

文章编号: 1008 - 2786 - (2014) 1 - 117 - 07

“4·20”芦山地震灾区次生山地灾害易发性评价

丁明涛¹ 程尊兰² 王青¹

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010;
2. 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)

摘 要: 选择“4·20”芦山地震灾区为研究区, 在野外实地考察的基础上, 结合高精度遥感影像解译分析, 针对地震灾区滑坡、崩塌和泥石流等次生山地灾害的形成条件展开系统分析; 在 ArcGIS 9.3 软件支持下, 采用信息量模型, 选择坡向、坡度、地层岩性、断裂带、河流冲刷作用、地震烈度和降水量 7 个影响因子作为芦山地震灾区次生山地灾害易发性评价的指标参数, 将其划分为高易发区、中易发区和低易发区, 该评价结果与实地考察结果基本吻合。基于 GIS 的信息量模型能够很好地为芦山地震灾区次生山地灾害易发性区划研究提供指导, 其结果可以用来解决次生山地灾害易发性评价中效率低、精度差、费时费力等问题, 从而实现次生山地灾害易发性评价的信息化和科学化。

关键词: 芦山地震灾区; 次生山地灾害; 易发性评价; 信息量模型

中图分类号: P642.2, P694, X43

文献标志码: A

20 世纪 90 年代以来, GIS 技术的应用使原先计算复杂甚至无法考虑的因子能够引入山地灾害易发性研究中, 并且使计算结果进一步精确细化^[1]。Wei Fangqiang 等利用 GIS 工具对比分析了汶川地震前后灾区次生山地灾害的分布特征^[2]; Ding Mingtao 等应用 ArcGIS 软件分析了三江并流区的山地灾害分布特征及其原因^[3]; G. C. Ohlmacher、Shen Che-Wei、Li Xiuzhen 等利用 GIS 工具, 结合一定的数学模型方法, 进行山地灾害易发性评价, 并取得良好效果^[4-8]; Xie Hong 等对岷江上游典型沟道泥石流活动特征及其危险性进行了分析^[9]。

2013-04-20T08:02 四川省雅安市芦山县(30.3N, 103.0E)发生 7.0 级地震, 震源深度 13 km。据中国地震局网站消息, 截至 24 日 14 时 30 分, 四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震共计造成 196 人死亡, 失踪 21 人, 11 470 人受伤。芦山地震灾区是一个典型的生态环境脆弱区和次生山地灾害

多发区。本文针对芦山地震灾区, 利用 GIS 和 RS 技术和信息量模型, 开展次生山地灾害易发性评价研究, 并进行灾害易发性区划, 获取灾害易发性分布区划图, 从而有针对性地指导地震灾区的聚落搬迁、人口分布和防灾减灾管理工作。

1 研究区概况

芦山地震灾区涉及四川省芦山县、宝兴县、天全县等 21 个县(市、区), 位于 29°28′~30°56′N, 102°16′~103°11′E, 总土地面积 42 786.05 km²(图 1)。其范围确定的依据是《四川省国土资源厅办公室关于切实做好“4·20”芦山地震灾区地质灾害应急排查工作的紧急通知》。

芦山地震灾区地理位置处于四川盆地的西部边缘, 是四川盆地到青藏高原的过渡地带。

1.1 地貌

收稿日期(Received date): 2012-07-05; 改回日期(Accepted): 2013-07-26。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(No. 41101164, No. 41371185), 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所方向性项目(No. SDS-135-1204-01)。[Supported by the NSFC (No. 41101164, No. 4137118), Directional Project of Institute of Mountain Hazards and Environment of CAS (No. SDS-135-1204-01).]

