

韩娜娜, 单新建, 宋小刚. 2017. 高空间分辨率数字高程模型测量技术及其在活断层研究中的应用. 地震学报, 39(3): 436-450. doi:10.11939/jass.2017.03.013.

Han N N, Shan X J, Song X G. 2017. VHR DEM measurement technology and its application in active fault research. *Acta Seismologica Sinica*, 39(3): 436-450. doi:10.11939/jass.2017.03.013.

综 述

高空间分辨率数字高程模型测量技术 及其在活断层研究中的应用^{*}

韩娜娜^{1,2)} 单新建^{2),*} 宋小刚²⁾

1) 中国山东青岛 266580 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院

2) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室

摘要 首先分析了获取数字高程模型(DEM)的高分遥感立体测量、合成孔径雷达干涉测量技术、激光雷达测距技术和运动重建技术等技术手段, 以及现阶段高空间分辨率数字高程模型(VHR DEM)提取技术的主要特点, 实际应用中需根据研究区地形地貌特点选择合适的VHR DEM获取技术; 然后, 结合最新研究成果着重阐述了VHR DEM在活断层识别及几何结构分析、同震位移与累积位移获取和古地震研究等领域的最新应用; 最后指出, VHR DEM由于其高精度、高空间分辨率的特点, 正逐步改变传统活断层的研究方法, 使得对活断层的研究进入到了前所未有的精细化水平.

关键词 DEM 获取技术 VHR DEM 获取 活断层

doi:10.11939/jass.2017.03.013 中图分类号: P315.2 文献标志码: A

VHR DEM measurement technology and its application in active fault research

Han Nana^{1,2)} Shan Xinjian^{2),*} Song Xiaogang²⁾

1) School of Geoscience, China University of Petroleum (East China),
Shandong Qingdao 266580, China

2) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology,
China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract: Firstly, we analyzed several technologies by which to obtain DEM (digital elevation model), including the high resolution remote sensing stereo measurement, InSAR (interferometric synthetic aperture radar), LiDAR (light detection and ranging) and SfM (structure form motion), and their characteristics to extract VHR DEM (very high resolution digital elevation model). In

* 基金项目 中国地震局地质研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项(IGCEA1505)和国家自然科学基金国际(地区)合作项目(41461164002)共同资助.

收稿日期 2016-06-17 收到初稿, 2016-09-20 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: xjshan@163.com



practical application, we should consider the terrain features of the study area and choose reasonable technology to extract VHR DEM. Then, combining with the latest research results, we summarized the applications of VHR DEM in active faults identification and geometric structure analysis, co-seismic displacement and cumulative displacement as well as paleoearthquake research. VHR DEM has brought the active fault research into the unprecedented fine level with its sub-meter spatial resolution and high accuracy.

Key words: DEM acquisition technology; VHR DEM extraction; active fault

引言

数字高程模型(digital elevation modal)的概念于 20 世纪 60 年代被提出, 它是伴随着计算机科学、传感器和图像处理等技术发展起来的, 例如我国研究人员陈述彭、王之卓、廖克、刘岳等于 20 世纪 70 年代末利用计算机辅助制图建立了 DEM 网格(汤国安, 2014). 20 世纪七八十年代, 由于摄影测量仍处于解析摄影测量阶段, 因此航空摄影测量成为当时获取 DEM 最成熟的手段, 也是在此阶段, 各国提出了相应的卫星对地观测计划并发射卫星, 例如美国的锁眼侦查卫星和俄罗斯的“宇宙”号系列卫星. 80 年代以后, 法国和印度分别发射了 SPOT 系列卫星和 IRS 系列卫星, 开启了商用卫星的发展. 日本 1999 年发射的 IKONOS 被认为是第一颗高分辨率的商业卫星, 其全色分辨率优于 1 m, 自此之后, 高分遥感立体测量技术逐渐发展成熟起来(孙刚, 2007). 在卫星测量发展成熟阶段, 一种新的地形测量技术, 即激光雷达测距(light detection and ranging, 简写为 LiDAR)技术悄然兴起, 成为目前精度最高的高空间分辨率数字高程模型(very high resolution digital elevation model, 简写为 VHR DEM)提取技术.

DEM 是地表形态的数字化表达, 蕴含着丰富的地学应用分析所必需的地形地貌信息(汤国安等, 2010). 2000 年, 美国“奋进”号航天飞机完成了全球 DEM 的建立, 并免费开放了空间分辨率为 90 m 的数据, 极大地促进了宏观地形地貌和地震活动等研究. 在构造地貌学领域, 大区域的宏观地貌定量化研究已普遍开展(张会平等, 2004, 2006; 刘静等, 2006; 洪顺英等, 2007; 胡艺, 2008; 高明星, 刘少峰, 2008; 赵洪壮等, 2009; 程三友等, 2010); 在地震滑坡研究中, 许多研究人员利用 DEM 提取高程、坡度和坡向等重要信息(陈晓利等, 2010, 2013; 许冲等, 2010; 王进等, 2012; Niethammer *et al*, 2012; 王志恒等, 2014; 庾露等, 2014; 刘甲美等, 2015; 宿星等, 2017). 近 10 年来, 高分遥感立体测量技术、LiDAR 技术以及新兴的数字摄影测量技术已成为获取 DEM 的主要手段, 所提取 DEM 的空间分辨率达到米级, 甚至亚米级, 从而使 DEM 达到高空间分辨率水平, 即 VHR DEM. 因此刘静等(2013)提出了基于 VHR DEM 的微地形地貌的研究方向. 由于地震往往发生在活断层上, 并形成一系列特殊的地震地貌(杨景春, 李有利, 2011), 因此, VHR DEM 被快速地应用于地震活断层研究领域. 本文参考国内外最新的研究成果, 简要介绍了 VHR DEM 的获取技术, 总结了 VHR DEM 在地震活断层研究中的应用现状, 并重点分析了其在活断层识别与几何结构分析、同震位移与累积位移获取及古地震研究等方面的发展.

断层的长期和突发活动是对地表形态的再塑造, 将 DEM 作为基础研究数据是必然的,

同时,断层活动造成的地表变形使原始DEM失去了时效性,而有效的DEM数据在抗震救灾和灾后重建等方面至关重要。以上特性决定了DEM在活断层研究中的重要地位,而VHR DEM是地学研究能否达到新的理论水平的关键,DEM的时效性特点也要求DEM获取需从定期转变为动态,这同时也对DEM的构建和分析理论提出了挑战。

1 VHR DEM 获取技术

DEM的概念自Miller于1958年提出(Miller, Laflamme, 1958)后发展至今,已成为地学研究赖以进行的核心数据。DEM根据空间分辨率基本可以分为低(百米)、中(几十米)、高(米、亚米)3个水平。高空间分辨率DEM,即本文所述的VHR DEM,具有高精度、米级至亚米级空间分辨率的特点。VHR DEM提取技术众多,各有其特点和应用范围。本文就现阶段常用的VHR DEM提取技术作简要介绍和比较。

1.1 高分遥感立体测量

立体测量是遥感卫星技术中一个重要的发展和应用方向。从广义上讲,具备立体测图或者高程测量能力的卫星均称为测绘卫星;从狭义上说,目前一般把从不同视角获取同一地区影像的光学遥感卫星称为测绘卫星(唐新明等,2012)。现阶段,具有立体测图能力的高分光学遥感卫星越来越多,表1列出了部分高分测绘卫星的发射情况。

