

汶川地震山地灾害遥感快速提取及其分布特点分析

苏凤环^{1,2}, 刘洪江^{1,3}, 韩用顺^{1,2}

(1 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

3 云南财经大学 遥感与 GIS 中心, 云南 昆明 650221)

摘 要: 针对泥石流滑坡灾害体特有的物质组成与活动特点, 通过比较分析其不同遥感影像的光谱特征差异, 选择 ETM+ 影像作为主要数据源, 提取湿度指数与绿度指数, 利用 ETM+ 的穗帽变换、影像差值增强、密度分割和掩膜技术建立了泥石流滑坡山地灾害快速提取模型, 并用于汶川地震。通过灾害体的提取, 分析了本次地震山地次生灾害的分布规律, 利用空间叠加进行了成因的分析。本次地震山地灾害具有如下特点: (1) 沿主要地表破裂带分布; (2) 山地灾害主要出现在 8 度—9 度地震烈度区, 随着烈度的降低, 山地灾害的总面积也相应的减少; (3) 山地灾害主要发生在海拔高度 1000—2500m 的地带; (4) 主要发生在坡度 20°—50°之间的边坡上; (5) 地震及余震期间以崩塌滑坡滚石为主, 后期以泥石流滑坡为主; (6) 具有河流左右两岸呈不对称分布等特点。结果表明, 利用 ETM+ 影像建立基于湿度指数与绿度指数的快速提取模型, 对于大规模泥石流滑坡提取效果较好, 进行大区域山地灾害的遥感快速提取是可行的。

关键词: 汶川地震; 山地灾害; 遥感; 快速提取

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

在世界许多国家, 地震是引起崩塌滑坡的主要原因。地震常常导致大面积斜坡变形破坏, 加速山地环境向恶性循环发展^[1,2]。地震诱发的坡体失稳形成滑坡所酿成的灾害远远超过地震本身直接造成的灾害。例如美国阿拉斯加大地震造成 12 亿美元的经济损失, 其中崩塌滑坡灾害损失 6.7 亿美元 (占总额的 56%)。这场地震导致 130 人死亡, 其中有 48 人是因崩塌滑坡过程所造成^[3]。1996-02-03 云南丽江发生 7.0 级地震, 造成 309 人死亡, 灾区面积 1.2 万 km² 范围内诱发了至少 420 处小型崩塌和 30 处大中型滑坡^[4]。

2008-05-12 在中国四川省汶川县发生了里氏 8.0 级地震, 本次地震波及范围广、引发次生山地灾害多、危害巨大、救灾困难, 均为历史罕见^[5,6]。由于地震重灾区位于四川西部山区, 山高谷深, 地质

构造复杂, 断裂发育, 地震灾害直接引发大量崩塌、滑坡、泥石流和堰塞湖等次生山地灾害, 对山区城镇村庄、道路交通、水利水电工程和通讯基础设施等造成严重破坏, 给灾区抗震救灾和灾后重建带来了巨大的困难。需要采取切实有效的方法了解次生山地灾害的分布, 为移民安置点设置、灾区重建、选址及后期抢险提供依据。

遥感技术已在滑坡领域得到广泛的应用。其应用主要集中在滑坡区域调查与滑坡的动态监测 2 个方面^[7-9]。目前国内外相关研究多采用信息增强、信息融合和目视解译相结合的方法获取灾害体信息, 灾害体的自动判识与提取仍需经过一个较长的探索发展与成熟的过程。

本文利用灾前灾后 2 期 ETM+ 影像, 根据湿度指数和绿度指数的光谱特征分析, 建立灾害体快速提取模型; 进行地震山地灾害的遥感快速提取与其分布特点分析, 为灾后山地地质灾害快速评估与分析提供支撑。

收稿日期: 2008-07-12 修订日期: 2008-08-01

基金项目: 中国科学院知识工程重要方向项目 (编号: KZCX2-YW-302) 和国家自然科学基金项目 (编号: 40841011)。

作者简介: 苏凤环 (1977—), 女, 博士学位, 现中国科学院山地灾害与环境研究所博士后, 毕业于西南交通大学, 主要从事 3S 技术与防灾减灾研究, 已发表论文 9 篇。E-mail: fhsu@imde.ac.cn。