作者简介(Biography): 丁明涛(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害风险评估及其预测预报研究。[Mingtao Ding (1981-), male, Ph.D., associate professor, specialized in risk assessment and prediction of geological disaster.] E-mail: mingtaoding@163.com

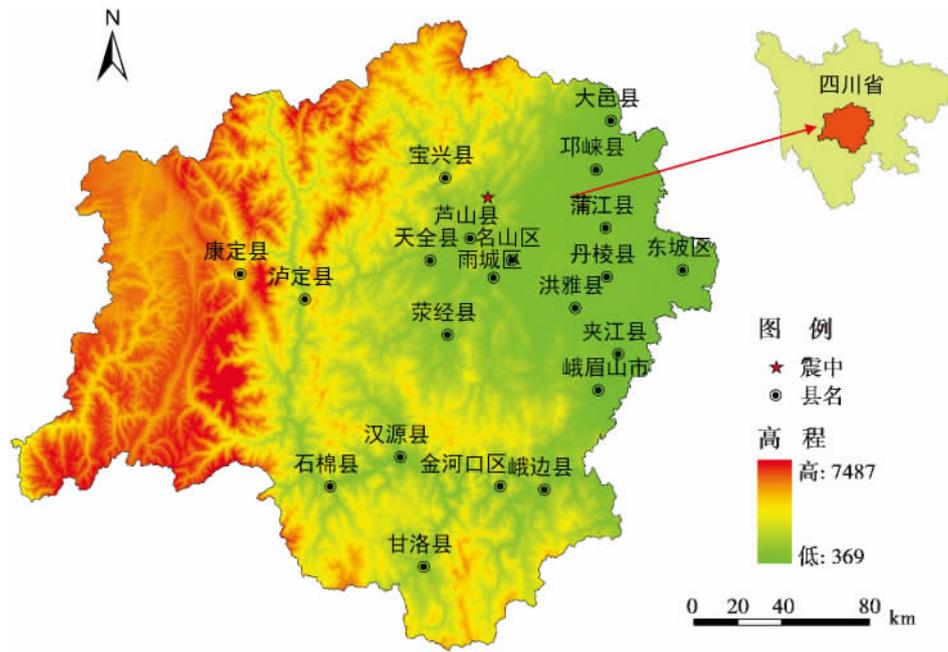


图1 研究区位置图

Fig. 1 Location and DEM map of the study area

研究区位于四川盆地西部边缘,龙门山的南段,处于我国地形的第一阶梯向第二阶梯(四川盆地与青藏高原接壤)的过渡地带。总体上北高南低、西高东低(图1)。研究区跨越四川西部高山、高原和东部盆地、山地地貌区,主要以山地为主,山地面积占93.91%。区内平均海拔在1300m以上,最高海拔7556m,位于康定县境东南缘的贡嘎山,岭谷高差3500m以上。重灾区的西北部是邛崃山脉的二郎山和夹金山。二郎山呈东北向;夹金山呈南北向,海拔>4000m。南部泥巴山为西北走向的山脉,海拔3000m以上,东部为低山丘陵区。

1.2 地层岩性

宝兴-芦山-雅安地区处于龙门山推覆构造与川西前陆盆地的交接地带。地层出露较全,岩石类型较多。出露的地层主要有震旦系、奥陶系、志留系、泥盆系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、下第三系和第四系。

在宝兴-芦山地区有大面积的岩浆岩分布,也就是“宝兴杂岩”。该杂岩体内的岩石类型较多,主要有闪长岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、钾长花岗岩及少量石英闪长岩。

1.3 地质构造

宝兴-芦山-雅安地区跨龙门山推覆构造带南段和四川盆地西缘两个构造单元。根据数条走向北东的巨大断裂,可将龙门山南段构造带划分为4个

亚带:1. 陇东褶皱推覆构造带;2. 宝兴冲断推覆构造带;3. 中林-石薄皮推覆构造带;4. 前陆褶皱构造带。

1.4 气象水文

本区属亚热带湿润性季风气候区,冬无严寒,夏无酷暑,年平均气温在14.1~15.3℃。1月气温最低,月平均气温4℃左右;7月最热,月平均气温在23~28℃,无霜期最长达319d,阴天多、湿度大,降雨强度大、易遭洪涝。风小雨夜多,雾稀日照少,因受地形影响,气流不畅,被称为“死水区”。

研究区属四川省四大暴雨区之一,年降雨量在1700mm以上,雨量非常充沛。降雨分布趋势,大致由西北向东南递增。宝兴、芦山一带,多年平均年降雨量为800~1200mm;荥经、天全多在1400~1800mm,天全二郎山站年平均降水2041.7mm,荥经县金山站高达2637mm,居全省之冠。

