造成相对于滑面较高的水位, 即滑坡的饱和因子较大, 位于此区的滑坡容易失稳。因此, 水文因素对于滑坡稳定性的影响的真正的原因是斜坡不同部位的集水能力的

不同, 在数值上表示为集水区面积, 或比集水区面积。小江流域的 500~2 000 m 的高程范围内的斜坡的比集水区面积较大的单元所占比例较大, 同时此高程范围为断裂显著影响区, 因此滑坡容易发生于这个高程范围内。

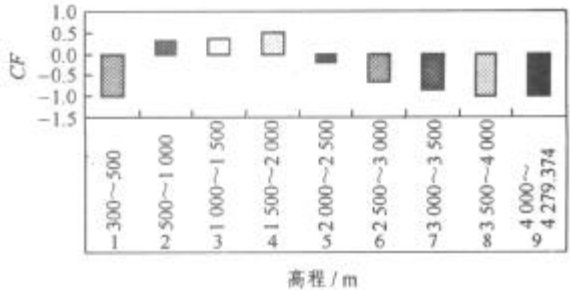


图 9 各高程范围滑坡发生的确定性程度

Fig.9 CF of elevation group

4.5 坡 向

一般认为, 不同斜坡坡向的太阳辐射强度等条件不同, 影响了水蒸发量、植被覆盖、坡面侵蚀等诸多因素, 从而影响了斜坡的地下水孔隙压力的分布及岩土体物理力学特征, 因而影响了斜坡及滑坡的稳定性。

将小江流域的坡向划分为 8 个级别, 并计算每一类别的 CF 系数(表 9)。可以看出, 利于滑坡发生的坡向条件为北、南及西北向。

表 9 坡向分级及 CF 值确定
Table 9 CF of aspect group

坡向	面积 / km ²	滑坡面积 / km ²	滑坡频率 / %	CF
北	278.710	13 679 478.335	4.900	0.166
北东	323.008	11 400 248.944	3.500	- 0.155
东	381.511	11 022 466.863	2.900	- 0.300
东南	388.605	13 907 244.081	3.600	- 0.130
南	291.904	16 479 417.796	5.600	0.276
南西	314.919	10 152 650.169	3.200	- 0.230
西	429.496	14 640 267.213	3.400	- 0.180
西北	377.030	23 174 486.234	6.100	0.339

4.6 岩土工程参数

岩土工程参数分区对于滑坡的影响应与地层岩性结合起来进行评价才有较为实际的意义, 以粘聚力分区为例, 大家知道, 粘聚力越低, 滑坡变形失稳的可能性越大, 即 CF 值应越大。从粘聚力分区的 CF 计算结果中(表 10)可以看出, 滑坡发生的确定性并未完全依照这个规律。因此, 在进行实际的

表 10 粘聚力区间划分及 CF 值确定
Table 10 CF of cohesive force group

代码	粘聚力分级 / kPa	面积 / m^2	滑坡面积 / km^2	滑坡频率 / %	CF
1	6 ~ 11.4	427.492	32.119	0.470	0.470
2	11.4 ~ 16.8	225.822	6.228	- 0.329	- 0.329
3	16.8 ~ 22.2	625.071	33.636	0.248	0.248
4	22.2 ~ 27.6	1 482.143	42.299	- 0.304	- 0.304
5	27.6 ~ 33	25.200	0.343	0.669	- 0.669

分析时, 应将不同岩土工程参数与其载体——岩土体结合起来进行综合评价。

5 结 论

根据滑坡因子敏感性分析, 小江流域最利于滑坡发生的条件是: (1) 岩性: 昆阳群的鹅头厂组、大龙组、黑头山-草岭组、震旦系及寒武系的白云岩、砂岩等; (2) 结构: 碎裂结构, 尤其是镶嵌结构的碎裂结构岩体; (3) 坡度: 为 $30^\circ \sim 50^\circ$ 的中高坡度; (4) 坡向: 南、北、西北向为主; (5) 高程: 位于 $1\ 000 \sim 2\ 000\ m$ 的高程范围内; (6) 断裂: 特别是小江深大断裂对滑坡发育起控制作用。然而小江断裂的不同几何分段部位对滑坡发育的控制作用不同, 控制作用较强的断裂分段为江口 - 达朵及达朵 - 阿

旺段。

致谢 感谢中国科学院成都山地研究所提供的小江流域的数字高程模型数据。

参 考 文 献

- 1 Carrara A, Guzzetti F. Use of GIS technology in the prediction and Monitoring of landslide hazard[J]. Natural Hazards, 1999, 20(2): 117 ~ 135
- 2 孙广忠, 姚宝魁. 中国滑坡地质灾害及其研究[A]. 见: 中国岩石力学与工程学会编. 中国典型滑坡[C]. 北京: 科学出版社, 1988, 1 ~ 11
- 3 Baeza C, Corominas J. Assessment of shallow landslide susceptibility by means of statistical techniques [A]. In : Senneset K ed. Proc. VII Int. Symp. on Landslides [C]. Rotterdam : A. A. Balkema, 1996, 153 ~ 158
- 4 Carrara A. Multivariate methods for landslide hazard evaluation[J]. Mathematical Geology, 1983, 15(3): 403 ~ 426
- 5 Fell R. Landslide risk assessment and acceptable risk[J]. Canadian Geotechnique Journal, 1994, 31(2): 261 ~ 272
- 6 戴福初, 李 军. 地理信息系统在滑坡灾害研究中的应用[J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 91 ~ 96
- 7 杜榕桓, 康志成, 陈循谦等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987
- 8 Heckerman A. Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factors[A]. In : Kanal L N, Lemmer J F ed. Uncertainty in Artificial Intelligence[C]. New York : Elsevier, 1986, 298 ~ 311

ANALYSIS ON SUSCEPTIBILITY OF GIS BASED LANDSLIDE TRIGGERING FACTORS IN YUNNAN XIAOJIANG WATERSHED

Lan Hengxing¹, Wu Faquan², Zhou Cheghu¹, Wang Sijing²

(¹LREIS, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101 China)

(²Institute of Geology and Geophysics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 China)

Abstract Analysis is made on the landslide triggering factor susceptibility in Xiaojiang watershed, Yunnan by means of landslide certainty factor (CF). The presented results are helpful to study the landslide mechanism and spatial distribution characteristics. The factors contributing the landslide occurrence are determined, including lithology, structure, slope, elevation and faults, etc..

Key words landslide stability, landslide certainty factor, factor susceptibility, GIS