

文章编号: 1008-2786-(2007)1-085-08

基于GIS和双变量分析模型的三峡库区 滑坡灾害易发性制图

白世彪¹, 王建¹, 闫国年¹, 周平根², 侯圣山², 徐苏宁²

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210097; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘 要: 在GIS技术的支持下, 以三峡库区忠县-石柱河段为研究区域(面积 260.9 km², 滑坡分布面积 5.3 km²), 建立了地质、地形数据库等滑坡因子空间数据库和滑坡空间分布数据库(数据比例尺均为 1:10万); 在进行滑坡影响因子敏感性分析的基础上, 对双变量分析模型进行了改进应用, 对滑坡影响定量因子采用滑坡种子网格数据驱动的分级新方法。在GIS系统中进行了滑坡危险度评价成果图制图, 将评价结果分为很低、低、中等、高、很高5个等级, 依次占研究区域 19.9%、31.69%、27.95%、17.1%和 3.6%。评价结果显示危险性高和很高的区域主要分布在长江两岸, 这与实际的滑坡分布吻合。研究结果对在三峡库区推广应用、防灾减灾具有实际指导意义。

关键词: 三峡库区; 滑坡; GIS数据驱动; 双变量模型; 易发性制图

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

三峡库区蓄水后, 由于水位上升, 在波浪冲蚀和水库水位变化等因素的综合作用下, 以及库区移民安置相关建设工程活动的影响, 可能会导致部分古滑体的复活和新滑体的产生。由于滑坡本身的复杂性, 对于滑坡的准确预报还很困难。当前的研究主要针对特定区域的滑坡灾害进行危险性评价, 使用准确的、详细的滑坡灾害危险度等级图来指导移民迁建规划, 以最大程度地减少生命和财产的损失。滑坡灾害危险性评价方法可以分为定性方法和定量方法。定性方法主要依赖于评价人员的主观经验对滑坡的变形失稳危险性进行定性描述, 对个人专业知识背景有较高的要求, 在过去20a的文献中很突出。进入20世纪80年代后, 随着计算机技术的发展和GIS的兴起, 在危险性评价中越来越多地使用定量方法, 如统计方法。定量方法具有很高的客

观性, 需要更少的专家知识, 但这些方法的成功使用依赖于数据的数量、质量和可靠性。本文在GIS技术支持下, 对滑坡影响定量因子采用滑坡种子网格数据驱动的分级新方法, 类属的划分不需要专家的经验, 数据的处理方法是客观的。分级后的定性因子以及定量因子再统一进行量化, 再进入双变量统计分析模型进行运算。弥补了已有的双变量统计分析模型存在主观性较强、准确性较差等缺陷。并以三峡库区的忠县-石柱河段为样区, 进行实证研究。

1 研究区域

研究区域为忠县-石柱河段(图1), 是三峡库区滑坡灾害严重的区域之一, 也是滑坡灾害比较典型的地区。范围为 107°86'~108°15'E, 30°11'~

收稿日期(Received date): 2006-06-13; 改回日期(Accepted): 2006-10-15

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展规划项目(2003CB41520128); 国家自然科学基金(40572097); 国家教育振兴计划教育部青年奖励基金项目(2001JBC12); 江苏省普通高校自然科学研究计划资助项目(06KJB170063)和南京师范大学高层次人才科研启动基金项目(2006105XGQ0036) [This study was supported by the National Key Project for Basic Research Development Planning (2003CB415201), National Natural Science Foundation of China (40572097), The Foundation for Excellent Youth Teacher from the National Education Administration (2001JBC12), The Natural Science Foundation of Jiangsu Higher Education Institutions of China (06KJB170063) and the Foundation for the Excellent Youth Teacher from Nanjing Normal University (2006105XGQ0036).]

作者简介(Biography): 白世彪(1974-), 男, 讲师, 主要从事自然地理学、滑坡风险评价和GIS应用与开发等方面的研究, E-mail: shibiao21@163.com [Bai Shibiao (1974-), male, doctor, research interests includes Physical Geography, Risk Evaluation of Landslide Hazard, GIS Development and Application.]