采用 ETM+ 数据的 5、4、2 波段进行泥石流滑坡的遥感解译。滑坡表现为蓝灰色的同时, 具有明显的滑坡后壁和滑动面特征。

3 研究方法与处理流程

使用 ERDAS MAGNE 9.1 软件和 ENVI 4.3 完成泥石流滑坡山地灾害的快速提取工作, 包括数据格式转换、数据几何精纠正、2 期影像精确配准、数据融合、融合影像的增强处理等过程; 通过湿度指数和绿度指数的光谱特征分析, 建立泥石流滑坡灾害体快速提取模型; 提取滑坡体信息, 获得震后研究区山地灾害的解译成果图件。

图像数据处理以 1:5 万地形图作为地面控制点的数据来源, 运用 ERDAS 提供的多项式变换方法进行几何精校正, 首先分别对 2 期全色波段影像进行几何精校正, 然后利用灾后的影像对灾前影像进行配准, 最后利用配准后的 2 期全色波段影像分别对相应的多光谱影像进行点精纠正。要求 RMS 误差小于 0.5 个像元, 这样得到的影像在同一坐标下, 坐标系为横轴麦卡托—高斯克吕格投影。

数据融合方法可分为像元级融合、特征级融合和决策级融合 3 个层次^[13]。研究中采用基于像元级的融合方法。对不同融合方法的效果进行对比分析, 确定利用主成分变换法。

利用 ERDAS 图像处理软件对卫星数据进行彩

$$BR\ BRIGHT = 0.3037IM1 + 0.2793IM2 + 0.4743IM3 + 0.5585IM4 + 0.5082IM5 + 0.1863IM7 \quad (1)$$

$$GREEN = -0.2848IM1 - 0.2435IM2 - 0.5436IM3 + 0.7243IM4 + 0.084IM5 - 0.18IM7 \quad (2)$$

$$WET = 0.1509IM1 + 0.1973IM2 + 0.3279IM3 + 0.3406IM4 - 0.7112IM5 - 0.4572IM7 \quad (3)$$

经反复对比发现, 采取湿度指数 (WET) 减绿度指数 (GREEN) 增强方法能够极好反映泥石流滑坡的特征。相对其他地物类型特征, 采用二者差值增强方法可以有效地将泥石流滑坡灾害体与其他环境信息予以区分, 从而直接提取泥石流滑坡体。

密度分割方法

密度分割实质上是根据影像的 DN 值的不同对影像进行归类, 可以根据需要提取感兴趣的地物。密度分割值的选取范围建立在专家分类的基础上, 通过研究区灾害体像元的反复核对, 最后得到一个最佳的密度分割值。对于 ETM+ 其值为 34—78, TM 的密度分割值为 -15—30。

掩膜技术

由 ETM+ 5、4、2 生成的湿度指数与绿度指数

色合成、灰度变换、反差调节及亮度调节等图像增强处理。

山体阴影为灾害体信息提取带来困难, 故在前期采用比值法将山体阴影予以消除。

3.1 光谱特征分析

泥石流滑坡灾害体的物质组成与活动方式极其特殊, 因而在影像上的色调、形状、位置、大小和纹理等特征存在较大的差异。泥石流滑坡具有 2 个最为显著的特征: 松散物质含水量高与植被破坏严重。它们在遥感影像上反映的则是土壤湿度和植被覆盖度特征, 土壤湿度可以用湿度指数反映, 植被覆盖度则可以用绿度指数进行反演。通过湿度指数和绿度指数的光谱特征分析就能提取灾害体的光谱异常, 可以进行灾害体快速提取模型构建。

3.2 模型的构建

模型的实现主要采用了影像增强技术、掩膜技术、人机交互的专家分类自动与半自动结合的泥石流滑坡识别技术。

缨帽变换

影像增强技术采用了缨帽变换 (Tasseled Cap), 利用如下变换式对影像进行缨帽变换, 产生亮度指数 (BRIGHT)、绿度指数 (GREEN) 和湿度指数 (WET)^[14]。

之差值所得到的影像, 生成新的图像。采用同样的方法由 TM 的第 5、4 波段生成水体掩膜; 采用第 5、4、3 波段组合运算得到城市掩膜。最后在 ENVI 4.3 软件中, 利用掩膜技术 (mask in), 构建掩膜 (build mask), 几个图像相减后便得到一个时期的泥石流滑坡灾害体。

