

引文格式: 曾超, 曹振宇, 曾珍, 等. 四川省应急测绘保障体系构建及实践 [J]. 测绘科学, 2021, 46(11): 187-200. (ZENG Chao, CAO Zhenyu, ZENG Zhen, et al. A survey on progresses and application of emergency surveying and mapping technology in Sichuan province [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(11): 187-200. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2021.11.027.

四川省应急测绘保障体系构建及实践

曾超^{1,2}, 曹振宇^{1,2}, 曾珍^{1,2}, 周兴霞^{2,3}

(1. 自然资源部四川基础地理信息中心, 成都 610041; 2. 自然资源部应急测绘技术创新中心, 成都 610041;
3. 四川省测绘地理信息局测绘应急保障中心, 成都 610041)

摘要: 针对应急测绘体系研究缺乏系统性总结和梳理问题, 以及大数据时代新技术对应急测绘发展带来的巨大挑战。通过相关文献资料的研究, 以四川省为例阐述了应急测绘的内涵及特点, 系统总结了面向不同灾种的应急测绘保障内容及工作流程, 梳理了应急测绘发展现状和趋势, 重点介绍了四川省空地一体化应急测绘保障体系构建及实践。结果表明, 国内外应急测绘的组织机制、基础设施和装备、关键技术及信息平台等方面研究已较为成熟, 面对未来防灾减灾的严峻形势, 还需加强理论方法和应急机制研究、国产化先进装备研发、灾害数据实时获取和处理等关键技术研究以及面向不同灾种的应用示范。

关键词: 应急测绘; 组织机制; 基准快速恢复; 灾害监测与预警; 灾情解译; 智能服务; 应急平台; 现状与展望

【中图分类号】P25

【文献标志码】A

【文章编号】1009-2307(2021)11-0187-14

A survey on progresses and application of emergency surveying and mapping technology in Sichuan province

ZENG Chao^{1,2}, CAO Zhenyu^{1,2}, ZENG Zhen^{1,2}, ZHOU Xingxia^{2,3}

(1. Sichuan Geomatics Center, MNR, Chengdu 610041, China;
2. Emergency Surveying and Mapping Technology Innovation Center, MNR, Chengdu 610041, China;
3. Emergency Surveying and Mapping Center Sichuan Bureau of Surveying,
Mapping and Geoinformation, Chengdu 610041, China)

Abstract: For the lack of systematic research of emergency surveying and mapping system, as well as the challenges brought by advanced technologies in the era of big data to the development of emergency surveying and mapping. It has also become a hot topic for researchers recently. By analyzing the relevant research papers, this paper proposes the conception and characteristics of emergency surveying and mapping, systematically summarizes the content and workflow of emergency surveying and mapping for different disasters, mainly reviews the development of the emergency surveying and mapping technology. The construction and practice of air-space-ground integrated emergency surveying and mapping support system of Sichuan province is introduced. The results show that the studies of organization mechanism, infrastructure and equipment, key technology and information platform of emergency surveying and mapping are relatively mature. However, facing the severe situation of future disaster prevention and mitigation,

it is necessary to improve emergency response mechanism research, advanced equipment development, key technologies research such as real-time acquisition and processing of disaster data, and application for different types of disasters.

Keywords: emergency surveying and mapping; organization mechanism; restoration of geodetic datum; disaster monitoring and early warning; disaster interpretation; intelligent services; emergency platform; progresses and prospects



作者简介: 曾超(1986—), 男, 四川成都人, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为山地灾害遥感与风险评估。

E-mail: zeng3chao@163.com

收稿日期: 2020-05-20

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFB0503004); 2019年自然资源部高层次创新人才培养工程杰出青年人才资助项目(1211060000018003934)

0 引言

防灾减灾是一个涉及多学科的“系统工程”，其中，应急测绘的主要任务是为防灾减灾科学决策提供灾害防治、监测预警、应急救援、恢复重建相关的地理空间变迁基础信息和服务^[1]。过去 15 年，在应对 2004 年印度洋海啸、2008 年汶川地震、2010 年海地地震、2011 年东日本大地震、2014 年马航 MH370 航班搜救等重大突发事件实践中，应急测绘为各国政府和机构科学决策和应急救援提供了及时有效的技术保障，发挥了不可或缺的重要作用^[2-3]。应急测绘也从纯粹的应急信息获取手段，逐渐发展成测绘学科的新型技术领域、工程行业的主要业务和应急管理体系的重要组成部分。

应急测绘对“速度、准确”等方面有极高的要求，这就需要有高效的组织体系和运行机制、完善的基础设施和先进可靠的技术装备，以及具有强大分析和决策能力的信息平台作为支撑。一直以来，各国都非常重视应急测绘的系统性建设以及关键技术研发。《2015—2030 年仙台减灾框架》提出要着力推动联合国灾害管理与应急反应天基信息平台等应急测绘工作^[4]。2000 年以来，建立了国际空间与重大灾害宪章、欧盟哥白尼应急管理服务机制、亚太地区航天组织协会、地球观测组织等相关的国际应急测绘组织和合作机制，推动了应急测绘国际间的广泛协作。我国在 2008 年后，建立了一套完善的组织机构体系和工作机制^[5-7]。2019 年国家机构改革，组建了应急管理部和自然资源部，应急测绘的职责更加明确，政府层面更加重视应急测绘在防灾减灾救灾中的作用^[8]。在技术层面，空间三维定位基准设施、卫星对地遥感观测网络系统等基础设施和应急测绘保障装备能力建设取得巨大进步^[1,9-11]。灾后测绘基准快速恢复、无人机灾情信息快速获取、灾害动态监测与预警、海量应急数据快速处理、应急场景快速制图和灾情分析评估等应急测绘关键技术取得突破^[12-15]。近年来，测绘地理信息与大数据、云计算、人工智能等技术的跨界融合日益加快，也推动应急测绘发展面临一系列新理论问题需要解决、新课题需要研究、新技术需要攻关。

本文基于已有应急测绘工作经验和积累，并通过相关文献资料研究，对国内外的应急测绘现状进行了系统性的总结，并结合其面临的机遇和挑战，对应急测绘做出展望。

1 应急测绘内涵及特点

1.1 应急测绘的内涵

应急测绘是指为应对突发事件所采取的测绘活动(国家应急测绘保障能力项目规程《应急测绘术语》)，即利用测绘遥感手段获取突发事件要素(孕灾环境、致灾因子、承灾体、灾情要素)的空间位置、几何分布和物理特征以及与其属性有关的信息，制作各种比例尺的应急专题地图、三维模型、多媒体(照片、视频)等应急地理信息产品，建立各种应急信息系统，编制分析评估报告，为防灾减灾救灾提供服务。狭义的应急测绘仅服务于应急响应阶段，广义的应急测绘服务于防灾减灾、应急准备、应急响应、恢复重建各阶段。

1.2 应急测绘的特点

突发事件应急管理的特殊性质和具体要求，决定了应急测绘应具备“快、准、全、新”4 个方面的特点。

1) 快速响应，及时保障。灾害的发生具有突发性、偶然性和不可预知性，要求应急测绘在灾害发生后第一时间响应，迅速启动应急预案，快速获取、处理和译灾信息，及时提供各类应急测绘产品和分析结果，为应急救援、趋势研判、灾情评估等提供支撑保障。

2) 精准实施，稳定可靠。灾害应急处置的准确性和有效性需要精准、实时、可靠的灾害信息作为保障。要求应急测绘拥有稳定可靠的技术装备，能够提供精准的位置数据、时空数据及灾情信息等，分析获得的灾害现状、态势预测等结果能保证政府决策准确可靠。

3) 全程保障，持续服务。灾害响应周期内各个阶段需要应急测绘提供全流程、全手段、多样化、可持续的保障服务。包括北斗定位与导航、航空航天遥感、地理信息系统、地图制图等技术手段支撑保障，地理信息数据、遥感影像图、三维模型、专题地图、信息系统、分析报告等多样化产品，以及覆盖灾前、灾中和灾后各阶段的 7×24 h 服务能力。

4) 创新融合，协同发展。应急测绘是新型的测绘工程技术领域，它立足测绘科学与技术，融合了地理学、管理学、安全科学和计算机科学等学科的理论和技术，是多学科综合交叉融合的产物。在自身实践和发展中催生了新理论、新技术、新装备、新模式，极大地拓展了测绘技术范畴和应

