

# 机载激光雷达技术在长江三峡工程库区滑坡灾害调查和监测中的应用研究

刘圣伟<sup>1</sup> 郭大海<sup>1</sup> 陈伟涛<sup>2</sup> 郑雄伟<sup>1</sup> 王圣尧<sup>3</sup> 李显巨<sup>2</sup>

(1.中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083;2.中国地质大学,湖北 武汉 430074;  
3.中国矿业大学,北京 100083)

**摘要:**机载激光雷达技术是一种利用激光对地表三维坐标精确信息进行采集的新型遥感技术。本文以长江三峡工程库区滑坡灾害调查和监测应用为主要研究目标,通过对试验区的机载激光雷达数据的获取和处理,得到了精度很高的机载激光雷达 DEM 产品,并从定性和定量两个方面进行了机载激光雷达技术滑坡调查和动态监测应用试验。研究表明机载激光雷达山体阴影图能够直观表达微地貌形态;机载激光雷达坡度和地表粗糙度图像能够提供精确的微地貌特征量;利用多期机载激光雷达数据进行滑坡动态监测,可以掌握一定时间段内滑坡体的变形趋势和特征,并精确测算变形量。

**关键词:**机载激光雷达;DEM;滑坡;调查监测

**中图分类号:**P694 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)02-0507-11

长期以来,遥感技术一直是地质灾害调查和研究中的重要技术手段。近年来,以高分辨率、高精度为特征的新型遥感技术不断涌现,使得地质灾害遥感调查的精度和可靠性也在迅速提高<sup>[1]</sup>。机载激光雷达就是一种利用激光对地表三维坐标信息进行采集的新型遥感技术,它结合了激光测距、卫星定位(GPS)和惯性测量(INS)等先进技术<sup>[2]</sup>,其主要特点如下:(1)采样率高。可以快速完成大区域的地表三维坐标信息采集,可生成 1 m 或更小格网间隔的数字高程模型(DEM);(2)精度高。目前,机载激光雷达数据的高程绝对精度通常可达到 15 cm,平面绝对精度随航高不同可达到 10 cm 到 1 m;(3)穿透率高。能部分穿透植被和云层,可对林区、山区或阴云覆盖地区开展调查。机载激光雷达技术的上述特点使其具备以下能力:(1)快速而精确地获取滑坡等地质灾害体的微地形地貌等细节特征信息;(2)可以定量提取精细的地表粗糙度、坡度、坡向等地形地貌参

数;(3)多期数据下,可以精确地提取特征地形地貌的细微变化量。从而为滑坡等地质灾害的调查和监测等研究提供有力的技术支持。近年来,一些开展机载激光雷达技术研究较早的国家和地区,如美国、欧洲和日本等,利用机载激光雷达提取的精细地形地貌信息进行滑坡识别和调查,取得了一定的进展<sup>[3-5]</sup>。

在长江三峡工程库区,由于自然因素和人为因素的影响,以滑坡、崩塌为主的地质灾害频发,危害严重,给长江航运和城乡居民的生命财产构成了严重威胁,因此采用遥感技术对这一地区开展地质灾害调查和监测研究具有重要的现实意义。但是,一方面由于三峡库区湿度大、霾厚,导致获取高空间分辨率光学影像的可能性,即数据源保障程度较低;另一方面,三峡库区地形切割强烈、植被覆盖影响较大。以上因素对传统光学遥感手段的采用造成了很大限制。中国国土资源航空物探遥感中心在 2009 年 4 月到 6 月获取了长江三峡库区秭归—巴东段面积约

收稿日期:2011-07-25;改回日期:2012-02-13

基金项目:中国地质调查局“长江中上游(江津—宜昌段)1:5 万航空遥感地质调查”项目(1212010911004)及“国土资源部百名优秀青年科技人才计划”资助。

作者简介:刘圣伟,男,1972 年生,博士,主要从事遥感技术应用和方法研究工作;E-mail: lsw6002@163.com。

1 000 km<sup>2</sup> 机载激光雷达数据。通过激光点云数据处理,得到了高精度的激光雷达数字高程模型,在此基础上对该区典型滑坡进行了定性和定量分析,开展了滑坡边界的圈定和灾害体动态监测等试验,获得了较好的效果。

## 1 区域概况

机载激光雷达飞行区位于湖北省三峡库区库首至巴东县中部。面积共计约 1 000 km<sup>2</sup>(图 1)。

飞行区内长江自西向东横贯,水系和植被发育。总体地势西南高东北低,平均海拔千米以上,相对高差在 500~1 300 m。所处的地质构造自东向西依次为黄陵背斜、秭归向斜和巴东复向斜。主要发育岩性为:第四系松散岩类,白垩系、侏罗系、泥盆系碎屑岩类地层,三叠系至震旦系碳酸盐岩以及前震旦系结晶杂岩。空间上可分为 3 个区:西部碳酸盐岩分布区,中部秭归向斜一带的碎屑岩分布区,东部结晶杂岩分布区。工作区内地质灾害以滑坡为主,主要分布在长江及其支流沿岸。本区地处亚热带季风气候区,气候温和湿润、雨量充沛、四季分明,年平均气温 17~19℃。降雨连续集中,雨季多暴雨。

## 2 机载激光雷达数据获取与处理

### 2.1 数据获取

机载激光雷达系统采用了美国莱卡公司生产的 ALS50-II,该系统飞行高度区间为 200~6 000 m,最大激光脉冲发射频率为 150 kHz,最大扫描角为 75 度,最大扫描频率 90 Hz,最多可接收 4 次回波。主要飞行设计参数为:以运五飞机为航空遥感平台,相对航高为 1 000 m,飞行速度 150 km/h,航线数 18 条,激光扫描角 45 度,最大激光脉冲功率 100.8 kHz,最大扫描频率 42.46 Hz,航线扫描幅宽 2 586~3 000 m,航线重叠 34.18%,平均激光点密度 3.15 pts/m<sup>2</sup>。