3.3 数据分析与精度验证

3.3.1 泥石流沟谷提取

图 2 为灾害信息提取的原始影像中间过程和最后的提取结果, 从结果可以看到提取模型很好地反映了沟谷性泥石流和坡面泥石流的发育情况, 由此可以构建泥石流滑坡空间分布特征分析。

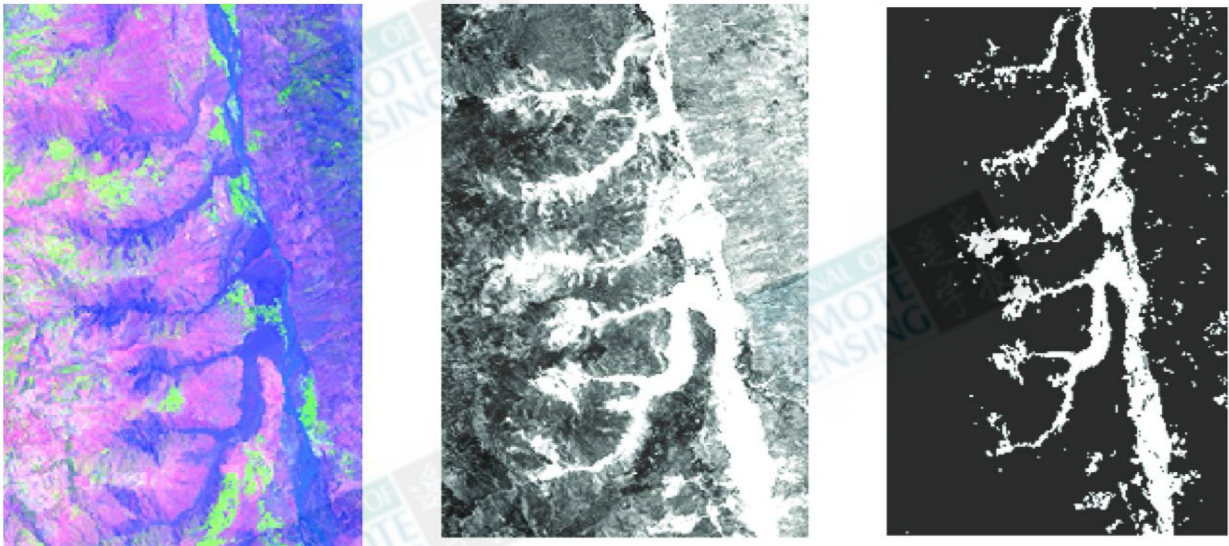


图 2 ETM+ 原始影像和密度分割和泥石流沟谷提取效果对比
Fig. 2 Effect comparison of ETM+ original image, density slice and debris flow gully extraction

