

# 灾后高分辨率遥感影像的地震型滑坡信息 自动提取算法研究

闫琦<sup>1,2</sup>, 李慧<sup>1</sup>, 荆林海<sup>1</sup>, 唐韵玮<sup>1</sup>, 丁海峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对地震滑坡灾害应急响应的高时效性要求,提出了一种基于灾后高分辨率遥感影像的地震滑坡体自动提取算法。该算法综合利用了高分辨率遥感影像的光谱、形状和纹理等特征,基于多特征阈值分层次逐步剔除干扰地物,实现了地震滑坡体的自动提取。涉及到的特征参量阈值均采用改进的 Otsu 算法自动确定。在利用 2008 年汶川地震后 ADS40 航空遥感影像自动提取滑坡的实验中,所提算法的滑坡个数正确提取率超过 70%,面积正确提取率超过 80%。对于 10000 row×10000 column 的 ADS40 影像,算法执行时间低于 1 min。相较于传统的人机交互目视解译方法,该算法的自动化程度高、滑坡提取速度快,滑坡识别精度可以满足地震灾害应急要求。

**关键词** 图像处理; 高分辨率; 地震滑坡; 自动提取; 阈值检测

**中图分类号** TP751.1      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.112801

## Automatic Extraction Algorithm of Seismic Landslide Information Based on After-Calamity High-Resolution Remote Sensing Image

Yan Qi<sup>1,2</sup>, Li Hui<sup>1</sup>, Jing Linhai<sup>1</sup>, Tang Yunwei<sup>1</sup>, Ding Haifeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Aiming at the high efficiency requirement of extraction seismic landslide, we propose an automatic extraction algorithm of seismic landslide based on after-calamity high-resolution remote sensing image. The algorithm utilizes the spectrum, shape, and texture features of seismic landslide of the remote sensing image to remove the disturbed features based on the analytic hierarchy process, and realizes the automatic extraction of the seismic landslide. All the feature parameters are computed automatically by the improved Otsu algorithm. In a test using high-resolution aerial remote sensing data acquired by ADS40 image after earthquake Wenchuan in 2008, the experiments demonstrate that more than 70% landslides are correctly detected by the proposed method. Furthermore, the area accuracy is more than 80% and the extraction time is less than one minute for the ADS40 image with 10000 rows and 10000 columns data. Compared with traditional visual interpretation of human-computer interaction, the proposed algorithm has high degree of automation and landslide extraction speed, and the landslide recognition accuracy can meet the earthquake disaster emergency requirements.

**Key words** image processing; high-resolution; seismic landslide; automatic extraction; threshold detection

**OCIS codes** 100.2000; 110.2960

**收稿日期:** 2017-05-16; **收到修改稿日期:** 2017-06-15

**基金项目:** 国家 863 计划(2015AA7026087)、高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(30-Y20A37-9003-15/17)、中国地质调查局项目(12120113089200)、国家科技支撑计划(2015BAB05B05-02)、中国科学院遥感与数字地球研究所所长青年基金(Y6SJ1100CX)、国家自然科学基金(41501489)

**作者简介:** 闫琦(1989—),男,硕士研究生,主要从事高分辨率遥感图像处理方面的研究。E-mail: yanqi@radi.ac.cn

**导师简介:** 荆林海(1971—),男,博士,研究员,主要从事遥感数字图象处理、遥感地质方面的研究。

E-mail: jinglh@radi.ac.cn(通信联系人)

# 1 引言

地震引发的滑坡次生地质灾害具有规模大、形成时间短、强度高和致灾重等特点,加剧了地震的破坏效应和损失程度<sup>[1-2]</sup>,给抗震救灾和震后重建工作造成了很大困难。震后快速获取滑坡灾情信息,对把握“黄金救援 72 h”,迅速组织抗震救灾工作具有重要意义。遥感对地观测技术具有观测范围广、信息获取迅速准确等特点,具有全天候、全天时的观测能力,在地震次生地质灾害的灾情速报、空间信息保障和次生灾害动态监测等方面发挥着越来越重要的作用<sup>[3]</sup>。

