



利用锁眼卫星影像提取历史地震同震位移 ——以1976年土耳其Chaldiran地震为例

卢乐浚¹ 周宇¹

¹ 中山大学地球科学与工程学院广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室,广东 广州,510275

摘要:大地震的地表破裂及形变特征对研究地震成因机制、断层运动及大陆变形具有重要意义。随着卫星技术的日益成熟,自1992年美国加州Landers地震以来,光学和雷达影像被广泛应用于同震破裂、震后形变等定量研究。然而,由于缺乏更早之前的影像资料,90年代以前的历史地震研究无法深入。美国锁眼卫星KH-9影像的公开解决了震前卫星影像匮乏的问题,为研究70~90年代历史地震提供了可行的条件。首先借助伊朗Tabas-e-Golshan地震和Khuli-Boniabad地震的研究实例,概述了KH-9卫星影像测量历史同震位移的方法与进展;然后利用1976年(震前)和1980年(震后)的KH-9影像对1976年土耳其Chaldiran地震的同震位移进行了计算,测得该地震东西向同震位移量为 (3.1 ± 0.7) m,与实地测量的地表位移相符,表明该走滑地震没有明显的浅部滑动亏损现象;最后对KH-9卫星影像定量研究历史地震的未来应用和限制进行了讨论与总结。

关键词:KH-9卫星影像;影像匹配;同震位移;1976年土耳其Chaldiran地震

中图分类号:P237;P315

文献标志码:A

地震是一种对人类安全威胁很大的自然灾害,但人们对大地震($M_w \geq 7$)的地震周期研究进展缓慢,其原因之一是大地震是一种小概率事件,可供研究的大地震震例很少。尤其是在大陆内部,断层应变积累缓慢,大地震周期往往很漫长,难以对其进行深入的研究^[1]。目前,利用大地测量与遥感技术对已发生的大地震的定量研究仅能追溯到1992年美国加州Landers地震^[2],亟需一种技术能够将大地测量与遥感技术用于对1992年以前的地震进行研究,但由于缺乏震前的影像数据,历史地震的研究也受到限制。美国锁眼(KeyHole, KH)卫星影像的公开解决了此前震前卫星影像匮乏的难题,为研究70~90年代的历史地震提供了可能。近年来,一些学者基于KH-9影像成功提取了全球部分70~90年代历史地震的同震位移,打开了定量研究历史地震的新局面^[3-4]。针对历史地震的研究,本文首先介绍了KH-9影像和数据处理方法,对目前已取得的研究成果进行了概述;然后利用KH-9和Landsat 8影像提取了1976年土耳其 M_w 7.3级地震的同震

位移;最后讨论了该方法的局限性以及未来的可能应用。

1 KH系列卫星

KH系列卫星最开始发射于20世纪60年代,总发射次数达270余次。美国将此前的“日冕(CORONA)”“萨莫斯(SAMOS)”“发现者(DISCOVER)”等早期军事侦查卫星计划相合并,发展建立起KH卫星计划。KH系列卫星型号从KH-1发展到KH-12,根据装载的仪器类型可分为3代侦察卫星。第1代照相侦察卫星KH-1~6,类型为胶片返回式照像侦察卫星,装载有全景相机,工作寿命短,分辨率低。第2代照相侦察卫星KH-7~10,在第1代的基础上额外装载了红外扫描仪和多光谱扫描仪,工作寿命及分辨率均有提高。第3代照相侦察卫星KH-11和KH-12,类型为数字成像无线电传输卫星,具备数据实时传输功能,工作寿命及分辨率进一步提升^[5-6]。

本文使用的KH-9卫星是由美国中央情报局

收稿日期:2019-09-04

项目资助:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0901);国家自然科学基金(41874020);国家重点研发计划(2017YFC1500101);广东省引进创新科研团队——环南海地质过程与灾害创新团队(2016ZT06N331)。

第一作者:卢乐浚,博士生,研究方向为构造大地测量。luj8@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者:周宇,博士,教授。zhouyu36@mail.sysu.edu.cn

于1965年计划研发的,用于替代将要退役的KH-4卫星。KH-9卫星于1971—1986年间共发射了20次,轨道高度为171 km,其中最后一次发射失败。该卫星是一颗可回收胶卷舱的卫星,卫星将相机拍摄到的胶卷影像存储到回收舱中,最终由回收舱将卫星影像运送回地球^[7]。