3 3 2 大型沟谷泥石流验证

对研究区内典型地段三家村沟、打色尔沟等大型沟谷泥石流的提取均具有较好的效果 (图 3), 谷泥石

流的活动具有大尺度空间的特点, 在遥感影像上具有多个像元特征时, 能基本反演泥石流滑坡的分布, 说明模型对于大型沟谷泥石流的提取是适用的。

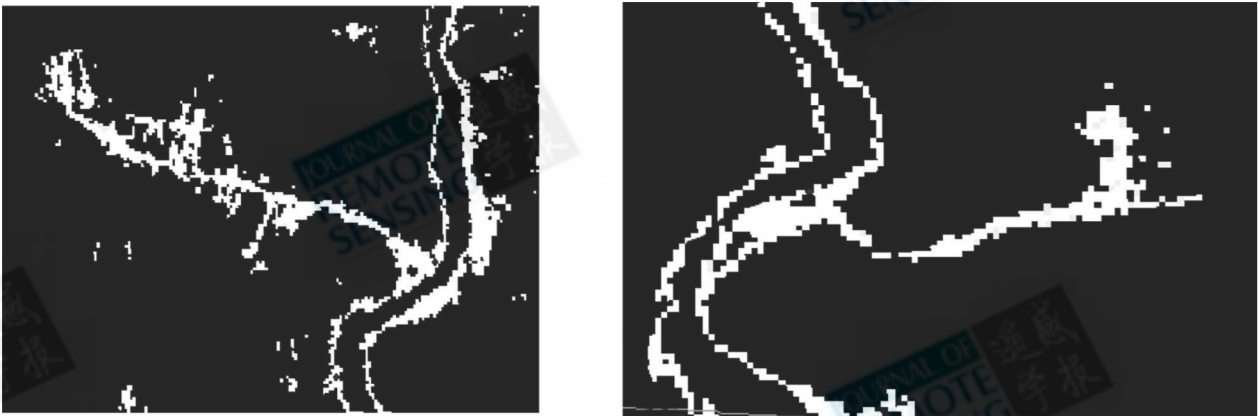


图 3 大型沟谷泥石流提取 (三家村沟和打色尔沟)
Fig. 3 Extraction of large scale gully debris flow (sanjiacun gully and daseer gully)

3 3 3 坡面泥石流检验

由于坡面泥石流的空间活动尺度较小, 提取的像元有时候只有几个甚至一个像元, 受到其他噪声信息干扰较大, 增大了模型的提取难度。由于泥石流滑坡具有强烈的光谱异常特点, 因此从理论上讲, 仍然可以将此部分弱信息提取出来。从图 4 对坡面泥石流的提取效果来看, 也能基本反映坡面泥石流的分布情况, 说明模型也能对坡面泥石流进行提取。

4 研究区山地灾害分布特征

4.1 山地灾害整体特征描述

图 5 为利用建立的山地灾害快速提取模型与方法获得的研究区的山地灾害分布图, 研究区共计有大型崩塌滑坡泥石流等次生山地灾害 5700 多处。由该图可以看出, 研究区山地灾害的空间分布具有分布范围广、但又不均匀的特点, 绝大多数灾害沿龙门山地震断裂带集中分布, 且有沿河谷发育与分布的特点。