用服务领域。

2 应急测绘内容及流程

2.1 应急测绘保障内容

针对不同灾种的应急测绘保障一直是本领域

探索的焦点, 需要根据各应急管理部门需求出发, 部署高效的应急测绘任务及流程, 提供满足相关部门在不同灾害管理环节需要的应急测绘产品。本文系统梳理了面向不同灾种和减灾任务的应急测绘保障内容(表 1)。

表 1 面向不同灾害减灾任务的应急测绘保障内容

Tab 1 Tasks of Emergency Surveying and Mapping for Disaster Prevention and Mitigation

灾害种类	防灾减灾	应急准备	应急响应	恢复重建
地震	建筑物量评估	地壳运动监测	同震位移参数反演	损失评估
	人口分布制图	承灾体应变累积测量	搜索和救援路线规划	灾害重建规划选址
		危险性制图	疏散和撤离规划	
			承灾体损伤制图 灾情评估	
地质灾害	易发区制图	降水量监测	灾害特征分析	损失评估
	风险制图	危险性制图	灾情评估	空间规划
	群测群防	坡体稳定性与形变监测	减灾建议	灾害治理
	灾害调查	灾害预警		
洪水	易发区制图	洪水侦察	疏散和撤离规划	损失评估
	泛滥区划定	早期预警	灾情评估	空间规划
	土地利用制图	降水量分布	洪水分布图	
火灾	易发区制图	火灾探测	火情监测	损失评估
	可燃物监测	火灾扩散预测	配合扑灭火灾工作	
	风险分析	早期预警		
干旱	易损性分析	天气预报	干旱灾情监测	损失评估
	风险分析	植被监测		缓解干旱措施
	土地和水资源管理和规划	作物耗水量制图		
火山	数字地形分析	早期预警	熔岩流分布制图	损失评估
	风险分析	喷发物监测	疏散和撤离规划	空间规划
		热量警报		
		危险性制图		
飓风	易损性分析	早期气象预警	撤离路线规划	损失评估
	风险分析	长期气候预测建模	危机制图	空间规划
			危险性评估	
			飓风发展监测	
			风暴潮预测	

2.2 应急测绘工作流程

广义上, 应急测绘服务于灾害管理周期的防灾减灾、应急准备、应急响应、恢复重建 4 个阶段, 涉及灾害管理的信息报告、灾情研判、应急救援、重建规划、灾害防治、生态修复、监测预警等 10 余个环节^[16-17], 对应了应急测绘的预案

启动、应急地理信息获取、测绘基准恢复维持、灾害调查监测等 10 个工作流程(图 1), 提供专题地图、地理信息数据、遥感影像、三维模型、现场视频和分析评估报告等 8 类应急测绘产品和服务。

1) 应急准备。利用测绘遥感手段开展自然灾害和

孕灾环境调查评价；采用全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic-aperture radar, InSAR)、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)及高清光学遥感等技术对高风险地区和重要灾害点进行动态监测；储备重点地区应急地理信息数据、专用地图等，利用灾害预警信息服务平台开展灾害的预测预警。

2)应急响应。灾后立即启动应急测绘保障预案，向各方救援力量提供已有测绘成果及应急专题地图，同时建立恢复灾害现场应急测绘基准，利用无人机、有人机、卫星以及地面和地下勘测设备开展应急地理信息获取与处理，进行遥感影像解译、空间分析与灾害发展态势

评估，提出减灾建议，为政府决策和抢险救援提供支撑。

3)恢复重建。通过遥感监测发现房屋倒塌、道路破坏、基础设施损毁等，开展损失评估。利用大比例尺地理信息数据、测绘基准恢复重建成果、自然资源和环境调查评价成果等为灾后恢复重建规划与实施提供可靠的数据支撑和保障。

4)防灾减灾。为灾害防治、风险管理、国土空间规划和生态环境修复，提供地理信息数据和灾害防治专用图及地理信息技术支撑，通过实施国土空间规划有效避让重大灾害点，生态环境的修复从灾害源头的治理出发，降低孕灾环境的脆弱性，减少灾害易发性。

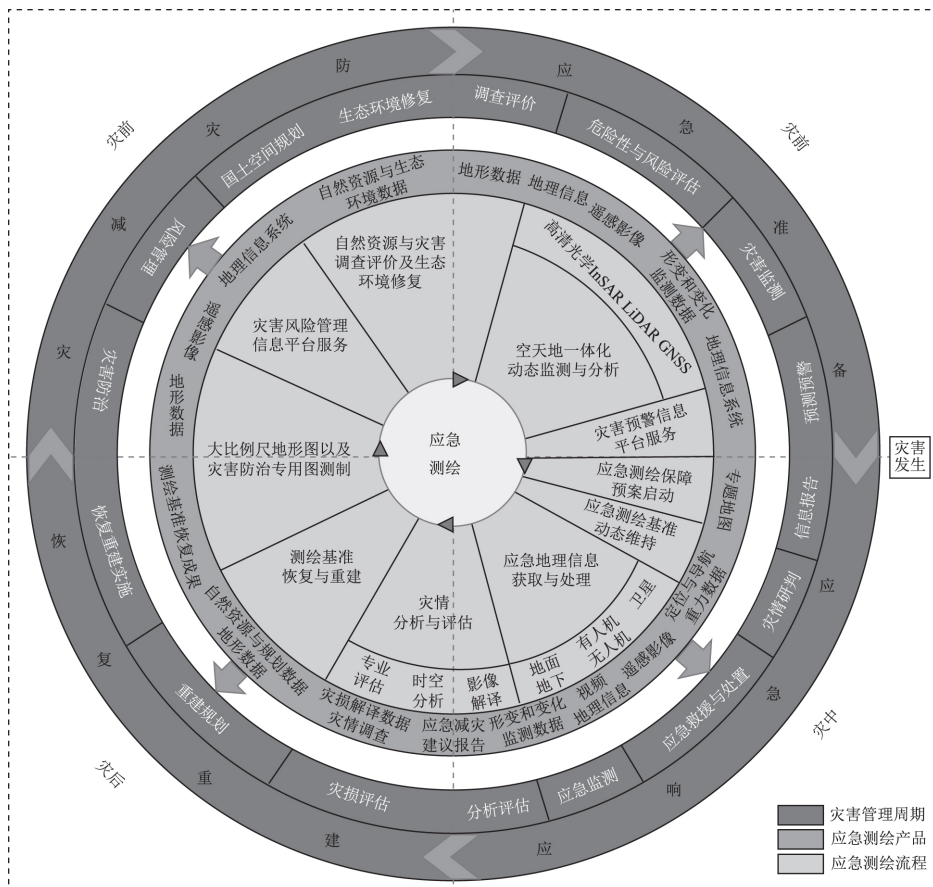


图 1 灾害周期与应急测绘工作流程图

Fig 1 Disaster Management Circle and Emergency Surveying and Mapping Process

3 应急测绘发展现状

应急测绘体系是包含组织体系、工作机制、技术装备和保障服务等方面的系统，其高效、有序地运行，需要有完备的组织体系和运行机制，先进可靠的技术装备能力，丰富的应急数据资

源，以及强大的分析和决策能力的平台系统作为支撑。

3.1 应急测绘组织体系

3.1.1 完善的组织机构体系和工作机制

20 世纪 90 年代以来，随着各国发射遥感卫星能力的不断增强，以及空间对地观测技术的迅速

发展, 空间减灾国际合作组织及运行机制也呈现不断产生、发展的趋势, 并广泛发挥作用^[18]。《国际空间与重大灾害宪章》于 2000 年正式运行, 目前成员已达 17 个, 拥有 19 个合作伙伴, 形成了较为成熟的工作流程和运行机制。截至 2019 年, 宪章已为世界 126 个国家超过 600 余起的重大突发事件提供应急测绘服务^[2]。欧盟制定了哥白尼应急管理服务机制, 主要提供灾害早期预警和灾害制图两种服务, 已启动各类灾害制图服务 300 余次, 生产制图产品 3 600 余幅^[19]。日本主导成立了亚洲哨兵组织, 其成员已包括 25 个国家的航天或减灾机构, 主要服务亚太地区的灾害管理^[20]。我国作为创始国之一的地球观测组织, 目前拥有 104 个成员国和欧盟等 126 个组织, 为灾害预报、准备、减轻和响应提供的制图产品和信息服务^[18]。此外, 国际相关领域的专家成立了卫星应急制图国际工作组(IWG-SEM)。我国经过多年的探索和实践, 建立了一套完善的统一领导、分级负责的组织机构体系和工作机制, 形成了较为顺畅的“纵向互连、横向互通”的应急联动响应机制^[5]。测绘与应急管理、地震、水利、自然资源、林业、公安等部门及军队之间建立了较为成熟的应急联动响应和协作机制, 基本实现了应急信息的互联互通和交换共享。

