科学通报 2013 年 第 58 卷 第 36 期: 3859 ~ 3866
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

基于 RS 与 GIS 的芦山地震地质灾害敏感性评价

陈玉*, 郭华东, 王钦军

中国科学院数字地球重点实验室, 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094
* 联系人, E-mail: yuchen@ceode.ac.cn

2013-06-03 收稿, 2013-08-19 接受, 2013-11-26 网络版发表
国家自然科学基金(41240012)和国家科技支撑计划(2012BAK15B05)资助

摘要 北京时间 2013 年 4 月 20 日上午 8:02 分, 四川芦山县发生了 7.0 级强震, 地震发生后中国科学院遥感与数字地球研究所迅速启动重大灾害应急响应, 及时对灾情进行评估. 通过 0.6 m 分辨率航空遥感影像解译的崩滑体分布情况, 结合坡度、坡向、高程、岩性、构造、水系、植被覆盖及地震烈度 8 个评价因子信息, 分别基于概率指数模型与信息量模型对地震重灾区芦山县、宝兴县进行了地质灾害敏感性评价. 各因子分析的贡献度排序表明, 距离构造 350 m 以内对地质灾害影响最大, 其次为较陡的坡度(40°以上)及距离主干河道较近区域. 采用接收者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线对模型精度评价, 表明信息量模型具有 73.3%的精度, 略高于概率指数模型的 71.5%, 二者的评价结果较吻合, 均表明芦山县双石镇、太平镇、宝盛乡、龙门乡及宝兴县五龙乡、民治乡、永富乡等地具有较高的地质灾害敏感性. 评估结果为震后地质灾害隐患点排查, 预防二次灾害提供技术支持.

关键词
芦山
地震
地质灾害
信息量
概率指数

北京时间 2013 年 4 月 20 日上午 8:02 分, 四川芦山县发生了 7.0 级强震, 截至 2013 年 4 月 23 日, 已造成 193 人死亡, 25 人失踪、12211 人受伤、大量房屋倒塌. 地震引起的滑坡及崩塌等次生地质灾害引起道路多处中断, 部分阻塞河道. 此外, 地震导致灾区地质结构稳定性降低, 在后续降雨的作用下, 极易导致次生灾害的进一步扩大. 为科学有效对震后地质灾害隐患点排查, 预防二次灾害的进一步发生, 通过 0.6 m 分辨率航空遥感影像解译的崩滑体分布情况, 结合地质灾害评价因子信息, 分别基于信息量模型与概率指数模型对地震重灾区芦山县、宝兴县进行了地质灾害敏感性评价. 并采用接收者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线对模型精度进行了评价.

1 数据获取

2013 年 4 月 20 日 9 时 50 分, 中国科学院遥感与数字地球研究所航空遥感飞机 B-4101 携带光学传感器从四川绵阳机场起飞, 开始执行雅安地区地震灾情遥感监测任务. 至 4 月 20 日下午第一架次返航, 获取地震灾区芦山、宝兴、邛崃等县市约 5000 km^2, 0.6 m 分辨率航空遥感数据约 256 GB. 之后, 又连续飞行 3 架次, 以震中为中心辐射 50 km, 获取原始数据 247 GB 的航空遥感数据, 生成快视影像图 130 GB. 去除云层干扰条带后, 本研究采用的航空影像覆盖范围如图 1 斜条纹框所示, 底图为灾前 ETM743 波段合成影像. 基于航空遥感影像解译的重灾区芦山县与宝兴县地质灾害的分布如图 1 红色区所示. 地质灾害主要为崩塌和崩塌性滑坡为主, 图 1(a)~(c)为局部地点地质灾害航空遥感影像.

2 评价方法

基于 RS 与 GIS 技术开展地质灾害的敏感性评价, 已经在国内外广泛应用. 从数学上讲, 地质灾害评价

引用格式: 陈玉, 郭华东, 王钦军. 基于 RS 与 GIS 的芦山地震地质灾害敏感性评价. 科学通报, 2013, 58: 3859–3866
Chen Y, Guo H D, Wang Q J. Geological disaster susceptibility assessment of the Lushan earthquake based on RS and GIS (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 3859–3866, doi: 10.1360/972013-665

