

汶川大地震滑坡体遥感识别及生态服务价值损失评估

花利忠^{1,2}, 崔胜辉^{1,*}, 李新虎¹, 尹 锴¹, 邱全毅¹

(1. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要:利用遥感技术,提出了综合遥感指数、非监督分类和监督分类的自动识别滑坡体的方法:先构建 4 个遥感指数(植被指数 SAVI、水体指数 MNDWI、建筑指数 NDBI 和云指数 NDCI)合成新影像图,用 SAVI 指数阈值分割新影像图确定无植被区,最后对无植被区进行非监督分类和监督分类区分滑坡体的方法。以 TM/ETM+ 影像为数据源,应用此方法提取了地震重灾区——汶川县的滑坡体,分类精度达 93%,进而研究了滑坡体空间分布特征并对其造成的生态服务价值损失进行了评价。结果表明,滑坡体面积随着坡度的增加呈现先增后减的趋势,30~40°之间的滑坡体面积最大;地震共产生滑坡体 206.5 km²,汶川-茂县,映秀-北川两大断裂带之间的区域受地震影响最大,成为滑坡灾害最为严重的区域,其中映秀镇 15.9% 的乡镇面积被滑坡体所掩埋;地震造成全县 151.08 km² 林地、16.13 km² 草地和 5.11 km² 耕地丧失,崩塌的滑坡体填充的河流面积达 3.45 km²;各类生态系统服务总价值损失 22 646 万元,其中林地生态系统服务价值损失最大,占 89.8%,虽然耕地价值损失所占比重不大,但滑坡灾害使人均耕地减少 45.6 m²,加剧了该县耕地面积短缺的局面。

关键词:遥感识别; 滑坡; 地震; 汶川县; 断裂带; 生态服务

文章编号:1000-0933(2008)12-5909-08 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Remote sensing identification of earthquake triggered landslides and their impacts on ecosystem services: a case study of Wenchuan County

HUA Li-Zhong^{1,2}, CUI Sheng-Hui^{1,*}, LI Xin-Hu¹, YIN Kai¹, QIU Quan-Yi¹

1 Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 5909 ~ 5916.

Abstract: In this paper, we present a method for assessing landslides and associated ecosystem service losses based on TM/ETM+ remote sensing techniques. The method includes three major steps. The first step is to calculate the four indexes, Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), Normalized Difference Built-Up Index (NDBI) and Normalized Difference Cloud Index (NDCI), and layerstack them as a new image. The second step is to use SAVI for identifying non-vegetation areas from the new image. The final step is to execute once unsupervised and supervised classification respectively. We applied this method in the spatial analysis of the landslides in Wenchuan County after the 8.0 earthquake of May 23, 2008. The result shows that the area of a landslide increases with land-slope

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-422);厦门市科技计划资助项目(3502Z20072002)

收稿日期:2008-09-20; 修订日期:2008-11-21

作者简介:花利忠(1978~),男,山西晋中人,博士,GIS与遥感应用,城市生态环境规划研究. E-mail: hualizhong2008@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shcui@iue.ac.cn

致谢:感谢黄少鹏教授的指导与帮助。

Foundation item: The project was financially supported by the Key direction in Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-422); Science and technology plan projects of Xiamen (No. 3502Z20072002)

Received date: 2008-09-20; **Accepted date:** 2008-11-21

Biography: HUA Li-Zhong, Ph. D., mainly engaged in GIS and RS application, and urban eco-environment planning. E-mail: hualizhong2008@yahoo.com.cn

when the slope is smaller than 30—40 degrees, whereas it decreases with slope when the slope is greater. The affected areas of the earthquake-triggered landslides in Wenchuan County are summed to 260.5 km². The most seriously damaged areas are located in between two major fault zones, such as the town of Yingxiu where 15.9% of its area was affected by land sliding. County-wide, it is estimated that 151.08 km² of forestland, 16.13 km² of grassland, 5.11 km² of farmland and 3.45 km² of river channel were destroyed by the earthquake. The associated cost due to the loss of various ecosystem services is about 226.5 million Yuan, 89.8% of which is resulted from the loss of forestland. Although the area of the lost farmland is relatively small, it exerts additional stress on the farmland shortage by decreasing the average ownership by 45.6 m² per person in Wenchuan County.

