

文章编号:0559-9350(2018)01-0009-10

变化环境下气象水文预报研究进展

雷晓辉¹, 王浩¹, 廖卫红¹, 杨明祥¹, 桂梓玲^{1,2}

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 随着全球气候变化、下垫面改变及高强度人类活动的不断加剧, 流域降水、蒸发、径流等气象水文要素都受到直接性的影响, 水文序列的一致性假设不复存在。在变化环境下, 传统径流预报方法适用性逐步变差, 从而对气象水文的精准预报带来挑战。本文分别从气象水文预报的各个环节——多源降水数据融合、数值天气预报、流域水文模型、参数率定、数据同化、集合预报等方面综述了变化环境下的气象水文预报的研究进展。可以看到, 国内外学者围绕上述技术都开展了大量研究, 并取得了大量成果。未来针对变化环境下气象水文预报研究, 将主要围绕以下方向开展: (1) 落地和预报降水精度及时空分辨率的进一步提高; (2) 水文模型结构的改进及不确定性分析; (3) 水文预报误差的描述方法及其可靠性。

关键词: 非一致性; 气象水文预报; 数值天气预报; 流域水文模型; 参数率定; 数据同化; 集合预报

中图分类号: P338

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170750

1 研究背景

水文预报就是根据已知的信息(测验或分析的信息)对未来一定时期内水文要素的状态做出定性或定量的预测^[1]。近百年来, 受到气候变化、自然变迁(自然)和人为活动(社会)等综合影响, 全球大气、陆表生境发生了重大变化。气候变暖、厄尔尼诺等现象导致流域降水量和蒸发量发生显著改变, 洪涝、干旱等极端事件不断凸显。人为活动也导致地表下垫面发生较大改变, 进而导致流域河川径流发生突变。此外, 水库工程和调水工程的建设也在影响着水资源分布, 大大改变了水循环的特点, 导致水文序列在自然形成的固有规律下, 又出现了新的特征。Milly等^[2]在气候变化和人类活动的影响下, 基于一致性假设的水文概率分布估计理论和方法已经无法帮助人们正确揭示变化环境下水资源和洪水演变的长期规律。具体而言, 气候变化下天气系统更不稳定, 降水、蒸发等气象要素的时空分布及模拟预测不确定性更高, 且洪旱水文极值事件频发^[3]; 高强度人类活动又影响着流域下垫面和产汇流过程, 使得水文模型结构及参数在水文模拟预测中的不确定性也越来越高; 综上, 水文预报的难度加大, 现有或即将开发建设的水利工程及其运行调度等面临设计频率失真, 乃至决策判断失误等问题^[4]。

如何提高变化环境下气象水文的预报精度和延长其有效预见期, 成为困扰气象与水文人员的难题和挑战。首先, 针对落地降水的多源数据融合、针对预报降水的数值天气预报模型都是从源头上提高预报精度的重要方法。在水文预报模型层面, 不仅需深入研究高强度人类活动对流域洪水的影

收稿日期: 2017-07-31; 网络出版日期: 2018-01-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20180124.1524.006.html>

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFB0203104); 国家自然科学基金项目(51709273)

作者简介: 雷晓辉(1974-), 男, 陕西澄城人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源、水库调度及水力控制等研究。