30. 37°N, 行政区域上处在重庆市的忠县和石柱县。考虑到数据源特征和投影类型应用的广泛性, 研究采用 Albers 等面积投影, 中央经线 105°, 椭球体 Krasovsky_1940, 矢量化图面计算面积为 260 928 320 m², 其中水域面积为 50 535 527 m², 滑坡分布面积为 5 318 941 m²。

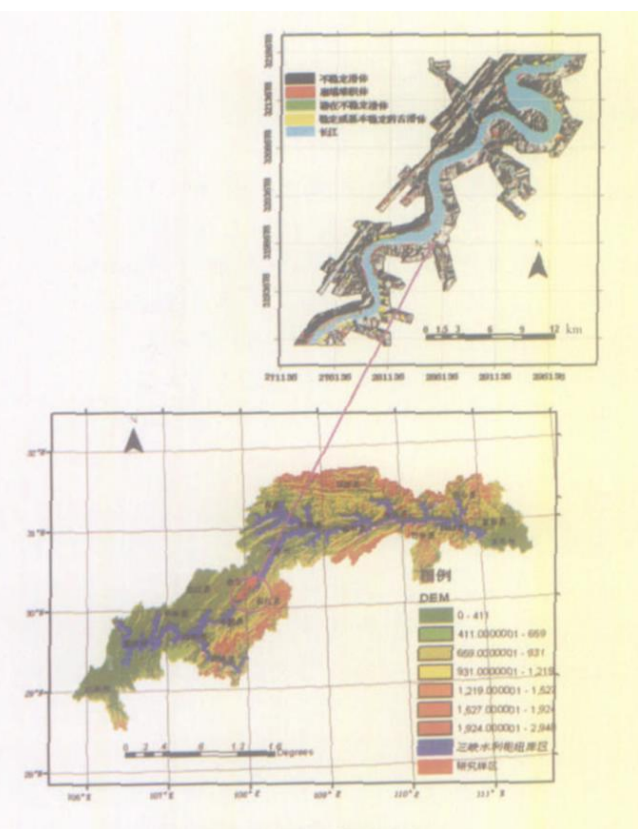


图 1 研究区域位置图

Fig 1 Location of the study area

2 GIS滑坡空间数据库的建立

对研究区内已有的图件¹⁾、报告、文献等资料数据进行搜集和整理, 包括 RS 影像、第四纪地质图、土壤图和 DEM 等, 对所有的资料进行数字化和相关数据录入, 建立滑坡基础空间数据库, 包括滑坡因子空间数据库和滑坡数据库, 其中滑坡数据库包括滑坡体数据库和滑坡体种子网格数据库。

2.1 滑坡因子空间数据库

1. 岩性地层: 三峡地区各个时代的地层, 按照岩相建造和岩体结构特征, 可以划分为块状岩浆岩组、层状碎屑岩组、层状碳酸盐岩组、片状变质岩

组和松散堆积岩(土)组等五种工程地质岩组^[1]。研究区域地层出露以第四系和侏罗系为主, 根据地层岩性及年代特征, 将地质年代相近、岩性相似的地层合并组合, 同时根据已有的库区滑坡和地层分布关系的研究结果^[2-4], 为了方便统计分析, 将面积较小和滑坡分布与较少的地层进行了合并, 形成 7 种地层岩性岩石组合和三种工程地质岩组。

2. 地形数据: 有关地形因子均是从数字高程模型(DEM)中派生提取。从 1: 5 万 GRID DEM 中提取高程、高差、坡度、坡向和地面形态等地形地貌因子。在 GIS 软件 ArcGIS 和 Surfer 中可以方便地提取高程、高差、坡度、坡向和地面形态等派生因子^[5-6]。

3. 土地覆被: 土地覆被等信息数据以研究区域 2000-07-31, 轨径号 127-39 的美国 Landsat 卫星 TM 遥感数据为基础数据源, 经过波段选择与组合、几何精纠正、人机交互目视解译判读或模型模拟等遥感技术进行土地覆被、植被覆盖等信息提取。

4. 土壤类型: 土壤类型来自于土壤类型分布图的数字化。

5. 其他因子: 包括了到河流距离、到公路的距离和到居民点的距离三个评价因子。从目前三峡库岸众多的崩滑体分布来看, 由于河流掏蚀坡脚产生了众多的临空面, 致使大量滑移控制面得以暴露, 才使得三峡库区滑坡如此的发育。有必要考虑距离河流远近这一指标; 到居民地距离和到公路的距离主要是考虑人为因素对滑坡的影响作用。滑坡虽然是一种自然地质过程, 但是由于人类的活动而使其活动程度远远超过其自然条件下的发展程度。在兴修铁路、公路时都涉及挖填斜坡的问题, 二者必将使坡体内部应力状态发生重新分配。

2.2 滑坡体数据库

研究区域滑坡体空间分布数据库: 包括古老滑坡(57个)、不稳定滑坡(19个)、潜在不稳定滑坡(2个)和崩塌堆积体(64个)。滑坡体空间分布见图 2。滑坡和崩塌在一定条件下还可以相互转化、相互诱发; 且有时岩土体的重力运动形式介于滑坡式运动和崩塌式运动之间无法鉴别。因此, 将滑坡和崩塌放在一起研究比较恰当^[7], 本文基于这一认识, 在研究中也把滑坡和崩塌放在一起。