3.1.2 分级应急测绘保障预案体系

国际上, 多数国家未制定应急测绘保障专项预案, 而是在突发事件应对相关法律法规、总体预案、应急操作手册、应急响应机制中明确应急测绘的职责和任务^[21]。如美国内政部制定了系列应急管理相关手册, 明确应急管理办公室利用地理空间技术支持应急管理^[22]; 日本国土院在《日本灾害对策基本法》框架下, 作为政府机构及时提供与防灾密切相关的地壳运动、地形和土地利用等地理信息^[23]; 德国宇航中心的危机信息中心制定了详细的应急测绘响应流程。我国于 2009 年发布《国家测绘保障应急预案》, 各省级自然资源和测绘主管部门、相关企业也相继制定了部门级应急测绘保障预案, 形成了较为完备的国家、省级应急测绘保障预案体系^[5]。在国家和各省制定的突发事件总体应急预案、各类灾害应急专项预案及部门应急预案中, 也均明确了应急测绘保障的职责和任务。应急测绘保障预案体系的不断完善, 使应急测绘运行机制和工作流程更加顺畅, 显著提升了应急响应效率。

3.2 应急测绘技术体系

应急测绘技术体系包含基础设施、数据资

源、装备体系、关键技术 4 个方面。近年来, 随着现代测绘技术的迅速发展与应用, 测绘基础设施逐步完善, 先进技术和装备集成化程度提高, 多学科融合更加深入, 应急测绘技术得到较大发展。

3.2.1 具备应急响应能力的测绘基础设施

1) 现代化地面和近地空间三维定位基础设施逐步建成完善。抢险救灾和灾后重建等需要动态、精准的三维定位和导航服务, 随着现代空间技术的发展和运用, 主要国家在传统测绘基准体系的基础上, 逐步建成了具有高精度、全地域、动态、三维地心等特点的现代测绘基准体系, 作为维持和更新测绘基准体系的 GNSS 连续运行基准站网逐步建成完善^[24]。如美国国家大地测量局建立了连续运行参考站(Continuously Operating Reference Stations, CORS)系统, 日本的全球定位系统永久性跟踪站网(GPS Earth Observation Network, GEONET), 德国的卫星定位与导航服务(the German Satellite Positioning Service, SAPOS)系统^[25]。我国于 2003 年通过整合全国范围内 2 518 个 GPS 控制点和 30 个连续运行基准站, 形成了 2000 国家大地控制网。目前我国自然资源系统已建成 GNSS 连续运行基准站 3 136 座。

2) 具备全天时、全天候和全球覆盖能力的灾害卫星对地遥感观测网络基本形成。卫星遥感是灾害制图、调查监测和评估不可或缺的手段^[26]。截至 2012 年, 全球共发射 320 多颗对地观测卫星^[18]。其中, 数 10 颗卫星可在应急响应机制协调下用于灾害监测和应急服务, 初步形成了全球虚拟的灾害监测卫星星座, 能够获取大量与灾害相关的大气、海洋和地表的高精度、高时空分辨率观测数据^[27-30]。我国在国家综合减灾“十一五”规划中提出了建设环境与灾害监测小卫星星座^[31], 实现“4+4”减灾卫星星座方案, 达到全球优于 12 h 的高时效重复观测能力。近年来发展了多颗高轨遥感卫星, 将全球灾害应急响应能力提高到分钟级, 为灾害监测、风险与损失评估业务提供了有力的数据保障^[32]。到 2020 年, 将形成具有时空协调、全天时、全天候和全球范围观测能力的稳定运行系统^[33]。

3.2.2 初步构建了应急测绘装备体系

2008 年汶川地震后, 我国应急测绘保障能力快速发展, 研制了航空应急遥感、地面应急测绘采集与监测、应急遥感数据快速处理、应急快速制图与输出和应急测绘服务保障系列装备^[5]。构建

了“空地一体、机动灵活”的无人机集群灾情信息获取系统^[13]。2015 年启动了国家应急测绘保障能力建设项目,极大地推动了国家航空应急测绘、灾害现场应急勘测、应急测绘指挥决策和应急资源共享装备能力建设,基本形成无人机起飞后 4 h 可覆盖我国 80% 陆地及沿海重点区域的灾害现场影像获取能力,以及 2 h 提供应急指挥用图、12 h 提供第一批灾害现场应急测绘成果、7×24 h 不间断在线应急测绘数据处理与分发服务能力,实现突发事件现场信息快速获取、分析、处理与高效服务,应急测绘保障的整体响应效率提高 3~4 倍^[11]。

3.2.3 多源、海量、实时和共享的应急测绘资源

目前,各国应急数据资源主要是通过航天航空飞行器搭载的传感器,对地球进行观测获得的灾害和环境相关信息,如 Landsat、SPOT、JERS、Radarsat、ERS、Envisat、IKONOS、QuickBird、WorldView、CBERS、HJ、ZY 和 GF 等卫星观测数据。随着高分辨率对地观测和无人机普及时代的到来,灾害观测数据正以每日太比特级的速度增长^[33],这些海量多源观测数据为全球灾害应急管理提供了坚实的数据基础。经过多年积累,我国形成了以基础地理信息为主、行业专题数据为重要补充的应急测绘数据资源体系^[34]。包括全国覆盖年度更新的 1:50 000 基础地理信息数据和全国覆盖率为 62.4% 的 1:10 000 基础地理信息。全国覆盖、定期更新的卫星遥感影像数据,海量航空摄影数据。积累了包括全国 20 余个部委的突发事件重大危险源、风险防范区、重点防护目标和应急保障资源等类型的应急专题信息。全国各省通过交换共享机制,收集了大量自然资源、地震、水利、气象、交通、环保等部门的专题数据,在国家 and 省级层面初步建立应急测绘资源数据库,实现了应急数据资源共享应用。

3.2.4 应急测绘关键技术

1) 测绘基准快速恢复与 GNSS 减灾应用技术。重大灾害发生后,地面测绘基准往往遭受损失,需要采用卫星导航定位技术快速恢复或建立灾区平面和高程基准,为抢险救灾和灾后重建提供定位和导航服务^[35],学者多采用基于国家(区域)的 CORS 系统的网络实时载波相位差分(real-time kinematic, RTK)技术、通过与灾区周围的 CORS 站联测、基于静态模式建立临时基准站的单站或网络 RTK 技术以及精密单点定位技术及广域差分技术等实现了测绘基准快速恢复^[1]。2008 年汶川

地震后,四川测绘地理信息局提出了应急基准快速恢复与动态维持技术,达到震后 12 h 快速恢复 1 500 km² 范围内的基准服务。GNSS 系统一直作为灾害监测预警的重要技术和通信手段。地壳形变监测方面,被成功应用于大规模和区域性的应变积累、板块运动、沿着断层滑动、震前和震后的变形监测^[36-37]。海平面变化监测方面,通过装备有 GNSS 的海面浮标接收器以及 GNSS 测高技术实现毫米级海平面变化量测^[38-39]。GNSS 与 InSAR、水准测量等其他大地测量技术,被广泛应用于滑坡、崩塌等地表形变监测^[40-42]。

2) “空天地”立体化灾害调查、监测与预警技术。建设“空天地”立体化遥感对地观测技术体系一直是各国政府和组织面临的重要任务。近年来,卫星对地观测对灾害事件的响应效率大幅提升,2006 年从启动应急响应到成功获取影像数据的时间平均为 4.5 d,到 2014 年缩短至 2.5 d,应急影像产品制作自动化水平也在不断提高,技术人员可在 6~16 h 内提取或解译灾害相关信息,并将其转变为可用地理信息产品^[2]。利用卫星遥感、无人机、地面勘测技术开展灾害识别、调查与监测等方面也展现了较好的发展前景^[43],如房屋倒损评估、基础设施损毁评估、次生灾害监测、紧急转移安置区规划与监测、恢复重建监测等方面的遥感评估^[10];地质灾害遥感调查监测、灾情解译和分析评估等技术应用较为广泛^[44-45]; InSAR 技术和基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警技术成为热点,以此构建的地质灾害“三查”体系已在四川、贵州等省开展了工程化应用,并取得了良好的成效^[14,46-49]。