表1 高分测绘卫星参数

Table 1 Parameters of high resolution optical remote sensing mapping satellites

遥感卫星名称	发射年份	地面分辨率/m		重访周期/d	幅宽/km	平面精度/m		高程精度/m	
		全色	多光谱			无控制	有控制	无控制	有控制
美国 IKONOS-2	1999	1	4	3	11	12	2	10	3
法国 SPOT-5	2002	2.5/5/10	10	3	60	—	10	10	5
美国 Orbview-3	2003	1	4	3	8	11	—	16	—
美国 Worldview-1	2007	0.41	8	1.7	17.6	7.6	2	—	—
美国 GeoEye-1	2008	0.5/0.41	1.64	3	15.2	4	2	6	3
美国 Worldview-2	2009	0.46	1.84	1	16.4	4	2	3	2
法国 Pleiades	2011	0.5	2	1	20	—	—	1	0.5
法国 SPOT-6	2012	1.5	6	3	60	—	—	—	—
中国资源三号	2012	3.5/2.1/3.7	5.8	5	50	6	1.6	8	1.6
美国 Worldview-3	2014	0.31	1.24	4.5	13.1	2.16	—	1.61	0.62

注:表中各卫星获取DEM的精度仅供参考,因为不同研究人员在进行精度评价时其影像覆盖区域的地形不同,数据处理过程也有差异。表中参数引自Deilami和Hashim(2011),潘红播等(2013),朱红等(2014),兰穹穹等(2015),Jacobsen和Topan(2015)以及Hu等(2016)。

从表1中可以看出,几乎每年都有高分测绘卫星升空。民用测绘卫星的空间分辨率已提高至0.31 m,测图精度可以满足1:5000地形图的要求。卫星重访周期均低于5天,Worldview-2和Pleiades的重访周期甚至可达1天。另外,立体测量过程中加入地面控制点可以有效提高测量精度,而近几年发射的高分卫星的无控测量精度已与最初发射的高分卫星有控测量精度相当,如Worldview-3的平面无控测量精度达到了IKONOS-2的平面有控测量精度。无地面控制点条件下的几何定位精度是评价测绘卫星性能的重要指标(唐新

明等, 2012). 所以现阶段高分光学遥感立体测量的发展趋势是: 高空间分辨率、短重访周期卫星的研发, 精密传感器的设计以及卫星轨道和姿态的精密测定, 提高无地面控制点测量的精度。

雷达卫星是另一种重要的对地观测卫星。利用合成孔径雷达干涉(interferometric synthetic aperture radar, 简写为 InSAR)测量技术提取 DEM 的构想是 Rogers 和 Ingalls (1969)提出的。Graham (1974)首次基于机载雷达制作了 InSAR 地形图, Goldstein 等 (1988)又将这项技术应用到星载雷达, 从而大大拓宽了 InSAR 的应用范围。2000 年, 美国“奋进”号航天飞机执行雷达地形测绘使命(Shuttle Radar Topography Mission, 简写为 SRTM)并获取了全球数字高程模型, 随后便面向全球开放了空间分辨率为 90 m 的 SRTM DEM, 该数据被广泛地应用于宏观地形地貌的研究; 2009 年, 美国航天局与日本经济产业省基于 Terra 卫星拍摄的 130 万个立体图像合作推出了先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型(advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model, 简写为 ASTER GDEM), 其空间分辨率达 30 m; 2010 年, 德国航空航天中心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 简写为 DLR)发射了 TanDEM-X 雷达卫星, 与之前发射的 TeraSAR-X 卫星组成了双星 SAR 系统, 构建推出了空间分辨率为 12 m 的 DLR DEM。InSAR DEM 的高程精度, 在平坦地区约为 2 m, 在地形起伏较大区域约为 5 m(许才军等, 2015), InSAR DEM 提取精度除了受地形因素影响外, 还受大气、失相干等因素的影响。从目前发展来看, InSAR 提取 VHR DEM 的发展方向是: 高分 SAR 卫星的研发和多源数据融合算法的研究(Bhardwaj *et al*, 2013; Jiang *et al*, 2014; 杜亚男等, 2015)。

1.2 机载 LiDAR 技术

LiDAR 技术出现于 1970 年(Kaula *et al*, 1974)。20 世纪八九十年代, 大多数研究主要集中于激光测高传感器的研制, 而全球定位系统(global positioning system, 简写为 GPS)和惯性导航系统(inertial navigation system, 简写为 INS)的出现彻底解决了机载 LiDAR 的定位和姿态测量问题(刘经南, 张小红, 2003)。1988 年德国斯图加特大学利用 GPS 接收机、INS 及激光扫描仪组成地形断面测量系统, 被视为现代机载 LiDAR 系统的原型(Ackermann, 1999)。中国科学院和武汉大学最早开始自主研制我国机载 LiDAR 系统(李清泉等, 2000; 李树楷等, 2000)。目前, 机载 LiDAR 系统的硬件和软件由各大生产厂商提供, 如 Leica, Trimble 公司, 其扫描频率高达 250 kHz, 精度为厘米级, 点云密度达到 20—50 个/m², 可直接生成高精度的 DEM 数据(陈涛, 2014)。未来机载 LiDAR 在 DEM 提取方面的发展趋势是: 多源数据的融合处理, 例如融合影像数据、多光谱数据、地面已知 GIS 数据等; 点云滤波和分类算法的研究, 需注意的是, 该方法目前在高山和峡谷等地带容易出现分类错误(张小红, 刘经南, 2004; 周晓明, 2011)。

与传统遥感手段相比, 机载 LiDAR 的主要技术优势为(Baltsavias, 1999; 马洪超, 2011): 激光雷达能部分穿透植被, 获得真实的地表高程信息, 利用高密度点云生成高精度 DEM; 受天气影响比光学遥感卫星测量要小; 可在地震、火山等自然灾害情况下快速开展应急。面临的主要问题是开展 LiDAR 扫描工作的成本太高, 在高山、峡谷等坡度较陡地区, 实现点云滤波处理困难较大。

1.3 SfM 技术

运动重建(structure from motion, 简写为 SfM)技术不是一种严格意义上的数字摄影测量技术, 在地形地貌研究上的运用是近几年才发展起来的。摄影测量技术的发展经历了模拟摄影测量、解析摄影测量和数字摄影测量。模拟摄影测量已经基本淘汰(张祖勋, 2007)。解析摄影测量有专门的解析测图仪, 但现阶段已很少使用解析测图仪进行 DEM 提取, 而是使用在普通计算机上运行的专业软件, 如 EREAS, 完成 DEM 的解析计算。数字摄影测量是目前研究的热点, 主要有两个研究方向: 一是数据采集端, 二是数据后处理系统(刘先林等, 2007), 基于 SfM 的新型摄影测量技术就是在后者上发展起来的。SfM 开发的初衷是为了自动生成来自无序图像集合的 3D 模型(Brown, Lowe, 2005), 与摄影测量计算像点点位的目的相同。该技术在运用于地表模型恢复之前, 已经开发了众多的成熟软件, 例如 Agisoft Photoscan, Buner Photogrammetry Package, PhotoModeler 等。近几年, 一些研究人员利用航空摄影测量平台拍摄了大量航片, 使用 SfM 处理软件得到地表的点云数据(James, Robson, 2012; Westoby *et al*, 2012)。由于得到的点云数据是在任意坐标系下, 因此需要结合地面控制点将其转化至地理坐标系下。Westoby 等(2012)在陡峭的沿海山坡、冰川碛和基岩山脊处拍摄了大量照片, 并利用 SfM 技术构建了地面模型, 该模型与 LiDAR DEM 的残差小于 0.5 m。James 和 Robson(2012)也用近距离(20 m)拍摄的地面照片, 制作了 7 个时间序列的 SfM 模型, 与 LiDAR DEM 的残差仅几厘米。以上实验研究表明, 使用 SfM 技术构建的 VHR DEM 具有很高的精度; 但 SfM 技术与 LiDAR 技术一样, 均需对地面点云数据作后处理, 不同的是 SfM 生成的点云数据除了具有位置属性外, 还具有色彩属性(RGB 值)(Fonstad *et al*, 2013; Johnson *et al*, 2014)。