### 2.2 数据预处理

#### 2.2.1 数据解算与系统误差检校

机载激光雷达所获取的数据资料,包括地面 GPS 参考站的数据、机载 GPS 数据、机载 IMU 数据和激光雷达扫描数据。其中激光雷达扫描数据又包含测距、测角和多次回波强度等。以上原始数据需要经过解算、系统误差检校等预处理,才可以得到带地表三维坐标的激光点云数据。主要解算步骤如下:(1)利用 DGPS(差分 GPS)原理,结合地面 GPS 和机载平台的动态 GPS 数据联合求出飞行轨迹的三维坐标;(2)将平台的 INS(惯导)数据整合到飞行的三维轨迹上,求解出具有激光扫描仪瞬时位置和姿态信息的飞行轨迹;(3)结合飞行轨迹和激光扫描数据,加入系统误差改正参数、坐标投影参数,求出各航带具有 WGS84 坐标系统三维坐标的点云数据<sup>[2]</sup>。

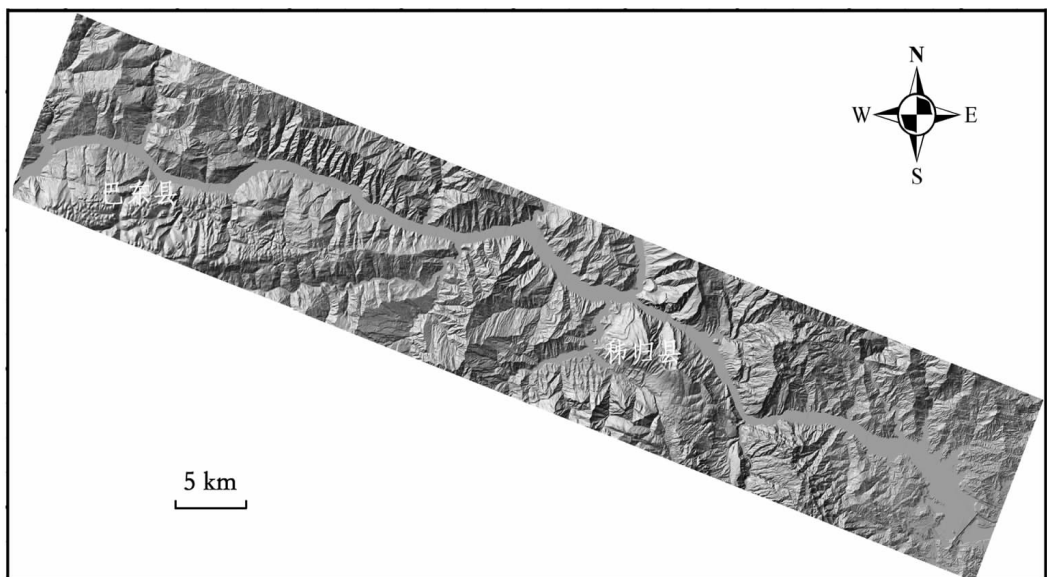


图 1 机载激光雷达飞行区范围(详图为机载激光雷达 DEM 山体阴影图)

Fig.1 Flight zone of airborne lidar (hillshade map made by lidar DEM)

### 2.2.2 航带系统误差检查修正

由于受到 INS、GPS 和扫描系统坐标转换及其他不确定的系统误差和偶然误差影响,尽管在前述激光点云数据预理解算时引入系统误差校正,在飞行规划控制精度良好的情况下,可以有效减小航带性系统误差,但解算产生的点云数据仍会产生残余的航带性系统误差或区域性误差,即在相邻两条航带的重叠区内同名地物的三维坐标会出现一定的差异<sup>[6]</sup>。因此,在进行点云分类前,必须检查并改正数据的航带性系统误差,才可以根据需要进行点云滤波分类,利用区分出的地面点生成 DEM 产品。

### 2.3 激光点云分类

本文中机载激光雷达数据处理的目的是为地质灾害调查应用研究提供较高精度的 DEM 产品,因此本次激光点云的分类目标主要是进行地面点和非地面点区分,最后利用地面点数据生成所需的 DEM 产品。采用基于 MicroStation V8 平台的 TerraSolid 系列软件,地面点分类主要用到其中的 TerraScan 和 TerraModeler 模块。TerraScan 模块进行地面点分类的原理是基于 Axelsson (1999, 2000)<sup>[7-8]</sup>的改进的不规则三角格网加密方法。

## 3 产品成果分析

### 3.1 产品成果分类

目前的机载激光雷达产品成果,多以 Flood (2002)<sup>[9]</sup>产品分级为参照,即依据工序将产品主要分为四级:第一级为原始点云,也就是直接由 GPS 和扫描数据解算得到的包含地形面和覆盖面的所有点;第二级为仅由软件自动分类得到的成果,产品分 DEM 和 DSM;第三级为第二级产品经人工编辑对自动分类成果进行修正,由于人工作业存在难以避免的误差,故其正确率定为 99%;第四级产品为增修了特征线,例如陡坎,水涯线等断裂线,该级别产品符合一般对 DEM 的制作规范要求。以上不同的产品等级关系到技术和成本,需要在综合分析具体应用需求和现有人力物力的基础上确定数据处理流程和产出的数字高程产品级别。

在所有机载激光雷达各级产品中,第三级产品中的人工编辑部分所耗人力最大。鉴于本文的应用目标为地质灾害调查,而相关资料的分析表明研究区主要地质灾害点均集中在长江的干流和支流岸坡。因此本次机载激光雷达产品生产方案为:首先,在

利用软件进行自动批处理地面点分类的基础上,对干流和支流岸坡进行了仔细的分类效果检查和适量的人工编辑,得到研究区二级产品;然后选择少部分重点试验区进行了精细人工修编,得到其三级产品。

本次数据处理成果包括:(1)飞行区 1 000 km<sup>2</sup> 面积范围的一级原始点云数据,处理过程如下:① GPS 和扫描数据解算;②航带性系统误差检查;③航带平差改正。(2)飞行区 1 000 km<sup>2</sup> 面积范围的二级 DEM 产品(图 2),处理过程如下:①软件自动批处理分类;②分类效果检查和适量人工编辑。(3)重点试验区 100 km<sup>2</sup> 面积范围的第三级 DEM 产品,处理过程如下:①软件自动批处理分类;②精细人工编辑。

