

GIS 支持下川滇黔接壤区滑坡危险性评价

史展^{1,2}, 陶和平¹, 刘斌涛¹, 王东坡^{1,2}

(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. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 川滇黔接壤地区是中国滑坡灾害的多发区, 区内共有崩塌、滑坡等地质灾害隐患点 1.2 万余处, 对 100 余万人的生命与财产安全构成威胁, 严重影响当地人民生产、生活安全与可持续发展。选择坡度、相对高差、到活动断裂带距离、年均降雨量和年均大雨日数 5 个因子作为滑坡危险性的评价因子, 在 GIS 支持下获取各因子的贡献权重, 根据贡献率模型在空间叠加下生成研究区滑坡危险性评价图。结果表明: (1) 研究区 $1.92 \times 10^5 \text{ km}^2$ 面积中, 极高危险区 $3.92 \times 10^4 \text{ km}^2$, 高危险区 $4.34 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中危险区 $4.58 \times 10^4 \text{ km}^2$, 低危险区 $3.92 \times 10^4 \text{ km}^2$, 稳定区 $2.42 \times 10^4 \text{ km}^2$, 中度以上危险区面积占研究区总面积的 67.00%; (2) 极高危险区主要分布在小江—安宁河深大断裂两侧以及金沙江、雅砻江等深切河谷中, 显示出活动断裂带和地貌对滑坡危险性的宏观控制作用; (3) 中度以上危险区内人口总量约 1 152.31 万人, 占总人口的 32.17%; GDP 约 419.88 亿元, 占研究区总量的 28.75%, 因此加强川滇黔接壤地区地质灾害防灾减灾能力建设已刻不容缓。

关键词: 滑坡; 危险性评价; 贡献权重; GIS

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)03-0262-05

中图分类号: P954

Evaluation of Landslide Hazards in Border Areas of Sichuan, Yunnan and Guizhou Province Based on GIS

SHI Zhan^{1,2}, TAO He-ping¹, LIU Bin-tao¹, WANG Dong-po^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The border areas of Sichuan, Yunnan and Guizhou Province are greatly hit by landslides. There are 1.2 million hidden dangerous points experiencing geological disasters, which have threaten more than 100 million lives and property security, and have negative effects on production, livelihood security of local people and sustainable development. The five evaluation factors of gradient, relative height distance to active fractures, annual average rainfall and annual average number of heavy rain days are selected to calculate their contribution weights. With the support of GIS, the map for landslide hazard evaluation in the area is drawn by using superposition method and the contribution rate model. Results show that: (1) The study area (about $19.18 \times 10^4 \text{ km}^2$) contains very highly dangerous zone ($3.92 \times 10^4 \text{ km}^2$), highly dangerous zone ($4.34 \times 10^4 \text{ km}^2$), moderately dangerous zone ($4.58 \times 10^4 \text{ km}^2$), slightly dangerous zone ($3.92 \times 10^4 \text{ km}^2$) and stable zone ($2.42 \times 10^4 \text{ km}^2$). The areas of very highly, highly and moderately dangerous zones account for 67.00% of the total area. (2) Very highly dangerous zone is mainly located in the two sides of deep fractures in Xiaojiang—Anning River and deep valleys of Jinsha River and Yalong River, which implies that active fractures and landform play a macro-control effect on landslides. (3) The population in very highly and highly dangerous zones is about 11.5231 million, accounting for 32.17% of the total, and GDP is about 41.988 billion yuan, accounting for 28.75% of the total. So, it is essential to strengthen the capacity of preventing and reducing the geological hazards in the area.

Keywords: landslide; hazard evaluation; contribution weight; GIS

滑坡是山区最常见的自然灾害之一, 它的孕育和发生受多种因素的影响, 这些因素可分为基本因素和诱发因素。基本因素有地形地貌、地层岩性和坡体结

构等; 诱发因素有降雨、地震和人类活动等^[1]。两类影响因素的相互作用, 造成滑坡发生机制十分复杂, 给滑坡的危险性评价带来一定困难。我国西南山区具有

收稿日期: 2011-07-07

修回日期: 2011-09-19

资助项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目“西南山区情势与资源环境安全战略研究”(KZX2-YW-333)

作者简介: 史展(1987—), 女(汉族), 山东省临沂市人, 博士研究生, 主要从事 3S 技术支持下的山地环境与灾害评价研究。E-mail: shizhanlxz@163.com.

