

Charter机制在气象灾害监测中的应用

高浩 武胜利 赵长海 方翔 刘诚

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 近年来在气象灾害和衍生灾害的业务监测中, 高分辨率卫星遥感影像和雷达卫星数据的作用越来越重要。虽然中国的环境减灾卫星和资源卫星已在业务中得到应用, 但是仍不能满足对高分辨率卫星影像和雷达卫星数据的需求。国际减灾宪章机制(Charter机制)是目前运行最成功的政府间减灾机制之一, 通过授权用户向遭受灾害的地区无偿提供及时的卫星遥感数据, 用于灾害的监测和评估。中国气象局作为中国的授权用户, 已启动两次针对气象灾害的Charter机制, 通过获取各类高分辨光学影像和雷达卫星影像分别对2010年8月7日甘肃舟曲泥石流灾害和2013年8月东北洪涝灾害的监测显示, 国际减灾宪章提供的高分辨率卫星影像是对中国气象卫星及陆地观测卫星数据监测气象灾害和衍生灾害的有效补充, 在业务应用中起到了重要的作用。

关键词: 气象灾害, Charter机制, 卫星遥感, 业务应用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.021

The Application of Charter in Meteorological Disaster Monitoring

Gao Hao, Wu Shengli, Zhao Changhai, Fang Xiang, Liu Cheng

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: The high resolution satellite data and Radar satellite data have become very important in the meteorological disasters and derived disasters monitoring in recent years. Although, the HJ-1A/B and ZY-3 satellite data are used in the operational application, the need for the high resolution optical and SAR satellite data still couldn't be fulfilled. As one of the successful intergovernmental mechanism of disaster mitigation, Charter aims at providing cost-free satellite data in time to those affected by natural disasters through authorized users for disaster monitoring and evaluation. China Meteorological Administration, as the authorized users of Charter in China, has twice triggered Charter activations for mud-rock flow monitoring in Zhouqu county of Gansu province on Aug 7th 2010, and flood monitoring in the northeast of China on Aug 16th 2013, respectively. It is showed that the high resolution satellite imagery is an effective complement for meteorological disasters and derived disasters monitoring by meteorological satellites and earth observation satellites, and plays an important role in the operational application.

Keywords: meteorological disaster, Charter mechanism, remote sensing, operational application

0 引言

中国是世界上自然灾害发生频繁、灾害种类多样的国家之一, 其中气象灾害是自然灾害中最为频繁而又严重的灾害之一^[1]。气象灾害及其衍生灾害直接或间接对人民生命和财产安全、国民经济造成极大的损失。而且, 随着中国经济的高速发展, 气象灾害造成的损失也呈现上升的趋势, 直接影响中国社会和经济的发展。

随着中国气象卫星事业的不断发展, 风云气象卫星在气象灾害的业务监测中发挥了重大作用。风云气

象卫星作为中等空间分辨率的卫星, 针对一些重大灾害的监测和评估, 仍有一定的局限性。例如, 气象卫星和陆地观测卫星等光学卫星在有云层的遮挡时, 对地表的监测能力不足; 气象卫星的空间分辨率在一些局地重大灾害的监测和评估中仍显不足; 陆地观测卫星的分辨率尚无优于1m的民用卫星数据, 无法提供更丰富的细节信息。近年来, 业务监测中高分辨卫星影像, 特别是雷达卫星影像日趋重要, 尽管中国的环境减灾卫星和资源卫星已在业务中得到不断应用, 但仍不能满足重大气象灾害业务监测的需求。

作为“空间与重大灾害”国际宪章(Charter)成员国授权用户, 近年来中国气象局针对重大气象灾害启动了两次国际宪章机制(Charter机制), 获取的高分辨率卫星影像和雷达卫星数据在减灾评估中起到

收稿日期: 2014年5月6日; 修回日期: 2014年8月12日

第一作者: 高浩(1982—), Email: gaohao@cma.gov.cn

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306049)

了重要的作用。本文针对中国气象局针对重大气象灾害及其衍生灾害监测中启动的这两次国际减灾宪章机制，对国际减灾宪章机制做详细介绍，重点介绍启动的两次Charter机制在气象灾害监测中的应用，分析其在国家卫星气象中心气象灾害业务监测中的作用。