以上技术在提取 VHR DEM 时各有其优势。从研究的空间尺度上来看: LiDAR 和 SfM 均可实施地面测量, 通过将其搭载于航空器(飞机、氢气球)上, 对地面物体进行三维提取, 建立某一区域的地面模型; 而高分遥感卫星的覆盖范围更广, 系统更加稳定可靠, 可以完成大范围的地形测绘任务。从对地表观测的精度上来看: LiDAR 可以获得更真实的地形, 这是其它技术无法比拟的, 其生成的 VHR DEM 精度最高, 常用其评价其它技术提取的 DEM 的精度; SfM 技术是一种广义上的摄影测量技术, 比大多数测绘卫星的立体测量精度要高。从资金成本上来看: LiDAR 的成本最高, SfM 比 LiDAR 低得多, 在能够满足精度要求的情况下, 建议优先选择高分遥感立体测量技术。

VHR DEM 主要是对微地形地貌的表达, 因此对 DEM 的精度要求很高。所以, LiDAR 技术在地震活断层的研究中发展得最快、应用得最广, 由此产生的关于活断层的新研究方法开拓了其它技术的应用方向。SfM 技术是近几年才被应用于地学研究, 因此研究成果少, 但发展潜力大。随着近几年民用高分遥感卫星的发射, 开始有研究者使用高分立体像对提取高精度的 VHR DEM, 并将其应用于活断层研究。在开展活断层研究时, 应以研究内容为主, 根据研究区地形地貌特点选择合适的测量技术。

2 VHR DEM 在活断层研究中的应用

活断层的研究手段主要包括传统的野外调查、航片卫片解译、GPS、InSAR 空间对地观测以及数值模拟等。技术手段的变革深刻地影响着不同学科对活断层的研究方式, VHR DEM 极高的空间分辨率使我们从形态特征、运动学特征等方面对断层有了更深刻的认识。

下文将主要基于相关研究者的最新成果和前人的总结(马洪超, 2011; Meigs, 2013; 任治坤等, 2014), 从活断层识别及几何结构分析、同震位移与累积位移及古地震等方面论述VHR DEM 在活断层研究中的独到优势及其所带来的变革.

2.1 活断层识别及几何结构分析

断层位置的准确识别和提取是活断层研究的基础, 亦是评价和研究断层体系的关键. 最初将 LiDAR 技术运用到断层研究中源于一次偶然的发现, 1997 年美国地质学家在利用 LiDAR 扫描地形的过程中发现了一个高达 5 m 的断裂陡坎, 陡坎周围森林密布, 此前的野外调查和航空解译均未发现此陡坎. 相关研究者敏锐地洞察到了这一技术优势(Haugerud *et al*, 2003), 随后利用 LiDAR 技术的大型断裂带精细扫描项目陆续开展, 例如美国 B4 项目对圣安德烈斯断裂南段和圣哈辛托断裂的扫描(Bevis *et al*, 2005), 该项目的开展对活断层研究产生了深远的影响(Arrowsmith, Zielke, 2009; Zielke *et al*, 2010, 2012; Zielke, Arrowsmith, 2012). 我国自汶川地震后开始应用该技术进行相关研究(李峰等, 2008; 马洪超等, 2008; 袁小祥等, 2012), 并在 2011 年对海原断裂带开展大范围机载 LiDAR 扫描, 获得丰硕成果(刘静等, 2013; Chen *et al*, 2014; 李占飞等, 2016).

在植被覆盖茂密的山区和城市地区, 断层填图一直是难点. 另外, 一些破坏性大的地震常常发生在研究较少的分支断层或未识别断层上, 而我们对这些断层却知之甚少, 一个重要的原因就是断层信息难于获取. 多位学者先后在研究过程中分析比较了 VHR DEM 在活断层识别中的优势. Lin 等(2013)通过对比分析分辨率为 10 m, 2 m, 0.5 m, 0.25 m 的 DEM 数据, 认为 0.5 m 的 DEM 更适于识别微小构造断裂, 结合赤色图(red relief image map, 简写为 RRIM)可视化方法, 可识别出许多茂密植被覆盖下的微小陡坎(Chiba *et al* 2007, 2008). Arrowsmith 和 Zielke(2009)采集 LiDAR 点云数据, 利用反距离加权法对点云数据进行插值运算, 制作分辨率为 0.25 m 和 0.5 m 的 DEM, 仅依靠此 VHR DEM 进行了圣安德烈斯断裂局部活断层的构造地貌填图, 并与航片和野外观测相结合的经典断层提取方法相比较, 发现两者精度基本一致. 魏占玉等(2014)也进行了相似研究, 其结果表明 LiDAR DEM 在宏观上足以获得与航片解译和野外调查一致的断裂分布特征, 但在微观上具有更高的精细度. Johnson 等(2014)首次利用 SfM 低空摄影测量绘制了断裂带地形, 拍摄了几百张研究区照片, 生成每平米 500 点以上的点云数据, SfM DEM 分辨率达厘米级. 与 LiDAR DEM 相比, SfM DEM 分辨率更高, 且能更清晰地展示微小陡坎等断错地貌. 以上相关实验研究表明, VHR DEM 数据在断层识别中充分体现了其高空间分辨率的优势, 可以准确识别、测量几十厘米的微小陡坎、断错冲沟和冲积扇等地貌(Nissen *et al*, 2014; Scharer *et al*, 2014), 便于补充完善早期断裂地质图, 另外可在研究人员难以到达的地区提取断层, 极大地减少野外工作.

研究活断层与地震的关系, 除了需要准确识别断层位置外, 更重要的是获取断层的长度、走向、倾向、倾角、组合形式等几何要素, 例如较大断层之间的阶区分布和断层本身弯曲变化往往抑制地表破裂的传播(Elliott, 2014). 活断层的几何结构关系到地震灾害的破坏程度, 也是地震预测研究的重要内容. 目前常用的研究方法有构造地质法、地震剖面及数值模拟推断法等, VHR DEM 在断层几何结构分析方面的应用将是重要的发展方向之一, 但现阶段该方面的研究成果比较少. Zhou 等(2016)利用高分立体像对提取的 VHR DEM 计算了 2013 年 9 月 24 日巴基斯坦 $M_w 7.7$ 地震发震断层的倾角. 他们假设研究区断

层面为平面且破裂面穿透地表, 建立如式(1)所示的断层面模型, 即

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (1)$$

式中, A, B, C, D 为平面参数, x, y, z 为破裂面与地面交线上的点, 则断层倾角的计算公式为

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \quad (2)$$

计算结果显示 Hoshab 断层西部端点处的倾向发生了变化, 进一步通过遥感解译发现断层在此处分成东、西两部分, 存在抑制地表破裂发育的阶区, 而在此前的研究中均未发现该阶区。需要注意的是, Zhou 等(2016)的模型计算的是地表处的断层面倾角, 即破裂面穿透地面的有限部分。

2.2 同震位移与累积位移

理论上数字高程模型可以直接捕捉地表形变信息, 但中等分辨率的 DEM 精度较低, 即使在较大的地震中也难以发挥作用。随着 VHR DEM 数据的使用, 获取微小地表形变成可能。此外, 基于 VHR DEM 还可以获得垂直方向上的位移。利用 VHR DEM 获取同震位移的方法大致有两种: 断错地貌标志法和 DEM 差分法, 其中传统的断错地貌标志法虽然只需震后 DEM 数据, 但需研究人员主观识别断错山脊、冲沟、阶地等(Arrowsmith, Zielke, 2009; Chen *et al.*, 2014), 而 DEM 差分需要地震前后的 DEM 数据, 数据处理过程自动化程度高且结果可靠, 但该方法对 DEM 数据的空间分辨率和精度要求较高。