3) 海量应急数据实时快速处理以及灾情信息解译技术。突发事件的应急处置需要接近实时的数据处理效率。目前,多源海量应急数据的处理效率不够高。按照历年应急测绘保障经验,可实时提供应急视频影像,2 h 内提供灾害现场地理信息现状图,3 h 内提供应急专题图,4 h 内提供三维模型、灾后 DEM 等应急测绘产品。随着多源传感器数据与信息融合、遥感数据的一体化综合快速处理、遥感影像精密定位等技术快速发展,国内外相继推出了新一代航空航天数字摄影测量数据处理平台,应急测绘数据的自动处理速度显著提高^[9],应急测绘产品生产时间进一步缩短,效率提升约 1 倍。在灾情信息解译方面,开展了空间信息认知模型和遥感影像智能解译的理论、多传感

器遥感信息目标自动识别与分类的理论与方法以及遥感影像快速并行处理方法等研究, 然而由于灾害孕灾背景、致灾因子和承灾体时空特征的复杂性, 以及计算机图像识别与信息理解能力的制约, 目前应急影像的解译和目标识别仍然停留在人工目视判读的水平, 仍难以实现灾情信息自动化、智能化解译。

4) 面向任务的应急测绘智能化服务技术。针对多层次、多样化的应急测绘任务需求, 学者提出了一种新的应急测绘任务驱动的聚焦服务机制及技术体系, 实现包括聚焦服务架构、智能搜索、服务动态组合与服务链演化等基本目标^[50]。学者研发了面向应急任务的快速专题制图系统、基于互联网灾情地理信息变化发现系统及自然灾害地理信息发布平台。提出了语义关联的灾害信息智能选取方法, 建立了动态数据驱动的重大自然灾害模拟与精细风险评估方法, 突破了任务感知的灾害场景按需构建、多模态数据高效组织管理、时空数据智能聚合服务等关键技术, 基本形成了重大自然灾害动态模拟、风险评估与信息智能服务技术体系^[51]。

5) 初步构建了科学、实用的应急测绘标准体系。国际标准化组织地理信息标准化技术委员会(ISO/TC211), 制定了社区灾害早期预警系统一般准则、自然灾害安全方法疏散指导系统(图形符号)、社区安全和抵御能力、事故防范和运营连续性管理指南等 12 项应急测绘相关标准^[52]。开放地理信息协会发布了防灾能力试点用户系列指南, 包括地理空间平台图像数据用户指南、洪水应急响应和影响评估、社区互通的灾害影响及时分析、洪灾中互操作性的数据资源优化分配、洪水飓风和农业状况的快速评估等^[53]。美国、德国和日本等国家的标准化研究机构及相关应急管理部门也制定了应急测绘相关的国家标准、学会标准、协会标准或行业标准^[54]。我国制定了灾害遥感专题图的产品制作、草原沙化遥感监测、草地石漠化遥感监测等应急测绘相关的国家标准 9 项, 相关行业标准 9 项^[54]。测绘行业制定了应急测绘术语、无人机航空应急测绘影像获取、应急基准损毁检测与恢复建设技术、应急影像快速处理、灾情样本影像制作与信息解译、应急专题地图制图和应急测绘野外安全生产等 13 个应急测绘标准规范, 形成了较为完善的应急测绘标准体系^[55]。

3.3 应急地理信息平台

多数国家和地区建立了以测绘遥感和地理信

息为基础建立了统一协调、互联互通、信息共享的应急管理信息平台。美国于 2001 年发布“国家突发事件管理系统”, 实现了应急测绘技术与突发事件应急管理融合。英国政府在 2004 年建立从国家到地方的综合应急管理系统。德国于 2001 年建成“德国紧急预防信息系统”。日本在 2002 年完成“灾害信息系统”。我国各级政府和部门也基本建立了有侧重、有特设的应急系统或平台^[56], 如北京市、上海市、吉林省、广东省、陕西省、黑龙江省、四川省、湖南省、重庆市等陆续建立了省级应急地理信息平台, 公安、地震、水利、民政、林业、气象等部门以测绘地理信息为基础, 在专业应急系统研发方面也初具成效^[57]。

4 四川应急测绘体系构建及实践

4.1 四川应急测绘体系构建

2008 年以来, 四川在应对历次重大地震、地质灾害等自然灾害工作中, 构建了省级应急测绘保障体系(包括组织体系、技术体系和指挥平台), 在突发事件应急处置与防灾减灾工作中发挥了重要作用, 并逐步在全国推广。

1) 四川应急测绘组织体系。应急测绘组织体系涵盖应急预案、应急机制、应急标准、应急队伍 4 个方面。通过制定全国首个省级应急测绘保障预案, 建立“横向互联、纵向互通”的应急联动响应机制, 建设专业化应急保障队伍, 编制应急测绘系列标准, 形成了高效的应急测绘组织体系。

2) 四川应急测绘技术体系。四川从应急数据储备、应急基础设施、应急关键支撑技术等方面深入开展研究和建设, 形成了系统化、高度集成的应急测绘技术体系。① 应急数据储备。构建基于“基础库、专题库、模型库”三库一体的应急测绘大数据库, 实现基础库(基础地理信息、地理国情监测、地理信息公共服务平台数据)、专题库(高精度地质灾害地理信息数据, 以及地震、水利、交通、气象、民政等行业专题数据)和模型库(用于机器学习无人机遥感影像样本库、三维模型等数据模型, 以及灾情评估、灾害预警等知识模型)的高效集成管理; ② 应急基础设施。以大规模省级北斗地基增强系统, 以及全省 100 座兼容 Beidou/GPS/GLONASS 的连续运行基准站为基础, 建立四川省北斗导航高精度基础数据中心, 为应急处置及防灾减灾提供高精度的实时导航与位置服务。通过建立应急测绘专网, 实现与自然

资源部、省政府应急指挥中心及相关省级部门的联动和协同，实现应急状态下测绘地理信息与应急专题信息的快速集成与交换共享；③应急测绘关键技术。研究应急测绘基准快速恢复技术，保障应急状态下持续开展全天候、三维、实时动态、高精度的空间定位服务，在汶川地震后，紧急开展灾区测绘基准恢复工作，实现 12 h 快速恢复 1 500 km² 范围内的基准服务。高效集成无人机、有人机、卫星、移动测量车等测绘技术手段及装备，构建了“天地一体、机动灵活”的数据快速获取体系。针对四川省高原、山地等复杂条件下普通低空无人机飞行困难的技术瓶颈，将飞行高度从海拔 3 000 m 提升到海拔 5 500 m；通过通信频率差异化配置，实现了同一区域无人机多架次并行航摄，大幅提升应急状态下的空域资源利用率和成果提供使用速度，显著提升灾后影像获取能力。研发遥感影像数据快速处理技术，采用自动化、并行处理、远程管理等技术，大幅提高了影像处理效率，影像数据效率提高 10 倍以上。研

究基于无人机影像快速解译房屋、道路、桥梁损毁、土地灭失等要素自动化解译技术，形成灾情快速评估能力。研发应急信息智能化服务平台，大幅提升灾情地理信息在线服务能力。

3)四川省应急测绘指挥平台。按照应急测绘机制和工作内容，构建以现代信息通信、遥感与地理信息、虚拟现实技术为基础，软硬件相结合的省级应急测绘指挥平台(图 2)。平台设计采用 4 层体系架构，运行支撑层主要包括应急通信网络、硬件设施环境和软件支撑环境；数据层是应急测绘大数据库，包括以测绘地理信息数据为主体的基础库、交换共享获取的各行业专题数据和用于分析的模型知识库；应用支撑层以各类服务接口为主，包括数据库管理系统、API 接口服务、通信接口服务、数据交换共享服务、地理信息系统等；应用层包括系统平台及行业应用，包括指挥调度、辅助决策、应急地图和灾情发布 4 个子系统，以及森林草原防灭火、地质灾害防治和水旱灾害应急等行业应用系统。