1 Charter机制简介

“空间与重大灾害”国际宪章（International Charter “space and major disasters”，简称Charter），是目前影响最大的国际减灾机制之一，旨在通过授权用户向遭受自然或人为灾害的地区提供统一的空间数据获取和交付系统^[2-4]。每个成员机构都承诺提供资源支持宪章条款，并帮助减轻灾害对人类生命和财产的影响。国际宪章由欧洲空间局（ESA）和法国国家空间研究中心（CNES）在1999年7月于奥地利维也纳UNISPACE III大会后发起，加拿大空间局（CSA）于2000年10月20日签署该宪章。2000年11月1日，该宪章正式宣布实施^[2]。截止到2015年，共有15个航天或减灾机构加入并提供卫星应急支持。中国国家航天局（CNSA）于2007年5月代表中国作为正式成员加入宪章，国家减灾委和中国气象局为中国的授权用户^[5]。

目前各成员机构为Charter服务的卫星资源数量达到60多颗，包括RADARSAT、SPOT、PLEIADES、Landsat、TerraSAR-X、ENVISAT、QuickBird、GeoEye、DMC Constellation等光学和雷达卫星，其中也包括中国的风云系列卫星、CBERS、SJ-9A和高分一号卫星。截止到2014年3月底，Charter已为世界范围内遭受洪灾、滑坡、泥石流、地震、森林火灾、飓风等重大灾害的国家或地区提供了500次数据和技术支持，调动了60多颗卫星资源，为110多个国家提供了20多万景卫星数据，为受灾国家和地区的减灾救灾及灾后重建提供了及时有效的人道主义援助。作为Charter中国的授权用户，当中国遭遇重大气象灾害，比如洪涝、泥石流等灾害，且中国气象局启动相应灾害的二级及以上响应时，就可以申请启动国际减灾宪章，但当灾情严重时，并不局限于二级响应。截止目前，由中国气象局针对重大气象灾害启动的国际宪章有两次，分别针对2010年8月的甘肃舟曲泥石流灾害（Call_321）、2013年8月的东北大范围洪涝灾害（Call_447）。

2 国际宪章数据优势

近年来中国气象灾害频发，风云气象卫星在气象灾害及其衍生灾害的监测和评估方面发挥了巨大的作用，在业务运行中风云卫星在对暴雨、台风、雪灾、海冰等恶劣天气的实时预报和监测也为防灾减灾提供

了重要的依据。

风云系列卫星属于中等空间分辨率的卫星，其最高分辨率为250m，在监测大范围的自然灾害时具有一定的优势，当发生小范围的重大自然灾害时，其空间分辨率并不能满足业务需求，并且在有大量云覆盖的情况下，光学卫星并不能穿透云层。Charter机制成员机构对授权用户可提供数据服务的卫星资源有45种（表1），不但卫星数量多、传感器种类丰富、空间分辨率多样，而且不同卫星也提供了较高的过境频次，在灾害的监测中具有一定的针对性和优势，特别是雷达卫星能全天时、全天候工作并且能够穿透云层，能弥补光学卫星的不足。目前中国的民用雷达卫星数量较少，Charter提供的雷达卫星数据弥补了国内雷达卫星数据少、洪涝灾害监测中获取雷达数据不足的缺陷。此外，中国缺乏空间分辨率优于1m的民用卫星数据，而Charter提供的卫星数据分辨率为亚米级，这些卫星数据为泥石流、地震等灾害的监测提供了丰富的细节信息，在重大自然灾害监测和评估中发挥了关键作用。

3 两次启动Charter机制获得的数据及在气象灾害监测中的应用

3.1 2010年8月甘肃舟曲泥石流监测

泥石流是气象衍生灾害中的常见地质灾害，其分布广，危害大。目前对泥石流的监测采用多种手段相结合，其中遥感影像解译是业务监测中的重要方法，高分辨率的卫星影像和雷达卫星数据为泥石流的监测提供了重要的影像数据。

2010年8月7日晚至8日凌晨，甘肃省舟曲县强降雨引发泥石流灾害，对当地造成重大损失。中国气象局紧急启动国际减灾宪章机制（Call_321），先后获取了日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）提供的ALOS/AVNIR-2光学卫星影像2景、ALOS/PALSAR雷达卫星影像2景、法国国家空间研究中心（CNES）提供的SPOT-5高分辨率光学卫星影像3景，加拿大空间局（CSA）提供的RADARSAT-2高分辨率雷达卫星影像2景，用于此次由于强降雨引发的泥石流灾害的监测和评估。由于气象卫星的空间分辨率不足，不能对泥石流灾害的滑坡体进行有效的监测，而环境减灾星的空间分辨率（30m）也不足以监测到滑坡体的细节信息，因而通过Charter获取的10m分辨率的ALOS卫星数据和5m分辨率的SPOT-5卫星数据在对滑坡体的监测和灾害发生诱因的分析中起到了关键的作用。此外，由于持续的强降雨，灾害发生时光学卫星不能穿透云层对下垫面进行监测，通过Charter获取的3m分辨