上述不同级别产品对比分析和后期应用的结果表明,二级产品能够满足研究区的滑坡要素识别和分析等应用需要。三级产品虽然植被点滤除更干净,地面点分布更为光滑,地面点分类精度更高,但由于飞行区内植被覆盖度极高,如果片面追求分类精度,会造成地面点的分布密度不能满足后期应用的需要。在这种情况下就必须根据应用需要将一些能够反映地形特征细微变化的低矮植被也作为地面点处理,以增加地面点的密度和对真实地形信息的表达。图 3 为激光点低矮植被覆盖地区的激光点云图,其中左图的红色点云为精细分类的地面点,右图中的黄色点云为处理时也作为地面点分类的低矮植被点。可以看出,在真实地面点过于稀疏时,有选择地增加一些能够近似反映地形细微变化的地面附近的低矮植被,对于保证处理产品的后期应用效果非常重要。同时,三级产品在数据处理过程中往往需要进行流程化的航带间的冗余重叠区数据删除,造成植被覆盖区本就稀少的地面点更为稀疏(图 4)。本文在二级产品的数据处理过程中则对重叠区存在的偏差进行了平差改善,并用于地面点分类,得到了更好的应用效果。因此,本文后期应用中使用的机载激光雷达产品均为二级产品。

### 3.2 成果精度评价

以往对机载激光雷达数据的精度分析通常采用将激光点云数据转换为规则网格数字地表模型再以数学内插方式进行对比,但在网格化中会因抽样过程牺牲一部分激光点云数据。因此直接利用原始激光点云数据进行精度比较分析的结果会更为客观。由于激光雷达数据为离散分布的激光点云,激光脚点并不一定落在设定的地面检测点上,因此在进行



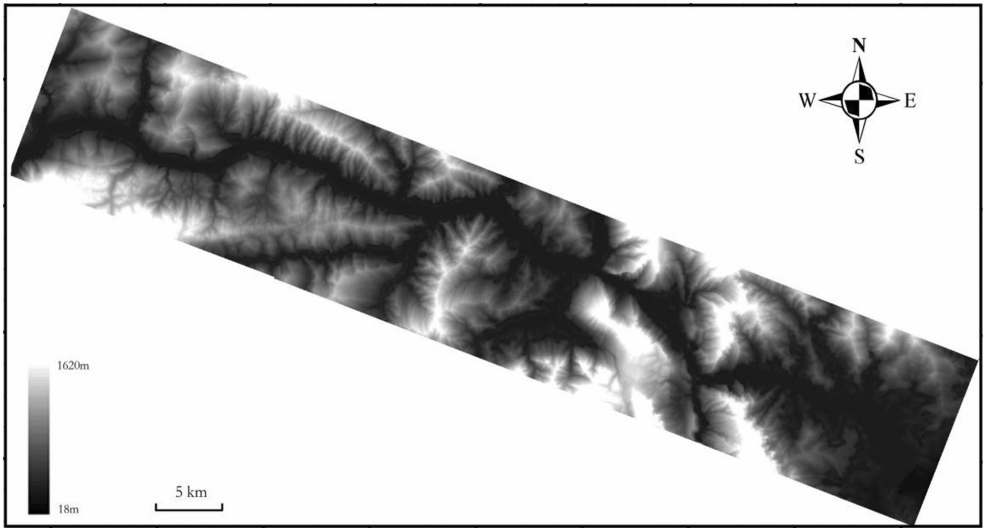


图 2 1 000 km<sup>2</sup> 飞行区机载激光雷达 DEM(1m x 1 m 栅格)  
 Fig.2 Ariborne lidar DEM of flight area of about 1 000 km<sup>2</sup>(1m x 1m grid)

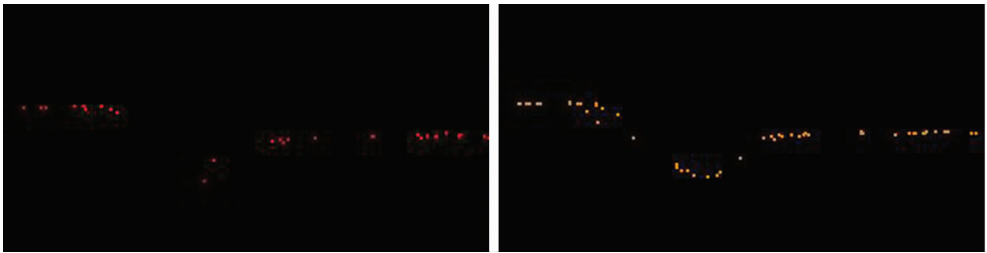


图 3 低矮植被覆盖区地面点分类(左:三级产品,右:二级产品)  
 Fig.3 Ground points classification of low vegetation coverage (left: third level product; right: second level product)

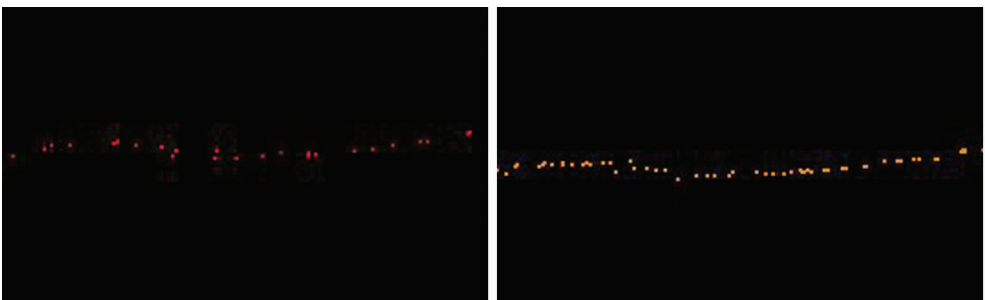


图 4 重叠区地面点分类(左:三级产品,右:二级产品)  
 Fig.4 Ground points classification of flight overlap (left: third level product; right: second level product)

