

我国流域水文气象业务进展回顾与展望

崔讲学¹ 王俊² 田刚³ 杨文发²

(1 湖北省气象局, 武汉 430074; 2 长江水利委员会水文局, 武汉 430010; 3 武汉中心气象台, 武汉 430074)

摘要: 水文气象自20世纪30年代开始至今已有近百年的发展历程, 回顾了我国流域水文气象业务围绕提高预报精度和延长洪水预见期, 在定量降水监测及估算、基于雷达外推和数值模式的定量降水预报、延伸期及气候旱涝趋势预测等的气象监测预报, 洪水预报方法和水文气象耦合预报等领域所取得的研究进展及其应用服务开展情况, 并对云计算、大数据处理和数据挖掘、机器智能学习等信息新技术在未来行业数据的汇集共享、气象预报与洪水预报集成耦合、水旱灾害的智能化监测预警及雨洪资源应用气象辅助决策平台等领域的应用前景进行了展望。

关键词: 流域, 水文气象, 业务, 进展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.04.005

The Review and Outlook on the Development of Basin Hydrometeorological Applications and Services in China

Cui Jiangxue¹, Wang Jun², Tian Gang³, Yang Wenfa²

(1 Hubei Meteorological Bureau, Wuhan 430074

2 Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010

3 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074)

Abstract: As an intersection of hydrology and meteorology, hydrometeorology has had a history of nearly 100 years. Mainly focusing on high accuracy flood forecasting and forecasting long periods, the developing course of basin hydrometeorological applications and services in China is reviewed, including quantitative precipitation estimation, quantitative precipitation forecasting, extension and climate drought forecasting, other meteorological monitoring and forecasting technology, flood forecasting methods, and hydrological and meteorological forecast coupling technology. With the development of the social economy and improvements in science and technology, future developments of hydrometeorological applications and services will continue. They are needed to satisfy the demand for intelligent monitoring and early warning of rain and flood resources using meteorological decision platforms. New technology will be needed to carry out data collection and sharing research, weather and flood forecasting coupling, and construction after flood and drought disasters.

Keywords: basin, hydrometeorology, services, development

0 引言

水文气象学是研究水圈与大气圈界面上发生的物理现象、过程及其演变规律的一门学科, 是连接水文和气象的交叉学科, 主要研究水文循环、水量平衡变化密切相关的降水和蒸发的有关问题, 它既是应用气象学的一个分支, 又是水文学的重要组成部分^[1-5]。

国内外对水文气象学的认识与应用, 早期多集中于防洪与灌溉, 水文与气象常常是密不可分的。独立水文学是在19世纪末和20世纪初期才逐渐形成的一门

独立学科, 独立气象学的建立则是以1803年英国Luke Howard提出云分类方法为标志的。在陆地表面和大气各自不同的领域里, 水文学与气象学开始是分别研究水分循环系统的不同环节; 而现代水文学和气象学相结合, 是20世纪30年代美国国家气象局成立水文气象学后开始的, 即寻求从气象资料中推算最大可能降水和最大可能洪水, 以满足防洪建筑设计的需要^[6]。随着气象雷达、气象卫星等探测技术的发展, 特别是1960年以后降水监测水平有了很大提高, 为降水短时预报与洪水预报的结合创造了条件, 水文气象学得到了新的发展^[7]。长江水利委员会主任林一山于1954年倡导水文学与气象学相结合开展流域洪水预报方法, 并首次于20世纪60年代初在全国首创水文气象预报业务。随着长江流域水文气象业务实践和防洪需要, 1982年长江水利委员会陈金荣等指出气象预报同水文

收稿日期: 2017年12月14日; 修回日期: 2018年6月1日

第一作者: 崔讲学 (1958—)

通信作者: 田刚 (1976—), Email: yctg@163.com

资助信息: 中国气象局2016年度气象软科学研究重大项目 ([2016]Z01); 中国气象局山洪地质灾害防治气象保障工程项目

预报的结合,将为防洪和水库调度等工作带来巨大的优越性和必要性,是水文预报发展的必然趋势^[8]。文中阐述的基本思想在水文气象预报技术已有许多新的发展和进步的今天仍然具有指导意义。20世纪90年代以来,随着计算机信息、遥感、数值天气预报、水文监测和预报等技术的不断发展,基于遥感和数值预报天气模式的降水预报技术与水文模型开展多途径的水文气象耦合,从而实现不同预见期的水文水资源预报等正成为当前水文气象学在实践业务中的重要应用发展方向^[9-14]。而云计算、大数据分析、机器学习等新兴技术的不断应用,也在为水文气象学的发展注入新的内涵^[15-20]。

伴随着水文气象学的应用发展历程,其核心追求的一直是如何获取精度高和预见期长的流域洪水预报。而要达到此目的,需要拓展到研究大气中水循环规律,分析预测大气中未来要发生降水信息作为流域水文模型输入来实现。其中流域面雨量作为水文预报主要的输入因子,是水文气象学的重点研究对象,已成为各级政府和有关部门组织防汛抗洪、水库调度以及山洪地质灾害防治等决策的重要依据^[21-27]。