E-mail: lxh@iwhr.com

通讯作者: 廖卫红(1986-), 女, 湖北荆州人, 博士, 高级工程师, 主要从事分布式水文模拟、洪水预报等研究。

E-mail: behellen@163.com

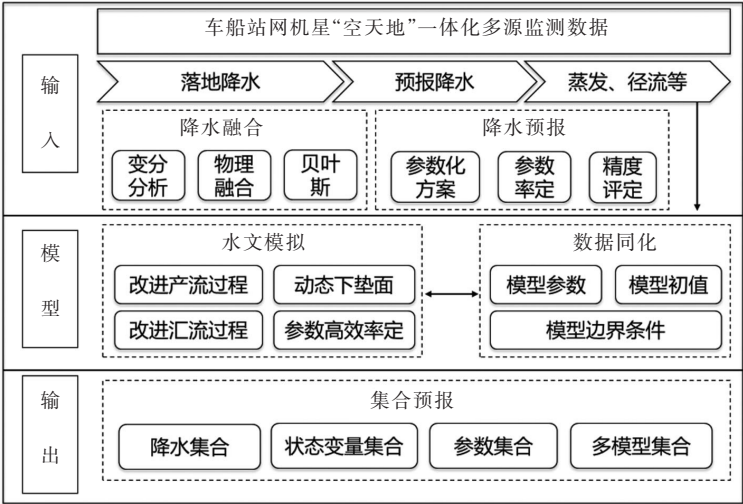


图1 变化环境下气象水文预报关键技术

响机制以改进水文模型结构，还应分析模型参数的不确定性，研发出更能考虑参数不确定性的快速高效的参数率定算法，增加水文模型适用性。在实时预报过程中利用数据同化技术还可进一步对水文模型预报变量和参数进行动态校正，进一步提高预报精度。在模型输出方面，采用径流集合预报技术以及集合预报结果后处理技术，相比传统的单值预报，能获得总体最优、结果更为可靠的集合预报结果。上述技术及其在水文实时预报中的作用详见图1所示。本文将分别对这些技术的发展及应用进行综述。中长期尺度下水文预报同样也受变化环境的影响，但由于中长期水文预报主要基于统计模型实现，故而变化环境下中长期水文预报主要侧重于分析长系列径流序列的变化规律以及改进统计算法等方向，本文暂不对此进行讨论。

2 多源降水数据融合技术

降水是水文模型中最重要的输入。降水具有显著的时空变异性，传统地面雨量计观测的空间局限性，成为水文气象研究中重要的不确定性来源^[5]。降水监测数据一般有三大来源：地面观测、雷达估测及卫星观测反演，其主要优缺点归纳如表1^[6]所示。

表1 三种主要降水观测技术的优缺点(基于刘元波等^[6]修改)

观测类型	仪器类型	主要优缺点
地表观测	雨量计	测量累计降水量及雨滴谱，易于操作；定点测量，精度依存于降水类型，缺乏降雨类型的辅助信息
	地基雷达	测量极化和多普勒频谱；测量准确性取决于校准，测量空间范围有限
空间卫星观测	可见光/红外传感器	时空分辨率较高；属于间接估算
	被动微波传感器	测量范围大，标定较准确，频段选择相当灵活、易于操作，亮温对水凝物敏感
	主动微波传感器	标定相当准确，测量反射率；扫描宽度窄，试验性强

不同来源的降雨观测数据均有自身的误差特征及其观测代表性时空尺度，合理利用多源观测信息是解决水文研究中普遍面临的时空变异过程与观测-模拟不确定性问题的潜在有效途径^[7]。因此，近年来多源数据观测信息综合利用与同化融合技术开发已发展成为国际水文研究中的关注热点。自1970年代，国内外就开展了雷达-雨量计联合测雨的研究；后来，有关台站-卫星降水联合估计降水分布的研究开始活跃。归纳起来，常见的数据融合方法就是依靠地面雨量观测资料来校正遥感降雨估测结果，采用诸如协同克里金方法、概率匹配方法、客观统计分析法、贝叶斯校正方法、卡尔曼滤波方法、最优插值-概率匹配方法、变分方法、地理加权回归等方法融合地面降雨观测信息，以降低遥感估测降雨的误差^[8]。这类方法的核心均是基于加权平均、回归，分析、滤波分析等数学思想，

相对直接地对遥感降雨观测误差进行处理,并且在降水信息融合研究中取得了不少成果。如:Gerstner等^[9]通过订正后的客观统计分析法得到了实时降水融合资料,并且融合后降水的均方根误差降低了59%;中国国家气象信息中心采用概率密度函数与最优插值两步订正法建立了中国区域逐日0.25°地面台站与CMORPH卫星降水资料融合的概念模型^[10]。胡庆芳^[8]首次引入地理加权回归方法建立了赣江流域降水空间估计模型,改进了传统的空间插值中降水的局部空间自相关性以及与地理信息互相关性的定量描述方式。尽管降水融合的表达方式不同,假设条件有别,但基本思路均是:需要首先构建降水量的背景场(或初始场),然后采用地面实测降水信息在假设的优化准则下对背景场进行修正,表达降水细节信息,最终得到一个降水估计场(或分析场),用来代表融合降水的真实场。