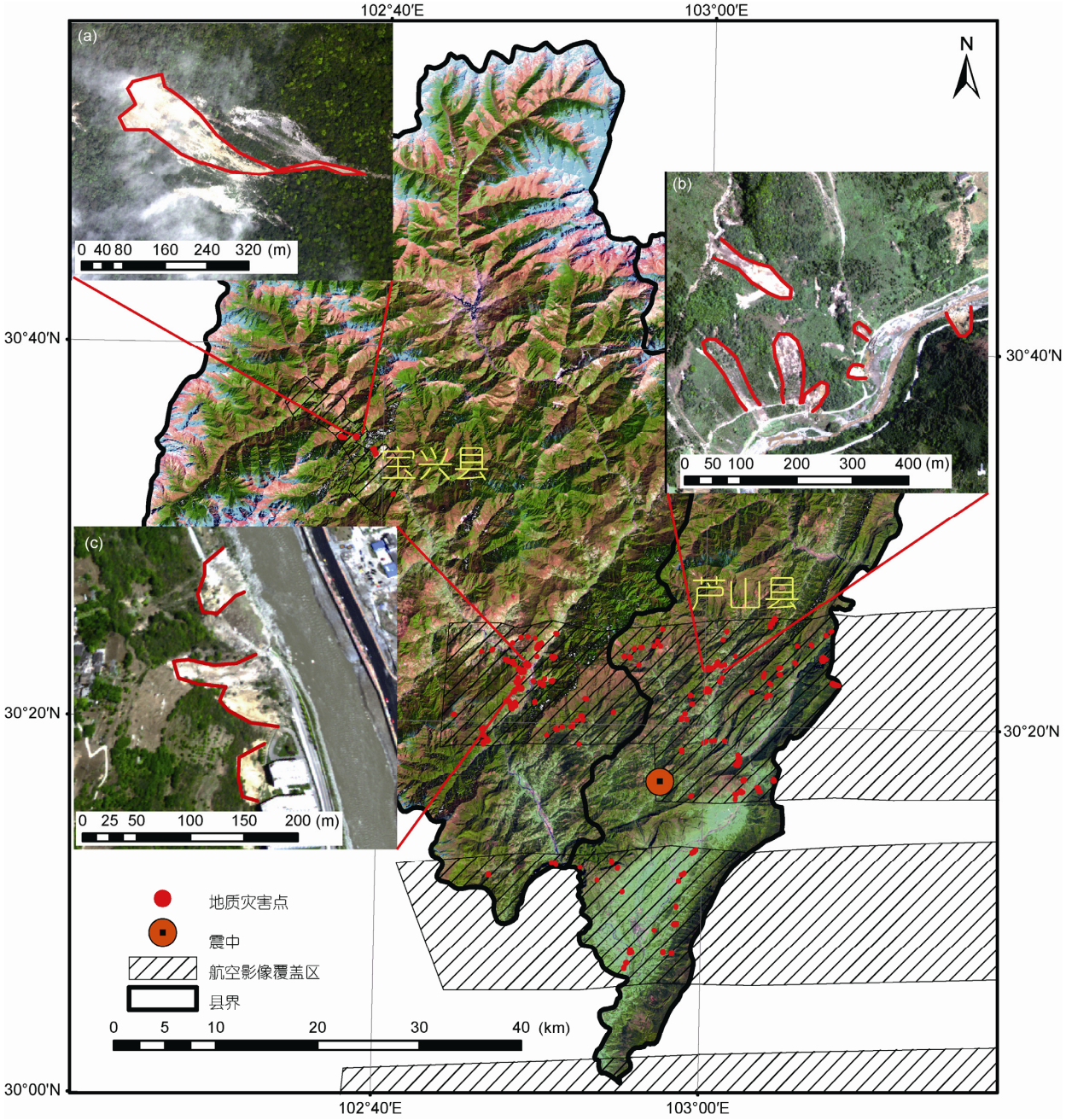


图 1 研究区影像覆盖及地质灾害解译结果

(a) 宝兴县健康村附近崩塌, 毁坏林地面积约 20000 m^2; (b) 芦山县中林乡沙坝子村附近多处崩塌及滑坡, 共计损坏道路百余米并威胁河道; (c) 宝兴县城体育场北侧 3 处崩塌损坏道路约 50 m, 其中 1 处威胁建筑

是一个映射分析, 主要是考虑控制和影响地质灾害发生的基本因素和影响因素各自对地质灾害易发性的贡献, 将其按照一定的数学方法进行叠加和组合, 来分析灾害的易发性. 各种敏感性评价的数学模型和方法都是建立在对地质灾害与环境背景条件的映射分析基础之上的, 这些环境背景条件称为评价因子.