在1973—1980年服役期间,KH-9卫星共完成12次制图任务(任务编号1 205~1 216)^[8]。KH-9卫星使用框幅式相机进行拍摄,总共收集到29 000幅地面分辨率为6~9 m的黑白图像用于制图,每一幅图像覆盖的地面面积为125 km×250 km,拍摄区域基本覆盖了整个地球^[9]。2011-09-17,美国国家侦察局将受严密保护的KH-9卫星影像资料公开,并将KH-9卫星在美国航空航天博物馆停车场向公众展示一天,以此纪念美国国家侦察局建局50周年^[10]。在KH-9卫星的公开资料中,用于制图的相机参数并没有详细给出。经美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)扫描影像后对比实验发现,该摄影机与美国航空航天局的大像幅相机相似,使用的胶卷尺寸为23 cm×46 cm,镜头焦距为30.5 cm^[11]。

2 光学影像匹配提取地震形变方法

基于KH-9影像估算地震同震位移的步骤包括影像获取、影像配准、正射校正、影像匹配,其流程如图1所示。

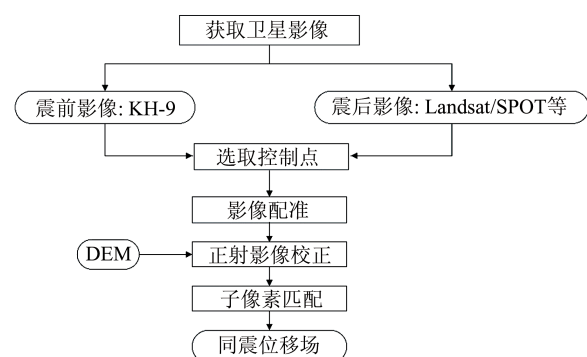


图1 利用光学影像获取同震位移场流程图

Fig.1 Flowchart of Estimating Earthquake Displacements Using Optical Imagery

1) 影像获取。震前的KH-9影像可以通过USGS EarthExplorer网站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)以30美元每幅的价格购买^[12]。震后影像可根据需求使用免费的Landsat 8影像或购买SPOT、WorldView等高分辨率影像。

2) 影像配准。由于不同影像的成像条件不同(如成像时间、成像视角、传感器等),影像间的坐标系统存在差异,尤其是KH-9影像未经过几何校正和地理编码,因此在进行影像匹配前,需要利用控制点对影像进行匹配。由于靠近震中位置地表形变大,控制点选取应远离震中。通过在震前和震后影像中选取足够的同名点,计算影像间的映射函数^[13],进而对KH-9影像进行校正,完成对震前KH-9影像与震后影像的配准。

3) 正射校正。卫星影像在成像过程中由于地面高程、大气折射以及地球曲率等因素影响,会造成影像发生不同程度的几何畸变失真。正射校正的作用是消除成像过程中由于地形起伏、高程变化引起的畸变,使得输出的正射校正影像为平面真实影像^[14]。

4) 影像匹配。由于大部分地震造成的形变量小于KH-9影像的分辨率,利用KH-9影像测量同震位移时需要达到亚像素级。为了保证精度,影像匹配通常在频率域进行^[15]。

首先提取同一区域震前 i_1 及震后 i_2 两幅正射校正后的卫星影像。以卫星的质心为原点(O)建立空间坐标系(XYZ), Y 轴为卫星运动方向, Z 轴由地球质心指向卫星方向, X 轴为 YOZ 平面的垂线方向,计算两幅影像的空间位移量:

$$i_2(x, y) = i_1(x - \Delta_x, y - \Delta_y) \quad (1)$$

式中, (x, y) 表示影像像素坐标; Δ_x 表示 X 轴上的位移量; Δ_y 表示 Y 轴上的位移量。代入以下等式关系:

$$I_2(\omega_x, \omega_y) = I_1(\omega_x, \omega_y) e^{-j(\omega_x \Delta_x + \omega_y \Delta_y)} \quad (2)$$