表1 Charter机制提供的卫星数据
Table 1 Satellite data from the international charter

数据机构	卫星/传感器	类别	空间分辨率
法国国家空间研究中心 (CNES)	PLEIADES	光学 (Optical)	0.5~2.8m
	SPOT	光学 (Optical)	2.5~20m
	FORMOSAT-2	光学 (Optical)	2~8m
中国国家航天局 (CNSA)	CBERS	光学 (Optical)	2.7~260m
	SJ-9A	光学 (Optical)	2.5~10m
阿根廷空间委员会 (CONAE)	SAC-C	光学 (Optical)	35~350m
加拿大空间局 (CSA)	RADARSAT-1	雷达 (SAR)	10~100m
	RADARSAT-2	雷达 (SAR)	1~100m
德国航空航天中心 (DLR)	TerraSAR-X	雷达 (SAR)	1~40m
	TanDEM-X	雷达 (SAR)	1~40m
	RapidEye constellation	光学 (Optical)	6.5m
英国国家航天局 (UKSA)	UK-DMC2	光学 (Optical)	22m
	NigeriaSat-2	光学 (Optical)	2.5~32m
	Deimos-1	光学 (Optical)	22m
	NigeriaSat-X	光学 (Optical)	22m
欧洲空间局 (ESA)	ERS	雷达 (SAR)	30m
	ENVISAT	光学和雷达 (Optical & SAR)	30~1000m
	PROBA	光学 (Optical)	5~36m
巴西国家太空研究院 (INPE)	Sentinel-1	雷达 (SAR)	5~40m
	CBERS	光学 (Optical)	2.7~260m
印度空间研究组织 (ISRO)	Cartosat-1	光学 (Optical)	2.5m
	Cartosat-2	光学 (Optical)	1m
	Cartosat-2B	光学 (Optical)	1m
	Resourcesat-2	光学 (Optical)	5.8~56m
	RISAT-1	雷达 (SAR)	1~8m
	Oceansat-2	光学 (Optical)	236×360m
日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA)	ISS	光学 (Optical)	120~240m
	ALOS	光学和雷达 (Optical & SAR)	2.5~100m
韩国航空宇宙研究院 (KARI)	Kompsat-2	光学 (Optical)	1~4m
美国国家海洋与大气管理局 (NOAA)	POES	光学 (Optical)	1100m
	GOES	光学 (Optical)	1~8km
俄罗斯联邦航天局 (ROSCOSMOS)	Kanopus-V	光学 (Optical)	2.1~10.5m
	Meteor-M	光学 (Optical)	450~900m
	Resurs-P	光学 (Optical)	1~24m
欧洲气象卫星组织 (EUMETSAT)	Metop-S	光学 (Optical)	1100m
	Meteosat Second Generation	光学 (Optical)	1~3km
	Meteosat First Generation	光学 (Optical)	2.5~5km
美国地质调查局 (USGS)	Landsat-5	光学 (Optical)	30~120m
	Landsat-7	光学 (Optical)	15~60m
	Landsat-8	光学 (Optical)	15~100m
	QuickBird	光学 (Optical)	0.6~2.4m
	IKONOS	光学 (Optical)	0.8~3.2m
	Worldview-1	光学 (Optical)	0.5m
	Worldview-2	光学 (Optical)	0.5~2m
GeoEye-1	光学 (Optical)	0.4~1.65m	

率的Radarsat-2和12.5m分辨率的ALOS/PALSAR雷达卫星影像弥补了这方面的不足, 及时提供了灾害发生时的泥石流监测信息, 为救灾提供了重要的数据支持。

利用空间分辨率为10m的日本ALOS卫星2010年8月10日的AVNIR光学卫星影像(图1)对甘肃舟曲泥石流灾害的监测分析表明, 灾害发生后舟曲县城北部

三眼裕、罗家裕出现明显的滑坡体信息。三眼裕的滑坡灾害最为严重, 滑坡体将原来的植被及建筑全部掩埋, 一直延伸到白龙江, 同时, 流经舟曲县城的白龙江水体信息有明显增加, 并延伸至沿岸的城区内。定量计算显示, 三眼裕滑坡体长2km、宽150m, 面积约0.24km²; 罗家裕滑坡体面积约0.07km²。

