

文章编号: 1006-6616 (2016) 03-0747-13

高精度机载 LiDAR 在小江活动构造和 地质灾害研究中的应用

刘宇平, 梁虹, 陈菲菲

(中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081)

摘要: 通过机载 LiDAR 飞行数据处理, 获得飞行区内高精度的数字高程模型 (DEM) 和数字地表模型 (DSM) 等数字地形成果, 应用数字地形进行地质构造解译, 确定小江活动断裂展布及构造地貌特征, 圈定飞行区内金沙江、小江的滑坡及泥石流分布范围, 估算其面积及体积, 为此类地质灾害的预警提供可靠信息。

关键词: LiDAR; DEM; 小江断裂; 活动断裂; 泥石流

中图分类号: P546; P627

文献标识码: A

0 引言

激光雷达测量技术 (Light Detection And Ranging, LiDAR) 是近 10 年来迅速发展的一种新型对地观测手段, 是对地貌高程的最直接且精度最高的测量手段。机载 LiDAR 技术可精确、快速、可靠地获取地面 3 维数据, 在地球科学中的应用日益广泛。机载 LiDAR 最具吸引力的优势在于激光束能够通过植被缝隙到达地表, 并能够准确测量地表形态。这些数据可以在适当的尺度 (m) 和精度 (dm) 上展现断层活动在地表留下的迹象。

与传统的摄影测量方法相比, LiDAR 测量是对地表 3 维坐标的直接测量, 避免通过摄影像对解算或雷达干涉测量 (In-SAR) 间接获得地表 3 维坐标, 从而大大提高测量精度。另外, 通过对 LiDAR 原始数据后期处理, 能够获得高精度、高分辨率的 DEM 数据。这些 DEM 数据能够精细表达地表地貌结构, 为研究和理解活动构造相关构造地质情况、地貌和最新的形变历史提供更精确的基础数据。

LiDAR 具有的高空间分辨率、强抗干扰能力以及高自动化等特点, 使其不仅能够快速获取高程数据, 而且在地形测绘、城市三维建模、环境监测、工程建设、地球科学及行星科学等诸多领域具有极好的发展前景和很强的竞争力。近年来在活动断裂^[1-5]、古地震及地质灾害^[5-9]等地质领域得到了广泛的应用, 并取得了一系列成果与新进展。

小江断裂是青藏高原东缘重要的活动断裂之一, 云南东川小江地区以地形切割强烈和地质灾害特别是泥石流发育为特征。本文通过对小江东川—格勒段机载 LiDAR 数据的分析处理, 获得了

收稿日期: 2016-04-11

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“青藏高原东缘重要地区区域地质专项调查”(1212011220413); “川(滇)铁路沿线地质矿产调查”(DD20160021)

作者简介: 刘宇平 (1962-), 男, 硕士, 研究员, 主要从事活动构造研究。E-mail: 1060923050@qq.com

高精度数字地形成果, 并应用这些成果对小江地区的活动构造及地质灾害进行了分析研究。

1 LiDAR 数据的获取及数据处理

小江地区机载 LiDAR 航空遥感数据由中国国土资源航空物探遥感中心飞行获取。飞行沿小江南段的东川—格勒段, 飞行区大致在长约 50 km 宽约 6 km 的范围, 同时开展飞行数据地面的检效和校正。

云南东川小江地区的 LiDAR 数据处理采用芬兰 Terrasolid 公司开发的 Terrasolid 系列软件进行。首先对飞行数据进行分块处理, 获得小区域的点云数据 LAS 文件; 在此基础上, 用 Global Mapper 获得地表数字高程 (DSM) 和数字高程 (DEM) (见图 1)。

2 基于高精度数字地形成果的小江活动构造解译

用 DEM 和 DSM 数字地形成果进行地质构造解译, 确定小江断裂东川段的展布, 特别是小江东西支的活动断裂展布, 小江断裂东支和西支在达朵—新田坝一线的分合, 小江断裂形成的断层崖 (如绿茂)、坡中槽 (槽子地)、挤压脊, 以及水系的牵引等构造地貌, 指示了小江断裂的活动特征。

2.1 线性地貌特征

小江断裂是青藏高原东缘重要的活动断裂, 以左旋走滑为特征, 地貌上线性特征明显 (见图 1)。断裂分为东西两支, 东支称为东川—格勒断裂, 沿新厂—绿茂—小新村—东川一线分布, 西支称为达朵—乌龙断裂, 东西两支断裂在新田坝附近相汇合。由于小江断裂作用形成许多线性的陡崖, 在 DEM 和 DSM 数字地形上表现为非常明显的线性地貌特征 (见图 2), 大致沿东川—新田坝—格勒一线, 断裂在小江西岸形成陡岸。

在绿茂—新村一线, 小江东支断裂形成了长约 20 km 的地形陡崖, 垂直高差可达 100 m 以上 (见图 2, 局部放大部分); 在新田坝以北地区, 其形成的线性陡崖规模要小些。

2.2 坡中槽

由小江断裂作用形成的坡中槽构造地貌主要分布在槽子地和外团山。坡中槽是小江断裂曾经发生活动的证据, 在晕渲图 (Hill-Shading Map) 和坡度图 (见图 2) 呈线性分布, 地形上的高差大约 150 m (见图 3、图 4)。槽子地坡中槽长度约 500 m, 与山体地形明显存在着差别。外团山坡中槽位于槽子地坡中槽西侧 300 m 左右, 与槽子地坡中槽平行, 但规模小。据地震记录, 1733 年 8 月 2 日小江断裂在此处曾发生 7.8 级地震, 可能是该地震形成的破裂。

2.3 被小江断裂切割的金沙江—小江阶地

小江断裂切割了小江和金沙江, 汇合处形成有二级阶地, 小江断裂在此沿伸长度约 5.8 km。因断裂的作用金沙江的流向在此从 $NE45^\circ$ 转为近南北向, 而从格勒到巧家长达 50 km 金沙江的流向基本上沿小江断裂, 因此金沙江受到错断约 50 km^[10]。从数字地形分析和地质资料整理发现小江断裂在该处的活动表现。

从格勒—龙树大约 5.8 km 的距离内, 小江断裂切割格勒—龙树阶地, 形成线性地貌特征, 并在两侧形成张性裂隙, 指示为左旋走滑的特征 (见图 4、图 5)。