2.1 评价因子

地震诱发型地质灾害的主要影响因素包括地形因素、地质环境因素(工程地质岩性、断裂构造、水

系条件)、地表覆盖因素(植被)及地震活动因素[1]. 据此确定的评价因子如下:

(ⅰ) 地形因子. 包括坡度、坡向、高程. 研究区坡度、坡向、高程基于 SRTM DEM(分辨率约 30 m)数据获取, 各因子的分布如图 2(a)~(c)所示. 为便于统计分析, 依据地质灾害在各因子中的分布情况, 分别将因子进行分段处理, 如表 1 所示.

(ⅱ) 工程地质岩性. 按照 1:25 万比例尺地质图(全国地质资料馆提供)的岩性描述, 研究区内岩性分布如图 2(d)所示. 本次研究将其分为 3 个岩性组, ① 软弱岩性组: 第四系(Q)冲洪积物, 石炭系(C)黑色碳质页岩夹煤层, 志留系茂县群(S*m*)灰黑色、灰绿色千枚岩, 强烈风化的侵入岩类如中粗粒花岗岩等(γ), 震旦系陡山沱组(Z_2d)千枚岩, 三叠系飞仙关组(T_1f)粉质泥岩; ② 软硬相间岩性组: 二叠系(P)碳质页岩、灰岩夹煤层, 泥盆系(D)灰岩、砂岩夹煤层, 志留系粉砂质页岩、泥岩、灰岩互层, 奥陶系龙马溪组(O_3S_1l)碳质页岩夹粉砂岩, 三叠系须家河组(T_3x)砂岩夹泥岩及煤层, 古近系(E)泥岩夹粉砂岩; ③ 坚硬岩性组: 震旦系灯影组($Z_2\varphi_1d$)中厚层白云岩, 侏罗系(J)、白垩系(K)厚层砂岩、灰岩等.

(ⅲ) 断裂构造. 宝兴县与芦山县位于龙门山断裂带西南段. 该段对应发育有 3 条活动断裂带, 如图 2(e)所示, 分别命名为后龙门山断裂带、中央断裂带和前山断裂带. 后龙门山断裂带由 NE 向的五龙断裂和 NNE 向的冷碛断裂组成, 这条断裂带向北东延伸与龙门山断裂带中段的映秀-北川断裂相接, 向南西终止在鲜水河断裂带上, 该断裂为西南段总体地貌格局的控制断裂. 中央断裂带也称双石-大川断裂, 从天全以南向北经大溪、双石、大川、西岭等, 再向北东与安县-灌县断裂带相连; 前山断裂带也称大邑断裂带, 该断裂带遥感影像特征不甚明显, 前人的调查和研究结果显示, 这是一条全新世活动性断裂, 具有右旋逆冲运动性质[2~4], 本次地震的发震构造即为此断裂. 本次研究将断裂的影响缓冲区分别以 350 和 1200 m 为界, 分为 3 段, 如表 1 所示.

(ⅳ) 水系条件. 为突出不同规模河流对崩滑的影响, 本次研究将水系区分为主干水系及支流水系(图 2(f), 水系生成基于 SRTM DEM 数据). 主干水系为玉溪河、灵关河(东河、西河), 其余为支流水系. 针对主干水系及支流分别建立不同的缓冲区范围分析其对地震地质灾害的影像. 缓冲区建立标准见表 1.

(ⅴ) 植被覆盖. 本文基于 ETM 影像获取归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)作为植被覆盖的度量指标(图 2(g)). 表达式为: NDVI=(B4−B3)/(B4+B3), 其中 B3, B4 分别为 ETM 第 3, 第 4 波段反射率值. 最后将研究区内 NDVI 按照地质灾害分布集中情况分为 4 段, 如表 1 所示.

(ⅵ) 地震活动. 研究区内烈度分区如图 2(h)来源于美国地质调查局(USGS)发布的地震烈度图. 本次研究分别以烈度 5.5, 6.5, 7.5 为分界, 分为 4 段, 如表 1 所示.

2.2 评价模型选择

本次研究选取信息量评价模型、概率指数模型对研究区未来次生地质灾害敏感性进行评价和对比分析.

(ⅰ) 概率指数模型. 概率指数是指将某一因子类 X 中, 地质灾害面积密度最大的因子发生地质灾害的概率设定为 100%, 那么因子 X_i 发生地质灾害的概率由以下公式算出:

$$GW_{\text{area}}(i)=\frac{D_{\text{area}}(i)}{\text{Max}\left(D_{\text{area}}(1),D_{\text{area}}(2)\cdots D_{\text{area}}(m)\right)}, \quad (1)$$

其中, $GW_{\text{area}}(i)$是因子 X_i 中发生地质灾害的概率, $D_{\text{area}}(i)$是因子 X_i 的地质灾害的面积密度.

