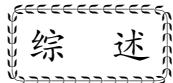


陈立泽, 申旭辉, 王辉, 洪顺英, 荆凤. 2016. 我国高分辨率遥感技术在地震研究中的应用. 地震学报, 38(3): 333-344. doi:10.11939/jass.2016.03.002.

Chen L Z, Shen X H, Wang H, Hong S Y, Jing F. 2016. Application of high-resolution remote sensing technique to earthquake studies in China. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 333-344. doi:10.11939/jass.2016.03.002.



我国高分辨率遥感技术在 地震研究中的应用^{*}

陈立泽^{1,†} 申旭辉² 王 辉¹ 洪顺英¹ 荆 凤¹

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

摘要 本文概述了我国高分辨率遥感技术在地震监测预报、灾害预防和应急救援防震减灾三大业务体系中的应用现状, 重点介绍了“高分遥感地震监测与应急应用示范”项目的进展。该项目针对防震减灾业务体系发展的应用需求, 在整合地震行业现有技术和资源的基础上, 突破了高分辨率对地观测系统卫星遥感数据在地震构造调查、地震监测和地震应急救援等方面应用的关键技术, 制定行业应用规范, 建设高分遥感地震业务应用示范系统, 并开展应用示范。该项目的成功实施, 使得我国高分辨率遥感技术在地震中的应用从以往分散的科学研究所提升到一个业务化应用的状态, 从而能更加有效地服务于防震减灾工作。

关键词 高分辨率 遥感 地震构造调查 地震监测 地震应急救援

doi:10.11939/jass.2016.03.002 中图分类号: P315.7 文献标志码: A

Application of high-resolution remote sensing technique to earthquake studies in China

Chen Lize^{1,†} Shen Xuhui² Wang Hui¹ Hong Shunying¹ Jing Feng¹

1) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract: This paper summarizes current applications of high-resolution remote sensing technique to earthquake monitoring and prediction, earthquake disaster prevention, and earthquake disaster emergency response for earthquake disaster mitigation in China, especially focuses on progress of the project about application of high-resolution remote sensing to earthquake monitoring and emergency response. To meet the requirements of earthquake disaster mitigation, the techniques and resources in China Earthquake Administration (CEA) are inte-

* 基金项目 高分辨率对地观测系统重大专项(31-Y30B09-9001-13/15)资助。

收稿日期 2015-10-26 收到初稿, 2016-01-22 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: chenlize@hotmail.com



grated to solve the key problems of applying high-resolution remote sensing data acquired by China High-Resolution Earth Observation System (CHEOS) to seismotectonic investigation, earthquake monitoring, and emergency response. Application criteria are formulated, an application system is constructed for earthquake professional work, and practical work is carried out at test sites. With the successful implement of the project, the application of high-resolution remote sensing to earthquake science is promoted from individual researches to systematic practices, providing better services for earthquake disaster mitigation in China.

Key words: high-resolution; remote sensing; seismotectonic investigation; earthquake monitoring; earthquake emergency response

引言

遥感作为一门综合技术兴起于 20 世纪 60 年代, 经历了航空遥感、卫星遥感等发展阶段。随着航天技术、传感器技术和计算机技术的飞速发展, 遥感技术在 20 世纪后期发展迅猛, 其中可见光、红外和雷达遥感技术等日渐成为地球科学研究的重要手段。进入 21 世纪, 在轨运行的对地观测卫星数量成倍增加, 其类型也日益多样化, 对地观测卫星的时间、空间和光谱分辨率越来越高, 标志着遥感技术进入了一个高分辨率遥感时代。高分辨率遥感技术不仅在地球科学领域得到了广泛应用, 而且随着定位和地图服务的普及, 也逐渐走进了大众生活。

地震预测作为一个世界性的科学难题, 在彻底掌握地震孕育和发生机理之前, 通过不同的手段对地震进行全方位的观测和研究显得尤为重要。遥感技术具有成像快速、获取图像范围大、受地面条件影响小等特点, 在地震观测和震例数据获取方面有着独特的优势。我国早在 20 世纪 70 年代末已开始使用遥感技术进行地震应用研究, 并且对遥感技术在地震研究中的应用提出了展望, 认为遥感技术在区域地震地质和强震构造研究、地震红外辐射和地下流体及电磁辐射变化监测、震害调查及地震专题图制作等方面的应用前景广阔(张海根, 1981)。随后, 我国遥感地震应用研究百花齐放, 在遥感地震构造解译、遥感地震红外异常监测、利用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, 简写为 InSAR)法进行同震形变监测及遥感地震灾害损失评估等方面取得丰硕的成果(强祖基等, 1990; 单新建等, 2002; 王晓青等, 2003; 付碧宏等, 2006)。

2010 年 5 月, 经国务院常务会审议批准, 我国正式启动了高分辨率对地观测系统重大专项, 计划发射一系列高空间分辨率和高时间分辨率的光学卫星、雷达卫星和高光谱卫星, 在 2020 年前建立起自主的高空间、高时间和高光谱分辨率的对地观测系统, 全面提升我国自主获取高分辨率观测数据的能力, 加快我国空间信息应用体系的建设, 推动卫星及应用技术的发展。地震行业以此为契机, 在多年研究积累的基础上, 对行业内部现有的队伍和资源进行整合, 启动了“高分遥感地震监测与应急应用示范”项目, 以突破高分卫星遥感数据在地震中的应用水平, 提高我国防震减灾能力。

1 高分辨率遥感技术在地震灾害预防中的应用

地震灾害预防是防震减灾三大业务工作体系之一, 在防震减灾整体工作中占有非常重

要的地位, 旨在对活动构造与地震构造识别和研究的基础上, 通过工程抗震设防和政策法规等措施, 减轻未来可能发生的破坏性地震所造成的损失。遥感技术作为一种高效的探测手段在活动构造与地震构造识别和研究中发挥着重要作用。