2.4 挤压脊

在小江断裂东支和西支断裂汇合以北的地区, 多排子田、樊家坪子到刺棵田一线, 由于

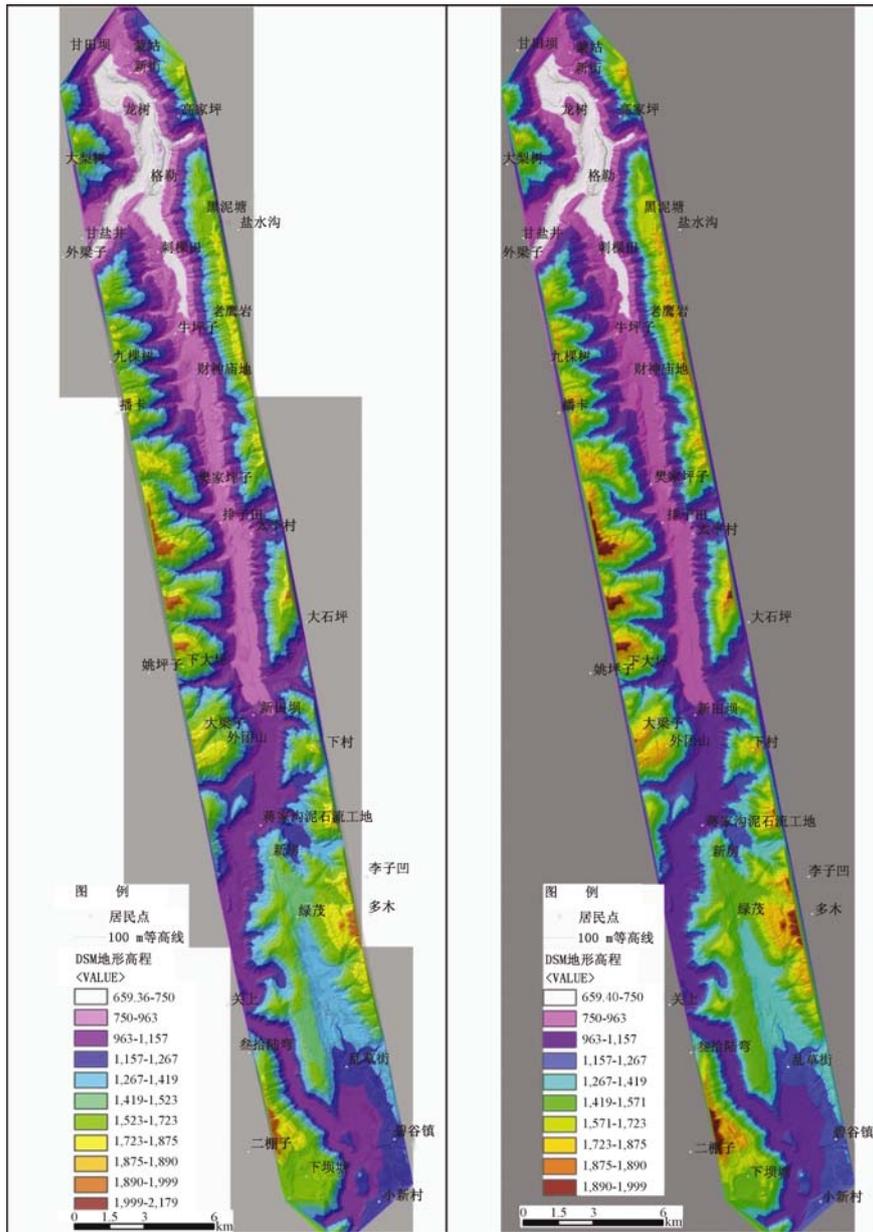


图 1 云南东川 DSM (左) 和 DEM (右) 数字地形图

Fig. 1 DSM (left) and DEM (right) digital topographic maps in Dongchuan, Yunnan

小江断裂的作用, 导致前昆阳群大龙口组、美党组等地层与寒武系中下统断层接触 (见图 6)。受到断层的走滑挤压, 寒武纪地层均呈不对称形状, 其长轴方向与小江断裂之间有 10° — 20° 的交角, 指示了小江断裂具有左旋走滑的特征。

2.5 小江断裂的位错

小江断裂是第四纪活动断裂, 将改变经过水系的流动方向。根据构造及地层、水系对比, 总位移量达到 $50 \sim 60 \text{ km}$, 其中小江断裂北段将一级河流金沙江错断约 $50 \sim 60 \text{ km}$, 小江断裂东支将三级河流的牛栏江、南盘江水系分别错断 18 km 和 24 km (见图 7)^[11-12]。

