

DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2020268

刘荣华,周燕怡,郭良,等.美国山洪灾害预警研究进展[J].中国防汛抗旱,2020,30(9/10):141-148.LIU Ronghua,ZHOU Yanyi, GUO Liang, et al.Research progress on early warning of flash flood disasters in the United States[J].China Flood & Drought Management, 2020, 30(9/10): 141-148.(in Chinese)

# 美国山洪灾害预警研究进展

刘荣华<sup>1,2</sup> 周燕怡<sup>3</sup> 郭良<sup>1,2</sup> 翟晓燕<sup>1,2</sup> 田济扬<sup>1,2</sup> 张晓蕾<sup>1,2</sup> 李锐<sup>1,2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院,北京 100038;2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心,北京 100038;  
3. 北京七兆科技有限公司,北京 100076)

**摘要:**作为减轻山洪灾害损失的有效手段,山洪预警一直是美国学者的研究热点,也是美国山洪灾害防御的主要措施。早在20世纪七八十年代,美国就已开始山洪灾害预警的研究工作。几十年来,在水文和气象信息监测技术、预警技术等方面取得了长足的进步。对美国山洪灾害预警研究工作进行了梳理,重点介绍了监测技术和短期预警技术的进展。同时,指出我国与美国之间的差距和未来的努力方向,以期为中国今后的山洪灾害监测和预警工作提供参考。

**关键词:**山洪灾害;监测技术;短期预警技术;美国

中图分类号:TV877;X43

文献标识码:A

文章编号:1673-9264(2020)09/10-141-08

## 0 引言

根据美国国家气象局(National Weather Service, NWS)的定义,山洪是指在强降雨、溃坝和冰塞等事件发生后的6 h内,高水位迅速淹没正常干旱地区,或溪流水位迅速上升至限制水位以上的现象<sup>[1]</sup>。6 h阈值用于划分区域河流预报中心(River Forecast Centers, RFC)和当地气象预报办公室(Weather Forecasting Office, WFO)之间的水文预报和监测责任,前者负责处理较长时间尺度上发生的洪水,后者负责处理较短时间尺度上发生的山洪。

美国山地面积约占总国土面积的34%,山洪灾害频发,对民众的生命财产安全造成严重危害。据统计,受洪水威胁的国土面积约占总国土面积的7%,受洪水影响的人口超过全国人口的10%<sup>[2]</sup>。从2007年10月1日至2015年10月1日,根据风暴事件数据库(Storm Events Database)记录,NWS报告美国共发生了28 826次山洪事件,平均每年3 603次。在

这8年间,共有278人因山洪暴发死亡。

作为有效的山洪灾害防御手段,早在20世纪70年代,作为发达国家的美国就已开始山洪灾害预警研究<sup>[3]</sup>。从产生洪水的机制到水雨情的监测,从中长期预警技术到短期预警技术,再到民众对山洪预警信息的反馈,几十年来,研究内容覆盖了从山洪发生到发出预警信息的每个环节。其中,水雨情的监测技术和短期预警技术一直是美国乃至全世界山洪预警领域的研究热点。因此,本文对美国近几十年的山洪预警研究工作进行梳理,在此基础上详细介绍水雨情监测技术和短期预警技术的研究进展,并指出中国与美国的差距和下一步的改进方向。

## 1 美国山洪预警研究体系

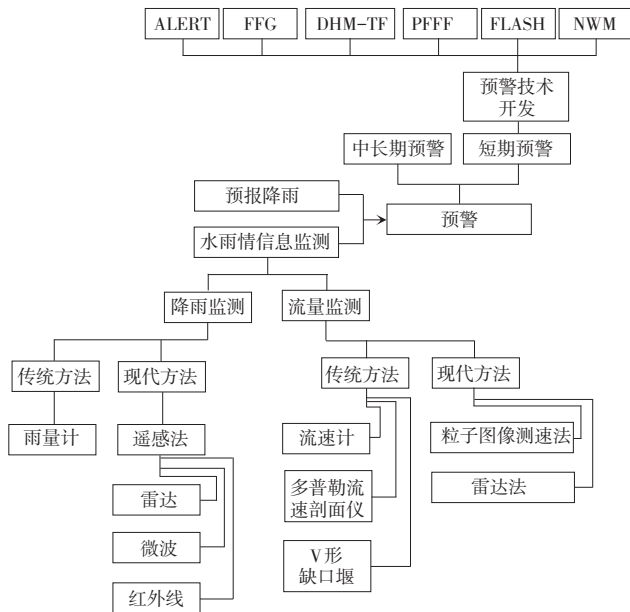
20世纪60年代之前,美国主要采用工程方法来防治山洪灾害。修建了大量的防洪工程后,政府的救灾负担仍然很重,专家们才开始关注非工程方法——山洪预警。美