1 中国流域水文气象业务发展现状

1.1 概况

中国的水文事业基本上是在1949年以后才得到了迅速发展,并与气象相结合,密切地服务于水利工程建设和江河防汛。例如在葛洲坝工程建设期间,由长江流域规划办公室(现长江水利委员会,以下简称长江委)和葛洲坝工程局协同国家气象局气象科学研究院(现中国气象科学研究院)、湖北省气象局等十余个单位开展了一系列葛洲坝工程截流施工期中、长期水文气象科研协作研究^[28]。20世纪50年代末,长江委在国内水利行业率先建立了气象预报业务,并于1972年正式组建了长期水文气象预报业务机构。80年代后期,由中国气象学会与中国水利学会联合,在这两个学会系统中,开始成立了中国水文气象交叉学科的专门委员会^[29]。为保障三峡工程大江截流期施工的顺利进行,长江委水文局于1997年4月15日起开展了三峡截流施工期长、中、短期水文气象预报工作^[30]。自2006年开始,中国气象局先后在七大流域建立流域气象中心,长江流域气象中心也于2009年组建,成立了长江流域气象服务协调委员会,整合了流域气象部门资源,形成了整体面向地方政府、流域管理机构和水利水文部门开展气象服务的格局。从水文部门的角度来看,希望降水预报尽量要准、预见期要长;而从气象部门的角度来看,希望气象预报能在洪水预报中起

到作用,更好地服务于水资源综合管理。水文气象的关注重点离不开降水估测和预报技术的应用、洪水预报技术的发展和业务产品、业务平台的开发。而国内水文气象业务侧重面雨量预报方面,20世纪90年代开始主要是集中于按水系分区的面雨量预报,21世纪后已经开始向更精细化的任意流域分区面雨量预报转变。

1.2 气象监测预报技术在流域业务中的应用

定量降水估测与定量降水预报是精细化流域面雨量服务工作的基础,也是洪涝及其次生灾害的预报基础^[29]。降水的产生过程和物理机制非常复杂,它是由一系列同时出现的,从微尺度到天气尺度的不同尺度的复杂物理过程共同作用的结果,针对不同的预报时效,流域降水估测和预报采取的技术是不尽相同的。

1.2.1 降水监测及估算

定量降水估测(QPE)一直是国内外气象学与水文学研究的热点和难点之一,其方法可以分为实况插值方法、回归分析法以及遥感方法^[23-25]。实况插值方法是基于有限雨量站监测数据展开,根据不同的插值理论基础可分为空间几何插值法、函数插值法以及地理统计法;空间几何插值法包括算术平均法、泰森多边形法、反距离权重法等;函数插值法包括样条插值法和最优插值法等;地理统计方法则以Kriging法最具代表性。回归分析法就是选出影响降水分布变化的因子,根据这些因子与降水量的关系,从统计学上得到降水量的分布函数。遥感方法主要是利用测雨雷达、卫星等遥感信息进行降水量估算的方法。

目前实况插值方法中的泰森多边形法和算术平均法在实际中应用较广泛,国家气象中心进行全国七大江河流域面雨量计算采用的是泰森多边形法^[31]。由于受观测站密度、位置和空间代表的影响,实况插值方法、回归分析法在使用过程中受到了诸多局限。而雷达等遥感估算降水有时空分辨率高的优点,可以比较客观地反映降水量相对大小的分布趋势,近年来已成为降水估算研究的热点,万玉发、尹忠海、李建通、张亚萍等研究表明其可明显提高降水估算精度^[32-36]。目前中国建成了由193部新一代多普勒天气雷达组成的雷达观测网,实现了6分钟一次的数据实时传输和拼图联网,利用雷达测雨估算代替实况插值的计算面雨量进入水文预报模型已经成为了可能。

1.2.2 基于雷达外推和与数值模式相融合的短时定量降水预报(QPF)

目前12 h以内的流域水文气象预报业务主要还是直接采取数值模式定量降水预报的方法,但由于数值预报模式起转问题,最初的数小时模式预报与实况有

很大差距，WMO当前发展短时预报的共识是将临近预报技术与数值预报技术进行融合^[37-39]。

针对0~2 h的定量降水预报，最早出现的临近预报是基于雷达数据的雷暴识别追踪和外推预报，其技术方法可分为交叉相关法和单体质心法两类，其中考虑面上外推的交叉相关法更加符合水文气象的关注特点。有资料表明，通过使用光流法来改进交叉相关法进行雷达估测降水外推预报，在0~2 h可以得到较好的预报效果；针对3~6 h的定量降水预报，由于存在外推预报质量快速下降和数值预报模式起转的问题，国内外目前多结合雷达、卫星和自动站等高时空分辨观测资料建立快速更新循环同化数值预报的方法^[37,40-43]。另外，北京、广东、上海等省（市）还开展了雷达回波外推临近预报和高分辨率数值预报相融合的业务试验^[44-47]。研究表明，对5 mm以上的降水，上述方法较直接使用数值预报，预报改进效果是相当显著的；而6~12 h的预报多直接使用快速循环同化数值预报的方法。

1.2.3 基于数值模式的中短期（1~10 d）定量降水预报

当前，国内水文气象业务开展1~10 d的定量降水预报，主要是基于数值模式，其中，预见期24~48 h内的预报还结合天气学方法进行融合订正，48 h以外随着预见期延长，则更主要依赖数值天气预报模式。数值天气预报技术研究开始于20世纪50年代，目前国际上比较先进的数值天气预报模式有欧洲中期预报中心（ECMWF）的全球模式，美国国家环境预报中心（NCEP）的Eta模式、WRF模式，美国宾夕法尼亚州立大学和美国大气研究中心联合开发的中尺度数值预报模式MM5以及日本全球模式、亚洲区域模式、日本区域模式等模式系统^[44-48]。中国的数值预报研究始于20世纪70年代，多以引进吸收国外模式为主^[49-53]。中国自行研发的模式则以GRAPES为代表^[54-55]。目前NWP整体水平与欧美等发达国家还存在一定的差距。但中国QPF预报水平逐年提升、空间分辨率越来越高，有限区域细网格业务化模式网格距已达5 km左右。随着气象预报服务向精细化方向发展，国内流域气象或水文部门大多已建立了7 d以内数值模式与人工订正相融合的定量降水预报业务，长江流域则将定量降水常态化预报时效扩展到了10 d。