利用空间分辨率5m的法国SPOT-5光学卫星2010

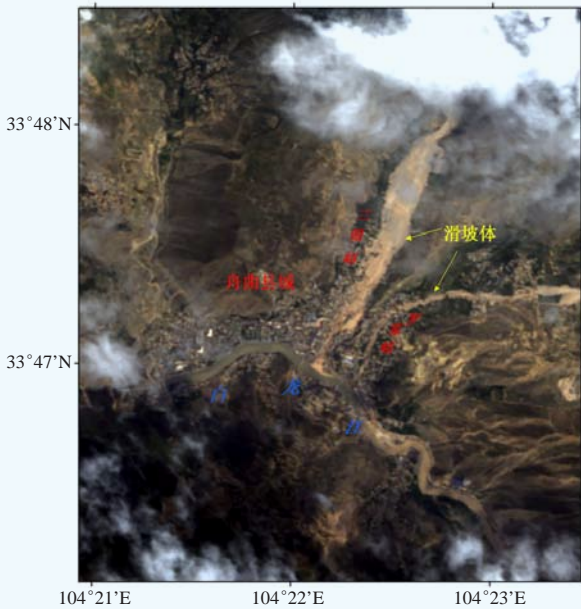


图1 ALOS卫星2010年8月10日甘肃省舟曲县泥石流监测图
Fig. 1 Mud-rock flow monitoring graph of Zhouqu, Gansu Province by ALOS on 10 August 2010

年8月15日的影像数据，结合DEM高程数据分析显示（图2），舟曲县城特大泥石流灾害的三眼峪和罗家峪泥石流来自于北部三眼峪集水区和罗家峪集水区，集水区地形和植被的共同作用是引发特大泥石流灾害的重要因素。三眼峪集水区呈现扇形漏斗状，山顶最高处海拔约3700m，舟曲县城海拔约1300m，两条沟谷的汇合处约2000m，从山顶道汇合处的沟谷有数千米的落差，从山谷汇合处到县城又有数百米的落差，经计算发现，三眼峪的集水区面积约20.5km²。利用空间分辨率5m的法国SPOT-5卫星2008年7月1日的影像数据分析显示，舟曲县北部的山区前期的植被覆盖较低，沿山脊的沟谷两侧多为裸露的褐色岩石和裸土，



图2 SPOT卫星2010年8月15日甘肃省舟曲县3D监测图
Fig. 2 Three D monitoring graph of Zhouqu County, Gansu Province by SPOT-5 on 15 August 2010

这是形成泥石流的重要因素。相比较，罗家峪沟的集水区面积仅为14.8km²，集水区面积、海拔落差、山脊植被裸露程度都轻于三眼峪沟。强降雨时，雨水沿多条沟涧直接泻入山谷中的主沟槽，雨水携带沙石和裸土形成泥石流，在多条山谷的狭窄交汇处汇合，直接形成特大泥石流。因此，舟曲县附近特殊的地形，如扇形集水区、漏斗状山谷、巨大的海拔落差，以及植被覆盖状况和短时间内集中的强降水是共同引起甘肃舟曲县8月7日特大泥石流灾害的致灾因子。

3.2 2013年8月东北洪涝灾害监测

2013年8月以来，中国东北地区的持续强降水造成嫩江、松花江和黑龙江流域发生自1998年以来的最大洪涝灾害。持续阴雨天气使得利用风云气象光学卫星难以及时监测该地区的洪涝水体，急需能穿透云层、全天候、全天时工作的雷达卫星影像对东北地区下垫面洪涝水体进行监测服务。因而，8月16日中国气象局启动国际宪章（Call_447）申请获取东北洪涝灾区的雷达卫星数据，开展洪涝水体的监测和评估。