收稿日期:2020-09-10

第一作者信息:刘荣华,男,高级工程师,E-mail:liurh@iwhr.com。

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1510605)。

国山洪预警研究体系如图1所示。



山洪灾害的主要驱动因子是暴雨,主要表现形式为水位/流量超过警戒值,因此,有效的雨情和水情监测对于山洪预警至关重要。目前,美国主要采用传统的雨量计法和现代的遥感方法(雷达、微波、红外线)监测降雨量,流量监测方法也包括传统方法(流速计、多普勒流速剖面仪、V形堰)和现代方法(粒子图像测速法、雷达法)两大类。此外,为了延长预见期,一些山洪预警技术开始使用预报降雨作为预警模型的驱动条件。基于对水雨情监测和预报数据的分析,输出山洪风险范围、时间和等级,即为预警。根据预警的时效性不同,分为中长期预警和短期预警。中长期预警的目标是评估未来多年山洪灾害发生的可能性,也叫山洪风险评估。短期预警行为则是预测未来几天或几小时内山洪暴发的可能性,其研究重点是预警技术的开发。美国目前的短期预警技术主要包括实时自动本地评估ALERT(Automated Local Evaluation in Real Time)、FFG(Flash Flood Guidance)、DHM-TF(Distributed Hydrological Model Threshold Frequency)、PFFF(Probabilistic Flash Flood Forecast)、FLASH(Flooded Locations and Simulated Hydrographs)以及NWM(National Water Model)6种技术。

## 2 水雨情监测技术

### 2.1 流量监测

美国水文测站的密度较高,仅美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)管理运行的水文站就达7 000多个,还有15 000个备用站。而且这些站点的自动化程度较高,50%的测站建有自动测报系统,根据需要随时测报流量、水位等水情信息。

在水文站的几种观测数据中,流量数据对于山洪预报最为重要。早期,主要采用流速计进行流量监测。到1996年,声学多普勒流速剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)出现并被投入业务运用,迅速取代了流速计。由于传统流量测量方法的多种缺点,连续波微波雷达(Continuous Wave Microwave Radar)、单站UHF多普勒雷达(Monostatic UHF Doppler Radar)、脉冲多普勒微波雷达(Pulsed Doppler Microwave Radar)、探地雷达(Ground-Penetrating Radar)测量法以及粒子图像测速法(Particle Image Velocimetry, PIV)等更安全、方便、准确的测量方法,逐渐受到美国学者的关注<sup>[4-5]</sup>。目前,美国采用的流量监测方法既有传统方式也有非传统方式,传统测量方法并未被完全替换掉。

### 2.2 降雨监测

除了流量,降雨监测数据也对山洪预报至关重要。传统上,一般采用多种形式的雨量计进行雨量观测,NWS和USGS经常使用翻斗式雨量器记录降雨数据。然而,由于雨量计的局限性,其观测数据难以反映降水过程的复杂时空变化。除了随机误差和系统误差,雨量计的时间采样分辨率和盛水容器的容积分辨率也可能会带来误差。目前,美国只有8 000多个地面雨情监测站。

为了弥补雨量监测站的不足,美国开始研究基于遥感信息定量估算降雨量(Quantitative Precipitation Estimating, QPE)的方法,先后启动了热带降雨测量任务(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)<sup>[6]</sup>和全球降雨测量任务(Global Precipitation Measurement, GPM)<sup>[6-7]</sup>。在这两个任务中,多种传感器(雷达、红外线、微波等)的观测数据被用来估算降雨量,其中使用频率最高的是雷达,包括地面雷达、机载雷达以及星载雷达。

应用雷达估计降雨的研究最早可以追溯到1971年NWS开始的数字化雷达实验(Digitized Radar Experiment,

D/RADEX),该实验的目标是应用计算机改进雷达数据的业务使用。1983年,该系统升级为雷达数据处理器第二版RADAP II(Radar Data Processor, Version II)。RADAP II系统使用了两种雷达,即1957年天气监视雷达(Weather Surveillance Radar-57, WSR-57)和1974年S波段天气监视雷达(Weather Surveillance Radar-74S, WSR-74S)。到1991年,RADAP II网络由12个站点组成,其中6个站点覆盖了美国中部阿肯色河流域的大部分地区。1992年,RADAP II系统停止使用,被多普勒雷达(Weather Surveillance Radar-88 Doppler, WSR-88D)所取代<sup>[8-10]</sup>。