通信作者: 陶和平(1952—), 男(汉族), 江苏省镇江市人, 博士生导师, 研究员, 主要从事山地环境与地图学研究。E-mail: thp@imde.ac.cn.

地形复杂、地势起伏大的显著特点,是滑坡灾害多发区。根据四川、云南、贵州3省统计部门提供的数据和野外调查资料分析,川滇黔接壤区内共有崩塌、滑坡等地质灾害隐患点1.2万余处,对100余万人的生命与财产安全构成威胁,严重影响当地人民生产、生活安全与可持续发展,因此本文选取川滇黔接壤区作为西南山区的典型研究区进行滑坡危险性评价的研究。

滑坡灾害危险性评价归纳起来有2种方法:一种是以滑坡分布图和各因素图的叠加,定量、半定量确定滑坡敏感性指标,然后对各敏感性指标进行相加处理,如信息量模型^[2-3],贡献因子权重模型^[4-8]和逻辑回归算法等^[9]。另一种方法是以滑坡影响因素与滑坡关系的理论分析,采用打分或评级的方法赋予各因素以权重系数,再对各权重系数进行相关数学运算,从而得到滑坡危险性区划的定量依据,如层次分析法^[10-12]和网络分析法等^[13]。

1 研究区概况

研究区地处四川省、云南省和贵州省接壤地区,包括川南的凉山彝族自治州、攀枝花市、宜宾市、泸州市和乐山市南部的马边县,云南的昭通市、丽江的华坪县、楚雄东北部的永仁县、元谋县和武定县、昆明北部的东川区 and 禄劝县、曲靖的会泽县、宣威县和富源县,以及贵州的毕节市、六盘水市和遵义西部的仁怀市、习水县和赤水县,共75个县级行政单元。研究区内海拔高差悬殊,既有西南地区典型的高山峡谷区,如木里县,整体海拔在3000 m以上,也包含相对平缓的丘陵区,如宜宾市,海拔在500 m以下,因此该区域是地形较为复杂的区域。区内气候温和,降雨量较大,年平均降雨量在700 mm以上。而区内地层从元古代到第四纪地层均有分布,岩石类型多样,因此区内地质环境极其复杂,地质灾害频繁发生。据不完全统计,该区内地质灾害隐患点约1.22万余处,其中滑坡灾害隐患点达6000余处。

2 评价方法

2.1 贡献权重模型

贡献权重模型^[5,7-8]是根据已有滑坡数据得到评价因子贡献大小确定各因子的影响等级的评价方法,它是进行滑坡危险度分区的定量模型之一。该模型的评价基础是评价因子贡献率的确定,其方法如下:

$$U_{oi} = U_i / \sum U_i \times 100\% \quad (1)$$

式中: U_{oi} ——本底因子贡献率; U_i ——本底因子贡献指数。一般可以选用量密度、面密度和体密度3种指标对本底因子进行贡献程度评价。下同。

自权重和互权重的确定是在本底因子贡献率的基

础上确定的,针对滑坡危险性评价因子等间隔划分不同等级,针对不同等级贡献率确定因子内部自权重,再根据自权重的综合作用确定互权重,其方法如下:

$$\omega_i = U_{oi} / \sum U_{oi} \quad (2)$$

$$\omega'_i = U_{ij} / \sum U_{ij} \quad (3)$$

式中: ω_i ——自权重,无量纲; U_{oi} —— i 因子的贡献率; ω'_i ——互权重,无量纲; U_{ij} ——综合贡献率。

贡献权重模型是利用本底因素及其自权重、互权重相乘得到,其表达式为:

$$H = \sum \omega_i \omega'_i U_i \quad (4)$$

2.2 评价因子量化

滑坡危险性评价流程如图1所示。影响滑坡的因素有很多,本文主要选取坡度、相对高度、地层岩性、多年平均降雨量、年平均日降雨量 ≥ 25 mm大雨日数和到活动断裂带距离6个评价因子。其中,坡度和相对高度数据根据90 m分辨率的SRTM—DEM数据计算得到;地层岩性数据采用全国1:250万地质岩性图;降雨数据采用TRMM卫星测雨数据(来源于中国气象科学数据共享服务网)和地面气象站点降雨数据,数据的空间分辨率是 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为3 h;到断裂带距离采用中国断裂带分布图数字化后计算获取。研究区滑坡危险性评价是在 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 的网格中处理,采用Albers投影方式,中央经度为 105° 。

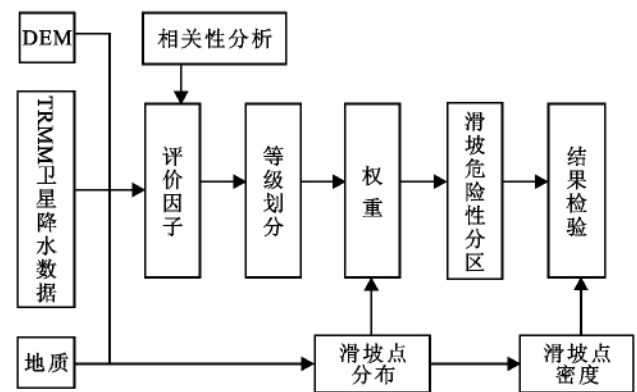


图1 滑坡危险性评价流程

(1) 坡度。由90 m分辨率的SRTM—DEM数据生成坡度图层,以 10° 间隔划分8个等级,即 $0^\circ \sim 10^\circ$ (s_1), $10^\circ \sim 20^\circ$ (s_2), $20^\circ \sim 30^\circ$ (s_3), $30^\circ \sim 40^\circ$ (s_4), $40^\circ \sim 50^\circ$ (s_5), $50^\circ \sim 60^\circ$ (s_6), $60^\circ \sim 70^\circ$ (s_7), $70^\circ \sim 80^\circ$ (s_8),分别统计各等级坡度内滑坡点数量,依据其贡献率归并为5级: $0^\circ \sim 10^\circ$, $10^\circ \sim 20^\circ$, $20^\circ \sim 30^\circ$, $30^\circ \sim 40^\circ$, $>40^\circ$ 。统计数据显示,川滇黔接壤区历史滑坡集中发生 $20^\circ \sim 30^\circ$ 和 $30^\circ \sim 40^\circ$ 的坡度范围内,坡度大于 50° 时滑坡点数量仅占总数的2.61%(图2a)。

(2) 相对高度。相对高度以 100 m 的间隔将其划分为 8 级： $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, h_8 (>700 \text{ m})$ ，得到不同等级的相对高度对滑坡的综合贡献率。根据统计结果，区内滑坡大多发生在高差 200~300 m 的范围内，其次是 300~400 m 范围(图 2b)。

(3) 地层岩性。岩性数据是滑坡发生的一个基本因素，通常滑坡发生的地层称为“易滑地层”，这类岩层一般是软弱岩层或软弱相间的岩层^[1]。因此，根据滑坡分布情况与岩性的统计分析将地层岩性划分为 5 个等级，分级赋值并转换为栅格数据(表 1)。

表 1 地层岩性分级及对滑坡的综合贡献率

等级	岩层类型	岩石组成	数量	贡献率/%
1	极不易滑	花岗岩、花岗闪长岩、正长岩、安山岩等侵入岩及火山熔岩岩组。	57	5.5
2	不易滑	混合岩、片麻岩、石英岩、板岩等岩组，砂岩、砾岩等碎屑岩，后层灰岩、白云岩等。	113	10.9
3	较易滑	弱风化沙砾质碎屑岩，弱风化中薄层灰岩，弱风化片岩、片麻岩、石英岩、板岩等岩组。	208	20.1
4	易滑	弱风化千枚岩、板岩、片岩、片麻岩，泥岩、页岩、煤层等。	282	27.2
5	极易滑	黄土及其他土类，上第三系泥岩、泥灰岩、粉砂岩、砂岩等。	377	36.4