由于降水本身存在极大的时空变异性,多源降水融合方法的难点在于如何高效地识别不同来源相对有效的降水信息,同时能够量化各个来源数据估测随时空尺度及位置的变化规律^[11]。目前围绕多源降雨观测的技术开发、定量评估、综合应用、信息融合等一系列关键问题,国内外广大学者仍在积极探索;结合多源降雨观测技术在我国水文研究中发展与应用的实际情况,对目前相关研究中存在的代表性问题概括如下:(1)对与流域暴雨-洪水响应密切相关的降雨小尺度时空变异规律研究不够,尤其缺乏在我国典型山区流域的系统观测与定量分析;(2)我国山区流域雷达定量降雨估计算法的研究相对不足,尤其缺乏雷达定量降雨产品在流域高分辨率分布式水文模拟中的应用检验;(3)在具有复杂水文气候条件与下垫面条件的我国大型流域,缺乏对最新卫星遥感降雨产品在区域水文应用中的全面评估与长期检验;(4)多源降雨观测信息融合技术还有待进一步深入探讨^[12],需要发展能够明确地定量考虑降雨观测信息不确定性的融合分析框架。总的来看,基于多源信息进行降水空间估计在理论和方法上均具有很大的探索空间,尤其在复杂地形、地面资料匮乏地区仍是一个开放性的研究课题。

3 降水数值预报技术

提高既往降水观测值的时空分辨率和精度,可提高水文模型对历史洪水场次的模拟精度,并据此率定出更为准确的模型参数。但要提高在预见期内水文预报的精度,还需借助于一定时段的未来降水预报信息。而随着水文模型的高速发展,降水预报的空间和时间分辨率分别达到10 km和1 h才能满足洪水预报的要求,传统等级的降水预报已经无法满足需求,取而代之的是高时空分辨率、定量化、准确的降水预报,即定量降水预报(Quantitative Precipitation Forecasts, QPF)业务应需而生。

目前,定量降水预报主要依赖于数值天气预报模式。数值天气预报的概念早在100多年前已被提出,但真正得到快速发展却是在近二十年^[13]。较为成熟的数值天气预报模型有:美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)用于业务预报的ETA模式^[14]、美国宾夕法尼亚大学和国家大气研究中心(Pennsylvania State University/National Center for Atmospheric Research, PSU/NCAR)合作研制的MM5(Mesoscale Model 5)模式^[15]、科罗拉多州立大学(Colorado State University, CSU)研发的区域大气模拟系统——RAMS(Regional Atmospheric Modeling System)^[16]等。为了整合各方最新的研究成果,美国多所研究机构共同开发了新一代高分辨率数值天气预报模式——WRF模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF Model)^[17]。WRF模式包含了一系列物理过程:云微物理、积云、边界层等,模式按照区域情况分类,研发并内嵌了多套参数化方案,即为各物理过程配置好多套不同取值的参数集,从而可将成百上千各参数的配置简化为若干套参数化方案的配置^[18]。

WRF模式已广泛应用于实时水文预报中,如Tang^[19]验证了WRF模式与VIC的单向耦合在蒸发、土壤含水量、径流以及基流模拟预报中的有效性,其中径流模拟误差主要来源于WRF的降水模拟;郝春沅等^[20]利用WRF模式单向驱动WEP分布式水文模型,对降雨及径流模拟良好;高冰等^[21]采用WRF耦合分布式水文模型GBHM,对三峡入库洪水进行了预报,结果具有一定精度且明显延长径流预见期。随着WRF模式在水文预报中的逐步应用,为提高预报精度,学者们对WRF模式中不同参数化方案的应用效果也开展了大量研究,如Clark Pennelly等^[22]通过对比和分析,得到Kain-Fritsch微物

理方案和 explicit 积云对流参数化方案的组合表现最好的结论；史金丽^[23]利用 WRF 模式中 7 种不同的云微物理参数化方案和 2 种积云对流参数化方案组成 14 组对比实验，最终发现 WSM5 & KF 方案和 WSM6 & BMJ 方案对典型降水模拟效果较好。为进一步提高 WRF 模式的适用性，Yang 等^[24]提出了模式的参数化方案动态优选技术，可根据历史暴雨应用经验对各物理过程的参数化方案进行配置，能明显提高降水预报精度。此外，通过不断引入的观测数据对数值预报模式的状态变量进行同化也是提高模式预报精度的一个重要手段^[25]，数值天气预报模式中数据同化技术主要集中在变分同化与集合滤波方面。

