

包红军,张恒德,许凤雯,等,2021. 国家级水文气象预报业务技术进展与挑战[J]. 气象,47(6):671-684. Bao H J, Zhang H D, Xu F W, et al, 2021. Progress and challenge of national level operational technology for hydrometeorological forecasting [J]. Meteor Mon, 47(6):671-684(in Chinese).

国家级水文气象预报业务技术进展与挑战^{*}

包红军 张恒德 许凤雯 狄靖月 王 蒙
曹 爽 杨 寅 李宇梅 刘海知

1 国家气象中心,北京 100081

2 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,北京 100081

提 要:近年来,国家级水文气象预报业务已经取得了明显进展,但与国外先进水平相比还有一定的差距。总结了近十年来国内外水文气象预报业务现状和技术进展,目前国家级的技术支撑状况和所面临的挑战,并提出未来发展计划。目前,水文气象预报技术主要是以基于统计学的致灾阈值模型和分布式水文模型等为主,结合大数据分析人工智能的气象—水文—地质耦合预报模式将在水文气象预报中发挥重要作用。流域天—空—地—基监测、水文气象灾害机理研究和多尺度分析是水文气象预报的重要基础;基于无缝隙精细化智能网格降水的水文气象预报技术及水文集合预报模式是水文气象预报的发展方向。

关键词:水文气象,业务预报技术,进展,挑战

中图分类号: P49, P641

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.003

Progress and Challenge of National Level Operational Technology for Hydrometeorological Forecasting

BAO Hongjun ZHANG Hengde XU Fengwen DI Jingyue WANG Meng
CAO shuang YANG Yin LI Yumei LIU Haizhi

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081

Abstract: The forecasting operation of quantitative hydrometeorology with accurate spatio-temporal distribution is to meet the demands of the national disaster prevention and mitigation, major projects support, expanding impacted forecasting and risk warning. Although great progresses in the hydrometeorological forecasting have been made in National Meteorological Centre in the recent years, there are still many gaps compared with the advanced forecasting technology in foreign countries. The current development of technique and operation status of the hydrometeorological forecasting was reviewed in this paper. In addition, the current challenges facing China were summarized and the corresponding measures and further development plans were proposed. At present, the main techniques on hydrometeorological forecasting can be classified as two types: the rainfall threshold model based on statistical theory and the distributed hydrological model. Moreover, the atmospheric-hydrological-geological model based on big data analysis and

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1508102、2016YFC0402702)、国家自然科学基金项目(41775111、41875131)、2019 年国家气象中心现代化项目(QXXDH201912)、2020 年国家气象中心青年基金项目(Q202004、Q202006)和 2020 年国家气象中心科技成果转化基金项目(K202004)共同资助

2020 年 8 月 20 日收稿; 2021 年 2 月 3 日收修定稿

第一作者:包红军,主要从事水文气象与气象灾害风险业务科研工作. E-mail: baohongjun@cma.gov.cn

artificial intelligence technique will play important roles in the hydrometeorological forecasting. Hydrometeorological monitoring with satellite, radar and gauge observations is the foundation of hydrometeorological forecasting. Hydrometeorological forecasting based on seamless fine intelligent-and-grid QPF and hydrometeorological ensemble forecasting model will be the important development directions of the hydrological forecasting in the future.

Key words: hydrometeorology, operational forecasting technique, progress, challenge

引 言

水文气象预报是指根据前期和现时的大气与流域水文状态,使用气象学与水文学原理与预报技术,对未来水文循环中某一水体、某一流域或者某一站点/格点的降水、蒸发、土壤水分、径流等水文气象要素的状态及可能影响进行预报预测(Bruce and Clark, 1966; Sene, 2010; 包红军等, 2016c; 包红军, 2017; 丁一汇等, 2020)。

水文气象业务始于 20 世纪 30 年代。美国为了满足防洪工程设计需要,专门成立水文气象实体机构从事气象资料推算可能最大降水和可能最大洪水的研究与应用。随后,水文学快速发展,使得水文学与气象学逐步有机结合,水文气象学成为了具有独立体系的一门学科。水文气象预报的发展,主要依赖于气象学与水文学的发展。20 世纪 70—80 年代,西方发达国家和我国先后进入广泛应用客观定量的数值天气预报的现代天气预报阶段。20 世纪 60—80 年代,流域水文模型得到蓬勃的发展与业务应用,尤其 80 年代以后,随着计算机技术、地理信息系统、数字高程模型和遥感技术的快速发展,一系列分布式水文模型得到了发展和应用。数值天气预报的定量化预报水平逐步提升,使得提高水文气象预报精度与延长预报预见期成为可能。20 世纪 90 年代以来,欧美发达国家逐步实现基于数值天气预报与流域水文模型的现代水文气象预报,并形成模型系统在业务中广泛使用(Warner et al, 1991; Bae et al, 1995; Lin et al, 2002; McEnery et al, 2005; Amengual et al, 2007; Alfieri et al, 2013; 包红军等, 2016c)。最为典型的为欧洲洪水预报系统(European Flood Forecasting System, EFFS; Alfieri et al, 2013)与美国水文预报服务系统(Advanced Hydrologic Prediction Services, AHPS; McEnery et al,

2005)。EFFS 是以 ECMWF 全球模式和 LIST-FLOOD 耦合实现水文气象预报;AHPS 中,针对“单一”确定性数值天气模式降水预报的不确定性,采用二元联合分布将“单一”确定性数值预报降水转化成有意义的降水概率预报,并在此基础上生成了集合预报,并与 Sacramento 模型、HL-RMS 模型等耦合,实现水文气象预报。相比欧美,国内的水文气象预报技术发展时间相对滞后。进入 21 世纪,基于数值模式的水文气象预报技术得到飞速的发展:Lu et al(2008)基于加拿大 MC2 模式建立淮河上游水文气象预报模型系统,崔春光等(2010)基于 AREW 中尺度数值模型发展了长江流域水文气象预报模型系统等等。Bao and Zhao(2012)发现使用“单一”确定性数值预报,由于模式初值误差、模式偏差以及大气自身的混沌特性,易造成水文气象预报出现较大偏差,水文集合预报包含了水文气象预报链式的不确定性,既提供确定性预报,又能提供概率预报信息,成为水文气象预报的重要发展方向。叶爱中等(2015)基于 GEFS 集合预报模式建立了飞来峡流域水文气象集合预报模型,包红军和赵琳娜(2012)基于多中心多集合预报发展了淮河流域水文气象集合预报模型系统。

当前全球范围非常重视气象灾害风险管理和减轻气象灾害风险行动。2009 年以来,国际减灾战略秘书处,跟踪全球减灾风险最新发展理念和成果;世界气象组织(WMO)将基于影响的多灾种预报和预警服务作为重点加以推广,其认为传统的天气预报预警已经不能满足当前防灾减灾的要求,而需要由常规天气要素预报向基于承灾体脆弱性和暴露度的气象灾害影响预报预警服务转变;WMO 着力推进的全球气候服务框架也将减轻灾害风险作为气候服务的优先发展领域。经过十年的发展,国内外建立了多个基于风险的影响预报业务,其中以基于降水的影响预报与风险预警居多。在国内,随着经济发

展与防灾减灾的迫切需求,天气预报服务逐步向紧贴用户需求的影响预报与风险预警转变。特别是中国气象局从2013年起正式开展的暴雨诱发中小河流洪水、山洪与地质灾害气象风险预警服务业务,旨在基于影响预报与风险预警理念,实现水文气象预报从传统的江河流域面雨量监测预报等业务向基于风险的中小河流洪水、山洪与地质灾害气象风险预警转变,国家级业务具体由中央气象台承担。

经过多年的业务建设与技术研,欧美很多国家与地区发展了降水诱发的中小河流洪水、山洪与地质灾害的预报模型与业务系统,最大程度减少水文气象灾害损失。比较典型的是美国天气局水文研究中心开发的基于临界雨量阈值的暴洪指导系统(FFGS),在美国本土及世界多个流域应用;另外,美国国家河流预报中心与马里兰大学开发的基于HEC水文模型的山洪预报系统(HEC-DHM),意大利研发的耦合TOPKAPI水文模型的中小河流与山洪预报预警系统等。在滑坡预警方面,基于经验统计的雨强与持续时间阈值与下垫面地质环境信息的统计预报模型在降水诱发型滑坡预报业务中应用越来越多(Brunetti et al, 2010; He et al, 2014)。国内,水利部减灾中心在全国山洪灾害调查评价基础上,提出了小流域CNFF-HM分布式水文模型与山洪灾害预警指标技术;自然资源部地质灾害技术指导中心发展了隐式统计预警、显式统计预警模型,在山洪与地质灾害气象预警业务中得到应用(郭良等, 2018; 刘传正等, 2009; 刘艳辉和苏永超, 2019)。