20 世纪 70 年代末,遥感技术被应用于滑坡调查中<sup>[4]</sup>。传统的滑坡灾情解译由有经验的专业人员利用航空立体像对建立解译标准,配合计算机软硬件采用人工勾画完成<sup>[5]</sup>。近年来,高分辨率的卫星影像开始取代航片用于滑坡制图,人机交互的目视解译、影像分类、变化检测和面向对象的影像分析等算法被广泛应用到滑坡解译中<sup>[6-8]</sup>。人机交互的目视解译方法首先需要建立滑坡的遥感解译标志,然后以预处理后的灾后影像(包括融合影像、增强影像等)为底图,利用 ArcGIS、Photoshop、CorelDraw 等软件平台,辅助数字高程模型(DEM)、地质资料等数据综合解译<sup>[9-10]</sup>。该算法是目前较为常用的算法,但具有工作量大、人员投入多、费用高、解译精度易受解译人员主观因素影响等缺点。基于遥感影像分类的算法主要是对灾后影像采用监督或非监督算法进行地物分类,然后在分类图像上圈定滑坡要素<sup>[11]</sup>。由于滑坡体上往往出现多种地物覆盖类型(如植被、岩土等),故而该算法很难将与滑坡体光谱特征相似的地物(如居民点、道路、河床、农耕地等)予以区别并剔除。此外,该算法通常需要借助辅助数据(如 DEM)提高滑坡的提取精度<sup>[12]</sup>。面向对象的影像分析算法可将形状、纹理等特征与光谱特征结合起来提取滑坡信息,比基于像元的分类算法具有更高的提取精度<sup>[13]</sup>,但其中的光谱权重、形状权重和分割尺度等参数的设置和优化比较繁琐<sup>[13-15]</sup>,导致该类算法的自动化程度不高。变化检测算法从灾前、灾后同一地区的遥感影像中提取变化信息,可以得到滑坡灾害分布信息<sup>[16-19]</sup>。但实际的灾害应急中往往存在灾前影像难以获取、灾后影像质量不高等情况,这使得变化检测算法在实际应用中受到了一定限制。近年来,一些快速的滑坡识别算法逐渐被提出,许多半自动化的滑坡提取算法逐步成为研究热点。李松等<sup>[20]</sup>采用支持向量机算法实现了滑坡体的快速识别和分类,分类结果的 Kappa 系数达到 0.82;Martha 等<sup>[21]</sup>综合利用滑坡体的光谱、空间和形态特征,使用面向对象的算法实现了滑坡体信息的半自动化提取;Lu 等<sup>[22]</sup>提出了基于面向对象的变化检测算法,并采用该算法对高分辨率遥感影像中的滑坡信息实现了半自动化提取和快速成图;Stumpf 等<sup>[23]</sup>在面向对象影像分析的基础上,利用随机森林分类算法对滑坡信息进行提取;Mondini 等<sup>[24]</sup>利用贝叶斯统计框架,在影像分类的基础上半自动化地实现了滑坡信息的提取和分类。这些半自动化算法相较于传统滑坡识别算法的效率更高,对灾害应急具有重要意义。

本文在前人半自动化滑坡提取算法研究的基础上,从地震灾害应急响应的实际情况出发,探索出了一种基于震后高分辨率遥感影像的地震型滑坡信息自动提取算法——多特征阈值的逐层次信息提取算法。该算法综合利用了滑坡体在遥感影像上的光谱、形状和纹理等特征,设计自动阈值求解算法,结合专家知识建立了提取规则。

## 2 地震滑坡体的遥感特征

不同类型滑坡体产生的地质环境条件、发生时间的长短以及滑坡运移距离等不同,这使得滑坡遥感识别具有一定的复杂性,难以建立统一的遥感解译标准<sup>[25]</sup>。但地震滑坡作为一种特殊的滑坡类型,属于震后新发育的地物,在色调、形态、纹理等方面与周围地物具有较显著的区别。这些区别在高分辨率遥感影像上会以光谱、形状和纹理等特征予以反映,是识别和提取地震滑坡的物理基础<sup>[26]</sup>。因此,本课题组仅以震后新发育的滑坡为研究对象,设计地震型滑坡体的自动提取算法。

### 2.1 光谱特征

在高分辨率遥感影像上,地震滑坡与周围地物的色调明显不同。发生在低植被覆盖或完全裸露区的地震滑坡主要呈现为新鲜土体或岩体的色调,以灰白色、白色调最为常见。发生在高植被覆盖区的地震滑坡,其色调为灰色、浅灰色调,与周围植被的色调反差较大。对比图 1 震后滑坡的多光谱和亮度特征影像可以看到,滑坡体呈现为较亮的色调,大面积的植被和水体呈现为较暗色调。因此,仅依据亮度特征就可以排除一些明显的干扰地物(如大面积的植被、水体等),这为后续滑坡的进一步准确提取奠定了基础。

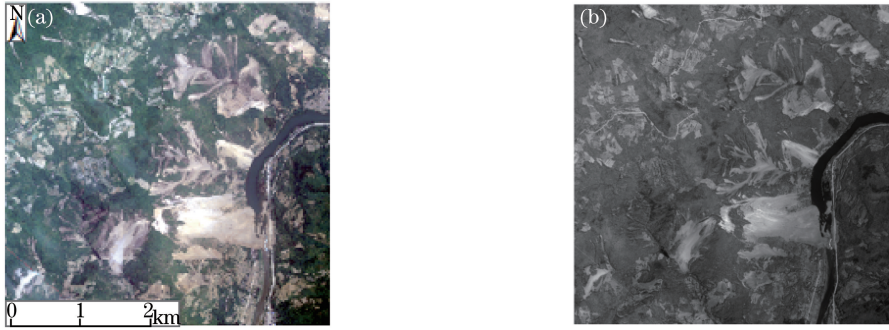


图1 地震滑坡的光谱特征。(a)原始 ADS40 影像;(b)亮度特征影像

Fig. 1 Spectral feature of seismic landslide. (a) Original ADS40 image; (b) brightness feature of the image

## 2.2 形状特征

在高分辨率遥感影像上,滑坡体多呈现舌形、椭圆形、长椅形、牛角形、平行四边形和菱形等,没有较为统一的形态<sup>[27]</sup>。而一些人工地物(如建筑物、道路和梯田等)往往呈现为较规则的形状,如矩形、线条形以及由各种基本图形组合成的多边形等,较容易刻画。因此,结合地震滑坡体的光谱特征,可以进一步利用形状特征将高亮地物中规则的人工地物予以剔除,以减少非滑坡地物的干扰,提高地震滑坡识别的精度。

## 2.3 纹理特征

在高分辨率遥感影像上,居民区(包括建筑物、道路以及其他人工地物)与植被、裸土等自然地物的纹理差异较大,能被有效地区别开来。滑坡由于受到重力的作用,会沿着软弱面或软弱带向下滑动,部分岩土体会在滑坡下部堆积,导致滑坡下部的纹理较粗糙,而上部的纹理相对比较细腻<sup>[27]</sup>。地震滑坡体以岩土体为主,而暴雨引发的滑坡体则以土质物质为主,这两种滑坡体组成物质的差异在纹理特征上也得到了一定体现。有研究发现,地震滑坡与翻种不久的农耕地在色调上十分相似,但纹理差异较大,因此可以利用纹理信息来有效地剔除耕地<sup>[28]</sup>。