2.3 滑坡体种子网格数据库

目前国内外计算滑坡等山地敏感性系数和进行

1) 长江水利委员会综合勘测局。长江三峡水利枢纽库区崩滑体及第四纪地质图(1: 1 万), 内部用图, 1995。

危险性评价的方法可归纳为两类:将滑坡等山地灾害作为面状灾害考虑的面积分析方法^[8-10]和将滑坡等山地灾害作为点状灾害考虑的灾点分析法^[11-12]。在进行滑坡敏感性分析时,因滑坡活动具有流域特性,较适合面积分析方法。对滑坡和崩塌而言,在进行大比例尺($\geq 1:1$ 万)敏感性评估时,可将滑坡和崩塌视为面状灾害。采用面积分析方法最重要的步骤就是要正确地提取作为因变量的滑坡空间范围分布图。通过遥感影像、野外人工调查和直接矢量化滑坡分布图来得到已经发生的滑坡空间范围,这些处理过程中产生的主要误差在于不能精确地标识出滑坡边界的位置^[13-15],导致了大量相关

研究中作为因变量的滑坡空间范围分布图既包括了已经发生滑坡的区域,也包含了部分没发生滑坡的区域^[16-21]。由于包含了没有发生滑坡的区域,就降低了判别规则中有效参数的效果,这样在危险度评价过程中就降低了判别规则的质量。本项研究的滑坡原始数据为 1:1 万的滑坡体的分布图,需要推求滑坡发生前的范围。可以从滑坡多边形区域附近地区提取最好的原状地形状况,来代表滑坡发生前的最佳未扰动的地形。使用一种称为“滑坡体种子网格”(Seed Cells)新方法^[22],即从矢量化后的滑体多边形附近地区提取滑坡发生前地形状况。滑坡种子网格的分布见图 2。

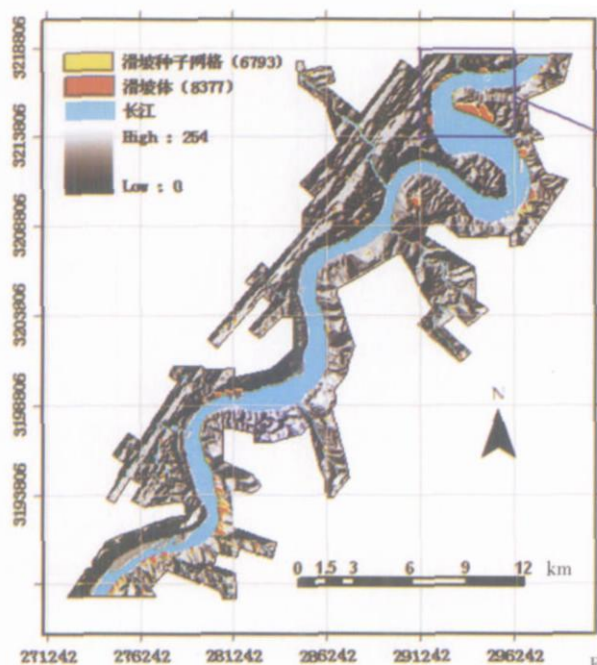


图 2 研究区域滑坡体和滑坡种子网格空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of landslide and seed cells in the study area

3 滑坡灾害易发性制图

3.1 数据驱动的双变量统计分析模型

目前国内外滑坡、崩塌危险性评价普遍采用的数据处理做法,是根据专家的观点将定量因子分成若干类,每个类作为一个定性的因子来处理^[23-29]。在实践中,各因子的量化根据专家的经验来确定在评价中所占的权重,存在主观性较强、准确性较差等缺陷;另一个不足是参与区划的因子不能多,一般 4~5 个,再多了叠置就有困难,且不能反映出各因子的重要程度。针对以上不足,对滑坡影响定量因子采用滑坡种子网格数据驱动的分级新方法,类属的

划分不需要专家的经验,数据的处理方法是客观的。分级后的定性因子以及定量因子再统一进行量化,再进入双变量统计分析模型进行运算。

3.2 定性影响因子类属划分

利用种子网格百分位分类结果对连续因子进行分类属的划分。对定性因子保持其分类不变,对定量因子的各因子层的种子网格进行百分位类型划分(分成 5 类),使用划分的结果对各因子层进行 5 个类属的划分。图 3 以定量因子高程为例示例分类的过程,表 1 为划分结果。这样的数据处理可以对各个影响因子百分位分类权重进行相互比较,随机选取某个因子的百分位分类都可与其他因子的百分位分类进行权重比较。