小江属于四级水系, 虽然没有像金沙江、牛栏江和南盘江见到主河道明显的牵引错断现

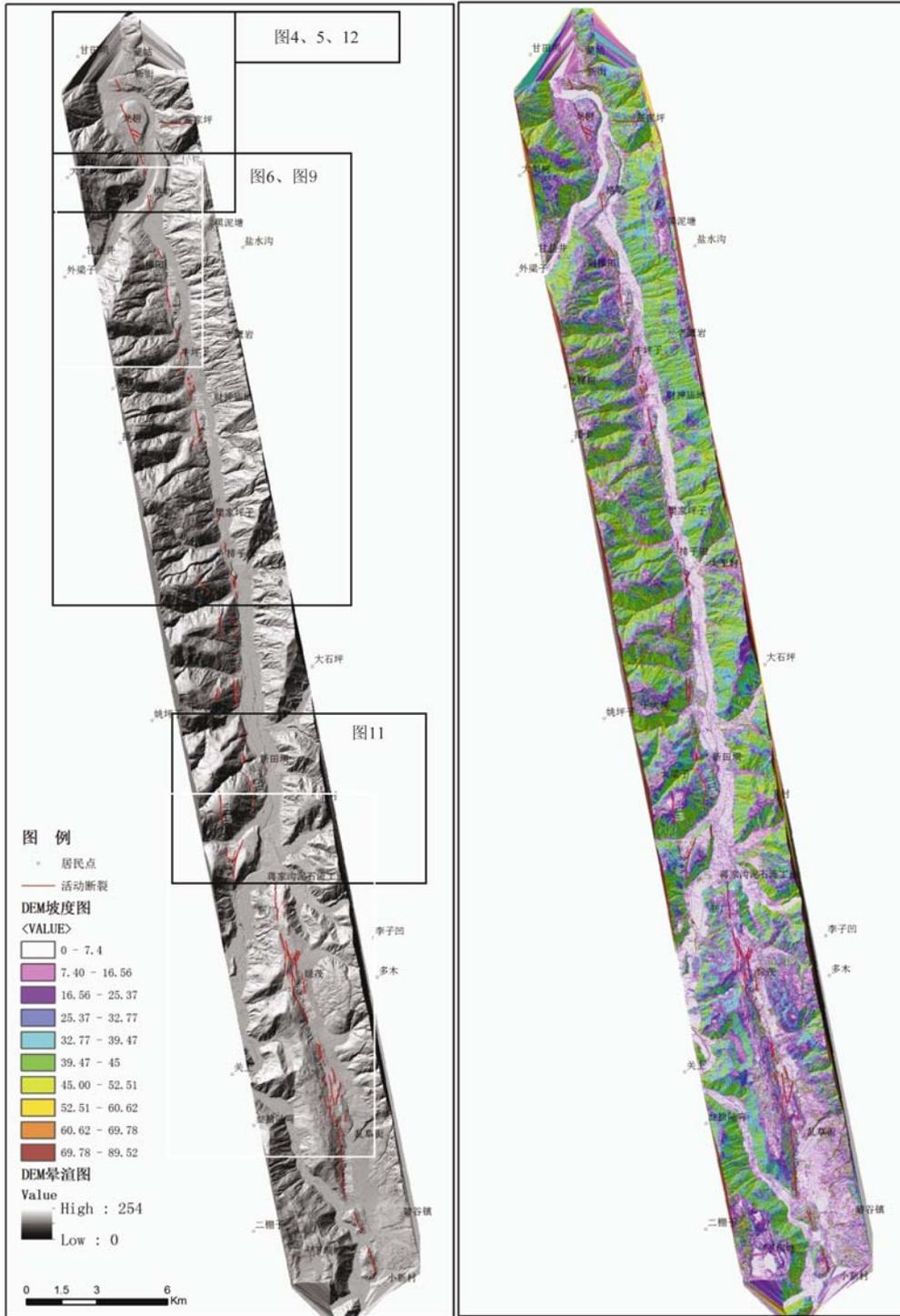


图2 小江地区的 DEM 晕渲图 (左) 和坡度图 (右)

Fig.2 Hill-shading map (left) and slope map (right) of DEM in Xiaojang region

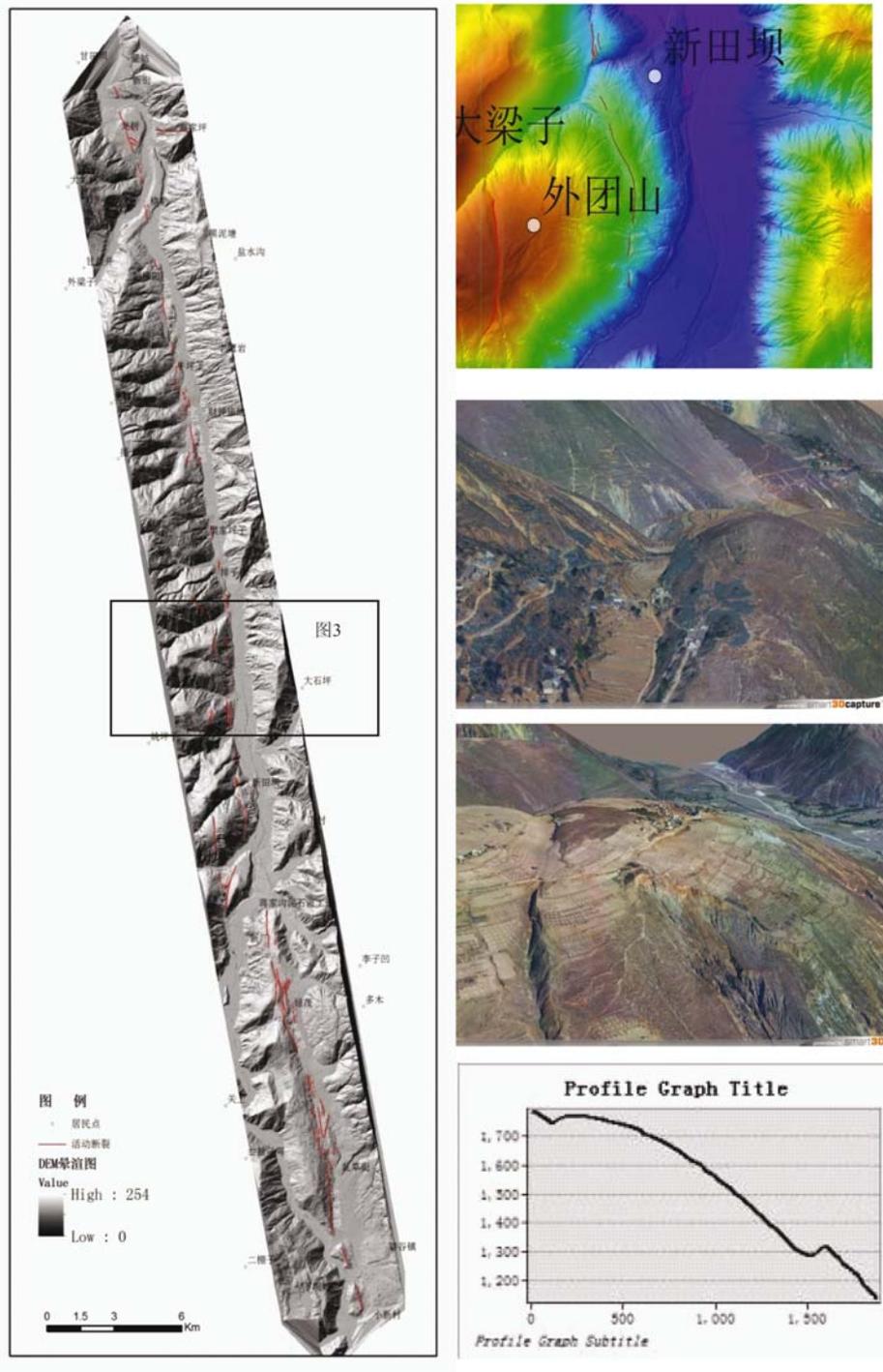


图3 小江断裂形成的坡中槽

Fig. 3 Slope groove formed by Xiaojing fault

象, 但次级水系发育牵引、弯曲现象。在新田坝到格勒之间, 有多处次级水系被牵引弯曲现象 (见图 8), 据高精度的数字地形资料, 发生位移大约 315 ~ 984 m (见图 9)。