Hudnut 等(2002)首次运用 LiDAR 技术获取了 1999 年 10 月 16 日加利福尼亚 $M_w 7.1$ 地震的同震位移。对发震断层进行全覆盖激光扫描, 提取断层两侧地形剖面并进行比较, 获得同震水平位移约为 4.2 m, 垂直位移约为 0.9 m, 与前人野外测量和 InSAR 观测结果相近, 从而证明了该方法的可行性和可靠性。Zielke 等(2010, 2012)及 Zielke 和 Arrowsmith (2010)对 1857 年 1 月 9 日圣安德烈斯断层上发生的 $M_w 7.9$ 地震基于 VHR DEM 开展同震位移研究, 在测量了大量的断错冲沟、洪积扇、阶地等后重新评定此次地震的同震水平位移约为 6 m, 而不是之前的野外测量结果(约 9 m), 由此对圣安德烈斯断层破裂模型提出了质疑。Zielke 和 Arrowsmith (2012)提出的位错测量原理及开发的 LaDiCaoz 软件, 得到了相关研究者的认同, 如 Chen 等(2014)基于该方法对海原断裂 1920 年 12 月 16 日 $M_w 8.3$ 地震哨马饮区段进行了研究。王朋涛等(2016)将数码相机搭载于无人机上, 对海原断裂上骟马沟及其西侧阶地断错地貌进行了图像采集, 将采集到的 106 幅照片利用 SfM 技术处理生成了 0.1 m 空间分辨率的 SfM DEM, 更加真实地反映了微地形地貌。魏占玉等(2015)在独山子逆断裂-背斜带的机载 LiDAR 测量过程中, 借助飞行平台用数码相机拍摄了大量照片, 分别生成了 SfM 和 LiDAR 点云, SfM 的点云密度为 25.5 个/ m^2 , 生成分辨率为 0.2 m 和 0.5 m 的 SfM DEM 均可以清楚地表示小冲沟, 而 LiDAR 的点云密度仅为 6.9 个/ m^2 , 生成的 0.5 m 分辨率的 LiDAR DEM 表示不出这些小冲沟, 并且 LiDAR 点云与 SfM 点云相比, 垂直偏差小于 0.1 m 的比例为 58.3%, 垂直偏差小于 0.2 m 的比例为 88.3%, 这说明 SfM DEM 的精度与 LiDAR DEM 相当。

Oskin 等(2012)对 2010 年 4 月 4 日 EI Mayor-Cucapah $M_w 7.2$ 地震前后的 LiDAR DEM 进行差分, 获取了该地震的近场形变。虽然该地震发生在多级断层组成的断裂带上, 构造背景十分复杂, 但 VHR DEM 差分图清晰、直观地显示了 120 km 长的地表破裂带,

与三维弹性模型的模拟结果吻合。Zhou 等(2015a)首次评定了 Pleiades-1A/B 卫星提取的 VHR DEM 在获取 EI Mayor-Cucapah 地震同震垂直位移中的稳定性, 并从点云密度、地形坡度等方面评定了 VHR DEM 精度, 认为在坡度较小、植被稀疏、特征地物丰富的地区所提取的 VHR DEM 具有较高精度, 通过与震前 LiDAR DEM 差分获得同震水平位移, 且其结果与 Osokin 等(2012)所得结果相近。

此外, 构造地貌法常常根据断错的地貌标志来研究活断层的长期运动规律, 例如通过测量河流阶地的累积位移研究断层的第四纪活动速率。Cowgill(2007)及 Cowgill 等(2009)在此方面作了大量的研究, 但大多基于航片、卫片及野外观测。在 2010 年 1 月 12 日海地 $M_w 7.0$ 地震中, Cowgill 等(2012)基于震后快速获取的 LiDAR 数据, 提出了可交互的沉浸式虚拟现实技术在快速开展地震科学研究中的应用, LiDAR DEM 可通过 3D 形式再现断错地貌标志, 达到与野外观测相似的位错测量结果, 尤其是垂直位错。Zhou 等(2015b)在无野外观测的情况下, 利用 2013 年 9 月 24 日巴基斯坦 $M_w 7.7$ 地震后 Pleiades 立体像对提取了 VHR DEM, 并测量了大量断错的累积位移和同震位移, 之后分别计算位移比值 R , 即

$$R = \frac{L}{V}, \quad (3)$$

式中, L 为水平位移, V 为垂直位移。结果表明同震位移与累积位移其 R 值相似, 由此判断该断层的运动方式并未发生变化。由此可见, VHR DEM 给基于构造地貌法研究断层长期活动规律的传统方法带来了新的启示。

2.3 古地震

古地震研究对认识断层活动的时空规律及评价地震危险性均具有重要意义。古地震的研究方法非常广泛, 包括地貌标志法、地层分析法、树木年轮变异法等。确定断层的活动幅度、年代、次数、时间间隔和活动速率等是古地震研究的主要内容。例如利用断错地貌标志测定累积位移, 再结合相应的测年数据就可计算出断层的长期活动速率(Cowgill, 2007; 张培震等, 2008; Cowgill *et al.*, 2009)。

反映古地震的地质地貌现象常因被埋藏在地下而未受到侵蚀破坏, 所以开挖探槽是进行古地震研究的常用手段(杨景春, 李有利, 2011)。Haddad 等(2012)利用地基 LiDAR 扫描古地震探槽, 发现 LiDAR 技术比传统研究手段更具优势: 传统人工手绘作业需要大量的作业时间, 且易遗漏细节信息, 对探槽壁拍照后需要对几百张照片进行室内拼接, 不同拍摄角度和探槽壁粗糙度会加大拼接变形, 后期校正处理工作量大; 而 LiDAR 扫描的点云具有空间坐标, 能够完整地保存和记录探槽信息, 避免影像拼接造成的影响, 更可避免塌方等危险对工作人员的伤害(郑文俊等, 2015)。此外, 可将采集到的古地震探槽信息统一到同一地理框架下进行集成化管理。在无法开挖探槽的基岩地区, 依据保存较好的出露断层面形貌特征进行古地震识别已得到相关研究人员的关注(Giaccio *et al.*, 2003; Bubeck *et al.*, 2015)。何宏林等(2015)利用地基 LiDAR 扫描了霍山山前断裂的基岩断层面, 生成了分辨率为 2 mm 的断面 DEM, 精确地反映了断层面的粗糙程度, 进而判断断层面出露时间, 之后又基于分形理论计算断层面 2D 分维值并分析其在垂直方向上的变化, 最终识别出 3 次古地震事件。另外, 断层的垂直运动会造成河流的溯源侵蚀并形成河流裂点, 裂点的分布可以揭示古地震的活动特性。华丽思等(2011)同样以霍山山前断裂为试验区, 从立体像对中提取 DEM 数据, 获取横穿断裂的 23 条冲沟的地形剖面, 最终揭示了霍山山前断

裂的 3 次古地震事件，并确定强震重复周期为 1500—2600 年。可见，VHR DEM 除了在空间分辨率上具有无可比拟的优势外，获取方式的灵活性也使其获得了广泛的应用，给传统古地震研究带来了新的启示和研究策略。

3 讨论与结论

本文主要介绍了现阶段 VHR DEM 的提取技术，并结合最新研究成果概述了 VHR DEM 在活断层研究中的应用，得到如下主要结论：

1) 高分遥感立体测量、InSAR 技术、LiDAR 技术及 SfM 技术是现阶段获取 VHR DEM 的有效手段。机载 LiDAR 技术作为目前的研究热点，能够去除植被影响并获得真实的地面高程信息，高密度点云生成的 VHR DEM 精度高，因此对通过其它手段提取的 VHR DEM 进行精度评价时，常以 LiDAR DEM 为依据。机载 LiDAR 在地震活断层研究中的应用最广泛，最具发展前景，但高成本对其也有所制约；SfM 和高分遥感立体测量是近几年才被应用于地震活断层的研究，因此研究成果较少，但其成本比 LiDAR 要低得多，只是受天气、植被、地形等影响较大；InSAR 技术在获取 DEM 方面一直备受关注，尤其是 TeraSAR-X/TanDEM-X 双星系统的建成，将给全球高精度 DEM 的构建及应用研究带来更多突破。目前，高精度真实地面模型的建立主要依靠 LiDAR 技术和 InSAR 技术。

