

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.03.016

基于遥感空间信息的洪水风险识别与动态模拟研究进展

曾子悦^{1,2}, 许继军^{1,2}, 王永强^{1,2}

(1. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 对地观测卫星遥感能够提供广泛可靠的空间信息, 是洪水风险识别与动态模拟的重要支撑技术之一。为阐明卫星遥感技术对洪水研究的推动作用, 回顾了洪水风险识别与动态模拟研究的发展历程及技术需求, 以对地观测卫星遥感三大阶段的发展轨迹为主线, 分析了遥感空间信息在洪水研究中的历史性贡献和阶段性效用, 讨论总结了危险分区法、水文模型和微波遥感监测等3种洪水研究典型方法的应用进展。提出未来洪水风险识别与动态模拟研究的重点: 遥感空间信息与模型算法的深度结合, 遥感反演算法与系统的开发及应用, 典型洪水研究方法集成系统的开发与应用, 大数据方法与手段的应用。以期提升洪水应急响应能力与灾害风险管理水平提供有效参考。

关键词: 对地观测卫星; 遥感; 洪水; 风险识别; 动态模拟

中图分类号: TP 79; TV 122; G353.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2020)03-0463-10

据世界银行统计, 全球每年因干旱、洪水等自然灾害造成的经济损失高达5 200亿美元^[1]。面对频发的自然灾害, 即将步入的“十四五”时期是全面建设与提升中国防灾减灾救灾能力的关键阶段。暴雨洪水灾害是中国发生频率最高、影响范围最广的洪水灾害^[2]。自20世纪90年代以来, 中国平均每年约有40%的自然灾害损失由洪水及其次生灾害造成, 致死人口约占因灾死亡总人口的60%^[3]。

考虑发生区域及灾害特性, 内陆暴雨洪水可分为河流洪水、山洪和城市洪水3种。自1998年特大洪水以来, 经过集中治理已基本形成全国大江大河干流防洪体系^[4], 大型河流洪水灾害相应减少, 但一旦发生, 往往持续时间长、波及范围广^[5]; 在山地丘陵地区, 暴雨洪水灾害常以山洪的形式发生, 其预见期短、水流速度快、破坏力巨大^[6]; 而平原地区城镇密集, 人口经济分布高度集中, 城市洪水往往造成交通拥堵、财产损失甚至人口死亡, 严重阻碍了城市发展^[7]。内陆暴雨洪水灾害已成为人类社会经济可持续发展的主要制约因素, 洪水风险识别和动态模拟研究也一直是洪水研究的重点和难点。因此, 有必要梳理总结国内外相关研究的进展与不足, 结合多学科交叉前沿技术探讨洪水研究的发展方向, 为提升洪水灾害应急响应能力和灾害风险管理水平提供更有效参考。

1 洪水风险识别与动态模拟研究的发展历程

随着遥感、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)和水文模型等理论技术的发展, 内陆暴雨洪水风险识别逐渐由点向面、由静态向动态转变, 洪水动态模拟也趋于物理化和精细化。

在早期研究中, 洪水风险识别往往基于河流关键断面的长时序水位和流量资料, 通过频率分析评价风险

收稿日期: 2019-10-28; 网络出版日期: 2020-04-07

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200407.0926.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0400901); 中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(CKSF2019478)

作者简介: 曾子悦(1993—), 女, 湖北天门人, 博士, 主要从事遥感水文应用、洪水监测方面研究。

E-mail: zengzy@mail.crsri.cn

等级来表示区域整体的洪水风险^[8]。但由于水文站点无法达到大面积观测,借助遥感和 GIS 技术的洪水风险区划逐渐成为洪灾风险识别的主要手段^[9]。起初,一般采用基于洪灾历史事件的空间制图进行洪水风险区划。谭徐明等^[10]基于 1700—1999 年历史洪水灾害数据,利用历史水灾频率法界定出重点区域洪水风险区边界,绘制了全国洪水风险区划图。该类方法适用于资料丰富地区,有一定局限性。随后,基于自然地理及社会经济空间数据的风险区划逐渐兴起,可有效反映洪水风险空间分布,但受限于资料更新频率,一般用于绘制静态或半静态区划图^[11]。目前,有研究表明,基于水文模拟结果可对风险区划进行动态更新,能满足变化环境下洪水风险识别的要求^[12]。

另一方面,水文模型作为河流洪水动态模拟的主流方法,在早期发展中主要基于站点长期观测资料推求的降雨—径流关系模拟洪水径流过程^[13]。从 20 世纪 60 年代起,流域水文模型逐渐由概念化朝物理化方向转变。70 年代以来,在集总式模型基础上分布式水文模型迅速发展,借助卫星遥感、GIS 等技术可提取流域河网、流域集水面积等基础数据,确定模型内部物理参数和状态变量的时空分布变化,提升水文模型对径流、土壤湿度等水文要素的模拟精度,从而为水动力学模型提供边界输入条件,模拟河道洪水演进及河漫滩洪水淹没过程^[14]。除了模型本身物理机制外,降水驱动、DEM(Digital Elevation Model)地形数据等对水文水动力学洪水模拟也存在直接影响^[15-18]。