表 1 定性因子种子网格数据驱动的百分位类属划分
Table 1 The percentiles of seed cells within each quantitative variable

	高程 (m)	高差 (m)	坡度 (°)	到河流 距离 (m)	到居民 点距离 (m)	到道路 距离 (m)
最小值	124	0	0	0	0	0
最大值	495	101	57.6	16.59	3 361	4 656
20	158	12	10	48	285	220
40	187	17	15	104	496	674
60	217	22	18.5	177	743	1 224
80	252	27	21	252	1 096	1 906
100	402	88	52.5	887	3 361	4 017

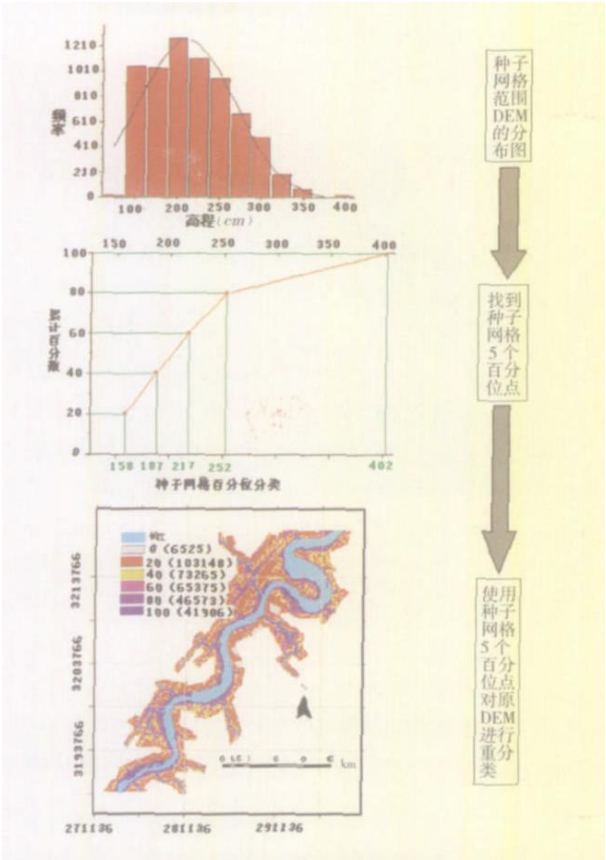


图 3 种子网格百分位分类结果对连续因子重分类
Fig 3 The snapshot of methodology of percentile method and reclassified parameter map production

3.3 影响因子量化

通过计算已经被确认的滑坡体在某一定性或者定量因子某一个类属上的分布情况,用滑坡体在该类属的发生概率和滑坡体在整个定性或者定量因子的概率之比,来表示该种类属相对于其他类属对滑坡发生的作用大小。具体步骤如下:

1. 利用已经建立滑坡影响因子空间数据库,将各参与评价的定性因子按以上提出的数据驱动分级

方法进行类属的划分、重分类;定量因子直接按因子属性进行栅格化。

2. 利用已经建立滑坡体分布数据库和滑坡发生种子网格数据库,分别提取滑坡体和滑坡发生种子网格区域内各因子的属性数据并栅格化。

3. 分别计算滑坡体以及滑坡发生种子网格区和整个研究区栅格每个属性的相对频率,设 P_{mn} 代表因子 m 的某个类属 n 出现的频率,那么滑坡体以及滑坡发生种子网格区和整个研究区栅格的相对频率分别按下面的公式来计算。

对滑坡体以及滑坡发生种子网格区数据

$$DP_{mn}(L) = P_{mn}(L) / P_m(L) \tag{1}$$

对整个研究区栅格数据

$$DP_{mn}(G) = P_{mn}(G) / P_m(G) \tag{2}$$

4. 计算每个因子类属的敏感性

$$PD_{mn} = DP_{mn}(L) / DP_{mn}(G) \tag{3}$$

因为整个研究区栅格数据代表研究区域的地面特征,敏感性则表征了与地面特征相关的滑坡属性的重要程度,如果 $PD_{mn} > 1$ 说明该类属对滑坡发生作用的大小大于该因子的平均水平,也就是说该类属出现的地方,滑坡发生的可能性就大。相反,如果 $PD_{mn} < 1$ 则说明该类属对滑坡发生作用的大小小于平均水平,也即该类属出现的地方发生滑坡的可能性就小。如果 $PD_{mn} = 1$ 则说明该类属对滑坡作用的大小相当于所有类属的平均水平。