精度比较时, 首先要在激光点云中确定地面检测点的位置, 利用该位置在激光点云中的平面坐标与实测坐标进行比对, 分析其平面精度; 对于高程精度, 则必须通过内插方法推算出地面检测点位置的激光雷达高程值才能计算误差。

3.2.1 平面精度评价

(1) 确定激光点云中地面检测点位置

①先对激光点云进行地面点分类; ②利用扫描和成像的时间信息将激光点云和机载激光雷达集成 RCD 影像进行匹配, 并生成正射影像(TerraPhoto 软件模块可以实现); ③将激光点云叠加在正射影像之上, 结合地面检测点的控制像片刺点资料, 确定激光点云中地面检测点的位置。

(2) 平面精度结果

将精度验证区 12 个地面检测点平面坐标和对应位置的激光点云坐标进行比对和统计分析,均方根误差在飞行方向(X)上为 1.013 5 m,在垂直飞行方向(Y)上为 1.245 2 m。

### 3.2.2 高程精度评价

#### 1) 内插方法

以激光点云中地面检测点的位置为待插点,选择周围的六个激光点来拟合一个二次曲面,利用这个二次曲面方程在待插点内插高程与地面检测点高程比较。

设定的二次方程为:

$$z=A \cdot x^2+B \cdot xy+C \cdot y^2+D \cdot x+E \cdot y+F$$

$x, y, z$  为空间坐标,  $A, B, C, D, E, F$  为曲面方程的系数。根据 GPS 地面控制点的选点原则,测量点均选在周围空旷,无建筑物和植被干扰,地面平坦,无明显高程变化的地方。选取的 6 个激光点条件为满足距离待插点最近且最大高程差低于 10 cm。

#### 2) 高程精度结果

利用精度验证区 23 个地面检测点与激光雷达原始点云高程误差进行统计分析,高程的平均误差为 0.179 9 m,最大误差为 0.343 0 m,最小误差为 0.075 0 m,均方根误差为 0.197 8 m。

### 3.2.3 精度评价结果分析

本次飞行的相对航高约为 1 000 m,根据目前机载激光雷达测量的标称高程精度一般在 10~20 cm、平面精度通常为航高的 1/2 000~1/1 000 的标准,精度验证区范围内的机载激光雷达数据完全能够满足标称的精度要求。由于客观条件限制,精度验证区仅布设在地势相对平坦且空旷度较好的地区,对于工作区内大部分地形起伏很大的地区,其平面精度会相应略有变化,但高程精度通常不受航高的影响。结合数据处理和后期应用过程中掌握的情况看,本次研究获取的激光雷达数据在精度指标和激光点密度等方面的表现都是非常可靠的。

## 4 基于机载激光雷达技术的典型滑坡调查与监测研究

本文选择研究区内的千将坪滑坡和树坪滑坡两个典型实例,分别从定性和定量两个层次分析利用机载激光雷达技术获取的精细微地形地貌信息进行

滑坡调查与监测的技术方法。定性方法是指针对一定研究区域,利用机载激光雷达 DEM 产品生成一系列不同视角下的山体阴影图(Hillshade)。山体阴影图是根据假想的照明光源对 DEM 栅格图的每个栅格单元计算照明值。它能够很好地表达地形的立体形态,而且可以方便地提取地形遮蔽信息。通过分析研究不同方位角的山体阴影系列图,可以找出单幅图难以发现的微地形变化,尤其是一些线性特征。相对于定性方法,定量方法是指利用机载激光雷达 DEM 产品,提取精细微地形地貌参数分析滑坡要素。文中使用的参数分别是坡度和地表粗糙度。它们是反映地形起伏变化和侵蚀程度的重要指标。

### 4.1 滑坡概况

#### 4.1.1 千将坪滑坡

千将坪滑坡体位于秭归县沙镇溪镇千将坪村,处长江支流——青干河的左岸,据河口约 3 km,距三峡工程大坝 44 km。该滑坡为山体基岩滑坡,2003 年 7 月 13 日零时 20 分发生,造成 15 人死亡、9 人失踪,4 个乡镇企业被摧毁。滑坡体平面总体上呈圈椅状,后缘呈弧形,侧缘呈扇形展开,前缘略呈弧形。纵长 1 205 m,平均宽度 450 m,平均厚度 29 m,面积  $52 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,体积  $1 542 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,后缘高程 450 m,前缘淹没于青干河水中,高程 102 m,东侧边界为一个走向  $130^\circ$  左右的陡壁,西侧边界是走向  $150^\circ$  左右的岩壁、沟槽及堆积垄。地层岩性为侏罗系聂家山组微风化新鲜的中厚层粉沙质泥岩、泥质粉沙岩夹厚层长石石英砂岩。千将坪滑坡所在的青干河北岸坡总体上为一倾角  $20^\circ \sim 30^\circ$  的顺向斜坡,岸坡最高高程在 700 m 左右,河谷高程 90 m 左右,斜坡上分布有若干缓坡平台,高程 150 m 及 400 m 左右,河谷阶地均淹没在三峡水库 139 m 以下。滑坡形成较典型的微地貌有滑坡壁、整体下滑区、缓坡平台、侧缘拉裂槽、侧缘拉裂坎、前缘反翘区及滑坡牵引拉裂区等多种微地貌(图 5)。

#### 4.1.2 树坪滑坡

自三峡库区 2003 年 6 月蓄水以来,发生了大量的滑坡复活和失稳现象。树坪滑坡是变形较为严重的滑坡之一。树坪滑坡位于秭归县沙镇溪长江右岸,蓄水至 135 m 后仅一个月,滑坡就开始发生变形,在滑坡的中部和侧缘形成粗大裂缝,前缘江水一直出现混浊现象。滑坡形态为明显的圈椅状,分布高程为 65~500 m,纵长 800 m,横宽 700~900 m,滑体前缘突入长江,剪出口高程约 65~68 m,滑体厚 40~70



