

数字高程模型在活动断层位置及地表变形变位特征提取研究中的应用

张欣欣

(浙江大学地球科学系, 杭州 310027)

摘要:活动断层的位置分布及其地表变形变位特征的准确识别是研究和评价活动断层的基础,国内外学者利用数字高程模型(DEM)对断层提取进行了大量研究。本文基于DEM的活动断层位置的提取方法进行综述,总结了DEM提取断层位置的地貌形态特征分析、图像处理以及综合处理提取方法,突出介绍了高分辨率DEM在详细的断层位置分布提取中的优势,DEM在断层地表变形变位及其特征参数提取研究中的最新应用进展。随着高分辨率DEM的快速发展,DEM及其空间分析技术已成为一种常见的地学研究方法,将其与野外调查、遥感、测年等技术结合进行综合分析,能够促进对活动断层的深入研究,并成为断层定量化研究强有力的技术手段。

关键词:数字高程模型(DEM);激光雷达;活动断层;地表变形变位特征

1 引言

断层位置的识别和提取是活动断层研究的基础和前提,断层活动形成的地表变形变位是用来确定断层位置的基本依据,因此断层的位置分布及其地表变形变位特征的准确识别(Burbank et al, 2011),是评价和研究一个断层系统的关键。

野外调查结合地势图、地质图等进行综合分析,是研究断层最传统、也是最经典的方法,该方法的局限是调查周期长,工作量大,一些偏远地区难以到达。随着遥感影像的出现及其分辨率的不断提高,基于遥感影像解译断层位置受到学者的关注(Koike et al, 1995; Novak et al, 2000; Marghany et al, 2010),但是遥感影像的解译通常难以定量地获取垂直方向的断层地表变形变位数据。数字高程模型(DEM)是对地表形态特征的模拟和数字化表达,同时具有平面和高度位置信息,可有效应用于构造地貌的定量化研究,在断层的研究中受到很大的瞩目。

在利用DEM的活动断层提取的研究中,由于常见DEM分辨率常低于30 m,无法识别小尺度的地表变形变位特征和精确的断层位置分布,而微小的地表变形变位是断层最新活动的证据,精确度不足的断层位置及其地表形变特征信息,会引起对断层位置分布、断层长度、断层活动强度及未来地震强度等的错误判断。近年来,机载激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR) DEM等高分辨率DEM的出现,为解决这一问题提供了强有力的数据支持。如何深入利用高分辨率DEM数据,成为目前活动断层研究进一步发展所面临的挑战和机遇(Haugerud et al, 2003; Cunningham et al, 2006; Arrowsmith et al, 2009; Wechsler et al, 2009; Zielke, 2010; Cowgill et al, 2012; Grebbby et al, 2012; Oskin et al, 2012; Lin et al, 2013; 刘静等, 2013; Nissen, 2014; Tarolli, 2014)。

本文对基于DEM的断层位置的提取方法和地表变形变位特征参数的提取方法分别进行了综述,总结了提取方法的经典研究和最新进展,探讨了

收稿日期:2015-02;修订日期:2015-05。

基金项目:教育部博士点基金项目(20120101110052);国家自然科学基金项目(41472174)。

作者简介:张欣欣(1990-),女,山西临汾人,硕士生,主要研究方向为地理信息系统(GIS)应用,E-mail: ZhxCynthia@163.com。

引用格式:张欣欣. 2015. 数字高程模型在活动断层位置及地表变形变位特征提取研究中的应用[J]. 地理科学进展, 34(10): 1288-1296.
[Zhang X X. 2015. DEM application in the extraction of active fault location and active fault surface deformation features[J]. Progress in Geography, 34(10): 1288-1296.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.10.009

DEM应用于断层研究的发展方向。提取断层位置分布和地表变形变位特征的方法是紧密相联的,经典研究更多是断层位置分布的查找,目前主要趋势则是对详细地表变形变位的研究,针对二者的特点,本文分别加以介绍。

2 断层位置的提取

断层位置分布指示着未来地震可能发生的位置和地震强度等重要信息。断层活动引起的地表变形是断层识别的主要标志,地表的突然变形使得地面高程、坡度等基本地形参数以及水系形态等发生突变,因此,地貌形态及其特征参数的突变可以用来识别断层的存在。

2.1 基于较低分辨率DEM提取断层位置

常见的较低分辨率DEM主要有分辨率为100 m的GTOP DEM、分辨率为90 m或30 m的SRTM DEM、分辨率为30 m的ASTER DEM等。基于较低分辨率DEM提取断层位置的方法主要分为地貌形态特征分析法、图像处理法和以及综合处理方法(图1)。地貌形态特征分析法根据地貌形态参数分析识别断层;图像处理法不考虑地形特征信息,利用电脑程序将DEM及其专题图视为简单的图像进行断层边缘的增强和提取的解译;综合处理法是将前两种方法与遥感影像等进行综合分析解译断层。

2.1.1 地貌形态特征分析法

基于较低分辨率DEM解译断层位置最常用的

方法是地貌形态特征分析法,即通过地表高程、坡度、坡向、曲率、粗糙度、起伏度以及水系形态等分析,结合研究者的专业知识,识别断层引起的地表变形变位及其形态参数的变化,从而确定断层的位置(Florinsky et al, 1996)。