# 3 基于多特征阈值的地震滑坡体自动提取算法

## 3.1 地震滑坡体自动提取算法

结合地震滑坡体在灾后高分辨率遥感影像上的光谱、形状及纹理等特征,提出了一种基于多特征阈值的逐层次滑坡灾害信息自动提取算法。该算法基于滑坡的光谱、形状和纹理等特征,逐层次处理,最终得到了地震滑坡的提取结果。根据地震滑坡在震后高分辨率遥感影像上呈现出的浅色调特点,该算法首先利用光谱特征提取图像中亮度值较高的地物,然后利用形状信息去除高亮度地物中形状规则的人工地物,最后利用纹理信息剔除农耕地等干扰地物,最终得到了滑坡提取结果。该算法的流程图如图2所示,主要包含以下几个步骤:

- 1) 影像预处理,包括几何校正、大气校正和简单去云等,处理后得到了亮度特征影像  $I_P$ ;
- 2) 利用改进的阈值求解算法计算  $I_P$  的亮度特征阈值,基于该阈值对  $I_P$  二值化,保留亮度值较高的地物,得到中间结果  $M_1$ ;
- 3) 对  $M_1$  进行 8 邻域的连通区域划分,自动计算所有连通区域的形状特征阈值和纹理特征阈值;
- 4) 利用形状特征阈值剔除高亮度地物中形状规则的人工地物,得到中间结果  $M_2$ ;
- 5) 利用纹理特征阈值剔除农耕地等干扰地物,最终得到地震滑坡体提取结果  $M_3$ 。

## 3.2 特征选择

选取高分辨率遥感影像的光谱、形状和纹理特征对地震滑坡体进行多特征描述,并设计提取算法。对于光谱特征方面,选取影像的亮度特征作为光谱特征的衡量指标,通过阈值处理可以有效剔除低亮度值的水体和植被等非滑坡地物。影像亮度特征的计算公式为

$$G_{\text{GRAY}} = 0.229R + 0.587G + 0.114B, \quad (1)$$

式中  $G_{\text{GRAY}}$  为像素的亮度值, $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别为像素三分量的灰度值。

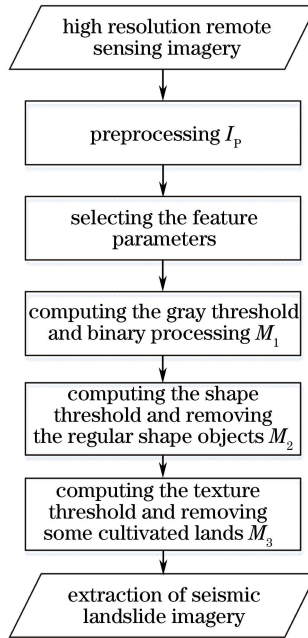


图 2 所提算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the proposed algorithm

对于形状特征方面,采用连通区域图斑紧致度参数并结合长宽比表征线性地物,如道路、河流等。采用矩形度  $G$  表征规则的建筑物、梯田等。将紧致度参数定义为图斑面积与周长的比值,用  $C$  表示, $C$  值越小,说明图斑面积与周长的差异越大,地物的线性程度越高。将长宽比定义为图斑在主轴方向上的最大长度与其在垂直主轴方向上的最大宽度的比值,用  $R$  表示, $R$  值越大,说明地物的线性程度越高。具体计算公式为

$$G = \frac{A}{L \times W}, \quad (2)$$

$$C = \frac{A}{P}, \quad (3)$$

$$R = \frac{L}{W}, \quad (4)$$

式中  $A$  为连通区域图斑的面积, $L$  为连通区域图斑在主轴方向上的最大长度, $W$  为图斑在垂直于主轴方向上的最大宽度, $P$  为连通区域图斑的周长。

纹理特征通常可由局部方差和灰度共生矩阵来描述。灰度共生矩阵的计算较为复杂,而局部方差的计算则比较简单,但其对纹理的刻画能力相对较弱。经过光谱和形状特征提取后,图像中剩余的地物类型较少,主要存在滑坡区域及部分农耕地。滑坡与农耕地的纹理差异较大,滑坡比农耕地的纹理更细腻,方差较小。考虑到地震灾害应急的实际情况,选择计算简单高效的方差参数来表征地物的纹理特征,目的是对农耕地予以剔除。方差的计算公式为

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (5)$$

式中  $S^2$  为连通区域图斑的方差, $n$  为该连通区域内的像元个数, $x_i$  为像元  $i$  的亮度值, $\bar{x}$  为该连通区域内像元亮度的平均值。

### 3.3 特征阈值的自动计算

目前,应用较多的阈值自动求解算法为最大类间方差法<sup>[29]</sup>(又称 Otsu 算法)。该算法是由日本学者 Otsu 于 1979 年基于方差分析思想提出的,因其计算简单、自适应性强而被广泛应用。Otsu 算法利用图像灰度直方图,以目标与背景之间的方差最大作为目标函数,动态地确定图像阈值<sup>[30]</sup>。文献[31-33]及大量实验结果表明,Otsu 算法存在的最大局限在于阈值易偏向于直方图分布中占优势的灰度级一边。即当背景与