4 人类活动影响下流域水文模拟

随着人类活动影响的不断深入，流域的产汇流规律也不断发生变化，采用固定模式的水文模型、历史水文资料率定的参数已很难适用变化情况的模拟。尤其是人类活动过程本身就带有较大随机性，如流域下垫面土地利用的变化、流域中水库的调蓄过程等，更进一步增进了流域产汇流模拟的难度。另一方面，变化环境下流域产汇流参数也会不断发生变化，但现有参数测量水平又难以匹配和适应这种快速变化，因而变化环境对水文模型中的产汇流参数率定也提出了新的要求。

4.1 流域水文模型及其改进

4.1.1 分布式水文模型 流域水文模型的输入是流域上各点的降水过程，输出是流域出口断面的流量或水位过程，因此是一种输入具有分散性、输出具有集总性的模型。由于基于观测资料的经验统计方法常常平均了流域径流过程，因而概念性模型的应用受到了较大的限制^[26]。分布式水文模型将整个流域离散成若干较小的单元，这与真实自然界中下垫面和降水的时空分布不均匀性更加符合，能更好体现流域产汇流的非线性特征，且分布式模型可有效利用遥感、雷达和 GIS 技术等多元输入数据，更好地考虑气候、地形、土壤和植被等元素的空间变异性^[27-28]。

1969 年，Freeze 最早提出了流域分布式水文模型的概念和框架，之后伴随计算机编程技术、遥感及地理信息系统技术的快速发展，各类分布式水文模型相继问世，常用的模型有：MIKE-SHE^[29]，SWAT^[30]，TOPMODEL^[31]，HEC-HMS^[32]等。我国学者对分布式水文模型的研究起步较晚，但也研发了大量适用于国内情况的分布式水文模型。如贾仰文等^[33]研发的 WEP 模型，杨大文等^[34]研发的 GBHM 模型，郭生练等^[35]提出的流域分布式水文模型，夏军等^[36]开发的时变增益的半分布式水文模型，以及雷晓辉等^[37-38]开发的 EasyDHM 模型。这些模型都是基于水文学的基本原理，差异主要反映在模型单元划分、对水文过程的描述以及模型求解方法等方面。

4.1.2 分布式水文模型的改进和完善 土地利用变化和人工调蓄水库等人类活动直接改变了流域蒸发散，产流过程中的截留、填洼、下渗和土壤蓄水能力，汇流过程中的地表糙率、地表蓄水量、河道汇水路径等因素及其反馈作用，使得流域的产汇流规律不断发生变化，水循环呈现出“自然-人工”二元特性^[2]，影响了流域水文预报模型和方法。

为分析变化环境下分布式水文模型的适应性，Ciaran Broderick 等^[39]分析了 6 种水文模型和 4 种模型平均方法对于差异气候下的可转移性；Kim 等^[40]提出了一种考虑气候变化、非一致性条件和季节变化的水文模型方法。基于分布式水文模型的优势，很多学者从人类活动影响土地利用等下垫面的角度出发，开展了土地利用变化条件下的分布式水文模拟，即从水文循环理论上提高模型模拟流域对土地利用变化响应的能力。如池宸星等^[41]提出利用基于 DEM 的分布式水文模拟技术，采用网格滞蓄的方法在子网格上体现人类活动引起的下垫面变化及其对产汇流的影响；Huang 等^[42]将流域划分为 6 种不同土地利用及覆被变化类型，分别考虑蒸发和下渗的差异，计算地表径流量和地下径流量，最终得到流域的水文过程。人类活动对水循环影响的另一个重要手段是兴建水利工程，包括拦蓄水量的水库、引走水量的引水工程、蓄滞洪区等。水利工程通过其调节作用，能改变天然来水的河流形态和时空分布，从而实现对洪水、水资源在时空上的再分配。大型水库的调度研究已经非常成熟^[43-44]。但流域中大量分布的小水库、塘坝准确位置及相关资料难以收集完整，水文模型中