式中, I_1 和 I_2 分别表示震前和震后影像的傅里叶变换函数; ω_x 和 ω_y 分别表示列与行的频率变量。将正射校正后的震前和震后影像进行傅里叶变换,从空间域转换到频率域,并代入下式计算:

$$C_{i_1 i_2}(\omega_x, \omega_y) = \frac{I_1(\omega_x, \omega_y) I_2^*(\omega_x, \omega_y)}{|I_1(\omega_x, \omega_y) I_2^*(\omega_x, \omega_y)|} = e^{j(\omega_x \Delta_x + \omega_y \Delta_y)} \quad (3)$$

式中, $C_{i_1 i_2}(\omega_x, \omega_y)$ 表示交叉谱;*表示复共轭运算。通过计算交叉谱的相位得到像素的相对位移,运用傅里叶反函数 F^{-1} 得到相关匹配方程:

$$\delta(x + \Delta_x, y + \Delta_y) = F^{-1} \left\{ e^{j(\omega_x \Delta_x + \omega_y \Delta_y)} \right\} \quad (4)$$

式中, δ 表示待匹配窗口与匹配窗口的相关系数,用于衡量影像匹配的可靠性。若得到互相关匹配系数 δ 大于设定的阈值,相应的 Δ_x 和 Δ_y 即为估算的地表形变。

3 70~90 年代历史地震研究实例

目前,有学者利用 KH-9 影像对全球两例 70 年代地震进行了定量研究,即 1978 年伊朗 Tabas-e-Golshan 地震^[3]和 1979 年伊朗 Khuli-Boniabad 地震^[4],如图 2 所示。

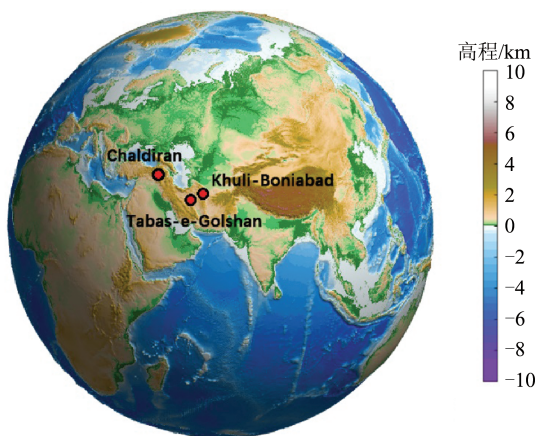


图 2 基于 KH-9 影像研究全球历史地震的分布图
Fig.2 Distribution Map of Global Historical Earthquakes that Have Been Studied Using KH-9 Imagery

3.1 1978 年伊朗 Tabas-e-Golshan 地震

1978-09-16,伊朗东部 Tabas 地区发生 Mw 7.3 级地震,震中位置为(54.7°E, 32.4°N),是由盲逆断层导致的^[16-19]。震后野外调查发现 85 km 长的破裂带,测量到的单一破裂带上的最大同震滑移量仅为 35 cm^[20]。此次 Mw 7.3 级 Tabas-e-Golshan 地震的同震滑移量到底有多大,是一个谜题。

为了估算此次地震的实际滑移量,Zhou 等^[3]获取了覆盖 Tabas 区域的 1974 年 KH-9 影像(震前)和 2013 年 SPOT-6 影像(震后)。基于§2 描述的方法,Zhou 等^[3]获取了地震的形变场(图 3(a)),计算得到 1974—2013 年间 Tabas 逆断层东西向缩短约 3.4 m(图 3(b)),反演结果表明,这一缩短量反映了断层面上约 7 m 的滑动。Tabas 地区同时发育了两级河流阶地,通过河流阶地的高程剖面反演,Zhou 等^[3]发现 Tabas 断层显示出特征地震的行为,每次地震滑移量均为 7 m。考虑到 Tabas 断层的地质滑动速率为 1 mm/a,该地区地震复发周期约为 3 500 a。

3.2 1979 年伊朗 Khuli-Boniabad 地震

1979-11-27,伊朗东北部南霍拉桑省 Koli 村庄发生 Mw 7.1 级地震^[4]。Khuli-Boniabad 地震形成了震区中 65 km 长的东西向地表破裂,据野外调查,观测到震区内最大水平位移量为 2.55 m,最大垂直位移量为 3.80 m^[21]。