Key Words: remote sensing identification; landslide; earthquake; Wenchuan County; fault zone; ecosystem service

2008年5月12日14点28分,我国四川省汶川县发生里氏8.0级强烈地震。这次新中国成立以来破坏性最强、波及范围最广的地震,共造成约8.7万人遇难,直接经济损失高达8450亿元人民币。地震不仅造成直接的灾难,而且还对灾区的生态环境产生重要影响,催生一系列的次生地质灾害,诸如山体滑坡、堰塞湖以及由堰塞湖溃坝所引发洪水灾害等。因此如何快速准确识别滑坡体的数量及分布特征,并对由此产生的一系列生态环境问题作出科学合理的评估,对于保障灾区人民的生命财产安全意义重大。

迅速发展的遥感技术,为区域地质灾害及其发育环境宏观调查研究提供了有利的支持和崭新的手段。在地震^[1]、滑坡^[2]、崩塌、泥石流和地面沉降等地质灾害的调查、监测及防灾减灾工作中,遥感技术均发挥了重要的作用。利用卫星遥感对地观测技术来动态监测滑坡体已成为一个重要的研究和应用领域。滑坡遥感解译经历了20世纪90年代的立体镜解译^[3],到后来的人机交互式解译^[4],再到目前的基于遥感影像的光谱信息的解译方法^[5]。但立体镜解译和人机交互式解译其缺陷是均没有充分挖掘和利用遥感影像的光谱信息,而且识别速度较慢。利用光谱信息的遥感解译方法代表着新的发展方向。本文利用遥感技术,提出一种灾区滑坡体的自动识别方法,用此方法提取了地震重灾区——汶川县的滑坡体,分析了滑坡体的空间分布特征,进一步评估其造成的生态服务价值损失,为灾区的次生灾害治理和灾后重建提供科学依据。

1 研究区概况

汶川县(30°45′~31°43′N,102°51′~103°44′E)位于四川省西北部、阿坝州境东南部的岷江两岸,是阿坝州的南大门,有“川西锁钥”和“西羌门户”之称。县境东西宽84 km,南北长105 km,总面积4084 km²。汶川西南部受制于邛崃山系,东北部为龙门山脉所控,地势由西北向东南倾斜,相对高差大,地形坡度陡,临空面发育,沟谷纵横,切割强烈,西部多分布海拔3000 m以上的高山,东南部漩口地区的岷江出口处海拔仅780 m。汶川县被龙门山3条主干断裂带的其中两条穿过,西边是沿汶川—茂县一带,东边一条则连接映秀镇—北川一线,并向北延伸到青川县。

该县气候随地势的上升呈垂直分布,有“十里不同天”之说,可分为8个不同的自然气候区。南湿(漩口、映秀地区)北旱(威州、绵虎地区)趋势明显,光、热、水分布不均。海拔2000 m以下地区,年均气温13.5℃(北部)~14.1℃(南部),无霜期247~269 d,雨量528.7~1332.2 mm,日照1693.9~1042.2 h,适宜各类动植物生长^[6]。岷江由县北部入境,贯穿东部,长达88 km。杂谷脑河、草坡河、寿江为县境内岷江的主要支流,由西向东分别注入岷江。全县境内生物资源丰富,植物种类达4000余种,其中高等植物2002种;野生动物2004种,珍稀品种有大熊猫、金丝猴等45种。全县现辖6镇8乡,是全国仅有的4个羌族聚居县之一,全县总人口11.2万人,其中羌族人口占30.2%。沿岷江及各大支流河谷、半山地带为全县主要经济活动区。

2 研究材料与方法

2.1 数据源与处理软件

研究所使用的数据包括震前2007-09-18日的Landsat 5 TM影像,震后2008-05-23日的Landsat 7 ETM+影像,数字DEM(数字高程模型)和汶川县行政区划图,它们分别源于美国Maryland大学,美国地质调查局

(USGS),美国国家航空航天局(NASA)和国家测绘局。不同时相遥感影像数据都已经进行了校正,配准误差(RMS)小于0.5个像元。所有数据均采用统一坐标系:UTM投影,48 zone,WGS84椭球体。研究分析所采用的软件为Erdas Image 9.1和ArcGIS 9.1。

2.2 研究方法

2.2.1 遥感指数的选取

汶川县与四川盆地其它城市天气情况类似,以“不雨不晴”的多云天气为主。震后影像中的云层覆盖率很高,此外,再加上高山上常年不化的雪盖都给遥感解译造成了干扰。根据遥感影像和当地的具体情况,去除云层覆盖后,将该县震后的土地覆盖类型分为植被、滑坡体、雪盖和水体四大类。植被可进一步分解为林地、耕地和草地。由于滑坡体是一种较复杂的土地覆盖类型,其信息用单一指数或一种方法难以准确地提取,采用综合方法才能取得较好的效果。本研究将综合应用植被、水体、建筑和云这四种指数和遥感图像分类方法进行汶川县土地利用信息的提取。研究选取的4种遥感指数如下:

(1) 土壤调节植被指数 SAVI(soil adjusted vegetation index)