对于小水库和塘坝对径流洪水的拦蓄、滞留作用一般不加考虑。但实际上,大批小型水库的蓄泄规律从总体上讲呈现“涨水段泄水,退水段蓄水”的统计规律,随着小型水库、塘坝的大量兴建,其对径流的影响日益增强,尤其对汛期洪水的形成和演进影响已不容忽视。Güntner A等^[45]提出了一种缺资料水库在分布式水文模型中的处理方法,依据库容对水库进行分类,将每类型水库看作一个整体;初京刚^[46]在 Güntner A方法的基础上对各类型水库的入流和出流计算过程进行了改进,精度得到了进一步提高。雷晓辉等^[47]建立了一套内嵌于分布式水文模型 EasyDHM 中的通用水利工程调度模块,并提出了“聚合水库”的概念和统计意义上聚合水库的防洪调蓄规则形式及反演方法。

4.2 分布式水文模型高效参数率定 为应对变化环境的影响,分布水文模型物理过程考虑的愈加细致,其参数数量也将随之增多,因过多参数导致的分布式水文模型高维参数率定问题将面临更大的挑战。一方面,分布式水文模型参数率定对计算环境要求更高^[48],且随着分布式水文模型非线性程度的提高,高维参数的不确定性也更大,参数率定的有效求解和高效计算都将更为困难^[49-50];另一方面,随着流域水资源的空间分布发生改变,采用历史水文资料和固定模式的水文模型率定的参数也失去了代表性,已很难适用变化情况的水文模拟^[2]。

当前,水文模型的高维参数率定已经引入了很多自动优化算法,包括基于自然界中适者生存、优胜劣汰等生物进化规律演化的一种自适应的全局优化算法 GA^[51],模拟鸟群捕食行为来实现人工智能的一种优化算法 PSO^[52],为 SWAT 应用的解决高维参数的非线性全局优化问题的 SCE-UA^[53],以及简单有效的、在有限评价规模内全局搜寻最优方案的优化算法 DDS 等^[54]。上述算法在水文模型的应用中,优化算法也得到了一些改进,如考虑多目标的 SCEM-UA^[55]和将参数敏感性分析引入 DDS 中的 MDDS 等^[56]。认识到变化环境的影响,借助于高效参数率定工具,很多学者开展了变化环境下水文模型参数分析的工作,如 Seth Westra 等^[57]通过构造时变参数来代表水文模型的非一致性;Markus Wallner 等^[58]采用基于自组织映射的优化算法,构造了与气候指数相关的非一致性参数;王中根等^[59]分析探讨了变化环境下水文模型参数率定和敏感性分析等问题。

计算机技术和数学优化算法的革新,均在一定程度上推动了分布式水文模型参数的高效率定。然而在人类活动影响下,为了更好的考虑下垫面特性的异质性,大流域上计算单元的增加不可避免,而计算耗时则将呈指数延长。在这种情况下,参数率定不能过分依赖计算机自动优化方法,而应充分利用人的知识和经验,有可能更迅速地判断复杂问题解的搜索方向,即应当注重将人的智慧和经验融入计算机自动优化方法中^[60]。

综上,尽管发展迅速,水文模型仍存在诸多亟需解决的难点问题,包括水文系统高度非线性导致的模型参数率定和验证问题、不同尺度上水文变量和参数的空间变异性问题、不同时间尺度上水循环的机理、资料的限制等。这其中,为了应对高强度人类活动的影响,提高分布式水文模型的适用性更是尤为重要,即模型验证、误差传递、不确定性、风险和可靠性的分析将是分布式水文模型未来发展的主要方向。

5 水文模型数据同化技术

水文模型的改进、高效参数率定等技术都是从单方面来减少模型误差,而数据同化方法则可以充分考虑水文模拟中的各种误差来源,包括模型本身的误差。数据同化技术可通过不断引入的观测数据,不断校正模型参数、状态等信息,从而提高模拟精度^[61]。

水文模型数据同化一般基于顺序同化方法即滤波算法实现。卡尔曼滤波(KF)^[62]作为该类方法的基础,已在水文模型参数实时校正中得到了大量应用^[63-64]。KF是线性最小方差估计方法,主要用于同化具有高斯分布误差的线性系统。但现实中各物理模型大多是非线性系统,为此,扩展性卡尔曼滤波(EKF)在KF的基础上被开发出来^[65]。随着模型越来越复杂,EKF在高度非线性模型中的适用性越来越低,Evensen提出了集合卡尔曼滤波(EnKF)方法^[66]。EnKF在计算误差协方差时不必像KF和EKF需要进行切线性模式和伴随模式,因此节省了巨大的计算量,在水文模型中得到了广泛的应