2 对地观测遥感在洪水研究中的发展阶段及特征

在传统风险识别与水文模拟基础上,对地观测遥感为洪水研究提供了新的手段和途径。1972 年 Landsat 1 号的成功发射开启了对地观测卫星遥感时代。经历半个多世纪的发展,面向气象、资源、环境灾害监测等用途的对地观测卫星逐步增多。与此同时,洪水风险识别与动态模拟研究对地形地貌及水文气象数据的需求逐渐增长,对数据时空精度的要求也越来越高。考虑对地观测卫星数量、卫星遥感技术发展以及卫星遥感空间信息可获取性,依据对地观测卫星遥感在洪水研究进程中的历史贡献和阶段性效用,本文将对地观测卫星遥感发展进程划分为 3 个阶段:

(1) 第一阶段(20 世纪 70 年代到 90 年代中期) 成功发射并在轨运行的对地观测卫星逐渐增多,但总体数量少,传感器多以光学/红外波段为主,功能较单一;微波辐射计的通道较少,极化方式单一;主动微波遥感技术尚处于小范围试验阶段。该阶段卫星遥感技术能提供大范围陆表空间信息,但更新周期较长,数据产品质量与时空精度相对较低,仅能基本满足洪水风险识别的要求。

(2) 第二阶段(20 世纪 90 年代中期到 21 世纪初) 随着对地观测系统 EOS(Earth Observing System)的提出,卫星遥感进入全面发展阶段。对地观测卫星数量增多,单卫星搭载的传感器种类功能开始多样化。光学/红外遥感迅速向多光谱、高光谱、高分辨率方向发展^[19]。该阶段卫星光学/红外和微波遥感观测能力迅速提升,逐渐能满足洪水动态模拟的时空精度要求。但受到传感器性能和反演算法等限制,遥感估测水文要素及其相关参数的精度和准确性有待提升。

(3) 第三阶段(21 世纪初至今) 各类卫星观测平台逐步增多,对地观测技术日益完善,特别是主动微波遥感的数据量与可获取性,得到了极大提升。遥感空间信息观测网络的形成和发展使得海量、多源、异构数据爆发式增长,呈现明显的大数据特征^[20]。如何有效借助遥感大数据技术手段,探究变化环境下的洪水情势及演变规律,是当前阶段面临的关键问题。

如表 1 所示,从洪水研究角度分析,第一阶段能提供静态或半静态的土地覆盖/利用类型、植被覆盖等环境特征变量的空间分布,特别适用于由坡度、土壤、植被等因素起主导作用的山洪灾害的风险识别,促使危险分区法成为洪水风险识别的典型方法^[21]。第二阶段中,微波联合红外遥感观测降水产品的时空精度逐步提升^[22],例如 TMPA(TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis)、GSMaP(Global Satellite Mapping for Precipitation)、GPM(Global Precipitation Measurement)等遥感卫星全球降水估测产品的业务化发布,可为水文模型提供大范围的降水驱动。从该阶段起,基于卫星降水驱动的水文模型在流域乃至全球洪水径流模拟上取得

了诸多突破性进展^[23-26]。光学/红外卫星遥感观测也能为水文模型的参数设置和边界条件确定提供更可靠的下垫面信息,使得径流过程的模拟更具物理意义^[27-29]。在当前阶段(第三阶段),基于遥感空间信息的水文洪水过程模拟趋于动态化与精细化。而随着合成孔径雷达 SAR(Synthetic Aperture Radar)的发展和普及,高精度微波遥感监测能全天候持续观测洪水事件的发生发展,为无资料或人类活动干预强烈的地区和情境下的城市洪水等复杂洪水问题提供新的解决途径^[30]。

表1 对地观测卫星遥感各发展阶段及其相应的洪水研究典型方法

Table 1 Stages of earth observation satellite remote sensing development and the corresponding typical methods for flood studies

卫星遥感发展阶段	卫星遥感对洪水研究的贡献与作用	洪水研究典型方法	各方法的功能效用	主要针对的洪水问题
第一阶段	以中低分辨率的光学/红外卫星遥感为主,能提供静态/半静态遥感空间信息	危险分区	洪水风险快速识别	洪水 (山洪)
第二阶段	以中高分辨率的光学/红外和被动微波遥感为主,对降水等水文要素的全球时空动态分布的观测能力大幅提升	水文模型	洪水径流过程模拟	洪水 (河流洪水)
第三阶段	可全方位提供光学/红外和主被动微波遥感高时空分辨率的大范围动态空间信息	微波遥感监测	洪水范围动态模拟	洪水事件 (城市洪水)