中央气象台在总结国内外水文气象业务建设与技术发展基础上,提出了国家级水文气象预报技术发展思路,初步建立了基于智能网格降水的水文气象预报模型体系并在业务中应用,发挥了其防灾减灾效益。

1 水文气象业务现状

国家级水文气象业务源于1998年长江、嫩江松花江流域特大洪水水文气象服务,正式启动于2002年的七大江河流域面雨量估测预报业务。2003年起,根据国土资源部和中国气象局联合签署的相关协议,正式开展汛期地质灾害气象预报预警业务。2006年,为了更好地做好农田渍害与城市内涝防治

气象服务,中央气象台正式通过气象影视发布渍涝灾害气象风险预报预警。

2011年起,随着经济发展与防灾减灾的迫切需求,为了实现由常规天气要素预报向基于承灾体脆弱性和暴露度的气象灾害影响预报预警服务转变,中国气象局开始组织安徽、江西、福建、湖北、四川等省开展中小河流洪水、山洪与地质灾害等气象风险预警服务试点工作;并于2012年启动全国暴雨洪涝气象灾害风险普查,各省(自治区、直辖市)也陆续开展气象灾害风险预警服务试验工作。国家级气象灾害风险预警服务业务由国家气象中心(中央气象台)负责,旨在基于影响预报与风险预警理念,针对降水诱发的中小河流洪水、山洪与地质灾害,发布基于风险的气象预警。目前气象灾害风险预警业务已在全国推广应用,涵盖气象灾害风险普查、致灾临界面雨量科学确定、量化风险评估、气象灾害风险预警、业务检验和效益评估等多个业务流程,建立了国家、省、市、县四级气象灾害风险预警服务业务体系。开展气象灾害风险预警服务,是提高气象服务针对性和实效性、发挥气象服务效益的科学举措,在国家防灾减灾体系中发挥重要的作用。

气象与相关部委间预警协作得到了不断发展和加强。2013年,经中国气象局和原国土资源部批复,将两部门于2003年开始联合发布的“地质灾害气象预报预警”业务更名为“地质灾害气象风险预警”业务;2018年国务院机构改革后,将发布单位更改为“自然资源部和中国气象局”;2015年,经中国气象局和水利部批准决定,从2015年7月起,水利部和中国气象局联合发布“山洪灾害气象预警”业务。气象与相关部门联合发布气象灾害风险预警在防灾减灾和公众服务中发挥重要支撑作用。国家级具体业务均由中央气象台承担。

气象灾害风险预警服务业务内容主要包括灾害风险普查和灾害信息管理、致灾气象阈值确定、定量降水估测(quantitative precipitation evaluation, QPE)和定量降水预报(quantitative precipitation forecasting, QPF)、风险预警、预警业务检验和效益评估。在灾害风险普查和灾害信息库基础上,确定中小河流洪水、山洪与地质灾害的致灾气象条件阈值,结合精细化降水估测与预报,发布气象灾害风险预警,基于业务检验动态评估风险预警效果效益。

2 水文气象业务技术进展

2.1 技术整体框架

降水诱发的水文气象灾害,主要是指强降水落地至水流汇集,形成暴涨的地表径流,流经流域河道,引发河道水位上升流量暴涨,并形成流域洪涝、中小河流洪水、山洪与泥石流灾害;渗透入下垫面引发土壤水过饱和,导致剪切力增大造成边坡失稳形成滑坡等地质灾害的整个过程。图 1 为国家级基于智能网格降水的水文气象预报服务技术框架,面向水文气象灾害,形成气象—水文耦合的预报技术,开展流域气象预报服务与气象灾害风险预警业务。

降水是水文气象最主要的致灾因子。实况降水主要通过地面气象站、地基雷达、卫星遥感探测等手段获取。近年来,雷达—卫星—地面降水观测多源降水融合已经成为高精度 QPE 的主流方法。这样可以综合地面雨量观测、雷达的降水信息准确率较高和卫星遥感大范围连续探测的优势(潘旻等,2018)。而诱发水文气象灾害的强降水形成的物理条件,除了具备一般性降水条件外,还需要有充分的水汽供应、强烈的上升运动和一定的持续时间等,预报难度很大,中央气象台暴雨预报 TS 评分在 0.2 左右。而降水诱发的中小河流洪水、山洪与地质灾害尺度相对较小,对定时定点定量的降水预报需求很大。无缝隙智能网格降水为水文气象灾害风险预警提供了重要基础。

径流的形成是一个极为复杂的过程,水文学中将其概化为产流阶段和汇流阶段。径流形成在降水诱发的水文气象灾害成灾过程中起非常重要的作用,是研究水文气象灾害机理与规律的基础。目前,主要应用流域水文模型描述径流形成过程。分布式水文模型是精细化刻画径流形成过程的重要工具。

中央气象台水文气象业务正是根据水文气象灾害形成机制,在无缝隙智能网格降水与分布式水文模型的研发基础上,面向降水诱发的流域洪涝、中小河流洪水、山洪与地质灾害等,发展了基于智能网格降水的水文气象预报技术,支撑业务预报。

2.2 无缝隙精细化智能网格降水预报

近年来, QPF 已经进入在数值预报模式基础

上主客观融合的无缝隙精细化网格预报阶段(毕宝贵等,2016;代刊等,2016;曹勇等,2016;金荣花等,2019)。为了应对水文气象预报与气象灾害风险预警业务与服务需求,国家气象中心利用雷达、卫星、地面观测等多源观测、全球/区域模式预报、频率匹配与机器学习等模式后处理新技术,发展了多尺度不同时效的无缝隙、精细化网格预报技术与降水产品(金荣花等,2019)。

图 2 为无缝隙精细化智能网格降水预报技术框架,基于主客观融合网格预报平台的智能网格降水预报技术的核心在于三个方面(王建捷,2018):(1)动态自动调整或订正模式降水预报误差;(2)量化模拟预报员预报思路或融入预报经验;(3)预报过程人与技术可交互,人在更高层面发挥作用。

针对水文气象灾害风险预警的高影响 0~10 d 无缝隙智能网格降水预报,中央气象台基于层叠架构的 L-K 光流技术与强度守恒约束的 semi-Lagrangian 平流技术,结合 GRAPES-Meso 快速循环同化系统,提高临近智能网格 QPF 精度;利用 GRAPES-3 km 高时空分辨率特性,构建基于 Time-Lag 融合的(2~12 h)短时预报模型,并引入实时频率匹配订正技术提升短时智能网格 QPF 能力;在多中心全球确定性和集合预报模式,区域中尺度模式基础上,发展与引进了基于降水相似分析的多模式集成方法(林建等,2013)、基于确定性模式的逻辑回归降水预报(张芳华等,2016)、频率匹配订正算法(Zhu and Luo,2015)、基于集合模式的最优百分位方法(代刊等,2018)等模式统计后处理方法,集成预报员主观预报与降尺度技术,提高短中期智能网格 QPF 精度。

2.3 面向水文气象预报的分布式水文模型

自世界上第一个流域水文模型“Stanford 模型”研制以来,水文学家根据模型应用目的,对流域几何特性、模型输入、控制方程、初始及边界条件和模型输出等组成模型的五部分进行选择性的结合(Singh,1995;李致家,2008;包红军等,2016c)。根据基于流域特征对水文过程的描述,流域水文模型可分为集总式水文模型和分布式水文模型,介于两者之间常称之为半分布式水文模型(Singh,1995)。

水文气象预报特别是中小河流洪水、山洪与地

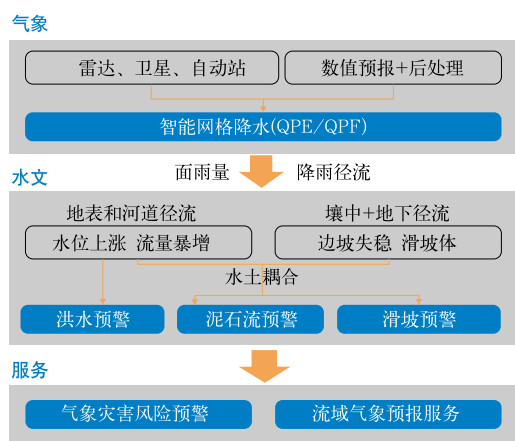


图 1 基于智能网格降水的水文
气象预报服务技术框架

Fig. 1 Technical sketch of hydrometeorological
forecasting and service based on
intelligent-and-grid QPF