图 5 千将坪滑坡体全貌

Fig.5 Photograph of Qianjiangping landslide

m, 体积约  $2\ 600 \times 10^4\ m^3$ 。滑坡体形态总体呈下陡上缓斜坡, 坡度  $22^\circ \sim 35^\circ$ 。自下而上分布有四级缓坡平台, 高程分别为  $95 \sim 105\ m$ 、 $150 \sim 200\ m$ 、 $225 \sim 240\ m$ 、 $300 \sim 350\ m$ 。其中二级和四级平台规模较大, 四级平台是典型的滑坡后缘平台。滑体物质主要为三叠系巴东组棕红色砂质泥岩、泥质粉砂岩及灰褐色泥灰岩等的崩滑破坏产物; 滑床为巴东组基岩, 西高东低, 即滑槽方向斜向下游(图 6)。

#### 4.2 滑坡调查应用试验

图 7 和图 8 分别为千将坪滑坡和树坪滑坡不同方位角条件的机载激光雷达山体阴影系列图。很显

然, 与 DEM 栅格图像相比, 不同方位角的山体阴影图反映滑坡地形立体形态的能力显著增强。图中滑坡壁与滑坡体的分界线在不同角度的山体阴影图上均较为清晰。同时, 不同方位角的山体阴影图在表达滑坡局部地貌特征时存在着较大的差异。如千将坪滑坡的滑坡侧缘在方位角为  $90^\circ$  时边界最为清晰, 方位角为  $135^\circ$  时次之, 方位角为  $180^\circ$  时最差。但是, 在显示滑坡体内部的地形起伏和裂变特征时, 效果最好的则是方位角为  $180^\circ$  的图像,  $135^\circ$  时次之,  $90^\circ$  时最差。树坪滑坡图中, 方位角为  $90^\circ$  时滑坡后缘边界没有  $180^\circ$  时清晰。但是, 在显示滑坡侧缘边界时, 方位角为



图 6 树坪滑坡体全貌

Fig.6 Photograph of Shunping landslide



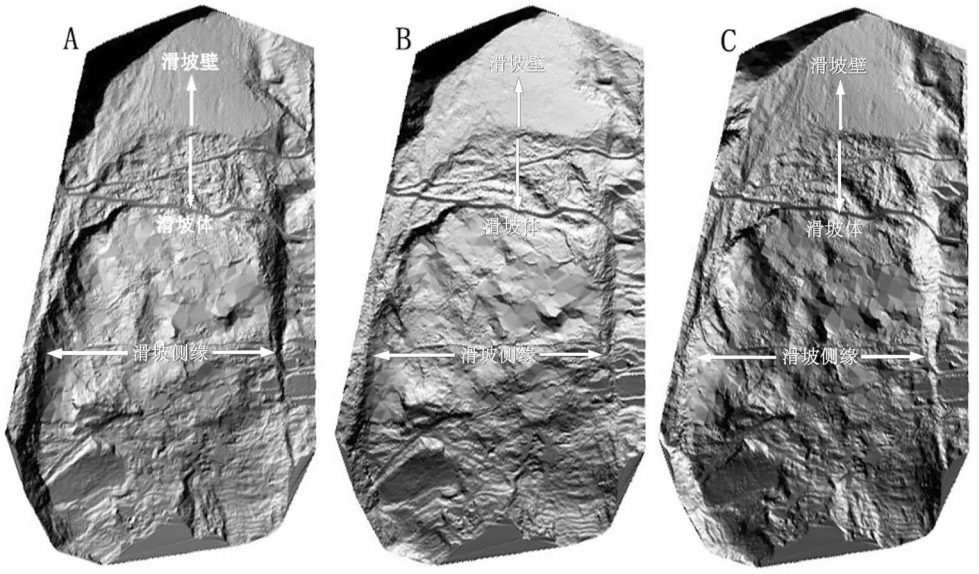


图 7 千将坪滑坡山体阴影系列图(A、B、C 分别代表方位角为 90°、135°、180°)  
 Fig.7 Lidar hillshade maps of Qianjiangping landslide (azimuth: A-90°, B-135°, C-180°)

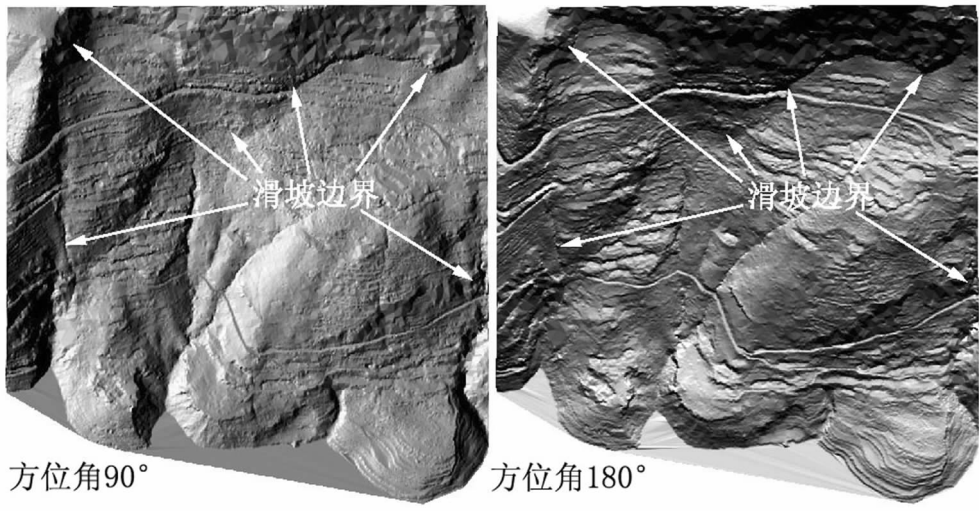


图 8 树坪滑坡山体阴影系列图  
 Fig.8 Lidar hillshade maps of Shuping landslide (azimuth:left-90°, right-180°)

90°时的效果比方位角为 180°时的效果好。

千将坪滑坡和树坪滑坡的机载激光雷达坡度图(图 9)和粗糙度图(图 10)显示,滑坡壁与滑坡体、滑坡体与滑舌的分界处以及滑坡侧缘与周围地貌处,坡度和粗糙度明显呈跳跃式变大或变小,并且其跳跃幅度基本相同。从坡度图像的色彩和粗糙度图像的灰阶分布上看,千将坪滑坡的特点是在滑坡壁与滑舌位置相对比较集中且匀滑,基本呈面状分布。而树坪滑坡的特点是滑坡区域和非滑坡区域的值域相