DEM阴影图是地貌研究最常见、最有力的工具,它能直观反映研究区地形高度的变化,通过调整太阳方位角可以模拟各个方向的太阳光照,从而消除阴影的影响,凸显各个方向的线性构造,对于地形起伏平缓的区域还可通过增大高程变化系数在视觉上增大起伏,从而有效地识别断层陡坎、错断水系、孤立丘等地表变形变位,进而确定断层的位置(Ganas et al, 2005)。Oguchi等(2003)等分析了日本本州岛中部高山地区50 m分辨率的DEM,通过设置不同的太阳方位角和太阳高度角制作DEM阴影图,利用地貌形态特征分析法识别断层,研究解译出了前人未曾识别的断层。坡度是地面高程的变化率的求解,是地貌研究最重要的参数之一,高程变化剧烈且呈直线分布的区域可判别为断层。Jordan等(2003, 2005)利用DTA(Digital Terrain Analysis)方法对匈牙利Káli盆地的构造特征进行了研究,在DEM阴影图上识别出NE-SW向的线性构造,N-S向排列的火山锥及NW-SE向的山脊线、山谷线、坡折线。以坡度的累计百分比曲线中的2个拐点为界,将坡度图分为3个等级,Káli盆地沿NE-SW,NW-SE和N-S方向的边界线在坡度等级图中很明显。坡向图按灰度显示后与阴影图类似,但其

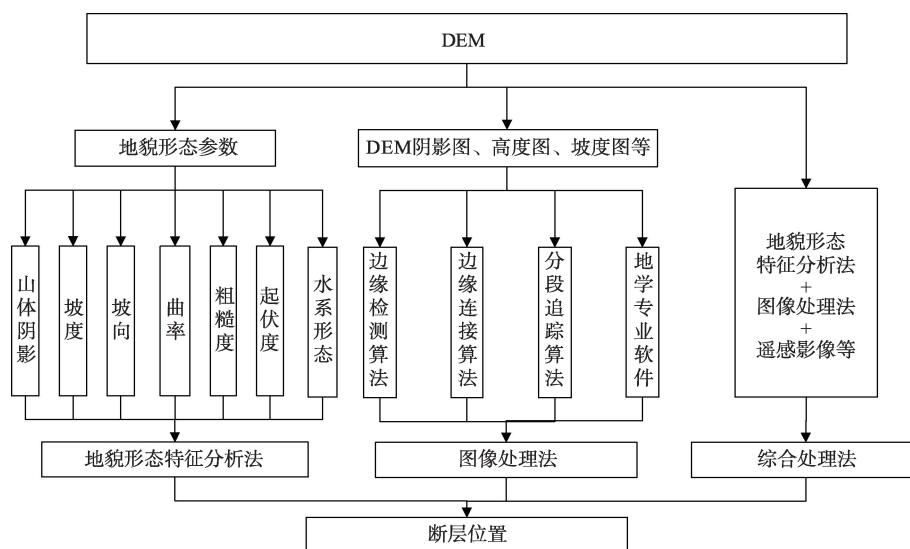


图1 基于DEM提取断层位置的方法流程图

Fig.1 Flowchart of fault extraction based on DEM

不受光照方向影响,可以准确识别出山脊、山谷、坡折线的位置,同时制作坡向玫瑰图对研究区域的所有坡向进行统计分析,将坡向图分为两个等级,发现具有同一坡向的坡面边界均为沿N-S和NW-SE方向的直线。平面曲率图中的黑白线分别代表山脊线、山谷线。剖面曲率图中能识别沿NE-SW方向的坡折线。对上述地貌形态参数图中的线性边界分别进行解译,通过综合分析对研究区的构造特征进行全面地认识。该研究发现,坡向图是地貌研究又一有力工具,并指出坡度大且坡向一致的坡面区域可能会有断层存在,因此可以将坡度与坡向相结合进行断层研究。坡向、曲率以及地形起伏度、地面粗糙度等地貌形态参数一般作为辅助手段来解译断层。DTA方法几乎囊括了利用地貌形态参数解译断层的所有方法, Demirkesen(2008, 2009)基于DEM利用DTA方法进行了断层构造解译。

水系形态对流域内断层活动的响应极为敏感,因此水系形态分析也是断层构造解译的重要技术手段。根据不同水系在同一直线上展布、主河流两侧的水系密度差异、河流系统拐弯且呈直角等水系特征可以解译断层(Jackson et al, 1996; Chorowicz et al, 1998; Dumont et al, 2005; Guarnieri et al, 2008; Štěpančíková et al, 2008; Walker et al, 2012)。

2.1.2 图像处理法

图像处理法将DEM及其地貌特征专题图视为简单的图像进行处理(Gloaguen et al, 2007),处理方法最初来源于遥感影像处理,依靠DEM影像、阴影图、坡度图等色调变化来检测线性构造。Argialas等(2004)在希腊Nisyros岛基于遥感影像、地形图和DEM使用边缘检测(如Canny、Rothwell、Black、Bezdek、Iverson-Zucker、EDISON、SUSAN等)和边缘连接技术(如Hough变换)提取线性构造,均取得了较好的提取效果。与其他算法相比,分段追踪(Segment-tracing)算法(Masoud et al, 2011a, 2011b)能够只跟踪连续的线性构造,且能够提取平行于光照方向的位于阴影区的线性构造。