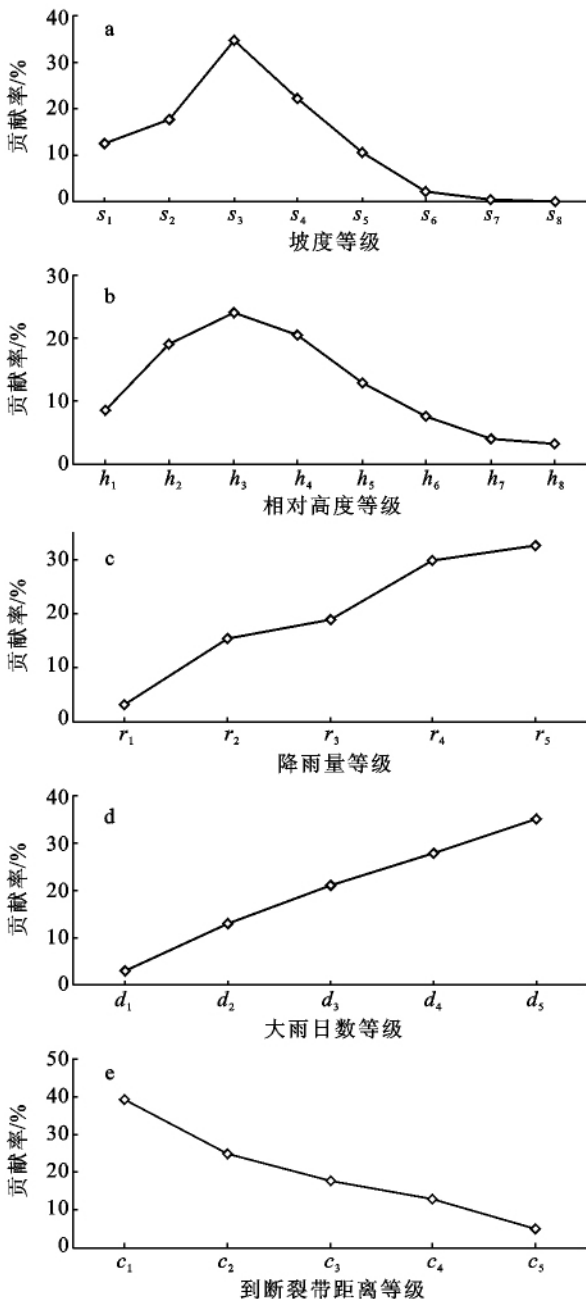


图 2 各因子对滑坡的贡献率

(4) 降雨。降雨的发生(尤其是大雨和暴雨)对滑坡起诱发作用，它通过影响地下水位的变化来影响滑坡发生的可能性及规模，是滑坡危险性区划中不可忽视的一个因素。但受降雨数据的限制现有很多滑坡危险性评价分析中没有考虑该因素，其评价结果存在一定的局限性，因此本文采用多年平均降雨量和年平均日降雨量 $\geq 25 \text{ mm}$ 大雨日数表现降雨对滑坡灾害的影响。多年平均降雨量是反映区域内降水变化总体趋势的指标，年平均日降雨量 $\geq 25 \text{ mm}$ 大雨日数能够反映一次降雨事件(1 d降水)情况，根据中国科学院成都山地灾害研究所研究发现日降雨量 $\geq 25 \text{ mm}$ 的大雨与崩、滑、流的形成有十分密切的关系^[14-16]。利用 TRMM 卫星 1998—2010 年降水估算数据与地面气象站相应时段降水数据进行回归分析得到 $y = 1.0077x + 1.263$ (x 为地面气象站实测降水数据, y 为 TRMM 卫星降雨量)的线性关系，相关系数达到 0.99,说明卫星估算数据与地面站实测数据基本吻合，因此对气象站点稀少的地区进行插值点加密处理后再进行空间插值得到研究区降水分布数据。该区域降水分布在 750~1 250 mm,以 100 mm 为间隔等间隔划分为 5 个等级，即 750~850(r_1), 850~900(r_2), 950~1 050(r_3), 1 050~1 150(r_4)和 1 150~1 250 mm(r_5)，统计各等级滑坡贡献率(图 2c)。大雨日数以 0.5 d 进行等间隔划分，8 d 以下的滑坡分布较少，故将其归并为一类，因而大雨日数划分为 5 级： $<8(d_1)$, $8\sim 8.5(d_2)$, $8.5\sim 9(d_3)$, $9\sim 9.5(d_4)$ 和 $9.5\sim 10 \text{ d}(d_5)$ ，统计各等级滑坡贡献率(图 2c)。