本次研究以宝兴县及芦山县内航片覆盖范围为概率指数评价建模区域, 区域内各因子的概率指数计算值见表 1. 将所有因子概率指数图层进行叠加运算, 得到全要素综合概率指数图, 即基于概率指数的区域地质灾敏感性分布图(图 3(a)). 采用几何分割方法结果分为 5 部分, 分别为极高易发区、高易发区、易发区、不易发区、极不易发区, 并将解译的地质灾害叠加之上效果如图 3(b)所示.

(ⅱ) 信息量评价模型. 信息量模型的理论基础是信息论, 采用地质灾害发生过程中熵的减少来表征地质灾害事件产生的可能性, 因子组合对某地质灾害事件的确定所带来的不肯定性程度的平均减少量等于该地质灾害系统熵值的变化, 认为地质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, 可以用信息量来衡量的, 信息量越大, 表明产生地质灾害的可能性越大.

$$I(y,x_1,x_2,\cdots,x_n)=\log_2(P(y\mid x_2x_2\cdots x_n)/P_y), \quad (2)$$

式(2)可进一步写成

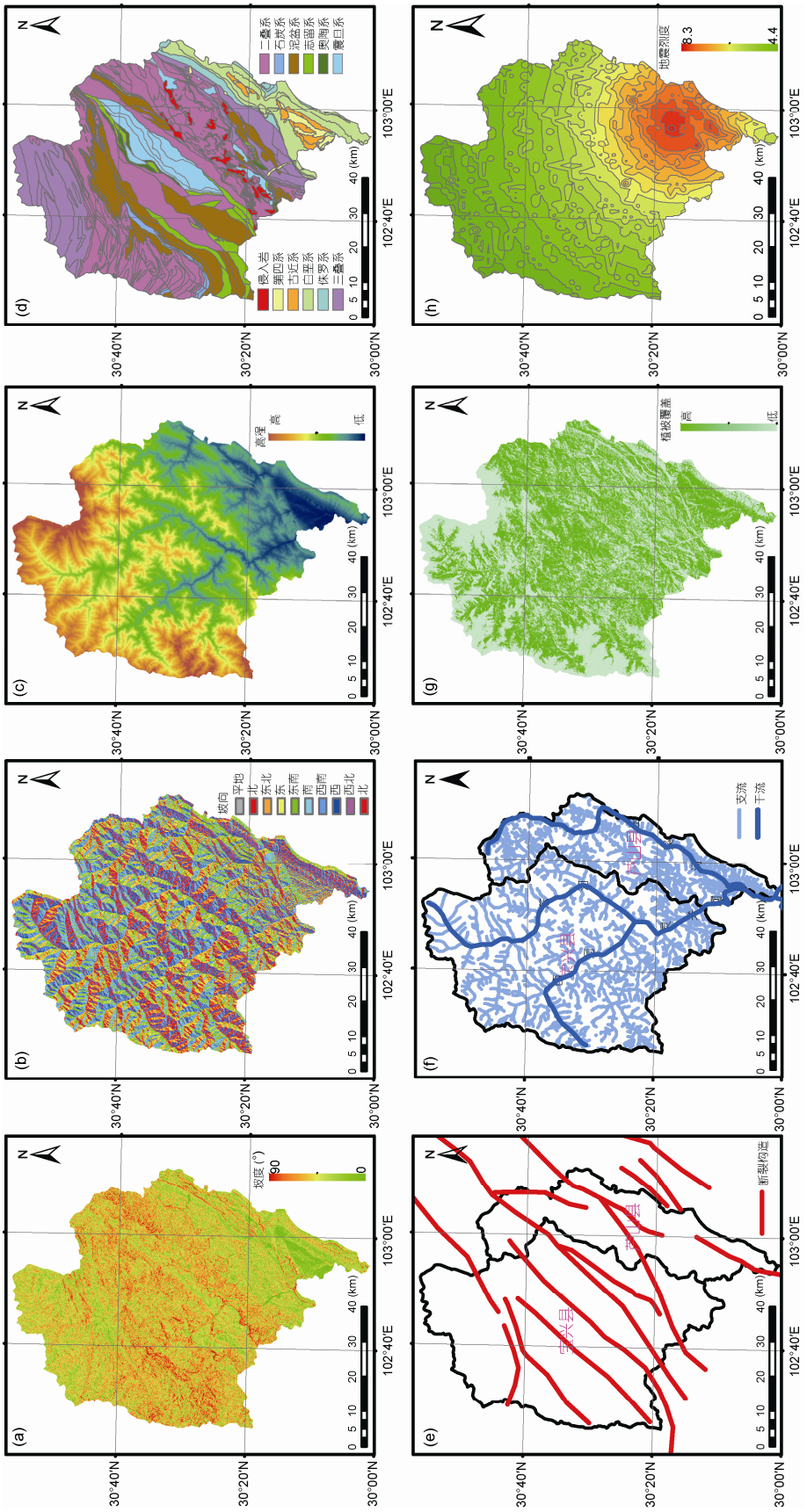


图 2 地质灾害敏感性评价因子

(a) 坡度; (b) 坡向; (c) 高程; (d) 岩性; (e) 断裂构造; (f) 水系; (g) 植被覆盖; (h) 地震烈度

表 1　各评价因子信息量及概率指数计算结果

评价因子	分段情况	类内总面积(km^2)	类内灾害面积(km^2)	信息量	概率指数	贡献排序
坡度(°)	0~10	68.00	0.04	−1.16	0.17	33
	11~30	372.85	0.53	−0.33	0.38	24
	31~40	185.13	0.42	0.12	0.60	12
	41~90	145.05	0.54	0.63	1.00	2
坡向	平地	0.04	0.00	−9.08	0.00	36
	北	37.08	0.05	−0.34	0.46	25
	东北	67.26	0.09	−0.40	0.44	27
	东	85.45	0.23	0.28	0.86	9
	东南	145.87	0.26	−0.12	0.57	20
	南	106.30	0.09	−0.80	0.29	32
	西南	79.73	0.08	−0.68	0.33	30
	西	85.30	0.23	0.31	0.89	8
	西北	164.18	0.50	0.43	1.00	6
高程(m)	596~1000	133.27	0.26	0.00	0.65	17
	1000~1500	295.21	0.90	0.43	1.00	7
	1500~2500	314.80	0.37	−0.53	0.38	29