此外,遥感软件如PCI、ERDAS等中检测线性构造的模块被广泛应用于断层线性结构的提取(Flores-Prieto et al, 2015)。Mallast等(2011)在死海的西部集水盆地基于30 m分辨率的DEM进行4个方向的线性滤波,将4张图融合为一张凸显4个方向线性构造的影像,然后使用ERDAS中基于对象的影像分析和PCI Geomatic中的Line算法分别解

译线性构造,两种方法抽取的结果比较相似,但是基于对象分析能够抽取较小的线,而PCI Geomatic中的Line算法则能够抽取较大的线,通过GIS分析将两种方法提取的结果整合得到一个全面互补的线性构造图。

2.1.3 综合处理方法

除了以上两种常见的基于DEM提取断层位置的方法外,还可结合遥感影像等进行综合分析来判断断层。遥感影像的获取建立在一定光学参数的基础上且只能定量获取二维信息,而DEM能定量地反映地表的高程信息且在建立阴影图时可以为模拟任意光照角度,由此弥补了遥感影像的不足之处。遥感影像分辨率较高以及影像中地物颜色、纹理的准确辨认可以弥补较低分辨率DEM的不足,有助于地物的直观识别。因此,通过高分辨率遥感影像与较低分辨率DEM的结合(Chorowicz et al, 1999; Samy et al, 2012),可以进行地形三维叠加,从而更准确地从多角度对构造信息进行提取。在利比亚西北部的Eljufra地区, Saadi等(2008)对遥感影像进行了影像增强,基于影像的色调、纹理、河网形态等对研究区的线性构造进行了解译,然后将遥感影像叠加到DEM阴影图上进行三维模拟,解译出沿NNW-SSE和NNE-SSW两个方向的线性构造,其中沿NNE-SSW走向的线性构造首次被识别。同时基于重力数据提取出地表下的构造线,将其与地质图解译的已有的构造线对比,发现地表和地下的构造相对比较吻合。Saadi等(2011)在上述研究的基础上基于DEM提取水系,通过识别直线状沟谷、线状凹陷及坡度大的陡坎等确定线性构造位置,还通过已有地质图和野外观察解译了地质构造线,将其与遥感数据解译的构造线综合,对古达米斯(Ghadames)流域的起源和演化进行了定量研究,重新认识了古达米斯流域及其接壤的利比亚西北部其他地区的构造形态。Saadi等(2008, 2011)注重多源数据结合,全面地解译了断层的构造信息。地质图上的断层信息,受比例尺和获取方法不同的影响,与DEM和遥感影像所反映的线性构造信息有一定的位置差异,但其对提取的断层具有很好的验证和指导作用。

2.2 基于高分辨率DEM提取断层位置

较低分辨率DEM受精度的限制,无法识别能反映断层最新活动的微小地表变形,因此主要是侧重于断层线性构造的快速认识和提取,但这些提取

出来的线状体是否准确体现出实际的活动断层分布存在疑问,成为研究实用化的很大障碍。

高分辨率DEM的出现,为解决这一问题提供了良好的数据支持。目前高分辨率DEM除了航空及地面激光雷达数据(LiDAR DEM),还有基于高分辨率遥感立体像对的DEM、以及近年出现的基于摄影测量的 SfM(Structure from Motion)DEM等。目前主流的机载 LiDAR DEM 的精度已经达到分米级,能识别几十厘米以下的陡坎、微小的位错水系等微小断层地貌;同时 LiDAR 测量技术具有很强的穿透性,能穿过植被直接获取地面信息,提取植被覆盖下的地表形态。因此,当前的活动断层研究应用这些高分辨 DEM,沿断层走向逐个详细识别地表变形特征,在此基础上实现详细的断层位置分布的提取(Zachariasen et al, 2008; Meigs, 2013; Roring, 2013)。

由于 LiDAR DEM 分辨率高,其阴影图能非常详细、精确地表达地形,因此利用阴影图并辅以其他地形特征专题图(Cunningham et al, 2006; Hunter et al, 2011)是最常见的基于 LiDAR DEM 查找断层的方法。在墨西哥湾的休斯顿地区,Engelkemeir等(2008)利用 1.5 m 分辨率的 LiDAR DEM 及其阴影图、坡度图、坡向图、等高线图等主观识别断层及断

层陡坎,其中阴影图是识别断层和断层陡坎最好的工具,将解译的断层图与已有的断层图进行对比,发现与标有断层位置的旧图有 100 多米的偏差,新图更加精确,且解译出了尚未被发现的断层,从而对研究区的活动构造有了新的认识。Arrowsmith等(2009)比较了仅依靠 LiDAR DEM 和基于航片和野外观测的断层提取精度,发现提取结果具有很大的-致性(图2),并指出 LiDAR DEM 应用于野外调查的前期、中期及调查完成后的数字化工作都将提高提取精度,而 LiDAR DEM 与野外调查和航片等结合将得到最佳提取效果。Lin等(2013)利用 0.5 m 分辨率的 LiDAR DEM 及 RRIM(Red Relief Image Map)可视化方法,识别出了日本山区植被覆盖下未被发现的、Neodani 活动断层地表变形变位。RRIM 三维视图不受光照的影响,结合高度信息的 RRIM 立体像对,能更有效地识别和解译大小、走向、形态各异的微小地表变形变位,如错断的河道和山脊、陡坎、线状沟槽及凹陷等。