芦山地震重灾区处于青衣江流域上游,植被良好,径流主要来源于降水,次为融雪;水系主要受地形控制,流向多为北西至南东,较大的河流有宝兴河、芦山河、玉溪河及天全河。这些河流均属青衣江流域,河水湍急,滩多水浅。

1.5 次生山地灾害分布

通过野外实地考察,结合遥感影像解译分析,已查明芦山地震灾区发育有滑坡和崩塌灾害点共有690处,泥石流灾害点有92处,其分布主要沿龙门

山南段地震断裂带集中分布(芦山地震的发震断裂——映秀—宝兴—泸定断裂)和沿河谷两岸斜坡集中分布,特别是灵关河一带。

2 次生山地灾害易发性评价

2.1 信息量模型

次生山地灾害现象(Y)的产生受多种因素(X_i , $i=1, 2, \dots, n$)的影响,各种因素所起作用的大小、性质是不同的,因此,对于区域次生山地灾害,要综合研究其影响因素和具体状态的组合。能否准确预测某区次生山地灾害的产生,与预测过程中所获取的信息的数量和质量有关,用信息量来表示即为^[2]

$$I(Y, X_1, X_2 \wedge X_n) = \lg \frac{P(Y, X_1, X_2 \wedge X_n)}{P(Y)} \quad (1)$$

根据条件概率运算,上式可进一步写出

$$I(Y, X_1, X_2 \wedge X_n) = I(Y, X_1) + I_{X_1}(Y, X_2) + \wedge + I_{X_1, X_2 \wedge X_{n-1}}(Y, X_n) \quad (2)$$

式中 $I(Y, X_1, X_2 \wedge X_n)$: 因素组合 X_1, X_2, \dots, X_n 对次生山地灾害所提供的信息量; $P(Y, X_1, X_2 \wedge X_n)$: 因素 X_1, X_2, \dots, X_n 组合条件下次生山地灾害发生的概率; $I_{X_1}(Y, X_2)$: 因素 X_1 存在时,因素 X_2 对次生山地灾害提供的信息量; $P(Y)$: 次生山地灾害发生的概率。

式(2)说明,因素组合 X_1, X_2, \dots, X_n 对次生山地灾害所提供的信息量等于因素 X_1 确定后,因素 X_2 对次生山地灾害提供的信息量,直至因素 X_1, X_2, \dots, X_{n-1} 确定后, X_n 对次生山地灾害提供的信息量,从而说明次生山地灾害空间区划充分考虑了因素组合的共同影响与作用。

次生山地灾害空间区划是在对区域次生山地灾害分布图开展信息统计分析的基础上进行的。一般情况下,由于作用于次生山地灾害的因素很多,相应的因素组合状态也特别多,样本统计数量往往受到限制,故采用简化的单因素信息量模型分步计算,再综合叠加分析,相应的信息量模型改写为

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \lg \frac{S_0^i / S}{A_0^i / A} \quad (3)$$

式中 I : 预测区某单元信息量预测值; I_i : 因素 X_i 对次生山地灾害所提供的信息量; A : 区域总面积; A_0^i : 含有因素 X_i 的单元总面积; S : 已发生次生山地灾害单元的总面积; S_0^i : 含有因素 X_i 的单元中发生次生山地灾害单元的面积之和。

通过计算,我们可以得到各个划分单元的信息量综合评价价值 I ,其值越大,说明该单元所在区域发生次生山地灾害的可能性越大,其次生山地灾害易发性越高。

2.2 评价单元

本研究用栅格数据处理方法,将芦山地震灾区面积 $42\,786.05 \text{ km}^2$ 的区域在 DEM 数据的基础上进行规则网格划分,每个单元面积为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。根据上述原则,将评价区域划分为 $4\,278\,407$ 个单元。

2.3 评价指标

评价因素选取的基本原则是:从工程地质和环境条件的角度,尽量全面地考虑影响次生山地灾害发生的各种因素,主要分为基本因素和影响因素两类。本研究确定的基本因素有坡向、坡度、地层岩性、断裂带分布等 4 个参数;影响因素有降水量、地震烈度和河流冲刷作用等 3 个参数。经分析认为,本文选取坡向、坡度、地层岩性、断裂带、河流冲刷作用、地震烈度和降水量等 7 个因子进行研究。