用。如 Xie 等^[67]将模型参数同等地视为状态变量，即同时同化水文模型中的状态变量和模型参数；McMillan 等^[68]使用迭代集合卡尔曼滤波方法对操作水文数据进行同化处理，考虑了模型中土壤含水量和蓄水量对流域集水时间有滞后作用，可以改善模型初始条件并提高预测流量的精度；Moradkhani 等^[69]基于 EnKF 提出了一种双重估算方法并在一个概念性降雨-径流模型上进行了验证。

数据同化方法可根据不断引入的实测数据，更新模型参数、预报的状态变量初值，甚至可以同化出准确的上游边界入流，追踪模型参数的变化等。随着监测水平的逐步提升，尤其是遥感技术的不断发展，水文模型中可用于同化的观测数据种类和数量都不断增多，如蒸发、土壤含水量等信息，因而多源数据同化将是水文模型数据同化技术发展一个主要趋势。与此同时，随着同化对象、观测数据源的增多，同化问题将更为复杂，同化问题的高效求解技术也将成为研究的热点和难点。

6 水文集合预报技术

针对复杂模拟对象，水文预报可分为不考虑预报不确定性的单值预报和考虑初始输入/预报过程不确定性的集合预报。单值预报的结果是单一确定的预报输出。集合预报有两种形式：(1)确定性预报，其输出是将集合成员进行平均，由于计算平均的过程中会将不可能预报的随机信息过滤掉，通常比单值预报、甚至比用高分辨率模式所产生的单值预报更准确；(2)概率预报，是指对于某个特定预报对象，计算出其发生的相对频率，概率分布包含了集合预报系统所能提供的所有信息，最大程度地包含了实际大气可能发生的种种情况，较单值预报气候概率预报以及基于单一模式单一预报的 MOS 预报更准确。有研究表明，水文集合预报的可靠度更高，且能显著提高调度效益^[70]，因而得到越来越高的重视。2003 年，欧盟正式开展欧洲洪水预警模式，并于次年在英国召开国际水文集合预报首届研讨会。2005 年，美国 NOAA 主持开发建立了首个集合预报技术的先进水文预报模式^[71]。

国内外学者也针对水文集合预报开展了大量研究。如 Bao 等^[72]利用 TIGGE 驱动洪水预测模型，将集合预报中的多个预报降水并分别与洪水模型进行了单向耦合，并最终得到多个洪水预报结果；Xu 等^[73]通过对三个集合预报系统(NCEP, ECWMF, NMC)的降水数据利用全球/区域同化预报系统 GRAPES 进行降尺度，并驱动单一水文模型对淮河下游的临沂集水区进行径流预报，发现可有效提前预警期；吴娟等^[74]利用加拿大球谱模型 GEM、加拿大气候模式 MC2 及中国气象局国家气象中心全球谱模式(T213L31)集合预报并驱动陆面模式，在淮河流域进行了暴雨洪水的验证。

集合预报后处理技术是指在水文集合预报系统中消除水文模型模拟过程产生的误差，降低水文模拟中不确定性影响的过程。正如气象数值预报输出结果不能作为最终结果直接发布，水文模型的预报输出也不能作为最终结果发布，它存着许多不确定性。和气象数值预报的后处理类似，水文集合后处理方法主要目的是根据已知的历史观测流量和模型模拟/预报的流量建立一个回归统计模型。从概率上讲，水文集合后处理就是求水文集合预报对应的观测值的条件概率密度函数。目前，国内外在水文集合方面的前后处理工作积累了较多方案，Seo 等^[75]提出了利用一个简化的后处理器对集合预报系统水文要素进行后处理，目前已经在美国各气象单位广泛使用；Bogner 等^[76]利用小波变换结合状态空间模式，开发了径流的观测、模拟误差分析系统，同时采用贝叶斯方法设计了后处理方法，有效地减少了径流预报误差；姜迪等^[77]利用通用线性模型(Generalized Linear Model, GLM)校准了水文集合结果，对水文集合结果进行后处理并有效减少了模式模拟误差。