	2500~5282	28.08	0.00	−4.61	0.01	35
水文条件	支流 200 m 外	436.48	0.61	−0.35	0.39	26
	支流 200 m 内	162.53	0.31	−0.05	0.52	19
	主干河道 400~1000 m	97.86	0.34	0.57	0.96	5
	主干河道 400 m 内	74.39	0.27	0.61	1.00	3
断裂构造	距离低于 350 m	58.77	0.37	1.14	1.00	1
	350~1200 m	130.52	0.29	0.10	0.35	14
	1200~3700 m	306.12	0.41	−0.40	0.21	28
	3700 m~最大	275.94	0.47	−0.15	0.28	21
地震活动(烈度)	小于 5.5	46.92	0.12	0.21	1.00	11
	5.5~6.5	62.07	0.01	−2.76	0.05	34
	6.5~7.5	483.74	1.02	0.05	0.85	15
	大于 7.5	178.74	0.39	0.11	0.90	13
工程岩性	松散岩性组	159.14	0.57	0.59	1.00	4
	软硬相间岩类	401.31	0.77	−0.03	0.54	18
	坚硬岩类	210.93	0.19	−0.79	0.25	31
植被覆盖(NDVI)	−1~0.002	45.20	0.08	−0.15	0.69	22
	0.002~0.157	215.71	0.35	−0.20	0.66	23
	0.157~0.298	367.74	0.75	0.03	0.83	16
	0.298~0.722	145.13	0.36	0.22	1.00	10

$$I(y,x_1,x_2,\cdots,x_n)=I(y,x_1)+I_{x_1}(y,x_2)+I_{x_1,x_2,\cdots,x_{n-1}}(y,x_n), \tag{3}$$

式中，$I(y,x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 为具体因素组合 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 对地质灾害提供的信息量；$P(y|x_2x_2\cdots x_n)$ 为因素 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 组合条件下地质灾害发生的概率；P_y 为地质灾害发生的概率；$I_{x_1,x_2,\cdots,x_{n-1}}(y,x_n)$ 为因素 $x_1,x_2,\cdots,x_{n-1}$ 存在条件下，因素 x_n 对地质灾害所提供的信息量.