前景之间的方差相差较大时, Otsu 算法并不能得到较好的阈值。对于双峰直方图, Otsu 阈值检测效果较好。但对于多峰直方图, 经过单次 Otsu 算法处理后很难得到较好的阈值。为此, 本课题组在分析 Otsu 阈值性质的基础上提出了一种改进的 Otsu 阈值求解算法。

### 3.3.1 Otsu 阈值性质分析

文献[33]证明了 Otsu 阈值具有的一个性质, 即最大类间方差准则(Otsu 准则)下的阈值是分割出的两类均值的平均值。该阈值可以表示为

$$T_m = \frac{1}{2}(\mu_A + \mu_B), \quad (6)$$

式中  $T_m$  为 Otsu 准则下求得的最佳阈值,  $\mu_A$  和  $\mu_B$  为被阈值  $T_m$  分割的背景与前景各自的灰度均值。可将整幅图像的灰度均值  $\mu$  表示为

$$\mu = P_A \mu_A + P_B \mu_B, \quad (7)$$

式中  $P_A$  和  $P_B$  分别为被分割的背景与前景出现的概率, 它们满足

$$P_A + P_B = 1. \quad (8)$$

目标区域所占比例越大, 平均灰度值往往越接近最佳阈值<sup>[32]</sup>。因此, 将(6)式和(7)式作差, 并将差值记为  $f$ , 则有

$$f = T_m - \mu = (0.5 - P_A)(\mu_A - \mu_B). \quad (9)$$

由(9)式可知, 当  $P_A = P_B = 0.5$  时,  $f = 0$ , 即 Otsu 最佳阈值恰好等于灰度均值。当  $P_A$  不等于 0.5 时,  $f$  的大小与被分割的两类灰度均值之差有关。在实际的遥感影像信息提取中, 背景往往占有更高的比例, 如果设  $P_A$  表示背景出现的概率, 那么  $P_A > 0.5$ , 此时,  $f$  的大小完全取决于背景与目标灰度均值的差异。由地震滑坡的遥感影像特征分析可知, 滑坡的灰度值较高, 其背景的灰度均值小于前景的灰度均值, 即  $\mu_A < \mu_B$ , 直接使用 Otsu 得到的阈值将大于灰度均值, 即  $T_m > \mu$ 。采用所提多特征阈值逐层提取地震滑坡时, 随着背景(非滑坡地物)逐渐较少, 目标区域(滑坡)所占比例逐渐增大, 其最佳阈值越来越接近均值。当目标区域所占比例超过背景区域所占比例时, 最佳阈值将小于灰度均值。基于最佳阈值与灰度均值的变化关系对经典的 Otsu 算法进行改进, 提出了一种逐渐缩小最佳阈值搜索区间的自动求解算法。

### 3.3.2 改进的 Otsu 阈值求解算法

本文通过多次使用 Otsu 算法来减少数据直方图的峰数, 逐步缩小阈值的搜索范围。在每一次求解后, 通过比较所得阈值  $T_i$  与当前样本均值  $M_i$  的大小, 确定最佳阈值的搜索区间, 并进行下次求解。下次求解基于上次约束条件下的特定区域进行, 求解速度更快, 阈值更优。假设  $T_i$  为一次求解后得到的阈值,  $M_i$  为当前样本的均值, 为了尽量不丢失目标地物, 对每一次的约束条件设定为: 1) 当  $T_i > M_i$  时, 去掉小于  $M_i$  的样本; 2) 当  $T_i < M_i$  时, 去掉大于  $M_i$  的样本。

使用改进的 Otsu 算法求解阈值的示意图如图 3 所示。

在图 3 中, 横坐标表示像元灰度级(0~ $n$ ), 纵坐标表示灰度级  $n_i$  的像元频数(0~1)。以求解灰度阈值为例, 在初始计算时, 由于非滑坡所占比例远远大于地震滑坡所占比例, 且非滑坡的灰度均值小于地震滑坡

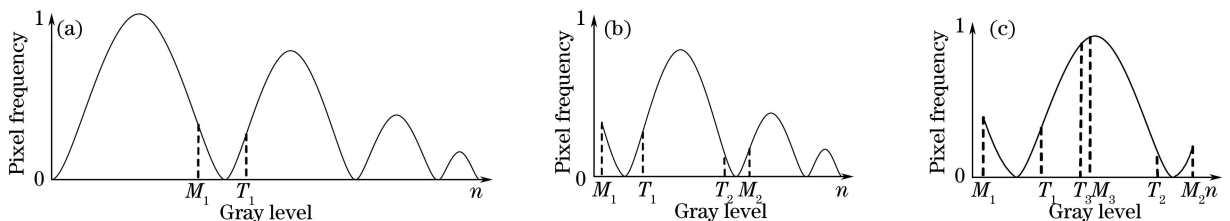


图 3 使用改进 Otsu 法求解阈值的示意图。(a)第一次 Otsu 阈值求解;

(b)去除小于  $M_1$  后的样本阈值求解;(c)去除大于  $M_2$  后的样本阈值求解

Fig. 3 Schematic of calculating threshold using improved Otsu method. (a) Calculating threshold using Otsu method

at the first time; (b) threshold calculation of sample after removing the part less than  $M_1$  ;

(c) threshold calculation of sample after removing the part bigger than  $M_2$

的灰度均值,所得 Otsu 阈值大于灰度均值( $T_1 > M_1$ ),故而可以将小于  $M_1$  的像元去除。假设经过第 2 次(也可能大于 2 次)Otsu 求解后,非滑坡所占比例小于滑坡所占比例,此时,Otsu 阈值将小于灰度均值( $T_2 < M_2$ ),可以将大于  $M_2$  的像元去除,然后再进行下一次 Otsu 约束求解,直到得到最佳阈值。