差较大,表现为非滑坡区域的坡度值和粗糙度值明显大于滑坡区。根据上述特征,就能够对滑坡体进行准确识别,并从坡度和粗糙度图上直接圈定滑坡侧缘边界。

由此可见,由于树坪滑坡与千将坪滑坡两者的成生环境不同,滑坡不同方位角的山体阴影图对滑坡边界的刻画效果也不同。借助于不同方位角的机载激光雷达山体阴影图及坡度和粗糙度图,能够准确地圈定出树坪滑坡滑动的范围,并能够准确地圈定出滑

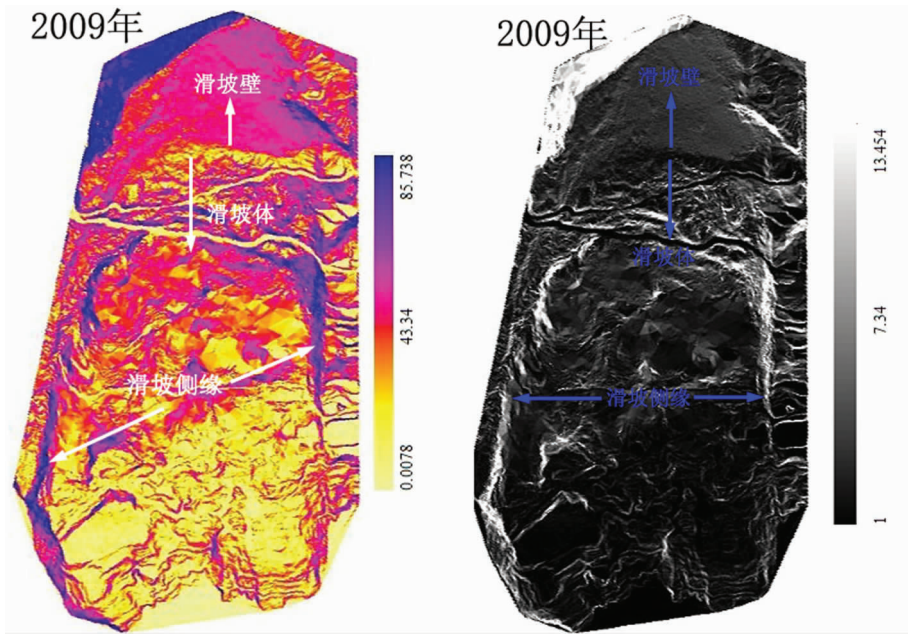


图9 千将坪滑坡地表坡度(左)与粗糙度(右)图

Fig.9 Slope (left) and roughness (right) map of Qianjiangping landslide

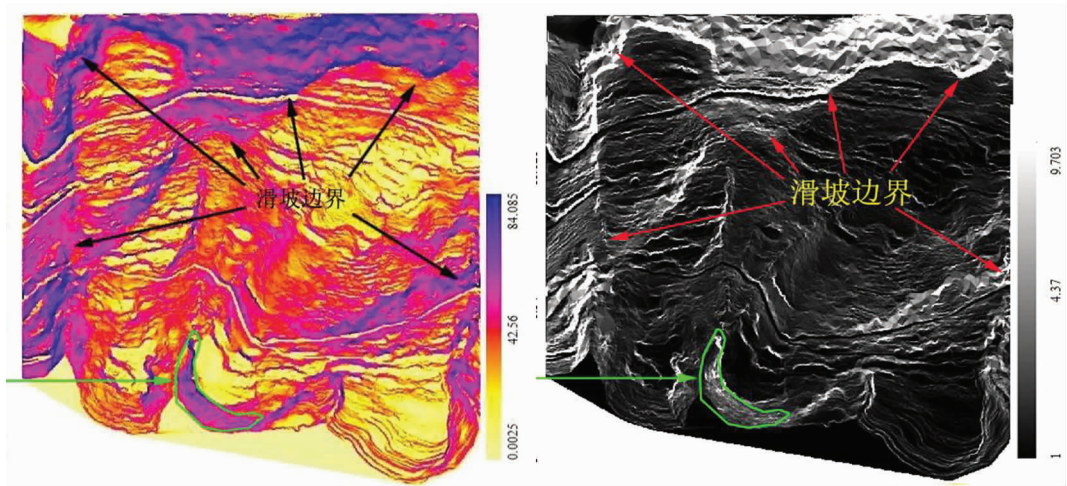


图10 树坪坪滑坡地表坡度(左)与粗糙度(右)图

Fig.10 Slope (left) and roughness (right) map of Shuping landslide

坡后缘、滑坡侧缘、滑舌等滑坡要素。本次利用机载激光雷达技术圈定的千将坪和树坪滑坡的滑坡边界,与当地国土部门实地勘测的结果相比,总体上是十分一致的,仅在局部存在较小的差异(图 11~12)。

#### 4.3 滑坡动态监测应用试验

为了进一步挖掘机载激光雷达技术监测地质灾

害动态变化的能力,本文利用2006年和2009年两期机载激光雷达产品成果对树坪滑坡期间的变形情况进行了初步的分析。该区2006年机载激光雷达产品购自武汉地大信息工程有限公司,其平面和高程误差均满足规范精度要求<sup>①</sup>。考虑到两期数据之间可能存在着由于飞行参数和机载激光雷达硬件设置不

① 武汉地大空间信息有限公司. 三峡库区地质灾害监测预警工程第二期遥感监测建设项目4D产品技术总结,2008.