1.2.4 延伸期降水预报

延伸期预报（一般为10~30 d）作为现有中期预报的延伸，衔接了现有天气预报（≤10 d）和气候预测（≥30 d）之间的时间缝隙，开始受到了越来越多的关注。延伸期预报困难的原因在于其预报

时效超越了确定性预报的理论上限（2周左右），而预报对象的时间尺度又小于气候预测的月、季时间尺度^[56-58]。目前，大气季节内振荡（ISO）、MJO（Madden-Julian Oscillation）、CGT（Circum Global Teleconnection）、SCGT（Southern Circum Global）等低频信号是10~30 d延伸期天气的主要可预报性来源，在此基础上借助动力模式（包含集合数值模式、可预报分量提取、相似-动力、动力-统计等方法）、经典统计和大数据等方法来实现对延伸期天气的预报^[59-73]。

随着研究和实践的深入，延伸期的降水预报从最初的降水趋势预报逐渐向降水过程预报、逐日雨量预报发展^[58,73-74]。针对长江流域延伸期的降水预报，长江水利委员会通过与高校合作研究，开展了延伸期面雨量过程预报（一般为10~20 d）试验，并直接纳入长江防汛会商平台供决策参考^[75]。长江流域气象中心基于NCEP_CFSv2模式降尺度方法，L-J分型预报方法和MJO组合相似预报方法，开展了长江流域站点降水过程及延伸期逐日雨量集合预报研究并已相继投入业务应用。

1.2.5 基于气候模式的旱涝趋势预测

利用气候模式开展气候预测，是当前发达国家的主流和国际上的发展方向，目前主要是在动力气候模式输出产品的基础上采取统计降尺度方法、多模式集成、动力-统计相结合及集合概率预报等方法实现气候趋势预测^[58,78-86]。通过模式后处理，基于动力-统计相结合的预报方法建立的动力与统计集成的季节降水预测系统（FODAS），及基于模式降尺度和集合预报建立的多模式解释应用集成预报系统（MODES），目前已是气象局气候预测客观化预测方法的主要组成，成为汛期降水预测的重要参考^[87-88]。

长江流域气象中心为开展长江流域汛期旱涝趋势以及三峡水库安全蓄水的各关键期（蓄水期、供水期、消落期、汛期）趋势预测，目前使用的方法主要包括：基于数值模式及解释应用方法中的动力与统计相结合的预测方法，多模式解释应用方法（EOF分析迭代、BP典型相关、奇异值分解、人工神经网络），及算术平均、权重、区域最优等多种定量预测结果集成方法。而常规物理统计预测方法中的气候特征相似合成法、要素变化趋势分析法、突变检验方法（M-K检验、滑动T检验）、相关分析、正交函数分解方法、聚类分析方法、小波分析方法、最优子集法等多种方法，也已先后应用于长江流域月-季节-关键期降水趋势及流域面雨量预测研究^[89-91]。另外，长江水利委员会也引进区域气候模式RegCM4，针对长江流域的月、季时间尺度的降雨量来进行预测应用探讨^[92]。

1.3 洪水预报技术在流域业务中的应用

洪水预报就是根据掌握的信息（测验或分析预测的信息）对未来一定时期内洪水要素的状态做出定量或定性的预测，是水文科学的重要组成部分，也是一项重要的防洪减灾非工程措施^[1, 93]。在人类长期与洪水灾害斗争的客观需求及推动下，洪水预报科学日渐受到普遍的重视和关注，并逐步发展起来。中国是一个洪涝灾害频发的国家，在实际工作中，特别是流域防洪减灾中，洪水预报是调度决策的重要依据，能帮助人类有效地防御洪水、减少洪灾损失、更好地控制和利用水资源，而发布的洪水预报将在很短的时间内得到检验和验证。因此，洪水预报是一项理论性强、应用要求高的工作。

20世纪30—40年代，随着Sherman单位线（1932年）、Horton均值包气带产流理论（1935年）、马斯京根（Muskingum）洪水演算方法（1938年）等理论的提出及不断成熟，为洪水预报的发展奠定了基础；20世纪50—60年代，研究人员逐步重视对水文现象物理机制的认识，为经验性洪水预报方法和各种水文预报模型提供了理论基础，这个时期通过学习、吸收原苏联和美国的洪水预报方法，奠定了中国洪水预报的基础；20世纪70—80年代，流域水文模型的研究快速发展并取得了丰硕的成果，美国萨克拉门托（Sacramento）河流预报中心模型、日本水箱（TANK）模型、意大利约束系统（CLS）模型和中国赵人俊教授等研制的新安江模型均是其中的杰出代表；20世纪90年代以来，随着计算机、RS、GIS等技术在水文科学的应用及数值降雨预报模式、陆面模式、分布式水文模型的发展，国内外在洪水预报模型和方法的研究及应用中取得了显著的进展^[94-101]。可以预见，随着相关理论和技术的不断进步，洪水预报将步入立足于传统方法与基于下垫面地理信息的分布式流域水文模拟相结合，水文学与水利学相结合，水文气象预报耦合的洪水预报阶段^[102]。