SAVI指数由Huete^[7]提出,该指数中引入了土壤调节因子,克服了NDVI指数的缺陷(假设研究区域内的所有土壤类型相同),消除了土壤背景的干扰。其公式为:

$$I_{SAVI} = [(NIR - Red)(1 + l)] / (NIR + Red + l) \quad (1)$$

式中,*NIR*和*Red*分别为近红外波段和红光波段,TM/ETM+影像中分别为第4波段和3波段;*l*为土壤调节因子,其值介于0~1之间,0和1分别代表植被覆盖率极高和极低的两种极端情况,通常选择0.5可以较好地消除土壤的噪声影响^[7]。

(2) 改进的归一化差异水体指数 MNDWI(modified normalized difference water index)

MNDWI的原型为McFeeters提出的归一化差异水体指数(NDWI),后经徐涵秋^[8]修正。MNDWI指数用短波红外波段替代近红外波段,进一步增强水体与其它地类的反差,更有利于水体信息的提取。徐涵秋利用MNDWI对含不同水体类型的遥感影像包括湖泊、河流和海洋进行了实验,大部分获得了比NDWI好的效果,而且MNDWI比NDWI更能够揭示水体微细特征,如悬浮沉积物的分布、水质的变化^[8]。其公式如下:

$$I_{MNDWI} = (Green - SWIR) / (Green + SWIR) \quad (2)$$

式中,*Green*和*SWIR*分别为绿光波段和短波红外波段,TM/ETM+影像中分别为第2波段和5波段。

(3) 建筑指数 NDBI(normalized difference built-up index)

NDBI指数的前身为杨山^[9]提出的仿归一化植被指数,后由查勇等人^[10]改称为归一化建筑指数。因为许多其他地物的光谱类似建筑用地,也具有第5波段的反射率大于第4波段的特点,单靠NDBI将建筑物信息准确提取不太理想,因此查勇等^[10]采用NDVI和NDBI两种指数结合的方法来提取城市建筑用地。NDBI公式如下:

$$I_{NDBI} = [(SWIR - NIR)] / (SWIR + NIR) \quad (3)$$

式中,*SWIR*和*NIR*分别为短波红外波段和近红外波段,TM/ETM+影像中分别为第5波段和4波段。

(4) 归一化云指数 NDCI(normalized difference cloud index)

NDCI指数由权维俊等人^[11]基于云与其他地物在短波红外波段与热红外波段上呈现的明显差异性而提出的,其构成公式如下:

$$I_{NDCI} = [(SWIR - TIR)] / (SWIR + TIR) \quad (4)$$

式中,*SWIR*和*TIR*分别为短波红外波段和热红外波段,TM/ETM+影像中分别为第5波段和6波段。

2.2.2 地震前后土地利用信息提取

利用Erdas Image软件的Modeler模块的建模功能,分别构建NDBI、SAVI、MNDWI和NDCI指数模型,计算生成4幅指数影像图,各影像图均拉伸到0~255范围。每幅影像图作为一个波段,用Erdas Image中的Layer stack工具合成,构成由4波段组成新的影像图(以下简称新影像图)。新影像图中植被、水体和云等信息被分

别突显出来(图 1),减少了数据冗余度,且四个波段为负相关,利用其进行分类,可以明显降低地类的光谱混淆现象,提高分类的精度。研究分为震后滑坡体信息提取和震前土地利用信息提取两种。

(1)地震后滑坡体信息提取过程如下:

(a)确定 SAVI 指数阈值,区分有植被覆盖区和无植被覆盖区域,具体取值可根据目视效果进行确定,经过反复验证, I_{SAVI} 取 0~93 为无植被区,其余为有植被覆盖区。利用 SAVI 影像掩膜的无植被覆盖区域切割新影像图,得到无植被区部分。

(b)对无植被区影像进行非监督分类,经多次实验,发现分类为 4 时效果较好。结果分为 4 组,第 1 组为云,第 2 组为雪盖,第 3 组为水体、植被阴影和雪盖,最后一组为滑坡体、居民点和少量的云影。

(c)对于含滑坡体信息的一组,利用其掩膜切割新影像图,再次进行非监督分类。经测试分两类,效果较好,滑坡体与云影被分离。滑坡体中夹杂的居民点,通过监督分类分出。

(d)采用遥感中常用的位置精度评价法,即将分类后的结果与其所在位置的原始影像进行检查,验证滑坡体的遥感分类精度。结果表明总体分类精度为 93%。

(2)地震前土地利用信息提取过程如下:

a SAVI 指数阈值分割法区分有无植被覆盖区,有植被覆盖区进一步划分为高、低植被区。结果分 3 类: $I_{SAVI} \leq 161$ 为无植被区; $161 < I_{SAVI} < 180$ 为低植被区,主要为草地和耕地类型; $180 \leq I_{SAVI} \leq 255$ 为高植被区,包括林地(包含有林地、灌木林和其它林地)、草地和耕地三类。