通过Charter机制获取了东北灾区嫩江下游、吉林桦甸和黑龙江下游区域的数据，包括美国地质调查局（USGS）提供的Landsat-8灾前和灾后光学影像、高分辨的WorldView-1、Quickbird遥感影像数据；德国航空航天中心（DLR）提供的嫩江下游、吉林桦甸和黑龙江下游TerraSAR-X灾后和灾前影像；加拿大空间局提供的嫩江下游、吉林桦甸和黑龙江下游洪涝灾区RADARSAT-2灾前和灾后影像；法国国家空间研究中心提供的洪涝灾区灾后SPOT-5光学影像；印度空间研究组织（ISRO）提供的洪涝灾区RISAT-1灾后雷达影像数据、Resourcesat-2 Awifs光学影像；英国灾害监测卫星国际图像公司（DMCii）提供的灾区灾后光学影像，共计1106景。

国家卫星气象中心及时对从Charter获取的各类卫星和雷达影像数据进行了处理分析，对此次东北地区洪涝水体变化范围进行了监测分析，相关的监测成果图和分析报告报送至中国气象局相关决策部门、以及黑龙江当地的相关政府部门，为此次洪涝灾害的评估和救灾提供了关键的数据。此外，针对东北洪涝灾害启动的Charter机制也得到了中国气象报等相关媒体的陆续报道，同时国家卫星气象中心工作人员也参加了中国气象频道关于东北洪涝灾害监测的专题节目，对此次洪涝与1998年的洪涝灾害进行了详细的对比分析。

3.2.1 雷达遥感监测水体优势及方法

东北地区洪涝发生后，持续的降雨云团使得光学和红外卫星都无法穿透云层对东北地区的水体进行

实时监测，而合成孔径雷达卫星（Synthetic Aperture Radar, SAR）作为一种主动式微波传感器，具有全天候、全天时成像的特点，可以穿透云层对水体进行监测（图3）。SAR影像是目前监测洪涝灾害最为有效的遥感技术，但是SAR数据并不容易获取。SAR影像

上，水体由于镜面反射回波强度较小，在图像上呈现出暗色或者黑色，而陆地的回波强度较大，呈现灰白色或者黑灰色，因而在SAR影像上水陆界限明显，可以清晰的看到洪水淹没范围，利用SAR影像可以迅速地监测洪涝灾害。

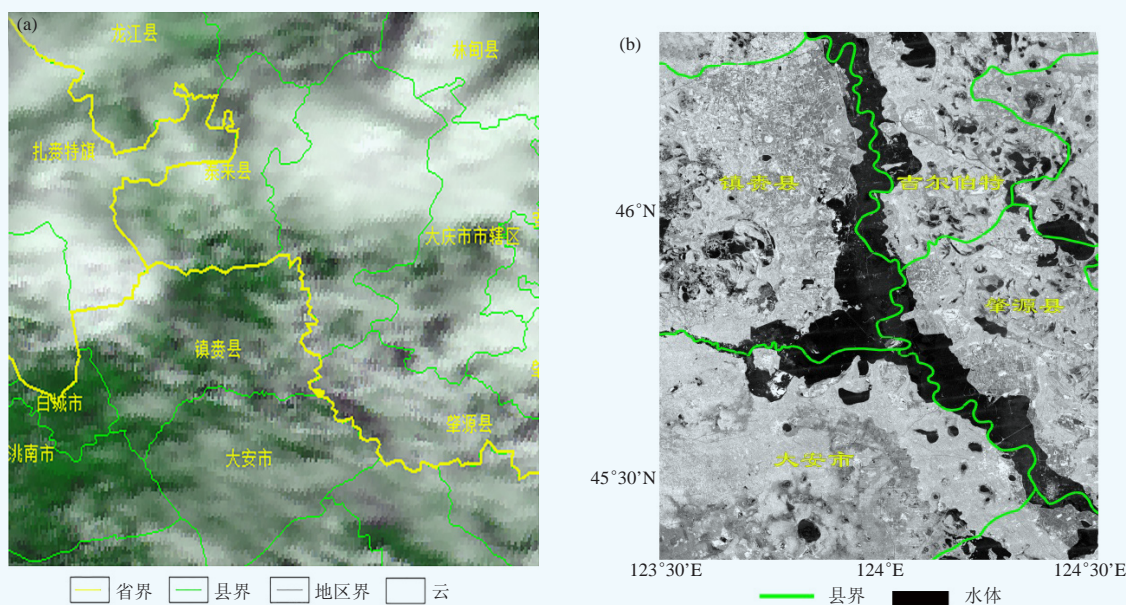


图3 光学卫星与雷达卫星性能对比（2013年8月17日），(a) FY-3A；(b) TerraSAR-X
Fig. 3 Comparison of optical and radar satellite capability on 17 August 2013, (a) FY-3A; (b) TerraSAR-X