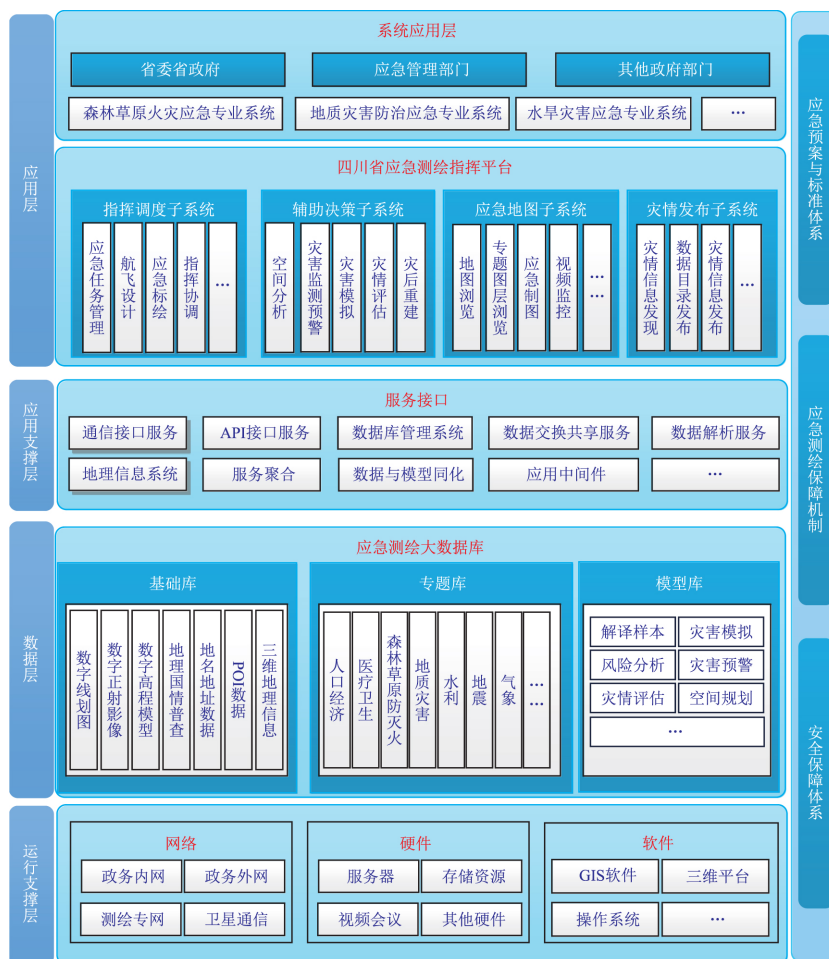


图 2 四川省应急测绘指挥平台总体架构

Fig 2 Emergency Surveying and Mapping Command Platform of Sichuan Province

4.2 四川应急测绘重大实践

2008 年以来, 四川测绘地理信息局历经数 10 次重大自然灾害应急测绘实践, 应急测绘保障工作从科学救灾、科学减灾、科学避灾逐步走向成熟, 应对灾情更加沉着有序, 预案更加完备, 救援更加科学。

1)2013 年, 芦山“4·20”强烈地震应急测绘保障。按照应急测绘工作流程和内容。震后, 第一时间启动测绘保障应急预案和 I 级应急测绘响应, 提供已有测绘成果, 启用应急测绘指挥平台; 震后 2 h 完成第一幅抗震救灾专用图编制, 同步开展应急导航和位置服务; 震后 7 h 利用无人机成功获取地震灾区第一批影像并制作影像图, 开展影像快速处理, 并持续开展次生灾害监测; 震后 17 h 完成次生灾害影像解译, 完成地震及次生灾害分析评估, 通过地理信息发布平台对外服务, 为各级抗震救灾指挥部、参与抗震救灾的武警、解放军以及专业救援队伍等提供了大量的应急测绘成果服务。灾后重建阶段, 参与完成灾后重建总体规划、防灾减灾和地质灾害防治专项规划编制, 为灾区资源环境承载力评价提供测绘地理信息支撑。此次应急测绘保障工作响应迅速, 保障精准, 全程参与抢险救援、过渡安置、损失评估、灾后重建各个阶段, 是应急测绘保障走向成熟的标志。

2)2017 年“6·24”茂县叠溪山体滑坡应急测绘保障。根据四川省政府部署安排, 灾后立即启动应急预案, 启用应急测绘指挥平台。派出无人机应急测绘分队, 在灾情发生不到 24 h, 获取核心灾区高分辨率航空及激光雷达影像数据, 完成数字正射影像和数字高程模型处理; 根据灾前灾后影像及数字高程模型, 计算滑坡危害范围和堆积厚度等(图 3); 紧急制作救灾应急专用图、灾前、灾后影像图及叠加对比图等, 获取并制作灾害体全景影像图; 通过地理信息发布平台及时发布、共享灾情地理信息; 根据灾后影像, 监测二次滑坡裂缝发展, 基于滑坡运动模型开展潜在滑坡体威胁范围模拟分析(图 4), 与权威部门、单位共同编制灾害预测、灾害应对、应急处置和减灾建议报告, 成果通过应急传输系统传送至四川省政府和相关应急管理部门。此次灾害事件, 首次成功开展了二次灾害预测和研判, 应急测绘与防灾减灾实现紧密结合, 避免了因二次垮塌导致人员伤亡事件, 应急测绘保障从科学减灾走向科学避灾。

3)2018 年, 金沙江白格堰塞湖应急测绘保障。按照自然资源部和四川省政府部署安排, 第一时间启动应急预案, 启用应急测绘指挥平台, 提供已有

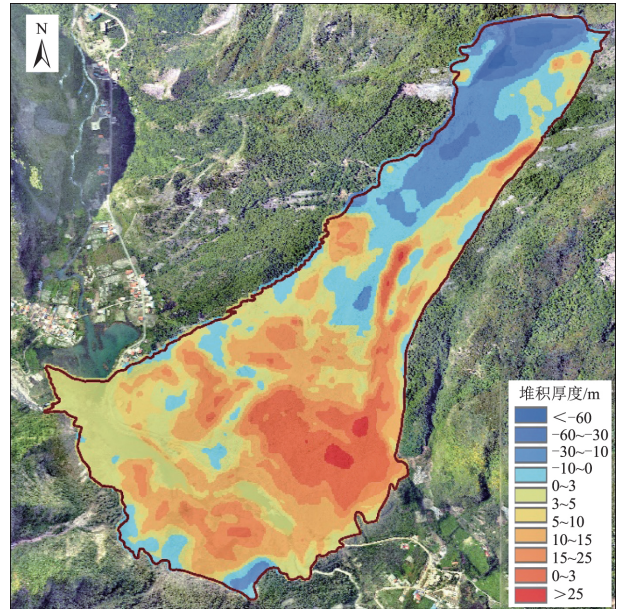


图 3 滑坡堆积厚度

Fig 3 Depth of Landslide

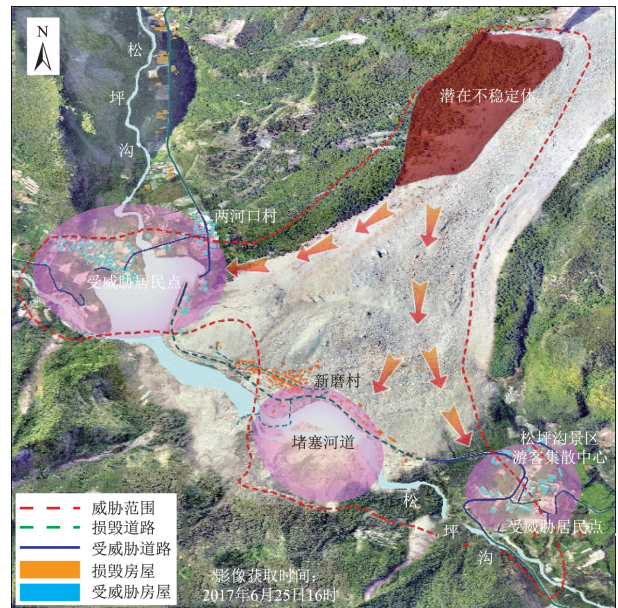


图 4 滑坡风险模拟结果

Fig 4 Simulation of Landslide Risk Area

测绘成果。利用无人机获取滑坡及堰塞体上下游沿江灾后无人机影像, 制作了数字正射影像、实景三维模型、数字高程模型, 结合卫星遥感和无人机(每天两次)持续监测滑坡和堰塞湖发展趋势; 利用灾前、灾后航空航天遥感影像和地理信息数据, 研判滑坡后缘新增裂缝, 成功预测二次垮塌形成堰塞湖风险(图 5); 计算堰塞坝土石方量及堰塞湖相关参数, 计算泥沙冲刷量、泄洪通道等, 模拟堰塞湖溃坝洪水威胁下游城镇和重要设施的危险性, 编写减灾建议和堰塞湖应急处置报告, 成果送自然资源部前线工作组、应急管理部、省地质灾害及省防汛抗旱指挥部等。堰塞湖风险处置后, 利用 InSAR 和