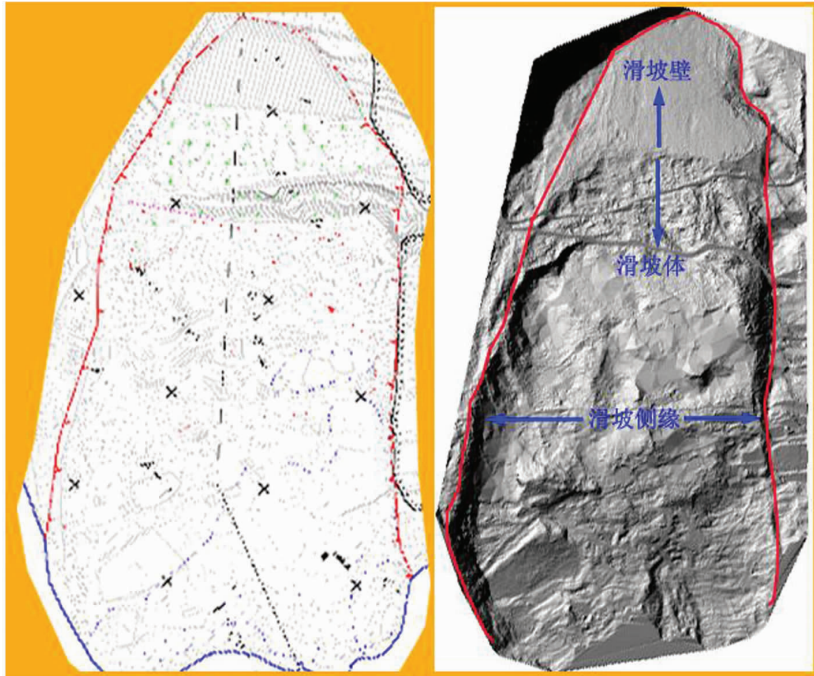


图 11 千将坪滑坡边界(红线)Lidar 识别结果(右)与实地勘测图(左)对比

Fig.11 Landslide boundary (red line) of Qianjiangping identified by lidar (right) and field survey (left)

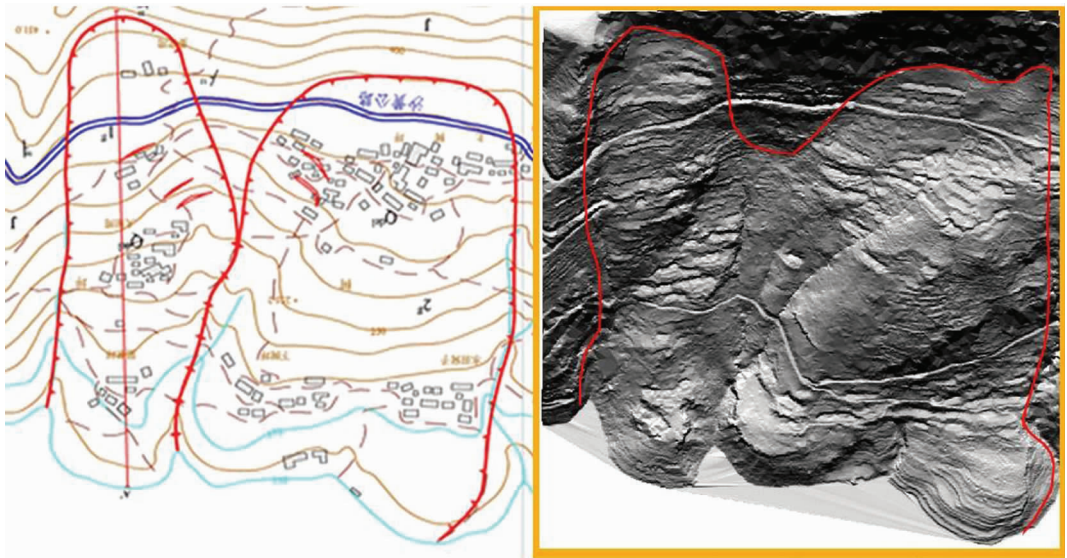


图 12 树坪滑坡边界(红线)Lidar 识别结果(右)与实地勘测图(左)对比

Fig.12 Landslide boundary of Shuping identified by lidar (right) and field survey (left)

同导致的某些系统偏差, 本文通过比较不同特征点之间的坐标差在两期机载激光雷达测量结果中的变化进行滑坡变形监测, 从而消除系统偏差的影响。图 13 是树坪滑坡动态监测示意图。图中三条横线代表两期数据相同位置的水平面, 1、2、3 为水平面与图中各道路的切点, 这些切点作为滑坡监测特征点。根

据图中各点的精确坐标, 点 1 与点 2 南北方向上的坐标差在 2006 年和 2009 年分别为 119.11 m 和 119.15 m, 二者差值仅为 4 cm。点 2 与点 3 的坐标差分别为 163.69 m 和 164.60 m, 二者差值达 0.91 m; 点 1 和点 2 东西方向上的坐标差在 2006 年和 2009 年分别为 253.82 m 和 256.02 m, 二者差值为

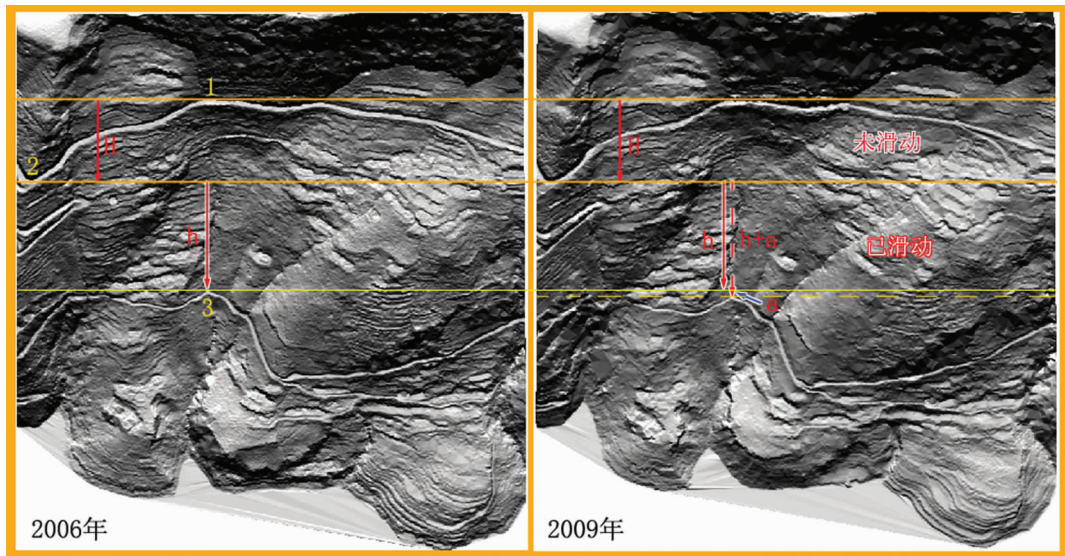


图 13 树坪滑坡变形状况动态监测示意图

Fig.13 Dynamic monitoring map of Shuping landslide (left: 2006, right: 2009)