质灾害气象风险预警,由于灾害局地性、突发性强,需要精细化的分布式水文模型进行模拟与预报;而包括智能网格降水、数值模式在内的各类降水预报均为格点型产品,为了避免流域尺度与网格点尺度之间差异带来的误差,水文模型应为格点型分布式水文模型;作为国家级水文气象业务水文模型,既要具有反映我国流域复杂的空间多样性与水文物理过程的能力,又要兼顾业务使用的简单性与高效性的预报计算特点,应基于降雨径流概念性模型与分布式物理汇流模型构建(Todini and Ciarapica, 2001; Yang et al, 2002; Bao et al, 2010; 2011; 包红军等, 2016c)。

中央气象台在 2006 年引入的 VIC 水文模型、2009 年引进的新安江水文模型基础上,发展了 GMKHM 分布式水文模型(Bao et al, 2017)。模型结合数字高程模型(DEM)、遥感(RS)技术,以 DEM

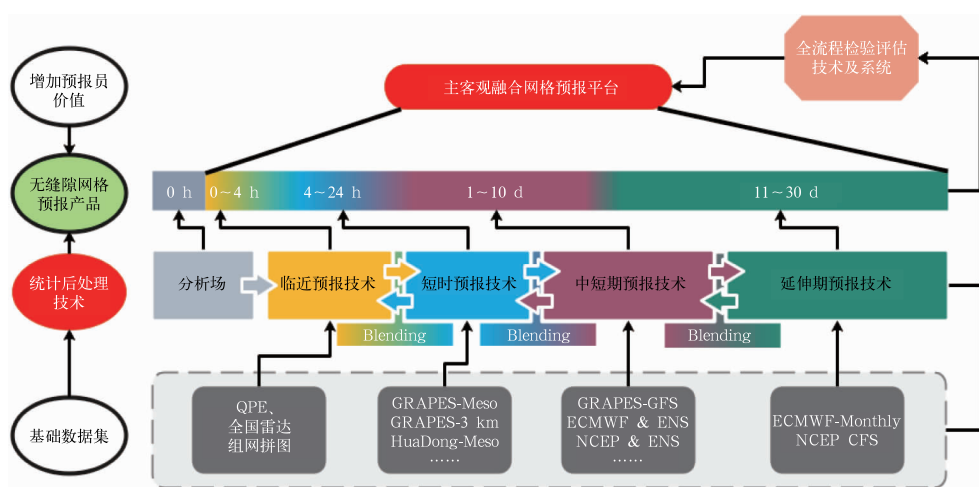


图 2 无缝隙精细化智能网格定量降水预报技术框架

Fig. 2 Technical sketch of seamless fine intelligent-and-grid QPF

栅格为计算单元,栅格内进行植被冠层截留、蒸散(发)、产流与分水源计算;采用混合产流模型进行流域产流计算,考虑栅格间水量交换和水系排水影响(包红军等, 2016b),坡面汇流和河道汇流均采用逐栅格的分布式运动波模型水流演算,模型参数基于 DEM、GIS 和 RS 技术先验估计直接获取(包红军等, 2016a; 2017a; Wang and Bao, 2018)。目前,已经建立基于智能网格降水预报的全国逐 1 或 6 h 的 5 km×5 km 分辨率的全国陆地水文过程预报。

为了更好地兼顾江河流域水文气象预报服务特

点,在 GMKHM 分布式水文模型基础上进一步发展了组合框架的松散耦合型分布式水文模型。模型考虑网格与子流域两个基本单位,蓄满、超渗、先蓄后超、先超后蓄四个产流模型,单位线、线性水库、Muskingum、运动波、扩散波与动力波六个汇流模型。针对复杂流域中存在行蓄洪区等水利工程的影响,发展了基于扩散波与柱蓄和楔蓄理论建立 Muskingum-Cunge 水位流量演算模型进行具有行蓄洪区的复杂河系预报,在淮河 2016 年水文气象预报精度较高(包红军等, 2017c)。

2.4 面雨量监测预报

面雨量指某一时段内特定区域或者流域的平均降雨量,是水文气象业务与科研中最重要的物理量之一,也是流域内水旱防御、水资源评估预估、工程设计、山洪与地质灾害防治与减灾的重要依据。中央气象台的面雨量估测预报业务起始于 1998 年长江和嫩江松花江流域洪涝气象服务。2002 年起,正式开展七大江河流域共 86 个子流域面雨量实时估测预报业务;2010 年,根据国家防汛减灾等新需求扩展到 96 个子流域。

地面站点降水是面雨量估测与预报的重要依据。目前,我国有降水观测任务的国家地面气象观测站为 2 423 个,另外,还设有加密自动气象站约 6 万个。面雨量估测主要通过泰森多边形法、双线性插值、克里金系列方法、反距离权重等技术进行计算,其中以泰森多边形法最为常用;面雨量预报通常把降水预报反演至站点,再通过泰森多边形等方法进行面雨量预报。

在业务中,由于国家地面气象观测站降水的空间代表性与加密自动站降水质量控制问题,往往导致流域面雨量监测与预报存在较大的误差。近年来,无缝隙精细化智能网格降水技术的快速发展较好地解决了流域空间降水分布问题,为面雨量监测与预报方法拓展了新的思路。无缝隙精细化智能网格降水实况采用雷达—卫星—地面降水观测多源降水融合技术,形成了覆盖中国区域完整的降水融合产品,时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 。应用独立样本检验表明,精度优于任一来源产品(潘旸等,2018)。无缝隙精细化智能网格降水预报利用雷达、卫星、地面观测等多源观测、全球/区域模式预报、频率匹配与机器学习等模式后处理新技术,发展了多尺度不同时效(短时临近、短期、中期)的主客观融合的无缝隙网格预报技术与降水产品(金荣花等,2019)。中央气象台在智能网格降水的基础上,基于射线法与算术平均法建立全国七大江河流域 96 个子流域面雨量估测与预报技术。2017 年起,实现基于智能网格降水的全国七大江河流域面雨量估测与预报(预报时效为 10 d),4 254 条中小流域面雨量估测与预报(预报时效为 7 d)。另外,还基于 ECMWF、GRAPES、智能网格降水预报发展

了动态权重集成面雨量预报技术,进一步提升面雨量预报精度(包红军,2016)。

2.5 中小河流洪水气象预警

近年来,面对世界范围内越来越严重的中小河流洪水灾害,很多国家已经或正在研发有效的中小河流洪水监测预警预报系统和洪水管理方法,力求使灾害程度达到最小(Georgakakos,2006;Norbiato et al,2008;2009;Clark et al,2014;刘志雨等,2010;叶金印等,2014)。

目前,中小河流洪水预警技术主要可以分为两类:一类为基于高分辨率的分布式水文模型预报出每个子流域(或者网格点)的径流过程、洪峰等洪水特征,根据河流防洪标准,发布洪水预警;另一类是动态临界面雨量阈值法,通过流域水文模型反演致洪临界面雨量的动态阈值,基于实时流域面雨量预报,发布洪水预警。后者在目前中小河流洪水预报预警中是更为常用的方法。

针对国内外水文气象与中小河流洪水预警研究进展与国内气象部门业务现状,中央气象台将全国河流分为 4 254 条中小河流,并根据中小流域的水文气象资料情况划分成有完整水文气象资料流域(简称为有资料流域)、缺水文有气象资料流域(简称为缺资料流域)、无资料流域。对于有资料流域与缺资料流域,采用流域水文模型与频率分析技术可推求基于流域初始状态(常用土壤饱和度表示)的中小河流致洪雨量动态临界阈值(包红军,2016)。但在我国部分中小河流流域中,常常存在既无长序列水文资料,又缺少长序列降水资料的情况。如何获取流域致洪降水动态临界雨量阈值是能否实现无资料中小河流洪水预报预警的关键技术之一。中央气象台发展了基于流域地形地貌特征信息的中小河流致洪动态临界面雨量阈值推求方法(包红军等,2020b),建立了全国中小河流致洪动态临界面雨量阈值。图 3 为 2020 年 8 月 17 日 08 时全国中小河流致洪动态临界面雨量阈值,分为红橙黄蓝四级,色彩越深,其临界阈值越小。