基于 LiDAR DEM 提取断层的方法除了利用 DEM 地形解析的方法外,图像处理的方法也有一定的应用。Nyborg等(2007)基于 0.25 m 分辨率的 LiDAR DEM,运用滤波技术对断层进行了自动解译。在塞浦路斯特罗多斯北部地区,Grebby等

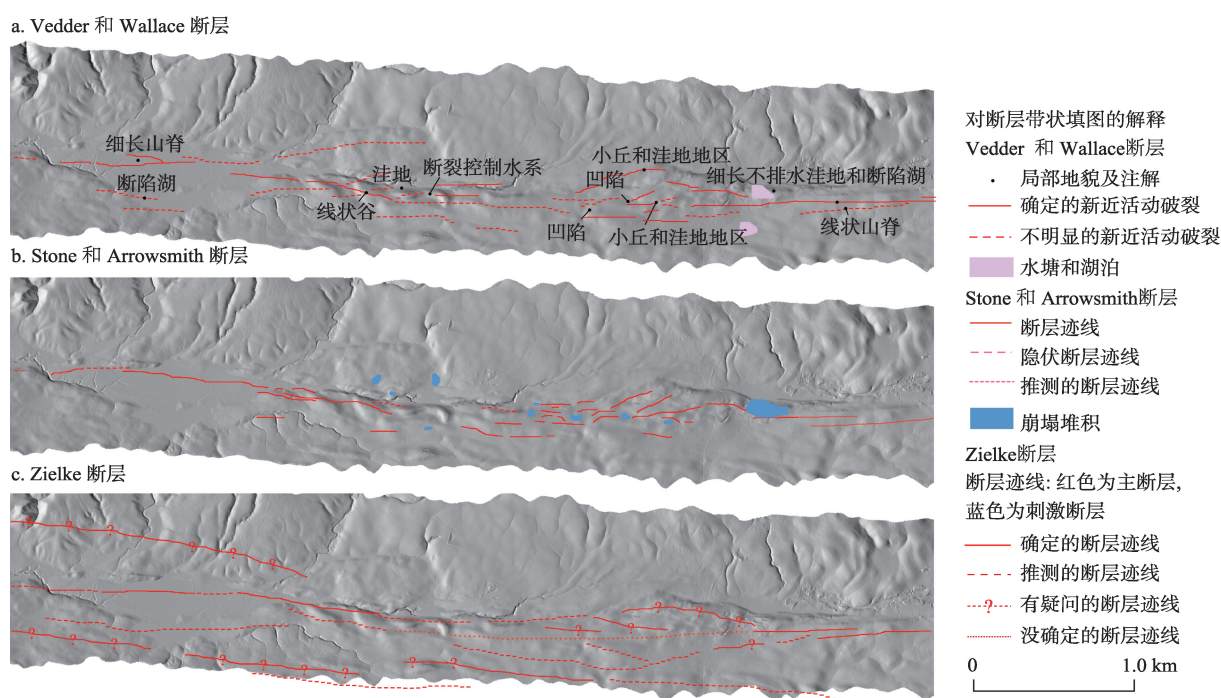


图2 Vedder 和 Wallace、Stone 和 Arrowsmith、Zielke 解译的断层(修改自 Arrowsmith et al, 2009)

Fig.2 Fault strip mapping by Vedder and Wallace, Stone and Arrowsmith, and Zielke (Modified from Arrowsmith et al, 2009)

(2012)对4 m分辨率的LiDAR DEM,进行了阴影图制作、拉普拉斯滤波、顶帽变换等分析,同时对4 m分辨率的机载多光谱影像进行了假彩色组合、拉普拉斯滤波、顶帽变换的视觉增强等分析,分别解译植被覆盖下的活动断层构造。

3 断层地表变形变位及其特征参数的提取

活动断层的特征地形复杂多样,包括断层陡坎、地堑、错断水系、错断山脊、闭塞丘、断头河、风隙等,这些变形变位所包含的形变信息特征各异,提取方法复杂。但是,断层的形变从根本上可分为两类,水平形变和垂直形变。下面以断层陡坎代表断层的垂直形变,以错断水系代表断层的水平形变进行说明,并介绍其他最新的变形变位特征的提取方法。