1.1 光学遥感活动构造调查

早期国内开展的活动构造研究使用的遥感数据多为航空遥感数据和中低分辨率的卫星数据。从1978年开始, 我国利用美国陆地资源卫星Landsat多光谱扫描仪获得的数据及大量的航空照片, 开展了全国范围内的活动构造调查研究工作, 并于20世纪80年代早期编制完成了1:400万的《中国卫星影象地震构造判读图》(国家地震局地质研究所, 地震研究所, 1980)和《中国活动构造典型卫星影象集》(国家地震局地震研究所, 国家地震局地质研究所, 1982)。由于所使用的数据分辨率较低, 成果只反映了我国主要的构造格局, 对局部的构造和构造细节研究程度不够。20世纪末期, 诸多研究人员使用Landsat卫星专题制图仪(thematic mapper, 简写为TM)和增强型专题制图仪(enhanced thematic mapper, 简写为ETM)获取的中低分辨率数据在活动断裂空间展布的解译和提取方法上作了大量的研究工作, 成果主要集中在断裂带识别标志的分析总结以及遥感图像增强处理技术等方面(Philip, 1996; Phillips *et al*, 1999; Robinson *et al*, 2000)。

2001年昆仑山M_s8.1地震发生后, 我国开始大量使用高分辨率卫星影像进行活动构造研究, 所使用的数据主要来源于国外的Ikonos, QuickBird, Spot, GeoEye及IRS等卫星。研究工作一方面是利用影像进行线性构造提取, 获取活动断裂的空间展布和规模; 另一方面是基于影像对活动构造变形参数进行定量分析和提取, 分析断层的活动性质、活动特征以及活动时代。例如: 付碧宏等(2006)利用IRS高分辨率遥感数据和航天飞机雷达地形测绘使命获取的数字高程模型数据对康西瓦断裂第四纪构造活动及地貌特征进行了研究, 认为该断裂晚第四纪经历了强烈的左旋走滑活动, 并根据不同年代地表地貌特征的位错量, 估算了该断裂第四纪以来的长期走滑速率; 刘华国等(2011)利用IRS-P5像对和GeoEye-1影像对柯坪推覆构造的近地表地层产状进行了定量提取, 结合区域地质图和石油地震反射剖面等资料给出了完整的地质剖面, 为了解柯坪推覆构造的活动情况提供了重要资料。

国产高分辨率卫星发展相对较晚, 而且在分辨率和图像质量上与国外卫星比较还存在一定差距, 因此, 基于国产高分辨率卫星数据开展活动构造的研究也相对较少。但是, 已有研究表明, 国产高分辨率数据能有效应用于1:5万填图和活动构造的定量研究中(徐岳仁等, 2011)。2014年新疆于田发生M_s7.3地震, 徐岳仁等(2015)利用高分辨率对地观测系统高分一号卫星获取的高分辨率光学遥感影像对同震地表破裂带进行了提取, 并识别了发震构造, 这是我国首次成功地使用国产卫星在震后快速获取同震地表破裂带, 反映了国产高分辨率卫星数据在地震构造中的应用前景颇为乐观。

1.2 雷达遥感活动构造调查

雷达遥感对线性物体反映敏感, 而且具有一定的穿透能力, 对活动构造中的线性构造和浅层隐伏构造探测具有独特的优势, 逐渐被运用于活动构造调查中。我国雷达构造探测研究始于20世纪晚期, 郭华东(1986)在对巴丹吉林沙漠的阿拉腾敖包地区的雷达图像分析中证实了雷达对沙的穿透性, 郭华东等(1997)在航天成像雷达-C/X波段合成孔径雷达(synthetic aperture radar, 简写为SAR)图像上清晰地识别出昆仑山山前地带的褶皱构

造。随后,中低分辨率的卫星雷达数据开始大量使用。高分辨率的商业卫星雷达数据则在21世纪才出现,主要有Radarsat-2,Cosmo-Skymed和TerraSAR等,但是数据价格昂贵,获取难度大,实际应用远不如中分辨率的ERS-1/2和ALOS等卫星。由于SAR图像在数据处理和构造识别方面比光学图像要复杂,所以在应用时通常采用光学遥感与雷达遥感相结合的方式,保留光学遥感的光谱特性和雷达遥感的纹理特征,这样更有利构造的识别。张微等(2007)使用Landsat卫星ETM数据和Radarsat数据对杭州的城市活断层进行了解译分析,认为在第四纪松软沉积物覆盖区,雷达影像对隐伏构造的识别有一定作用。

国产民用雷达卫星研制进度比较缓慢,在分辨率和图像质量方面也与国外商业雷达卫星差距很大,因此在地震行业中很少应用。高分辨率对地观测系统的高分三号卫星即将发射,将为开展雷达遥感活动构造调查提供可靠的数据源。

2 高分辨率遥感技术在地震监测中的应用

地震监测包括对与地震活动相关的地球物理场和地球化学场的监测,通过对监测信息的分析,提取地震前兆异常信息,为地震预报提供依据。遥感具有成像快、监测范围大、受地面条件影响小等优势,已成为地震监测非常重要的手段。现在使用较多的有卫星红外监测和InSAR形变监测,卫星高光谱技术作为一种新兴手段也开始用于断层溢出气体的监测。

2.1 红外遥感地震监测

20世纪80年代,国内外研究人员利用卫星红外开展地震研究,分析卫星红外亮温增温异常与地震时、空、强三要素的关系(Gornyi *et al*, 1988; 强祖基等, 1990),并对卫星红外增温的异常机制进行了试验研究(强祖基等, 1997)。之后,利用红外进行地震预测的研究和报道越来越多,特别是对台湾地区集集 $M_w7.6$ 、昆仑山 $M_s8.1$ 、苏门答腊岛 $M_s8.7$ 等大地震的红外辐射,采用不同的方法和参量对其特征进行了研究(徐秀登等, 2000; 康春丽等, 2003; 刘德富, 康春丽, 2005; 陈梅花等, 2006; 孟庆岩等, 2014)。结果显示,在地震发生之前,震源区附近大多出现了较为显著的辐射异常现象,而且这种辐射异常能够从卫星遥感技术所获取的反映大范围地表热辐射场的动态演化参数(亮温、长波辐射通量及潜热通量)中予以识别,对地震预测有一定的指示意义。目前,地震红外异常监测已作为一种常规手段应用于地震会商,为地震预测提供参考。