按公式 (1)、(2) 和 (3) 依次计算出所有因子的权重 (表 2)。

3.4 评价结果

在滑坡危险性评价中的关键步骤在于栅格图层的叠加 (复合) 运算。由于参与评价的各影响因子与评价成果图之间具有复杂的非线性关系,往往不能用简单的函数关系进行表达。双变量叠加分析模型的滑坡影响因子类属权重计算完全来自于滑坡及其因子数据自身,故不需要额外的对影响因子进行加权或者其他处理,直接进行叠加运算。将以上计算得到的权重重新指定到相关因子的类属,得到 12 个因子权重的栅格文件,栅格文件中栅格单元的值就是以上相应类属的权重大小,再将所有因子权重栅格图层进行叠加运算。使用 12 个滑坡影响因子进行滑坡危险度评价结果见图 4。

3.5 危险度等级制图

目前国内外相关文献关于危险度分级标准的问题很少提及,多数采取的是依照专家个人的经验对

表 2 选定的因子类属及权重

Table 2 Weight values of the all available parameter classes

定性影响因子	坡向	0	北	东北	东	东南	南	西南	西	西北
	类属概率	0.470	0.660	0.460	0.665	1.060	1.090	1.023	1.839	1.175
	地层岩组	310100	320111	320112	320121	320122	320135	320212		
	类属概率	1.689	0.844	0.544	0.307	0.2355	1.874	0.270		
	土地覆被	21	22	23	31	32	41	51	52	112
	类属概率	0.195	0.260	0.761	0.485	0.575	1.989	1.630	1.623	1.334
	土壤	21	23	24	30	33	43	50		
	类属概率	0.637	0.292	0.769	1.786	0.401	0.605	2.052		
	工程岩组	松散	软层	硬层						
	类属概率	1.690	0.832	0.468						
	坡度形状	凹	平	凸						
	类属概率	1.038	0.912	0.973						

		因子类属及概率				
定量影响因子	高程		1.627	1.459	0.915	0.633
	局部高差		0.859	1.021	1.148	0.928
	坡度		0.834	0.942	1.217	0.979
	到居民地距离		1.334	1.054	0.980	0.868
	到河流距离		1.258	1.423	1.385	1.001
	到公路距离		0.821	0.718	1.071	1.489

滑坡危险度评价结果进行分级。如 Suzen 等^[22]使用 0~ 0.25、0.25~ 0.5、0.5~ 0.75 和 0.75~ 1 作为分级边界,将评价结果分为很低、低、高和很高四个危险度等级。金晓媚、刘金韬^[30]在对万县滑坡划分危险性等级时,将危险性划分为四类:极重(危险性指数 > 6)、重度(危险性指数 5~ 6)、轻度(危险性指数 4~ 5)、无危险(危险性指数 < 4); Dai 和 Lee^[31]为了简化计算将香港大屿山危险度评价结果分为四类:很低(0~ 0.2)、低(0.2~ 0.35)、中等(0.35~ 0.5)和高(> 0.5); Lee 和 Min^[32]按面积相等把评价结果分为 10 类; Dai 和 Lee^[33]根据评价结果直方图的分布划分为很低、低、中等、高、很高 5 级,各类的分值分别为 < 0.1、0.1~ 0.3、0.3~ 0.55、0.55~ 0.75、0.75~ 1.0; Gregory C 等^[34]为了评价结果的显示美观,按滑坡危险性百分比分为四类:< 0.1%、0.1%~ 1%、1%~ 10% 和 > 10%。

目前对滑坡灾害危险性评价结果的危险度分级方法国际上都没有统一的标准。在 GIS 软件支持下,全自动对评价结果进行百分位、自然断点、等间隔和标准差的分级划分对比实验。实验表明百分位分类划分的同一级包括的危险性概率值的范围太宽;尽管自然断点的结果可以接受,但数据值会出现很大的跳跃,不适合我们的评价结果的分级;等间隔分级由于过分强调级与级之间范围的一致性,更不适合对评价结果的分级;最后实验得出标准差的分

级划分方法最适合。根据危险度分级方法的选择,对比实验选择了标准差的分级划分方法。以最终评价结果的平均值为基准点,之后加上或减去评价结果的标准差作为分级边界,将结果分为很低、低、中等、高、很高 5 级,得到滑坡危险度评价成果图(图 5)。

4 结论

在过去的 20 多年,许多学者致力于评价滑坡灾害和绘制滑坡危险度图来描述滑坡的空间分布,但至今尚未建立通用的评价方法。本文在 GIS 技术的支持下,对滑坡影响定量因子采用滑坡种子网格数据驱动的分级新方法,类属的划分不需要专家的经验,数据的处理方法是客观的。分级后的定性因子以及定量因子再统一进行量化,再进入双变量统计分析模型进行运算,弥补了已有的双变量统计分析模型存在主观性较强、准确性较差等缺陷,并以三峡库区滑坡灾害较严重的地区之一的忠县-石柱河段为样区,进行实证研究。对该研究区滑坡危险性评价方法和模型方面的深入探讨,对三峡库区的研究具有示范作用,对整个三峡库区滑坡灾害在空间上的预测具有重要的现实意义,同时对于移民工作的合理规划和布局也具有很重要的意义。所以本研究既具有学科意义,又对推广应用、防灾减灾具有实际的指导意义。