LiDAR 等技术手段开展上下游地质灾害隐患识别和动态监测, 为灾害监测预警提供支撑。此次灾害后,

四川应急测绘工作实现了从注重灾后救助向注重灾前预测、预报、预警等预防为主转变。

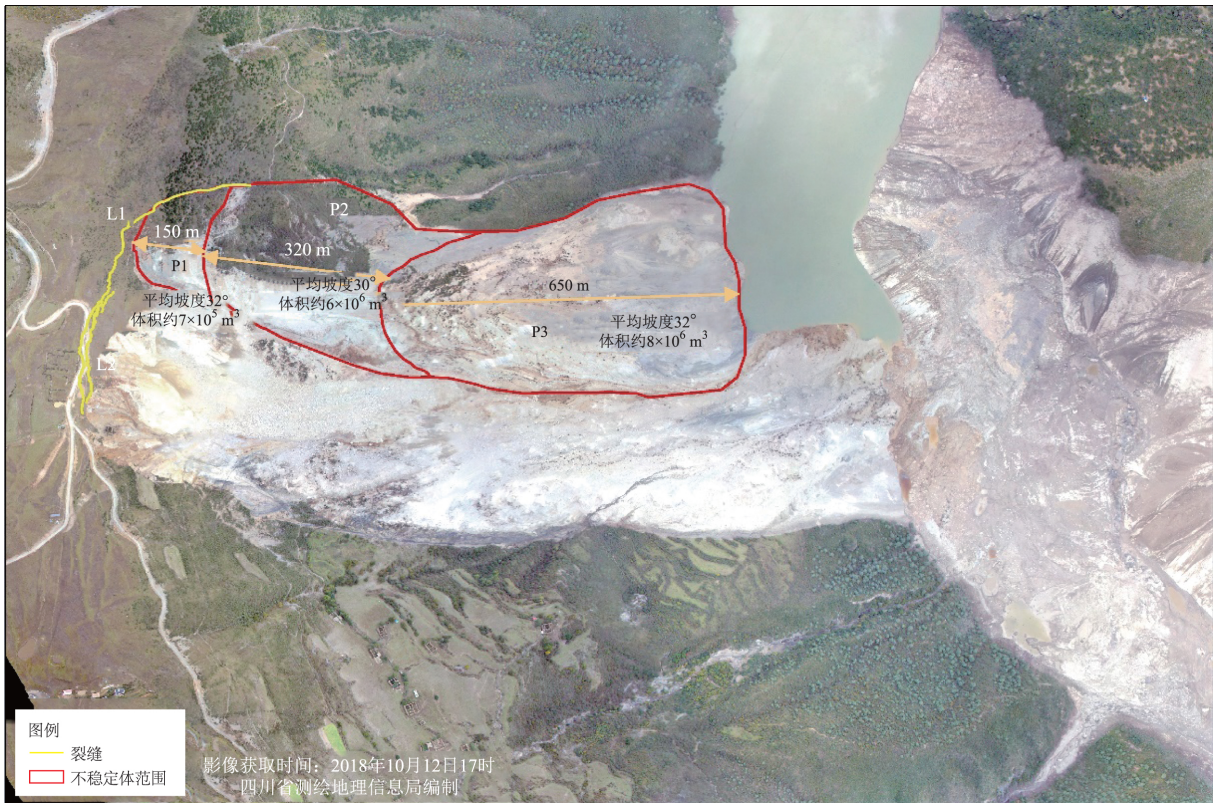


图 5 滑坡裂缝发展及再次堵江形成堰塞湖评估

Fig 5 Analysis of the Potential Landslide Development and the Risk of Landslide Dam Lake

5 应急测绘发展面临的机遇与挑战

受全球气候变化等自然和经济社会因素耦合影响, 未来极端天气事件及其次生衍生灾害呈增加趋势, 自然灾害的突发性、异常性和复杂性将有所增加, 各国防灾减灾救灾形势依然十分严峻, 对应急测绘技术支撑的基本需求将更为迫切。2019年, 我国应急管理机构改革推动应急体制机制取得重大进展, 政府层面更加重视各种防灾减灾技术的应用和各方力量的整合, “大应急”的理念逐渐形成, 应急测绘成为应急管理的一支重要力量。同时, 测绘合并到自然资源系统, 使应急测绘与地球系统科学结合得更加紧密, 应急测绘保障的职责得到延续和拓展。技术方面, 先进测绘地理信息装备技术飞速发展, 与物联网、大数据、云计算、人工智能等技术的跨界融合日益加快, 推动应急测绘发展面临一系列新的理论问题需要解决、新的关键技术需要研究。

1) 加快推进应急测绘理论与体制机制研究及应用实践。应急测绘取得的效益已得到政府、组织和专家学者的广泛认可。然而, 目前对应急测绘

理论方法缺乏系统性的研究和总结, 先进技术体系和实践经验因缺少理论支撑, 难以在全国和世界其他地区、国家推广应用。需要系统研究面向不同灾种的应急测绘保障预案、组织体系和实战工作手册, 研究应急测绘任务规划与资源高效调度方法, 建设高效的应急指挥和决策支持系统等。创新应急测绘体制机制, 建立完善的国际、国家、省、市、县各级政府纵向互通, 以及各级部门间和机构间横向互联的应急联动响应机制、资源共享机制和协同会商机制。建立统一的技术标准和规范体系。加强应急测绘保障演练和重大灾害应急管理应用实践。

2) 完善现代化应急测绘基础设施与提升国产化先进装备研发能力。测绘基准现代化和空间对地观测技术的快速发展为防灾减灾提供了有力的支撑。然而, 为实现全天候、全天时、全球化及高精度、动态的应急测绘服务目标, 还需解决测绘基准站点数量不足、定位精度不够、动态监测终端成本高, 以及国产高分辨率卫星少、响应时效性低、全天候观测能力弱、全谱段观测手段少(亚米级分辨率和优于 1 d 的快速响应型卫星仍极度匮乏, 可穿透云层能力较差)等问题。需要完善国家

和区域连续运行参考站)系统,整合地震、气象等部门的监测设施,加强地壳形变及海平面变化大地测量监测网络及相关基础设施建设。完善灾害遥感对地观测网络体系,研发具有普适性的国产化灾害监测预警设施设备,发展国产化机载 LiDAR 和多传感器集成的高分辨率航空遥感平台、平流层悬停全天时不间断对地观测平台、远程控制轻型化超高分辨率低空遥感平台等,具备面向应急响应任务的多种观测手段智能调度与聚焦服务能力。

3)加强应急测绘关键技术研发及成果应用转化。测绘技术的发展及与相关领域的融合,推动应急测绘技术向“快、准、全、新”的目标靠近,要满足应急管理新要求,还要加强关键技术的研发和应用。需要探索灾区测绘基准的快速恢复或重建技术,研究卫星-航空-低空遥感对地观测传感器网络及机动组网技术,克服复杂天气的应急数据快速获取和灾情动态监测技术,满足海量、多源、涉密应急测绘数据的快速、稳定和安全传输技术,基于新型智能处理算法与处理模式的海量观测数据快速处理和灾情信息提取技术。进一步研究灾害智能搜索和主动聚焦服务、基于知识图谱的灾情信息优选与智能服务和大规模灾害复杂场景融合与增强可视化等难题。需要注重与地球科学理论技术的融合,进一步拓展研究内容和范畴,构建新一代应急测绘时空大数据库,突破实时数据驱动的灾害动态模拟预警、时空大数据高效组织管理、协同计算与知识发现等瓶颈问题,研制面向防灾减灾的时空大数据处理和空间智能决策支持软件平台,加强成果转化应用,为应急管理提供成套的智能信息服务方案。

6 结束语

近 20 年来,应急测绘已从灾害发生后获取现场数据的技术手段,逐渐发展成为新型测绘工程技术领域、基础测绘的重要业务和应急管理体系的重要组成部分。应急测绘在重大自然灾害的应对中发挥了重要作用,然而其理论方法和关键技术整体水平仍处于初步发展阶段。为满足应急管理和灾害应对的需要,基础理论需要进一步扩展和深化,基础设施建设和装备研发有待加强,诸多关键技术须有结合应急实践进行探索、研究和应用。当前,世界防灾减灾形势十分严峻,我国政府对灾害应急管理高度重视,大数据、云计算、人工智能等技术与地理信息服务的融合给应急测绘的发展带来了新的机遇和挑战。本文基于近年来