多年平均降雨量和年平均日降雨量 $\geq 25 \text{ mm}$ 大雨日数都呈现出和滑坡点分布的正相关关系，有的滑坡大多分布在降雨量大于 900 mm 以上的地区，占总数的 88%，而 800 mm 以下的地区几乎没有滑坡的发生。对于大雨日数而言，滑坡发生集中在 8.5 d 以

上的范围,占到滑坡总数的 76%(图 2d)。

(5) 到断裂带距离。断层也是诱发滑坡的一个重要因素,区内主要分布有安宁河断裂带和小江断裂带,此外还有若干一般断裂带。因此,采用到断裂带距离指标揭示断裂带对滑坡危险性的影响程度。将到断裂带距离划分 5 级,即 0~2 500(c_1),2 500~5 000(c_2),5 000~10 000(c_3),10 000~20 000(c_4),>20 000 m(c_5)分别统计各级滑坡点数量,可以发现滑坡点集中分布在距断裂带 5 km 范围内,明显的高于其他各等级,表明区内滑坡点往往沿断裂带分布。

2.3 权重的确定

根据评价因子对滑坡贡献的综合分析,确定滑坡危险性 5 个等级的因子组合(表 2),并按照自权重和互权重的计算方法,分别得到各评价因子内部不同等级的自权重和不同因子间的互权重(表 3)。

2.4 结果检验

利用现有滑坡点数据,以 50 km 为半径生成滑坡点密度分布图,分别得到上述 5 个等级的滑坡点密度,结果显示滑坡危险性越高其密度越高,说明评价结果与实际滑坡较吻合(表 4)。

表 2 评价因子对滑坡发育的贡献

等级	坡度/(°)	相对高度/m	地层岩性	多年平均 降雨量/mm	年均≥25 mm 大雨日数/d	到断裂带 距离/km
1	0~10	0~100	极不易滑岩层	<880	<7.5,>10	>20
2	>40	>500	不易滑岩层	880~980	7.5~8.5	10~20
3	10~20	100~200,400~500	较易滑岩层	980~1 030	9.5~10	5~10
4	30~40	300~400	易滑岩层	1 030~1 130	8.5~9	2.5~5
5	20~30	200~300	极易滑岩层	>1 130	9~9.5	<2.5

表 3 滑坡危险度各因子贡献权重

因子	坡度	相对高度	地层岩性	多年平均 降雨量	年均日降雨量 ≥25 mm 大雨日数	到断裂带 距离
自 权 重	1	0.13	0.11	0.05	0.03	0.03
	2	0.16	0.18	0.11	0.16	0.13
	3	0.17	0.19	0.20	0.19	0.21
	4	0.24	0.25	0.27	0.30	0.28
	5	0.30	0.27	0.36	0.32	0.35
互权重	0.21	0.19	0.17	0.16	0.15	0.12

表 4 滑坡等级与滑坡点密度关系

滑坡等级	1	2	3	4	5
滑坡点密度百分比/%	9.47	16.16	21.63	25.44	27.30

3 结果与分析

依据贡献率模型对川滇黔接壤地区滑坡危险性划分 5 个等级,即稳定区、低危险区、中危险区、高危险区和极高危险区(表 5),根据其分布数量和分布规律进行深入分析得出如下。