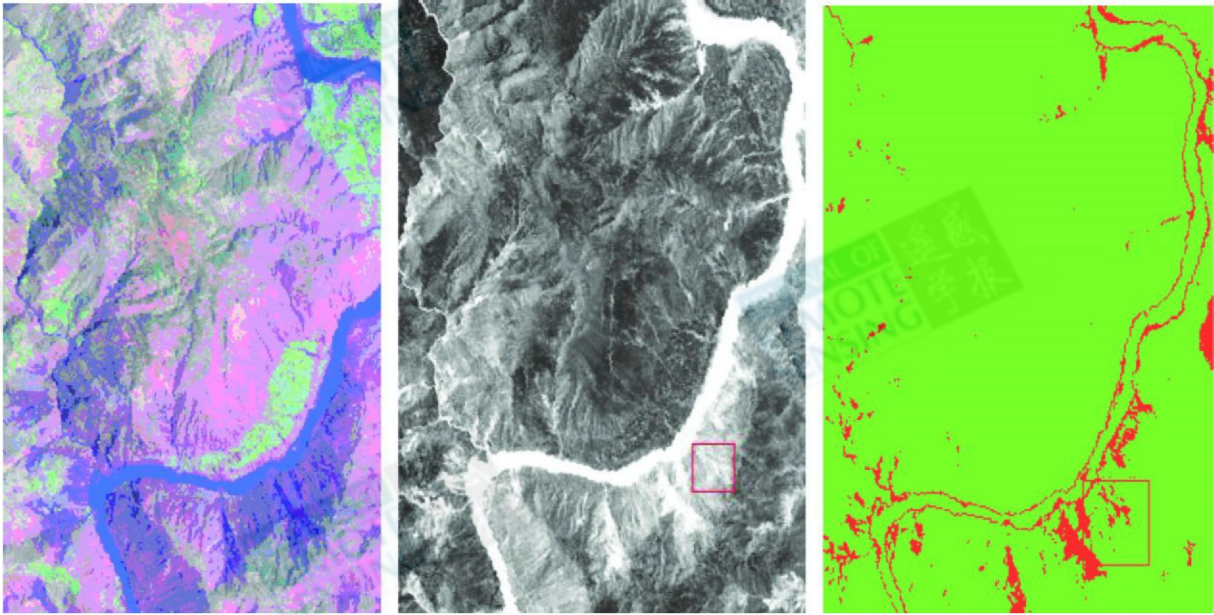


图 4 模型对坡面泥石流流的提取效果
Fig. 4 Extraction effect of debris flow on slop

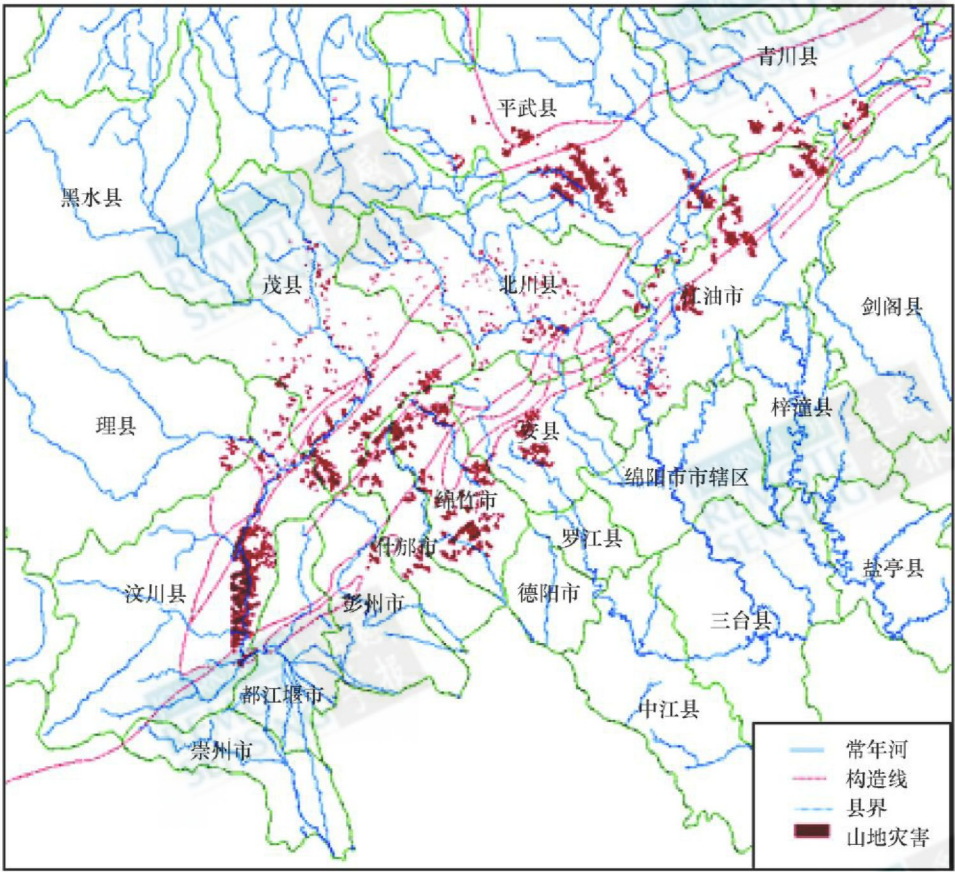


图 5 研究区山地灾害分布图
Fig. 5 Distribution of mountain hazard

4 2 山地灾害分布与地震烈度的关系
根据四川地震局制作的地震烈度分区图, 利用

arcgis叠加 统计功能计算不同烈度区山地灾害的数量与总面积 (表 1)。

表 1 不同地震烈度区山地灾害分布数量表

Table 1 Distribution quantity table of mountain hazard in different earthquake intensity area

地震烈度区 / (°)	地震烈度区面积 / km ²	崩塌滑坡泥石流山地灾害			
		个数	总面积 / km ²	崩塌群最大面积 / km ²	所占面积百分比 / %
11	2158.72	1040	93.175	9.304	35.44
10	3446.85	1261	74.025	4.092	28.15
9	7221.31	2009	57.37	3.179	21.82
8	27660.86	1311	37.59	2.972	14.30
7	83557.11	75	1.5	0.100	0.29
6	311830.67	12	0.05	0.002	0.01

从表 1 可以看出, 地震诱发的崩塌滑坡, 主要出现在 8 度—9 度地震烈度区。随着烈度的降低, 山地灾害的总面积也相应的减少。在 11° 烈度区, 崩塌滑坡主要分布在北川、汶川及国道 G213 都江堰—汶川一线。