b 对于高、低植被区,在原始 7 个波段影像图中切出各自区域,并选取相应的训练样本 10~20 个,采用监督分类,分出林地、耕地和草地 3 类。

c 对于无植被区的分类采用非监督分类,可以分出云,但无法区分雪盖和水体。对比影像图与高程图发现,积雪分布于海拔(H)3 800 m 以上的高山,因此引入高程图设置 $H \geq 3 800$ m,可以有效提取雪盖。

d 提取雪盖后余下部分切割新影像图后,继续进行非监督分类,可分为水体和植被阴影,居民点和云影两组。

e 上一步区分的两组,通过各自再次非监督分类,区分水体、植被阴影、居民点和云影 4 类。同时,研究发现水体指数 I_{SAVI} 和植被指数 I_{MNDWI} 的差异明显,水体 $I_{MNDWI} > I_{SAVI}$,植被阴影则相反,所以这是区分水体和植被阴影的另一种方法,这一点与权维俊等人^[11]的研究一致。

f 将分类结果与原始图像进行叠加对比分析,采用目视判读检验其提取效果,其总体效果较为满意,进一步对明显错分的土地利用类型进行手工修改。

综合以上分析,提出本研究的遥感解译流程(图 2),图上显示了从剔除云外的影像中区分滑坡体的两种分类方法 ①(虚线)和②,效果其实是一致的。如果仅为提取滑坡体,则方法 ①用一次非监督分类和一次监督分类区分滑坡体显然更为简洁,本地震后遥感影像中滑坡体的提取采用此方法。方法 ②则是先区分雪

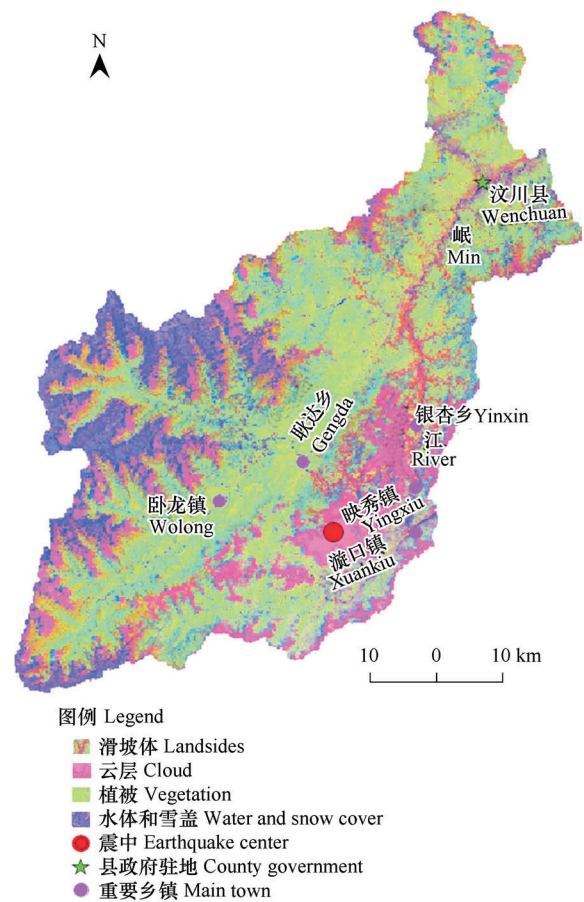


图 1 NDCI、MNDWI 和 SAVI 波段组合显示的震后影像
Fig. 1 Representing new image comprised of bands NDCI, MNDWI and SAVI as Red-Green-Blue after the earthquake