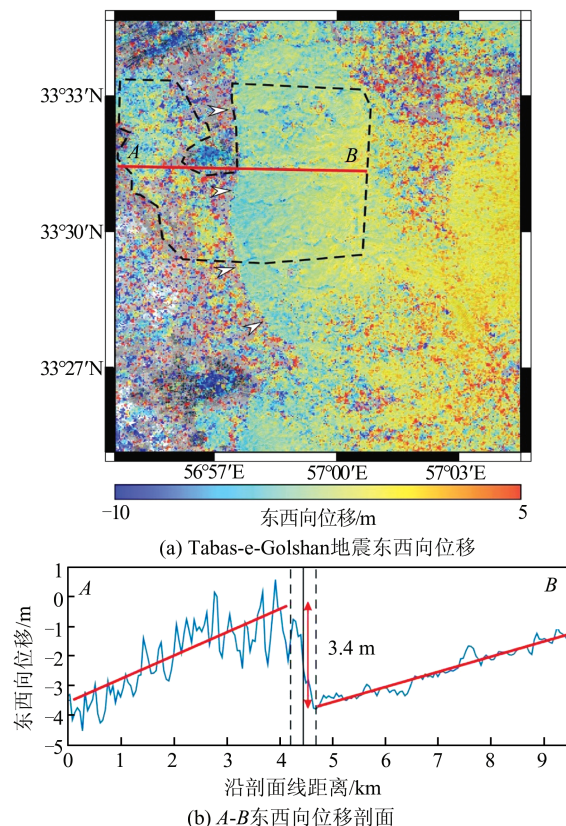


图 3 1978 年伊朗 Tabas-e-Golshan 地震东西向位移场图^[3]

Fig.3 E-W Displacement of the 1978 Tabas-e-Golshan Earthquake, Iran^[3]

Marchandon 等^[4]利用 1976 年 KH-9 影像(震前)和 2017 年 Sentinel-2 影像(震后)的匹配,获取了 Khuli-Boniabad 地震的形变场。结果显示,该地震在地表处形成了一条东西向的破裂痕迹,图 4 中 A-B 段、B-C 段、C-D 段的断层走向(断层迹线与北方向的夹角)分别为 65°N、85°N、81°N,D-F 段破裂不明显,而 F 处西端弯曲至 160°N。P₁ 东西向位移剖面显示,断层位移量为(4.92±0.73) m。

4 1976 年土耳其 Chaldiran 地震

1976-11-24 14:00,土耳其东部城市范市(Van)发生 Mw 7.3 级地震,其中损害最严重的地区为 Chaldiran 城镇。据 USGS 的震源数据分析显示,该次地震震中位置为(44.02°E, 39.10°N)。美国国家科学院的地震报告分析指出,该地震是由 NW-SE 右旋走滑断层运动所引起的,而该断层在地震前并未被发现^[22]。

4.1 震区构造背景

土耳其东部与伊朗西北部相接壤,位于东安纳托利亚高原,处于欧亚板块和阿拉伯板块持续

碰撞的复杂交接地带,地质构造复杂。该交接地带分布着多个子块体,其中伊朗板块、高加索板块夹持于两大板块之间,且与相接板块交互作用,构成Zagros褶皱俯冲带。该地带的形成主要与中新世中期新特地斯洋的向北俯冲及消亡有关^[23]。

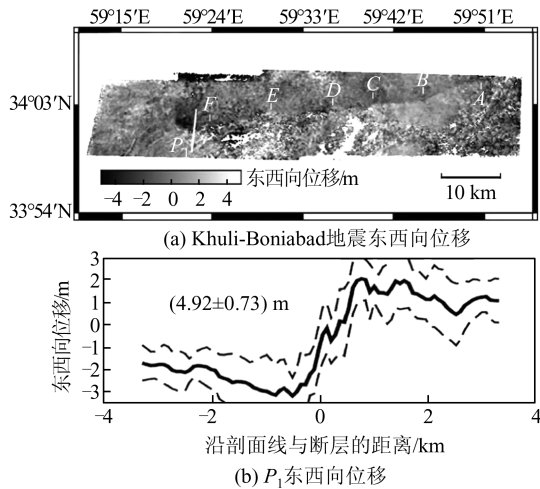


图4 1979年伊朗Khuli-Boniabad地震东西向位移场图^[4]
Fig.4 E-W Displacement of the 1979 Khuli-Boniabad Earthquake, Iran^[4]