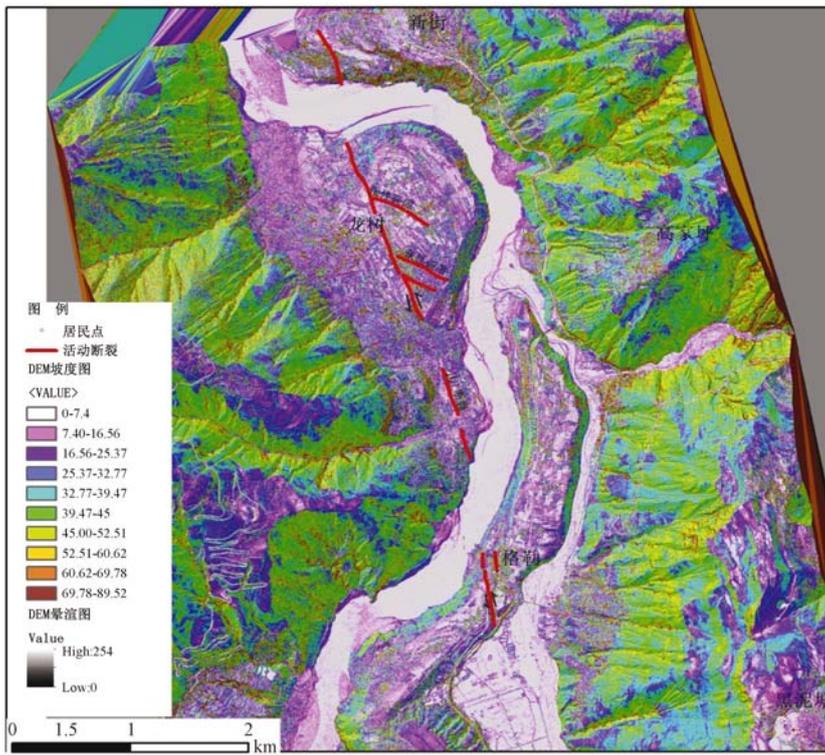


图4 小江断裂切割格勒—龙树阶地的地形坡度图

Fig.4 Gele-Longshu terrace cut by Xiaojing fault (digital slope map)