根据研究区次生山地灾害的调查资料,经过详细分析芦山地震灾区的坡向、坡度、地层岩性、断裂带、人类工程活动、河流冲刷作用、地震烈度和降水量 7 个影响因素,按差异原则对其进行若干不同状态划分,最终确定了 39 种状态为预测变量(表 1)。

通过芦山地震灾区的 DEM、1:10 万地质图、地震分布、断裂带、水文和土地利用图等图件,我们可以较为直观地确定各个划分单元区的坡向、坡度、地层岩性和河流冲刷作用等影响因素的状态。结合 ArcGIS 9.3 软件的数据编辑与空间分析功能,采用 GIS 数字高程模型中的 DEM 进行坡向和坡度因子划分,得出 $4\,278\,407$ 个单元格的坡向图(图 2)和坡度图(图 3);分别对芦山地震灾区进行河流冲刷作用、地层岩性、断裂带分布、地震烈度等 4 个纸质图件进行扫描数字化得到 1:10 万地质图、地震分布图、断裂带分布图、水文图和土地利用图的数字栅格图件,并进行矢量化处理,再将得到的线性图使用拓扑处理功能转换成面图层,并向面图层各区域赋予类别,最后由量化的面图层转换为赋予了各图件类型的栅格图(图 4~7);而通过芦山地震灾区各气象站的数据得到年平均降水量,得到的点数据再进行克里金插值,得到芦山地震灾区年降水量栅格图(图 8)。因此,再得到以上 7 个因子的栅格图层后,

表 1 芦山地震灾区次生山地灾害易发性评价参数变量表
Table 1 Parametric variables for susceptibility assessment on secondary mountain hazards in Lushan earthquake-stricken area

因子	类别	因素 X_i	含有因素 X_i 的单元	含有因素 X_i
			中发生次生山地灾害单元的 面积之和/ km^2	的单元总 面积/ km^2
坡向	北	X_1	130	4 951.49
	东北	X_2	178	5 894.08
	东	X_3	260	6 185.76
	东南	X_4	186	5 363.6
	南	X_5	164	4 761.2
	西南	X_6	174	5 128.23
	西	X_7	248	5 454.48
	西北	X_8	182	5 047.27
坡度/ $^\circ$	0 ~ 10	X_9	408	8 515.48
	10 ~ 20	X_{10}	548	8 517.32
	20 ~ 25	X_{11}	242	5 115.52
	25 ~ 30	X_{12}	140	5 696.22
	30 ~ 35	X_{13}	100	6 067.81
	35 ~ 40	X_{14}	56	4 988.52
	40 ~ 50	X_{15}	22	3 447.11
	50 ~ 60	X_{16}	4	415.7
	> 60	X_{17}	2	22.43
	地层岩性	C(灰岩)	X_{18}	192
Ar - Pt(花岗岩)		X_{19}	50	2 574.09
H(片岩)		X_{20}	72	5 946.04
E(砂砾岩)		X_{21}	630	4 789.07
J(砂岩)		X_{22}	506	16 031.47
Q(土)		X_{23}	30	3 147.97
S(页岩)		X_{24}	42	1 254.21
断裂带		较弱	X_{25}	478
	较强	X_{26}	626	16 648.23
	强烈	X_{27}	418	6 821.31
河流冲刷作用	较弱	X_{28}	570	2 781.9
	较强	X_{29}	312	7 120.83
	强烈	X_{30}	640	7 844.24
地震烈度	IX	X_{31}	114	207.65
	VIII	X_{32}	498	1 439.56
	VII	X_{33}	360	4 080.51
	VI	X_{34}	346	13 130.51
	其他	X_{35}	204	23 925.87
年降水量/ mm	< 800	X_{36}	14	7 337.16
	800 ~ 1 000	X_{37}	194	11 311.97
	1 000 ~ 1 200	X_{38}	412	10 960.17
	> 1 200	X_{39}	902	13 174.77

使用重分类和栅格计算功能计算各个区域包含次生山地灾害数量与面积的信息量图,最后使用信息量模型工具(图 9),对坡向、坡度、地层岩性、断裂带、人类工程活动、河流冲刷作用、地震烈度和降水量这 8 个因子进行叠加,得出芦山地震灾区次生山地灾害易发性评价的信息量分布图(图 10)。