Chaldiran走滑断层位于高加索板块的南缘,与伊朗板块的交接位置也处于Zagros褶皱俯冲带上,在地震发生前未被发现。基于GPS数据和弹性板块模型,Reilinger等^[24]计算得到了伊朗板块、高加索板块、阿拉伯板块分别以相对于欧亚板块约16 mm/a、13 mm/a、15 mm/a的速度向北运动(图5),速度差异导致两个板块交接处发生NW-SE向伸展,形成右旋走滑断层,从而引发本次地震。

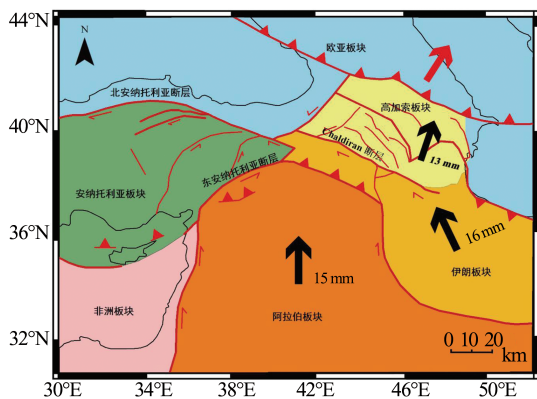


图5 中东地区活动构造图^[23]
Fig.5 Active Tectonic Map of the Middle East^[23]

据统计,Chaldiran地震共造成约3 800人死亡,9 000余间建筑严重坍塌,10 000余间建筑不

同程度的破坏,破坏性极强^[22]。该走滑断层的破裂在地表延伸长为55 km,顺破裂轨迹中西侧走向为N70°W,在Chaldiran东侧破裂有一定弯曲,走向变为N45°W。破裂轨迹西端延伸至西侧山脉处突然消失,东端地表位移变化逐渐减小,至伊朗边界处消失,可能在底下有继续延伸趋势。通过测量道路、河床、车辆轨迹等得到横向位移约200~250 cm,部分地区横向位移达370 cm^[22,25-26]。

4.2 数据与结果

为获取Chaldiran地震的同震位移,从USGS购买了1976-07-27(震前)和1980-07-27(震后)的KH-9影像,同时下载了1幅2014年的Landsat 8影像用于影像匹配(表1)。首先,分别在两幅KH-9和Landsat 8影像上选取15个同名点,利用同名点在Landsat 8影像上已知的空间坐标计算两幅KH-9影像的外方位元素;然后利用30 m分辨率的ALOS World 3-D DEM对两幅KH-9影像进行正射校正,恢复影像真实的地理坐标;最后使用COSI-Corr软件对两幅正射校正后的KH-9影像进行子像素匹配,匹配窗口定为32×32像素,窗口移动步长定为8×8像素,得到位移场,如图6所示。

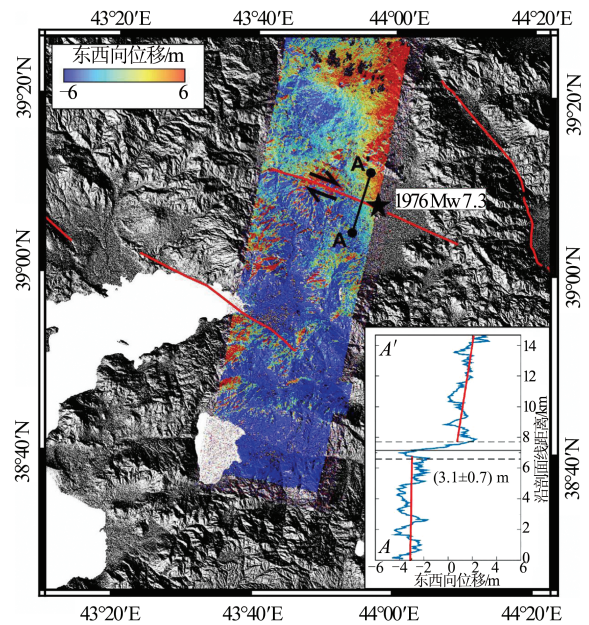


图6 1976年土耳其Chaldiran地震东西向位移场图
Fig.6 E-W Displacement of the 1976 Chaldiran Earthquake, Turkey