利用SAR影像对洪涝灾害进行监测时，首先对SAR影像进行几何精校正，多采用多项式校正方法。Charter提供的数据都已进行了地理精校正，在应用中可以忽略此步。其次，利用雷达卫星影像数据的相关参数表，将影像亮度值转为后向散射系数。第三，对SAR影像进行滤波。由于雷达发射的是纯相干波，相干波照射地面产生衍射，地面目标上随机散射面的散射信号与发射的相干信号之间的干涉作用会使图像产生相干的斑点噪声，严重影响图像的质量和使用。在消除斑点噪声的同时还要保留图像更多的锐度和细节，并增强水体信息，因而必须根据实际情况，选择合适的滤波器对雷达影像进行滤波。实际应用中，经常采用基于局域统计特性的空域自适应滤波方法，如Lee滤波、Sigma滤波等^[6-8]，或者空域相干斑算法自适应处理，如Kuan滤波、Frost滤波等^[9-10]，在本次灾害监测中对所获取的雷达卫星影像数据进行了Lee滤波。最后，利用滤波后的影像选择合适的后向散射系数阈值提取影像中的水体。准确的后向散射系数阈值是提取水体精度的保证，在本次水体监测应用中，采用基于水体内像元灰度特征值和水陆边界像元点灰度值确定阈值的方法，这两种方法也是经过

试验表明最能反映真实水体边界的方法，其误差在 $\pm 1\% \sim \pm 4\%$ ^[11]，能够满足利用SAR影像监测洪涝的需要。

3.2.2 SAR 影像监测东北洪涝

利用2013年8月19日加拿大RADARSAT-2雷达卫星数据与2013年6月17日的美国Landsat-8陆地卫星数据对嫩江下游流域的水体变化的监测显示（图4），嫩江下游和松花江西段的水体范围与持续强降水前相比，水体范围显著增宽。嫩江下游河段水体最宽处达8km，是此次持续强降水前该处河段宽度的数十倍。嫩江下游区域多处出现大范围新增水体，其中齐齐哈尔市新增水体面积约480km²、肇源县约560km²、杜尔伯特蒙古族自治县约1050km²、泰来县约470km²。

利用2013年8月21日空间分辨率12.5m的加拿大RADARSAT-2雷达卫星数据和2013年7月23日空间分辨率30m的美国Landsat-8陆地卫星数据对黑龙江及松花江下游绥滨县、同江市水体变化的监测显示（图5），8月21日黑龙江在绥滨县、同江市河段的水体范围较7月23日显著增宽，黑龙江在绥滨、同江沿江地区形成了大范围的洪涝积水，在俄罗斯境内沿江区域也形成了严重的洪涝水体。与7月23日相比，松花江下游绥

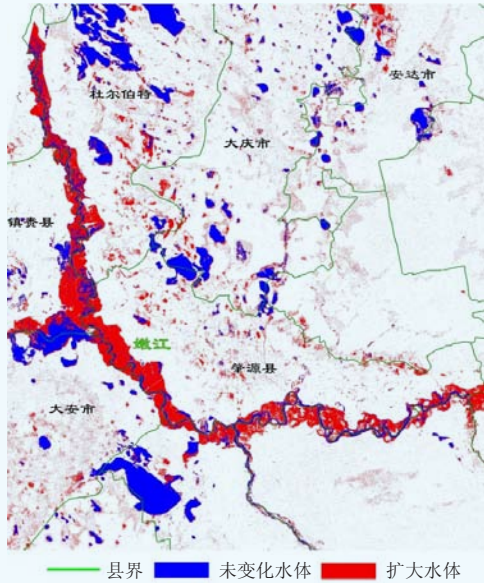


图4 RADARSAT-2雷达卫星(2013年8月21日)与 Landsat-8光学卫星(2013年7月23日)嫩江水体监测图
Fig. 4 Water monitoring graph of Nenjiang by RADARSAT-2 (21 August 2013) and Landsat-8 (23 July 2013)

滨县段有一处新增洪涝水体, 绥滨县境内泛滥洪水面积约392km², 同江市境内部分地区的泛滥水体面积约200km²。另外, 黑龙江该处河段在俄罗斯境内形成的泛滥水体约943km²。