4.3 山地灾害与地形地貌的关系

4.3.1 山地灾害与海拔高度的关系

利用研究区域的数字高程模型 DEM 数据进行空间分析, 将高程按照 500m 的等间隔划分为 12 类, 叠加分析不同高程范围内山地灾害的分布面积, 图 6 是山地灾害在不同海拔高度的面积百分

比。从图中看出, 山地灾害的分布具有明显的差异性, 海拔低于 500m, 高于 4500m 没有出现, 而 1000—2000m 分布的山地灾害百分比占 55.51%, 随着海拔的升高, 山地灾害所占面积逐渐减少。

4.3.2 山地灾害与坡度的关系

将研究区地形坡度按 10° 间隔划分为 8 级, 图 7 是不同坡度范围内山地灾害分布面积统计图。从图中看出, 30°—40° 间所占面积最多 (占 34.0%), 其次为 20°—30° (占 25.90%), 40°—50° (占 20%), 而坡度大于 70° 则没有山地灾害发生, 地震产生的崩塌滑坡等山地灾害大多发生在 20°—50° 的边坡上。

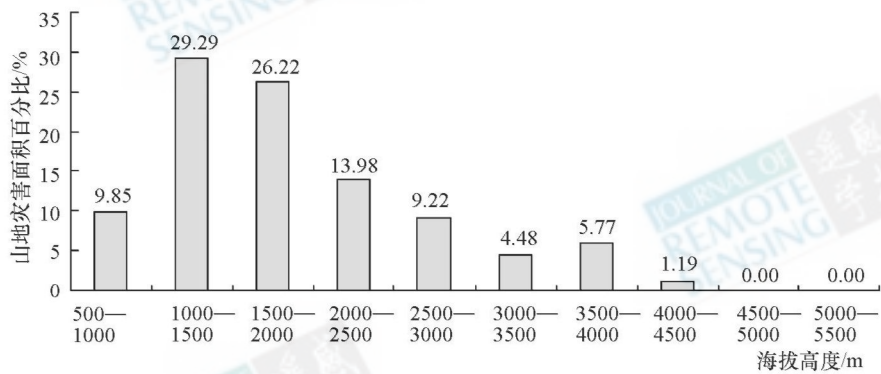


图 6 不同海拔高度山地灾害所占面积统计图
Fig. 6 Area cartogram of mountain hazard in different altitude

4.4 地震及余震期间以崩塌滑坡滚石为主, 后期以泥石流滑坡为主

地震直接在龙门山区等地激发了数以千计的崩塌滚石和滑坡等次生山地灾害, 这些滑坡多为古滑坡的复活, 如青川县前进乡小罗院子堰塞湖就是因为古滑坡的复活导致的堰塞湖回水淹没了大量的农田, 在滑坡体山坡及沟道内上部囤积了大量的