如图1所示,如何充分利用多源卫星遥感空间信息,改进和创新各阶段洪水研究的典型方法,对提高洪水风险识别与动态模拟的精度和准确性十分必要。

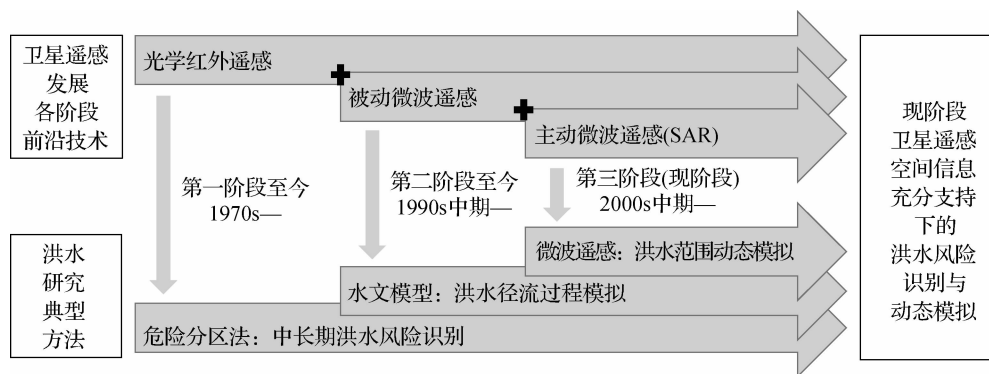


图1 对地观测卫星遥感在洪水研究中的历史性贡献和阶段性效用

Fig.1 Historical contribution and periodic utility of earth observation satellite remote sensing in flood studies

3 各发展阶段洪水研究典型方法的应用进展

这三阶段的洪水研究典型方法具备的特点和优势不同,能针对性解决的洪水问题也不同。下面以对地观测卫星遥感的发展轨迹为主线,总结与讨论危险分区法、水文模型和微波遥感监测这3种洪水研究典型方法的应用进展。

3.1 基于遥感空间信息的洪水风险危险分区法

由于危险分区法不受限于临界流量等实测资料,可利用降水强度衡量致灾因子的危险性,将易损性表征为降水作用下承灾体的暴露程度和损失率,为研究方法并不仅限于水文模拟的山洪风险识别提供了可靠途

径^[31]。早期的危险分区法侧重于刻画洪水灾害危险性,作为代表性方法,山洪指导系统 FFG (Flash Flood Guidance) 中的山洪潜在危险指标 FFPI (Flash Flood Potential Index) 使用广泛、技术成熟,主要通过量化坡度、植被覆盖、地物类型和土壤质地等影响因子对山洪风险的贡献,反映山洪灾害潜在危险分布^[32]。为完善 FFPI 方法,Zeng 等^[33]进一步引入了降水、社会经济、防洪措施等影响因子,充分考虑灾害系统的易损性,将 FFPI 拓展为级联式洪水风险识别体系 CFFG (Cascading Flash Flood Guidance); Tang 等^[34]构建了一套基于 FFPI 的卫星降水洪水事件检测算法,在中国南方 5 省得到了成功应用,为 FFPI 的多领域推广提供了良好范例。

总体上,遥感技术的发展极大促进了危险分区法的大面积应用推广。该方法思路清晰,可操作性强,也便于进行洪水风险归因分析,能很好地代表洪水风险识别技术。但由于采用的数据以半静态数据为主,该方法主要用于洪水中长期风险识别。

3.2 基于遥感空间信息的水文模型洪水模拟方法

卫星遥感对水文模型的推动作用主要表现为 3 个方面:

(1) 提供模型降水驱动 由于雨量实测数据在地形复杂或偏远区域难以获取,地面雷达信号也常受到运行环境等因素的干扰^[35],卫星降水观测是目前全球降水观测唯一有效的手段^[26],公众能获取各类实时或准实时免费卫星降水产品数据。新一代全球降水观测任务 GPM 加密了全球卫星降水观测网络,并通过地面观测降水订正、卫星数据和地面观测数据融合等手段减小了降水估测误差,能作为水文模型降水驱动的可靠来源^[36]。

(2) 提供状态变量观测值 遥感卫星能观测水储量、土壤湿度等水文模型状态变量。以土壤湿度为例,卫星微波对土壤湿度的反演能刻画土壤湿度的大范围空间分布和长时序变化特征^[37]。通过修正如土壤水最大可能滞留量等变量,可完善水文模型产流计算机制,提升径流模拟效果。其中,搭载有 L 波段 SAR 和被动微波辐射计的 SMAP (Soil Moisture Active Passive) 作为最新一代全球土壤湿度观测卫星,可提供 2015 年 3 月 31 日至今被动微波反演的数据,与中国风云 3 系列 (FY3B 和 FY3C) 等多卫星联合使用,其数据时空精度能满足大尺度洪水模拟研究的要求^[38]。

(3) 确定模型参数 卫星遥感能提供不透水面积、土地覆盖/利用类型、植被覆盖程度、河网水系分布等陆表空间信息,能有效确定水文模型物理参数,强化模型物理机制^[39-41]。此外,遥感获取的参数空间分布能有效反映流域空间变异特性,促进分布式水文模型的发展。

总体上,卫星降水观测计划使得水文模型在降水驱动上受限更少,遥感陆表空间信息也进一步推动水文模型模拟向分布式、精细化、物理化方向发展,为河流洪水动态模拟提供了有效手段。