盖、水体、植被阴影和云影后,再区分滑坡体。

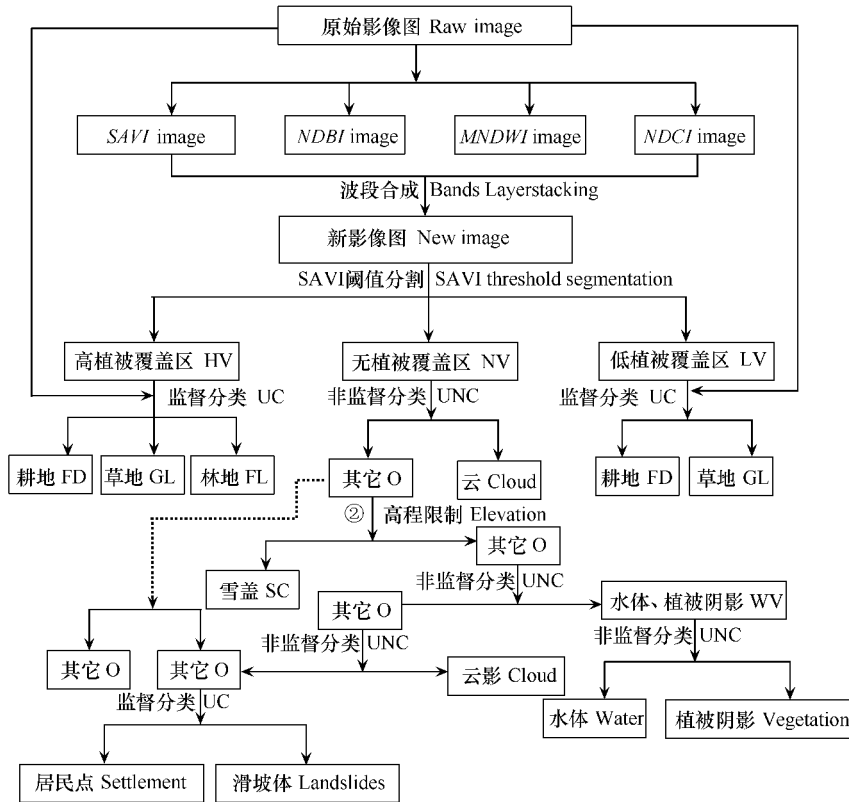


图 2 汶川县土地利用遥感解译流程

Fig. 2 Flow chart to extract landuse information

HV: High vegetation coverage; NV: Non-vegetation coverage; LV: Low vegetation coverage; SC: Snow cover; UC: Supervised classification; UNC: Unsupervised classification; WV: Water and vegetation; FD: Farmland; FL: Forestland; GL: Grassland; O Other unclassified landuse types

3 结果与讨论

本文所提取的滑坡体是指以滑坡体为主,包含少量崩塌体和泥石流等在内的次生地质灾害,因为研究采用的震后影像 Landsat 7 ETM + 空间分辨率仅仅 30 m,很难进一步区分崩塌体和泥石流等灾害。可尝试采用高分辨率的影像如 SPOT5(2.5 m)或 Quickbird(0.61 m)等进行详细区分,做更深入的研究。

3.1 滑坡体空间分布特征

解译结果显示,汶川地震在汶川县境内发生的滑坡体面积为 206.5 km²,滑坡体主要沿河流两岸分布(图 3)。由于震后影像图中有大量云层覆盖,遥感解译的云层覆盖率为 10.22%,所以实际的滑坡体面积可能比解译结果更大。

汶川-茂县断裂带右边的滑坡体要比左边分布更多,这是因为 5.12~5.23 之间汶-茂断裂带左边仅有 6 次 4 级以上余震,而断裂带的右边除 8.0 级地震外,发生的 4 级以上余震仍多达 16 次。草坡河出口至映秀镇的岷江干流沿岸正好位于两大断裂带之间,受地震的影响最大,滑坡灾害最为严重。局部放大的地震前后影像图上,更清晰地显示地震后岷江干流沿岸滑坡体的分布(图 4)。全县 14 个乡镇中,岷江沿岸的乡镇受灾严重,银杏乡滑坡面积最大,达到 42.81km²,占总滑坡面积的 20.7%,滑坡面积最小是水磨镇;如果滑坡面积与该乡镇面积的比值作为滑坡危害度的话,映秀镇危害度最高,15.9%的乡镇面积被滑坡体所覆盖,危害度最小的也为水磨镇(表 1)。

滑坡体分布与海拔关系不明显(图 5),滑坡体在海拔 3 500~4 500 m 之间分布面积最大,占滑坡体总面积的 38.5%,4 500 m 以上分布最少,仅仅 1.3%。滑坡体面积随着坡度增加呈先增加后减少的趋势(图 6),

10°以下极少有滑坡体产生,仅占滑坡体总面积的3.7%;随后逐渐增加,30~40°之间的滑坡体面积达到最大74.2 km²,占总面积36.0%;之后逐渐降低,50°以上滑坡体面积仅占5.3%。

3.2 生态服务价值损失评估

地震后识别的滑坡体图像切割地震前解译的土地利用图后,得到滑坡体区域在震前的土地利用类型。表2总结了大地震造成的不同土地利用类型面积及生态系统服务价值的损失。

震前影像中有云覆盖部分为1.12 km²,与震后影像对比,发现这部分为林地覆盖,因此归入林地类。大地震造成全县境内151.08 km²林地、耕地5.11 km²和16.13 km²草地丧失,被崩塌的滑坡体所填充的河流面积积达3.45 km²。