根据基于智能网格降水的中小流域面雨量集成预报,与致洪动态雨量临界阈值,形成全国中小河流洪水气象风险预警客观模型,可实现未来 240 h,每日 08 时和 20 时起报,逐 24 h 的全国中小河流洪水气象风险预警产品;未来 72 h,逐 6 h 全国中小河流

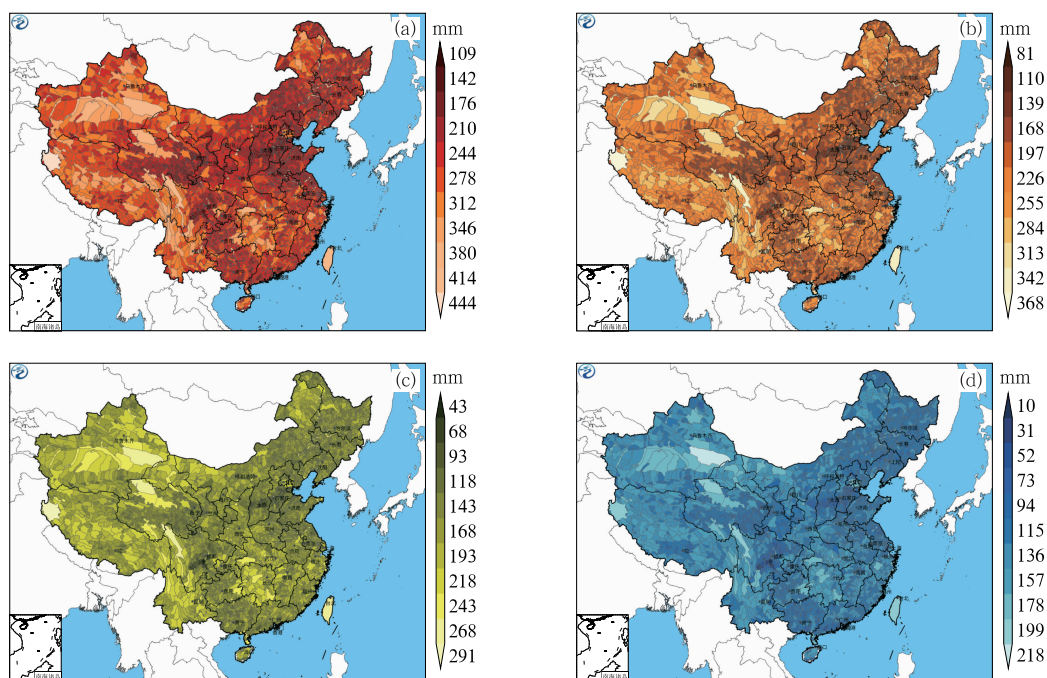


图 3 全国中小河流洪水致洪临界动态面雨量阈值

(a)红,(b)橙,(c)黄,(d)蓝四级

Fig. 3 Critical dynamic area rainfall thresholds for small to middle river floods

(a) red, (b) orange, (c) yellow and (d) blue four levels

洪水气象风险预警产品。

2.6 山洪灾害气象预警

近年来,中国气象局在全国山洪灾害气象风险普查基础上,发展了山洪灾害致灾气象风险阈值技术、基于 EFI 指数山洪灾害气象预警技术与 GMKHM 分布式水文模型等方法,旨在提升山洪灾害气象预警精度(包红军等,2017a;2020a)。

将溪沟小流域精细化 QPE 与 QPF 作为分布式水文模型输入强迫,驱动水文模型得到山洪水文要素预报过程。由于山丘区溪沟小流域往往没有长序列的水文气象资料进行模型参数率定,参数如何取值成为困扰分布式水文模型应用的难点。中央气象台考虑到形成山洪的径流过程常存在既有蓄满产流又有超渗产流的情况,构建了基于中国气象局逐小时的 QPE 与 QPF 驱动 GMKHM 分布式水文模型实现山洪灾害气象风险精细化预警。图 4 是在四川青川大沟山洪沟流域(流域面积为 79.8 km^2 ,时间分辨率为 1 h ,空间分辨率为 $30'' \times 30''$)的山洪定量预报图,基于 GMKHM 分布式水文模型的青川大沟 2009 年 7 月 14 日 16 时至 19 日 08 时山洪模拟预报过程与实况基本吻合,确定性系数为 0.94。

山洪灾害致灾雨量阈值模型是中央气象台山洪

灾害业务重要的预警模型之一。模型基于中国气象局暴雨洪涝风险普查推求的致灾阈值与无缝隙精细化智能网格降水结合,建立全国山洪灾害气象风险预警模型。截至目前,已经完成全国 13 628 个山洪溪沟小流域的四级预警气象阈值确定。

另外,由于山洪灾害往往由极端性降水诱发,而极端性降水事件预报的难度很大。近年来,随着集合预报的快速发展,从集合预报中提炼极端降水事件发生的 EFI 指数为山洪灾害气象预警提供了新的

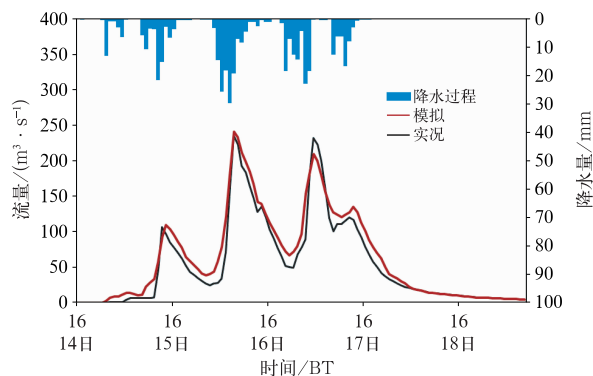


图 4 2009 年 7 月 14 日 16 时至 19 日 08 时大沟流域出口山洪模拟预报过程

Fig. 4 The simulated hydrograph of flash flood in Dagou Basin from 16:00 BT 14 to 08:00 BT 19 July 2009

思路。中央气象台基于 ECMWF 集合预报的 EFI 指数与山洪灾害承灾体信息融合,建立全国山洪灾害气象风险预警 EFI 模型(预报时效为未来 7 d 逐 24 h, $5\text{ km} \times 5\text{ km}$),自 2019 年 7 月起,为山洪灾害气象风险预警业务提供重要支撑。图 5 为基于 EFI 指数的全国山洪灾害气象预警 2020 年 8 月 17 日 08 时的预报结果,四川中部的局部地区存在橙色的山洪灾害气象风险。

2.7 地质灾害气象预警

地质灾害是指在自然或者人为因素的作用下形成的,对人类生命财产、环境造成破坏和损失的地质作用(现象)。我国是世界上地质灾害最为严重的国家之一,地质灾害种类多、分布广、危害大,严重制约和威胁着地质灾害多发易发地区经济社会发展和人民生命财产安全。其中滑坡、泥石流和崩塌是最主要的气象因素诱发的地质灾害类型之一(刘传正等, 2009),最为常见的触发强迫因子为降水(包红军等, 2017b)。地质灾害气象风险预警模型主要分为统计预报(隐式统计预报、显式统计预报)和动力机理模型预报,自然资源部地质灾害预报预警业务模型和中央气象台地质灾害气象风险预警业务模型均属于前者。近年来,中央气象台在逻辑回归概率预报站点模型基础上,引入智能网格降水,发展了概率预报格点模型,模型分辨率达到 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 。图 6 为 2020 年 8 月 17 日 08 时起报的全国 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 分辨率的逻辑回归地质灾害格点概率预报,西南地区局部地区风险高。



图 5 2020 年 8 月 17 日 08 时起报的
基于 EFI 指数的山洪灾害气象预警
(红、橙、黄、蓝四级)

Fig. 5 Forecast of the developed flash flood meteorological warning model based on EFI index initiated at 08:00 BT 17 August 2020 (four levels: red, orange, yellow and blue)