3.3 基于微波遥感监测的洪水淹没范围动态模拟方法

不同于水文水动力学模型模拟,微波遥感监测可直接探测洪水淹没范围,对云层、地表植被以及冰雪的穿透能力强,能全天候全天时工作。微波卫星遥感监测不受区域限制,几乎不依赖 DEM、河道数据等地面资料,可直接用于洪水范围动态模拟。

在被动微波遥感中,辐射亮温是水体识别和洪水模拟研究的基础数据。常用的星载微波辐射计包括 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer Earth Observing System)、TMI (TRMM Microwave Imager)、SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) 等,其重访周期短,在全球大多数地区能达到一天 2 次的观测频率,空间分辨率一般为 10 ~ 70 km^[42]。Brakenridge 等^[43]和 van Dijk 等^[44]已证明在 36.5 GHz 或 37 GHz 水平极化下水体和陆地的辐射响应非常容易区分,对土壤湿度也并不敏感,可作为水体探测的有效工具,据此提出了利用亮温数据估测河道流量的 M/C 信号方法。达特茅斯洪水监测平台 DFO (Dartmouth Flood Observatory) 基于该方法搭建了“河流监测”业务化运行模块,实时展示的应用案例已覆盖全球绝大多数流域 (<https://floodobservatory.colorado.edu/>)。

主动微波遥感发展至今,SAR 采用有限的雷达天线长度获取高分辨率影像,可提供地物后向散射信息

作为区分水体与陆地的有效依据^[45]。SAR 技术正向着高分辨率、多极化、多模式方向发展, TerraSAR-X、COSMO-SkyMed、ALOS-2 等商业卫星以及 2014 年初欧洲空间局 ESA(European Space Agency)发射的非盈利性 Sentinel 系列卫星均可用于水体提取, 其空间分辨率普遍能达到 1~10 m, 对全球大部分区域的完全轨道重返周期为 2~4 周^[30]。基于 SAR 影像能进行洪水淹没范围提取, 主动微波遥感监测因此成为洪水研究的重要手段。目前, 该领域的前沿热点研究以实现基于 SAR 影像的水体范围自动探测算法或系统为主。Twele 等^[46]开发了一套洪水监测系统, 能自动抓取并处理 Sentinel-1 SAR 影像; Shen 等^[47]公布的准实时雷达淹没范围绘制系统 RAPID(Radar-Produced Inundation Diary), 可利用多源 SAR 影像数据准确重现 2017 年 Harvey 飓风在休斯敦造成的洪水淹没过程。

随着微波遥感技术的发展, 可用于洪水研究的数据更丰富, 覆盖范围更广, 成本更低, 能直接模拟洪水淹没范围的动态变化, 尤其为城市洪水问题提供了新的解决途径。

4 未来洪水风险识别与动态模拟研究的重点

危险分区法和水文模型的发展较为成熟, 而基于微波遥感监测的洪水范围动态模拟尚处于起步阶段, 具备广阔的改良创新空间。随着遥感算法的成熟和遥感大数据技术的发展, 洪水风险识别与动态模拟还需强化 4 个方面的研究, 深入探讨遥感数据和技术对洪水研究方法的促进机制。

4.1 遥感空间信息与模型算法的深度结合

未来对地观测卫星遥感能提供全方位、多尺度、高精度的空间信息。计划于 2021 年发射的新一代测高卫星 SWOT(Surface Water and Ocean Topography)可进行地表水水位、流量、流速等水文观测, 将从本质上丰富洪水实测数据的获取途径, 为揭示陆地水储量变化、观测陆地水流动态等研究提供发展契机^[48]; CoReH2O 任务作为 ESA 的备选计划, 可通过 Ku 和 X 双波段 SAR 反演雪水当量、冰盖分布等寒区水文要素, 能促进寒区水资源动态变化的评估分析, 强化水文模型对积雪-融雪物理过程的表征, 提升寒区洪水模拟精度; 在中国, 高分系列中监测能力达到亚米级的微波遥感卫星高分十二号于 2019 年底成功发射, 风云系列在 2025 年前计划新增 9 颗卫星, 全球水循环观测卫星 WCOM 作为首个综合观测全球陆地、海洋和大气水循环关键要素的地球科学卫星也即将发射, 未来能提供精度更好、质量更高、观测更灵活的陆表监测信息和气象数据。如何充分利用遥感空间信息有效刻画水文及洪水要素的时空分布与动态变化, 对洪水研究的未来发展至关重要^[49]。

但现阶段的研究对遥感空间信息的利用尚不充分。程卫帅^[50]和 Grillakis 等^[51]指出, 卫星降水产品与土壤湿度反演数据可作为推求动态山洪临界雨量的基础, 对进一步开发 FFG 系统具有实际应用价值。而水文模型对降雨径流过程物理机制的概化与假设, 使其存在不少改进空间^[52]。如 Azimi 等^[53]将 SMAP 土壤湿度同化进入 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)水文模型, 可显著提升小流域洪水模拟效果。因此, 未来研究应坚持尝试和探讨新型卫星遥感观测数据在洪水风险识别和动态模拟中的可行性, 逐步寻求稳定可靠的遥感空间数据推动模型算法的改进。