1.4 水文气象耦合技术在流域业务中的应用

数值天气预报模式与流域水文模型在时空分辨率上存在的差异，制约了天气预报模式预报结果应用的进一步发展。为了有效地提高定量降水估算预报产品在水文预报中的应用，国内外学者开始从“雷达资料同化+模式嵌套+高分辨的区域数值模式+动力释用技术”的角度，全面、系统地开展数值天气模式与流域水文模型的尺度匹配方法研究：在观测降水上基于新一代多普勒雷达探测技术和雨量计实测资料，采用卡尔曼滤波、最优插值、变分、统计权重等多种校正方法，研发高分辨的定量降水估算校正新技术；在数值

模式预报降水上通过资料同化、模式嵌套、动力释用等技术缩小天气模式与水文模型网格尺度的差异，发展实时洪水预报中水文气象耦合的降尺度技术，为流域水文气象耦合预报奠定基础^[103-105]。

1.4.1 雷达定量降水估算与洪水预报的耦合

为了将雷达测雨资料用于洪水预报预警，国内外学者相继展开了相关研究。如美国已经建立了由多探测器降水估算技术和人机交互雨量订正技术共同构成的定量估算降水业务应用系统，并和水文预报模型结合，应用在山洪指导系统（FFGS）和美国国家气象局河流预报系统（NWSRFS）中。英国气象局开发的水文雷达系统（HYRAD）和河流预报系统（RFFS）共同组成了实时降水与河流预报系统，集成了雷达-雨量计估算面雨量和流域雷达降水预报以及水文预报的研究成果，目前RFFS与HYRAD已经在泰晤士流域等几个洪水预报警报中心进行日常业务应用^[8]。国内有关学者也开始了定量降水估算和洪水预报耦合技术的研究探讨，研究表明应用天气雷达估算降雨技术来进行水文预报，能有效提高水文模型的模拟精度^[9-14]。

1.4.2 模式预报降水与洪水预报的耦合

预见期内的降水量直接影响着洪水预报的精度，预见期愈长，预见期内的降雨对预报值影响愈大，为此预见期内的降雨与洪水预报耦合技术也逐步受到了广大水文和气象科技工作者的关注。目前随着数值预报理论与方法的飞跃发展，数值预报现已成为暴雨预报实现定点、定时和定量的关键手段，为水文模型预见期降水的预报提供了强有力的支撑。目前定量降水预报应用于水文预报模型是被水文气象学界普遍认同的发展方向之一，也是目前研究的热点、难点。对于预见期降雨与洪水预报耦合的研究，水利部、中国气象局、武汉大学等以及国内外相关学者已开展过相关试验和研究，结果表明：相对于未考虑预见期降雨，考虑预见期内的降雨对洪水预报结果提高具有明显的优势，能有效延长水文预见期，提高水文预报精度；将降水集合预报产品引入水文预报领域，则进一步拓展了水文不确定性预报的新方法，能将单一的确定性预报转化为可能发生范围的预报，获取更多的水文预报信息，提高了水文预报结果的可靠性，能更好地满足防洪减灾对风险信息的需求^[22, 26-27, 105-109]。

1.5 水文气象服务

目前中国境内的水文气象服务主要包括两类：一是面向流域管理机构和地方政府的决策服务，重点围绕大江大河防汛抗旱、山洪地质灾害中小河流风险预警；二是面向水利水电工程的水资源优化调度专业服务。

大江大河的防汛抗旱，在各地流域气象中心成立之前，气象部门尚未建立规范性的业务服务产品和相应的业务系统，通常是在与水利部门会商时提供的临时性服务，与其他决策服务没有不同。近年来，随着流域业务的逐步规范，气象部门开始向流域管理机构和地方政府常态提供流域天气公报、流域重要气象报告、流域雨情快报、流域气候影响评价等服务产品，并逐步建立相应的业务平台。以长江流域气象中心为例，目前可提供长江流域21000多个国家以及区域气象站观测资料的共享和58部多普勒雷达的联合拼图，其提供的数值模式与人工订正融合的降水格点预报产品空间分辨率达到10 km，48 h内时间分辨率达到3 h，预报时效达到10 d。并在中国气象局的组织下，开发了集监测报警、预报订正、制作发布、检验评估为一体，能提供水雨情监测、定量降水估算、流域气候监测预报、上游洪水评估等多类业务产品制作与共享的长江流域气象服务综合业务平台，现已在全国各流域气象中心推广应用^[110-111]。而实时洪水预报系统的业务化应用多集中于水利部门，日本、美国、法国、英国等从20世纪50年代起，相继在本国的河流研制出具有自动化洪水预报、自动警报功能的水文自动测报系统。目前中国开发的洪水预报系统以水利部水文局开发的“中国洪水预报系统（CNFFS）”和长江委水文局开发的“WIS水文预报平台（WISHFS）”为代表，其中中国洪水预报系统以实时水情数据库为依托，以地理信息系统为平台，能方便地构建洪水预报方案，具有标准的、通用的预报模型方法库，可任意选择多模型、多方法制定预报方案，具有人工和自动优选结合的模型率定功能，具有定时预报和人机交互预报功能，可干预任何信息源和预报过程，具有全面完善的系统管理功能等，已在25个流域机构和省（市、区）的水文部门推广应用^[95]。国家气象中心、长江流域气象中心等国内气象部门，也开展了水文预报模型和水文气象耦合的实时洪水预报技术研发，长江流域水文气象实时预报系统等已开始试验性运行，这些系统多基于定量降雨估算（QPE）、定量降雨预报（QPF）、集合降水预报技术，并结合流域雷达定量降水估算、流域精细化面雨量预报、中尺度暴雨数值预报系统、流域洪涝预估模型来建设^[112]。