从发展前景来看：LiDAR 技术仍然保持着迅猛的发展速度，其数据后处理算法是重要的研究方向，系统运行成本的降低也是该领域研究人员所期望的；SfM 技术具有广阔的发展和应用空间，因其数据采集端基于航空摄影测量平台，所以系统构建比较容易，主要的发展方向仍在数据点云的后处理上；高分遥感立体测量基于卫星平台，覆盖范围广，系统运行稳定，高空间分辨率、高精度、短重访周期测绘卫星的研制和无控制点立体测量算法的研究是未来主要的发展方向。

2) VHR DEM 亚米级的高空间分辨率在活断层研究中已发挥了独到的优势，逐渐成为一种新的研究手段，使基于地形地貌的活断层研究真正从宏观尺度进入到精细化微观尺度。相关研究人员通过实验得出 VHR DEM 能精确地识别并测量微小陡坎、冲沟等断错地貌；在茂密植被覆盖下的山区、建筑物密集的城市地区，利用 LiDAR DEM 能准确地发现“盲断层”，可用于精细地质断层的填图工作，有利于深入理解活断层的几何学、运动学及动力学等特征；极大地减少无人区、地形复杂山区等地的野外观测工作，避免不必要的危险，提高工作效率。获取同震位移场是 VHR DEM 差分技术的一个新的应用方向，未来大量 VHR DEM 数据的采集将使 VHR DEM 差分技术在地震形变研究中得到广泛应用，但该技术主要受 VHR DEM 精度的影响。

高精度 VHR DEM 在活断层几何结构定量分析方面的应用可作为未来研究的重要方向。现阶段，基于构造地貌理论的活断层定量化研究，大多是从高精度数字高程模型上进行的“类实地测量”，需要经验丰富的地质工作者主观识别地貌标志，其实质是基于 VHR DEM 的人工精细测量及相关统计分析，VHR DEM 在这方面所体现的优势是前所未有的高空间分辨率、垂直方向测量和提供“大量”可供测量的断错地貌。随着 VHR DEM 提取技术和精度的提高，可进行适宜尺度的活断层自动识别和参数自动提取，如断层走向、倾向、倾角等，研究断层分级、组合形式等，当然这需要相关研究理论的支持和实验验证，虽然现阶段这方面的研究较少。地震形变方面的研究对数据质量要求较高，往往需要地震发生

前的VHR DEM数据,因此有必要开展大范围主要活动断裂带的VHR DEM数据采集工作,这不仅会推动相关科学的研究进步,更重要的是为地震等地质灾害应急和监测预报提供宝贵资料。现阶段,VHR DEM获取技术众多,部分已比较成熟,在实际应用时需综合考虑研究区本身的地形特点、数据处理的难度及精度,选择最有利的方法。VHR DEM不仅为活断层研究带来了新的启示和创新,也将在其它地球科学的研究中发挥重要作用。

参 考 文 献

- 华丽思,何宏林,徐岳仁,魏占玉,石峰.2011.基于高分辨率DEM的裂点序列提取和古地震序列的识别:以霍山山前断裂为实验区[J].*地震地质*,33(4):963-977.
- Bi L S, He H L, Xu Y R, Wei Z Y, Shi F. 2011. The extraction of knickpoint series based on the high resolution DEM data and the identification of paleo-earthquake series: A case study of the Huoshan MTS. piedmont fault[J]. *Seismology and Geology*, 33(4): 963-977 (in Chinese).
- 陈涛.2014.机载激光雷达技术在构造地貌定量研究中的应用[D].北京:中国地震局地质研究所:3-23.
- Chen T. 2014. *Application of Airborne LiDAR (Light Detection and Ranging) for Quantitative Tectonic Geomorphology*[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration: 3-23 (in Chinese).
- 陈晓利,周本刚,冉洪流,王明月.2010.汶川地震中擂鼓镇地区的滑坡崩塌规律及预测[J].*吉林大学学报:地球科学版*,40(6):1371-1379.
- Chen X L, Zhou B G, Ran H L, Wang M M. 2010. Analysis and prediction of the spatial distribution of landslides triggered by Wenchuan earthquakes in Leiguzhen region[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science*, 40 (6): 1371-1379 (in Chinese).
- 陈晓利,袁仁茂,庾露.2013. Newmark方法在芦山地震诱发滑坡分布预测研究中的应用[J].*地震地质*,35(3):661-670.
- Chen X L, Yuan R M, Yu L. 2013. Applying the Newmark's model to the assessment of earthquake-triggered landslides during the Lushan earthquake[J]. *Seismology and Geology*, 35(3): 661-670 (in Chinese).
- 程三友,李英杰,刘少峰.2010.基于DEM的大别山地区地貌特征研究[J].*东华理工大学学报:自然科学版*,33(3):270-275.
- Chen S Y, Li Y J, Liu S F. 2010. Geomorphology features of the Dabie orogenic belt based on DEM data[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 33(3): 270-275 (in Chinese).
- 杜亚男,冯光财,李志伟,朱建军,彭星.2015.TerraSAR-X/TanDEM-X获取高精度数字高程模型技术研究[J].*地球物理学报*,58(9):3089-3102.
- Du Y N, Feng G C, Li Z W, Zhu J J, Peng X. 2015. Generation of high precision DEM from TerraSAR-X/TanDEM-X [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(9): 3089-3102 (in Chinese).
- 高明星,刘少峰.2008.DEM数据在青藏高原地貌研究中的应用[J].*国土资源遥感*,(1):59-63.
- Gao M X, Liu S F. 2008. The application of DEM data to the study of Tibet plateau[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, (1): 59-63 (in Chinese).
- 何宏林,魏占玉,华丽思,徐岳仁.2015.利用基岩断层面形貌定量特征识别古地震:以霍山山前断裂为例[J].*地震地质*,37(2):400-412.
- He H L, Wei Z Y, Bi L S, Xu Y R. 2015. Identify paleo-earthquakes using quantitative morphology of bedrock fault surface: A case study on the Huoshan piedmont fault[J]. *Seismology and Geology*, 37(2): 400-412 (in Chinese).
- 洪顺英,申旭辉,荆凤,杜则澄.2007.基于SRTM-DEM的阿尔泰山构造地貌特征分析[J].*国土资源遥感*,(3):62-66.
- Hong S Y, Shen X H, Jing F, Du Z C. 2007. An analysis of geomorphology characteristics of the Altai mountain based on DEM[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, (3): 62-66 (in Chinese).
- 胡艺.2008.基于数字高程模型的构造地貌分析[D].北京:中国地质大学(北京):20-26.
- Hu Y. 2008. *DEM-Based Tectonic Geomorphology Study in the Northeastern Margin of Tibetan Plateau*[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 20-26 (in Chinese).
- 兰穹穹,郝雪涛,齐怀川.2015.资源三号卫星影像DEM提取与精度分析[J].*遥感信息*,30(3):14-18.