松散碎屑物质, 在雨季到来后将转化为泥石流。同时地震导致了新的滑坡体出现, 可以预见在今后几十年的时间内, 这个区域将成为泥石流的高发区。

4.5 具有河流左右两岸呈不对称分布等特点

地震次生山地灾害具有沿河谷发育与分布的特点, 典型的有沿岷江河谷 (都江堰—映秀—汶川—茂县段)、北川湔江河谷、青川河谷、安县茶坪

河上游等。这些河道两侧,由于山坡坡度陡,切割深,斜坡岩石破碎,在地震时发育了大量的崩塌、滑

坡,造成河道堰塞成湖,形成了大量的地震次生山地灾害。

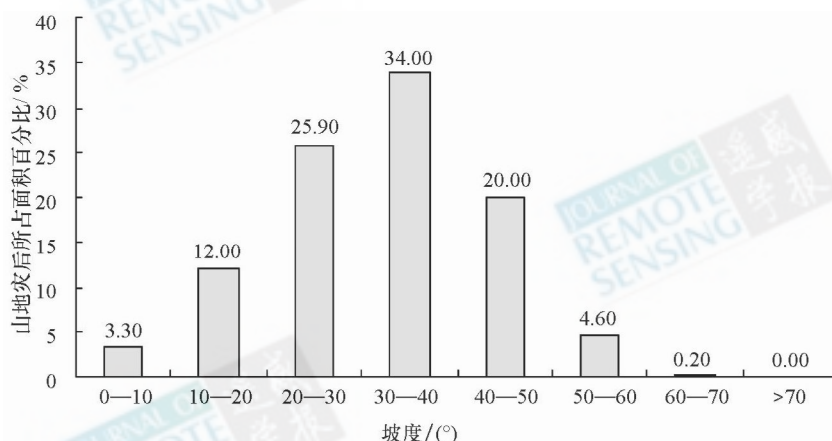


图 7 不同坡度山地灾害所占面积统计图

Fig. 7 Area cartogram of mountain hazard in different slop

5 结论与讨论

本研究根据泥石流滑坡的特点即含水量较高和绿度指数较低的特点,利用 TM、ETM+ 的穗帽变换、影像差值增强、密度分割和掩膜技术建立了泥石流滑坡快速提取模型。根据建立的模型对震后研究区的山地灾害进行快速提取,获取研究区的山地灾害分布图;最后对地震次生山地灾害的分布与发育规律进行了分析。

研究存在的缺陷主要表现在:(1)泥石流滑坡的活动尺度具有一定的尺度变化范围,模型对于处理大型泥石流滑坡体具有较好效果;而对于坡面泥石流,由于其宽度在 15m 以下活动范围,在 ETM+ 影像上仅表现为 1 个像元,因而模型提取小坡面冲沟效果不太理想。(2)目前模型对于阴影区泥石流滑坡的提取效果不太理想,虽然对阴影做了前期消除处理,但处理后的效果仍然受到噪声的影响,需要进一步加强研究。

综上所述,利用灾前、灾后的 ETM+ 融合影像建立山地灾害快速提取的模型是可行和有效的,本次研究为泥石流滑坡的自动识别模型建立进行了有益的探索。

致谢 本文在数据获取上得到中国科学院对地观测与数字地球中心提供的灾区免费 ETM 数据下载以及国家基础地理信息中心 DEM 数据支持,在野外考察过程中得到都江堰市政府的支持,在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Pain C F. Characteristics and Geomorphologic Effects of Earthquake-Initiated Landslides in the Adelbert Range Papua New Guinea [J]. *Engineering Geology*, 1972, **6**: 261—274
- [2] Garwood N C, Janos D P, Brokaw N. Earthquake-Caused Landslides: A Major Disturbance to Tropic Forests [J]. *Science*, 1979, **205**: 997—999
- [3] Keefer D K. Landslides Caused by Earthquakes [J]. *Geological Society American Bulletin*, 1984, **95**: 406—421
- [4] Tang C, Huang C X, Wan Y. Lijiang Earthquake and the Induced Rockfalls and Slumps in Yunnan [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1997, **6**(3): 76—84 [唐川, 黄楚兴, 万晔. 云南省丽江大地震及其诱发的崩塌滑坡灾害特征 [J]. *自然灾害学报*, 1997, **6**(3): 76—84]
- [5] Cui P, Wei F Q, He S M, et al. Mountain Disasters Induced by the Earthquake of May 12 in Wenchuan and the Disasters Mitigation [J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, **26**(3): 280—282 [崔鹏, 韦方强, 何思明等. 5·12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施 [J]. *山地学报*, 2008, **26**(3): 280—282]
- [6] Cui P, Wei F Q, Chen X Q, et al. GeoHazard in Wenchuan Earthquake Area and Countermeasure for Disaster Reduction [J]. *S&T for Disaster Relief*, 2008, **23**(4): 317—323 [崔鹏, 韦方强, 陈晓清等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策 [J]. *中国科学院院刊*, 2008, **23**(4): 317—323]
- [7] Wang Z H. Remote Sensing for Landslides in China [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2005, **63**(1): 1—7 [王治华. 中国滑坡遥感 [J]. *国土资源遥感*, 2005, **63**(1): 1—7]
- [8] Wang Z H. RS+GCPs Select Basic Information of Landslide [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, **15**(1): 94—101 [王治华. RS+GCPs 获取滑坡基本信息 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2004, **15**(1): 94—101]
- [9] Li T F, Xu Y R, Pan M, et al. Study on Interpretation of Rain-