改进算法的本质是一种逐渐逼近的求解算法,其关键是每次求解约束条件的设定以及最终停止逼近准则的确定。以 Otsu 阈值  $T_i$  与当前灰度均值  $M_i$  的大小关系作为约束条件,通过排除低概率样本区间,可以逐步缩小 Otsu 阈值求解的搜索范围。停止逼近准则可以通过比较当前阈值  $T_m$  与均值  $M_m$  的差异(当两者差异较小时,认为该阈值最佳)来确定。需要指出的是,该改进算法是以灰度阈值求解为例提出的,但实验结果表明,该算法对于形状特征以及纹理特征的阈值求解同样适用。

## 4 实验与分析

改进算法从地震应急响应实际出发,尽可能地简化流程,在保证滑坡提取精度的基础上,充分保证算法的执行效率。从改进算法提取地震滑坡体的个数、面积以及执行效率等方面进行分析和评价,并与结合 DEM 数据提取震后滑坡体的传统方法进行了对比。

### 4.1 实验数据

实验采用 2008 年汶川地震后第一时间获取的四川省北川县陈家坝地区的 ADS40 航拍数据,空间分辨率为 0.7 m,包含红、绿、蓝 3 个波段。实验分别选取了 4000 row×4000 column[图 4(a1)、图 4(a2)]、6000 row×6000 column[图 4(a3)]及 10000 row×10000 column 的测试图像[图 4(a4)]。图像中包含了地震滑坡、已经存在的滑坡以及典型的非滑坡等(将已有的滑坡视为非滑坡一类,不做提取)。图 4(a4)中含有少量的薄云,可视为地震滑坡提取的合理干扰因素;图 4(c)为结合 DEM 采用传统提取手段得到的震后滑坡提取结果;图 4(d)中给出的目视解译结果是对照灾前高分辨率的 Google 地球影像手工勾画得到的,用于与改进算法提取结果作对比分析。

### 4.2 滑坡体自动提取结果

利用文中提出的地震滑坡在遥感影像上的光谱、形状和纹理特征,采用多特征阈值的逐层次分析处理算法得到如图 4(b)所示的地震滑坡提取结果,并将其与结合 DEM 的传统提取结果[图 4(c)]以及目视解译结果[图 4(d)]进行对比。从图 4 可以看出,该算法得到的滑坡检测结果与结合 DEM 的传统提取结果和目视解译结果十分接近,滑坡提取精度较高。仔细对照图 4(b)~(d)可以发现,该算法得到的小面积地物较多,对部分滑坡存在一定的漏检现象。这是因为改进算法阈值的自动计算是一种数据驱动型算法,是基于概率统计理论提出的,其样本量和分布特点是决定该算法有效性的关键因素。在实际处理时,每一次专家知识的运用均是在前一次处理结果的基础上进行的,阈值求解的样本量逐步减小,从而使得阈值求解误差逐渐增大。同时,各处理层次间相互依赖、阈值计算不独立等均是出现该现象的原因。

### 4.3 提取结果精度分析

在对提取结果的分析评价中,最直观、简捷的方法就是与目视解译结果进行对比分析。参考文献[21-24]中的精度评价算法,分别从滑坡的提取个数和面积对提取结果进行量化的精度评价,并与使用 DEM 提取的结果进行对比分析。

#### 4.3.1 个数提取精度

从滑坡提取个数角度出发,分别统计了正确提取的滑坡数  $n_a$ 、错误提取的滑坡数  $n_i$ 、被遗漏的滑坡数  $n_m$  以及总体的滑坡数  $n_t$ ,并分别计算了它们对应的比率,结果如表 1 所示。