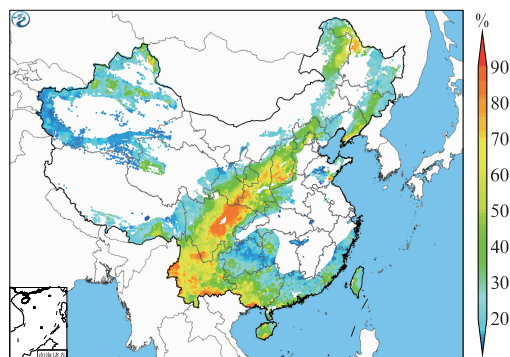


图 6 2020 年 8 月 17 日 08 时起报的 24 h 预报
时效的格点化地质灾害逻辑回归概率预报
Fig. 6 Forecast with lead time of 24 h of
grid-logistic geological model initiated
at 08:00 BT 17 July 2020

地质灾害统计模型中,难以考虑降水入参与产汇流等流域水文过程对滑坡、泥石流等地质灾害响应的影响(包红军等, 2017b)。包红军等(2017b; 2018)在滑坡泥石流物理模型中引入分布式水文模型,通过完善的流域水文过程更为准确计算触发地质灾害的有效降水,提高了地质灾害预报精度。目前,中央气象台基于此技术初步建立了区域地质灾害水土耦合预报模型。

2.8 渍涝气象预报预警

降水引起的渍涝是一种气象灾害,是由于降水过多,导致土壤过度浸泡并地面受淹而造成的一种自然灾害(包红军等, 2015)。渍和涝是一个问题的两个方面:渍强调由于地面径流、排水和土壤透水能力不足,使土壤过度浸泡,植物根部有毒气体聚集、营养成分减少、缺氧,而导致植物的损害、死亡和严重减产;涝强调地面受淹导致的直接灾害,包括城市渍(内)涝和农田渍涝。渍涝灾害已经成为影响人民生活、经济发展以及生态建设的主要因素之一(包红军等, 2015)。

2005 年,中央气象台建立了全国渍涝风险气象预报预警业务(谢正辉等, 2004; 林建等, 2008),并于 2006 年 7 月 5 日正式对公众发布“渍涝风险气象预报预警”产品,支撑技术主要为基于 VIC(variable infiltration capacity)-3L 水文模型的渍涝预报预警技术(Liang et al, 1996; Liang and Xie, 2001; 2003),空间分辨率为 $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ 。2015 年起,基于 USGS(U. S. Geological Survey)提供的 $30'' \times 30''$ 分

分辨率的 DEM 订正流域数字水系,提高流域水系的精确性与精细化程度;并将渍涝风险气象预报预警业务模型中的 VIC 水文模型替代为 GMKHM 分布式水文模型,提高模型分辨率到 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$,整体提升了渍涝业务模型预报的精准度。2017 年,渍涝灾害预报命中率由原模型的 17.8% 提升至 24.1%;2018 年,命中率由原模型的 16.9% 提升至 24.3%。

2.9 水文气象综合分析和会商支撑业务系统平台

相比于欧美发达国家,中央气象台水文气象业务系统建设较晚,开始于 2010 年建立的中央气象台水文气象监测与预警系统,内容以水情监测、七大流域面雨量为主要内容。自 2013 年,中国气象局正式启动暴雨诱发的中小河流洪水、山洪与地质灾害气象风险预警服务业务,使得水文气象预报服务业务从传统的流域水文气象服务向基于风险的影响预报转变,业务内容也以中小河流洪水、山洪与地质灾害为主。随着近年来业务的快速发展,业务数据量更加多源与海量、业务方向逐步增多、预报预警模型更

加科学与精细,亟需建立高效便捷、综合性强、集监测、预报分析、风险预警、检验评估、产品制作与发布的一体化、交互式、智能化的水文气象业务系统。2019—2020 年,为了更好地满足业务需求,中央气象台进一步持续推进基于 BS 框架和 Web GIS 技术的中央气象台水文气象综合分析与会商支撑业务系统平台。图 7 为其主界面,系统主要包括水文气象监测、面雨量监测预报、水文气象预报预警、预报检验评估和历史预报库等五个主要部分。该平台自应用以来,发挥了很好的业务支撑作用。

3 存在问题与对策

3.1 存在问题

目前,水文气象预报服务业务已经成为跨气象、水利、自然资源与应急管理的灾害风险防控科学问题。存在主要问题如下:

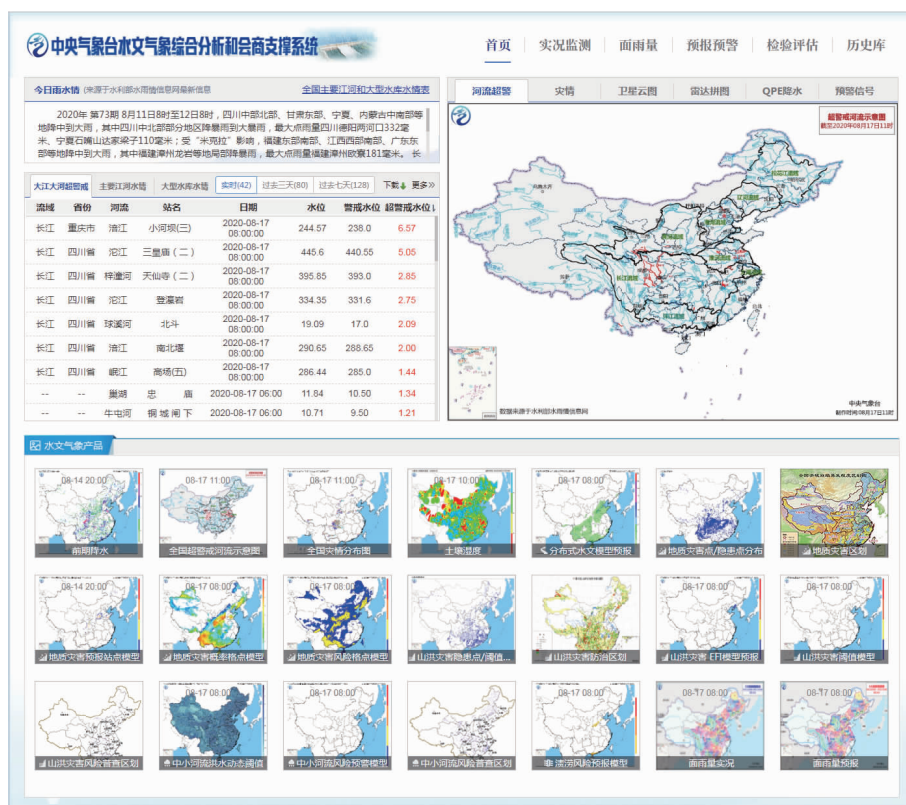


Fig. 7 Main interface of hydrometeorological analysis and consultation support system in National Meteorological Centre

(1)水文气象监测不足,呈“东密西疏”“大密小疏”。①地面监测水平空间代表性不够。面向中小河流洪水预报的水文气象监测,整体呈“东密西疏”“大密小疏”分布。强降水造成中小河流漫堤溃堤、中小水库出险、山洪与地质灾害的主要诱因。强降雨大多在中小尺度天气系统中形成,具有突发性、局地性、强度大等特征。中国气象局雨量观测站点空间分布不均衡,呈现东部密、西部疏,大江大河密、中小河流山洪沟溪与地质灾害隐患区域疏的特点,对致洪致灾流域强降水的捕捉能力不够。②天气雷达网探测覆盖范围不足。雷达、卫星、地面自动站多源信息融合的雨量场可以改善地面雨量站观测的空间代表性不够问题。但中国气象局天气雷达网呈现“东密西疏”的总体分布,存在站间探测盲区,且在地形地貌复杂山区中小河流山洪沟溪与地质灾害隐患区域易造成天气雷达观测遮挡盲区,极易导致局地强降水天气事件演变过程观测的缺失;流域洪涝、中小河流洪水、山洪与地质灾害防治气象保障所需的应急观测能力亟待提高,目前全国移动天气雷达数目不足,无法适应应急处置和补充加密观测需求。因此,如何利用天基、空基和地基等多源信息,实现水文气象灾害成灾全过程多尺度监测分析是水文气象预报亟需解决的关键技术之一。