3.1 断层陡坎的变形变位特征提取

断层陡坎是断层活动形成的典型的地表变形变位之一,记录着一次或多次断层活动的垂直位错量。结合陡坎的形变特征和陡坎的年代数据,可以用来求取断层的平均活动速率,研究断层的活动强度和结构特征(Hooper et al, 2003; Sherrod et al, 2004; Chan et al, 2007; Kondo et al, 2008; Petit, Gunnell, et al, 2009; Petit, Meyer, et al, 2009; Ganev et al, 2010; Hilley et al, 2010; Wiatr et al, 2013)。Begg等(2010)在新西兰陶波裂谷扩张最快的朗伊泰基平原地区,基于LiDAR DEM制作了阴影图,将半透明显示的阴影图叠加到彩色渲染过的LiDAR DEM上,结合坡度图和等高线图识别错断水系、陡坎等的准确位置,并解译出122条断层。断层陡坎记录着断层的垂直位移量,为了定量地研究断层,在平行于断层走向的断层两侧及垂直于断层走向横穿断层,以200 m为间隔共抽取了1000多条剖面线,测得断层的垂直位错量。研究发现,朗伊泰基平原上各断层的滑动速率差异较大,通过计算每个断层的最大错动量与长度的比值(D/L),发现大多数的断层带 D/L 值都比Wells等(1994)得到的正断层的经验值高,说明这些地区发生了多次地震。Begg等基于LiDAR DEM提取的断层数量比前人研究识别得多,且对断层的位错量、滑动速率等都有了新的认识。Brunori等(2013)基于1 m分辨率的LiDAR DEM,对意大利亚平宁山脉Pettino断层的4个90~

280 m的陡坎的高度、长度、坡度和坡向等特征进行了研究,通过阴影图、坡度图和坡向图中地形和坡度的突然变化来辨认陡坎的上下界限,同时,利用1 m分辨率的IKONOS全色影像和0.6 m分辨率的QuickBird影像来区别断层陡坎与人造物,最后精确提取了陡坎的相对高度、坡度、坡向等信息,制作了陡坎的3D示图,结合年代数据,估算了断层的滑动速率。

在国内,刘静等(2013)首次将LiDAR数据应用于断层地表变形变位特征的研究,研究基于LiDAR DEM与航空影像叠加的高精度和真三维成像研究海原断层,详细识别了包括断层陡坎等微小地貌结构特征,并对LiDAR数据应用于海原断层带的进一步研究进行了展望。

3.2 水系的变形变位特征提取

河流能够地形能够较好地记录断层活动,不同规模水系的位错特征是活动断层研究的重要参数,国内外的学者对此开展了大量的研究,取得了令人瞩目的成果(Hayakawa et al, 2006; Zielke, 2010; Ludwig et al, 2012; Wei et al, 2015)。

贯穿加利福尼亚西南部长约1287 km的圣安德烈斯断层是地球表面最长、最活跃的断层之一,在1857年的里氏7.9级Fort Tejon大地震中,地表发生了350 km的断裂;地质研究者对断层地震发生段进行了大量研究,认为该断层Carrizo平原段在1857年地震中平均右旋错动量大于其他段的错动量,因此认为该段控制了1857年地震的再次发生。然而,Zielke等(Zielke, 2010; Zielke, Arrowsmith, 2012; Zielke, Arrowsmith, Ludwig, 2012)利用高分辨率LiDAR数据对引发1857年大地震的断层再次进行研究,确定并抽取了Carrizo平原的水系和断层,并将错动水系上游和下游的阴影图和纵剖面线分别进行拼接复原以获取其水系位错量,其中能观测到的最小位错即为1857年大地震断层活动造成的错动。研究发现,1857年沿Carrizo平原段右旋破裂量与发生1857年大地震的断层的其他段一致,说明该段只是一个普通的断层段,并不能控制1857年大地震的再次发生。Zielke等对华莱士小溪(Wallace Creek)进行了古地震研究发现,其最小位错量为7.9 m,与前人得出的结论不同;同时重新推算了1857年地震的里氏震级M0和矩震级MW。与前人研究相比,Zielke等的研究认为Carrizo平原段发生地震的频率较高,滑动量却相对较小。Zielke, Ar-

rowsmith, Ludwig 等(2012)利用 Matlab 平台开发了两个图形交互界面 LiDARimager 和 LaDiCaoz, 以快速准确地测量线状地貌标志的水平错断量, 这两个计算工具已经被应用于其他研究区(Salisbury et al, 2012)。

在国内, 海原断层带东段哨马营地区具有活动断层典型的地表变形变位特征, Chen 等(2014)利用高精度 LiDAR DEM 制作的 0.2 m 间隔的等高线图, 通过冲击扇上一条沟谷的地形拼接恢复和同震位移点恢复, 分别测量出哨马营地区 1902 年大地震的同震水平位移量和垂直位移量, 并首次测量获取了该区域地貌的垂直变形, 且验证了 LiDAR 数据测量的地表变形位错量与野外实测的结果一致。研究结合年代数据, 获取了断层的平均水平走滑速率和垂直走滑速率。

3.3 其他断层地表变形变位特征提取

差分 LiDAR 技术能够定量获取地震变形的三维空间信息(Oskin et al, 2012; Glennie et al, 2014)。Nissen 等(2014)利用差分 LiDAR 技术测量了日本两个地震的断层带变形, 地震带均被植被覆盖, 研究利用震前 2 m 分辨率和震后 1 m 分辨率的 LiDAR DEM, 基于 ICP(Iterative Closest Point)算法抽取了地震造成的三维位移量和旋转量, 结果证明在其他遥感技术很难恢复变形位移的近地面和密集植被覆盖区域, 差分 LiDAR DEM 能够较好地认识断层的滑动变形。Johnson 等(2014)首次在植被稀少和矮小的华盛顿街和戈尔韦湖路两个区域将 SfM 技术应用于断层地形的研究中, 使用 ICP 算法进行差分运算, 同时将 SfM 获取的点云数据分别与机载 LiDAR 数据和地面 LiDAR 数据进行对比, 指出 SfM 技术与一些简单的差分算法结合将成为测量和监测断层详细变形和滑坡、断层陡坎退化及裂点后退等地形变化有力的工具。