- Lan Q Q, Hao X T, Qi H C. 2015. DEM extraction and precision analysis based on ZY-3 remote sensing data[J]. *Remote Sensing Information*, **30**(3): 14–18 (in Chinese).
- 李峰, 徐锡伟, 陈桂华, 董绍鹏, 魏占玉. 2008. 高精度测量方法在汶川 $M_{S}8.0$ 地震地表破裂带考察中的应用[J]. 地震地质, **30**(4): 1065–1075.
- Li F, Xu X W, Chen G H, Dong S P, Wei Z Y. 2008. The application of different high-precision survey method in the investigation of the $M_{S}8.0$ Wenchuan earthquake surface ruptures[J]. *Seismology and Geology*, **30**(4): 1065–1075 (in Chinese).
- 李清泉, 李必军, 陈静. 2000. 激光雷达测量技术及其应用研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, **25**(5): 387–392.
- Li Q Q, Li B J, Chen J. 2000. Research on laser range scanning and its application[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, **25**(5): 387–392 (in Chinese).
- 李树楷, 刘彤, 尤红建. 2000. 机载三维成像系统[J]. 地球信息科学学报, (1): 23–27.
- Li S K, Liu T, You H J. 2000. Airborne 3D imaging system[J]. *Geo-Information Science*, (1): 23–27 (in Chinese).
- 李占飞, 刘静, 邵延秀, 张金玉, 袁兆德, 王鹏, 唐茂云, 王朋涛. 2016. 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, **35**(1): 104–116.
- Li Z F, Liu J, Shao Y X, Zhang J Y, Yuan Z D, Wang P, Tang M Y, Wang P T. 2016. 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*, **35**(1): 104–116 (in Chinese).
- 刘静, 丁林, 曾令森, Tapponnier P, Gaudemer Y. 2006. 青藏高原典型地区的地貌量化分析: 兼对高原“夷平面”的讨论[J]. 地学前缘, **13**(5): 285–299.
- Liu J, Ding L, Zeng L S, Tapponnier P, Gaudemer Y. 2006. Large-scale terrain analysis of selected regions of the Tibetan plateau: Discussion on the origin of plateau planation surface[J]. *Earth Science Frontiers*, **13**(5): 285–299 (in Chinese).
- 刘静, 陈涛, 张培震, 张会平, 郑文俊, 任治坤, 梁诗明, 盛传贞, 甘卫军. 2013. 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, **58**(1): 41–45.
- Liu J, Chen T, Zhang P Z, Zhang H P, Zheng W J, Ren Z K, Liang S M, Sheng C Z, Gan W J. 2013. Illuminating the active Haiyuan fault, China by airborne light detection and ranging[J]. *Chinese Science Bulletin*, **58**(1): 41–45 (in Chinese).
- 刘经南, 张小红. 2003. 激光扫描测高技术的发展与现状[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, **28**(2): 132–137.
- Liu J N, Zhang X H. 2003. Progress of airborne laser scanning altimetry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **28**(2): 132–137 (in Chinese).
- 刘甲美, 高孟潭, 陈鲲. 2015. 地形效应影响下地震动参数与斜坡稳定性相关性研究[J]. 地震学报, **37**(5): 865–874.
- Liu J M, Gao M T, Chen K. 2015. On the correlation of ground motion parameters with slope stability incorporating topographic effects[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **37**(5): 865–874 (in Chinese).
- 刘先林, 段福洲, 宫辉力. 2007. 航空摄影科技发展成就与未来展望[J]. 前沿科学, (3): 10–14.
- Liu X L, Duan F Z, Gong H L. 2007. Achievements and prospects of aerial photography technology[J]. *Frontier Science*, (3): 10–14 (in Chinese).
- 马洪超, 姚春静, 张生德. 2008. 机载激光雷达在汶川地震应急响应中的若干关键问题探讨[J]. 遥感学报, **12**(6): 925–932.
- Ma H C, Yao C J, Zhang S D. 2008. Some technical issues of airborne LiDAR system applied to Wenchuan earthquake relief works[J]. *Journal of Remote Sensing*, **12**(6): 925–932 (in Chinese).
- 马洪超. 2011. 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, **36**(2): 347–354.
- Ma H C. 2011. Review on applications of LiDAR mapping technology to geosciences[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, **36**(2): 347–354 (in Chinese).
- 潘红播, 张过, 唐新明, 王霞, 周平, 许妙忠, 李德仁. 2013. 资源三号测绘卫星影像产品精度分析与验证[J]. 测绘学报, **42**(5): 738–744.
- Pan H B, Zhang G, Tang X M, Wang X, Zhou P, Xu M Z, Li D R. 2013. Accuracy analysis and verification of ZY-3 products[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, **42**(5): 738–744 (in Chinese).
- 任治坤, 陈涛, 张会平, 郑文俊, 张培震. 2014. LiDAR 技术在活动构造研究中的应用[J]. 地质学报, **88**(6): 1196–

1207.

- Ren Z K, Chen T, Zhang H P, Zheng W J, Zhang P Z. 2014. LiDAR survey in active tectonics studies: An introduction and overview[J]. *Acta Geologica Sinica*, **88**(6): 1196–1207 (in Chinese).
- 宿星, 孟兴民, 王思源, 魏万鸿, 冯乐涛. 2017. 陇中黄土高原典型地区滑坡特征参数统计及发育演化机制研究: 以天水市为例[J]. 第四纪研究, **37**(2): 319–330.
- Su X, Meng X M, Wang S Y, Wei W H, Feng L T. 2017. Statistics of characteristic parameters and evolutionary mechanism of landslides in typical area of Longzhong loess plateau: A case study of Tianshui city[J]. *Quaternary Sciences*, **37**(2): 319–330 (in Chinese).
- 孙刚. 2007. 测绘卫星的发展及技术现状[J]. 测绘科学与工程, **27**(1): 46–51.
- Sun G. 2007. The development and technical status of topographic satellite[J]. *Geomatic Science and Engineering*, **27**(1): 46–51 (in Chinses).
- 汤国安, 李发源, 刘学军. 2010. 数字高程模型教程[M]. 第2版. 北京: 科学出版社; 3–6.
- Tang G A, Li F Y, Liu X J. 2010. *Digital Elevation Model Tutorial*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press; 3–6 (in Chinese).
- 汤国安. 2014. 我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J]. 地理学报, **69**(9): 1305–1325.
- Tang G A. 2014. Progress of DEM and digital terrain analysis in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, **69**(9): 1305–1325 (in Chinese).
- 唐新明, 谢俊峰, 张过. 2012. 测绘卫星技术总体发展和现状[J]. 航天返回与遥感, **33**(3): 17–24.
- Tang X M, Xie J F, Zhang G. 2012. Development and status of mapping satellite technology[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, **33**(3): 17–24(in Chinses).
- 王进, 郭靖, 王卫东, 方理刚. 2012. 权重线性组合与逻辑回归模型在滑坡易发性区划中的应用与比较[J]. 中南大学学报: 自然科学版, **43**(5): 1932–1939.
- Wang J, Guo J, Wang W D, Fang L G. 2012. Application and comparison of weighted linear combination model and logistic regression model in landslide susceptibility mapping[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, **43**(5): 1932–1939 (in Chinese).
- 王朋涛, 邵延秀, 张会平, 刘洪春, 吴赵. 2016. sUAV摄影技术在活动构造研究中的应用: 以海原断裂带为例[J]. 第四纪研究, **36**(2): 433–442.
- Wang P T, Shao Y X, Zhang H P, Liu H C, Wu Z. 2016. The application of sUAV photogrammetry in active tectonics: Shanmagou site of Haiyuan fault, for example[J]. *Quaternary Sciences*, **36**(2): 433–442 (in Chinese).
- 王志恒, 胡卓伟, 赵文吉, 官辉力, 邓金宪. 2014. 基于确定性系数概率模型的降雨型滑坡孕灾环境因子敏感性分析: 以四川省低山丘陵区为例[J]. 灾害学, **29**(2): 109–115.
- Wang Z H, Hu Z W, Zhao W J, Guan H L, Deng J X. 2014. Susceptibility analysis of precipitation-induced landslide disaster-prone environmental factors based on the certainty factor probability model: Taking the hilly area in Sichuan as example[J]. *Journal of Catastrophology*, **29**(2): 109–115 (in Chinese).
- 魏占玉, 何宏林, 高伟, 徐锡伟, 甘伟军, 卫蕾华. 2014. 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, **36**(3): 794–813.
- Wei Z Y, He H L, Gao W, Xu X W, Gan W J, Wei L H. 2014. 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*, **36**(3): 794–813 (in Chinese).
- 魏占玉, Ramon A, 何宏林, 高伟. 2015. 基于SfM方法的高密度点云数据生成及精度分析[J]. 地震地质, **37**(2): 636–648.
- Wei Z Y, Ramon A, He H L, Gao W. 2015. Accuracy analysis of terrain point cloud acquired by “structure from motion” using aerial photos[J]. *Seismology and Geology*, **37**(2): 636–648 (in Chinese).
- 许才军, 何平, 温扬茂, 刘洋. 2015. InSAR技术及应用研究进展[J]. 测绘地理信息, **40**(2): 1–9.
- Xu C J, He P, Wen Y M, Liu Y. 2015. Recent advances InSAR interferometry and its applications[J]. *Journal of Geomatics*, **40**(2): 1–9 (in Chinese).
- 许冲, 戴福初, 姚鑫, 陈剑, 涂新斌, 曹琰波, 肖建章. 2010. 基于GIS的汶川地震滑坡灾害影响因子确定性系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, **29**(增刊1): 2972–2981.