最后,结合已有的调查和收集的资料,确定出各划分单元的具体状态,由公式(3)计算出每种状态变量的信息量值(表 2)。

依据公式(3)及表 2 中各变量信息的取值,然后利用 ArcGIS 9.3 软件的建模功能,建立研究区次生山地灾害易发性评价模型(见图 9)。

2.4 评价结果

通过上述方法取得研究区内各划分单元的信息量综合值,其取值范围为: -1.270 5 ~ 1.188 4,数值

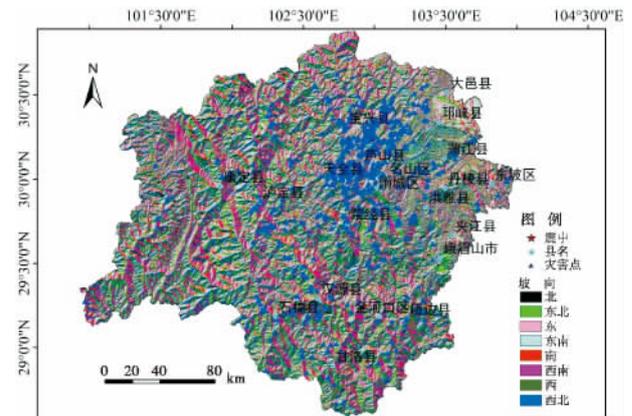


图 2 坡向因子分区和次生山地灾害分布图

Fig. 2 Map of slope aspect zoning and secondary mountain hazards distribution

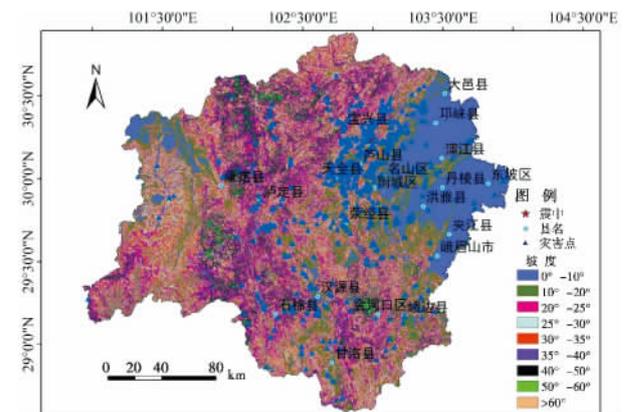


图 3 坡度因子分区和次生山地灾害分布图

Fig. 3 Map of slope gradient zoning and secondary mountain hazards distribution

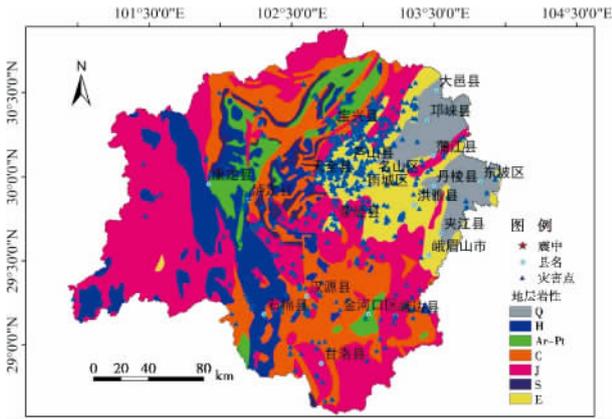


图 4 地层岩性因子分区和次生山地灾害分布图

Fig. 4 Map of stratum lithology zoning and secondary mountain hazards distribution

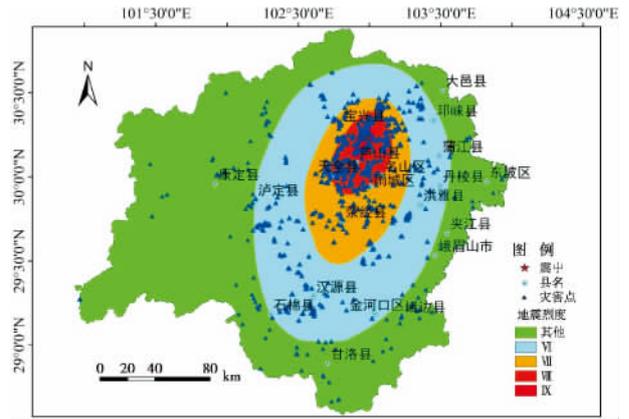


图 7 地震烈度因子分区和次生山地灾害分布图

Fig. 7 Map of seismic intensity zoning and secondary mountain hazards distribution