在重大自然灾害应急测绘保障实践工作中的思考和总结,阐述了应急测绘的内涵及特点,总结了面向不同灾种的应急测绘保障内容及工作流程,对应急测绘的组织体系、基础设施、装备体系、关键技术及应急平台等方面的发展现状和趋势作了分析和展望,介绍了四川应急测绘体系构建经验及实践,指出了应急测绘理论方法和体制机制研究、基础设施建设与先进装备研发、关键技术研究及成果应用转化等存在的问题及发展趋势,以期推动应急测绘在防灾减灾救灾及应急管理方面的应用。

参考文献

- [1] 李建成,宁津生,闫利. 应急测绘技术[C]//第十三届中国科协年会第 12 分会场-测绘服务灾害与应急管理学术研讨会论文集. 天津:[出版者不详],2011:3-8. (LI Jiancheng, NING Jinsheng, YAN Li. Emergency response surveying mapping technology[C]//Proceedings of the Thirteenth Session of the 13th China Association for Science and Technology Annual Conference-Symposium on Disaster Surveying and Mapping Services and Emergency Management. Tianjing:[s. n.],2011:3-8.)
- [2] VOIGT S, GIULIO-TONOLO F, LYONS J, et al. Global trends in satellite-based emergency mapping [J]. Science,2016,353(6296):247-252.
- [3] OKOLI E J, ENGBUMA W I. Overview of remote sensing application for search of mh370 [J]. Jurnal Teknologi,2015,77(15):63-68.
- [4] ZOLLNER K. United nations platform for space-based information for disaster management and emergency response (UN-SPIDER) [C] // Satellite-Based Earth Observation. Switzerland: Springer, Cham. 2018: 235-241.
- [5] 李朋德. 中国应急测绘体系建设与实践[J]. 卫星与网络,2013(11):22-27. (LI Pengde. Construction and practice of China's emergency surveying and mapping system[J]. Satellite & Network,2013(11):22-27.)
- [6] 曹振宇. 自然灾害应急测绘信息服务机制与方法[D]. 武汉:武汉大学,2014. (CAO Zhenyu. Mechanisms and methods of emergency mapping information services for natural disaster[D]. Wuhan:Wuhan University,2014.)
- [7] 汤建国,胡传文,王玲,等. 省级应急测绘保障服务体系研究[J]. 测绘通报,2012(7):94-96. (TANG Jianguo, HU Chuanwen, WANG Ling, et al. Study of provincial surveying emergency mapping service system [J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2012(7):94-96.)
- [8] 李卓聪. 自然资源部:做好机构改革过渡期应急测绘保障工作[J]. 资源导刊,2019(2):6. (LI Zhuocong. Ministry of natural resources: doing a good job of emergency surveying and mapping in institutional

- reform[J]. Resource Guide, 2019(2):6.)
- [9] 李德仁. 论空天地一体化对地观测网络[J]. 地球信息科学学报, 2012, 14(4):419-425. (LI Deren. On space-air-ground integrated earth observation network[J]. Journal of Geo-Information Science, 2012, 14(4):419-425.)
- [10] 范一大, 吴玮, 王薇, 等. 中国灾害遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5):1170-1184. (FAN Yida, WU Wei, WANG Wei, et al. Research progress of disaster remote sensing in China [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5):1170-1184.)
- [11] 赵勇, 武昊, 王中祥, 等. 国家应急测绘保障能力建设项目总体技术设计[J]. 测绘通报, 2019(9):121-127. (ZHAO Yong, WU Hao, WANG Zhongxiang, et al. Major design of capacity building project for national emergency surveying and mapping in China [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(9):121-127.)
- [12] 余银普, 李冲. 四川汶川地震灾区应急测绘基准精度检测[J]. 测绘, 2009, 32(5):229-232. (YU Yinpu, LI Chong. The accuracy test of emergent benchmark surveying in Wenchuan earthquake disaster area[J]. Surveying and Mapping, 2009, 32(5):229-232.)
- [13] 周兴霞, 廖小露, 刘嘉. 无人机航摄技术在四川省应急测绘保障中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(10):239-242. (ZHOU Xingxia, LIAO Xiaolu, LIU Jia. Application of unmanned aerial vehicle photogrammetric in emergency surveying and mapping support in Sichuan Province[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2014, 37(10):239-242.)
- [14] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7):957-966. (XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7):957-966.)
- [15] 杜萍, 刘涛, 李鼎凯, 等. 应急场景快速制图及地图信息传输[J]. 测绘学报, 2019, 48(6):747-755. (DU Ping, LIU Tao, LI Dingkai, et al. Rapid mapping of emergency scenario and cartographic information transmission[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(6):747-755.)
- [16] KHAN H, VASILESCU L G, KHAN A. Disaster management cycle-a theoretical approach[J]. Journal of Management and Marketing, 2008, 6(1):43-50.
- [17] LEWIS S. Remote sensing for natural disasters: facts and figures [EB/OL]. (2009-11-11) [2020-07-03]. <https://www.scidev.net/global/earth-science/feature/remote-sensing-for-natural-disasters-facts-and-figures.html> ?
- [18] 郭华东, 陈方, 邱玉宝. 全球空间对地观测五十年及中国的发展[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(Z1):7-16. (GUO Huadong, CHEN Fang, QIU Yubao. Development of earth observation over the past half century and future direction[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(Z1):7-16.)
- [19] Copernicus Emergency Management Service[EB/OL]. [2020-07-03]. <https://emergency.copernicus.eu/>.
- [20] KAKU K, HELD A A, FUKUI H, et al. Sentinel Asia initiative for disaster management support in the Asia-Pacific region [C] // Disaster Forewarning Diagnostic Methods and Management, Goa, India: SPIE, 2006: 03-10.
- [21] ALEANDER D E. Principles of emergency planning and management [M]. Oxford University Press on Demand, 2002:12-41.
- [22] Department of the Interior. All-Hazards baseline operational plan [EB/OL]. (2014-04-01) [2020-07-03]. <https://www.doi.gov/sites/doi.gov/files/migrated/emergency/upload/DOI-Baseline-Ops-Plan-Final-Signed-4JUNE14.pdf>.
- [23] Disaster Prevention Activities by GSI [EB/OL]. [2020-07-03]. https://www.gsi.go.jp/ENGLISH/page_e30067.html.
- [24] 姜卫平. 卫星导航定位基准站网的发展现状、机遇与挑战[J]. 测绘学报, 2017, 46(10):1379-1388. (JIANG Weiping. Challenges and opportunities of GNSS reference station network [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10):1379-1388.)
- [25] 过静珺, 王丽, 张鹏. 国内外连续运行基准站网新进展和应用展望[J]. 全球定位系统, 2008, 33(1):1-10. (GUO Jingjun, WANG Li, ZHANG Peng. The application and expectation of CORS in international and China [J]. GNSS World of China, 2008, 33(1):1-10.)
- [26] BOCCARDO P. New perspectives in emergency mapping [J]. European Journal of Remote Sensing, 2013, 46(1):571-582.
- [27] WULDER M A, COOPS N C. Satellites: make earth observations open access [J]. Nature, 2014, 513(7516):30-31.
- [28] University of Twente, ITC's database of satellites and sensors [EB/OL]. (2019-10-01) [2020-07-03]. www.itc.nl/research/products/sensordb/AllSatellites.aspx.
- [29] European Space Agency, Earth Observation Portal [EB/OL]. [2020-07-03]. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>.
- [30] Committee on Earth Observation Satellites, the CEOS database [EB/OL]. [2020-07-03]. <http://database.eohandbook.com/timeline/timeline.aspx>.
- [31] 范一大, 刘三超. 空间信息技术减灾应用及服务[J].