4.2 遥感反演算法与系统的开发及应用

光学/红外卫星遥感技术对地表水体分布的观测主要通过水体指数法区分陆地与水体来实现^[54-55], 其算法精度和效率还有很大提升空间。虽然光学/红外影像普遍能达到 30~500 m 的成像精度, 以高分二号卫星为代表的高分辨率卫星多光谱成像具有优于 10 m 的空间分辨率, WorldView 等商业卫星的观测能力甚至达到亚米级, 但在观测频率和有效性上无法满足洪水模拟时间精度要求。因此, 有必要加强多时相光学/红外遥感影像水体提取融合算法的开发, 为洪水动态模拟提供可靠的辅助数据和验证依据。

另一方面, 由于被动微波的观测精度受限于传感器性能、使用频段等因素, 主动微波观测周期也由卫星数量、观测轨道等决定, 如何突破现有微波遥感观测时空精度难以两全的问题, 开发联合主被动微波遥感的

高精度洪水动态模拟算法和系统,是目前基于微波遥感监测洪水模拟研究的难点。作为解决途径之一,在 RAPID 等 SAR 影像洪水处理系统中设置被动微波洪水监测信号接口,接入能指示洪水发生概率的 M/C 信号,针对洪水事件形成时间窗口,搜索相应时段的 SAR 影像并实现自动筛选、下载与接入,将提高系统的自动化程度和处理效率,有利于联合主被动微波遥感监测的自动化实时或准实时洪水模拟系统的搭建,拓展微波遥感技术在洪水模拟中的应用。

4.3 典型洪水研究方法集成系统的开发与应用

围绕上述典型洪水研究方法,美国、欧盟、中国等国家和地区已开发了多种洪水监测预报系统,例如基于危险分区法和水文模型模拟的美国山洪泥石流灾害监测预警业务系统 NFL(NMQ-FLASH-Landslide)、基于被动微波 M/C 信号的 DFO 平台“河流监测”模块、基于 SAR 影像观测的 RAPID 系统等。由于遥感数据可用性、平台建设等原因,尚未形成统一的集成系统。在未来研究中,可按照图 2 所示的设计框架,搭建典型洪水研究方法与遥感空间数据深度融合的集成系统,通过大范围洪水风险快速识别洪水高风险区域,采用水文模型模拟高风险区域洪水动态过程,针对具体洪水事件利用微波遥感监测模拟淹没动态范围,层层递进地开展多时空尺度的洪水风险识别与动态模拟,为洪水预警预报和灾害风险防范提供实时可靠的决策依据。

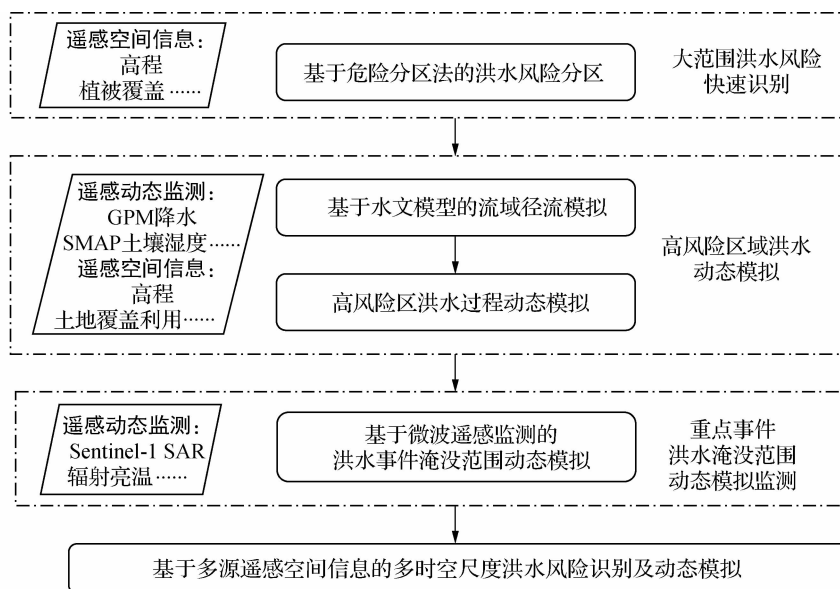


图 2 基于多源遥感空间信息的洪水风险识别及动态模拟集成系统设计框架

Fig. 2 Framework of the integrated system of flood risk identification and dynamic modelling based on multi-source remote sensing spatial information

4.4 大数据方法与手段的应用

洪水研究旨在实现对洪涝灾害的模拟、监测、预警与评估,研究数据需要进行及时迅速的处理与信息反馈,对智能化信息的提取、处理、分析与管理要求非常高,大数据方法与手段将引领洪水研究领域的技术革新^[56]。目前,针对洪水研究中遥感数据的提取处理与分析,以 Google Earth Engine(GEE)为代表的地理云计算平台整合了全球尺度的海量公开遥感影像,可进行在线可视化计算和分析处理。Pekel 等^[57]利用 GEE 平台,基于约 300 万景 Landsat 正射校正后的大气表观反射率影像和亮温数据,针对 1984—2015 年间全球水体变化进行了专题制图,为洪水研究提供了宝贵的基础数据;Cho 等^[58]通过随机森林机器学习算法在 GEE 平台上处理了植被覆盖、地表温度等卫星大数据,针对超过 10 万 km² 的红河流域北部提取了地下排水暗沟的分布,有效解决了以暗沟排水为主的农业区域中洪水风险分析面临的暗沟网络分布数据缺乏的问题。另一方面,大数据方法与手段能有效解决卫星遥感数据与地面站点实测数据在结合中存在的噪声影响、数据冲突、