目前开展的红外遥感地震研究主要以NOAA卫星数据和中分辨率成像光谱仪数据为主,数据空间分辨率为1 km左右,反演的长波辐射数据产品和潜热通量数据产品的最高精度仅可达 $1^\circ \times 1^\circ$ 。无论在时间分辨率还是空间分辨率上,均未达到高分辨的标准,这样的数据精度显然难以满足地震预报的需求。高分辨率对地观测系统中的高分四号卫星能连续获取分辨率优于400 m的红外数据,这将为红外遥感地震监测应用提供新的机遇和挑战。

2.2 InSAR形变监测

Massonnet等(1993)对ERS-1数据进行干涉处理,成功获得了Landers地震的同震位错形变,并发现了一些地表难以探测到的特征,引起了科学界对InSAR技术的极大兴趣,该技术迅速发展成为一种地表形变测量的常用手段。我国研究人员利用InSAR技术成功获得了张北—尚义地震的同震形变场(王超等, 2000),并且对震源破裂特征进行了分析

(单新建等, 2002). 在之后发生的大地震中, 只要能获取震前震后的干涉雷达像对, 即可开展同震形变干涉测量, 且形变测量精度也越来越高. InSAR 应用不只局限于同震形变的获取, 还可以利用获取的形变特征反演震源参数, 并利用改进后的 InSAR 技术对震前、震后乃至断裂带上微弱的形变进行监测, 进而分析构造活动与地震之间的关系.

我国尚未发射干涉雷达卫星, 开展 InSAR 形变监测完全依赖于国外的雷达卫星, 数据获取周期长、价格昂贵, 严重制约了我国震后形变场的获取能力和 InSAR 形变监测的发展. 高分辨率对地观测系统高分三号卫星能获取米级分辨率的雷达图像, 但不具备干涉测量能力, 我国的干涉雷达卫星要在“十三五”国家空间信息基础设施建设中才有望实现.

2.3 高光谱断层溢出气体监测

在地震活跃地区, 有大量 H_2O , CH_4 , CO_2 , CO 等痕量气体组分沿断层向地表溢散, 导致地表大气的组分发生变化, 这种断层溢出气体对地震响应敏感. 大量研究表明, 利用热红外谱段的高光谱卫星遥感数据可以对痕量气体组分进行识别和反演(Frankenberg *et al*, 2005; Ouzounov *et al*, 2007; Clarisse *et al*, 2011). 我国利用卫星高光谱传感器观测断层溢出气体的研究尚处于试验阶段, 通过对具体震例分析, 认为利用卫星高光谱遥感数据可以获取地震前后 CO , O_3 和水汽等气体组分浓度的变化情况, 并判断其是否出现异常, 这种高光谱遥感气体异常指标可以作为地震监测预报的一种新指标(崔月菊等, 2011; 孙玉涛等, 2014). 但是, 为了提高气体异常识别的能力和精度, 亟需提高高光谱卫星的光谱分辨率和空间分辨率. 高分辨率对地观测系统高分五号卫星作为我国首颗真正的高光谱卫星, 同时携带有专门气体组分探测仪, 为我国的高光谱断层溢出气体监测提供了新的平台.

3 高分辨率遥感技术在地震应急中的应用

地震应急工作包括破坏性地震发生前的应急准备和震后采取的救灾行动. 通常说的地震应急是指震后通过迅速准确地掌握震情灾情, 确定有效的救援行动方案, 从而合理调配各种救灾资源, 减轻灾害损失. 遥感技术在地震应急中的应用主要体现在对地震灾区范围的判定、破坏程度和灾害损失的快速获取等方面, 且应用效果显著.

3.1 光学遥感地震应急

20 世纪 70 年代以来, 我国地震部门和科学院系统有关单位先后对邢台 $M_s7.2$ 、海城 $M_s7.3$ 、唐山 $M_s7.8$ 、龙陵 $M_s7.4$ 和大同 $M_s6.1$ 等破坏性地震的震中区进行了航空遥感摄影和震害判读, 获得了房屋倒塌分级及破坏的分布情况(柳稼航等, 2004). 早期受各种条件限制, 主要采用航空遥感图片进行解译工作. 随着光学遥感卫星分辨率的提高和卫星重访周期的加快, 卫星数据逐渐取代航空遥感数据而成为地震应急工作的主要数据源. 我国遥感地震应急工作经过几十年的发展, 已经形成了地震遥感信息分析与处理系统, 并部署于国家地震应急指挥中心. 2003 年新疆巴楚—伽师 $M_s6.8$ 地震后, 王晓青等(2003)利用航空遥感影像首次完成了地震应急阶段的地震灾害评估工作. 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震发生后, 我国利用国内外多种高分辨率光学可见光影像和航空影像, 开展灾区震害调查, 获得了房屋建筑物和生命线工程损毁、地震次生地质灾害等重要灾情的分布情况(魏成阶等, 2008). 光学遥感数据在地震应急工作中, 特别是在震害范围快速评估、震后救援等方面已经开始发挥重要作用.

2010 年高分辨率对地观测系统重大专项启动后, 我国已经发射了高分一号和高分二号两颗高分辨率光学遥感卫星。“高分遥感地震监测与应急应用示范”项目通过先期攻关研发了高分光学遥感地震应急应用原型系统(窦爱霞等, 2013)。高分卫星数据和原型系统在 2013 年漳县—岷县 $M_s 6.6$ 、2014 年新疆于田 $M_s 7.3$ 、2014 年云南盈江 $M_s 6.1$ 、2014 年云南鲁甸 $M_s 6.5$ 、2014 年云南景谷 $M_s 6.6$ 及 2014 四川康定 $M_s 6.3$ 等 $M > 6.0$ 地震的灾区快速判定、建筑物损毁快速估计、震后道路通行能力评价以及地震次生地质灾害识别等方面发挥了减灾实效。