在靠近震中位置取剖面A-A',跨断层处位移剖面出现了明显的错动;用直线拟合断层两侧的位移,得到断层上东西向的位错约为(3.1±0.7) m。断层走向近东西,因此走滑量基本上表现为

东西向位移。利用 KH-9 影像测得的断层位错 (3.1 ± 0.7) m 反映的是地表以下的断层滑动,与 Toksöz 等^[25]野外测量的地表走滑位移量(最大 370 cm)相符,说明该地震不存在同震浅层滑动亏损的现象。

表 1 Chaldiran 地震研究所使用的影像数据
Tab.1 Images Data Used for the 1976 Chaldiran Earthquake

统计项	震前影像	震后影像	
	KH-9	KH-9	Landsat 8
时间	1976-07-27	1980-07-27	2014-08-13
相机类型	框幅式	框幅式	推扫式
分辨率/m	6~9	6~9	15
焦距/cm	30.5	30.5	243.8

5 总结与展望

利用 KH-9 影像为研究 70~90 年代历史地震带来了新的机遇。本文对 KH-9 影像处理方法和目前已取得的研究成果(包括 1978 年 Tabas-e-Golshan 地震和 1979 年 Khuli-Boniabad 地震)进行了梳理,同时将 KH-9 影像应用到 1976 年土耳其 Chaldiran 地震的研究中,获取了同震位移(约为 (3.1 ± 0.7) m),与野外调查的地表位错吻合,验证了该方法的可靠性。

然而,KH-9 影像用于历史地震的研究也具有一定的局限性,例如:①部分 KH-9 影像在扫描过程中产生了非常严重的扫描畸变,这一畸变主要在南北向,表现为规则的跳变^[3],如图 7 所示。因此目前对历史地震的研究都以东西方向为主,南北方向的形变分量基本可忽略。②KH-9 影像分辨率不高,约为 6~9 m(取决于数字化过程中的扫描分辨率),现有影像匹配算法的精度约为 1/10 个像素,所以基于 KH-9 影像的匹配精度约为 0.9 m,KH-9 影像仅能用于同震位移超过此量级的地震。根据 Wells 等^[27]的地震定标律:

$$M = 6.93 + 0.82 \lg D \tag{5}$$

可以计算出 KH-9 影像适用的最小地震震级为 Mw 6.9。式(5)中,M 表示地震矩震级;D 表示平均地表位移,单位为 m。考虑到扫描畸变的影响,KH-9 影像可能仅适用于 Mw 7 级以上的大地震。

对于全球 70~90 年代 Mw 7 级以上的大地震(例如 1976 年唐山地震),可以利用 KH-9 影像定量估算同震位移,同时结合干涉合成孔径雷达数据观测可能的震后效应或震间应变积累过程,从而完善对地震周期形变的认识和理解。

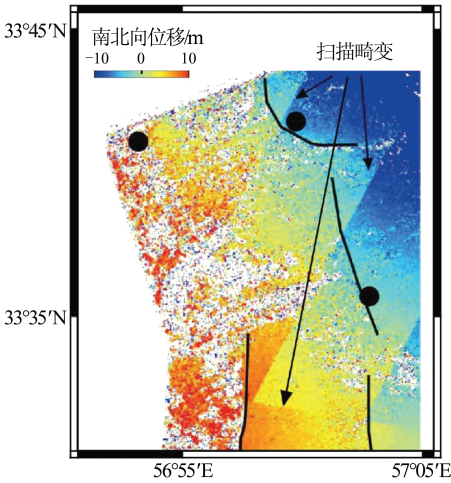


图 7 1978 年伊朗 Tabas-e-Golshan 地震的南北向位移图^[3]

Fig.7 S-N Displacement of the 1978 Tabas-e-Golshan Earthquake, Iran^[3]

参 考 文 献

[1] Zhang P Z. Beware of Slowly Slipping Faults[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(5): 323-324

[2] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. *Nature*, 1993, 364(6 433): 138-142

[3] Zhou Y, Walker R T, Hollingsworth J, et al. Co-seismic and Postseismic Displacements from the 1978 Mw 7.3 Tabas-e-Golshan Earthquake in Eastern Iran [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 452: 185-196

[4] Marchandon M, Vergnolle M, Cavalié O, et al. Earthquake Sequence in the NE Lut, Iran: Observations from Multiple Space Geodetic Techniques[J]. *Geophysical Journal International*, 2018, 215(3): 1 604-1 621