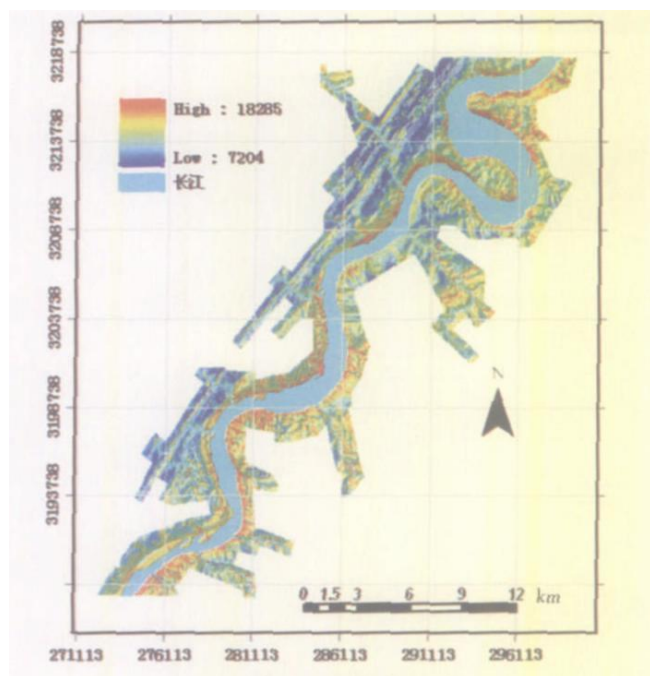


图 4 双变量分析模型评价结果

Fig 4 The probability map obtained after the bivariate analysis

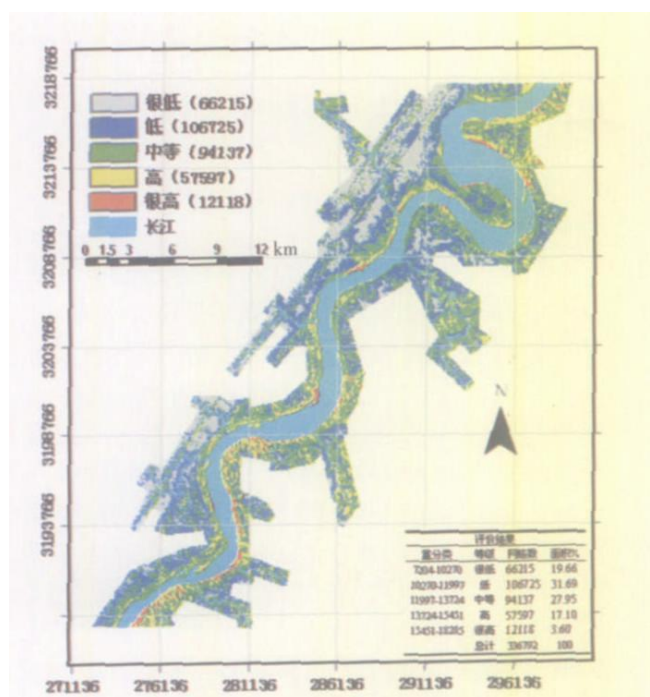


图 5 双变量分析模型得到危险度等级图

(红色表示很高等级, 橙色表示高等级, 绿色表示中等等级, 蓝色表示低等级, 灰色表示很低等级)

Fig 5 The hazard map as a result of bivariate analysis

(Red is very high hazard, orange is high hazard, green is medium hazard, blue is low hazard and gray is very low hazard)

参考文献 (References)