至今，世界上使用集合预报进行水文业务化预报的国家还较少，仅有部分国家的气象部门在业务评估上使用该方法。此外由于集合预报需要处理由气候数值预报前期产生的大量数据，更需加强研究人员相互间协同工作的能力，以上各种因素限制了集合预报方法在全球范围的应用。

7 展望

本文分析了变化环境下气象水文实时预报中遇到的种种挑战，分别针对多源降水融合、降水数

值预报、水文预报模型、高效参数率定、数据同化以及水文集合预报等方面,综述了各项发展及应用情况,说明了如何在气象水文预报各个环节降低预报误差,提高洪水预报的可靠度并延长预见期。总结来看,变化环境下气象水文预报技术研究热点和未来发展方向主要集中在以下几个方面:

(1)落地和预报降水精度及时空分辨率的进一步提高。由于雨量站布点相对稀疏,现有雨量观测水平往往限制了分布式水文模型的实际应用,因而引入其他手段的雨量观测数据配合雨量站点观测高效降水融合,可大幅提高水文模型输入——降水数据的时空分辨率精细程度,且能保证数据质量的可靠性;针对降水预报,各种数值天气预报模式都很难完整刻画真实的大气动力过程,且数值天气预报模式本身运转就极为耗费资源,要从数值模式中的参数、初值等方面提高气候变化条件下数值天气预报模式的精度,就需首先解决计算效率和计算能力的问题。

(2)水文模型结构的改进及不确定性分析。对流域水循环系统来说,其洪水过程呈现“自然-人工”二元特性,要从科学层面上研究高强度人类活动对流域洪水过程的影响机制及其不确定性,并研究模型物理参数的取值及不确定性,研究参数率定和数据同化的高效计算方法,以不断适应变化环境的影响。

(3)水文预报误差的描述方法及其可靠性。随着变化环境的影响,由于模型输入数据、模型结构及参数本身的缺陷,水文预报的误差逐渐不容忽视,采用传统的确定性预报方式容易造成预报偏差,因而综合考虑水文预报中的种种不确定性来源,研发集合预报方法可降低预报的不确定性,从而能为后续的防洪调度、水资源管理决策提供更好的支撑。同时,以不确定性方式给出的暴雨洪水集合预报,在一定程度上是将洪水预报的不确定性交给了决策者,最终要提高决策水平,从目前习惯的确定性暴雨洪水预报决策转变为不确定的暴雨洪水集合预报决策。

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[M].北京:中国大百科全书出版社,1987.
- [2] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead: whither water management[J]. Science, 2008, 319: 573-574.
- [3] GREENWOOD J A, LANDWEHR J M, MATALAS N C, et al. Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form[J]. Water Resources Research, 1979, 15 (5): 1049-1054.
- [4] WANG Q J. Using higher probability weighted moments for flood frequency analysis[J]. Journal of Hydrology, 1997, 194(1): 95-106.
- [5] 赵琳娜,包红军,田付友,等.水文气象研究进展[J].气象,2012,38(2): 147-154.
- [6] 刘元波,傅巧妮,宋平,等.卫星遥感反演降水研究综述[J].地球科学进展,2011,26(11): 1162-1172.
- [7] 游然.多源卫星降水融合方法研究[C]//第33届中国气象学会年会S20气象信息化——业务实践与技术应用,西安,2016.
- [8] 胡庆芳.基于多源信息的降水空间估计及其水文应用研究[D].北京:清华大学,2013.
- [9] GERSTNER E M, HEINEMANN G. Real-time areal precipitation determination from radar by means of statistical objective analysis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(3): 296-308.
- [10] 潘畅,沈艳,宇婧婧,等.基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验[J].气象学报,2015,73(1): 177-186.
- [11] 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.
- [12] 聂肃平,吴统文,罗勇,等.一套基于新的客观分析策略的全球多源逐日降水融合资料[C]//第33届中国气象学会年会S20气象信息化——业务实践与技术应用,西安,2016.
- [13] MANNAN M A, CHOWDHURY M A M, KARMAKAR S. Application of NWP model in prediction of heavy rainfall in Bangladesh[J]. Procedia Engineering, 2013, 56: 667-675.
- [14] NUTTER P, MANOBIANCO J. Evaluation of the 29-km Eta model. Part I: Objective verification at three select-