- Xu C, Dai F C, Yao X, Chen J, Tu X B, Cao Y B, Xiao J Z. 2010. GIS based certainty factor analysis of landslide triggering factors in Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **29**(S1): 2972–2981 (in Chinese).
- 杨景春, 李有利. 2011. 活动构造地貌学[M]. 北京: 北京大学出版社: 121–150.
- Yang J C, Li Y L. 2011. *Active Tectonic Geomorphology*[M]. Beijing: Peking University Press: 121–150 (in Chinese).
- 庾露, 单新建, 陈晓利. 2014. 基于综合指标法的芦山地震滑坡危险区等级快速划分[J]. 地震地质, **36**(4): 1106–1115.
- Yu L, Shan X J, Chen X L. 2014. A fast classification for Lushan earthquake-induced landslide hazard zones based on comprehensive indexes method[J]. *Seismology and Geology*, **36**(4): 1106–1115 (in Chinese).
- 袁小祥, 王晓青, 窦爱霞, 董彦芳, 王龙, 金鼎坚. 2012. 基于地面 LiDAR 玉树地震地表破裂的三维建模分析[J]. 地震地质, **34**(1): 39–46.
- Yuan X X, Wang X Q, Dou A X, Dong Y F, Wang L, Jin D J. 2012. Terrestrial LiDAR-based 3D modeling analysis of surface rupture caused by Yushu earthquake[J]. *Seismology and Geology*, **34**(1): 39–46 (in Chinese).
- 张会平, 杨农, 张岳桥, 孟晖. 2004. 基于 DEM 的岷山构造带构造地貌初步研究[J]. 国土资源遥感, **16**(4): 54–58.
- Zhang H P, Yang N, Zhang Y Q, Meng H. 2004. A GIS-based research on morpho structural features of the Minshan tectonic belt[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, **16**(4): 54–58 (in Chinese).
- 张会平, 杨农, 张岳桥, 孟晖. 2006. 岷江水系流域地貌特征及其构造指示意义[J]. 第四纪研究, **26**(1): 126–135.
- Zhang H P, Yang N, Zhang Y Q, Meng H. 2006. Geomorphology of the Minjiang drainage system (Sichuan, China) and its structural implications[J]. *Quaternary Sciences*, **26**(1): 126–135 (in Chinese).
- 张培震, 李传友, 毛凤英. 2008. 河流阶地演化与走滑断裂滑动速率[J]. 地震地质, **30**(1): 43–57.
- Zhang P Z, Li C Y, Mao F Y. 2008. Strath terrace formation and strike-slip faulting[J]. *Seismology and Geology*, **30**(1): 43–57 (in Chinese).
- 张小红, 刘经南. 2004. 机载激光扫描测高数据滤波[J]. 测绘科学, **29**(6): 50–53.
- Zhang X H, Liu J N. 2004. Airborne laser scanning altimetry data filtering[J]. *Science of Surveying and Mapping*, **29**(6): 50–53 (in Chinese).
- 张祖勋. 2007. 从数字摄影测量工作站(DPW)到数字摄影测量网格(DPGrid)[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, **32**(7): 565–571.
- Zhang Z X. 2007. From digital photogrammetry workstation (DPW) to digital photogrammetry grid (DPGrid)[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, **32**(7): 565–571 (in Chinese).
- 赵洪壮, 李有利, 杨景春, 吕红华. 2009. 基于 DEM 数据的北天山地貌形态分析[J]. 地理科学, **29**(3): 445–449.
- Zhao H Z, Li Y L, Yang J C, Lü H H. 2009. Geomorphic characteristics of northern Tianshan mountains based on DEM data[J]. *Scientia Geographica Sinica*, **29**(3): 445–449 (in Chinese).
- 郑文俊, 雷启云, 杜鹏, 陈涛, 任治坤, 俞晶星, 张宁. 2015. 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, **37**(1): 232–241.
- Zheng W J, Lei Q Y, Du P, Chen T, Ren Z K, Yu J X, Zhang N. 2015. 3-D laser scanner (LiDAR): A new technology for acquiring high precision palaeoearthquake trench information[J]. *Seismology and Geology*, **37**(1): 232–241 (in Chinese).
- 周晓明. 2011. 机载激光雷达点云数据滤波算法的研究与应用[D]. 郑州: 解放军信息工程大学: 34–121.
- Zhou X M. 2011. *Research and Application of Airborne LiDAR Point Cloud Data Filters*[D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University: 34–121 (in Chinese).
- 朱红, 刘维佳, 张爱兵. 2014. 光学遥感立体测绘技术综述及发展趋势[J]. 现代雷达, **36**(6): 6–12.
- Zhu H, Liu W J, Zhang A B. 2014. Overview and development trend of optical remote sensing stereo mapping techniques [J]. *Modern Radar*, **36**(6): 6–12 (in Chinese).
- Ackermann F. 1999. Airborne laser scanning: Present status and future expectations[J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, **54**(2/3): 64–67.
- Arrowsmith J R, Zielke O. 2009. Tectonic geomorphology of the San Andreas Fault zone from high resolution topography: An example from the Cholame segment[J]. *Geomorphology*, **113**(1/2): 70–81.
- Baltsavias E P. 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning[J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, **54**(2/3): 83–94.