3.2 雷达遥感地震应急

地震后灾区易形成云、雨等不利于光学遥感成像的天气条件。雷达遥感具有全天时、全天候工作的能力, 能在震后恶劣天气条件下快速地获取震后遥感图像。但是雷达遥感成像复杂, 图像有斑点噪音, 对地物的反映不如光学遥感直接, 给雷达图像解译带来难度, 因此在雷达遥感技术发展早期, 震后应急工作较少用到雷达数据。随着雷达信号处理技术的不断提升, 雷达遥感震害信息自动提取方法也得到快速发展。对于震后单时相数据, 可以根据完好建筑物与倒塌建筑物纹理特征的不同对建筑物震害进行提取(刘斌涛等, 2008), 也可以利用雷达极化信号对地物形状和方向的敏感性来区分完好房屋与倒塌房屋(Guo *et al*, 2009)。对于震前、震后多时相的雷达数据, 可以基于影像的灰度信息和纹理特征, 通过变化检测法来识别建筑物倒塌信息(张景发等, 2002)。雷达图像不仅记录了地物后向散射强度信息, 还记录了相位信息, 因此可以利用建筑物倒塌引起的相位相干性变化对地震损失情况进行评估(Chen *et al*, 2011)。雷达图像尽管不如光学影像直观, 但其信息量丰富, 而且能在震后恶劣天气情况下成像, 这种优势已在汶川地震中得到很好的体现(邵芸等, 2008), 因此利用雷达遥感进行地震应急也越来越受到重视。

2012 年, 我国首颗民用合成孔径雷达卫星环境一号 C 星发射, 其具备空间分辨率 5 m 条带和 20 m 扫描两种成像模式。但由于成像方式、工作模式和分辨率等原因的限制, 该卫星在地震中未能得到很好的应用。高分辨率对地观测系统中的高分三号卫星能获取更高分辨率的雷达数据, 可以为我国雷达遥感应急工作提供稳定的雷达数据源, 在多云、多雨地区的地震应急工作中发挥其独有的优势。

4 “高分遥感地震监测与应急应用示范”项目

高分辨率对地观测系统是《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》(中华人民共和国国务院, 2006)中确定的 16 个重大专项之一。2010 年 5 月 12 日, 国务院常务会议审议通过专项实施方案, 在“十二五”期间, 将发射 6—7 颗不同载荷的高分辨率卫星。通过政府行业部门开展的卫星应用技术攻关和应用示范, 促进各行业遥感应用的业务化, 带动国产遥感数据产业化发展, 最大程度地发挥高分卫星的效益。

中国地震局在高分辨率对地观测系统重大专项的支持下, 启动了“高分遥感地震监测与应急应用示范”项目。该项目将利用我国高分辨率遥感对地观测系统重大专项所提供的高分辨率可见光、红外、高光谱、SAR 等数据和该行业现有的遥感应用资源, 突破高分卫星遥感数据在地震构造调查、地震监测和地震应急救援等方面应用的关键技术, 制定行业应用标准和规范, 建设高分遥感地震业务应用示范系统, 并开展应用示范, 促进遥感地震应用由科学试验型向业务应用型过渡, 提高我国的防震减灾能力。根据卫星研制和发射进

度及地震业务的需求,该项目分3个阶段实施:2011—2012年为先期攻关阶段,2013—2015年为系统一期阶段,2016—2020年为系统二期阶段。

2010年10月,“高分遥感地震监测与应急应用示范先期攻关”项目正式立项。项目初期主要针对高分辨率对地观测系统中的光学卫星数据,进行地震行业应用关键技术的攻关,建立高分光学遥感活动构造调查原型系统和高分光学遥感应急应用原型系统,并具备试运行能力;同时开展遥感地震行业应用中心和区域示范基地建设方案设计。至2012年底,先期攻关阶段任务已经完成。

2013年10月,在先期攻关的基础上,“高分遥感地震监测与应急应用示范系统(一期)”项目正式启动。针对高分三一五号卫星所提供的可见光、红外、高光谱和SAR卫星遥感数据,开展地震行业应用关键技术的攻关;整合现有资源,建立高分遥感应用示范系统;在首都圈、川滇地区、青藏高原东北隅等3个示范区开展典型应用示范,促进高分遥感数据在防震减灾业务中的应用。高分遥感地震监测与应急应用示范系统研制总体方案(图1)可以分为3大部分:①关键技术攻关;②系统建设;③应用示范。

关键技术攻关是基于高分遥感数据和其它辅助数据,突破国产高分遥感数据在地震构

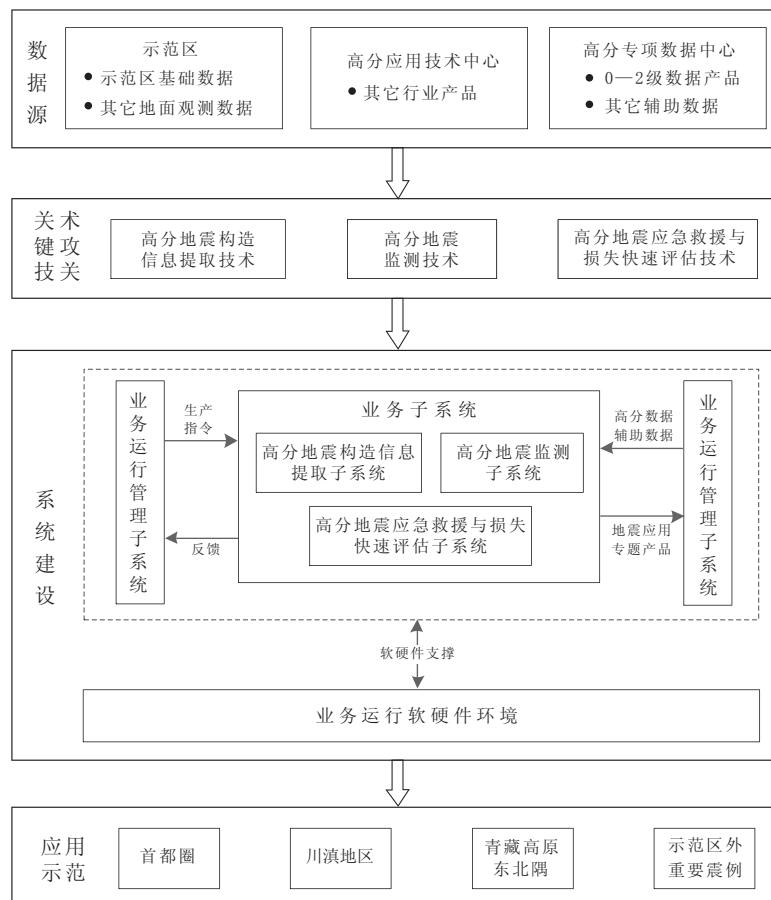


图1 高分遥感地震监测与应急应用示范系统研制总体方案

Fig.1 Framework for the application system of high-resolution remote sensing to earthquake monitoring and emergency response