生态系统服务价值采用Constanza^[12]提出的计算方法,即生态系统服务价值 = 单位面积生态系统服务价值 × 各种生态系统分布面积,以谢高地^[13]的青藏高原平均状态下的生态系统服务价值单价表为基础,计算了汶川县生态系统服务价值损失(表2)。各种土地利用类型生态系统服务损失总价值为22 646万元,不同类型生态系统服务价值差异巨大。各类生态系统中,林地生态系统服务损失价值最大,达到20 340万元,占损失总价值的89.8%,其次是水体,占损失总价值的6.2%。耕地损失的生态系统服务价值220万元,所占比重不大,但全县原耕地面积很少,人均不足600 m²,主要分布于岷江干流及三大河流沿岸,滑坡灾害破坏的耕地占原耕地面积的7.7%,人均耕地减少了45.6 m²,进一步加剧了该县耕地短缺的局面。

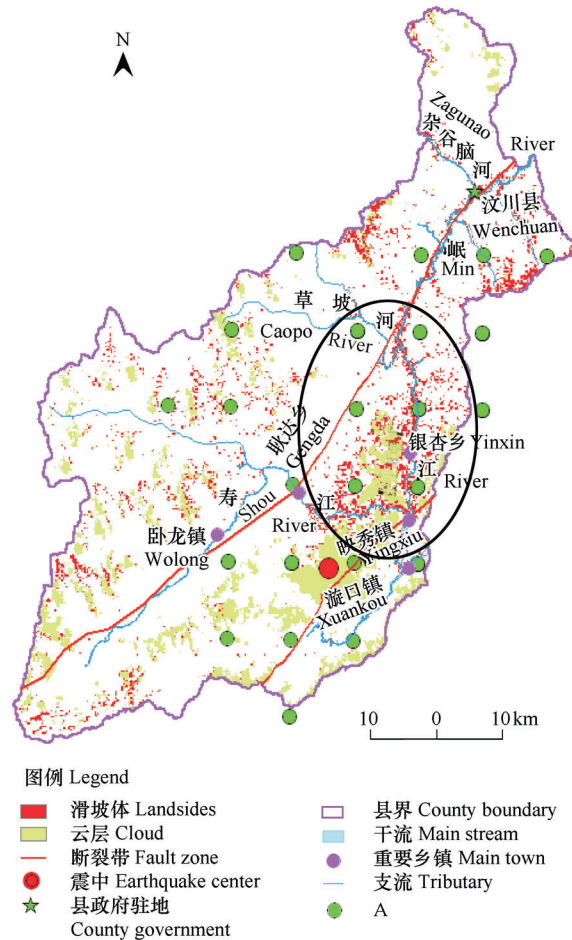


图3 大地震后汶川县滑坡体分布

Fig. 3 Spatial distribution for landslides in Wenchuan County after big earthquake

* A: 5.12 ~ 5.23 之间4级以上余震 Aftershocks above magnitude 4 between May 12, 2008 and May 23, 2008

表1 各乡镇滑坡体分布面积统计

Table 1 Statistics of landslide area for each town in Wenchuan County

| 乡镇名称 Town name | 滑坡面积(km ²) Landslide area | 占滑坡比例(%) Percent of total landslide area (%) | 滑坡危害度(%) Percent of town area (%) |
|-------------------|--|---|--------------------------------------|
| 龙溪乡 Longxi | 4.19 | 2.03 | 1.96 |
| 克枯乡 Keku | 2.85 | 1.38 | 4.32 |
| 雁门乡 Yanmen | 16.28 | 7.88 | 11.03 |
| 威州镇 Weizhou | 12.37 | 5.99 | 9.46 |
| 绵虬镇 Miansi | 22.65 | 10.97 | 8.95 |
| 草坡乡 Caopo | 16.05 | 7.77 | 3.05 |
| 银杏乡 Yinxin | 42.81 | 20.73 | 14.99 |
| 耿达乡 Gengda | 36.34 | 17.59 | 4.28 |
| 卧龙镇 Wolong | 25.06 | 12.14 | 3.05 |
| 映秀镇 Yingxiu | 19.50 | 9.44 | 15.85 |
| 白花乡 Baihua | 0.62 | 0.30 | 1.08 |
| 三江乡 Shangjiang | 6.21 | 3.01 | 1.28 |
| 漩口镇 Xuankou | 1.19 | 0.58 | 3.02 |
| 水磨镇 Shuimo | 0.41 | 0.20 | 0.47 |