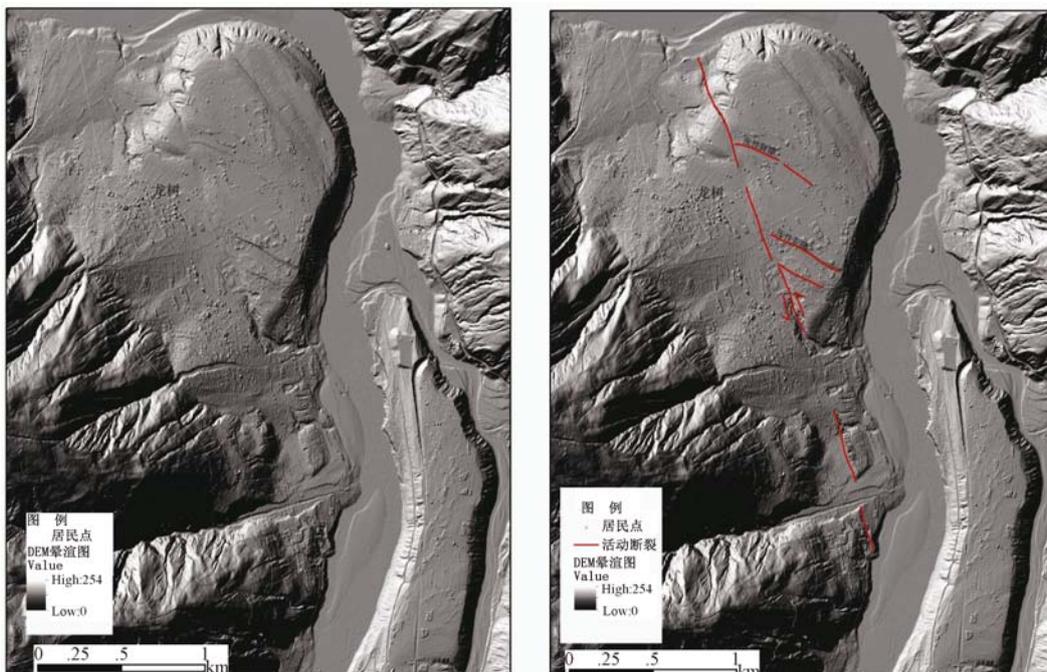


图5 龙树阶地被小江断裂切割的地貌特征

Fig.5 The geomorphic features of Longshu terrace cut by Xiaojing fault

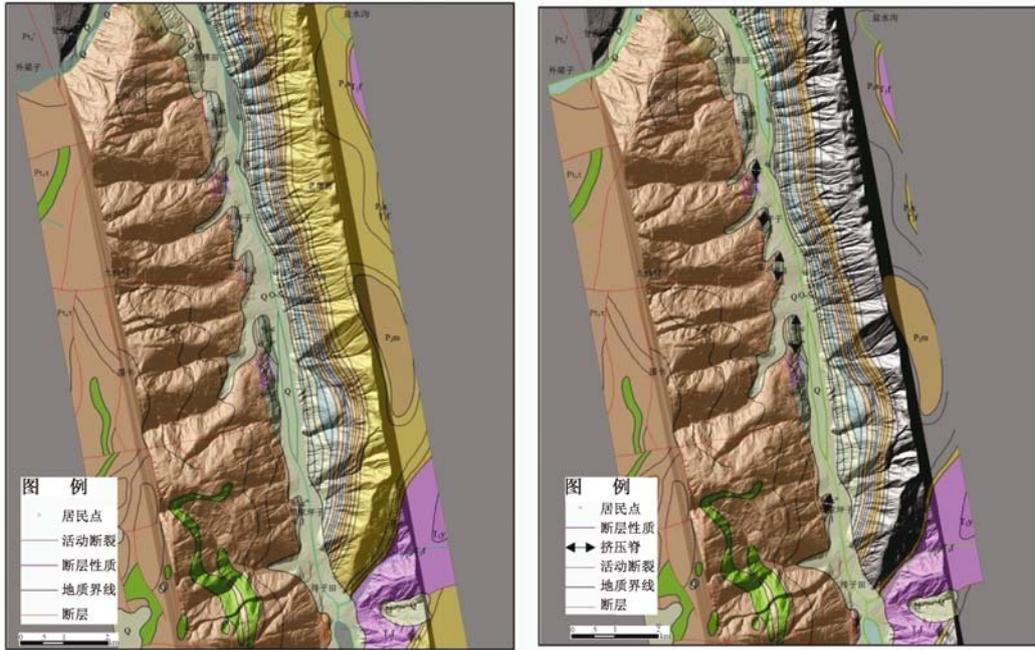


图6 小江断裂形成的地貌特征

Fig. 6 The geomorphic features formed by Xiaojing fault

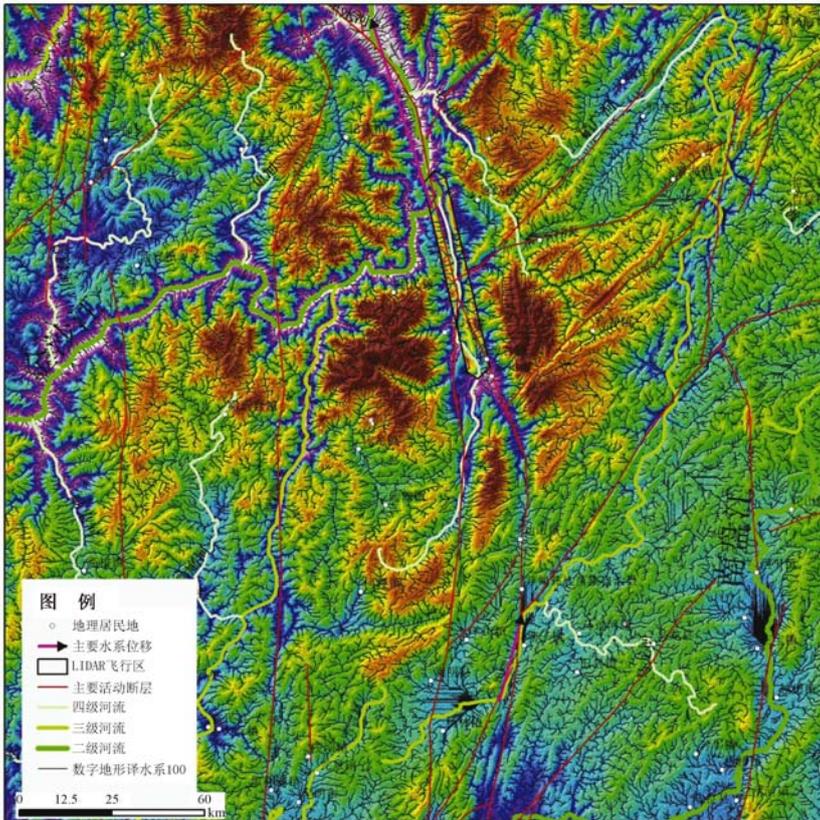


图7 东川周边小江断裂主要的错断裂水系

Fig. 7 Major displaced water system formed by Xiaojing fault around Dongchuan

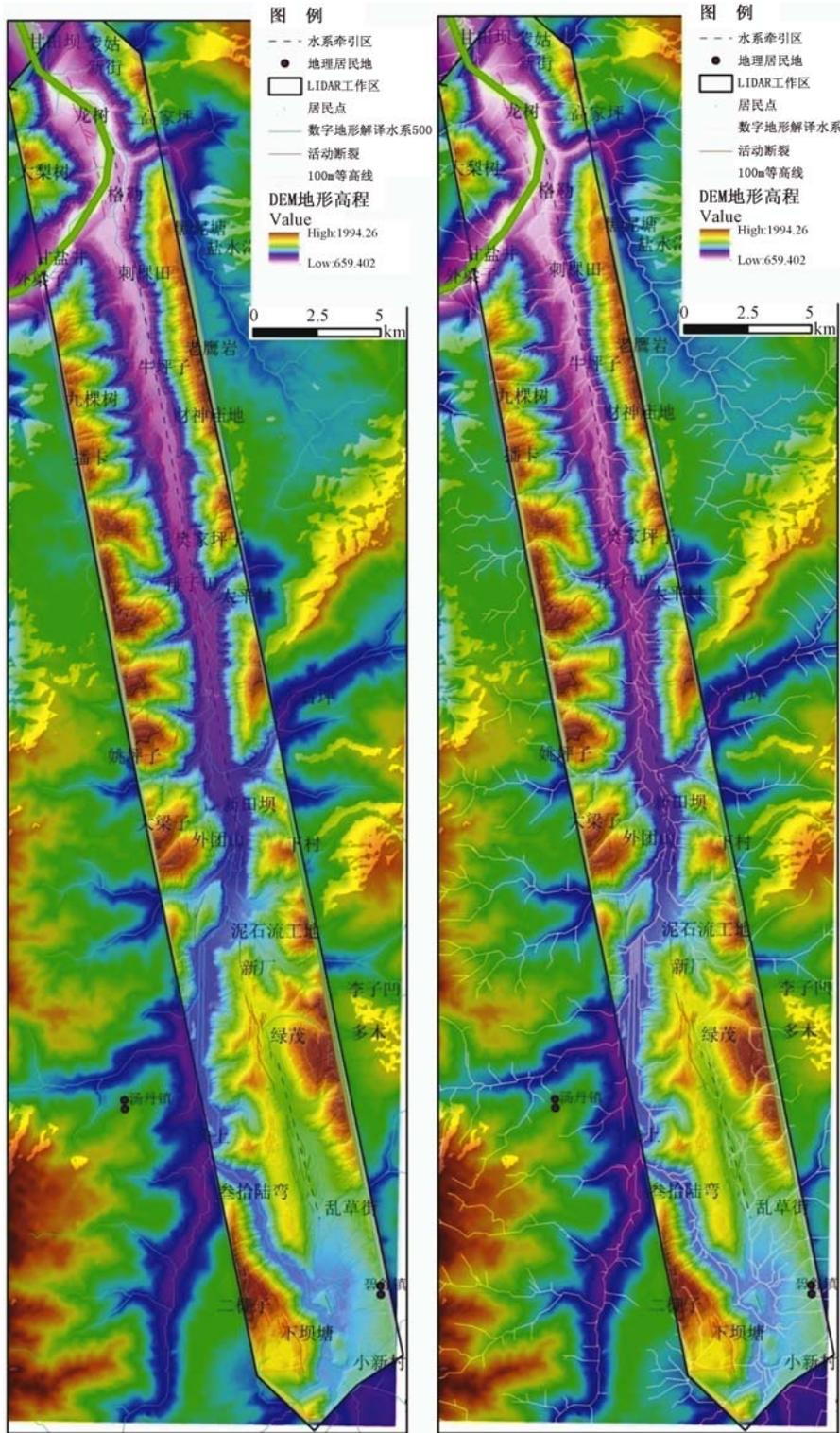


图 8 小江 LiDAR 飞行区的水系特征 (据全球 STRM DEM 数据)