山洪地质灾害、中小河流洪水和城市内涝的风险预警，在中国气象局的组织下，自2011年起进行试验探索，到目前已经建立了较为完善的技术规范和技术方法，对风险普查、监测预警、风险评估、产品检验、效益评估进行了规范，明确了省市县业务分工和业务流程，规范了风险服务产品，建立了以SWAN为

代表的一体化平台^[113-114]。

水库优化调度专业气象服务，重点针对流域防洪调度汛、发电优化调度、船闸安全通航、工程安全生产，支持工程效益的最大化发挥。需要提供流域年度旱涝趋势预测、流域关键期定量降水预报预测、流域中短期精细化降水预报等信息，为年度、关键期调度方案和运行计划编制、调整以及实时工程调度优化利用洪水资源提供支持；提供实时气象信息保障，支持流域水资源调度合理运用气象预报；提供水利水电工程坝区及周边灾害性天气预警，支持工程调度、发电、通航等安全生产。目前国内比较成熟的流域服务业务系统有长江流域气象中心为三峡梯调通信中心气象台提供的气象业务系统，其为具备气象预报能力的单位应用气象数据开展水库优化调度提供了范例^[110-111]。而兴山古洞口水电站气象水文信息遥测及水库防洪调度系统的研发，涵盖小流域范围的水文气象监测、降水预报、洪水预报各个环节，则为小水电应用水文气象技术科学优化调度提供了全套解决方案^[115]。

2 未来流域水文气象业务发展展望

随着经济社会的发展和科学技术的不断提升，面向流域的水文气象学科发展和应用领域需求在不断扩展延伸，要求以当前防汛抗旱和水库调度为主的流域气象服务向更加准确和精细方向发展^[116]，要求水资源优化调度回应多部门、多行业对防汛、发电、通航、生态等的不同关切，而移动互联、云计算、大数据处理和数据挖掘、机器智能学习、虚拟可视化等信息新技术的快速发展和应用，也要求水资源的开发利用要应用信息化技术进行协同创新、信息共享、行业融合，为水资源的优化配置提供技术支撑。2017年，国家已针对长江流域各方需求出台了梯级水库群联合调度专项工作实施方案，水资源调度初步形成了多方兼顾、统筹协调、联合创新的发展态势^[117]。因此，未来流域水文气象应用服务的发展，应着重在以下几个方面开展研究：

1) 应用新技术开展行业数据的汇集共享

充分应用大数据、云计算技术，通过国家政府规划建设的数据统一开放平台，应用现代信息技术强化行业之间、部门之间的信息互联互通，将流域内不同层级、不同行政区域涉及的监测信息资源、产品信息资源共同分享及利用，实现气象、水情水文气象数据和与优化调度相关的航运、电力等行业数据的信息共享共用。

2) 加强气象预报与洪水预报集成耦合的技术研究

以提高预报精度和延长洪水预见期为目标，发展水文气象核心技术。综合应用短时临近预警技术、格

点预报技术, 结合数值模式、集合预报的最新进展, 实现监测外推、数值预报与人工订正的有效融合, 建立以面向任意分区、格点预报为主的流域精细化定量降水预报业务; 进一步研发用于实时水文预报的分布式、概念性水文模型, 耦合 QPE/QPF技术和确定性水文模型, 建立水文气象耦合模式预报系统, 开展水文概率预报研究; 强化现代信息技术的应用, 尝试应用大数据挖掘技术完善或重构水文气象预报模型、指标阈值等预报理论, 通过图像识别、聚类分析等大数据处理技术对预报理论进行数字化处理, 并利用机器学习技术的反馈优化形成全新智能预报系统。

3) 构建水旱灾害的智能化监测预警及雨洪资源应用气象辅助决策平台, 推进水利、气象等多部门的业务融合, 结合防汛、发电、通航、生态等需求, 深入挖掘行业共享数据的应用潜力, 围绕防汛抗旱、灾害风险预警、专业气象服务, 分类建立水旱灾害应对和雨洪资源调度应用气象辅助决策平台, 为出行行程、生产调度和防灾减灾资源调配提供智能可选、影响预估的气象辅助决策建议。