- [1] China Geological Survey. Unstability Problems of the Slope along Yangtze River in the Region of the Three Gorges Project[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988. 1~90 [中国地质调查局编写组. 长江三峡工程库岸稳定性研究[M]. 北京: 地质出版社, 1988. 1~90]
- [2] Du Rongheng, Li Xiuming, Yuan Jianqiang, et al. Study on Landslides and Debris-flows in the Three Gorges[M]. Chengdu: Sichuan Science & Technology Publishing House, 1991. 1~207 [杜榕桓, 刘新民, 袁建模, 等. 长江三峡工程库区滑坡与泥石流研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1991. 1~207]
- [3] Bai Shibiao, L. Guonian, Sheng Yehua, et al. Application of GIS technology during the primary study on landslide hazards in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(3): 386~391 [白世彪, 闫国年, 盛业华. GIS技术在三峡库区滑坡灾害研究中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3): 397~402]
- [4] Bai Shibiao, L. Guonian, Sheng Yehua, et al. Analysis of landslide causative factors using GIS in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2005, 23(1): 63~70 [白世彪, 闫国年, 盛业华, 等. 基于GIS的长江三峡库区滑坡影响因素分析[J]. 山地学报, 2005, 23(1): 63~70]
- [5] L. Guonian, Qian Yadong, Chen Zhongming. Automated extraction of the characteristics of topography from grid digital elevation data[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 1998, 53(6): 562~569 [闫国年, 钱亚东, 陈钟明. 基于栅格数字高程模型提取特征地貌技术研究[J]. 地理学报, 1998, 53(6): 562~569]
- [6] Wang Jian, Bai Shibiao, Che Ye. Surfer 8.0 Geography Information Cartography[M]. Beijing: Atlas Publishing House of China, 2004. 1~235 [王建, 白世彪, 陈晔. Surfer 8 地理信息制图[M]. 北京: 中国地图出版社, 2004. 1~235]
- [7] Wang Wenjun. Characteristics and risk evaluation of collapse and landslide in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Catastrophology*, 2002, 17(4): 54~59 [王文俊. 三峡库区干流崩塌、滑坡的发育特征及危险性评价[J]. 灾害学, 2002, 17(4): 54~59]
- [8] Heckeman A. Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factors[A]. In: Kana LN, Lemmer JF (Eds.). *Uncertainty in artificial intelligence* [C]. New York: Elsevier, 1986. 298~311
- [9] Urmeihy A, Mahdaviar M R. Landslide hazard zonation of the Khorshrostan area, Iran[J]. *Bull Eng. Geol. Environ.*, 2000, 58: 207~213
- [10] Lan Hengxing, Wu Faquan, Zhou Cheghu, et al. Analysis on susceptibility of GIS based landslide triggering factors in Yunnan Xiaojiang watershed[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(10): 1500~1506 [兰恒星, 伍法权, 周成虎, 等. 基于GIS的云南小江流域滑坡因子敏感性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1500~1506]
- [11] He Y P, Xie H, Zhong D L, et al. GIS-based hazard mapping and zonation of debris flow in Xiaojiang Basin, southwestern China[J]. *Environmental Geology*, 2003, 45(2): 286~293
- [12] Ze-zhong He Yiping, et al. GIS-based mapping and zonation of landslide hazards in Xiaojiang valley of Southwest China[J].

- Wuhan University of Natural Sciences, 2003, 8 (3b): 1021 ~ 1028
- [13] Fookes P. G., Dak S. G. and Land J. M. Some observations on the comparative aerial photography interpretation of a landslide area [J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1991, 24: 249~ 265
- [14] Camara A., Cardinali M. and Guzzetti F. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk [J]. *ITC Journal*, 1992, 2: 172 ~ 183
- [15] Van Westen C. J. Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation: a review of principles and practice [R]. ITC Publication No. 15, ITC, Enschede, The Netherlands, 1993. 245
- [16] Gupta R. P., Joshi B. C. Landslides hazard zoning using the GIS approach—a case study from the Ranganaga catchment, Himalayas [J]. *Engineering Geology*, 1990, 28: 119~ 131
- [17] Camara A., Cardinali M., Detti R., *et al*. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard [J]. *Earth Surf Processes Landforms*, 1991, 16: 427~ 445
- [18] Pachauri A. K., Pant M., Landslide hazard mapping based on geological attributes [J]. *Engineering Geology*, 1992, 32: 81~ 100
- [19] Chung. Application of Geographic Information Systems to landslide hazard zonation [R]. ITC Publ 15, Enschede, 1995. 245
- [20] Soeters R., van Westen C. J. Slope instability recognition analysis and zonation [A]. In: Tumer K. T., Schuster R. L. (Eds.). *Landslides: Investigation and Mitigation* [C]. Transportation Research Board National Research Council Special Report Washington, DC, 1996, 247: 129~ 177
- [21] Guzzetti F., Cardinali M., Reichenbach P., *et al*. Comparing landslides maps: a case study in the Upper Tiber basin, Central Italy [J]. *Environ. Manag.*, 2000, 25 (3): 247~ 263
- [22] Su Zhen M. L., Doyuran V. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey [J]. *Engineering Geology*, 2004, 71: 303~ 321
- [23] Kienholz H. Maps of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland, scale 1: 10, 000 [J]. *Arctic and Alpine Research*, 1978, 10: 169~ 184
- [24] Magot J., Mahr T. Engineering geological mapping of the west Carpathian landslide areas [J]. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1979, 19: 116~ 121
- [25] Rupke J., Cammeraat E., Seijndersbergen, A. C. *et al*. Engineering geomorphology of the Widenobbel catchment, Apenzell and Sankt Gallen, Switzerland. A geomorphological inventory system applied to geotechnical appraisal of slope stability [J]. *Engineering Geology*, 1988, 26: 33~ 68
- [26] Gupta R. P., Joshi B. C. Landslides hazard zoning using the GIS approach—a case study from the Ranganaga catchment, Himalayas [J]. *Engineering Geology*, 1990, 28: 119~ 131
- [27] Pachauri A. K., Pant M. Landslide hazard mapping based on geological attributes [J]. *Engineering Geology*, 1992, 32: 81~ 100
- [28] Van Westen C. J. Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation: a review of principles and practice [R]. ITC Publication No. 15, ITC, Enschede, The Netherlands, 1993. 245
- [29] Soeters R., van Westen C. J. Slope instability recognition analysis and zonation [A]. In: Tumer K. T., Schuster R. L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* [C]. Transportation Research Board National Research Council Special Report Washington, DC, 1996, 247: 129~ 177
- [30] Jin Xiaomei, Liu Jintao. Risk assessment of collapse and landslide in Chongqing city [J]. *Journal of Catastrophology*, 1999, 14(1): 25~ 29 [金晓媚, 刘金韬. 重庆市崩塌和滑坡的危险性评价 [J]. *灾害学*, 1999, 14(1): 25~ 29]
- [31] Dai F. C., Lee C. F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong [J]. *Geomorphology*, 2002, 42 (34), 213~ 228
- [32] Lee M. in K. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea [J]. *Environmental Geology*, 2001, 40: 1095~ 1111
- [33] Dai F. C., Lee C. F. and Xu, Z. W. Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau island, Hong Kong [J]. *Environmental Geology*, 2001, 40 (3), 381~ 391
- [34] Gregory C., Ohmacher John C., Davis Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA [J]. *Engineering Geology*, 2003, 69: 331~ 343