- 中国科学院院刊, 2013(Z1): 93-97. (FAN Yida, LIU Sanchao. The application and service of space-based information technology in natural disaster reduction [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013 (Z1): 93-97.)
- [32] 刘三超, 高懋芳. 灾害监测应急虚拟卫星星座及应用服务研究 [J]. 航天器工程, 2018, 27(4): 127-134. (LIU Sanchao, GAO Maofang. Study on natural disaster monitoring and emergency virtual satellite constellation and pattern of application and service [J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(4): 127-134.)
- [33] 何国金, 王力哲, 马艳, 等. 对地观测大数据处理: 挑战与思考 [J]. 科学通报, 2015, 60(Z1): 470-478. (HE Guojin, WANG Lizhe, MA Yan, et al. Processing of earth observation big data: challenges and countermeasures [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(Z1): 470-478.)
- [34] 周治武, 赵勇, 朱秀丽, 等. 国家基础地理信息中心应急测绘保障服务现状与展望 [J]. 测绘通报, 2015(10): 16-19. (ZHOU Zhiwu, ZHAO Yong, ZHU Xiuli, et al. Surveying and mapping emergency support services provided by NGCC: present and future [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(10): 16-19.)
- [35] 王潇焯, 李建成. 精化“大地水准面”, 提升应急测绘效率 [J]. 中国减灾, 2013(15): 8-11. (WANG Xiaoye, LI Jiancheng. Refining “the geoid” to improve the efficiency of emergency surveying mapping [J]. Disaster Reduction in China, 2013(15): 8-11.)
- [36] VIGNY C, SIMONS W J, ABU S, et al. Insight into the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from GPS measurements in Southeast Asia [J]. Nature, 2005, 436(7048): 201-206.
- [37] LIU J Y, CHEN Y I, CHEN C H, et al. Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2009, 114(A4): 1-10.
- [38] KELECY T M, BORN G H, PARKE M E, et al. Precise mean sea level measurements using the global positioning system [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1994, 99(C4): 7951-7959.
- [39] SNAY R, CLINE M, DILLINGER W, et al. Using global positioning system-derived crustal velocities to estimate rates of absolute sea level change from North American tide gauge records [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007, 112(B4): 409.
- [40] GILI J A, COROMINAS J, RIUS J. Using global positioning system techniques in landslide monitoring [J]. Engineering Geology, 2000, 55(3): 167-192.
- [41] MALET J P, MAQUAIRE O, CALAIS E. The use of global positioning system techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France) [J]. Geomorphology, 2002, 43(1/2): 33-54.
- [42] 徐绍铨, 程温鸣, 黄学斌, 等. GPS 用于三峡库区滑坡监测的研究 [J]. 水利学报, 2003, 34(1): 114-118. (XU Shaoquan, CHENG Wenming, HUANG Xuebin, et al. The investigation of the landslides monitoring in the three gorges reservoir region by applying GPS [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(1): 114-118.)
- [43] ERDELJ M, NATALIZIO E. UAV-assisted disaster management: applications and open issues [C] // 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Kauai, HI, USA: IEEE, 2016: 1-5.
- [44] 许冲, 戴福初, 陈剑, 等. 汶川 Ms8.0 地震重灾区次生地质灾害遥感精细解译 [J]. 遥感学报, 2009, 13(4): 754-762. (XU Chong, DAI Fuchu, CHEN Jian, et al. Identification and analysis of secondary geological hazards triggered by a magnitude 8.0 Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(4): 754-762.)
- [45] FAN Jianrong, ZHANG Xiyu, SU Fenghuan, et al. Geometrical feature analysis and disaster assessment of the Xinmo landslide based on remote sensing data [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(9): 1677-1688.
- [46] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733. (ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1717-1733.)
- [47] 范青松, 汤翠莲, 陈于, 等. GPS 与 InSAR 技术在滑坡监测中的应用研究 [J]. 测绘科学, 2006, 31(5): 60-62. (FAN Qingsong, TANG Cuilian, CHEN Yu, et al. Applications of GPS and InSAR in monitoring of landslide studies [J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(5): 60-62.)
- [48] YE X, KAUFMANN H, GUO X F. Landslide monitoring in the Three Gorges area using D-INSAR and corner reflectors [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(10): 1167-1172.
- [49] 程海琴, 陈强, 刘国祥, 等. 短基线 InSAR 探测龙门山主断裂带两侧震后雨期的滑坡空间分布特征 [J]. 测绘学报, 2014, 43(9): 931-938. (CHENG Haiqin, CHEN Qiang, LIU Guoxiang, et al. Post-earthquake landslides distribution along longmen shan major fault during rainy season with short-baseline InSAR [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(9): 931-938.)
- [50] 朱庆, 韩会鹏, 于杰, 等. 应急测绘无人机资源多目标

- 优化调度方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1608-1615. (ZHU Qing, HAN Huipeng, YU Jie, et al. Multi-objective optimization scheduling method for UAV resources in emergency surveying and mapping[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11): 1608-1615.)
- [51] 朱庆, 丁雨淋, 苗双喜, 等. 动态观测数据驱动的滑坡灾害精准模拟分析方法[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 396-403. (ZHU Qing, DING Yulin, MIAO Shuangxi, et al. Precise simulation method for dynamic data driven landslide hazards[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 396-403.)
- [52] ISO/TC 211, iso standards [EB/OL]. [2020-07-03]. <https://www.iso.org/standards.html>.
- [53] Open Geospatial Consortium, OGC Standards and Resources [EB/OL]. [2020-07-03]. <https://www.ogc.org/projects/initiatives/dp>.
- [54] 张宝军, 陈厦, 李仪. 自然灾害遥感应用标准体系构建方法研究[J]. 防灾科技学院学报, 2016, 18(3): 1-10. (ZHANG Baojun, CHEN Sha, LI Yi. A study on standard system method of remote sensing technology application for natural disasters management [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2016, 18(3): 1-10.)
- [55] 赵鑫, 吕玉霞, 刘小强, 等. 应急测绘标准化建设探讨[J]. 测绘标准化, 2018, 34(2): 9-13. (ZHAO Xin, LYU Yuxia, LIU Xiaoqiang, et al. On surveying and mapping standardization for emergencies[J]. Standardization for Surveying and Mapping, 2018, 34(2): 9-13.)
- [56] 范维澄, 袁宏永. 我国应急平台建设现状分析及对策[J]. 信息化建设, 2006(9): 14-17. (FAN Weicheng, YUAN Hongyong. Analysis and countermeasures of China's emergency platform construction[J]. Information Construction, 2006(9): 14-17.)
- [57] 袁超, 罗灵军. 省级应急管理地理信息平台及实现技术研究: 以重庆市为例[J]. 地理信息世界, 2011, 9(1): 58-64. (YUAN Chao, LUO Lingjun. Technology emphases of the provincial emergency platform and integration: a case study in Chongqing[J]. Geomatics World, 2011, 9(1): 58-64.)

(责任编辑: 路素军)

(上接第 180 页)

- [23] 王真, 郭怀成, 郁亚娟, 等. 城市土地利用与交通相互关系研究进展[J]. 人文地理, 2009, 24(4): 91-97. (WANG Zhen, GUO Huaicheng, YU Yajuan, et al. Research progress in the interrelationship between urban land use and transport[J]. Human Geography, 2009, 24(4): 91-97.)
- [24] 谭琦川, 黄贤金. 城市土地利用与交通相互作用(LUTD)研究进展与展望[J]. 中国土地科学, 2018, 32(7): 81-89. (TAN Qichuan, HUANG Xianjin. Research progress and prospect on urban land use-transport interaction(LUTI) [J]. China Land Science, 2018, 32(7): 81-89.)
- [25] 曹峰, 宋海荣, 葛咏, 等. 基于粗糙集的交通道路与城镇用地扩展关系分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(6): 791-796. (CAO Feng, SONG Hairong, GE Yong, et al. Rough set-based research on the relationship between traffic road and urban land use expansion[J]. Journal of Geo-Information Science, 2010, 12(6): 791-796.)
- [26] 郎文婧, 李效顺, 卞正富, 等. 徐州市区土地利用格局变化分析及其空间扩张模拟[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(7): 592-599. (LANG Wenjing, LI Xiaoshun, BIAN Zhengfu, et al. Analysis of changes in land use pattern in Xuzhou city and simulation of its spatial expansion [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(7): 592-599.)
- [27] 李冬梅, 李文权, 范东涛. 快速城市化地区城市群交通发展研究[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(5): 25-29. (LI Dongmei, LI Wenquan, FAN Dongtao. Traffic system development strategy in urban clusters during rapid urbanization[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2013, 31(5): 25-29.)
- [28] 陈歆颐, 张熹. 国内“空间句法”理论在城镇规划与管理中的运用及未来发展展望[J]. 华中建筑, 2020, 38(6): 7-11. (CHEN Xinyi, ZHANG Xi. The application of domestic space syntax theory in town planning and its future development[J]. Huazhong Architecture, 2020, 38(6): 7-11.)

(责任编辑: 邓国臣)