2.20 m。点 2 和点 3 的坐标差分别为 260.55 m 和 261.20 m,二者差值为 0.65 m。以上结果表明,在两次测量期间,1、2 点之间的区域在南北方向上基本没有发生变形,而在东西方向上的变形量较大,机载激光雷达的量测结果达 2.2 m。2、3 点之间的区域在南北方向和东西方向上均发生一定程度的变形,机载激光雷达量测结果分别为 0.91 m 和 0.65 m。由此可见,树坪滑坡体的变形从上到下呈现不均匀变动的特点,其变动趋势主体是在东西方向,南北方向相对较弱,该变形特征与前人的研究结果是吻合的<sup>[10]</sup>。

## 5 结 论

长江三峡库区地形切割强烈,植被覆盖度高,地质条件复杂,常规的卫星成像与测量技术不能获取高精度的 DEM 数据,给该区地质灾害识别与分析带来了一定的困难。本次研究通过对库区约 1 000 km<sup>2</sup> 面积的机载激光雷达数据的获取和处理,得到了精度很高的机载激光雷达 DEM 产品,从调查和动态监测两个方面进行了机载激光雷达技术滑坡应用研究,得出如下结论:

(1) 机载激光雷达山体阴影图能够精确表达微地貌形态。尤其是利用不同方位角的山体阴影图,能够

直观呈现不同朝向的微地貌特征,突破了以往由于数据精度不高导致对灾害体认识不够全面的阻碍。

(2) 机载激光雷达坡度图像、地表粗糙度图像能够为地质灾害识别与分析提供定量的地貌参数,为滑坡边界的圈定提供科学依据。研究表明,滑坡后缘、滑坡体、滑坡侧缘在坡度与地表粗糙度上均具有明显的变化特征。

(3) 利用不同期次的机载激光雷达数据进行滑坡动态监测,可以掌握一定时间段内滑坡体的变形趋势和特征,并精确测算变形量,有助于提高滑坡监测的效率和精度。

**致谢:**野外工作期间,秭归县国土资源局余祖湛、郑卫军、王小俊给予了大力支持和诸多帮助,在此深表感谢。

## 参考文献(References):

- [1] 王治华. 中国滑坡遥感及新进展[J]. 国土资源遥感, 2007, (4):7-10.  
Wang Zhihua. Remote sensing for landslides in China and its recent progress [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007, (4):7-10 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2007:16-25.  
Zhang Xiaohong. Airborne Laser Radar Technology Theory and



- Methods of Measurement [M]. Wuhan:Wuhan University Press, 2007:16–25(in Chinese).
- [3] Nancy F Glenn, David R Streutker, D John Chadwick, et al. Analysis of LiDAR –derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity [J]. *Geomorphology*, 2006 (73):131–148.
- [4] Ardizzone F, Cardinali M, Galli M, et al. Identification and mapping of recent rainfall–induced landslides using elevation data collected by airborne Lidar [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, (7):637–650.
- [5] Sekiguchi T, Sato, HP. Mapping of micro topography using airborne laser scanning [J]. *Landslides* 2004, 1(3):195–202.
- [6] Burman H. Adjustment of laser scanner data for correction of orientation errors [C]//*International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33, part B2, Amsterdam:125–132.
- [7] Axelsson P. Processing of laser scanner data –algorithms and application [J]. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54 (2/3):138–147.
- [8] Axelsson P. DEM generation from laser scanner data using adaptive tin models [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(B4):110–117.
- [9] Flood, M. Product definitions and guidelines for use in specifying lidar deliverables [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, 68(12):1–7.
- [10] 张华伟, 王世梅, 霍志涛, 等. 自动位移计在树坪滑坡中的应用 [J]. *工程地质学报*, 2006, 14(03):401–404.
- Zhang Huawei, Wang Shimei, Huo Zhitao, et al. Automatic monitoring of ground movements in Shuping sliding slope on three gorges reservoir, middle reach of Yangtze River [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14 (03): 401–404 (in Chinese with English abstract).

## The application of airborne lidar technology in landslide investigation and monitoring of Three Gorges Reservoir Area

LIU Sheng–wei<sup>1</sup>, GUO Da–hai<sup>1</sup>, CHEN Wei–Tao<sup>2</sup>,  
ZHENG Xiong–wei<sup>1</sup>, WANG Sheng–yao<sup>3</sup>, LI Xian–Ju<sup>2</sup>

(1. *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China*; 2. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China*; 3. *China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** The airborne lidar is a new kind of remote sensing technology for collecting accurate three – dimensional coordinates on the surface by laser. In order to investigate and monitor the landslide of Three Gorges Reservoir Area, the authors obtained the high – precision DEM through the acquisition and processing of the airborne lidar data. On such a basis, the authors made the airborne lidar landslide investigation and dynamic monitoring test qualitatively and quantitatively. The results indicate that the lidar hill shade map can express micro – topography, and the lidar slope and surface roughness maps can provide precise micro – geomorphic feature parameters. In addition, deformation trends and characteristics of the landslide within a certain period can be detected and accurate deformation can be measured by multi – phase airborne lidar data.

**Key words:** airborne lidar; DEM; landslide; investigating and monitoring

**About the first author:** LIU Sheng – wei, male, born in 1972, doctor, mainly engages in the application and methods research of remote sensing technology; E – mail: lsw6002@163.com.