2002年3月,NWS对已有的业务雷达进行了极化升级。2003年,美国宇航局/喷气推进实验室(National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory, NASA JPL)开发了一种新的机载14/35 GHz降雨剖面雷达(Rain Profiling Radar),称为APR-2(Airborne Precipitation Radar-2)<sup>[11]</sup>,作为GPM的先进双频星载雷达的原型。该机载仪器能够在14 GHz和35 GHz(即Ku和Ka波段)同时测量降雨参数<sup>[12]</sup>。2008年,WSR-88D雷达开始以超分辨率(即方位角为0.5°、射程为250 m)采集数据。2009年,双极化雷达出现,双极化降雨率产品在250 m×1°极化网格上提供<sup>[13]</sup>。

双极化雷达具有较大的覆盖面积和填补采样空白的能力,已成为QPE的重要工具<sup>[14]</sup>。大多数极化雷达QPE系统都集中在S波段、C波段或X波段<sup>[14-16]</sup>,关于Ku波段或更高频率雷达和雷达降水量估计的研究相对较少。目前,美国很多地区采用下一代天气雷达(Next Generation Weather Radar, NEXRAD)监测降水量,在本土布设有100多部新一代天气雷达,可覆盖全美20 000多个洪水多发区域。到2020年,WSR-88D仍然是国家恶劣天气预警和预报基础设施的基石。但是,并不是整个NWS都使用基于雷达的降雨数据进行山洪预报,比如加利福尼亚—内华达河流预报中心(California-Nevada River Forecasting Center, CNRFC)就没有使用雷达信息来获取面雨量,它只依赖于这个流域的雨量计数据和降水气候资料。

除了雷达,微波、红外线等遥感手段也在定量降水估算方面有所应用,包括利用人工神经网络和遥感信息估计降水量法(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks, PERSIANN)、气

候预报中心变形法(Climate Prediction Center Morphing method, CMORPH)以及红外-被动微波法(Infrared-Passive Microwave, IR-PMW)等。

### 3 预警技术

山洪短期预警的目标是预测未来几天、几小时内山洪是否暴发,从而让山洪威胁区的居民有足够的时间来应对。美国山洪短期预警研究的重点是预警技术的开发,目前主要有ALERT、FFG、DHM-TF、PFFF、FLASH以及NWM 6种技术。

#### 3.1 ALERT

1976年以来,为了防治山洪灾害,NWS与各州政府合作,开发并推广了一种称为实时自动本地评估(ALERT)的预警系统<sup>[17]</sup>。ALERT主要包含3个组成部分:水雨情自动传感器、微型计算机以及洪水预报模型。NWS选择萨克拉门托土壤湿度计算模型(Sacramento Soil Moisture Accounting model, SAC-SMA)作为ALERT预警的基础,该模型已嵌入了ALERT的计算机程序。

ALERT使用配备有自激活无线电发射器的流量计、水位计和雨量计获得水雨情信息,这些信息会自动传输到中央微型计算机。一旦计算机接收到数据,就会对数据进行自动格式化和归档。计算机程序每12 min扫描一次降水数据文件并生成新的洪水预报结果。此外,ALERT还可以根据降雨预报资料产生洪水预报结果。计算机程序自动对洪水预报结果进行分析和显示,然后发出预警信息。ALERT系统具有音频和视频报警功能,可以根据特定的标准进行设置,以确保在计算机无人值守时发出预警信息。

#### 3.2 FFG

山洪预报指南(FFG)是指在给定的时间内,造成某一河流断面山洪暴发所需的上游流域平均降雨量。除了降雨,山洪的发生还与流域下垫面条件、前期洼蓄量、土壤湿度等因素有关。在不同条件下,导致某一流域发生洪水所需的降雨量也不同。因此,FFG是一个需要不断更新的动态变化值。目前,FFG的生成方式主要为:利用降雨径流模型实时模拟当前的土壤湿度状态,然后计算在当前土壤湿度条件下可能引发山洪的时段降雨量。FFG由分布在美国大陆的12个河流预报中心(River Forecasting Center, RFC)生产,RFC计算的FFG随后被交付到NWS的WFO。将降水

观测值与FFG对比后,WFO对降水量等于或超过FFG的地区发出山洪警告。FFG的发展经历了很长的时间。

FFG最早产生于NWS的山洪计划,可以追溯到1969年俄亥俄州沿海县的独立日洪水事件。在俄亥俄州,洪水和恶劣的天气造成41人死亡、559人受伤。针对山洪灾害预警的需求,西北地区河流预报中心(Northwest River Forecasting Center, NWRFC)开始制作不同时空范围的FFG,以支持当地WFO的山洪预警任务,这个时期的FFG是基于流域结构信息和历史时期的降雨量得到的。