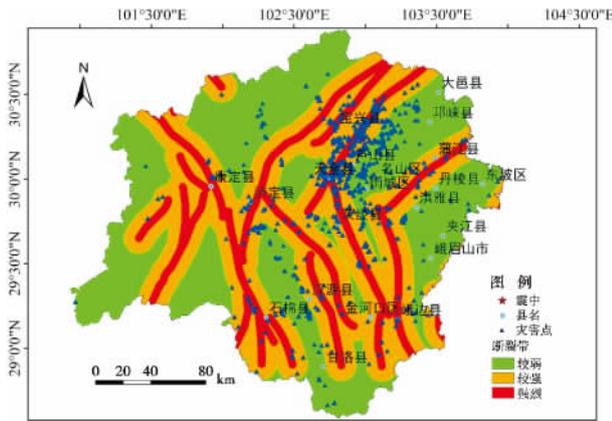


图 5 断裂带因子分区和次生山地灾害分布图

Fig. 5 Map of fault belts zoning and secondary mountain hazards distribution

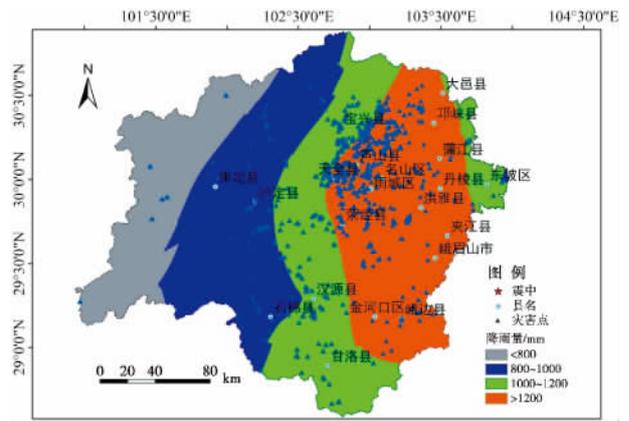


图 8 年降水量因子分区和次生山地灾害分布图

Fig. 8 Map of annual precipitation zoning and secondary mountain hazards distribution

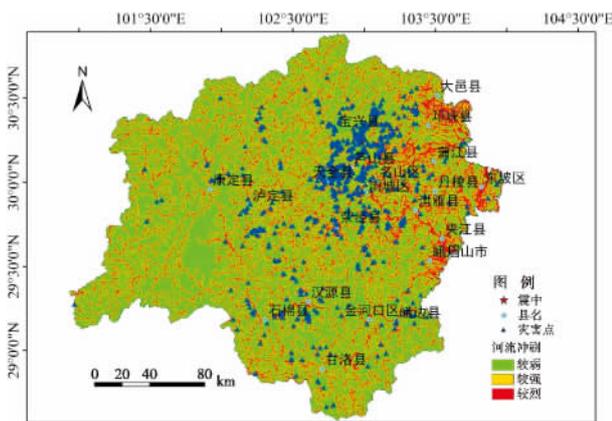


图 6 河流冲刷作用因子分区和次生山地灾害分布图

Fig. 6 Map of river scouring action zoning and secondary mountain hazards distribution

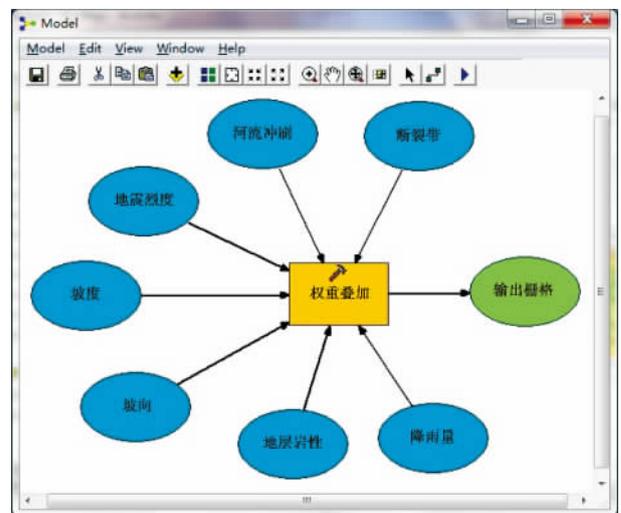


图 9 芦山地震灾区次生山地灾害易发性评价的信息量模型

Fig. 9 Information Model for susceptibility assessment on secondary mountain hazards in Lushan earthquake-stricken area