Fig. 8 The drainage characteristics of the LiDAR air field

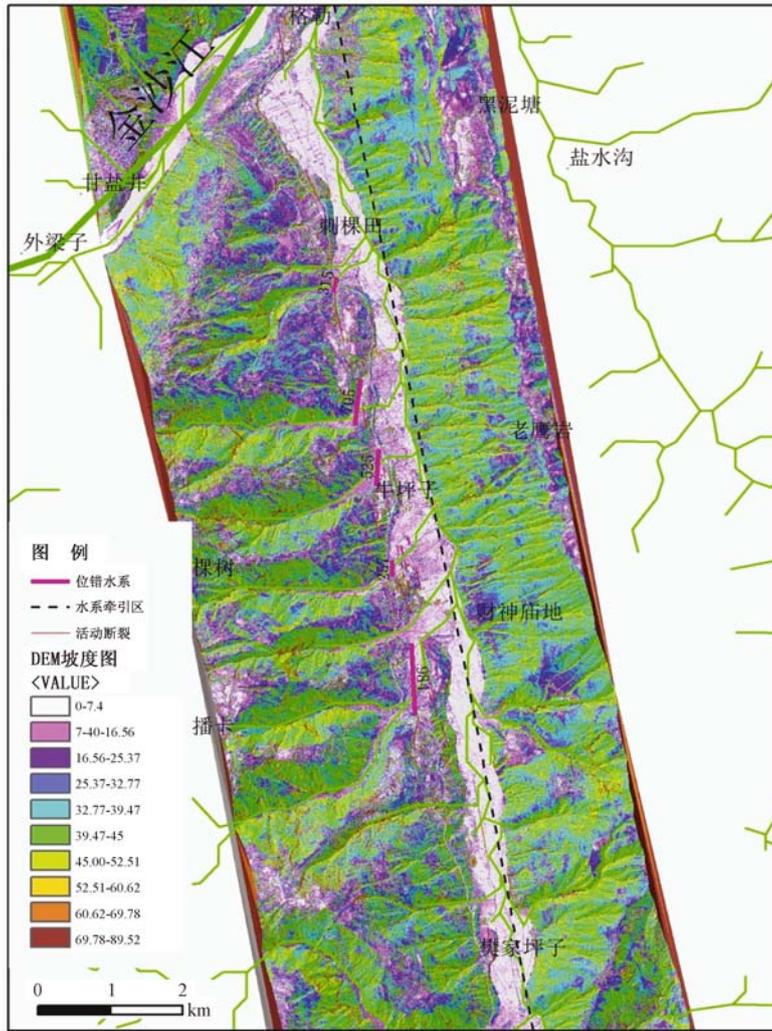


图9 小江断裂在新田坝—格勒之间形成的水系位移

Fig.9 Drainage displacement formed by Xiaojiang fault between Xintinba and Gele

3 地质灾害的解译

激光具有穿透植被的能力和多次回波的特点, 能获取更多的地形和植被信息, 在原理和方法上具备识别滑坡微地貌的条件。具体表现在: LiDAR 派生的 DEM 可对边坡整体变化的相关特征 (斜坡凹陷和突变) 进行识别; 结合 LiDAR 派生的详细 DEM, 随着地面粗糙度的增加, 可以识别一些地表特征 (如内部结构变形、裂隙、张裂缝和滑痕等)^[13]。

小江地区地质灾害以泥石流的发育为特征, 有著名的世界第一的蒋家沟泥石流。小江泥石流属于暴雨型, 每当雨季频频暴发, 堵塞江水、吞噬农田、破坏村舍、中断交通、影响工矿生产, 并威胁着东川市的安全。小江泥石流的形成有其特定的环境条件, 主要是有利的气候、地形和地质因素, 人类不合理的生产活动亦起到一定的作用。其中的地质因素主要与小江活动断裂活动、较陡的地形地貌和小江地区岩性有关。此外, 滑坡也是小江地区重要的地质灾害之一。

应用数字地形的晕渲图 (Hill-Shading Map) 和坡度图 (Slope Map) 可研究小江地区地质灾害, 圈定可能发生泥石流、滑坡、岩崩的地区, 并估算其分布的面积或体积 (见图 10)。

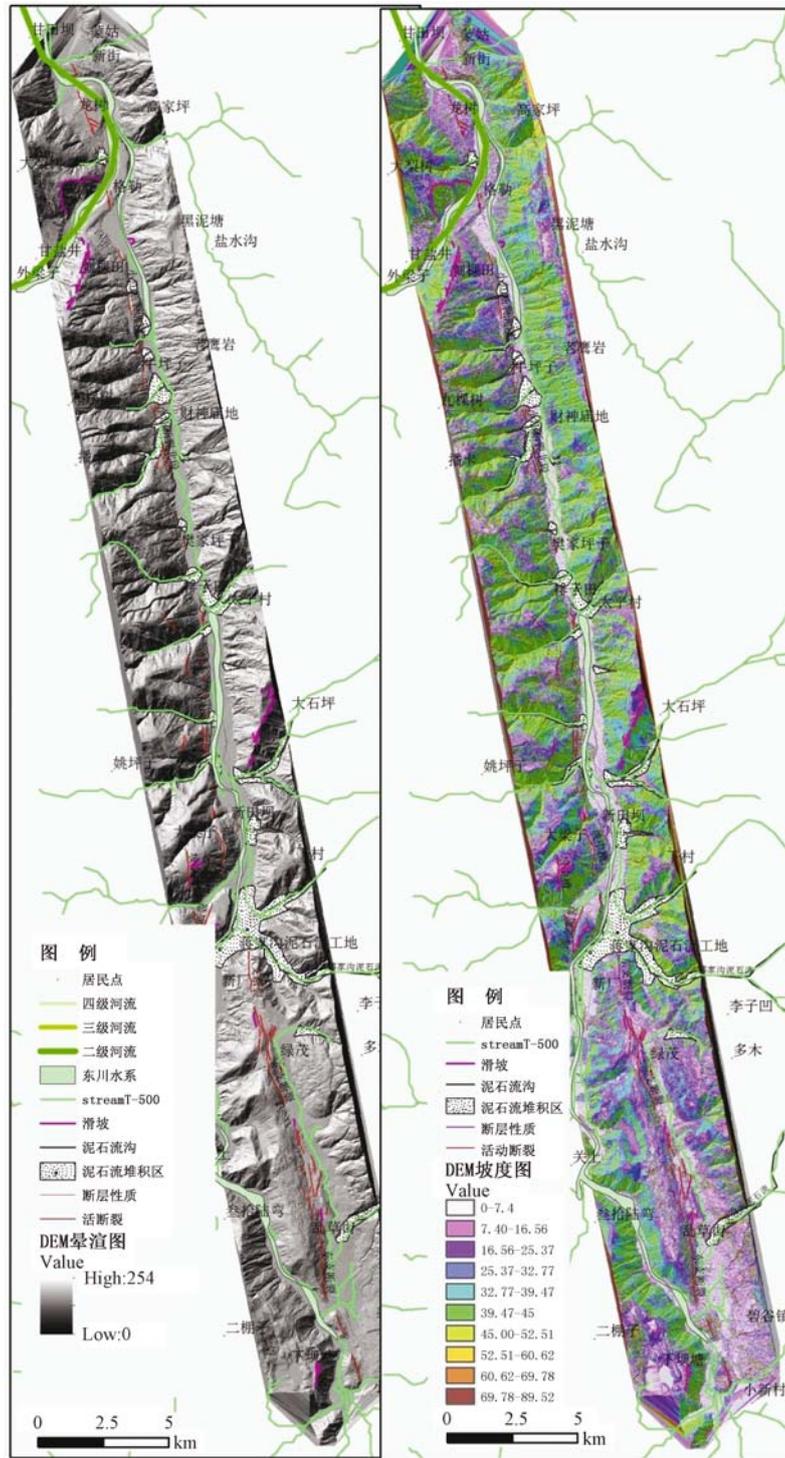


图 10 云南东川小江地区滑坡、泥石流和活动断裂分布

Fig. 10 Landslide, debris flow and active faults distribution in Dongchuan area, Yunnan Province