在表 1 中,正确率  $r_a$ 、误检率  $r_i$ 、漏检率  $r_m$ <sup>[21]</sup>的计算公式为

$$r_a = \frac{n_a}{n_t}, \quad (10)$$

$$r_i = \frac{n_i}{n_t}, \quad (11)$$

$$r_m = \frac{n_m}{n_t}. \quad (12)$$

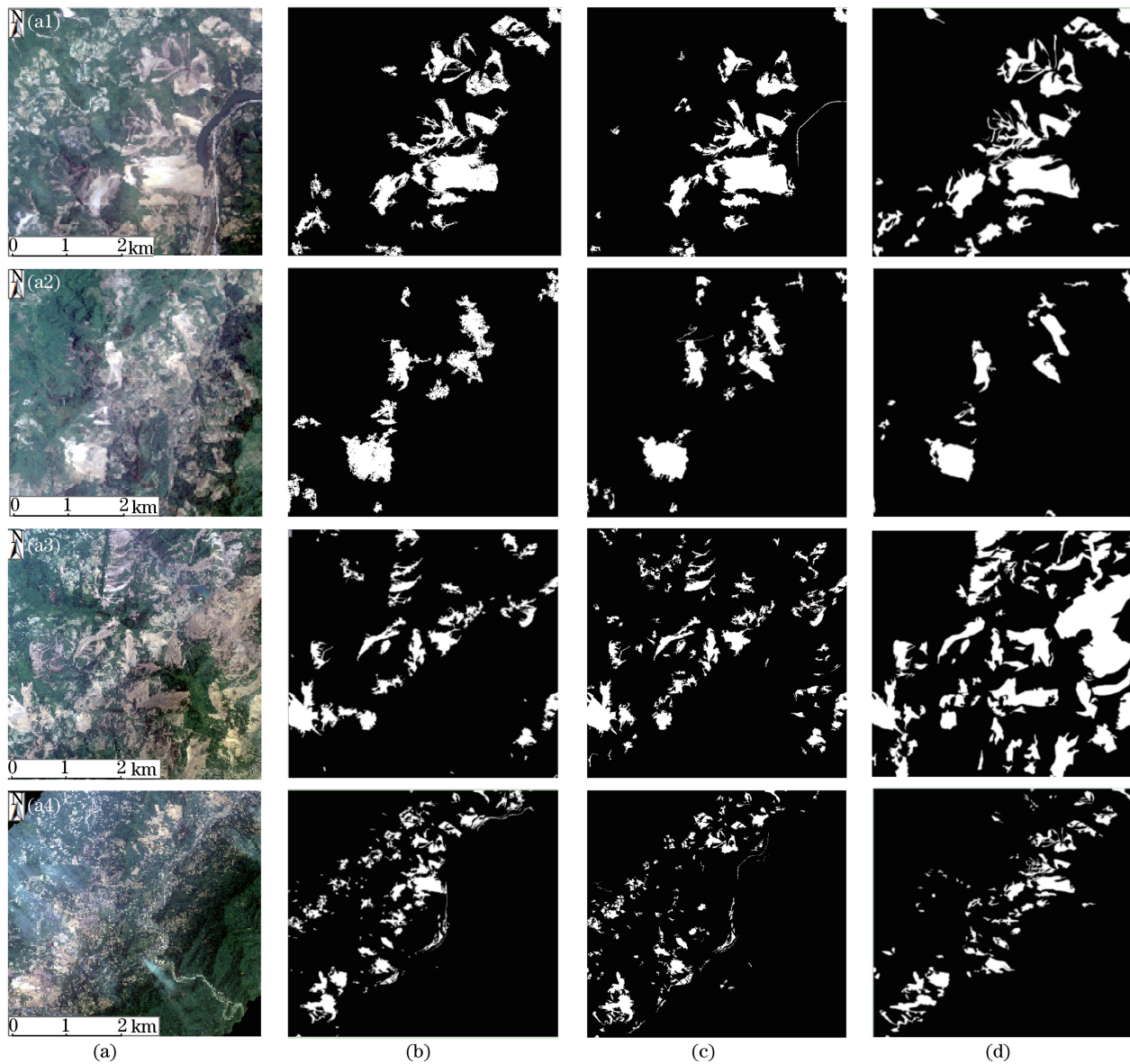


图 4 测试图像滑坡体提取结果的对比。

(a)测试图像;(b)本文算法的提取结果;(c)结合 DEM 的传统提取结果;(d)目视解译结果

Fig. 4 Comparison of landslide extraction results of test images. (a) Test images; (b) extraction results of the proposed algorithm; (c) extraction results of traditional method combined with DEM; (d)visual interpreting results

表 1 滑坡个数精度的统计结果

Table 1 Statistical results of landslide number accuracy

Test image	Accurate number	Inaccurate number	Missing number	Total number	Accurate rate/%	Inaccurate rate/%	Missing rate/%
Fig. 4 (a1)	14	2	3	17	82.4	11.8	17.6
Fig. 4 (a2)	9	3	3	12	75.0	45.0	25.0
Fig. 4 (a3)	26	4	5	31	83.8	12.9	16.2
Fig. 4 (a4)	19	7	4	23	82.6	30.4	17.4

从表 1 可以看出,除图 4(a2)外,滑坡提取个数的正确率均达到了 80% 以上,误检率和漏检率水平相当,维持在 15% 左右。对照原始影像可以发现,图 4(a2)的提取正确率偏低,原因可能是图 4(a2)中除几个面积较大的滑坡容易识别外,还有一些面积较小的滑坡不易识别。因此,如果仅对滑坡个数进行统计,并不能合理地反映该算法的提取精度和有效性。

### 4.3.2 面积提取精度

从滑坡提取面积的角度出发,以目视解译的实际滑坡面积为基准,以所提算法提取的滑坡面积为参考,得到了面积精度的统计结果,见表 2。表 2 中,在统计提取滑坡面积时,对面积过小的滑坡略去不予统计。同时,由于缺乏灾前数据以及其他辅助地理数据,对提取滑坡面积的统计中包含了部分面积较大的滑坡覆盖面积,因此得到的滑坡面积精度可以更加准确地反映所提算法提取滑坡的正确率。滑坡面积精度  $a$  和算法有效率  $b$  的计算公式为

$$a = \frac{S_t}{S_v}, \quad (13)$$

$$b = \frac{S_t}{S_a}. \quad (14)$$

式中  $S_t$  为滑坡面积,  $S_v$  为目视解译滑坡面积,  $S_a$  为算法提取的图斑面积。

从表 2 可以看出,所提算法提取的滑坡面积精度均达到了 80% 以上,甚至高达 88.5%,算法的有效率均在 74% 以上,充分说明了算法提取的滑坡面积精度较高,可以满足地震滑坡提取精度的要求。进一步分析表 2 可以发现,除图 4(a1)外,所提算法提取的滑坡面积略大于目视解译滑坡面积,即算法检测出了某些目视解译不好判断或是与地震滑坡高度相似的干扰地物。但所提算法的有效率略低于滑坡面积的提取精度,可能是因为受到了一些面积较小、且与滑坡相似度较高的地物的影响,这也是后续研究中需要解决的问题。