- Bevis M, Hudnut K, Sanchez R, Toth C, Grejner-Brzezinska D, Kendrick E, Caccamise D, Raleigh D, Zhou H, Shan S, Shindle W, Yong A, Harvey J, Borsa A, Ayoub F, Shrestha R, Carter B, Sartori M, Phillips D, Coloma F. 2005. The B4 project: Scanning the San Andreas and San Jacinto fault zones[C]// American Geophysical Union, Fall Meeting. San Francisco, USA: American Geophysical Union; Abstract H34B-01.
- Bhardwaj A, Chatterjee R S, Jain K. 2013. Assimilation of DEMs generated from optical stereo and InSAR pair through data fusion[J]. *Sci Res*, **1**(3): 39–44.
- Brown M, Lowe D G. 2005. Unsupervised 3D object recognition and reconstruction in unordered datasets[C]// Fifth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. Ottawa, Canada: Institute of Electrical and Electronics Engineers: 56–63.
- Bubeck A, Wilkinson M, Roberts G P, Cowie P A, McCaffrey K J W, Phillips R, Sammonds P. 2015. The tectonic geomorphology of bedrock scarps on active normal faults in the Italian Apennines mapped using combined ground penetrating radar and terrestrial laser scanning[J]. *Geomorphology*, **237**: 38–51.
- Chen T, Zhang P Z, Liu J, Li C Y, Ren Z K, Hudnut K W. 2014. Quantitative study of tectonic geomorphology along Haiyuan fault based on airborne LiDAR[J]. *Chinese Science Bulletin*, **59**(20): 2396–2409.
- Chiba T, Suzuki Y, Hiramatsu T. 2007. Digital terrain representation methods and red relief image map[J]. *Jpn Cartogr Assoc*, **45**: 27–36.
- Chiba T, Kaneta S I, Suzuki Y. 2008. Red relief image map: New visualization method for three dimensional data[J]. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*, **37**(B2): 1071–1076.
- Cowgill E. 2007. Impact of riser reconstructions on estimation of secular variation in rates of strike-slip faulting: Revisiting the Cherchen River site along the Altyn Tagh Fault, NW China[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **254**(3/4): 239–255.
- Cowgill E, Gold R D, Chen X H, Wang X F, Arrowsmith J R, Southon J. 2009. Low Quaternary slip rate reconciles geodetic and geologic rates along the Altyn Tagh fault, northwestern Tibet[J]. *Geology*, **37**(7): 647–650.
- Cowgill E, Bernardin T S, Oskin M E, Bowles C, Yıldız M B, Kreylos O, Elliott A J, Bishop S, Gold R D, Morelan A, Bawden G W, Hamann B, Kellogg L H. 2012. Interactive terrain visualization enables virtual field work during rapid scientific response to the 2010 Haiti earthquake[J]. *Geosphere*, **8**(4): 787–804.
- Deilami K, Hashim M. 2011. Very high resolution optical satellites for DEM generation: A review[J]. *EUR J Sci Res*, **49**(4): 542–554.
- Elliott A J. 2014. Control of Rupture Behavior by a Restraining Double-Bend From Slip Rates on the Altyn Tagh Fault [D]. California: University of California: 2–4.
- Fonstad M A, Dietrich J T, Courville B C, Jensen J L, Carboneau P E. 2013. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement[J]. *Earth Surf Proc Landforms*, **38**(4): 421–430.
- Giacco B, Galadini F, Sposito A, Messina P, Moro M, Zreda M, Cittadini A, Salvi S, Todero A. 2003. Image processing and roughness analysis of exposed bedrock fault planes as a tool for paleoseismological analysis: Results from the Campo Felice fault (central Apennines, Italy)[J]. *Geomorphology*, **49**(3/4): 281–301.
- Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. 1988. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping[J]. *Radio Science*, **23**(4): 713–720.
- Graham L C. 1974. Synthetic interferometer radar for topographic mapping[J]. *Proceedings of the IEEE*, **62**(6): 763–768.
- Haddad D E, Akçiz S O, Arrowsmith J R, Rhodes D D, Oldow J S, Zielke O, Toké N A, Haddad A G, Mauer J, Shilpkar P. 2012. Applications of airborne and terrestrial laser scanning to paleoseismology[J]. *Geosphere*, **8**(4): 771–786.
- Haugerud R A, Harding D J, Johnson S Y, Harless J L, Weaver C S, Sherrod B L. 2003. High-resolution lidar topography of the Puget Lowland, Washington: A bonanza for earth science[J]. *GSA Today*, **13**(6): 4–10.
- Hu F, Gao X M, Li G Y, Li M. 2016. DEM extraction from worldview-3 stereo-images and accuracy evaluation[C]// The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 23 ISPRS Congress. Prague: Czech Republic: 327–332.
- Hudnut K W, Borsa A, Glennie C, Minster J B. 2002. High-resolution topography along surface rupture of the 16 Octo-

- ber 1999 Hector Mine, California, earthquake (M_w 7.1) from airborne laser swath mapping[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(4): 1570–1576.
- Jacobsen K, Topan H. 2015. DEM generation with short base length Pleiades triplet[C]// *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Munich, Germany: ISPRS J Photogramm Remote Sens, 81–86.
- James M R, Robson S. 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application[J]. *J Geophys Res*, **117**(F3): F03017.
- Jiang H J, Zhang L, Wang Y, Liao M S. 2014. Fusion of high-resolution DEMs derived from COSMO-SkyMed and TerraSAR-X InSAR datasets[J]. *J Geod*, **88**(6): 587–599.
- Johnson K, Nissen E, Saripalli S, Arrowsmith J R, McGarey P, Scharer K, Williams P, Blisniuk K. 2014. Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion[J]. *Geosphere*, **10**(5): 969–986.
- Kaula W M, Schubert G, Lingenfelter R E, Sjogren W L, Wollenhaupt W R. 1974. Apollo laser altimetry and inferences as to lunar structure[C]// *Proceedings of the 5th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press; 3049–3058.
- Lin Z, Kaneda H, Mukoyama S, Asada N, Chiba T. 2013. Detection of subtle tectonic-geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey[J]. *Geomorphology*, **182**: 104–115.
- Meigs A. 2013. Active tectonics and the LiDAR revolution[J]. *Lithosphere*, **5**(2): 226–229.
- Miller C L, Laflamme R A. 1958. *The Digital Terrain Model: Theory and Application*[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Photogrammetry Laboratory: 433–442.
- Niethammer U, James M R, Rothmund S, Travelletti J, Joswig M. 2012. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results[J]. *Engineering Geology*, **128**: 2–11.
- Nissen E, Maruyama T, Arrowsmith J R, Elliott J R, Krishnan A K, Oskin M E, Saripalli S. 2014. Coseismic fault zone deformation revealed with differential lidar: Examples from Japanese M_w 7 intraplate earthquakes[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **405**: 244–256.
- Oskin M E, Arrowsmith J R, Corona A H, Elliott A J, Fletcher J M, Fielding E J, Gold P O, Garcia J J G, Hudnut K W, Liu-Zeng J, Teran O J. 2012. Near-field deformation from the El Mayor-Cucapah earthquake revealed by differential LiDAR[J]. *Science*, **335**(6069): 702–705.
- Rogers A E E, Ingalls R P. 1969. Venus: Mapping the surface reflectivity by radar interferometry[J]. *Science*, **165**(3895): 797–799.
- Scharer K M, Salisbury J B, Arrowsmith J R, Rockwell T K. 2014. Southern San Andreas fault evaluation field activity: Approaches to measuring small geomorphic offsets: Challenges and recommendations for active fault studies[J]. *Seismol Res Lett*, **85**(1): 68–76.
- Westoby M J, Brasington J, Glasser N F, Hambrey M J, Reynolds J M. 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications[J]. *Geomorphology*, **179**: 300–314.
- Zhou Y, Parsons B, Elliott J R, Barisin I, Walker R T. 2015a. Assessing the ability of Pleiades stereo imagery to determine height changes in earthquakes: A case study for the El Mayor-Cucapah epicentral area[J]. *J Geophys Res*, **120**(12): 8793–8808.
- Zhou Y, Elliott J R, Parsons B, Walker R T. 2015b. The 2013 Balochistan earthquake: An extraordinary or completely ordinary event? [J]. *Geophys Res Lett*, **42**(15): 6236–6243.
- Zhou Y, Walker R T, Elliott J R, Parsons B. 2016. Mapping 3D fault geometry in earthquakes using high-resolution topography: Examples from the 2010 El Mayor-Cucapah (Mexico) and 2013 Balochistan (Pakistan) earthquakes[J]. *Geophys Res Lett*, **43**(7): 3134–3142.
- Zielke O, Arrowsmith J R, Ludwig L G, Akciz S O. 2010. Slip in the 1857 and earlier large earthquakes along the Carrizo plain, San Andreas fault[J]. *Science*, **327**(5969): 1119–1122.
- Zielke O, Arrowsmith J R. 2012. LaDiCaoz and LiDAR imager: MATLAB GUIs for LiDAR data handling and lateral displacement measurement[J]. *Geosphere*, **8**(1): 206–221.
- Zielke O, Arrowsmith J R, Ludwig L G, Akciz S O. 2012. High-resolution topography-derived offsets along the 1857 Fort Tejon earthquake rupture trace, San Andreas fault[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **102**(3): 1135–1154.