随着技术水平的发展,研究者们对FFG不断地予以改进,衍生出不同种类的FFG产品。

20世纪七八十年代,NWS的RFC开发和部署了NWS河流预测系统(National Weather Service River Forecasting Center, NWSRFS),该系统最初仅用于对更大尺度的洪水进行预报。20世纪80年代末期,研究者们开始探索如何利用NWSRFS产生FFG。1992年,LFFG(Lumped Flash Flood Guidance)问世了<sup>[18-19]</sup>。1992年以前的FFG被称为原始FFG,1992年至21世纪初使用的FFG(截至2012年仍在一些RFC中使用)被称为LFFG。

大多数RFC使用SAC-SMA模型来获取土壤湿度数据。将流域平均累计降雨量数据和当前的土壤湿度数据输入降雨—径流模型,然后对比模型输出的径流量和河流径流量阈值。经过多次模拟,直到模型输出径流量等于河流径流阈值时,此时的降雨量即为给定初始土壤湿度和径流阈值下的LFFG。RFC一般给出1 h、3 h、6 h、12 h、24 h持续时间的LFFG值。如果RFC能按时获得降水数据,那么RFC的土壤湿度信息每6 h更新一次,因此LFFG也可以每6 h更新一次<sup>[19]</sup>。在LFFG的计算过程中,没有考虑流域内降雨在空间或时间上的变化。在这个时期,1988多普勒天气监测雷达(WSR-88D)网络提供的更精确和更高分辨率的降水量估计为提高山洪预警的准确性提供了助力。来自WSR-88D雷达的降雨量估计值在水文研究分析项目(Hydrologic Research Analysis Project, HRAP)网格上生成,名义上的分辨率为4 km×4 km。为了更有效地将雷达降雨量估计值用到山洪预警中,需要在相同的空间网格尺度上计算FFG。于是,RFC将流域平均LFFG分配至每个HRAP网格上,对LFFG进行了名义上的网格化<sup>[20]</sup>。WFO获得这种网格化的LFFG后,通过将WSR-88D的雷达估计降雨量与

LFFG进行对比来判断是否发出山洪预警信息。

21世纪初,WFO开发了山洪监测和预报软件(Flash Flood Monitoring and Prediction, FFMP),它是WFO水文预测系统(WFO Hydrologic Forecast System, WHFS)HydroView应用程序、对流分析和即时预报系统(System for Convection Analysis and Nowcasting, SCAN)以及匹兹堡WFO的区域平均流域估算降雨方法(Areal Mean Basin Estimated Rainfall algorithm, AMBER)中现有功能的发展和合并<sup>[21]</sup>。该软件将雷达估计的累计降雨量与LFFG值进行比较,以判断山洪发生的可能性。国家流域划定项目(National Basin Delineation Project, NBDP)使用地理信息系统技术(Geographic Information System, GIS)为WFO生成了山洪尺度的流域数据集<sup>[22]</sup>,FFMP系统使用了这些流域数据集。在NBDP流域数据集中,平均流域面积约为10 km<sup>2</sup>,最小面积为5 km<sup>2</sup>,与WSR-88D估算的降水量分辨率(4 km×4 km)近似<sup>[23]</sup>。然而,RFC并没有使用NBDP流域数据集,用于比较和预警决策的LFFG仍然代表大流域尺度(300~5 000 km<sup>2</sup>)的过程。降水量与LFFG的尺度差异是一个重要的误差来源。

除了尺度差异之外,LFFG还存在一些问题,比如一些HRAP网格单元存在LFFG值缺失,流域边界上的其他网格单元有多个重叠且不同的LFFG值,甚至LFFG值可能会沿流域边界出现明显的坡度。这些问题是由于软件和硬件的局限性、各个RFC之间的水文模型参数差异,甚至是RFC之间的模型差异造成的。为了解决LFFG的问题,一些机构开始寻找LFFG的替代品。

从2003年开始,科罗拉多流域河流预报中心(Colorado Basin River Forecasting Center, CBRFC)开始测试山洪威胁指数(Flash Flood Potential Index, FFPI)方法,试图通过FFPI得到FFMP流域发生山洪的可能性,达到替代LFFG的目的。FFPI使用网格化的地理信息(土壤特征、植被覆盖、地形坡度、土地利用、城市化以及野火等季节性影响)来生成代表山洪威胁程度的基于网格的指数<sup>[24]</sup>。对这些网格化的地理信息重新采样使其达到一致的分辨率,然后基于网格地理信息对山洪的敏感度为每种数据层的每个网格单元分配一个FFPI,FFPI=1~10,1代表对山洪最不敏感,10代表对山洪最敏感。然后,对于每个网格,计算所有数据层FFPI的加权平均值。在计算均值过程中,设置除坡度外的其