同概率指数模型一样，本次研究以宝兴县及芦山县内航片覆盖范围为信息量评价建模区域，区域内各因子的信息量计算值见表 1. 将所有因子信息量图层进行叠加运算，得到全要素综合信息量图，即区域地质灾敏感性分布图(图 4(a)). 采用几何分割方法

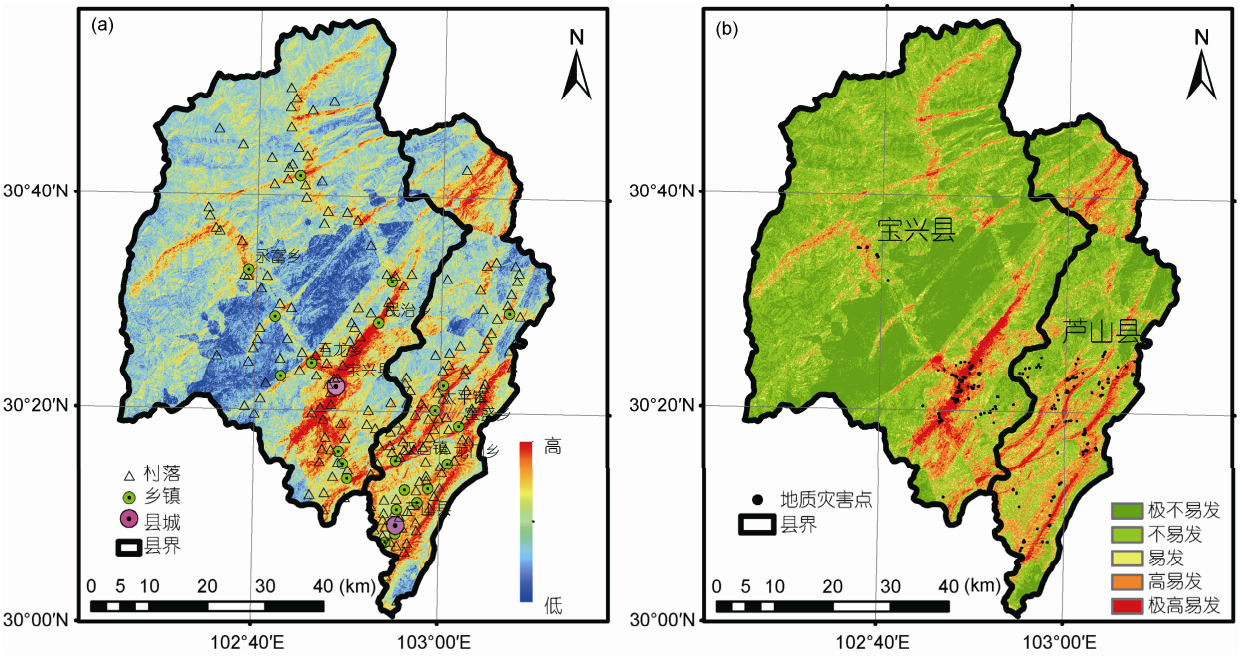


图 3 基于概率指数模型的地质灾害敏感性评价结果

(a) 敏感性相对强度与居民点叠加; (b) 敏感性分级结果与灾害点叠加

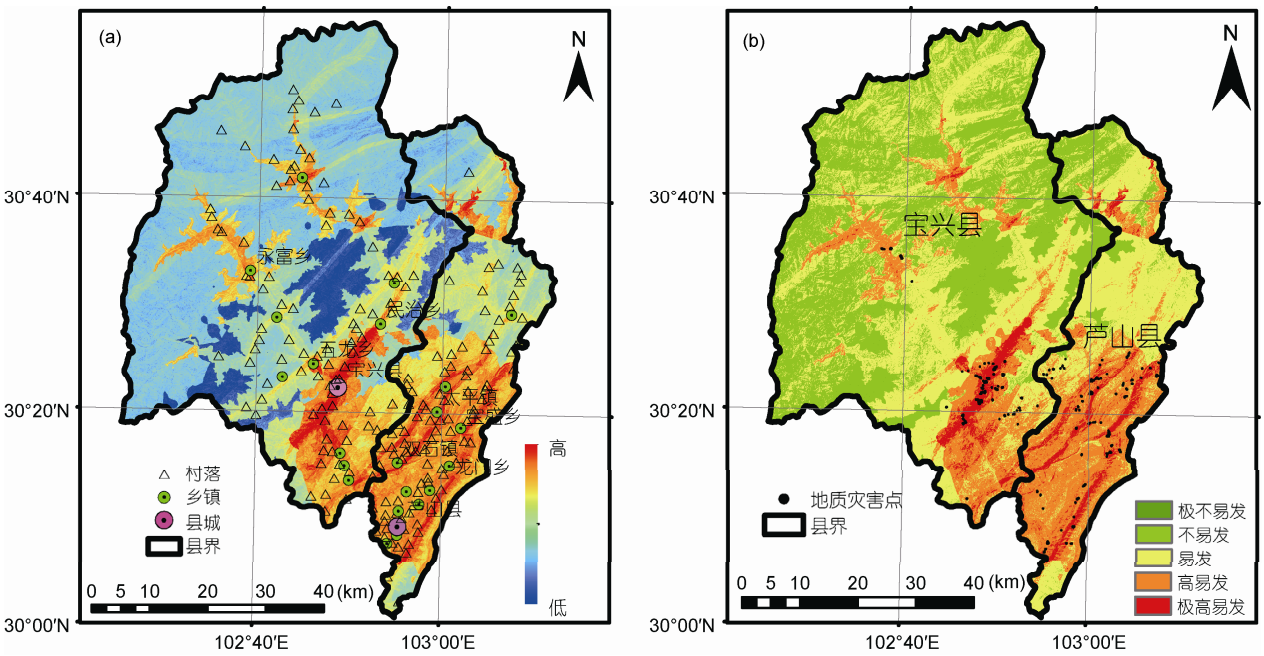


图 4 基于信息量模型的地质灾害敏感性评价结果

(a) 敏感性相对强度与居民点叠加; (b) 敏感性分级结果与灾害点叠加

结果分为 5 部分, 分别为极高易发区、高易发区、易发区、不易发区、极不易发区, 并将解译的地质灾害叠加之上效果如图 4(b)所示.

2.3 模型精度分析

在信号检测理论中, 接收者操作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线是一种对于灵敏度

进行描述的功能图像. ROC 曲线可以通过描述真阳性率(TPR)和假阳性率(FPR)来实现. ROC 曲线下的面积值(area under curve, AUC)在 0~1 之间, 面积越接近 1, 说明模型的判别效果越好. 