用 DEM 晕渲图和地形坡度图可以大致确定灾害的分布范围。小江流域数字地形资料表明, 小江两岸的地形坡度在 7° — 89° 不等, 最容易发生岩崩、滑坡的地形坡度范围在 30° — 45° 之间, 若有其他因素 (如地震等) 影响下, 极容易发生岩崩、滑坡。

从高精度 DEM 和 DSM 数字地形获得晕渲图和地形坡度图 (见图 10) 可以看出, 小江两岸地区的地形坡度在 30° 以上, 小江主要支流地形坡降大, 加之两岸较陡的地形和松散的岩性为泥石流提供物源, 这些支流形成泥石流沟具备了条件。

3.1 泥石流

在小江流域发生泥石流地区圈定了 20 条泥石流沟和泥石流堆积体, 其中的蒋家沟泥石流 (见图 11) 规模最大, 是世界第一的泥石流。蒋家沟泥石流沟在飞行区的长度为 6 km, 但还有部分未在工作区内, 其总长度超过 15 km, 泥石流冲积区域在 4.5 km^2 以上, 这是由于发育的变质岩的岩性、地形坡度以及天气决定。

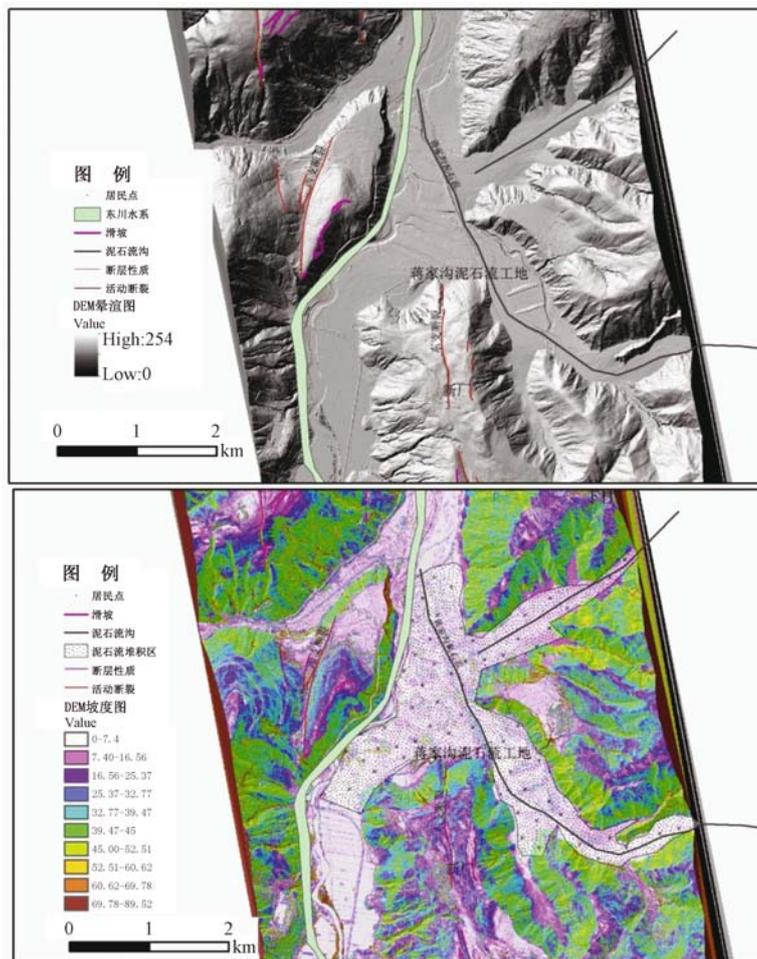


图 11 小江地区蒋家沟泥石流沟分布图

Fig. 11 Distribution of Jiangjiagou gully debris in Xiaojing region

3.2 滑坡

在 DEM 晕渲图和地形坡度图上可圈定滑坡 (见图 12)。其中在金沙江边发育一个较大的滑坡, 面积约 1.5 km^2 , 该滑坡可能对金沙江造成堰塞, 但其形成的时间不清楚。

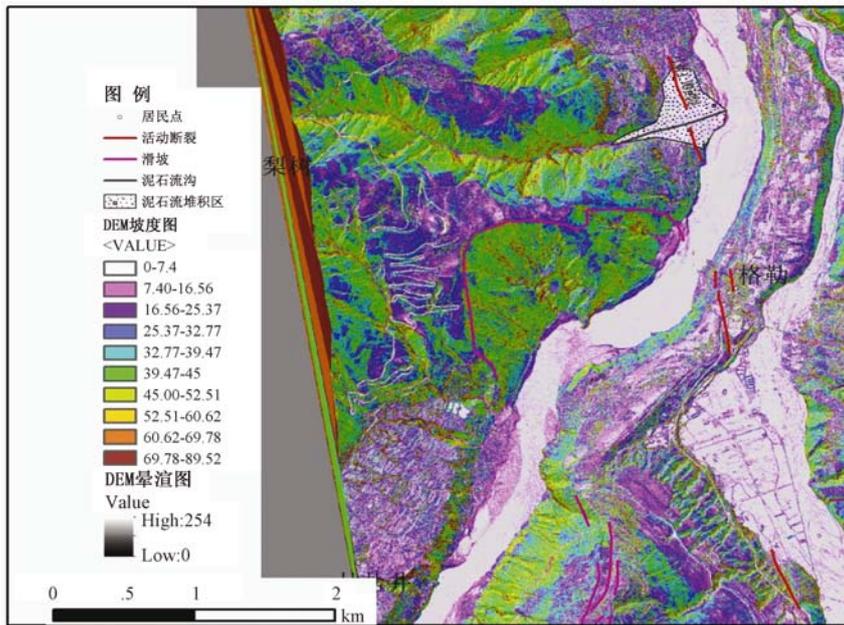


图 12 金沙江和小江交汇处主要泥石流沟及滑坡分布图

Fig. 12 Distribution of main flow gully and landslide between Jinshajiang interchange Xiaojing