- Induced Group Shallow Landslides Based on Multi-Period SPOT-5 Remote Sensing Images[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, **1**(3): 1—7. [李铁锋, 徐岳仁, 潘懋等. 基于多期 SPOT-5 影像的降雨型浅层滑坡遥感解译研究[J]. 北京大学学报(自然科学版): 2007, **1**(3): 1—7.]
- [10] An Q M, Ding L F, Wang H Z, *et al*. Research of Property and Activity of Longmen Mountain Fault Zone[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2004, **24**(2), 115—119. [安其美, 丁立丰, 王海忠等. 龙门山断裂带的性质与活动性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, **24**(2), 115—119.]
- [11] Costa J E, Schuster R I. The Formation and Failure of Natural Dams[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1998, **100**, 1054—1068.
- [12] Chai H J, Liu H C, Zhang Z Y. The Temporal-Spatial Distribution of Damming Landslides in China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, **18** (Suppl): 51—54.
- [13] Kallen D, Xiang W, Rohn E D. Landslides at Qingjiang River in the Downstream Area of Shuibuya Dam Site, China[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2006, **17**(2): 158—162.
- [14] Yang C J, Liu J Y, Hang H, *et al*. Correlation Analysis of the Biomass of the Tropical Forest Vegetation, Meteorological Data and Topographical data[J]. *Geographical Research*, 2005, **24** (3): 473—479. [杨存建, 刘纪远, 黄河等. 热带森林植被生物量与遥感地学数据之间的相关性分析[J]. 地理研究, 2005, **24**(3): 473—479.]

The Extraction of Mountain Hazard Induced by Wenchuan Earthquake and Analysis of Its Distributing Characteristic

SU Feng-huan^{1,2}, LIU Hong-jiang^{1,3}, HAN Yong-shun^{1,2}

(1 Key Laboratory of Mountain hazard and surface process CAS, Sichuan Chengdu 610041, China;

2 Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Sichuan Chengdu 610041, China;

3 RS&GIS center of Yunnan University of Finance, Yunnan Kunming 650221, China)

Abstract The deadly Wenchuan Earthquake hit Wenchuan, a small city southwest of Sichuan Province, China, with a magnitude of 8.0 at 14:28 local time of May 12. It shook more than half of China and brought devastation to more than fifty counties. The earthquake has not only caused numerous personnel casualties and destroyed kinds of facility directly, but also induced a lot of mountain hazards and superimposed the hazards more severely. The extraction of earthquake-induced mountain hazards using remote sensing images has important significance for earthquake relief, assessment of bearing capacity of disaster area and reconstruction work after earthquake. The extraction of disaster area is realized by a method combination of information enhancement, information fusion and visual interpretation. According to the active characteristic and material combination of debris flows and landslides, we compare and analyze the spectral feature difference of different images and take ETM+ image as main data source. Debris flows and landslides have two distinct properties of higher water content and lower vegetation cover. The reflective features on remote sensing images are soil moisture and vegetation coverage, which can be reflected by wetness index and green index. After the extraction of wetness index and green index, tasseled cap transformation, image difference reinforcement, density slice and mask technology are used to build the quick extraction model for debris flows and landslides. The model is used to extract mountain hazards induced by Wenchuan earthquake. The distribution rule and feature of geo-hazard and genesis are analyzed by spatial overlay. Mountain hazards induced by the earthquake distribute mainly along Longmenshan Mountain earthquake zones and rivers on both hillsides. They have the following characteristics: 1. The types of mountain hazards are diverse, including collapses, landslides, rockfalls, imprisoned lakes, debris flows and so on. 2. The relation is closed between the strong level of the action and the intensity of the earthquake. The mountain hazards are mainly present in the earthquake intensity area from 8 degree to 11 degree. With the intensity reduced, the gross area of geo-hazard decreased. 3. The mountain hazards mainly occurred in areas 1000m to 2500m altitude. 4. The gradient of the slope of generating geo-hazard mainly varied in the range from 20 to 50 degree. 5. In quantity by collapses, landslides, rockfalls primarily during aftershock and landslides, debris flows primarily during anaphase. 6. Pair of ecological environment destruction is enormous.

Key words Wenchuan Earthquake; mountain hazards; remote sensing; extraction