其评判标准为: 在 AUC<0.5, 预测结果相反; AUC=0.5, 随机模型; AUC 在 0.5~0.7 之间, 模型具有较低的准确性, AUC 在 0.7~0.9 之间, 模型具有较高的准确性, AUC> 0.9, 模型具有极高的准确性. 将 ROC 曲线应用于地质灾害敏感性模型评价的概念对应关系如下: (1) 灵敏度: 实际为真值的判断为真值的概率, 即实际上是地质灾害且模型判断为地质灾害的概率; (2) 特异度: 就是把实际为假值的判断为假值的概率, 即实际上不是地质灾害且模型判断不是地质灾害的概率; 对于地质灾害敏感性预测这类连续型预测值应用 ROC 曲线进行评价的优势是不需要进行分类阈值的选择, 评价的结果更具客观性. ROC 曲线始于医疗诊断领域, 目前已经被广泛应用于包括地质灾害评价在内的各个领域[5,6]. 本次研究采用 SPSS 软件, 将信息量模型及概率指数模型的预测结果及建模区内地质灾害存在与否输入其中得到的模型精度结果如图 5 所示, 模型参数见表 2. 从精度评价结果可以看出, 二者的评价精度均达到了较高级别, 信息量模型精度 73.3%的精度略高于概率指数模型的精度 71.5%.

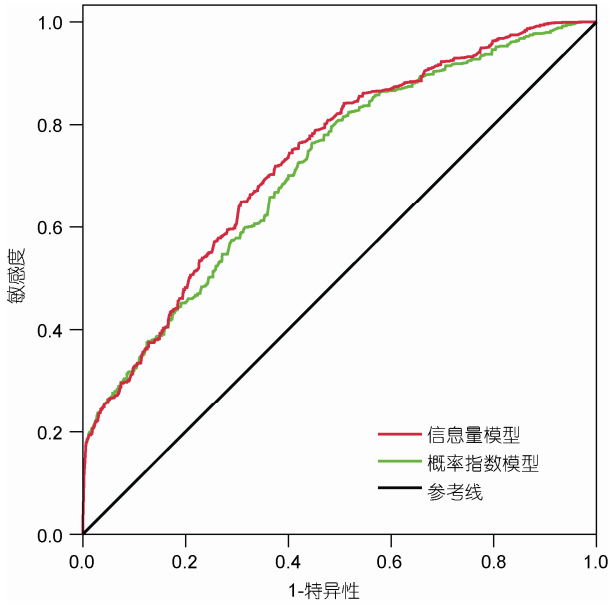


图 5 两个模型的精度评价结果

表 2 模型精度参数

检验模型	AUC	标准误差	渐进 Sig.	渐近 95%置信区间	
				下限	上限
信息量模型	0.733	0.006	0.000	0.721	0.744
概率指数模型	0.715	0.006	0.000	0.703	0.727