表 2 滑坡面积精度的统计结果

Table 2 Statistical results of landslide area accuracy

Test image	Landslide area with visual interpreting /km <sup>2</sup>	Total figure area with the proposed algorithm /km <sup>2</sup>	Total landslide area with the proposed algorithm /km <sup>2</sup>	Area accuracy /%	Algorithm validity /%
Fig. 4 (a1)	1.11	0.98	0.96	86.5	98.0
Fig. 4 (a2)	0.41	0.44	0.33	80.5	75.0
Fig. 4 (a3)	3.56	4.25	3.15	88.5	74.1
Fig. 4 (a4)	6.38	7.24	5.42	85.0	74.9

### 4.4 算法执行效率分析

在确保滑坡提取精度的同时,应最大程度地加快算法的执行速度,实现对地震滑坡的快速、自动提取。借助 MATLAB 平台对所提算法进行实现,对部分代码进行了优化,并对原始影像进行了降分辨率实验。表 3 中统计了不同尺度、不同分辨率的测试图像所耗费的时间以及对应的滑坡面积提取精度。对图 4(a3)(空间分辨率为 0.7 m)进行降分辨率重采样(重采样到 1.4 m、2.8 m 和 5.6 m),统计不同分辨率水平对应的消耗时间和滑坡提取精度。从表 3 可以看出,对于分辨率为 0.7 m、图像大小不超过 10000 row×10000 column 的高分辨率遥感影像,主体算法耗费的时间均在 1 min 以内。同时,随着影像空间分辨率的降低,算法耗费的时间急剧缩短,滑坡面积的正确提取率也相应地降低。进一步分析表 3 可以得出,对于空间分辨率在亚米级至米级的遥感影像,该算法能很好地满足地震滑坡提取精度和效率的要求。

表 3 所提算法的图像提取时间与滑坡面积提取精度

Table 3 Image extraction time and landslide area extraction accuracy obtained by the proposed algorithm

Test image	Size /(row×column)	Resolution/m	Extraction time/s	Extraction accuracy/%
a	4000×4000	0.7	15.2	86.8
b	6000×6000	0.7	24.2	80.1
c	10000×10000	0.7	43.6	88.4
d	4785×4785	1.4	11.3	70.0
e	2393×2393	2.8	3.9	50.6
f	1196×1196	5.6	1.8	48.1

## 5 结 论

本文针对地震灾害应急响应的实际需求,探索性地提出一种仅利用灾后高分辨率遥感影像快速、自动提



取地震滑坡的新算法。该算法基于地震滑坡多特征阈值的逐层次处理,采用改进的 Otsu 算法实现了对特征阈值的自动计算。结果表明,该算法简单、高效,能满足地震应急响应的高时效性要求。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang Duo, Wu Zhonghai, Li Jiacun, *et al.* An overview of earthquake-induced landslide research[J]. *Journal of Geomechanics*, 2013, 19(3): 225-241.  
张铎, 吴中海, 李家存, 等. 国内外地震滑坡研究综述[J]. *地质力学学报*, 2013, 19(3): 225-241.
- [2] Fan Yida, Wu Wei, Wang Wei, *et al.* Research progress of disaster remote sensing in China[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1170-1184.  
范一大, 吴玮, 王薇, 等. 中国灾害遥感研究进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1170-1184.
- [3] Yu Song, Chen Feng, Zhang Jin. Applied research of ZY-3 satellite in regional geological disaster emergency monitoring—taking province Shanxi as an example[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(4): 68-71.  
于颂, 陈峰, 张锦. 资源三号卫星在区域地质灾害应急监测中的应用——以山西省为例[J]. *测绘通报*, 2016(4): 68-71.
- [4] Zhu Jing, Tang Chuan. An overview of remote sensing application for landslide research in China[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(3): 458-464.  
朱静, 唐川. 遥感技术在我国滑坡研究中的应用综述[J]. *遥感技术与应用*, 2012, 27(3): 458-464.
- [5] Wang Yunnan, Ren Guangming, Wang Jiazhu, *et al.* Overview of explanation and interpretation on landslide in remote sensing image[J]. *Northwest Hydropower*, 2017(1): 17-21.  
王云南, 任光明, 王家柱, 等. 滑坡遥感解译研究综述[J]. *西北水电*, 2017(1): 17-21.
- [6] Mondini A C, Guzzetti F, Reichenbach P, *et al.* Semi-automatic recognition and mapping of rainfall induced shallow landslides using optical satellite images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(7): 1743-1757.
- [7] Hervás J, Barredo J I, Rosin P L, *et al.* Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy[J]. *Geomorphology*, 2003, 54(1): 63-75.
- [8] Zhang Yi, Tan Long, Chen Guan, *et al.* Landslide information extracted from high resolution remote sensing based on the object oriented classification method[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition)*, 2014, 50(5): 745-750.  
张毅, 谭龙, 陈冠, 等. 基于面向对象分类法的高分辨率遥感滑坡信息提取[J]. *兰州大学学报(自科版)*, 2014, 50(5): 745-750.
- [9] Zhang Xuefeng, He Zhengwei, Xue Dongjian, *et al.* Remote sensing investigation and risk assessment of large scale individual landslide triggered by the Wenchuan earthquake[J]. *Remote Sensing Information*, 2011(3): 50-54.  
张雪峰, 何政伟, 薛东剑, 等. 汶川地震大型单体滑坡遥感调查与危险性评价[J]. *遥感信息*, 2011(3): 50-54.
- [10] Wang Zhihua. Remote sensing for landslides in China and its recent progress[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2007, 19(4): 7-10.  
王治华. 中国滑坡遥感及新进展[J]. *国土资源遥感*, 2007, 19(4): 7-10.
- [11] Ye Runqing, Deng Qinglu, Wang Haiqing. Landslides identification based on image classification: a case study on Guizhoulaocheng landslide in the three gorges reservoir area[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2007, 4(6): 574-577.  
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[J]. *工程地球物理学报*, 2007, 4(6): 574-577.
- [12] Liu Chen, Liu Xiuguo, Chen Qihao, *et al.* Impact of DEM spatial resolution on landslide extraction using object-oriented methods[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(4): 631-638.  
刘辰, 刘修国, 陈启浩, 等. 面向对象滑坡信息提取中 DEM 空间分辨率影响分析[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(4): 631-638.
- [13] Stumpf A, Kerle N. Object-oriented mapping of landslides using random forests[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10): 2564-2577.
- [14] Zhang Yali. Landslides hazard of object-oriented based on high-resolution remotely sensed images[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.