造提取、地震监测和地震应急中应用的关键技术,制定技术流程,研发基于不同类型遥感数据进行地震构造信息提取、地震异常信息获取、地震应急救援与损失快速评估的功能模块,并设计可应用于业务的专题产品。

系统建设是对关键技术攻关研发的功能模块进行系统化,建立高分地震构造信息提取子系统、高分地震监测子系统和高分地震应急救援与损失快速评估子系统,研制高分遥感业务运行管理子系统,搭建基础支撑平台,通过软硬件系统集成,形成完整的并具有可扩展、可移植能力的高分遥感地震监测与应急应用示范系统,使其具备专题产品生产和分发的能力。

高分地震构造信息提取子系统利用高分一号、二号光学数据开展典型构造地貌特征提取和线性构造提取,利用高分三号雷达数据开展线性构造分析和隐伏构造提取,并利用数字高程模型与光学数据相结合的方式对活动构造进行三维分析和参数的定量提取,分析构造活动特征,编制活动构造图件,进而服务于地震灾害预防业务体系。

高分地震监测子系统利用高分四号和高分五号卫星的红外数据,在构建地震红外背景场的基础上,对我国大陆近10年 $M>5.0$ 地震的红外异常特征进行统计分析,然后采用多分辨率和多波段红外遥感地震监测技术,对地震红外异常特征进行综合分析和提取;另外,利用高分五号卫星的高光谱数据提取气体地球化学异常信息,用于地震监测;利用地震遥感信息挖掘技术将红外参量与高光谱参量进行结合,以探索地震监测预测新指标,进而服务于地震监测业务体系。

高分地震应急救援与损失快速评估子系统利用高分四号静止卫星光学数据快速判定极震区,为国务院抗震救灾指挥中心提供基础资料;同时在极震区判定的基础上,利用高分一号、二号高分辨率光学数据和高分三号高分辨率雷达数据,对建筑物震害、道路通行能力和地震地质次生灾害进行评估;最后根据震害模型进行地震损失定量评估,给出遥感地震烈度分布,进而服务于地震应急救援业务体系。

高分遥感业务运行管理子系统负责上述三大系统的任务调度和监督,同时也负责高分遥感数据和高分地震专题产品的存储管理、共享和分发,进而服务于整个地震行业。

应用示范针对强震频发、政治经济重要且在未来十年内可获得较多的地震试验研究样本的地区展开,选取的示范区有首都圈、川滇地区和青藏高原东北隅。根据示范区地震业务需求,提供高分遥感数据和高分遥感地震监测、地震应急、地震构造调查专题产品,直接服务于相关地区的防震减灾工作。考虑到我国地震的多发性,对中国大陆其它地区 $M>6.0$ 地震的高分遥感应急工作也将纳入示范工作中。

高分遥感地震监测与应急应用示范系统(一期)正处于准备验收阶段。现已完成14项高分遥感地震应用技术的攻关工作,并对所有技术进行流程化、模块化,形成了10个软件模块,以用于高分遥感地震应用专题产品的加工生产;搭建完成了高分遥感地震监测与应急应用示范系统支撑平台。在此基础上,完成了高分地震构造信息提取子系统、高分地震监测子系统、高分地震应急救援与损失快速评估子系统、业务运行管理子系统框架和基本功能的研制,正在集成关键技术研究形成的10个专业模块和先期攻关阶段研制的2个原型系统。在首都圈、青藏高原东北隅两个示范区开展了高分遥感1:25万构造图解译,并对两个示范区内的部分断层开展了1:5万和1:1万的遥感构造解译工作,对项目实施以来发生在我国大陆地区的 $M>6.0$ 地震开展了遥感地震应急工作,且已经发挥实效。图2为基

于高分一号卫星 2 m 全色和 8 m 多光谱数据在 2014 年新疆于田 $M_s7.3$ 地震发生后快速获取的地表破裂带的空间展布和形态, 对发震构造的认识提供了非常重要的资料。

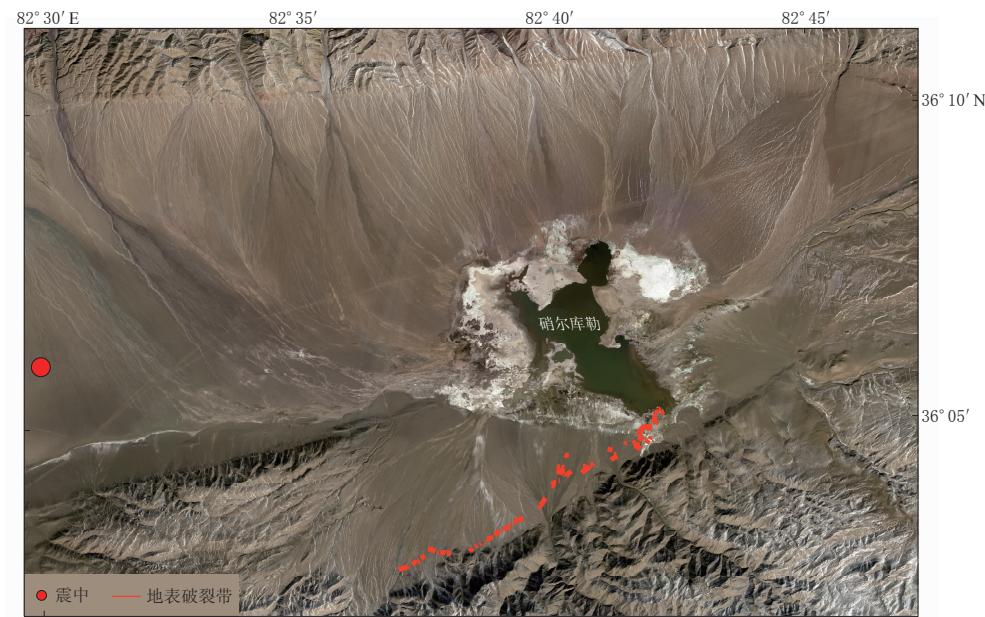


图 2 基于高分一号卫星数据获得的 2014 年新疆于田 $M_s7.3$ 地震地表破裂带解译结果

Fig. 2 Interpretation of the surface rupture for 2014 Xinjiang Yutian $M_s7.3$ earthquake based on GF-1 satellite data