3 结论与讨论

芦山地震灾区地形地貌十分复杂, 属于地质灾害多发地区, 地震造成山体破裂, 加上余震频发, 一旦连续下雨, 极易发生严重次生地质灾害. 本文通过高分辨率航空遥感影像解译的地质灾害, 结合其孕灾因子分别采用概率指数模型与信息量模型对重灾区芦山县、宝兴县进行了地质灾害敏感性评价. 对比两种模型的评价结果可以看出, 地质灾害的敏感性强弱分布趋势基本一致, 信息量模型评价结果的离散性(方差)更大, 在芦山县区域内具有更高的敏感性分布. 模型精度评价表明信息量模型略高于概率指数模型. 评价结果表明芦山县双石镇、太平镇、宝盛乡、龙门乡及宝兴县五龙乡、民治乡、永富乡等地具有较高的地质灾害敏感性. 从分类得到的各孕灾因子的信息量贡献率排序(表 1)可以看出距离断裂构造 350 m 以内对地质灾害影响最大, 其次为较陡的坡度(40°以上)及距离主干河道较近区域.

需要指出的是, 本次研究区选择的是芦山及宝兴两个县城覆盖区域, 但是由于航空遥感影像覆盖的限制, 建模的区域为航带覆盖范围内的部分(图 1 条纹区与两个县城重叠区). 所有评价因子统计分析均是基于建模区开展, 最后将得到的模型结果应用到整个研究区. 这种方法在建模区域与非建模区域环境孕灾因子值域特征相近, 致灾机理相同的情况下是可行的, 本次研究的建模区与其他区域高程及地震烈度值域范围存在一定程度差异. 为消除差异影响, 在做高程因子分段时, 将超过 2500 m 高程没有进一步分段. 地震烈度的信息量贡献整体不高, 因而影响程度不大. 此外, 部分因子段内信息量计算结果呈现与常识不吻合的情况, 如植被覆盖少的地方, 地质灾害贡献率未必多于植被覆盖多的地方, 这主要是由于各评价因子间的相关性造成的, 植被覆盖的好坏受水文、岩性条件等其他因素影响较大, 后续在更多数据辅助下, 可进一步针对各评价因子对地质灾害的影响做更深入的综合分析.

参考文献

1 Dai F C, Xu C, Yao X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 *Ms*8.0 Wenchuan earthquake, China. J Asian Earth Sci, 2011, 40: 883–895
2 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 等. 从汶川地震到芦山地震. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1064–1072
3 唐文清, 张清志, 刘宇平, 等. 汶川地震后龙门山断裂带活动特征. 沉积与特提斯地质, 2012, 4: 106–110
4 陈国光, 计凤桔, 周荣军, 等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究. 地震地质, 2007, 3: 657–673
5 方苗, 张金龙, 徐琪. 基于 GIS 和 Logistic 回归模型的兰州市滑坡灾害敏感性区划研究. 遥感技术与应用, 2011, 6: 845–854
6 Van Den Eeckhaut M, Vanwalleghem T, Poesen J, et al. Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: A case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). Geomorphology, 2006, 76: 392–410

Geological disaster susceptibility assessment of the Lushan earthquake based on RS and GIS

CHEN Yu, GUO HuaDong & WANG QinJun

Key Laboratory of Digital Earth Sciences, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

A 7.0-magnitude earthquake hit Lushan County, Ya'an, Sichuan, southwestern China at 8:02 am on April 20, 2013. The Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences immediately launched a major emergency response and conducted a rapid assessment of the situation after the earthquake. Based on the distribution of landslides interpreted from aerial remote sensing images with a 0.6-m resolution, we applied eight evaluation factors (slope, aspect, elevation, lithology, faults, hydrology, vegetation cover, and seismic intensity) to two models—the information index model and the probability model—to assess the landslide susceptibility of the quake-hit Lushan and Baoxing counties. Analysis of the contribution of each evaluation factor indicates that the earthquake had the greatest impact in areas which were less than 350 meters from the fault, and the next most affected areas were those with a steep slope (40° or more) close to the main river. An evaluation of the accuracy of the models using receiver operating characteristic (ROC) shows that the information index model has a slightly higher accuracy (73.3%) than the probability model (71.5%). The two evaluation results are in good agreement and indicate that the towns of Shuangshi, Taiping, Baosheng, and Longmen in Lushan County and the townships of Wulong, Minzhi, and Yongfu in Baoxing County are highly susceptible to damage from geological disasters. These results can provide useful information for the post-earthquake geological disaster point investigation and help plan measures to prevent secondary disasters.

Lushan, earthquake, geological disaster, information index model, probability model

doi: 10.1360/972013-665