参考文献

- [1] 中国大百科全书编辑委员会. 中国大百科全书: 大气科学、海洋科学、水文科学卷. 北京: 中国大百科全书出版社, 1987.
- [2] 刘春霖. 关于水文气象学研究中的时空尺度问题. 气象科技, 1989, (2): 54-56.
- [3] 柳崇健. 水文气象学及其应用. 沙漠与绿洲气象, 1995, (6): 1-4.
- [4] A. N. 沃叶意柯夫. 世界气候与俄国气候. 1884.
- [5] Э. М. 奥里杰柯普. 河川流域表面蒸发. 1911.
- [6] Ferguson H L. Recollections of Hydrometeorology in CANADA's Meteorological Service Hydrometeorology Recollections. 2006.
- [7] 杨文峰, 周辉, 李明, 等. 水文气象预报研究述评. 陕西气象, 2007, 5: 14-18.
- [8] 陈金荣, 罗伯昆. 对水文气象预报的认识和实践. 人民长江, 1982, 6(6): 50-57.
- [9] 刘黎平, 钱永甫, 王致君. 双线偏振雷达在水文预报领域的应用—实时水文预报系统的研制. 高原气象, 1996, 15(4): 508-514.
- [10] 刘晓阳, 毛节泰, 李纪人, 等. 雷达估测降水模拟史灌河流域径流. 北京大学学报(S), 2002, 38(3): 342-349.
- [11] Ren L L, Li C H, Wang M R. Application of radar-measured rain data in hydrological processes modeling during intensified observation period of HUBEX. Advances in Atmospheric Sciences, 2003, 20(2): 205-212.
- [12] Chen Y B, Hu J Q, Yu J. A flash flood forecast model for the three gorges basin using GIS and remote sensing data. Weather Radar Information and Distributed Hydrological Modeling, Proceedings of symposium HS03 held during IUGG2003 at Sapporo, July 2003. IAHS Publ. no. 282, 2003: 282-287.
- [13] 李致家, 刘金涛. 雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应用. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 601-606.
- [14] 彭涛, 宋星原, 殷志远, 等. 雷达定量估算降水在水文模式汛期洪水预报中的应用试验. 气象, 2010, 36(12): 50-55.
- [15] 沈红, 安东升, 韩晓静. 云计算在水文气象业务中的应用. 气象水文海洋仪器, 2011, (4): 53-56.
- [16] 柳林, 全黎熙, 杨敏. 云计算与水文信息化. 海河水利, 2012, (6): 59-62.
- [17] 刘海燕, 刘晓民, 史宝会, 等. 基于SOA的云计算流域模拟模型集成架构的研究. 南水北调与水利科技, 2017, (3): 20-24.
- [18] 雷成茂, 郭银, 杨国德, 等. 利用云计算技术构建水文大数据平台应用前景探讨. 山西水利, 2016, (11): 34-35.
- [19] 彭震. 利用大数据云计算提升贵州省防汛抗旱指挥决策支撑系统. 中国防汛抗旱, 2016, (3): 16-17.
- [20] 江竹, 宋文武. 基于机器学习的水位流量关系模型参数估计. 水文, 2013, (1): 74-78.
- [21] 陈祥华, 李培蓄. 流域洪水预报系统及其关键问题研究. 水利科技与经济, 2005, 11(2): 93-96.
- [22] 杨文发, 李春龙. 降水预报与洪水预报耦合应用初探. 水资源调查, 2003, 24(1): 38-40.
- [23] 赵琳娜, 包红军, 田付友, 等. 水文气象研究进展. 气象, 2012, 38(2): 147-154.
- [24] 徐晶, 姚学祥. 流域面雨量估算技术综述. 气象, 2007, 33(7): 15-21.
- [25] 高琦, 徐明, 李武阶, 等. 我国面雨量研究及业务应用进展. 气象科技进展, 2014, 4(2): 66-69.
- [26] 李超群, 郭生练, 张洪刚. 基于短期定量降水预报的隔河岩洪水预报研究. 水电能源科学, 2006, 24(4): 31-35.
- [27] 崔春光, 彭涛, 沈铁元, 等. 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. 气象, 2010, 36(12): 56-61.
- [28] 葛文波, 欧阳德和. 葛洲坝电厂气象水文预报方法及应用. 水电与新能源, 2000, (1): 7-9.
- [29] 章施. 1991—1994年中国水文-气象学进展. 沙漠与绿洲气象, 1995, (2): 1-3.
- [30] 沈滢英, 杨文发. 三峡工程大江截流水文气象预报. 人民长江, 1999, (9): 3-5.
- [31] 徐晶, 林建, 姚学祥, 等. 七大江河流域面雨量计算方法及应用. 气象, 2001, (11): 13-16.
- [32] 杨扬, 张建云, 戚建国, 等. 雷达测雨及其在水文应用中的回顾及展望. 水科学进展, 2003, 11(1): 92-98.
- [33] 万玉发, 吴翠红, 金鸿祥. 基于准同雨团样本概念雷达和雨量计的实时同步结合方法. 气象学报, 2008, 66(1): 262-273.
- [34] 尹忠海, 张沛源. 利用卡尔曼滤波校准方法估算区域降水量. 应用气象学报, 2005, 16(2): 213-219.
- [35] 李建通, 杨维生. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨. 大气科学, 2000, 24(2): 263-270.
- [36] 张亚萍, 程明虎, 等. 天气雷达回波运动场估测及其在降水临近预报中的应用. 气象学报, 2006, 64(5): 631-646.
- [37] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [38] 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等. 强对流天气监测预报预警技术进展. 应用气象学报, 2015, (6): 641-657.
- [39] Wilson J W, Feng Y, Chen M, et al. Nowcasting challenges during the Beijing Olympics: successes, failures, and implications for future nowcasting systems. Weather and Forecasting, 2010, 25: 1691-1714.
- [40] 韩雷, 王洪庆, 林隐静. 光流法在强对流天气临近预报中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 2008, (5): 751-755.
- [41] 曹春燕, 陈元昭, 刘东华, 等. 光流法及其在临近预报中的应用. 气象学报, 2015, (3): 471-480.
- [42] 漆梁波. 高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展. 气象, 2015, 41(6): 661-673.
- [43] 李泽椿, 毕宝贵, 金荣花, 等. 近10年中国现代天气预报的发展与应用. 气象学报, 2014, 72(6): 1069-1078.
- [44] 雷蕾, 孙继松, 王国荣, 等. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验. 气象学报, 2012, 70(4): 752-765.
- [45] 戴建华, 茅懋, 邵玲玲, 等. 强对流天气预报检验新方法在上海的应用尝试. 气象科技进展, 2013, 3(3): 40-45.
- [46] 程丛兰, 陈明轩, 王建捷, 等. 基于雷达外推临近预报和中尺度数值预报融合技术的短时定量降水预报试验. 气象学报, 2013, 71(3): 397-415.
- [47] 胡胜, 罗聪, 黄晓梅, 等. 基于雷达外推和中尺度数值模式的定量降水预报的对比分析. 气象, 2012, (3): 274-280.
- [48] Kalnay E. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press, 2003.
- [49] 薛纪善. 和预报员谈数值预报. 气象, 2007, 33(8): 3-11.
- [50] 陈起英, 姚明明, 王雨. 国家气象中心新一代业务中期预报模式T213L31的主要特点. 气象, 2004, 30(10): 16-21.
- [51] 管成功, 陈起英, 佟华, 等. T639 L60全球中期预报系统预报试验和性能评估. 气象, 2008, (6): 11-16.
- [52] 宇如聪, 薛纪善, 徐幼平. AREMS中尺度暴雨数值预报模式系统. 北京: 气象出版社, 2004: 3-7.
- [53] 皇甫雪官. 国家气象中心集合数值预报检验评价. 应用气象学报, 2002, (1): 29-36.
- [54] 薛纪善. 我国新世纪初的数值预报科技创新研究. 应用气象学