4 总结与展望

DEM 已广泛应用到断层的研究中, 本文综合 DEM 应用于断层提取研究方面的文献, 总结了 DEM 提取断层位置及其地表变形变位特征的研究方法及应用实例。传统 DEM 提取断层及其地表变形变位特征方法, 为高分辨率 DEM 应用于断层研究奠定了良好的基础, 而高分辨率 DEM 的出现, 可以较为准确地获取断层位置及地表变形变位特征

参数, 为活动断层详细的定量化的研究提供了重要的数据基础, 极大地促进了对断层活动特性的深入研究。目前高分辨率 DEM 在活动断层提取研究中的应用正处于探索发展阶段, 基于 DEM 提取断层位置及其地表变形变位特征的大多数研究方法尚存在主观的局限, 如何客观、快速、精细地获取断层位置及其地表变形变位特征, 是该研究方向面临的一个重要的议题。

需要指出的是, 虽然 DEM 是活动断层研究的重要工具, 其在活动断层地形的野外调查研究中的应用, 将提高断层调查的速度和精度, 但是它并不能完全取代野外观测, 因此需要注重其与野外调查的相辅相成作用, 同时也需要注重与其他学科的融合。DEM 与野外调查、遥感、测年等技术结合进行复合分析, 能够促进对活动断层的系统深入研究, 并逐渐成为断层量化研究强有力的技术手段。

致谢: 感谢浙江大学地球科学系林舟教授对本文的指导及提出的宝贵修改意见。

参考文献(References)

- 刘静, 陈涛, 张培震, 等. 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, et al. 2013. Illuminating the active Haiyuan fault, China by airborne light detection and ranging[J]. Chinese Science Bulletin, 58(1): 41-45.]
- Argialas D P, Mavrantza O D. 2004. Comparison of edge detection and Hough transform techniques for the extraction of geologic features[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34: 790-795.
- 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.
- Begg J G, Mouslopoulou V. 2010. Analysis of late Holocene faulting within an active rift using LiDAR, Taupo Rift, New Zealand[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 190(1-2): 152-167.
- Brunori C A, Civico R, Cinti F R, et al. 2013. Characterization of active fault scarps from LiDAR data: a case study from Central Apennines (Italy) [J]. International Journal of Geographical Information Science, 27(7): 1405-1416.
- Burbank D W, Anderson R S. 2011. Tectonic Geomorphology [M]. 2nd ed. Oxford, UK: Wiley-Blackwell.
- Chan Y C, Chen Y G, Shih T Y, et al. 2007. Characterizing the