数据缺失等问题,借助人工智能、深度学习等先进的数据挖掘手段可获取繁杂数据中的有效信息,促进洪水研究的成果管理与知识整合。此外,大数据方法和手段还可用于打造“天-空-地”一体化监测和分析网络,能促进地面观测信息对遥感数据的校正,推进遥感洪水产品的研发。

5 结 语

对地观测卫星遥感已进入全面发展时代,未来光学/红外遥感数据能提供精度更高、质量更好的陆表空间数据,微波遥感监测也朝着多通道、高频率、高分辨率的方向稳步发展,能更准确有效地观测模拟洪水空间动态变化。本文根据卫星遥感空间信息在洪水研究进程中的历史性贡献和阶段性效用,将对地观测卫星遥感的发展总结为三大阶段,并归纳出了危险分区法、水文模型以及微波遥感监测3种典型洪水研究方法,通过讨论各类方法的发展现状与趋势,针对如何有效借助遥感数据与技术探究洪水情势及演变规律的关键问题,探讨了对地观测卫星遥感对洪水研究方法的促进机制,分析总结了未来洪水研究的重点,以期提升洪水应急响应能力与灾害风险管理水平提供参考。

参考文献:

- [1] HALLEGATTE S, VOGT-SCHILB A, BANGALORE M, et al. Unbreakable: building the resilience of the poor in the face of natural disasters[M]. Washington DC: World Bank Publications, 2016: 2-3.
- [2] HU P, ZHANG Q, XU C Y, et al. Spatiotemporal patterns and driving factors of flood disaster in China[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2019. [doi: 10.5194/hess-2019-73]
- [3] 国家防汛抗旱总指挥部,水利部. 2018 中国水旱灾害公报[R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019. (National Flood Control and Drought Relief Headquarters, Ministry of Water Resources of the Peoples' Republic of China. 2018 China bulletin on flood and drought disasters [R]. Beijing: China Water&Power Press, 2019. (in Chinese))
- [4] 姜晓明,王艳艳,向立云. 我国防洪减灾体系建设与成就[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(10): 6-9. (JIANG X M, WANG Y Y, XIANG L Y. Construction and achievements of flood prevention and disaster reduction systems in China [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(10): 6-9. (in Chinese))
- [5] 刘宁. 大江大河防洪关键技术问题与挑战[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 19-25. (LIU N. Problems and challenges on flood control for large rivers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 19-25. (in Chinese))
- [6] 郭良,何秉顺. 我国山洪灾害防治体系建设与成就[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(10): 16-19. (GUO L, HE B S. Construction and achievements of flash flood disaster prevention systems in China[J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(10): 16-19. (in Chinese))
- [7] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491. (ZHANG J Y, WANG Y T, HE R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [8] YIN J, YE M, YIN Z, et al. A review of advances in urban flood risk analysis over China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(3): 1063-1070.
- [9] DE RISI R, JALAYER F, DE PAOLA F, et al. From flood risk mapping toward reducing vulnerability: the case of Addis Ababa [J]. Natural Hazards, 2020, 100(1): 387-415.
- [10] 谭徐明,张伟兵,马建明,等. 全国区域洪水风险评价与区划图绘制研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(1): 50-59. (TAN X M, ZHANG W B, MA J M, et al. Research on regional assessment of flood risk and regionalization mapping in China[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2004, 2(1): 50-59. (in Chinese))
- [11] 李林涛,徐宗学,庞博,等. 中国洪灾风险区划研究[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 22-30. (LI L T, XU Z X, PANG B, et al. Flood risk zoning in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 22-30. (in Chinese))
- [12] ZHANG W, LIU Y, XU J, et al. Research on real-time flood simulation and dynamic risk map[C]//2017 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA). Washington D C: IEEE Computer Society, 2017: 548-551.
- [13] DEVIA G K, GANASRI B P, DWARAKISH G S. A review on hydrological models[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4(1): 1001-

1007.