高分遥感地震监测与应急应用示范系统(二期)工作将于 2016 年启动。其主要任务是完善该系统, 保障该系统稳定运行; 根据实际应用需求, 为地震行业和其它部委提供数据共享与产品加工服务。针对高分一一五号卫星以及后续卫星的遥感数据开展地震应用示范, 将卫星应用与行业主体业务有机结合起来, 以提升我国遥感地震业务应用水平。

5 讨论与结论

高分辨率遥感已经成为 21 世纪遥感技术的一个主旋律。高分辨率遥感技术在我国地震监测预报、地震灾害预防和地震应急救援防震减灾三大业务体系中均有应用, 且应用前景乐观。但是, 由于高分辨率遥感数据长期受制于国外, 数据来源不稳定, 而且数据获取成本高、周期长, 导致高分辨率遥感技术在地震中的应用处于一种分散的科学的研究状态, 离真正的系统化和业务化的应用尚有较大差距。

随着高分辨率对地观测系统重大专项的实施, 我国遥感技术正式步入了高分辨率时代, 从此有了自主、稳定、类型多样的高分辨率遥感数据源, 能够为高分辨率遥感技术在地震行业应用的系统化和业务化提供强有力的数据支撑。中国地震局启动的“高分遥感地震监测与应急应用示范”项目, 旨在整合现有行业资源, 突破国产高分辨率遥感数据在地震三大业务体系中应用的关键技术, 建立规范的工作流程, 研制高分遥感地震监测与应急应用示范系统, 为防震减灾三大体系加工高分辨率遥感地震应用专题产品, 促进高分辨率遥感地震应用水平。通过项目先期攻关, 目前已经建立了光学遥感构造填图和光学遥感应

急应用原型系统；正在开展的系统(一期)建设也已接近尾声。系统(一期)建成后，其具备为整个地震行业提供高分辨率遥感数据分发、地震专题产品生产加工和高分遥感地震应用技术服务的能力。下一步，该项目将大力推广国产高分辨率数据在地震行业中的应用，为地震科研单位和业务部门提供高分遥感数据、专题产品和技术服务，进而提升高分遥感地震业务化水平。

参 考 文 献

- 陈梅花, 邓志辉, 杨竹转, 马晓静. 2006. 2004 年印度尼西亚 9 级大地震前的潜热通量异常[J]. 科学通报, **51**(1): 118–120.
- Chen M H, Deng Z H, Yang Z Z, Ma X J. 2006. Surface latent heat flux anomalies prior to the Indonesia $M_w 9.0$ earthquake of 2004[J]. *Chinese Science Bulletin*, **51**(8): 1010–1013.
- 崔月菊, 杜建国, 陈志, 李静, 谢超, 周晓成, 刘雷. 2011. 2010 年玉树 $M_s 7.1$ 地震前后大气物理化学遥感信息[J]. 地球科学进展, **26**(7): 787–794.
- Cui Y J, Du J G, Chen Z, Li J, Xie C, Zhou X C, Liu L. 2011. Remote sensing signals of atmospheric physics and chemistry related to 2010 Yushu $M_s 7.1$ earthquake[J]. *Advances in Earth Science*, **26**(7): 787–794 (in Chinese).
- 窦爱霞, 丁香, 王龙, 王晓青, 单新建, 张景发, 马海建. 2013. 高分光学遥感地震应急应用原型系统[J]. 地震, **33**(2): 11–18.
- Dou A X, Ding X, Wang L, Wang X Q, Shan X J, Zhang J F, Ma H J. 2013. A prototype system for emergency earthquake damage analysis and processing based on optical high resolution images[J]. *Earthquake*, **33**(2): 11–18 (in Chinese).
- 付碧宏, 张松林, 谢小平, 石许华, 王世锋. 2006. 阿尔金断裂系西段: 康西瓦断裂的晚第四纪构造地貌特征研究[J]. 第四纪研究, **26**(2): 228–235.
- Fu B H, Zhang S L, Xie X P, Shi X H, Wang S F. 2006. Late Quaternary tectono-geomorphic features along the Kangxiwar fault, Altyn Tagh fault system, northern Tibet[J]. *Quaternary Sciences*, **26**(2): 228–235 (in Chinese).
- 郭华东. 1986. 航天飞机雷达对阿拉善高原沙漠及次地表岩石的回波响应[J]. 环境遥感, **1**(1): 34–43.
- Guo H D. 1986. Space shuttle radar response from sand dunes and subsurface rocks of Alashan Plateau[J]. *Remote Sensing of Environment*, **1**(1): 34–43 (in Chinese).
- 郭华东, 廖静娟, 王长林. 1997. 航天飞机雷达 SIR-C 对西昆仑山新生代火山的探测[J]. 科学通报, **42**(3): 335–336.
- Guo H D, Liao J J, Wang C L. 1997. Shuttle imaging radar-C (SIR-C) detection for the Cenozoic volcanoes in West Kunlun, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, **42**(16): 1407–1408.
- 国家地震局地质研究所, 地震研究所. 1980. 中国卫星影象地震构造判读图[M]. 北京: 地图出版社: 1.
- Institute of Geology, State Seismological Bureau, Institute of Seismology, State Seismological Bureau. 1980. *The Seismotectonic Map of China Based on Interpretation of Satellite Images*[M]. Beijing: Sinomaps Press: 1 (in Chinese).
- 国家地震局地震研究所, 国家地震局地质研究所. 1982. 中国活动构造典型卫星影象集[M]. 北京: 地震出版社: 1–157.
- Institute of Seismology, State Seismological Bureau, Institute of Geology, State Seismological Bureau. 1982. *The Album of Typical Satellite Imagery of Active Structures of China*[M]. Beijing: Seismological Press: 1–157 (in Chinese).
- 康春丽, 陈正位, 陈立泽, 田勤俭, 刘德富. 2003. 昆仑山口西 8.1 级地震的卫星热红外前兆特征分析[J]. 西北地震学报, **25**(1): 12–15.
- Kang C L, Chen Z W, Chen L Z, Tian Q J, Liu D F. 2003. Analysis on the satellite infrared anomaly feature before west to Kunlun Mountain Pass $M 8.1$ earthquake[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **25**(1): 12–15 (in Chinese).
- 刘斌涛, 陶和平, 范建容, 田兵伟, 张建强, 严冬. 2008. 高分辨率 SAR 数据在 5·12 汶川地震灾害监测与评估中的应用[J]. 山地学报, **26**(3): 267–271.
- Liu B T, Tao H P, Fan J R, Tian B W, Zhang J Q, Yan D. 2008. Application of high-resolution SAR images in Wenchuan earthquake hazard monitoring and assessment[J]. *Journal of Mountain Science*, **26**(3): 267–271 (in Chinese).