他数据层的权重一致,地形坡度数据层的权重比其他层都大,因为地形坡度对于山洪的影响更显著。这些FFPI的平均值即为最终的FFPI产品,最终输出一个数据层。

由于网格化地理信息的分辨率各异,以一致的分辨率重采样后,FFPI对应的最小流域面积约为60 km<sup>2</sup>,显著高于LFFG的流域分辨率。但是FFPI流域仍然比FFMP流域或单个HRAP网格单元“粗”。最初的FFPI产品被嵌入CBRFC责任区的FFMP流域中,并在WFO中用作LFFG的补充,而不是LFFG的替代品。高精度的预报效果反馈让CBRFC最终用FFPI取代了LFFG。2008年,CNRFC开始使用其开发的FFPI方法,NWRFC也使用了类似的方法。在CBRFC的操作中,FFPI流域敏感度用于调整2.54 mm/h的降雨速率,这种修改后的经验法被WFO用作FFG。在NWRFC和CNRFC的责任流域,FFPI值同样用于分配初始流域敏感度,然后进行缩放以生成最终的FFG,并传输给WFO。

2005年,为了在山洪预警业务中充分利用FFMP,阿肯色州红色河流预报中心(Arkansas-Red Basin River Forecasting Center, ABRFC)开发了一个网格化的FFG模型GFFG(Gridded Flash Flood Guidance)。该模型能反映FFMP流域多变的物理特性,也在附加RFC上实现。这种方法模仿了LFFG,但将空间分辨率提高到与HRAP网格一致,允许模型将每个HRAP网格单元视为一个独立的上游流域。虽然实际尺寸随纬度的变化而变化,但名义上该网格的分辨率约为4 km×4 km。因此,解决了前面提到的LFFG和降水量之间的尺度不匹配问题。GFFG分辨率与FFMP已很接近,但依然没达到完全一致。

GFFG使用分布式水文模型获取土壤湿度数据,这与使用集总式水文模型的LFFG不同<sup>[25]</sup>。与LFFG一样,GFFG方法也需要计算土壤湿度,并通过反复运行降雨径流模型来确定造成径流阈值的降雨阈值。在GFFG的计算过程中,还需要计算每个网格单元的饱和度。2007年和2008年,GFFG方法被推广到其他河流预报中心,包括密西西比河下游地区河流预报中心(Lower Mississippi River Forecasting Center, LMRFC)、东南部河流预报中心(Southeast River Forecasting Center, SERFC)和西海岸河流预报中心(West Gulf River Forecasting Center, WGRFC)。到2008年年底,GFFG已在美国东南部和中南部使用。

2005年,中大西洋河流预报中心(Middle Atlantic River Forecasting Center, MARFC)也开发了一种FFG产品,即分布式FFG(Distributed Flash Flood Guidance, DFFG)。这种方法采用HRAP网格上的连续前期降水指数(Antecedent Precipitation Index, API)模型计算土壤含水量,剩余计算过程与GFFG类似。最终结果是一个空间分布的FFG产品,其空间变异性与ABRFC的GFFG方法相似。DFFG仅在MARFC使用。

以上这些FFG产品并非在同一时间、同一地点使用,地形、雷达覆盖范围和人口密度等因素使得暂时无法对它们的预报效果进行比较和排名<sup>[26]</sup>。在山洪预警业务中,美国各个RFC始终没有选择一致的FFG产品。到2010年,各个地区使用不同种类的FFG产品(LFFG、FFPI、GFFG和DFFG)进行山洪预报是NWS的山洪预警业务常态。

### 3.3 DHM-TF

随着高分辨率降雨数据集、地理信息系统和实时运行分布式水文模型所需的计算资源的建立,2007年,Reed等人演示了一种分布式水文模型阈值频率法DHM-TF<sup>[27]</sup>。DHM-TF方法与FFG方法相似,也需要每个网格单元的径流阈值,并依赖于水文模型进行降雨—径流计算。与FFG方法不同的是,DHM-TF方法使用观测或预测降雨作为水文模型的直接驱动数据,而不是在情景模式下确定降雨阈值。

DHM-TF方法的具体操作步骤是:基于已有的历史时期的网格化降雨观测数据,在记录期间运行分布式水文模型,以生成每个网格点处的模拟流量;从时间序列中提取年最大流量,并假设对数皮尔逊Ⅲ型分布可用来描述流量的分布特征;基于洪水频率分析方法计算与1 a、2 a、5 a等重现期相对应的流量;采用实时的、基于雷达的降雨数据驱动分布式水文模型,当模拟流量超过阈值重现期流量(例如2 a重现期流量)时,发出山洪警报。