4 小结

作为中国在国际减灾宪章(Charter)的授权用户, 中国气象局针对气象灾害启动的两次Charter机制, 通过获取Charter成员机构的高分辨光学影像和雷达卫星影像分别对2010年8月7日甘肃舟曲泥石流灾害和2013年8月东北洪涝灾害进行了业务监测服务, 应用实践显示国际减灾宪章提供的高分辨率卫星影像和雷达卫星影像数据种类丰富、空间分辨率多样、过境频次高, 并且具有特定的性能优势, 弥补了中国民用雷达卫星数据不足, 亚米级高分辨率卫星数据不足的缺陷。相关数据与中国卫星互补, 对气象卫星监测气象灾害和衍生灾害起到重要的补充作用, 并且有效提高了灾害监测的频次和范围, 在业务应用中发挥了关键作用, 为决策服务部门和相关各级部门的灾害评估、防灾救灾等提供了及时、准确、可靠的信息。

根据Charter机制预案^[12], 除洪涝、泥石流等对高分辨率卫星资料需求迫切的自然灾害之外, 该机制还能够应用于地震、火灾、雪灾、海冰等其他各类自然灾害。我国是一个自然灾害频发的国家, 上述灾种在我国均可能会出现, 因此, 在可预见的未来, Charter

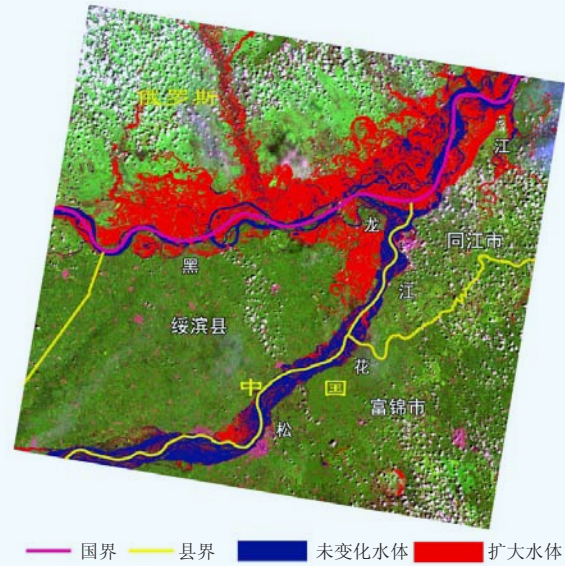


图5 RADARSAT-2雷达卫星(2013年8月21日)和 Landsat-8光学卫星(2013年7月23日)绥滨水体监测图
Fig. 5 Water monitoring graph of Suibin by RADARSAT-2 (21 August 2013) and Landsat-8 (23 July 2013)

机制将是我国防灾减灾的重要手段之一。

参考文献

- [1] 王静爱, 史培军, 王平, 等. 中国自然灾害时空格局. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] Bessis J L, Béquignon J, Mahmood A. The International Charter "Space and Major Disasters" initiative. *Acta Astronautica*, 2004, 54: 183-190.
- [3] Mahmood A, Cubero-Castan E, Platzcek G, et al. South American perspective of the International Charter "Space and Major Disasters". *Advances in Geosciences*, 2008, 14: 13-20.
- [4] Bessis J L, Béquignon J, Mahmood A. Three typical examples of activation of the international Charter "Space and Major Disasters". *Advances in Space Research*, 2004, 33: 244-248.
- [5] 李传荣, 范大一, 唐伶俐, 等. "空间与重大灾害" 国际公约组织的作用、贡献与意义. *遥感技术与应用*, 2008, 23(3): 112-116.
- [6] Lee J S. Refined Filtering of Image Noise Using Local Statistics. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, 15(4): 380-389.
- [7] Lee J S. Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Images. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, 17(1): 24-32.
- [8] Lee J S. Speckle Suppression and Analysis for Synthetic Aperture Radar Images. *Optical Engineering*, 1986, 25(5): 636-643.
- [9] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C, et al. Adaptive Noise Smoothing Filter for Images with Signal-Dependent Noise. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 1985, PAMI-7(2): 165-177.
- [10] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, et al. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 1982, PAMI-4(2): 157-166.
- [11] 柳钦火, 辛晓洲, 唐博, 等. 定量遥感模型、应用及不确定性研究. 北京: 科学出版社, 2010.
- [12] Mahmood A, Bessis J L, Béquignon J, et al. International Charter "Space and Major Disasters": Emergency On-Call Officer Procedure. RSCSA-PR0418, CSA, 2014, 109pp.