表 5 滑坡各等级百分比

等级	危险性分区	栅格数/个	百分比/%
1	稳定区	2 421 219	12.63
2	低危险区	3 922 101	20.45
3	中危险区	4 576 750	23.86
4	高危险区	4 340 158	22.63
5	极高危险区	3 917 627	20.43

(1) 从总体上看,研究区 $1.92 \times 10^5 \text{ km}^2$ 范围内,分布比例最高的是中危险区,面积达 $4.58 \times 10^4 \text{ km}^2$,占 23.86%;其次是高危险区 $4.34 \times 10^4 \text{ km}^2$,占 22.63%;稳定区比例最小,仅有 $2.42 \times 10^4 \text{ km}^2$ 占 12.63%,低危险区和极高危险区居中,均达到 $3.92 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。中等以上危险性区域比例约为 67%,因此该区域总体属于中高度危险区。

(2) 从空间分布格局上看,滑坡危险性分区呈现“两高三低”的分布格局,显示出活动断裂带和地貌对滑坡危险性的宏观控制作用(附图 8)。“两高”指的是极高危险区集中分布在小江—安宁河深大断裂两侧以及金沙江、雅砻江等深切河谷两侧;而“三低”指的是西北盐源盆地、安宁河谷区,东北的盆地丘陵以及中部的昭通盆地滑坡危险性均较低。以 5 km 距离对活动断裂带作缓冲区,可以发现,断裂带缓冲区范围内高危险区占 27.82%,较高危险区占 24.35%,中危险区占 23.49%,共占到缓冲区面积的 75.66%。

从空间分布形态上看,滑坡危险性分区呈现条带状或团块状分布特征,显示出降雨和地层岩性的微观控制作用。研究区内的 2 个多雨中心:贵州省六盘水市盘县区—六枝区一带和凉山彝族自治州米易县—德昌县一带,以及受北部雅安市影响的凉山州甘洛县—越西县一带,滑坡危险性等级均较高,其中极高危险区面积占 55.05%,高危险区占 28.63%;而中部少雨的昭通盆地和西北低雨量的木里县滑坡危险性相对较低,其中稳定区占 26.51%,低危险区占 39.45%,中危险区占 22.20%。区内极易滑岩层分布区内中度以上危险区面积占 69.46%,易滑岩层分布区内中度以上危险区面积占 50.05%。

(3) 从滑坡灾害威胁区内人口和经济程度上看,研究区内约 1/3 的人口和经济受到滑坡灾害的威胁。对 2003 年人口和 GDP 空间数据(数据来源于地球系统科学数据共享平台)统计分析发现,中度以上危险区内人口总量约 1 152.31 万人,占研究区总人口的 32.17%,GDP 总量约 419.88 亿元,占研究区 GDP 总量的 28.75%;而稳定区人口和 GDP 仅占 17.74% 和 21.88%。

4 结论

本文采用坡度、相对高度、岩性、到断裂带距离、多年平均降雨量和年平均日降雨量 ≥ 25 mm 大雨日数 6 个因子的贡献率对川滇黔接壤区 75 个县进行了滑坡危险性分区,结果表明该区域处于中高危险范围内,中度以上等级区域约占研究区范围的 67%。

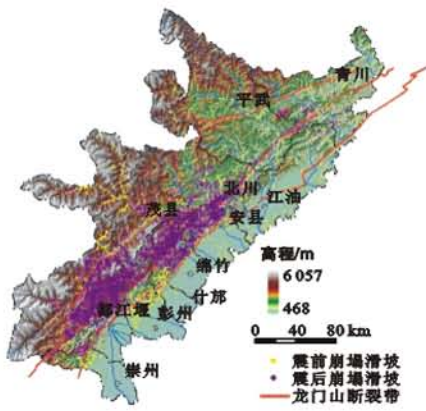
从空间分布格局上看,滑坡危险性分区呈现“两高三低”的分布格局,在活动断裂带和地貌的宏观控制作用及降雨和地层岩性的微观控制作用下,滑坡危险性分区呈现条带状或团块状分布特征。从滑坡的影响程度上看,区内约 1/3 的人口和经济受到滑坡灾害的威胁。因此,加强川滇黔接壤地区的地质灾害防灾减灾能力建设已刻不容缓。