在DHM-TF方法的使用过程中,分布式水文模型可产生与观测峰值流量具有高度相关性的模拟峰值流量,而无需对模型参数进行校准。只要模拟径流的等级直方图与观测值精确匹配,即使在模型存在明显偏差的情况下,该方法也能很好地实现。DHM-TF方法的关键点在于模拟事件的相对排序,而不是实际的峰值流量本身。DHM-TF方法的输出更符合山洪暴发的规模,只要模型具有预报能力,对模型参数预先估计,预报区域在雷达覆盖范围内,即使

该区域缺乏校正模型的资料,也可以用于该区域的预警。Reed 和 Norbiato 等<sup>[27-28]</sup>的研究都对比了 DHM-TF 与 FFG 的预警效果,研究结果显示,DHM-TF 比 FFG 的精度更高。

### 3.4 PFFF

高分辨率定量降水预报(Quantitative Precipitation Forecasting, QPF)集合具有不确定性,特别是精细尺度上的位移误差问题。这些小误差对山洪灾害的预测有很大的影响,因为山洪灾害具有很强的位置依赖性。容易发生山洪的流域都很小,暴雨的极小误差可能会完全逆转预报结果。因此,2016年,Wernli 等<sup>[29]</sup>研究者利用 SAL(Structure, Amplitude and Location)方法结合降雨观测数据对 QPF 的结构误差、振幅误差以及位置误差进行量化,将 QPF 输入分布式水文模型作为模型驱动条件,评估 QPF 误差对山洪预报结果的影响,最终产生特定流域的概率性山洪预报(PFFF)。该方法的主要优点是:①根据 QPF 的位置不确定性得到所预测水文响应的概率信息;②通过使用暴雨尺度的数值天气预报集合来延长预报期;③不需要多次模拟。

### 3.5 FLASH

2017年,研究人员设计了基于多雷达多传感器系统(Multi-Radar Multi-Sensor system, MRMS)的 FLASH 系统,FLASH 产生一套降雨和预测流量产品。鉴于 NWS 系统在山洪预报方面的经验,传统的 FFG 产品也纳入了 FLASH 系统<sup>[30]</sup>。

FLASH 系统使用包含 MRMS 降雨量估计值的 1 km×1 km 分辨率网格,在整个区域生成 1 080 万个网格点。FLASH 主要包括 3 种产品:

(1) 累计降雨量的平均重现期产品。基于美国各降雨监测点的年最大降雨量时间序列,FLASH 系统采用频率分析法计算给定降水持续时间 5 min~60 d 的降雨平均重现期(Average Recurrence Interval, ARI)。

(2) 累计降雨量与 FFG 的比值产品。国家环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)天气预报中心将 RFC 最近发布的 FFG 网格(每 6 h、12 h、24 h 发布一次或者在山洪暴发期间根据需要发布)拼接在一起,创建一个小时尺度的国家网格。将最新的基于 MRMS 雷达估计的累计降雨量与其配置的 FFG 值进行比较,获得比值产品。

(3) 预测流量和土壤饱和度产品。FLASH 系统中包含了一个开源的山洪预报集成框架(Ensemble Framework for Flash Flood Forecasting, EF5)。EF5 支持多种水平衡概念,

包括萨克拉门托土壤水分核算模型(Sacramento Soil Moisture Accounting, SAC-SMA)<sup>[31]</sup>、耦合演进和超蓄模型(Coupled Routing and Excess Storage, CREST)<sup>[32]</sup>以及一个疏水模型(Hydrophobic)。将 MRMS 降雨量估计值作为分布式水文模型的驱动条件,获得预测流量数据和预测土壤饱和度和数据。FLASH 项目 EF5 系统流程图见图 2。

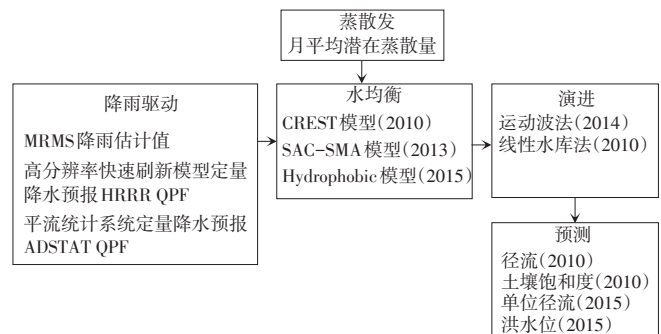


图2 FLASH项目EF5系统流程图(年份代表进入EF5的时间)