- Hsincheng active fault in northern Taiwan using airborne LiDAR data: detailed geomorphic features and their structural implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(3): 303-316.
- Chen T, Zhang P Z, Liu J, et al. 2014. Quantitative study of tectonic geomorphology along Haiyuan fault based on airborne LiDAR[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59(20): 2396-2409.
- Chorowicz J, Collet B, Bonavia F F, et al. 1998. The Tana Basin, Ethiopia: intra-plateau uplift, rifting and subsidence [J]. *Tectonophysics*, 295(3): 351-367.
- Chorowicz J, Dhont D, Gündoğdu N. 1999. Neotectonics in the eastern North Anatolian fault region (Turkey) advocates crustal extension: mapping from SAR ERS imagery and Digital Elevation Model[J]. *Journal of Structural Geology*, 21(5): 511-532.
- Cowgill E, Bernardin T S, Oskin M E, et al. 2012. Interactive terrain visualization enables virtual field work during rapid scientific response to the 2010 Haiti earthquake[J]. *Geosphere*, 8(4): 787-804.
- Cunningham D, Grebby S, Tansey K, et al. 2006. Application of airborne LiDAR to mapping seismogenic faults in forested mountainous terrain, southeastern Alps, Slovenia [J]. *Geophysical Research Letters*, 33(20): L20308.
- Demirkesen A C. 2008. Digital terrain analysis using Landsat-7 ETM+ imagery and SRTM DEM: a case study of Nevsehir Province (Cappadocia), Turkey[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14): 4173-4188.
- Demirkesen A C. 2009. Quantifying geological structures of the Nigde Province in central Anatolia, Turkey using SRTM DEM data[J]. *Environmental Geology*, 56(5): 865-875.
- Dumont J F, Santana E, Vilema W. 2005. Morphologic evidence of active motion of the Zambapala Fault, Gulf of Guayaquil (Ecuador)[J]. *Geomorphology*, 65(3): 223-239.
- Engelkemeir R M, Khan S D. 2008. LiDAR mapping of faults in Houston, Texas, USA[J]. *Geosphere*, 4(1): 170-182.
- Flores-Prieto E, Quénéhervé G, Bachofer F, et al. 2015. Morphotectonic interpretation of the Makuyuni catchment in Northern Tanzania using DEM and SAR data[J]. *Geomorphology*, 248: 427-439.
- Florinsky I V. 1996. Quantitative topographic method of fault morphology recognition[J]. *Geomorphology*, 16(2): 103-119.
- Ganas A, Pavlides S, Karastathis V. 2005. DEM-based morphometry of range-front escarpments in Attica, central Greece, and its relation to fault slip rates[J]. *Geomorphology*, 65(3-4): 301-319.
- Ganev P N, Dolan J F, Frankel K L, et al. 2010. Rates of extension along the Fish Lake Valley fault and transtensional deformation in the Eastern California shear zone-Walker Lane belt[J]. *Lithosphere*, 2(1): 33-49.
- Glennie C L, Hinojosa-Corona A, Nissen E, et al. 2014. Optimization of legacy LiDAR data sets for measuring near-field earthquake displacements[J]. *Geophysical Research Letters*, 41(10): 3494-3501.
- Gloaguen R, Marpu P R, Niemeyer I. 2007. Automatic extraction of faults and fractal analysis from remote sensing data [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 14(2): 131-138.
- Grebby S, Cunningham D, Naden J, et al. 2012. Application of airborne LiDAR data and airborne multispectral imagery to structural mapping of the upper section of the Troodos ophiolite, Cyprus[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 101(6): 1645-1660.
- Guarnieri P, Pirrotta C. 2008. The response of drainage basins to the late Quaternary tectonics in the Sicilian side of the Messina Strait (NE Sicily) [J]. *Geomorphology*, 95(3): 260-273.
- Haugerud R A, Harding D J, Johnson S Y, et al. 2003. High-resolution lidar topography of the Puget Lowland, Washington[J]. *GSA Today*, 13(6): 4-10.
- Hayakawa Y S, Oguchi T. 2006. DEM-based identification of fluvial knickzones and its application to Japanese mountain rivers[J]. *Geomorphology*, 78: 90-106.
- Hilley G E, DeLong S, Prentice C, et al. 2010. Morphologic dating of fault scarps using airborne laser swath mapping (ALSM) data[J]. *Geophysical Research Letters*, 37(4): L04301.
- Hooper D M, Bursik M I, Webb F H. 2003. Application of high-resolution, interferometric DEMs to geomorphic studies of fault scarps, Fish Lake Valley, Nevada-California, USA[J]. *Remote Sensing of Environment*, 84(2): 255-267.
- Hunter L E, Howle J F, Rose R S, et al. 2011. LiDAR-assisted identification of an active fault near Truckee, California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(3): 1162-1181.
- Jackson J, Norris R, Youngson J. 1996. The structural evolution of active fault and fold systems in central Otago, New Zealand: evidence revealed by drainage patterns[J]. *Journal of Structural Geology*, 18(2): 217-234.
- Johnson K, Nissen E, Saripalli S, et al. 2014. Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion[J]. *Geosphere*, 10(5): 969-986.
- Jordan G, Meijninger B M L, Van H D J J, et al. 2005. Extraction of morphotectonic features from DEMs: development and applications for study areas in Hungary and