- 刘德富, 康春丽. 2005. 苏门答腊岛 8.7 级大地震前的辐射异常现象[J]. 国际地震动态, (1): 37-39.
- Liu D F, Kang C L. 2005. Radiation anomalies before Sumatra Island M8.7 earthquake[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (1): 37-39 (in Chinese).
- 刘华国, 冉勇康, 李安, 徐良鑫, 李峰. 2011. 基于 P5 像对与 GeoEye-1 影像的近地表地层产状的提取[J]. 地震地质, 33(4): 951-962.
- Liu H G, Ran Y K, Li A, Xu L X, Li F. 2011. Attitude extraction of shallow stratum based on P5 stereo images and GeoEye-1 image[J]. *Seismology and Geology*, 33(4): 951-962 (in Chinese).
- 柳稼航, 杨建峰, 魏成阶, 关泽群. 2004. 震害信息遥感获取技术历史、现状和趋势[J]. 自然灾害学报, 13(6): 46-52.
- Liu J H, Yang J F, Wei C J, Guan Z Q. 2004. Acquisition of earthquake damage information based on remote sensing technology: History, current situation and trend[J]. *Journal of Natural Disasters*, 13(6): 46-52 (in Chinese).
- 孟庆岩, 康春丽, 申旭辉, 荆凤. 2014. 地震红外遥感[M]. 北京: 地震出版社: 96-145.
- Meng Q Y, Kang C L, Shen X H, Jing F. 2014. *Earthquake Infrared Remote Sensing* [M]. Beijing: Seismological Press: 96-145 (in Chinese).
- 强祖基, 徐秀登, 赵常恭. 1990. 卫星热红外异常: 临震前兆[J]. 科学通报, 35(17): 1324-1327.
- Qiang Z J, Xu X D, Lin C G. 1991. Impending-earthquake satellite thermal infrared and ground temperature increase anomalies[J]. *Chinese Science Bulletin*, 36(22): 1894-1900.
- 强祖基, 孔令昌, 郭满红, 王弋平, 郑兰哲, 赵常恭, 赵勇. 1997. 卫星热红外增温机制的实验研究[J]. 地震学报, 19(2): 197-201.
- Qiang Z J, Kong L C, Guo M H, Wang Y P, Zheng L Z, Lin C G, Zhao Y. 1997. An experimental study on temperature increasing mechanism of satellite thermal-infrared[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 10(2): 247-252.
- 单新建, 马瑾, 宋晓宇, 王超, 柳稼航, 张桂芳. 2002. 利用星载 D-INSAR 技术获取的地表形变场研究张北—尚义地震震源破裂特征[J]. 中国地震, 18(2): 119-126.
- Shan X J, Ma J, Song X Y, Wang C, Liu J H, Zhang G F. 2002. Using deformation field obtained by spaceborne D-INSAR technique to research characteristics of source rupture of Zhangbei-Shangyi earthquake[J]. *Earthquake Research in China*, 18(2): 119-126 (in Chinese).
- 邵芸, 宫华泽, 王世昂, 张风丽, 田维. 2008. 多源雷达遥感数据汶川地震灾情应急监测与评价[J]. 遥感学报, 12(6): 865-870.
- Shao Y, Gong H Z, Wang S A, Zhang F L, Tian W. 2008. Multisource SAR remote sensing data for rapid response to Wenchuan earthquake damage assessment[J]. *Journal of Remote Sensing*, 12(6): 865-870 (in Chinese).
- 孙玉涛, 崔月菊, 刘永梅, 杜建国, 张炜斌, 张冠亚. 2014. 苏门答腊 2004、2005 年两次大地震前后 CO 和 O₃ 遥感信息[J]. 遥感信息, 29(2): 49-55.
- Sun Y T, Cui Y J, Liu Y M, Du J G, Zhang W B, Zhang G Y. 2014. Remote sensing anomalies of CO and O₃ related to two giant Sumatra earthquakes occurred in 2004 and 2005[J]. *Remote Sensing Information*, 29(2): 49-55 (in Chinese).
- 王超, 刘智, 单新建. 2000. 张北—尚义地震同震形变场雷达差分干涉测量[J]. 科学通报, 45(23): 2550-2554.
- Wang C, Liu Z, Zhang H, Shan X J. 2001. The coseismic displacement field of the Zhangbei-Shangyi earthquake mapped by differential radar interferometry[J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(6): 514-517.
- 王晓青, 魏成阶, 苗崇刚, 张景发, 单新建, 马庆尊. 2003. 震害遥感快速提取研究: 以 2003 年 2 月 24 日巴楚—伽师 6.8 级地震为例[J]. 地学前缘, 10(特刊): 285-291.
- Wang X Q, Wei C J, Miao C G, Zhang J F, Shan X J, Ma Q Z. 2003. The extraction of seismic damage from remote sensing images: A case study of Bachu-Jiashi earthquake with $M_S = 6.8$ occurred on Feb. 24, 2003[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(Suppl): 285-291 (in Chinese).
- 魏成阶, 刘亚岚, 王世新, 张立福, 黄晓霞. 2008. 四川汶川大地震震害遥感调查与评估[J]. 遥感学报, 12(5): 673-682.
- Wei C J, Liu Y L, Wang S X, Zhang L F, Huang X X. 2008. Investigation and assessment of damage in earthquake Wenchuan Sichuan quake based on remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 12(5): 673-682 (in Chinese).
- 徐秀登, 徐向民, 王煜. 2000. 台湾南投 7.6 级地震前卫星红外异常[J]. 地震学报, 22(6): 666-669.
- Xu X D, Xu X M, Wang Y. 2000. Satellite infrared anomaly before Nantou $M_S = 7.6$ earthquake in Taiwan China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 22(6): 666-669 (in Chinese).