- [14] KAUFFELDT A, WETTERHALL F, PAPPENBERGER F, et al. Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 68-76.
- [15] 李致家, 姜婷婷, 黄鹏年, 等. 降雨和地形地貌对水文模型模拟结果的影响分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(4): 473-480. (LI Z J, JIANG T T, HUANG P N, et al. Impact and analysis of watershed precipitation and topography characteristics on model simulation results[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 473-480. (in Chinese))
- [16] TANG G Q, LONG D, HONG Y, et al. Documentation of multifactorial relationships between precipitation and topography of the Tibetan Plateau using spaceborne precipitation radars[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 208: 82-96.
- [17] CRISTIANO E, TEN VELDHUIS M, van de GIESEN N. Spatial and temporal variability of rainfall and their effects on hydrological response in urban areas-a review[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2017, 21(7): 3859-3878.
- [18] MUNOTH P, GOYAL R. Effects of DEM source, spatial resolution and drainage area threshold values on hydrological modeling[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(9): 3303-3319.
- [19] PALMER S, KUTSER T, HUNTER P. Remote sensing of inland waters: challenges, progress and future directions [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 157: 1-8.
- [20] GUO H. Big earth data: a new frontier in earth and information sciences[J]. *Big Earth Data*, 2017, 1(1/2): 4-20.
- [21] CLARK R A, GOURLEY J J, FLAMIG Z L, et al. CONUS-wide evaluation of national weather service flash flood guidance products [J]. *Weather Forecasting*, 2014, 29(2): 377-392.
- [22] 李哲. 多源降雨观测与融合及其在长江流域的水文应用[D]. 北京: 清华大学, 2015. (LI Z. Multi-source precipitation observations and fusion for hydrological applications in the Yangtze River basin [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese))
- [23] 陈晓宏, 钟睿达, 王兆礼, 等. 新一代 GPM IMERG 卫星遥感降水数据在中国南方地区的精度及水文效用评估[J]. *水利学报*, 2017, 48(10): 1147-1156. (CHEN X H, ZHONG R D, WANG Z L, et al. Evaluation on the accuracy and hydrological performance of the latest-generation GPM[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(10): 1147-1156. (in Chinese))
- [24] MAGGIONI V, MASSARI C. On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: a review[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 214-224.
- [25] WANG Z, ZHONG R, LAI C. Evaluation and hydrologic validation of TMPA satellite precipitation product downstream of the Pearl River basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(23): 4169-4182.
- [26] SUN Q, MIAO C, DUAN Q, et al. A review of global precipitation data sets: data sources, estimation, and intercomparisons [J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(1): 79-107.
- [27] HUANG C, CHEN Y, ZHANG S, et al. Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: a review[J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(2): 333-360.
- [28] HAN P, LONG D, HAN Z, et al. Improved understanding of snowmelt runoff from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 224: 44-59.
- [29] WANG Y, PENG J, SONG X, et al. Surface soil moisture retrieval using optical/thermal infrared remote sensing data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(9): 5433-5442.
- [30] ZENG Z, GAN Y, KETTNER A J, et al. Towards high resolution flood monitoring: an integrated methodology using passive microwave brightness temperatures and Sentinel synthetic aperture radar imagery[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124377.
- [31] LIU C, GUO L, YE L, et al. A review of advances in China's flash flood early-warning system[J]. *Natural Hazards*, 2018, 92(2): 619-634.
- [32] SMITH G E. Development of a flash flood potential index using physiographic data sets within a geographic information system [D]. Salt Lake City: University of Utah, 2010.
- [33] ZENG Z, TANG G, LONG D, et al. A cascading flash flood guidance system: development and application in Yunnan Province, China [J]. *Natural Hazards*, 2016, 84(3): 2071-2093.
- [34] TANG G, ZENG Z, MA M, et al. Can near-real-time satellite precipitation products capture rainstorms and guide flood warning for the 2016 summer in south China? [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(8): 1208-1212.