(2)气象—水文—地质耦合预报能力亟需加强。降水是水文气象预报中决定性的因素,面向流域洪涝、中小河流洪水、山洪与地质灾害风险预警与防控需求,强降水预报精度仍需提高。我国自主研发的GRAPES数值预报系统(全球、区域、集合预报)已业务运行;在多源信息融合同化与多尺度多中心模式基础上发展的无缝隙精细化智能网格降水预报,有效提升了强降水预报。但目前国内外对局地性、突发性强降水的预报能力均存在一定局限,特别是对局地极端性强降水预报能力亟待提高。流域雨量估测与预报在流域洪涝、中小河流洪水、山洪与地质灾害风险预警与防控应用不够。我国基于新安江水文模型的洪水预报业务主要应用在大江大河,湿润区预报效果较好,干旱半干旱区相关理论和预报模型尚有不足。国际上洪水管理、山洪与地质灾害防治呈现从大尺度概念性模型应用预报向精细化预报预警发展趋势。我国中小河流、山洪与地质灾害,尤其干旱半干旱地区非均质特征显著,地形地貌、土地利用复杂,中小水库塘坝的拦蓄与调节作用明显,水文过程与洪水地质灾害成灾机理复杂,变化环境下

气象—水文—地质耦合预报模型研发与应用不够,大大限制了水文气象灾害风险预报预警水平。因此,如何在预报模式中突破变化环境下精细网格尺度物理过程描述的难点,并引入人工智能技术(顾建峰等,2020),提升气象—水文—地质耦合预报模式精度并拓展在河流污染物输送等方面拓展预报能力,是水文气象预报中存在的又一难题。

(3)面向水文气象灾害的风险管理与应急处置能力不足。①水文气象灾害风险预警与影响评估业务体系不够完善。当前全球范围欧美发达国家与组织非常重视灾害风险管理。WMO推进基于影响的多灾种预报预警服务,由常规天气要素预报向基于承灾体脆弱性和暴露度的气象灾害影响预报预警服务转变。中国气象局依此建立的气象风险预警业务在防灾减灾体系中初显成效。国内洪水风险管理也逐步向定量、微观尺度实时动态情景分析转变,但对精细化气象灾害风险预警与影响评估业务体系仍不够系统完善,减灾效益不够明显。②水文气象灾害应急处置能力较为薄弱。风险预警与影响评估业务体系不够完善。近些年,我国由于突发性事件造成的损失巨大,此过程中科学的应急处置显得尤为重要。在突发性流域汛情险情、中小河流洪水、山洪与地质灾害的应急处置中,有现场作业环境与控制条件差、流域水文气象要素监测时效性高、预报技术方案基础不完备、标准规范灵活处理的特点。目前,水文气象灾害对应急监测手段、应急处置技术体系,应急响应的长效机制均较为薄弱。未来重点要在水文气象灾害风险预警与影响评估和水文气象应急处置技术两方面开展研发与实际应用。

(4)水文气象灾害预警发布与群测群防发展不平衡。①国家中小河流洪水、山洪与地质灾害等水文气象灾害气象风险预警发布能力不足。国家预警信息发布中心是国家应急管理体系的重要组成部分,已经形成综合自然灾害、事故灾难、公共卫生事件、社会安全事件四大类突发事件的预警信息发布业务体系;针对水文气象灾害气象风险预警发布需求,仍存在“消息树”和“发令枪”作用不明显,预警信息不能按照实际预警范围准确发布到指定区域和指定人群的情况,在中小河流洪水、山洪与地质灾害频发的农村地区、偏远山区,依然缺乏必要的预警信息接收终端或传播方式。②国家水文气象灾害防治群测群防体系亟需建立。由于我国中小河流众多,山洪与地质灾害点多面广,灾害频发,突发性强且损失

重,亟需在中小河流洪水、山洪与地质灾害等水文气象灾害易发区开展以当地群众为主体的监测、预报、预防工作。目前,社会化的水文气象防灾减灾网络构建不到位,对灾害风险管理人员的职业化培训不足,尚不能成为水文气象灾害防御与群测群防的有效力量;对公众开展水文气象灾害防御的宣传工作投入不足,公众的减灾避险自救意识不强。因此,如何解决水文气象风险预警与发布的“最后一公里”,与有效的灾害群测群防策略,是提升水文气象灾害防治、减少灾害损失的重要途径。

3.2 对策措施

随着精细化水文气象预报、信息融合、大数据分析等技术快速发展,开展水文气象灾害多尺度监测、高时空分辨率降雨量估算与预报、精细化分布式水文预报模型、洪水—地质灾害物理预报模型、灾害风险预警评估与应急处置等技术发展为水文气象灾害风险预警、防控与应急管理服务成为可能。因此,可从以下几个方面开展对策工作,将有力提高国家水文气象风险预警与防控能力,减少灾害损失。

(1)加强水文气象多尺度天—空—地基监测,实现水文气象灾害全过程监测体系建设。基于地基、空基、地基等多源监测资料,研发水文气象水灾害过程的三维监测技术;发展基于大数据识别与融合同化技术的水文气象灾害实时监测、提取和统计分析处理技术;建立水文气象数据库和监测系统,建立水文气象灾害全过程监测体系。

(2)发展气象—水文—地质耦合预报一体化模型。①构建不同水文气象分区降水特征条件下多源信息融合的高时空分辨率雨量场,发展基于人工智能与数值模式的雷达智能外推短时临近降水预报技术和基于多数值模式自适应的短中期定量降水集成预报技术;构建面向中小河流洪水、山洪与地质灾害等水文气象灾害的无缝隙精细化智能网格降水预报,着力提升流域强降水的预报精度。②面向中小河流洪水、山洪与地质灾害,基于精细化分布式水文模型的洪水—地质灾害耦合预报模型。基于历史降雨和洪水实测资料,结合大数据技术、遥感分析、原型实验和机理剖析,揭示不同水文气象分区和下垫面条件下的水文气象灾害预报模式及其成灾机制,构建气象—水文—地质耦合预报一体化模型。

(3)推进水文气象灾害风险预警评估与应急处置业务体系建设。①建立水文气象灾害风险预警与

影响评估。结合全国自然灾害综合风险普查,研究水文气象灾害风险因子辨识和快速提取方法,构建基于“致灾因子—暴露度—脆弱性”风险三角模型的水文气象风险评估指标体系;发展“气象—水文—水动力—灾害—影响”时序过程推演的水文气象灾害风险预警与评估模型;提出针对不同地貌类型区的实时灾害链式风险评估方法;建立精细化水文气象灾害风险动态预警技术;完善全国水文气象业务体系。②建立全国水文气象应急处置体系。采用层次分析方法,研究洪水监测预警、库坝调度、人员转移、抢险处置等关键环节的适用技术,建立水文气象灾害应急处置技术体系,提出灾害结构化应急预案编制方法,制定国、省、市、县四级的《水文气象灾害应急处置预案导则》,并实施。

(4)全国水文气象灾害气象风险预警精准一体化发布全覆盖与群测群防策略。①水文气象气象风险预警与发布“一张网”。提出基于风险的重大水文气象灾害气象风险预警快速制作技术,建立水文气象灾害风险预警信息发布和传播评估技术,建立以送达率、覆盖面等评估模型为基础的预警信息发布效果评估指标体系;研究预警信息精准智慧融合发布关键技术,利用大数据、物联网、应急通讯、气象卫星等技术,构建基于云计算的水文气象灾害风险预警精准快速发布示范平台。②建立以基层信息员为主体的水文气象灾害群测群防策略。提升基层应急能力,筑牢防灾减灾救灾的人民防线。加强水文气象灾害防御公众宣传力度;建立信息员队伍规章制度和评比办法;加大对群测群防信息员培训力度;优胜劣汰动态调整人员结构;多形式总结推广经验;建立“技防”和“人防”协同机制;等等。

中央气象台立足发展国家级链条式水文气象业务,重点发展“一平台、两模型、三重点、四拓展”。“一平台”指的是发展国家级全国水文气象监测与预报服务业务智能交互式一体化系统平台,“两模型”包括基于智能网格降水的分布式水文气象模型和面向防汛减灾的中小河流洪水、山洪与地质灾害气象灾害风险模型;“三重点”主要指流域气象精细预报服务、水文气象灾害风险预警评估和“一带一路”沿线风险预警能力;“四拓展”指重点城市内涝气象预警、流域水资源气象预估评估、流域水环境要素气象预报、流域水土保持气象风险预报等四个方面,实现从“水文+气象”向“水文气象+”的转变。