- 张雅莉. 面向对象高分辨率遥感数据滑坡灾害信息提取研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [15] Cai Liang, Guo Luo. A research of land-cover change of Wenchuan earthquake before and after based on object-oriented method [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 5927-5937.  
蔡亮, 郭砾. 基于面向对象方法的汶川大地震灾害土地覆盖变化[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 5927-5937.
- [16] Ashbindu S. Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10(6): 989-1003.
- [17] Zhu Lin. Research and application of remote sensing image change detection technology [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.  
朱林. 遥感图像变化检测技术的研究及应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [18] Zhao Xiang, Li Changchun, Su Na. Extraction of landslide/debris flow information based on multi-source remote sensing data [J]. 2009, 18(6): 29-32.  
赵祥, 李长春, 苏娜. 滑坡泥石流的多源遥感提取方法[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(6): 29-32.
- [19] Li Song, Li Yiqiu, An Yulu. Automatic recognition of landslides based on change detection [J]. *Remote Sensing Information*, 2010(1): 27-31.  
李松, 李亦秋, 安裕伦. 基于变化检测的滑坡灾害自动识别[J]. *遥感信息*, 2010(1): 27-31.
- [20] Li Song, Deng Baokun, Xu Hongqin, *et al.* Fast interpretation methods of landslides triggered by earthquake using remote sensing imagery [J]. *Remote Sensing Information*, 2015(4): 25-28.  
李松, 邓宝昆, 徐红勤, 等. 地震型滑坡灾害遥感快速识别方法研究[J]. *遥感信息*, 2015(4): 25-28.
- [21] Martha T R, Kerle N, Jetten V, *et al.* Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods [J]. *Geomorphology*, 2010, 116(1/2): 24-36.
- [22] Lu P, Stumpf A, Kerle N, *et al.* Object-oriented change detection for landslide rapid mapping [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 701-705.
- [23] Stumpf A, Kerle N. Combining random forests and object-oriented analysis for landslide mapping from very high resolution imagery [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 3(1): 123-129.
- [24] Mondini A C, Marchesini I, Rossi M, *et al.* Bayesian framework for mapping and classifying shallow landslides exploiting remote sensing and topographic data [J]. *Geomorphology*, 2013, 201(3): 135-147.
- [25] Tong Liqiang, Guo Zhaocheng. A study of remote sensing image features of typical landslides [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2013, 25(1): 86-92.  
童立强, 郭兆成. 典型滑坡遥感影像特征研究[J]. *国土资源遥感*, 2013, 25(1): 86-92.
- [26] Han Jinliang, Wu Shuren, He Shujun, *et al.* Basal characteristics and formation mechanisms of geological hazards triggered by the May 12, 2008 Wenchuan earthquake with a moment magnitude of 8.0 [J]. *Earth Science Frontier*, 2009, 16(3): 306-326.  
韩金良, 吴树仁, 何淑军, 等. 5.12 汶川 8 级地震次生地质灾害的基本特征及其形成机制浅析[J]. *地学前缘*, 2009, 16(3): 306-326.
- [27] Yan Tongzhen, Yang Shun'an, Fang Yun. *Landslide science* [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 2000.  
晏同珍, 杨顺安, 方云. *滑坡学* [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2000.
- [28] Wang Litao, Wang Shixin, Zhou Yi, *et al.* Remote sensing change detection method based on texture characteristic in natural disaster monitoring [J]. *Journal of Catastrophology*, 2014, 29(3): 97-101.  
王丽涛, 王世新, 周艺, 等. 基于纹理特征的高分辨率遥感影像灾害监测应用[J]. *灾害学*, 2014, 29(3): 97-101.
- [29] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [30] Hu Min, Li Mei, Wang Ronggui. Application of an improved Otsu algorithm in image segmentation [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, 24(5): 443-449.  
胡敏, 李梅, 汪荣贵. 改进的 Otsu 算法在图像分割中的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, 24(5): 443-449.
- [31] Dong Zhongyan, Jiang Lixing, Wang Junya, *et al.* Modified one-dimensional Otsu algorithm based on image complexity [J]. *Computer Science*, 2015, 42(s1): 171-174.  
董忠言, 蒋兴兴, 王俊亚, 等. 基于图像复杂度的一维 Otsu 改进算法[J]. *计算机科学*, 2015, 42(s1): 171-174.

- [32] Li Huiguang, Yao Lei, Shi Lei. Automatic selection of image threshold based on improved Otsu [J]. Computer Simulation, 2007, 24(4): 216-220.  
李惠光, 姚磊, 石磊. 改进的 Otsu 理论在图像阈值选取中的应用[J]. 计算机仿真, 2007, 24(4): 216-220.
- [33] Xu Xiangyang, Song Enming, Jin Lianghai. Characteristic analysis of threshold based on Otsu criterion [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2716-2719.  
许向阳, 宋恩民, 金良海. Otsu 准则的阈值性质分析[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2716-2719.