[参 考 文 献]

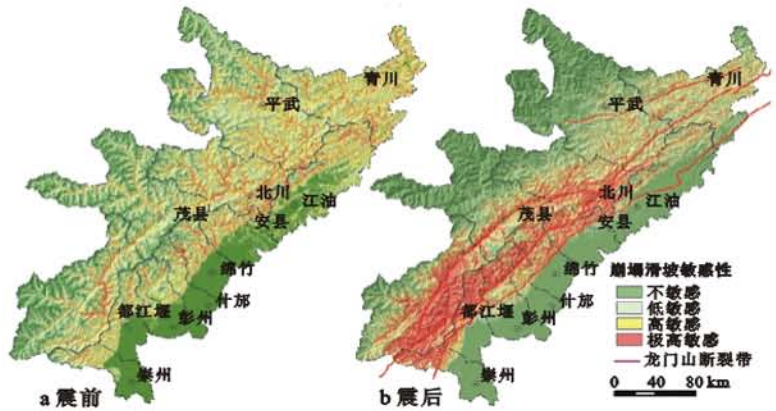
[1] 唐邦兴,崔鹏,王成华,等. 山洪泥石流滑坡灾害及防治

[M]. 北京:科学出版社,1994:241-263.

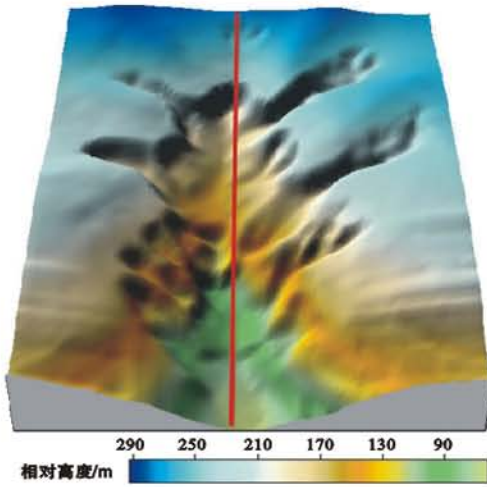
- [2] 殷坤龙,朱良峰. 滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究[J]. 地学前缘,2001,3(2):279-284.
- [3] 朱良峰,吴信才,殷坤龙,等. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究[J]. 地球科学与环境学报,2004,26(3):52-56.
- [4] Qiao Jianping, Zhu Axing, Wu Caiyan, et al. Bottom factors applied to zoning study of the risk levels of landslides in the Three Gorges Reservoir area[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, 11(4): 761-766.
- [5] 乔建平,朱阿兴,吴彩燕,等. 采用本底因子贡献率法的三峡库区滑坡危险度区划[J]. 山地学报,2006,24(5): 569-573.
- [6] 丛威青,潘懋,李铁锋,等. 基于 GIS 的滑坡、泥石流灾害危险性区划关键问题研究[J]. 地学前缘,2006,13(1): 185-190.
- [7] 王萌,乔建平. 基于 GIS 的沐川县滑坡危险度区划[J]. 自然灾害学报,2009,18(1):175-178.
- [8] 乔建平,吴彩燕,田宏岭. 三峡库区云阳:巫山段地层因素对滑坡发育的贡献率研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(17):2920-2924.
- [9] 王志旺,廖勇龙,李端有. 基于逻辑回归法的滑坡危险度区划研究[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(8):1451-1454.
- [10] 王亚强,王兰民,张小曳. GIS 支持下的黄土高原地震滑坡区划研究[J]. 地理科学,2004,24(2):170-176.
- [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] 吴敏,陈永波. 应用层次分析法进行金龙山滑坡危险度研究[J]. 水土保持研究,2008,15(2):239-243.
- [13] 江辉. 基于网络分析法的滑坡灾害风险区划研究及工程应用[J]. 测绘科学,2009,34(6):256-258.
- [14] 乔彦肖,郭庆十. 河北省泥石流、滑坡、崩塌灾害发育程度区划的初步研究[J]. 国土资源遥感,1997,34(4):26-32.
- [15] 杨子生. 云南金省沙江流域滑坡泥石流灾害区划研究[J]. 山地学报,2002,20(S1):88-94.
- [16] 刘仁志,倪晋仁. 中国滑坡崩塌危险性区划[J]. 应用基础与工程科学学报,2005,13(1):9-18.