4 结论与讨论

本文总结了近年来中央气象台水文气象预报服务业务的现状和技术进展,分析了存在的问题,并提出了相应的对策建议。从当前的业务技术进展来看,水文气象天—空—地基监测、水文气象灾害机理研究和多尺度分析是水文气象预报的重要基础;基于无缝隙精细化智能网格降水的水文气象预报技术及水文集合预报模式是水文气象预报的重要发展方向;针对水文气象灾害特点的检验评估方法是促进水文气象预报业务和技术发展的重要方面;一体化、交互式、智能化的预报服务系统是水文气象业务及技术进步的保证。由于水文气象预报服务涉及气象、水利、自然资源、应急管理等多个领域,建立完备的全国水文气象预报服务业务体系是一个非常复杂和重要的系统工程。

参考文献

- 包红军,2016. 中小河流洪水气象预警技术及业务应用[C]//天气预报技术文集(2015). 北京:气象出版社:492-497. Bao H J, 2016. Meteorological early warning technology and operational application of flood in small to medium-sized rivers[C]//Collection of Weather Forecast Technology (2015). Beijing:China Meteorological Press:492-497(in Chinese).
- 包红军,2017. 水文气象预报[M]//矫梅燕. 中国气象百科全书:气象预报预测卷. 北京:气象出版社:58-59. Bao H J, 2017. Hydrological forecasting[M]//Jiao M Y. Encyclopedia of Chinese Meteorology: Meteorological Prediction Volume. Beijing:China Meteorological Press:58-59(in Chinese).
- 包红军,曹勇,林建,等,2020a. 山洪灾害气象预警业务技术进展[J]. 中国防汛抗旱,30(9/10):40-47. Bao H J, Cao Y, Lin J, et al, 2020a. Operational technology advances in meteorological early warning for flash flood disasters[J]. China Flood Drought Manage, 30(9/10):40-47(in Chinese).
- 包红军,林建,曹爽,等,2020b. 基于流域地貌的中小河流致洪动态临界面雨量阈值研究[J]. 气象,46(11):1495-1507. Bao H J, Lin J, Cao S, et al, 2020b. Topography-based dynamic critical arearainfall threshold for small to middle-sized river flood warning[J]. Meteor Mon, 46(11):1495-1507(in Chinese).
- 包红军,王凯,张少杰,等,2018. 耦合分布式水文模型的泥石流物理模型预报试验[J]. 暴雨灾害,37(4):303-310. Bao H J, Wang K, Zhang S J, et al, 2018. Debris flow forecasting test based on a physical model coupling with a distributed hydrological model [J]. Torr Rain Dis, 37(4):303-310(in Chinese).
- 包红军,王莉莉,梁莉,2015. 对国家级渍涝风险气象预报预警业务模型的优化与改进[J]. 气象科技进展,5(2):42-47. Bao H J, Wang L L, Liang L, 2015. Optimization and improvement of water logging & water logged risk meteorological forecast and warning operational technology of China [J]. Adv Mereor Sci Technol, 5(2):42-47(in Chinese).
- 包红军,王莉莉,李致家,等,2016a. 基于 Holtan 产流的分布式水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),44(4):340-346. Bao H J, Wang L L, Li Z J, et al, 2016a. A distributed hydrological model based on Holtan runoff generation theory[J]. J Hohai Univ (Nat Sci), 44(4):340-346(in Chinese).
- 包红军,王莉莉,李致家,等,2016b. 基于混合产流与二维运动波汇流分布式水文模型[J]. 水电能源科学,34(11):1-4, 21. Bao H J, Wang L L, Li Z J, et al, 2016b. Grid-based distributed hydrological model with mixed runoff model and two-dimensional kinematic wave flow model[J]. Water Resour Power, 34(11):1-4, 21(in Chinese).
- 包红军,王莉莉,沈学顺,等,2016c. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. 气象,42(9):1045-1057. Bao H J, Wang L L, Shen X S, et al, 2016c. A review: advances of flood forecasting of hydro meteorological forecast technology [J]. Meteor Mon, 42(9):1045-1057 (in Chinese).
- 包红军,李致家,王莉莉,等,2017a. 基于分布式水文模型的小流域山洪预报方法与应用[J]. 暴雨灾害,36(2):156-163. Bao H J, Li Z J, Wang L L, et al, 2017a. Flash flood forecasting method based on Distributed Hydrological Models in a small basin and its application [J]. Torr Rain Dis, 36(2):156-163(in Chinese).
- 包红军,张珂,晁丽君,等,2017b. 基于水土耦合机制的流域滑坡预报研究[J]. 气象,43(9):1117-1129. Bao H J, Zhang K, Chao L J, et al, 2017b. Landslides forecasting using a physically-based, coupled hydrological-geotechnical framework [J]. Meteor Mon, 43(9):1117-1129(in Chinese).
- 包红军,张珂,魏丽,等,2017c. 淮河流域 2016 年汛期洪水预报试验 [J]. 气象,43(7):831-844. Bao H J, Zhang K, Wei L, et al, 2017c. Test on flood forecasts for Huaihe River in the 2016 flood season [J]. Meteor Mon, 43(7):831-844(in Chinese).
- 包红军,赵琳娜,2012. 基于集合预报的淮河流域洪水预报研究[J]. 水利学报,43(2):216-224. Bao H J, Zhao L N, 2012. Flood forecast of Huaihe River based on TIGGE ensemble predictions [J]. J Hydr Eng, 43(2):216-224(in Chinese).
- 毕宝贵,代刊,王毅,等,2016. 定量降水预报技术进展[J]. 应用气象学报,27(5):534-549. Bi B G, Dai K, Wang Y, et al, 2016. Advances in techniques of quantitative precipitation forecast [J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):534-549(in Chinese).
- 曹勇,刘凑华,宗志平,等,2016. 国家级格点化定量降水预报系统 [J]. 气象,42(12):1476-1482. Cao Y, Liu C H, Zong Z P, et al, 2016. State-level gridded quantitative precipitation forecasting system [J]. Meteor Mon, 42(12):1476-1482(in Chinese).
- 崔春光,彭涛,沈铁元,等,2010. 定量降水预报与水文模型耦合的中小流域汛期洪水预报试验 [J]. 气象,36(12):56-61. Cui C G, Peng T, Shen T Y, et al, 2010. The flood forecast test on QPF coupling with hydrological model in flood season in medium and small catchment [J]. Meteor Mon, 36(12):56-61(in Chinese).