- [35] 唐国强, 万玮, 曾子悦, 等. 全球降水测量 (GPM) 计划及其最新进展综述[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(4): 607-615. (TANG G Q, WAN W, ZENG Z Y, et al. An overview of the Global Precipitation Measurement (GPM) mission and its latest development [J]. Remote Sensing Technology and Applications, 2015, 30(4): 607-615. (in Chinese))
- [36] 杨云川, 程根伟, 范继辉, 等. 卫星降雨数据在高山峡谷地区的代表性与可靠性[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 24-33. (YANG Y C, CHENG G W, FAN J H, et al. Representativeness and reliability of satellite rainfall dataset in alpine and gorge region [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 24-33. (in Chinese))
- [37] BROCCA L, CIABATTA L, MASSARI C, et al. Soil moisture for hydrological applications: open questions and new opportunities[J]. Water, 2017, 9(2): 140.
- [38] 刘荣华, 张珂, 晁丽君, 等. 基于多源卫星观测的中国土壤湿度时空特征分析[J]. 水科学进展, 2017, 28(4): 479-487. (LIU R H, ZHANG K, CHAO L J, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of surface soil moisture across China based on multi-satellite observations [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(4): 479-487. (in Chinese))
- [39] CHIRACHAWALA C, SHRESTHA S, BABEL M S, et al. Evaluation of global land use/land cover products for hydrologic simulation in the Upper Yom River basin, Thailand[J]. Science of the Total Environment, 2020, 708: 135148.
- [40] TIAN Y, CHEN H, SONG Q, et al. A novel index for impervious surface area mapping: development and validation [J]. Remote Sensing, 2018(10): 1521.
- [41] JADIDOLESLAM N, MANTILLA R, KRAJEWSKI W F, et al. Investigating the role of antecedent SMAP satellite soil moisture, radar rainfall and MODIS vegetation on runoff production in an agricultural region [J]. Journal of Hydrology, 2019, 579: 124210.
- [42] BRODZIK M, LONG D, HARDMAN M. Best practices in crafting the calibrated, enhanced-resolution passive-microwave EASE-Grid 2.0 brightness temperature earth system data record [J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1793.
- [43] BRAKENRIDGE G R, NGHIEM S V, ANDERSON E, et al. Orbital microwave measurement of river discharge and ice status [J]. Water Resources Research, 2007, 43(4): W04405.
- [44] van DIJK A I J M, BRAKENRIDGE G R, KETTNER A J, et al. River gauging at global scale using optical and passive microwave remote sensing [J]. Water Resources Research, 2016, 52(8): 6404-6418.
- [45] SHEN X, WANG D, MAO K, et al. Inundation extent mapping by synthetic aperture radar: a review[J]. Remote Sensing, 2019, 11(7): 879.
- [46] TWELE A, CAO W, PLANK S, et al. Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain [J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(13): 2990-3004.
- [47] SHEN X, ANAGNOSTOU E N, ALLEN G H, et al. Near-real-time non-obstructed flood inundation mapping using synthetic aperture radar [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 221: 302-315.
- [48] 徐永生, 高乐, 张云华. 美国新一代测高卫星 SWOT: 评述我国宽刈幅干涉卫星的发展借鉴[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1): 84-94. (XU Y S, GAO L, ZHANG Y H. New generation altimetry satellite SWOT and its reference to China's swath altimetry satellite[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(1): 84-94. (in Chinese))
- [49] 徐宗学, 程涛, 洪思扬, 等. 遥感技术在城市洪涝模拟中的应用进展[J]. 科学通报, 2018, 63(21): 2156-2166. (XU Z X, CHENG T, HONG S Y, et al. Review on applications of remote sensing in urban flood modeling [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(21): 2156-2166. (in Chinese))
- [50] 程卫帅. 山洪灾害临界雨量研究综述[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 901-908. (CHENG W S. A review of rainfall thresholds for triggering flash floods [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 901-908. (in Chinese))
- [51] GRILLAKIS M G, KOUTROULIS A G, KOMMA J, et al. Initial soil moisture effects on flash flood generation: a comparison between basins of contrasting hydro-climatic conditions [J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 206-217.
- [52] 杨大文, 徐宗学, 李哲, 等. 水文学研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 36-45. (YANG D W, XU Z X, LI Z, et al. Progress and prospect of hydrological sciences [J]. Progress in Geography, 2018, 37(1): 36-45. (in Chinese))
- [53] AZIMI S, DARIANE A B, MODANESI S, et al. Assimilation of Sentinel 1 and SMAP-based satellite soil moisture retrievals into SWAT hydrological model: the impact of satellite revisit time and product spatial resolution on flood simulations in small basins [J]. Journal of Hydrology, 2020, 581: 124367.
- [54] MCFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. In-

- ternational Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [55] YAO F, WANG C, DONG D, et al. High-resolution mapping of urban surface water using ZY-3 multi-spectral imagery [J]. Remote Sensing, 2015, 7(9): 12336-12355.
- [56] 陈军飞, 邓梦华, 王慧敏. 水利大数据研究综述[J]. 水科学进展, 2017, 28(4): 622-631. (CHEN J F, DENG M H, WANG H M. A review of water resources big data [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(4): 622-631. (in Chinese))
- [57] PEKEL J F, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. Nature, 2016, 540(7633): 418.
- [58] CHO E, JACOBS J M, JIA X, et al. Identifying subsurface drainage using satellite big data and machine learning via google earth engine[J]. Water Resources Research, 2019, 55(10): 8028-8045.

Advances in flood risk identification and dynamic modelling based on remote sensing spatial information *

ZENG Ziyue ^{1,2}, XU Jijun ^{1,2}, WANG Yongqiang ^{1,2}

(1. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory of Basin Water Resources and Ecological Environment, Wuhan 430010, China)

Abstract: Earth observation satellite remote sensing can provide reliable wide-ranging spatial information and is believed as one of the key technologies for flood risk identification and dynamic modelling. Aiming at illustrating how satellite remote sensing technology promotes flood studies, this paper reviewed the development and technical demands of flood risk identification and dynamic modelling research and analyzed the historical contribution and periodic utility of spatial remote sensing information in flood studies based on the 3-stage evolution trajectory of earth observation satellite remote sensing. Application progresses in 3 typical methods in flood studies, which are risk zoning, hydrological modelling and microwave remote sensing monitoring, respectively, have been discussed and summarized. Focuses of the future research on flood risk identification and dynamic modelling have also been pointed out, including the integration of remote sensing spatial information and model algorithms, the development and application of remote sensing algorithms and systems, the development and application of an integrated system for typical methods and the application of big data methodology and technology, in expectation of providing valuable references for improving the response capacity and risk management level of flood disasters.

Key words: earth observation satellite; remote sensing; flood; risk identification; dynamic modelling

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0400901) and the Fundamental Research Funds for Central Public-interest Scientific Institute (No. CKSF2019478).