GIS-based and Data Drive Bivariate Landslide Susceptibility Mapping in the Three Gorge Area, China

BAI Shibiao¹, WANG Jian¹, LÜ Guonian¹, ZHOU Pinggen², HOU Shengshan², XU Suning²

(1. College of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China;

2. Chinese Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract The construction of the Three Gorges Dam will dramatically increase the landslide risk in the area. Due to its complex nature, it's very difficult to predict the accurate occurring time of landslide. The current research is to do landslide hazard assessment and get accurate and detailed landslide susceptibility maps. The case study area is Zhongxian-Shizhu Segment which is known as one of the most landslide prone areas and selected as a suitable case to evaluate the frequency and distribution of landslide. The site covers area of 260.9 km² with a landslide area of 5.3 km². Four data domains are used: remote sensing products, thematic maps, geological maps and topographical maps. The size of the pixels for all of the products is selected as 25 by 25 meters. Due to the uniformation of precipitation and earthquake, they are not considered for the analyses. The relationship between landslide occurrence possibilities and triggering factors is determined by using the landslide and its causative factors databases. In this study, a new attempt is tried to produce landslide susceptibility map using GIS. A data driven methodology and objective bivariate analysis is used to produce the landslide hazard assessment map. All continuous parameter maps are converted to categorical variables according to the percentile divisions of seed cells, and corresponding weight values of each class is calculated and added up to create the final hazard map. According to the map, 3.6% of the study area is classified as extremely high susceptibility, 17.1% of the study area is classified as high susceptibility, 27.95% of the study area is classified as medium susceptibility, 31.69% of the study area is classified as low susceptibility and 19.9% of the study area is classified as extremely low susceptibility. The results show that the high and very high hazardous zone is along both sides of Yangtze River, which agree with the actual distribution of landslide.

Key words Three Gorge Area; landslide; GIS; data drive; bivariate; susceptibility Mapping

封面照片: 岷江上游河谷

岷江发源于横断山区的岷山弓嘴岭, 流向由北向南, 流至宜宾同金沙江相汇组成长江。岷江在都江堰以上称岷江上游, 处于青藏高原向四川盆地的过渡地带, 穿行于高山峡谷之中, 所经区域地质条件复杂, 内、外地质营力作用强烈, 地震烈度高、活动频繁, 地形与气候变化梯度大, 干旱河谷特征显著, 滑坡、崩塌、泥石流、山洪等山地灾害极其发育, 生态环境十分脆弱。岷江上游有着丰富的植物资源, 上世纪 50~80 年代, 是四川的主要森林采伐区和木材供给地之一。岷江上游还是我国少数民族——羌族的主要聚居区。