4 结论

机载 LiDAR 技术是 21 世纪以来迅速发展并投入应用的对地观测系统,可直接获取高精度的植被下部、地面与地表物体的三维坐标,从而构建真实的裸地表形态,为与地貌相关的地学现象和地学过程研究提供基础数据。利用机载 LiDAR 技术获得的高精度、高分辨率 DEM 数据,可为研究和理解活动构造相关构造地质情况、地貌和最新的形变历史提供更精确的基础数据,在地学方面应用潜力巨大。

致谢 中国国土资源航空物探遥感中心陈洁、肖春蕾等为机载 LiDAR 数据获取做了大量工作,台北科技大学张国桢教授和台湾大学陈柔妃教授为机载 LiDAR 数据处理提供了帮助,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] Arrowsmith J R, Zielke O. Tectonic geomorphology of the San Andreas fault zone from high resolution topography: An example from the Cholame segment [J]. *Geomorphology*, 2009, 113 (1/2): 70~81.
- [2] 马洪超. 激光雷达测量技术在地学中的若干应用 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2011, 36 (2): 347~354.
MA Hong-chao. Review on applications of LiDAR mapping technology to geoscience [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geoscience*, 2011, 36 (2): 347~354.
- [3] 刘静, 陈涛, 张培震, 等. 机载激光雷达扫描揭示海原断裂带微地貌的精细结构 [J]. *科学通报*, 2013, 58 (1): 41~45.
LIU Jing, CHEN Tao, ZHANG Pei-zhen, et al. Illuminating the active Haiyuan fault, China by Airborne Light Detection and Ranging [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58 (1): 41~45.
- [4] 任治坤, 陈涛, 张会平, 等. LiDAR 技术在活动构造研究中的应用 [J]. *地质学报*, 2014, 88 (6): 1196~1207.
REN Zhi-kun, CHEN Tao, ZHANG Hui-ping, et al. LiDAR survey in active tectonics studies: An introduction and

- overview [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88 (6): 1196 ~ 1207.
- [5] 魏占玉, 何宏林, 高伟, 等. 基于LiDAR数据开展活动断层填图的实验研究——以新疆独山子背斜-逆冲断裂带为例 [J]. *地震地质*, 2014, 36 (3): 794 ~ 813.
WEI Zhan-yu, HE Hong-lin, GAO Wei, et al. Experimental study on geologic mapping of active tectonics based on LiDAR data: A case of Dushanzi anticline-reverse fault zone in XinJiang [J]. *Seismology and Geology*, 2014, 36 (3): 794 ~ 813.
- [6] 郑文俊, 雷启云, 杜鹏, 等. 激光雷达 (LiDAR): 获取高精度古地震探槽信息的一种新技术 [J]. *地震地质*, 2015, 37 (1): 232 ~ 241.
ZHENG Wen-jun, LEI Qi-yun, DU Peng, et al. 3-D laser scanner (LiDAR): A new technology for acquiring high precision palaeoearthquake trench information [J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37 (1): 232 ~ 241.
- [7] 肖春蕾, 郭兆成, 郑雄伟, 等. 机载LiDAR技术在地质调查领域中的几个典型应用 [J]. *国土资源遥感*, 2016, 28 (1): 136 ~ 143.
XIAO C Lhun-lei, GUO Zhao-cheng, ZHENG Xiong-wei, et al. Typical applications of airborne LiDAR technique in geological investigation [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016, 28 (1): 136 ~ 143.
- [8] 李占飞, 刘静, 邵延秀, 等. 基于LiDAR的海原断裂松山段断错地貌分析与古地震探槽选址实例 [J]. *地质通报*, 2016, 35 (1): 104 ~ 116.
LI Zhan-fei, LIU Jing, SHAO Yan-xiu, et al. Tecto-geomorphic analysis and selection of trench sites along Haiyuan fault in Songshan site based on high-resolution airborne LiDAR data [J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35 (1): 104 ~ 116.
- [9] 马晓雪, 吴中海, 李家存. LiDAR技术在地质环境中的主要应用与展望 [J]. *地质力学学报*, 2016, 22 (1): 93 ~ 103.
MA Xiao-xue, WU Zhong-hai, LI Jia-cun. LiDAR Technology and its application and prospect in geological environment [J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22 (1): 93 ~ 103.
- [10] Arrowsmith J R, Zielke O. 通过高分辨率地形数据解析圣安德烈斯断层带的构造地貌: 以乔莱姆段为例 [J]. *世界地震译丛*, 2011, (5): 64 ~ 80.
Arrowsmith J R, Zielke O. Tectonic geomorphology of the San Andreas Fault zone from high resolution topography: An example from the Cholame segment [J]. *Transland World Seismology*, 2011, (5): 64 ~ 80.
- [11] 朱成男, 滕德贞, 段加乐, 等. 云南巧家段金沙江断错河谷 [J]. *科学通报*, 1984, 24: 1520 ~ 1523.
ZHU Cheng-nan, QI De-zhen, DUAN Jia-le, et al. Qiaojia section of Jinsha River in Yunnan dislocation river valley [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1984, 24: 1520 ~ 1523.
- [12] Wang E, Burchiel B C, Royden L H, et al. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang, Red River, and Dali fault system of southwestern Sichuan and central Yunnan, China [C] //Special Paper of Geological Society of American 327. 1998: 1 ~ 108.
- [13] 李显巨. 基于LiDAR技术的复杂地质环境区滑坡识别研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
LI Xian-ju. Research of the landslide recognition based on LiDAR technology in the complex geological environmental area [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.

APPLICATION OF HIGH RESOLUTION AIRBORNE LIDAR IN XIAOJIANG ACTIVE TECTONICS AND GEOLOGICAL DISASTER STUDY

LIU Yu-ping, LIANG Hong, CHENG Fi-fi
(Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: By processing airborne LiDAR flight data of Jinsha River and Xiaojiang, we obtained high precision Digital Elevation Model (DEM) and Digital Surface Model (DSM). Using the digital terrain in geological structure interpretation, we may determine the distribution of active faults and the characteristics of tectonic geomorphology, delineating the range of the landslide and debris flow in Jinsha River and Xiaojiang, also estimating the area and volume of the landslide and debris flow. High precision airborne LiDAR data provides reliable information for such geological disaster warning.

Key words: LiDAR; DEM; Xiaojiang fracture; active faults; debris flow