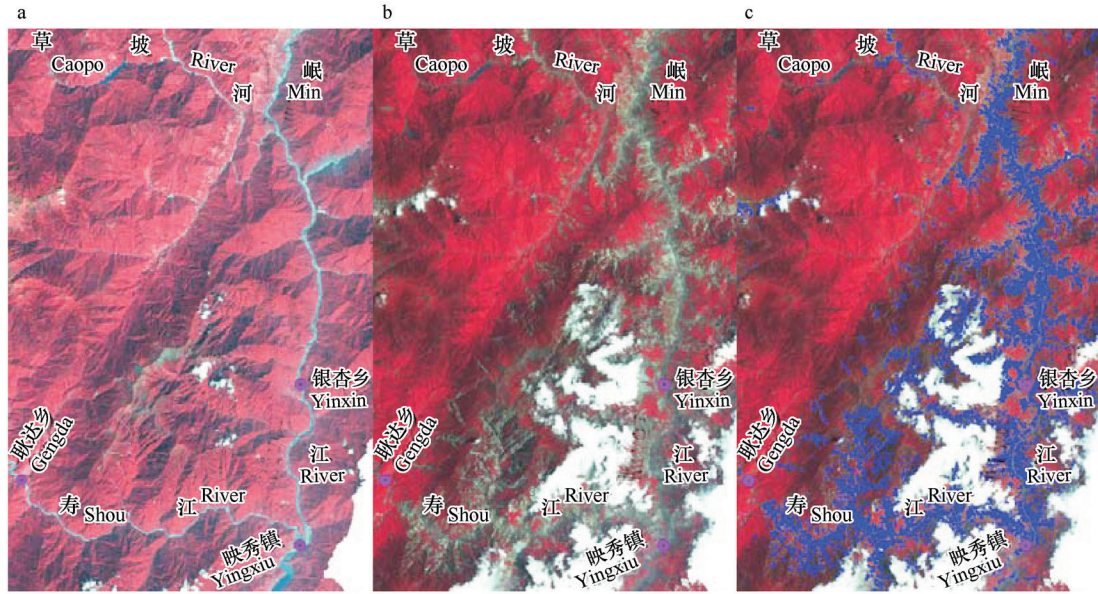


图 4 局部放大的震前 TM 影像(a)和震后 TEM+ 影像(b)(432 波段组合)及识别的滑坡体(c)

Fig. 4 Comparison of pre-seismic TM images (a) and post-seismic ETM+ (b) and landslides identified (c)

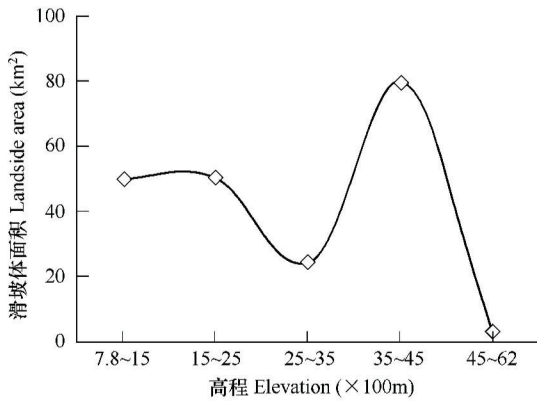


图 5 滑坡体面积随高程变化关系

Fig. 5 Relationship of landslide area vs elevation

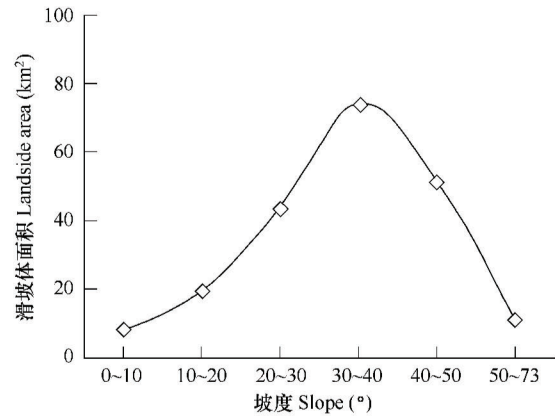


图 6 滑坡体面积随坡度变化关系

Fig. 6 Relationship of landslide area vs slope

表 2 地震灾害造成的各种土地利用类型面积及生态系统服务价值损失

Table 2 Landuse types area and its loss for ecosystem services value (ESV) caused by earthquake

| 土地利用类型 Landuse type | 面积 Area (km ²) | 占总面积比例 Percent of total area (%) | 生态系统服务价值单价 ESV per unit area (RMB/hm ²) | 生态系统服务价值损失 Loss value for ES (× 10 ⁶ RMB/a) |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---|--|
| 草地 Grassland | 16.13 | 7.8 | 3 512.6 | 5.7 |
| 耕地 Farmland | 5.11 | 2.5 | 4 341.2 | 2.2 |
| 林地 Forestland | 151.08 | 73.1 | 13 462.7 | 203.4 |
| 雪盖 Snow cover | 30.77 | 14.9 | 371.4 | 1.1 |
| 水体 Water | 3.45 | 1.7 | 40 676.4 | 14.0 |