- 徐岳仁, 申旭辉, 何宏林, 陈立泽, 孙浩越. 2011. CBERS-02B 数据在霍山山前活动断裂带 1:5 万填图中的应用[J]. 中国科学: 信息科学, **41**(增刊): 202–212.
- Xu Y R, Shen X H, He H L, Chen L Z, Sun H Y. 2011. Application of CBERS-02B satellite images to Mt. Huoshan piedmont active fault mapping (1:50 000 scale)[J]. *Science China: Information Science*, **41**(Suppl): 202–212 (in Chinese).
- 徐岳仁, 陈立泽, 申旭辉, 洪顺英, 王辉, 荆风, 董彦芳. 2015. 基于 GF-1 卫星影像解译 2014 年新疆于田 $M_{S7.3}$ 地震同震地表破裂带[J]. 地震, **35**(2): 61–71.
- Xu Y R, Chen L Z, Shen X H, Hong S Y, Wang H, Jing F, Dong Y F. 2015. Interpreting coseismic surface rupture zone of the 2014 Yutian $M_{S7.3}$ earthquake using GF-1 satellite images[J]. *Earthquake*, **35**(2): 61–71 (in Chinese).
- 张海根. 1981. 遥感技术在地震方面的应用和展望[J]. 地壳形变与地震, (1): 110–115.
- Zhang H G. 1981. Application and prospective of remote sensing technique to earthquake[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, (1): 110–115 (in Chinese).
- 张景发, 谢礼立, 陶夏新. 2002. 建筑物震害遥感图像的变化检测与震害评估[J]. 自然灾害学报, **11**(2): 59–64.
- Zhang J F, Xie L L, Tao X X. 2002. Change detection of remote sensing image for earthquake-damaged buildings and its application in seismic disaster assessment[J]. *Journal of Natural Disasters*, **11**(2): 59–64 (in Chinese).
- 张微, 陈汉林, 李启敏, 程晓敢, 姚琪. 2007. 高分辨遥感在杭州活断层探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, **35**(3): 10–14.
- Zhang W, Chen H L, Li Q M, Cheng X G, Yao Q. 2007. Application of high resolution remote sensing technique to exploration of active fault of Hangzhou and its surroundings[J]. *Coal Geology & Exploration*, **35**(3): 10–14 (in Chinese).
- 中华人民共和国国务院. 2006. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)[EB/OL]. [2015-09-21]. http://www.gov.cn/jrzq/2006-02/09/content_183787.htm.
- The State Council of the People's Republic of China. 2006. Outline of the national medium- and long-term planning for development of science and technology (from 2006 to 2020)[EB/OL]. [2015-09-21]. http://www.gov.cn/jrzq/2006-02/09/content_183787.htm (in Chinese).
- Chen L, Shen X, Hong S, Shao Y. 2011. Estimation of the building damages in Yushu earthquake based on ALOS SAR data[C]//*Proceedings of SPIE-MIPPR 2011: Remote Sensing Image Processing, Geographic Information Systems, and Other Applications*. Guilin, China: SPIE: 800626. doi:10.1117/12.901873.
- Clarisse L, R'Honi Y, Coheur P F, Hurtmans D, Clerbaux C. 2011. Thermal infrared nadir observations of 24 atmospheric gases[J]. *Geophys Res Lett*, **38**: L10802. doi:10.1029/2011GL047271.
- Frankenberg C, Platt U, Wagner T. 2005. Iterative maximum a posteriori (IMAP)-DOAS for retrieval of strongly absorbing trace gases: Model studies for CH_4 and CO_2 retrieval from near infrared spectra of SCIAMACHY onboard ENVISAT[J]. *Atmos Chem Phys*, **5**(1): 9–22.
- Gornyi V I, Sal'Man A G, Tronin A A, Shlin B V. 1988. The earth outgoing IR radiation of the earth as an indicator of seismic activity[J]. *Akad Nauk SSSR Dokl*, **301**(1): 67–69.
- Guo H D, Li X W, Zhang L. 2009. Study of detecting method with advanced airborne and spaceborne synthetic aperture radar data for collapsed urban buildings from the Wenchuan earthquake[J]. *J Appl Remote Sens*, **3**(1): 031695.
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, Adragna F, Peltzer G, Feigl K, Rabaut T. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. *Nature*, **364**(6433): 138–142.
- Ouzounov D, Liu D, Chunli K, Cervone G, Kafatos M, Taylor P. 2007. Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes[J]. *Tectonophysics*, **431**(1): 211–220.
- Philip G. 1996. Landsat Thematic Mapper data analysis for Quaternary tectonics in parts of the Doon valley, NW Himalaya, India[J]. *Int J Remote Sens*, **17**(1): 143–153.
- Phillips M E, Bussell M A, McDonald I, Hart R J, Andreoli M A G. 1999. A remote-sensing and geological investigation of the Vredefort impact structure (South Africa) using Landsat Thematic Mapper imagery[J]. *Meteorit Planet Sci*, **34**: A92–A93.
- Robinson J, Beck R, Gnos E, Vincent R K. 2000. New structural and stratigraphic insights for northwestern Pakistan from field and Landsat Thematic Mapper data[J]. *Geol Soc Am Bull*, **112**(3): 364–374.