[5] Zhao Qiuyan. Development of American Imaging Reconnaissance Satellites [J]. *OME Information*, 2001(10): 15-23(赵秋艳. 美国成像侦察卫星的发展[J]. 光机电信息, 2001(10): 15-23)

[6] Wang Xin, Zhang Jingfa, Jiang Wenliang, et al. Application of Keyhole Satellite Data in Active Fault Study: A Case Example of Jiangsu Segment of Tan-Lu Fault Zone [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(S1): 233-246(王鑫,张景发,姜文亮,等. 美国锁眼侦察卫星遥感数据在活动断层研究中的应用——以郯庐断裂带江苏段为例[J]. 遥感学报, 2018, 22(S1): 233-246)

[7] Pressel P. Spy in the Sky: The KH-9 Hexagon[J]. *Optics and Photonics News*, 2013, 24(10): 28-35

- [8] Surazakov A, Aizen V. Positional Accuracy Evaluation of Declassified Hexagon KH-9 Mapping Camera Imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2010, 76(5): 603-608
- [9] Burnett M G. Hexagon (KH-9) - Mapping Camera Program and Evolution [M]. Chantilly: Center for the Study of National Reconnaissance(CSNR), 2012
- [10] Guillemette R. Declassified US Spy Satellites Reveal Rare Look at Secret Cold War Space Program [EB/OL]. <http://www.space.com/12996-secret-spy-satellites-declassified-nro.html>, 2011
- [11] Hanes G K. Critical to US Security: The Development of the GAMBIT and HEXAGON Satellite Reconnaissance System [M]. Chantilly: National Reconnaissance Office, 2012
- [12] Fowler M J. The Archaeological Potential of Declassified Hexagon KH-9 Panoramic Camera Satellite Photographs [J]. *AARGnews*, 2016, 53: 30-36
- [13] Yang Shichao. Sub-pixel Offset Tracking Algorithm and Its Application to Detection the Co-seismic Deformation of Real Earthquakes [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015 (杨士超. 子像素偏移追踪算法及其在实际地震同震形变场监测中的应用 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015)
- [14] Sun Jiabing. Principles and Applications of Remote Sensing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009 (孙家柄. 遥感原理与应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)
- [15] Leprince S, Barbot S, Ayoub F, et al. Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1 529-1 558
- [16] Copley A. Postseismic Afterslip 30 Years After the 1978 Tabas-e-Golshan (Iran) Earthquake: Observations and Implications for the Geological Evolution of Thrust Belts [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 197(2): 665-679
- [17] Li Huaiying. The Reports and Comments About the September 16th, 1978 Tabas, Iran Earthquake from Foreign News [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 1979, 5: 4-6 (李怀英. 外电外刊对1978年9月16日伊朗塔巴斯地震的有关报道及评论 (综合汇编) [J]. 国际地震动态, 1979, 5: 4-6)
- [18] Walker R, Jackson J, Baker C. Surface Expression of Thrust Faulting in Eastern Iran: Source Parameters and Surface Deformation of the 1978 Tabas and 1968 Ferdows Earthquake Sequences [J]. *Geophysical Journal International*, 2003, 152(3): 749-765
- [19] Ibrion M, Mokhtari M, Nadim F. Earthquake Disaster Risk Reduction in Iran: Lessons and “Lessons Learned” from Three Large Earthquake Disasters—Tabas 1978, Rudbar 1990, and Bam 2003 [J]. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2015, 6(4): 415-427
- [20] Berberian M. Earthquake Faulting and Bedding Thrust Associated with the Tabas-e-Golshan (Iran) Earthquake of September 16, 1978 [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1979, 69(6): 1 861-1 887
- [21] Nowroozi A A, Mohajer-Ashjai A. Fault Movements and Tectonics of Eastern Iran: Boundaries of the Lut Plate [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1985, 83(1): 215-237
- [22] Gulkan P, Gurpinar A, Celebi M, et al. Engineering Report on the Muradiye-Çaldıran, Turkey, Earthquake of 24 November 1976 [M]. Washington D C: National Academy of Sciences, 1978
- [23] Selçuk A S, Erturaç M K, Nomade S. Geology of the Çaldıran Fault, Eastern Turkey: Age, Slip Rate and Implications on the Characteristic Slip Behaviour [J]. *Tectonophysics*, 2016, 680: 155-173
- [24] Reilinger R, McClusky S, Vernant P, et al. GPS Constraints on Continental Deformation in the Africa-Arabia-Eurasia Continental Collision Zone and Implications for the Dynamics of Plate Interactions [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B5): B05411
- [25] Toksöz M N, Arpat E, Şaroglu F. East Anatolian Earthquake of 24 November 1976 [J]. *Nature*, 1977, 270(5 636): 423-425
- [26] Toksöz M N, Nábělek J, Arpat E. Source Properties of the 1976 Earthquake in East Turkey: A Comparison of Field Data and Teleseismic Results [J]. *Tectonophysics*, 1978, 49(3-4): 199-205
- [27] Wells D L, Coppersmith K J. New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(4): 974-1 002