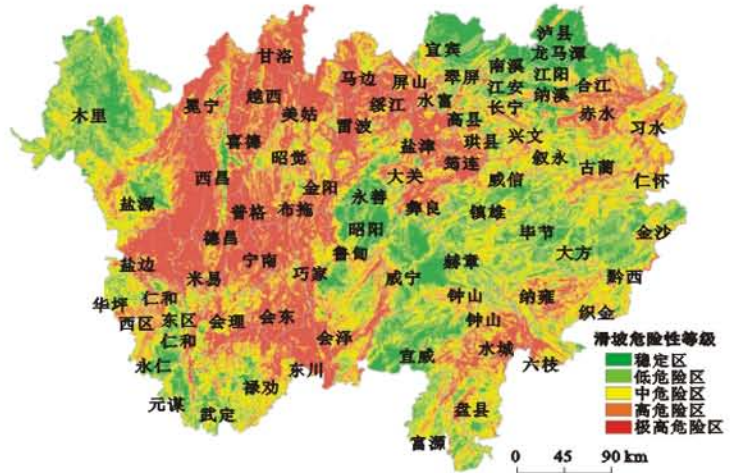
附图5 汶川地震前后龙门山断裂带崩塌滑坡分布



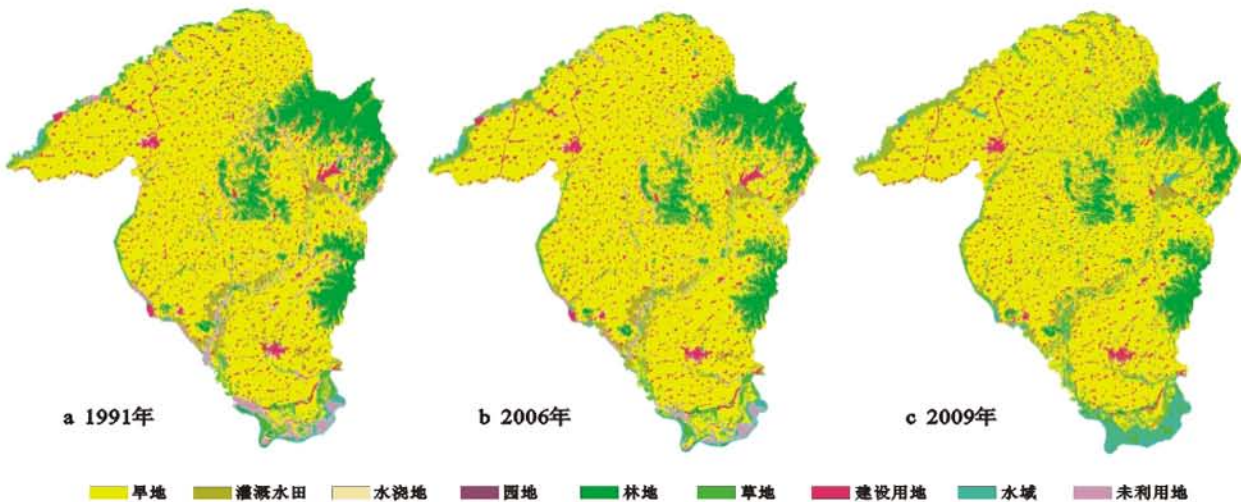
附图6 汶川地震前后龙门山断裂带崩塌滑坡敏感性评价



附图7 黄土高原王茂沟小流域地形地貌



附图8 川滇黔接壤地区滑坡危险性区划



附图9 黑龙江省巴彦县土地利用/土地覆被空间格局