4 结论

(1) 本文提出了综合遥感指数、非监督分类和监督分类来自动提取滑坡体的方法,克服了以前靠某种单

一方法或单一指数提取所出现的问题,是滑坡灾害解译的新探索。首先构建植被指数 SAVI、水体指数 MNDWI、建筑指数 NDBI 和云指数 NDCI 四大指数来合成新影像图,再通过 SAVI 指数阈值分割新影像确定无植被区,最后对无植被区进行非监督分类和监督分类区分滑坡体的方法,采用此方法对地震重灾区——汶川县的滑坡体进行快速识别与提取,分类精度达到 93%,取得了较好的效果。

(2) 滑坡体面积随着坡度增加呈现先增后减的趋势,30~40°之间的滑坡体分布最广。

(3) 全县境内共产生滑坡体 206.5 km²,汶川-茂县,映秀-北川两大断裂带之间的区域,即草坡河出口到映秀镇的岷江干流沿岸,是滑坡灾害最为严重的区域,其中银杏乡滑坡面积最大,占总滑坡面积的 20.7%,映秀镇有 15.9% 的乡镇面积被滑坡体所掩埋。

(4) 大地震造成汶川县境内 151.08 km² 林地、16.13 km² 草地破坏,崩塌的滑坡体填充的河流面积 3.45 km²。毁坏耕地 5.11 km²,使人均减少耕地 46.7 m² 亩。各类生态系统服务总价值损失 22 646 万元,其中林地生态系统服务价值损失最大,达到 20 340 万元,耕地虽然损失价值所占比重不大,但人均耕地面积的损失进一步加剧了该县耕地短缺的局面。

References:

- [1] Ma J, Chen S Y, Liu P X, *et al.* Temporal-spatial variations of associated faulting inferred from satellite infrared information: A case study of the N-S seismo-tectonic zone in China. *Acta Geophysica Sinica*, 2006, 49 (3): 816—823.
- [2] Li F B, Cui P, Zhou A X. Application of Remote Sensing and GIS in the Prevention and Mitigation of Hazard Caused by Landslide and Debris Flow. *Journal of Catastrophology*, 2004, 19(4): 18—24.
- [3] Metternicht G, Hurni L, Gogu R. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 98(2-3): 284—303.
- [4] Wang Z H. Remote sensing for landslides in China. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2005, 63 (1): 1—7.
- [5] Ye R Q, Deng Q L, Wang H Q. Landslides identification based on image classification: a case study on guizhoulaocheng landslide in the Three Gorges Reservoir Area. *Chines Journal of Engineering Geophysics*, 2007, 4(6): 574—577.
- [6] Zhao Y H, He X Y, Hu Y M, *et al.* Variation of cultivated land and the driving forces in Wenchuan County in the upstream of Min River. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2): 94—97.
- [7] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295—309.
- [8] Xu, H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27 (14): 3025—3033
- [9] Yang S. On extraction and fractal of urban and rural residential spatial pattern in developed area. *Acta Geographical Sinica*, 2000, 55(6): 671—678.
- [10] Zha Y, Gao J, Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(3): 583—594.
- [11] Quan W J, Guo W L, Ye C H, *et al.* Method for deriving indexes of water body density and vegetation cover in Beijing from TM images. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2007, 30(5): 610—616.
- [12] Costanza R, Arge R, Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 386: 253—260.
- [13] Xie G D, Lu C X, Leng Y F, *et al.* Ecological assets valuation of Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18 (2): 189—196.

参考文献:

- [1] 马瑾, 陈顺云, 刘培洵, 等. 用卫星热红外信息研究关联断层活动的时空变化——以南北地震构造带为例. *地球物理学报*, 2006, 49 (3): 816—823.
- [2] 李发斌, 崔鹏, 周爱霞. RS 和 GIS 在滑坡泥石流防灾减灾中的应用. *灾害学*, 2004, 19(4): 18—24.
- [4] 王治华. 中国滑坡遥感. *国土资源遥感*, 2005, 63 (1): 1—7
- [5] 叶润青, 邓清禄, 王海庆. 基于图像分类方法滑坡识别与特征提取——以归州老城滑坡为例. *工程地球物理学报*, 2007, 4 (6): 574—577.
- [6] 赵永华, 何兴元, 胡远满, 等. 岷江上游汶川县耕地变化及驱动力研究. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 94—97.
- [9] 杨山. 发达地区城乡聚落形态的信息提取与分形研究. *地理学报*, 2000, 55(6): 671—678.
- [11] 权维俊, 郭文利, 叶彩华, 等. 基于 TM 卫星影像获取北京市水体密度指数与植被覆盖指数的方法. *南京气象学院学报*, 2007, 30 (5): 610—616.
- [13] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18 (2): 189—196.