- 代刊,曹勇,钱奇峰,等,2016.中短期数字化天气预报技术现状及趋势[J].气象,42(12):1445-1455. Dai K, Cao Y, Qian Q F, et al, 2016. Situation and tendency of operational technologies in short- and medium-range weather forecast[J]. Meteor Mon, 42(12):1445-1455(in Chinese).
- 代刊,朱跃建,毕宝贵,2018.集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J].气象学报,76(4):493-510. Dai K, Zhu Y J, Bi B G, 2018. The review of statistical post-process technologies for quantitative precipitation forecast of ensemble prediction system[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):493-510(in Chinese).
- 丁一汇,胡雯,黄勇,等,2020.淮河流域能量和水分循环研究进展[J].气象学报,78(5):721-734. Ding Y H, Hu W, Huang Y, et al, 2020. The main scientific achievements of the first China-Japan cooperative GAME/HUBEX experiments: a historical review[J]. Acta Meteor Sin, 78(5):721-734(in Chinese).
- 顾建峰,周国兵,刘伯骏,等,2020.人工智能技术在重庆临近预报业务中的初步研究与应用[J].气象,46(10):1286-1296. Gu J F, Zhou G B, Liu B J, et al, 2020. Study on artificial intelligence technology and its application to Chongqing operational nowcasting[J]. Meteor Mon, 46(10):1286-1296(in Chinese).
- 郭良,丁留谦,孙东亚,等,2018.中国山洪灾害防御关键技术[J].水利学报,49(9):1123-1136. Guo L, Ding L Q, Sun D Y, et al, 2018. Key techniques of flash flood disaster prevention in China[J]. J Hydr Eng, 49(9):1123-1136(in Chinese).
- 金荣花,代刊,赵瑞霞,等,2019.我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J].气象,45(4):445-457. Jin R H, Dai K, Zhao R X, et al, 2019. Progress and challenge of seamless fine gridded weather forecasting technology in China[J]. Meteor Mon, 45(4):445-457(in Chinese).
- 李致家,2008.水文模型的应用与研究[M].南京:河海大学出版社:1-9. Li Z J, 2008. Application of Research of Hydrological Modelling[M]. Nanjing: Hohai University Press: 1-9(in Chinese).
- 林建,谢正辉,陈峰,等,2008.2006年汛期VIC水文模型模拟结果分析[J].气象,34(3):69-77. Lin J, Xie Z H, Chen F, et al, 2008. Simulation of VIC hydrologic model during 2006 flood season[J]. Meteor Mon, 34(3):69-77(in Chinese).
- 林建,宗志平,蒋星,2013.2010—2011年多模式集成定量降水预报产品检验报告[J].天气预报,5(1):67-74. Lin J, Zong Z P, Jiang X, 2013. The test report of multi model integrated quantitative precipitation forecast products in 2010—2011[J]. Wea Forecasting, 5(1):67-74(in Chinese).
- 刘传正,刘艳辉,温铭生,等,2009.中国地质灾害区域预警方法与应用[M].北京:地质出版社. Liu C Z, Liu Y H, Wen M S, et al, 2009. Regional Early Warning Method and Application of Geological Hazards in China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- 刘艳辉,苏永超,2019.四川青川县区域地质灾害气象风险预警模型研究[J].工程地质学报,27(1):134-143. Liu Y H, Su Y C, 2019. Early-warning model of regional geological disasters based on meteorological factor in Qingchuan County, Sichuan Province[J]. J Eng Geol, 27(1):134-143(in Chinese).
- 刘志雨,杨大文,胡健伟,2010.基于动态临界雨量的中小河流山洪预警方法及其应用[J].北京师范大学学报(自然科学版),46(3):317-321. Liu Z Y, Yang D W, Hu J W, 2010. Dynamic critical rainfall-based torrential flood early warning for medium-small rivers[J]. J Beijing Norm Univ (Nat Sci), 46(3):317-321(in Chinese).
- 潘旻,谷军霞,徐宾,等,2018.多源降水数据融合研究及应用进展[J].气象科技进展,8(1):143-152. Pan Y, Gu J X, Xu B, et al, 2018. Advances in multi-source precipitation merging research[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(1):143-152(in Chinese).
- 王建捷,2018.无缝隙精细化智能网格预报技术[R].合肥:第35届中国气象学会年会. Wang J J, 2018. Keynote lecture: seamless gridded weather forecasting technology[R]. Hefei: The 35th Annual Meeting of China Meteorological Society(in Chinese).
- 谢正辉,刘谦,袁飞,等,2004.基于全国50km×50km网格的大尺度陆面水文模型框架[J].水利学报,35(5):76-82. Xie Z H, Liu Q, Yuan F, et al, 2004. Macro-scale land hydrological model based on 50 km×50 km grids system[J]. J Hydr Eng, 35(5):76-82(in Chinese).
- 叶爱中,段青云,徐静,等,2015.基于GFS的飞来峡流域水文集合预报[J].气象科技进展,5(3):57-61. Ye A Z, Duan Q Y, Xu J, et al, 2015. The hydrological ensemble prediction based on GFS in Feilaixia Basin[J]. Adv Meteor Sci Technol, 5(3):57-61(in Chinese).
- 叶金印,李致家,常露,2014.基于动态临界雨量的山洪预警方法研究与应用[J].气象,40(1):101-107. Ye J Y, Li Z J, Chang L, 2014. Research and application of flash flood early warning method based on dynamic critical precipitation[J]. Meteor Mon, 40(1):101-107(in Chinese).
- 张芳华,曹勇,徐珺,等,2016. Logistic判别模型在强降水预报中的应用[J].气象,42(4):398-405. Zhang F H, Cao Y, Xu J, et al, 2016. Application of the Logistic discriminant model in heavy rain forecasting[J]. Meteor Mon, 42(4):398-405(in Chinese).
- Alfieri L, Burek P, Dutra E, et al, 2013. GloFAS-global ensemble streamflow forecasting and flood early warning[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 17(3):1161-1175.
- Amengual A, Romero R, Gómez M, et al, 2007. A hydrometeorological modeling study of a flash-flood event over Catalonia, Spain[J]. J Hydrometeorol, 8(3):282-303.
- Bae D H, Georgakakos K P, Nanda S K, 1995. Operational forecasting with real-time databases[J]. J Hydr Eng, 121(1):49-60.
- Bao H J, Wang L L, Li Z J, et al, 2010. Hydrological daily rainfall-runoff simulation with BTOPMC model and comparison with Xin'anjiang model[J]. Water Sci Eng, 3(2):121-131.
- Bao H J, Wang L L, Zhang K, et al, 2017. Application of a developed distributed hydrological model based on the mixed runoff generation model and 2D kinematic wave flow routing model for better flood forecasting[J]. Atmos Sci Lett, 18(7):284-293.
- Bao H J, Zhao L N, 2012. Development and application of an atmospheric-hydrologic-hydraulic flood forecasting model driven by TIGGE ensemble forecasts[J]. Acta Meteor Sin, 26(1):93-102.

- Bao H J, Zhao L N, He Y, et al, 2011. Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with grid-Xinjiang model for flood forecast[J]. *Adv Geosci*, 29: 61-67.
- Bruce J P, Clark R H, 1966. *Introduction to Hydrometeorology*[M]. Oxford: Pergamon Press: 1-30.
- Brunetti M T, Peruccacci S, Rossi M, et al, 2010. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 10(3): 447-458.
- Clark R A, Gourley J J, Flamig Z L, et al, 2014. CONUS-wide evaluation of national weather service flash flood guidance products [J]. *Wea Forecasting*, 29(2): 377-392.
- Georgakakos K P, 2006. Analytical results for operational flash flood guidance[J]. *J Hydrol*, 317(1/2): 81-103.
- He X G, Hong Y, Yu X D, et al, 2014. Landslides susceptibility mapping in Oklahoma State using GIS-based weighted linear combination method[M]// Sassa K, Canuti P, Yin Y P. *Landslide Science for a Safer Geoenvironment: Volume 2: Methods of Landslide Studies*. Cham: Springer: 371-377.
- Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, 1996. One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer variable infiltration capacity model [J]. *J Geophys Res*, 101(D16): 21403-21422.
- Liang X, Xie Z H, 2001. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models[J]. *Adv Water Res*, 24(9-10): 1173-1192.
- Liang X, Xie Z H, 2003. Important factors in land-atmosphere interactions: surface runoff generations and interactions between surface and groundwater[J]. *Glob Planet Change*, 38(1-2): 101-114.
- Lin C A, Wen L, Béland M, et al, 2002. A coupled atmospheric-hydrological modeling study of the 1996 Ha! Ha! River basin flash flood in Québec, Canada[J]. *Geophys Res Lett*, 29(2): 13-1-13-4.
- Lu G H, Wu Z Y, Wen L, et al, 2008. Real-time flood forecast and flood alert map over the Huaihe River Basin in China using a coupled hydro-meteorological modeling system[J]. *Sci China Ser E: Technol Sci*, 51(7): 1049-1063.
- McEnery J, Ingram J, Duan Q Y, et al, 2005. Noaa's advanced hydrologic prediction service: building pathways for better science in water forecasting[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 86(3): 375-386.
- Norbiato D, Borga M, Esposti S D, et al, 2008. Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: an assessment for gauged and ungauged basins[J]. *J Hydrol*, 362(3/4): 274-290.
- Norbiato D, Borga M, Dinale R, 2009. Flash flood warning in ungauged basins by use of the flash flood guidance and model-based runoff thresholds[J]. *Meteor Appl*, 16(1): 65-75.
- Sene K, 2010. *Hydrometeorology: Forecasting and Applications*[M]. Dordrecht: Springer: 1-28.
- Singh V P, 1995. *Computer Models of Watershed Hydrology*[M]. Highlands Ranch: Water Resources Publications.
- Todini E, Ciarapica L, 2001. The TOPKAPI model[M]// Singh V P, Frevert D K. *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Littleton: Water Resources Publications.
- Wang L L, Bao H J, 2018. Ensemble flood forecasting based on ensemble NWP and the GMKHM distributed hydrological model [J]. *MATEC Web of Conferences*, 246: 01108.
- Warner T T, Kibler D F, Steinhart R L, 1991. Separate and coupled testing of meteorological and hydrological forecast models for the Susquehanna River basin in Pennsylvania[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 30(11): 1521-1533.
- Yang D W, Herath S, Musiak K, 2002. A hillslope-based hydrological model using catchment area and width functions[J]. *Hydrol Sci J*, 47(1): 49-65.
- Zhu Y J, Luo Y, 2015. Precipitation calibration based on the frequency-matching method[J]. *Wea Forecasting*, 30(5): 1109-1124.