- NW Greece[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(3): 163-182.
- Jordan G. 2003. Morphometric analysis and tectonic interpretation of digital terrain data: a case study[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(8): 807-822.
- Koike K, Nagano S, Michito O. 1995. Lineament analysis of satellite images using a segment tracing algorithm (STA) [J]. *Computers & Geosciences*, 21 (9): 1091-1104.
- Kondo H, Toda S, Okumura K, et al. 2008. A fault scarp in an urban area identified by LiDAR survey: a case study on the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, central Japan[J]. *Geomorphology*, 101(4): 731-739.
- Lin Z, Kaneda H, Mukoyama S, et al. 2013. Detection of subtle tectonic- geomorphic features in densely forested mountains by very high-resolution airborne LiDAR survey[J]. *Geomorphology*, 182: 104-115.
- Mallat U, Gloaguen R, Geyer S, et al. 2011. Derivation of groundwater flow-paths based on semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(8): 2665-2678.
- Marghany M, Hashim M. 2010. Lineament mapping using multispectral remote sensing satellite data[J]. *Research Journal of Applied Sciences*, 5(2): 126-130.
- Masoud A A, Koike K. 2011a. Auto-detection and integration of tectonically significant lineaments from SRTM DEM and remotely-sensed geophysical data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6): 818-832.
- Masoud A A, Koike K. 2011b. Morphotectonics inferred from the analysis of topographic lineaments auto- detected from DEMs: application and validation for the Sinai Peninsula, Egypt[J]. *Tectonophysics*, 510(3-4): 291-308.
- Meigs A. 2013. Active tectonics and the LiDAR revolution[J]. *Lithosphere*, 5(2): 226-229.
- Nissen E, Maruyama T, Arrowsmith J R, et al. 2014. Coseismic fault zone deformation revealed with differential LiDAR: examples from Japanese Mw~7 intraplate earthquakes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 405: 244-256.
- Novak I D, Soulakellis N. 2000. Identifying geomorphic features using LANDSAT-5/TM data processing techniques on Lesbos, Greece[J]. *Geomorphology*, 34(1): 101-109.
- Nyborg M, Berglund J, Triumf C A. 2007. Detection of lineaments using airborne laser scanning technology: laxemar-simpevarp, Sweden[J]. *Hydrogeology Journal*, 15(1): 29-32.
- Oguchi T, Aoki T, Matsuta N. 2003. Identification of an active fault in the Japanese Alps from DEM-based hill shading [J]. *Computers and Geosciences*, 29(7): 885-891.
- Oskin M E, Arrowsmith J R, Corona A H, et al. 2012. Near-field deformation from the El Mayor-Cucapah earthquake revealed by differential LiDAR[J]. *Science*, 335: 702-705.
- Petit C, Gunnell Y, Gonga S N, et al. 2009. Faceted spurs at normal fault scarps: insights from numerical modeling[J]. *Journal of Geophysical Research*, 114(B5): B05403.
- Petit C, Meyer B, Gunnell Y, et al. 2009. Height of faceted spurs, a proxy for determining long-term throw rates on normal faults: evidence from the North Baikal Rift System, Siberia[J]. *Tectonics*, 28(6): TC6010.
- Roering J J, Mackey B H, Marshall J A, et al. 2013. 'You are here': connecting the dots with airborne LiDAR for geomorphic fieldwork[J]. *Geomorphology*, 200: 172-183.
- Saadi N M, Watanabe K. 2008. Lineaments extraction and analysis in Eljufra area, Libya[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2(1): 023538.
- Saadi N M, Zaher M A, El-Baz F, et al. 2011. Integrated remote sensing data utilization for investigating structural and tectonic history of the Ghadames Basin, Libya[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(5): 778-791.
- Salisbury J B, Rockwell T K, Middleton T J, et al. 2012. LiDAR and field observations of slip distribution for the most recent surface ruptures along the central San Jacinto Fault[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(2): 598-619.
- Samy I E, Shattri M, Bujang B K H, et al. 2012. Application of terrain analysis to the mapping and spatial pattern analysis of subsurface geological fractures of Kuala Lumpur limestone bedrock, Malaysia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 33(10): 3176-3196.
- Sherrod B L, Brocher T M, Weaver C S, et al. 2004. Holocene fault scarps near Tacoma, Washington, USA[J]. *Geology*, 32(1): 9-12.
- Štěpančíková P, Stemberk J, Vilímek V, et al. 2008. Neotectonic development of drainage networks in the East Sudeten Mountains and monitoring of recent fault displacements (Czech Republic)[J]. *Geomorphology*, 102(1): 68-80.
- Tarolli P. 2014. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: opportunities and challenges[J]. *Geomorphology*, 216: 295-312.
- Walker F, Allen M B. 2012. Offset rivers, drainage spacing and the record of strike-slip faulting: The Kuh Banan Fault, Iran[J]. *Tectonophysics*, 530: 251-263.
- Wechsler N, Rockwell T K., Ben-Zion Y. 2009. Application of high resolution DEM data to detect rock damage from geomorphic signals along the central San Jacinto Fault[J]. *Geomorphology*, 113(1): 82-96.

- Wei Z Y, Bi L S, Xu Y R, et al. 2015. Evaluating knickpoint recession along an active fault for paleoseismological analysis: The Huoshan Piedmont, Eastern China[J]. *Geomorphology*, 235: 63-76.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974-1002.
- Wiatr T, Reicherter K, Papanikolaou I, et al. 2013. Slip vector analysis with high resolution t-LiDAR scanning[J]. *Tectonophysics*, 608: 947-957.
- Zachariasen J, Prentice C S. 2008. Detailed mapping of the Northern San Andreas Fault using LiDAR imagery[J]. *Final Technical Report of National Earthquake Hazards Reduction Program*, 47: 05HQGR0069.
- Zielke O, Arrowsmith J R, Ludwig L G, et al. 2010. Slip in the 1857 and earlier large earthquakes along the Carrizo Plain, San Andreas Fault[J]. *Science*, 327: 1119-1122.
- Zielke O, Arrowsmith J R, Ludwig L G, et al. 2012. High-resolution topography-derived offsets along the 1857 Fort Tejon earthquake rupture trace, San Andreas Fault[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(3): 1135-1154.
- Zielke O, Arrowsmith J R. 2012. LaDiCaoz and LiDARimager-MATLAB GUIs for LiDAR data handling and lateral displacement measurement[J]. *Geosphere*, 8(1): 206-221.

DEM application in the extraction of active fault location and active fault surface deformation features

ZHANG Xinxin

(Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Extraction of active fault location and active fault surface deformation features is essential for the study of active fault systems, and a large number of studies have been carried out on fault extraction based on Digital Elevation Model (DEM). This article summarizes the active fault extraction methods using DEM of lower than 30 m resolution and very-high resolution DEM, such as Light Detection and Ranging (LiDAR) DEM and Structure from Motion (SfM) DEM. The fault extraction methods can be divided mainly into three categories: geomorphic feature interpretation, image interpretation and multiple interpretation. Geomorphic feature interpretation is based on GIS spatial analyses. Image interpretation identifies faults by examining linear variation of surface deformation through image processing algorithms. Multiple interpretation combines the above two methods with remote sensing image processing. Meanwhile, this article reviews the most recent progress in the extraction of surface deformation features using DEM, and enumerates the extraction of fault scarp and deformed drainage characteristics. With the progress in high-resolution DEM, DEM and its spatial analysis techniques have become a conventional geoscience research method. The integration of this method with field research, remote sensing, and dating techniques can provide a strong technical support to quantitative study in fault research.

Key words: Digital Elevation Model (DEM); LiDAR DEM; active fault; surface deformation of fault