表 2 各预测变量的信息量计算结果

Table 2 Calculation results of predictor variables' information value

变量	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
信息量	-0.131 9	-0.071 1	0.072 5	-0.011 1	-0.014 0	-0.020 5	0.106 6	0.005 9	0.129 3	0.257 4
变量	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	X ₂₀
信息量	0.123 8	-0.160 6	-0.334 1	-0.500 9	-0.746 1	-0.567 8	0.399 1	-0.224 1	-0.262 8	-0.468 0
变量	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉	X ₃₀
信息量	0.568 0	-0.052 0	-0.572 0	-0.026 3	-0.157 6	0.024 1	0.236 2	-0.239 6	0.090 5	0.360 5
变量	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₃₄	X ₃₅	X ₃₆	X ₃₇	X ₃₈	X ₃₉	
信息量	1.188 4	0.987 9	0.394 5	-0.130 3	-0.620 4	-1.270 5	-0.316 9	0.023 9	0.284 3	

越大,反映以上各因素对次生山地灾害发生的贡献率越大,发生次生山地灾害的易发性越大。将研究区易发性划分 3 级:高易发区、中易发区和低易发区(表 3)。根据所划分的区段,将他们表示在图上,再利用统计学中常用的自然断点法,兼顾考虑计算结果和次生山地灾害发生的具体情况,得到芦山地震灾区次生山地灾害分布与易发性评价图(图 10)。

表 3 芦山地震灾区次生山地灾害易发性区划结果表
Table 3 Susceptibility zoning results of secondary mountain hazards in Lushan earthquake-stricken area

区域	面积 /km ²	面积所占比例/%	次生山地灾害/处	灾害点所占比例/%
高易发区	3 467.43	8.11	412	52.69
中危险区	20 382.75	47.66	325	41.56
低易发区	18 914.75	44.23	45	5.75
芦山地震灾区	42 762.93	100	782	100

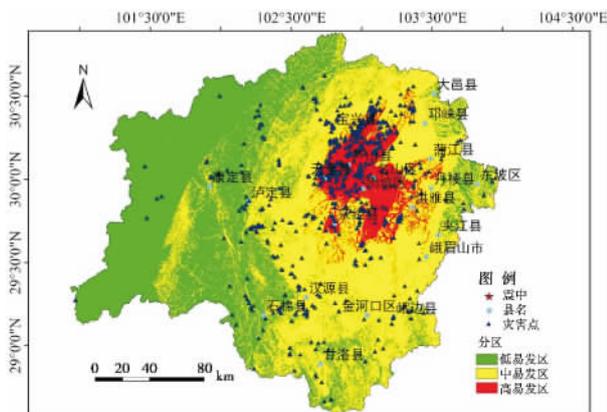


图 10 芦山地震灾区次生山地灾害分布与易发性评价图
Fig. 10 Distribution and susceptibility assessment map of secondary mountain hazards in Lushan earthquake-stricken area

3 结论与讨论

通过对芦山地震灾区次生山地灾害的实地考察,结合高精度遥感影像的解译分析,本研究可得到以下结论:

1. 芦山地震灾区次生山地灾害的分布有以下特点:(1)沿龙门山南段地震断裂带集中分布,即芦山地震的发震断裂——映秀—宝兴—泸定断裂,地震次生山地灾害比较发育;(2)沿河谷两岸斜坡集中分布,由于河谷两岸坡度较陡,切割深,斜坡岩石破碎,次生崩塌(滚石)、比较发育;(3)崩塌、滑坡多发生在中低山和中高山区的河谷两侧山坡上和道路的山坡一侧;芦山地震引发的次生山地灾害主要发育于白垩系、三叠系砂泥岩,二叠系石灰岩地层以及第三系砾岩半成岩地层的陡坡和陡崖上。