- 报, 2006, 17(5): 602-610.
- [55] 陈德辉, 薛纪善, 沈学顺, 等. 我国自主研发的全球/区域一体化数值天气预报系统GRAPES的应用与展望. 中国工程科学, 2012, (9): 46-54.
- [56] 王绍武. 短期气候预测研究的历史及现状. 北京: 气象出版社, 1996.
- [57] 丑纪范, 郑志海, 孙树鹏. 10~30 d 延伸期数值天气预报的策略思考——直面混沌. 气象科学, 2010, (5): 569-573.
- [58] 贾小龙, 陈丽娟, 高辉, 等. 我国短期气候预测技术进展. 应用气象学报, 2013, (6): 641-655.
- [59] 丁一汇, 梁萍. 基于MJO的延伸预报. 气象, 2010, (7): 111-122.
- [60] 梁萍, 丁一汇. 基于季节内振荡的延伸预报试验. 大气科学, 2012, (1): 102-116.
- [61] 孙国武, 信飞, 孔春燕, 等. 大气低频振荡与延伸期预报. 高原气象, 2010, (5): 1142-1147.
- [62] Wheeler M C, Hendon H H. An all-season real time multivariate MJO Index: development of an index for monitoring and prediction. Monthly Weather Review, 2004, 132: 1917-1932.
- [63] 贾小龙, 袁媛, 任福民, 等. 热带大气季节内振荡 (MJO) 的实时监测预测业务. 气象, 2012, 38(4): 457-463.
- [64] Waliser D, Weickmann K, Dole R, et al. The Experimental MJO Prediction Project. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 87(4): 425-431.
- [65] 琚建华, 赵尔旭. 东亚夏季风区的低频振荡对长江中下游旱涝的影响. 热带气象学报, 2005, 21(2): 163-171.
- [66] 黄静, 朱乾根. 与长江流域旱涝相联系的全球低频环流场. 热带气象学报, 1997, 13(2): 146-157.
- [67] 魏凤英. 我国短期气候预测的物理基础及其预测思路. 应用气象学报, 2011, 22(1): 1-11.
- [68] 封国林, 赵俊虎, 支蓉, 等. 动力-统计客观定量化汛期降水预测研究新进展. 应用气象学报, 2013, 24 (6): 656-665.
- [69] 鲍名, 倪允琪, 丑纪范. 相似-动力模式的月平均环流预报试验. 科学通报, 2004, 49(11): 1112-1115.
- [70] 任宏利, 张培群, 李维京, 等. 基于多个参考态更新的动力相似预报方法及应用. 物理学报, 2006, 55(8): 4388-4396.
- [71] 郑志海, 任宏利, 黄建乎. 基于季节气候可预报分量的相似误差订正方法和数值实验. 物理学报, 2009, 58(10): 7359-7367.
- [72] 朱玉祥, 黄嘉佑, 丁一汇. 统计方法在数值模式中应用的若干新进展. 气象, 2016(4): 456-465.
- [73] 杨秋明. 10~30 d 延伸期天气预报方法研究进展与展望. 地球科学进展, 2015, 30(9): 970-984.
- [74] 何金海, 梁萍, 孙国武. 延伸期预报的思考及其应用研究进展. 气象科技进展, 2013, 3(1): 11-17.
- [75] 邱辉, 曹红伟, 李春龙. 长江中上游延伸期降水时空投影法预报模型研究. 人民长江, 2016, (7): 28-33.
- [76] 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(3): 320-329.
- [77] 丁一汇, 李清泉, 李维京. 中国业务动力季节预报的进展. 气象学报, 2004, 62(5): 598-612.
- [78] Cane M A, Zebiak S E, Dolan S C. Experimental forecast of El Nino. Nature, 1986, 321: 827-832.
- [79] Barnett P, Bengtsson L, Arpe K, et al. Forecasting global ENSO-related climate anomalies. Tellus, 1994, 46A: 381-397.
- [80] Hunt B G, Zebiak S E, Cane M A. Experimental predictions of climatic variability for lead times of twelve months. International Journal of Climatology, 1994, 14(5): 507-526.
- [81] Palmer T N, Anderson D L T. The prospects for seasonal forecasting—a review paper. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1994, 120(518): 755-793.
- [82] Mason S J, Goddard L, Graham N E, et al. The IR1 seasonal climate prediction system and the 1997/98 El Niño event. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, (80): 1853-1873.
- [83] Ji M, Kumar A, Leetmaa A. A Multiseason climate forecast system at the National Meteorological Center. Bulletin of the American Meteorological Society, 1994, 75: 569-577.