FLASH 系统的出现为 NWS 的山洪预警业务提供了新的技术。但是,FLASH 仍然存在一些局限性。首先,FLASH 的所有产品都取决于 MRMS 雷达降雨估计值的准确度。在美国西部的山区,由于山脉的相互干扰,低水平雷达的覆盖受到抑制,因此在该区域 FLASH 的准确性无法保证。其次,山洪可能发生在 EF5 无法有效处理的情景和尺度,例如排水沟堵塞和堤坝溃决引发的洪水等。最后,EF5 分布式水文模型产品提供 6 h 以内的预报,但他们通常是基于降雨观测数据而不是降雨预测数据得到的。此外,EF5 中使用的水文模型概念不一定适用于所有地貌环境下的洪水预测,例如运动波演进方法在平坦地区的适用性是有限的,包括低洼的墨西哥湾海岸、密西西比三角洲、佛罗里达南部和加利福尼亚中部山谷等<sup>[33]</sup>。

### 3.6 NWM

2015年6月,由美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)天气预报办公室运营的国家水中心(National Water Center, NWC)开始研发国家水模型(National Water Model, NWM)。NWM 于 2016年8月正式投入业务使用,在美国大陆上首次生成了实时的、分布式的、连续的水文预报<sup>[34]</sup>。NWM 的初始目标是增加河流流量的预报点和扩大预报覆盖范围。RFC 只能提供大约 3 600 个地点的预报,而 NWM 可提供超过 270 万个

断面的水文预报,覆盖了全国所有山丘区,开启了全尺度洪水计算和预警的新篇章。

NWM框架基于天气研究和预报水文模型(Weather Research and Forecasting Hydrological model, WRF-Hydro)建立<sup>[35]</sup>,采用1 km分辨率的Noah-MP地表模型计算入渗和产流<sup>[36]</sup>,采用国家水文数据集第2版(NHD Plus V2)中等分辨率(1:10万)河网数据和Muskingum-Cunge法进行汇流计算。

NWM具有4种不同模式和预见期的产品,包括:①分析和同化周期:实时显示当前水文状况;②短期(0~18 h):每小时循环1次,生成未来18 h的预测结果;③中期(0~10 d):1 d循环4次,生成未来10 d的预测结果;④长期(0~30 d):1 d循环4次,生成未来30 d的预测结果。

#### 4 结 语

在山洪灾害预警领域,美国专家和学者在流量、降雨监测和山洪预警技术开发等方面开展了大量研究和系统建设工作,积累了超过40年的业务化应用经验,开发了6类预警技术,可为我国山洪灾害监测和预警系统的建设提供大量有益的参考。

(1)在降雨监测方面,应用雷达信息已成为美国获取降雨观测数据的主流方法,虽然雷达在我国也有大量应用,但是山洪预警仍然依赖于地面雨量监测站的资料。未来有待加强站点—雷达的监测信息融合应用,提高降雨数据的精度和分辨率,从而提高以降雨作为驱动条件的山洪预报模型的精度。

(2)在水情监测方面,美国建立了大量的水文监测站,还采用了一些先进技术监测流量等水情信息。我国目前主要依靠传统设备来获取水情信息,且各区域的水文站网密度差别很大。未来应该加强水情监测技术的研发工作,并在山洪多发区域增加水文站的建设密度,便于监测水情以及校正和验证山洪预报模型。

(3)在预警技术方面,美国的研究已趋于成熟,迄今为止已开发6类预警技术。而我国的预警技术还处于成长阶段,在下一步研究中,建议在我国的不同区域分析和比较美国的6类技术,为我国的山洪预警技术开发提供参考。

#### 参考文献

[1] NWS.National Weather Service Glossary[EB/OL].[2012]http://w1.

weather.gov/glossary/index.php.

- [2] 白超海.浅谈对美国防洪减灾工作的认识[J].湖南水利,1999(2):3-5.
- [3] Mogil H M, Monro J C, Groper H S. NWS flash flood warning and disaster preparedness programs[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1978, 59(6): 690-699.
- [4] Creutin J D, Muste M, Bradley A A, et al. River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa river[J]. Journal of Hydrology, 2003, 277(3-4): 182-194.
- [5] Costa J E, Cheng R T, Haeni F P, et al. Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods[J]. Water Resources Research, 2006, 42: W07422.
- [6] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1998(15): 809-817.
- [7] Huffman G J, Bolvin D T, Braithwaite D, et al. Nasa global precipitation measurement (gpm) integrated multi-satellite retrievals for gpm (IMERG), Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)[J]. National Aeronautics and Space Administration, 2014, 26(4): 1-30.
- [8] Heiss W H, McGrew D L, Sirmans D. Next generation weather radar (WSR-88D)[J]. Microwave, 1990, 33: 79-98.
- [9] Crum T D, Alberty R L. The WSR-88D and the WSR-88D operational support facility[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74: 1669-1687.
- [10] Crum T D, Saffie R E, Wilson J W. An update on the NEXRAD program and future WSR-88D support to operations[J]. Weather & Forecasting, 1998, 13(2): 253-262.
- [11] Sadowy G A, Berkun A C, Chun W, et al. Development of an advanced airborne precipitation radar[J]. Microwave Journal, 2003, 46: 84-98.
- [12] Tanelli S, Im E, Durden S L, et al. Rainfall and snowfall observations by the airborne dual-frequency precipitation radar during the Wakasa Bay experiment[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004.
- [13] Istok M J, Fresch M A, Smith S D, et al. WSR-88D dual polarization initial operational capabilities[C]// 25th Conference on International Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Phoenix, Arizona, American Meteorological Society, 2009.
- [14] Bringi V N, Chandrasekar. Polarimetric Doppler Weather Radar:

- Principles and Applications[M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2001:648.
- [15]Bechini R, Baldini L, Chandrasekar V. Polarimetric radar observations in the ice region of precipitating clouds at C-Band and X-Band radar frequencies[J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 2013, 52(5):1147-1169.
- [16]Chen H, Chandrasekar V. The quantitative precipitation estimation system for Dallas - Fort Worth (DFW) urban remote sensing network[J]. Journal of Hydrology, 2015, 531:259-271.
- [17]Platt R H, Cahail S A. Automated flash flood warning systems[J]. Applied Geography, 1987, 7(4):289-300.
- [18]U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Office of Hydrology. Modernized areal flash flood guidance, NOAA technical memorandum NWS HYDRO 44 [R]. 1992.
- [19]Sweeney T, Baumgardner T. Modernized flash flood guidance[EB/OL].[1999-06-23].<https://www.nws.noaa.gov/oh/hr/ffg/modflash.htm>.
- [20]Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al. The WSR-88D rainfall algorithm[J]. Weather Forecasting, 1998, 13:377-395.
- [21]Smith S B, Filiaggi M T, Churma M, et al. Flash flood monitoring and prediction in awips build 5 and beyond, preprints[C]//The 15th Conference on Hydrology, Long Beach, CA, American Meteorological Society, 2000.
- [22]Arthur A T, Cox G M, Kuhnert N R, et al. The national basin delineation project[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, 86(10):1443-1452.
- [23]Davis R S. Detecting the entire spectrum of stream flooding with the flash flood monitoring and prediction program. Session 6B, Weather to Climate Scale Flood Forecasting [C]//The 21st Conference on Hydrology, San Antonio, Texas: American Meteorology Society, 2007.
- [24]Smith G. Flash flood potential: Determining the hydrologic response of FFMP basins to heavy rain by analyzing their physiographic characteristics[R]. 2003:11.
- [25]Schmidt J A, Anderson A J. Spatially-variable, physically-derived flash flood guidance[C]// The 21st Conference on Hydrology, 87th Meeting of the AMS, San Antonio, Texas, 2007:15-18.
- [26]Clark R A, Gourley J J, Flamig Z L, et al. CONUS-Wide evaluation of national weather service flash flood guidance products[J]. Weather and Forecasting, 2014, 29(2):377-392.
- [27]Reed S, Schaake J, Zhang Z. A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations[J]. Journal of Hydrology, 2007, 337:402-420.
- [28]Norbiato D, Borga M, Dinale R. Flash flood warning in ungauged basins by use of the flash flood guidance and model-based runoff thresholds[J]. Meteorological Applications, 2009, 16: 65-75.
- [29]Wernli H, Paulat M, Hagen M, et al. Sal-a novel quality measure for the verification of quantitative precipitation forecasts[J]. Monthly Weather Review, 2008, 136:4470-4487.
- [30]Gourley J J, Flamig Z L, Vergara H, et al. The flash project: improving the tools for flash flood monitoring and prediction across the united states[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(2):361-372.
- [31]the Joint Federal and State River Forecast Center, National Weather Service, California Department of Water Resources. A general streamflow simulation system—Conceptual modeling for digital computers[R]. 1973.
- [32]Wang J, Coauthors. The coupled routing and excess storage distributed hydrological model[J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56:84-98.
- [33]Vergara H, Kirstetter P E, Gourley J J, et al. Estimating a-priori kinematic wave model parameters based on regionalization for flash flood forecasting in the Conterminous United States[J]. Journal of Hydrology, 2016:421-433.
- [34]Rojas M, Quintero F, Krajewski W F. Performance of the national water model in iowa using independent observations[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2019:1-18.
- [35]Gochis D, Yu Wei, Yates D, et al. The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0. NCAR Technical Document [EB/OL][s.n.]. [http://www.ral.ucar.edu/projects/wrf\\_hydro/](http://www.ral.ucar.edu/projects/wrf_hydro/).
- [36]Niu G Y, Yang Z L, Mitchell K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-mp): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(D12):D12109.

责任编辑 马 啸