Extracting Surface Displacements of Historical Earthquakes Using KH-9 Satellite Images: A Case Example of 1976 Chaldiran Earthquake, Turkey

LU Lejun¹ ZHOU Yu¹

¹ Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Surface ruptures and deformation of large earthquakes are important for investigating earthquake mechanisms, fault activities and continental deformation. With the improvement of satellite techniques, optical and radar images have been widely used in earthquake studies since the 1992 Landers earthquake. However, due to a lack of pre-earthquake images, historical earthquakes prior to the 1990s are rarely studied. Recent declassification of American KeyHole (KH) satellite images opened up new possibilities of investigating old earthquakes back to the 1970s. Researchers have successfully applied KH-9 images to the 1978 Tabas-e-Golshan and 1979 Khuli-Boniabad earthquakes in Iran, and gained some new insights into fault behaviours. We first provided a review of the methodology and progresses of using KH-9 images to measure earthquake deformation, then investigated the 1976 Chaldiran, Turkey earthquake by matching the pre- and post-earthquake KH-9 images, and obtained an E-W displacement of about (3.1 ± 0.7) m (i.e. strike-slip), consistent with the measurements in the field. KH-9 imagery provides a new means of investigating historical earthquakes in detail, but there are some limitations. These limitations are briefly discussed in the end.

Key words: KH-9 satellite images; image matching; earthquake displacements; 1976 Chaldiran earthquake of Turkey

First author: LU Lejun, PhD candidate, specializes in tectonic geodesy. E-mail: lulj8@mail2.sysu.edu.cn

Corresponding author: ZHOU Yu, PhD, professor. E-mail: zhouyu36@mail.sysu.edu.cn

Foundation support: The Second Tibetan Scientific Expedition and Research Program (STEP) (2019QZKK0901); the National Natural Science Foundation of China (41874020); the National Key Research and Development Program of China (2017YFC1500101); Guangdong Province Introduced Innovative Research and Development Team of Geological Processes and Natural Disasters Around the South China Sea (2016ZT06N331).

引文格式: LU Lejun, ZHOU Yu. Extracting Surface Displacements of Historical Earthquakes Using KH-9 Satellite Images: A Case Example of 1976 Chaldiran Earthquake, Turkey[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2): 289–295. DOI: 10.13203/j.whugis20190071 (卢乐浚, 周宇. 利用锁眼卫星影像提取历史地震同震位移——以 1976 年土耳其 Chaldiran 地震为例[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(2): 289–295. DOI: 10.13203/j.whugis20190071)

(上接第 269 页)

data simulation

First author: ZHAO Zhibo, master, specializes in LEO-augmented GNSS and ionospheric modeling. E-mail: zbzhao@whu.edu.cn

Corresponding author: REN Xiaodong, PhD. E-mail: renxiaodongfly@gmail.com

Foundation support: The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (41825009); the Youth Program of National Natural Science Foundation of China (41904026); the Wuhan Science and Technology Project (2018010401011270).

引文格式: ZHAO Zhibo, REN Xiaodong, ZHANG Xiaohong, et al. Regional Ionospheric Modeling and Accuracy Assessment Using GNSS/LEO Satellites Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2): 262–269, 295. DOI: 10.13203/j.whugis20190252 (赵智博, 任晓东, 张小红, 等. 联合 GNSS/LEO 卫星观测数据的区域电离层建模与精度评估[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(2): 262–269, 295. DOI: 10.13203/j.whugis20190252)