- [84] Kang L S, Park C K. A KMA/SNU dynamical seasonal prediction system. Proceedings of Second International Symposium on Physico-Mathematical Problems Related to Climate Modeling and Prediction. Shanghai: 22-23 September, 2002.
- [85] Kusunoki S, Sugi M, Kitoh A, et al. Atmospheric seasonal predictability experiments by the JMA AGCM. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2001, (79): 1183-1206.
- [86] Derome J, Brunet G, Plante A, et al. Seasonal predictions based on two dynamical models. Atmosphere Ocean, 2001, 39(4): 485-501.
- [87] 国家气候中心. 探索实现动力与统计的内结合提升短期气候预测准确率——“动力-统计集成的季节气候预测系统 (FODAS) 应用与推广”项目成果. 科技成果管理与研究, 2016, (3): 85-87.
- [88] 刘长征, 杜良敏, 柯宗建. 国家气候中心多模式解释应用集成预测. 应用气象学报, 2013, (6): 677-685.
- [89] 张礼平, 丁一汇, 李清泉. 遗传神经网络释用气候模式预测产品的试验研究. 气候与环境研究, 2008, (5): 681-687.
- [90] 杜良敏, 柯宗建, 刘长征. 基于聚类分区的中国夏季降水预测模型. 气象, 2016, (1): 89-96.
- [91] 张礼平, 张乐飞. 应用MJO制作长江流域月降水预测的试验研究. 气象, 2013, (9): 1217-1220.
- [92] 张录军, 王乐, 邢雯慧. 分辨率和陆面方案对长江流域短期气候预测影响. 水科学进展, 2016, (6): 800-809.
- [93] 张建云. 中国水文预报技术发展的回顾与思考. 水科学进展, 2010, 21(4): 435-443.
- [94] 芮孝芳. 水文学原理. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [95] 刘志雨. 我国洪水预报技术研究进展与展望. 中国防汛抗旱, 2009, (5): 13-16.
- [96] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型. 北京: 水利电力出版社, 1984: 1-128.
- [97] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 基于DEM的分布式流域水文物理模型. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(6): 1-5.
- [98] 夏军, 王刚胜, 吕爱锋, 等. 分布式时变增益流域水循环模拟. 地理学报, 2003, 58(5): 789-796.
- [99] 郭太英. 基于DEM的分布式水文模型的研究与应用. 大连: 大连理工大学, 2005.
- [100] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [101] 郑红星, 刘昌明, 王中根, 等. 黄河典型流域分布式水文过程模拟. 地理研究, 2004, 23(4): 447-454.
- [102] 夏军, 左其亭. 国际水文科学研究的新进展. 地球科学进展, 2006, 21(3): 256-261.
- [103] 邓伟涛. 利用CAM-RegCM嵌套模式预测我国夏季降水异常. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [104] 殷志远, 赖安伟, 公颖, 等. 气象水文耦合中降尺度方法研究进展. 暴雨灾害, 2010, 29(1): 89-95.
- [105] 《长江防洪系统实时调度研究》编辑委员会. 长江防洪系统实时调度研究. 北京: 中国水利电力出版社, 1997: 82-93.
- [106] 王庆斋, 刘晓伟, 许珂艳. 黄河小花间暴雨洪水预报耦合技术研究. 人民黄河, 2003, 25(2): 17-19.
- [107] Bao H J, Zhao L N, He Y. Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinjiang model for flood forecast. Advances in Geosciences, 2011, 29(6): 61-67.
- [108] 彭涛, 李俊, 殷志远, 等. 基于集合降水预报产品的汛期洪水预报试验. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 274-278.
- [109] 包红军, 赵琳娜. 基于集合预报的淮河流域洪水预报研究. 水利学报, 2012, 43(1): 146-154.
- [110] 王宏记, 杨代才. 基于CIMISS的长江流域气象水文信息共享系统设计与实现研究. 安徽农业科学, 2014, (32): 11565-11570.
- [111] 杨代才, 秦运龙, 杨维发, 等. 长江流域雨情监测分析系统及其关键技术. 气象科技, 2014, (5): 811-817.
- [112] 崔春光, 赵玉春, 彭涛, 等. 长江流域气象-水文暴雨洪涝预警技术系统研究. 中国工程科学, 2012, (10): 27-32.
- [113] 周月华, 田红, 李兰, 等. 气象灾害风险预警服务业务技术指南丛书: 暴雨诱发的中小河流洪水风险预警服务业务技术指南. 北京: 气象出版社, 2015.
- [114] 张容焱, 章国材, 章毅之, 等. 气象灾害风险预警服务业务技术指南丛书: 暴雨诱发的山洪风险预警服务业务技术指南. 北京: 气象出版社, 2015.
- [115] 唐军, 王俊超, 彭涛, 等. 山区小流域电站雨情遥测及水库防洪调度系统. 计算机技术与发展, 2014, (9): 191-193.
- [116] 郑治斌, 崔新强, 田刚. 长江经济带气象保障问题分析与机制创新研究. 人民长江, 2017, (1): 1-5.
- [117] 国家防汛抗旱总指挥部. 关于2017年长江上中游水库群联合调度方案的批复(Z). 2017-5-27.