2. 芦山地震灾区次生山地灾害高易发区总面积为 3 467.43 km²,占全区总面积的 8.11%,但有 52.69%的次生山地灾害分布在其中。该区不与低易发区相联,只与中易发区接壤。高易发区的分布主要与水系形态和人口活动密切相关,是经济活动最为频繁的地区。

3. 中易发区占全区总面积为 20 382.75 km²,占全区总面积的 47.66%。区内有次生山地灾害 315 处,占全区调查总数的 41.56%。

4. 低易发区较为分散,总面积为 18 914.75 km²,占全区总面积的 44.23%;区内灾害较少,有 45 处次生山地灾害在其中,是水系和人烟较稀少的地区。

本研究结果与调查收集资料对比表明,计算和区划结果基本符合芦山地震灾区的实际情况,因此证明基于 GIS 和信息量模型的次生山地灾害易发性评价方法是切实可行的,与一般的统计模型相比,信

息量模型具有更高的客观性和科学性。

参考文献(References)

- [1] Temesgen B, Mohammed M U, Korme T. Natural hazard assessment using GIS and remote sensing methods, with particular reference to the landslides in the Wondogenet Area, Ethiopia [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2001, 26(9): 665–675
- [2] Wei Fangqiang, Su Pengcheng, Jiang Yuhong. Distribution characteristics of landslides and debris flows in the Wenchuan earthquake region before and after the earthquake [J]. *Disaster Advances*, 2012, 5(4): 285–294
- [3] Ding Mingtao, Wei Fangqiang. Distribution characteristics of debris flows and landslides in Three Rivers Parallel Area [J]. *Disaster Advances*, 2011, 4(3): 7–14
- [4] Ohlmacher G C, Davis J C. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA [J]. *Engineering Geology*, 2003, 69: 331–343
- [5] Dai F C, Lee D F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong [J]. *Geomorphology*, 2002, 48: 213–228
- [6] Lin M L, Tung C C. A GIS-based potential analysis of the landslides induced by the Chi-Chi earthquake [J]. *Engineering Geology*, 2003, 64: 63–77
- [7] Shen CheWei, Lo WenChun, Chen ChenYu. Evaluating susceptibility of debris flow hazard using multivariate statistical analysis in Hualien County [J]. *Disaster Advances*, 2012, 5(4): 743–755
- [8] Li Xiuzhen, Kong Jiming. Application of support vector machine with posterior probability estimates in debris flow hazard assessment [J]. *Disaster Advances*, 2011, 4(4): 38–44
- [9] Xie Hong, Zhong Dunlun. Features and risk zonation of debris flow in Futangba Ravine of Wenchuan County of Min River [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, 14(4): 30–32 [谢洪, 钟敦伦. 岷江上游汶川县佛堂坝沟泥石流特征及危险性分区 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2003, 14(4): 30–32]
- [10] Mingtao Ding, Qing Wang. Delineation of rural settlement boundaries in the upper reaches of Min River, China [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 204–208: 2744–2748

Susceptibility Assessment on Secondary Mountain Hazards in “4·20” Lushan Earthquake-stricken Area

DING Mingtao¹, CHENG Zunlan², WANG Qing¹

(1. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, 610041 Chengdu, China)

Abstract: With Lushan earthquake-stricken area as the study area, field survey as the foundation, and the high resolution remote sensing visual interpretation as the method, a systematic analysis on the forming conditions of secondary mountain hazards in Lushan earthquake-stricken area is launched in this study. Employing the ArcGIS Software and the Information Model, and taking the 7 influencing factors including slope aspect, slope gradient, stratum lithology, fault belts, river scouring action, seismic intensity, and precipitation as the parameters of susceptibility assessment, the susceptibility area has been divided into three zones: high, middle, and low zones. Furthermore, the assessment result is in conformity with that of the field survey, indicating that GIS-based information model will effectively provide parameter reference for the study of susceptibility zoning of secondary mountain hazards in Lushan earthquake-stricken area, and that such assessment result will help resolve the existing problems such as poor efficiency, low resolution, painstaking and time-consuming process so as to realize the informative and scientific susceptibility assessment.

Key words: Lushan earthquake-stricken area; secondary mountain hazards; susceptibility assessment; information model