- ed stations[J]. *Weather and Forecasting*, 1999, 14: 5–17.
- [15] CHEN F, DUDHIA J. Coupling an advanced land surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: model description and implementation[J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129: 569–585.
- [16] WALKO R L, TREMBACK C J, HERTENSTEIN R F A. RAMS (the regional atmospheric modeling system) version 3b, User's Guide[M]. ASTER Division MRC, 1995.
- [17] YU Z, LAKHTAKIA M N, BARRON E J. Modeling the river–basin response to single–storm events simulated by a mesoscale meteorological model at various resolutions[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1999, 104(D16): 19675–19689.
- [18] KLEMP J B. Weather Research and Forecasting Model: A technical Overview[C]//84th AMS Annual Meeting, Seattle, U. S. A, 2004.
- [19] TANG C, DENNIS R L. How reliable is the fully couple of WRF and VIC model? [C]//AGU Conference, 2013.
- [20] 郝春沣, 贾仰文, 王浩. 气象水文模型耦合研究及其在渭河流域的应用[J]. *水利学报*, 2012, 43(9): 1042–1049.
- [21] 高冰, 杨大文, 谷湘潜, 等. 基于数值天气模式和分布式水文模型的三峡入库洪水预报研究[J]. *水力发电学报*, 2012(1): 22–28.
- [22] PENNELLY C, REUTER G, FLESCHE T. Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta[J]. *Atmospheric Research*, 2014, 135/136: 172–192.
- [23] 史金丽. WRF模式不同参数化方案对内蒙古不同性质降水模拟分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [24] YANG M X, JIANG Y Z, LU X, et al. WRF model evaluation for simulating heavy precipitation over the downstream of Yalong River Basin[J]. *Journal of Zhejiang University(SCIENCE-A)*, 2015, 16(1): 18–37.
- [25] 丑纪范. 数值天气预报的创新之路——从初值问题到反问题[J]. *气象学报*, 2007, 65(5): 673–682.
- [26] 芮孝芳. 流域水文模型研究中的若干问题[J]. *水科学进展*, 1997, 8(1): 94–98.
- [27] 芮孝芳, 黄国如. 分布式水文模型的现状与未来[J]. *水利水电科技进展*, 2004, 24(2): 55–58.
- [28] 徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. *水利学报*, 2010, 41(9): 1009–1017.
- [29] SINGH R, SUBRAMANIAN K. Hydrological modeling of a small watershed using MIKE SHE for irrigation planning[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 41(3): 103–109.
- [30] KINIRY J R, WILLIAMS J R, KING K W. Soil and water assessment tool theoretical documentation (Version 2005)[J]. *Computer Speech & Language*, 2011, 24(2): 289–306.
- [31] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based variable contributing area model of basin[J]. *Hydrological Science Bulletin*, 1979, 24(1): 43–69.
- [32] FELDMAN A. Hydrologic Modeling System HEC–HMS–Technical Reference Manual[M]. US Army Corps of Engineers, Davis, CA, 2000.
- [33] 贾仰文. WEP模型的开发与分布式流域水循环模拟[C]//中国水利学会2003学术年会论文集, 2003.
- [34] YANG D W, HERATH S, MUSIAKE K. Development of a geomorphology based hydrological model for large catchments[J]. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 42: 169–174.
- [35] 郭生练, 熊立华, 杨井, 等. 基于DEM的分布式流域水文物理模型[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2000, 21(4): 35–38.
- [36] 夏军, 王纲胜, 吕爱锋, 等. 分布式时变增益流域水循环模拟[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 789–796.
- [37] LEI X, LIAO W, WANG Y, et al. Development and Application of a Distributed Hydrological Model: EasyDHM[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014, 19(1): 44–59.
- [38] 雷晓辉, 廖卫红, 蒋云钟, 等. 分布式水文模型EasyDHM(1)理论方法[J]. *水利学报*, 2010, 41(7): 786–794.
- [39] BRODERICK C, MATTHEWS T, WILBY R L, et al. Transferability of hydrological models and ensemble averaging methods between contrasting climatic periods [J]. *Water Resources Research*, 2016, 52: 8343–8373.
- [40] KIM K B, KWON H H, HAN D W. Hydrological modelling under climate change considering nonstationarity and seasonal effects[J]. *Hydrology Research*, 2016, 47(2): 260–273.
- [41] 池宸星, 郝振纯, 王玲, 等. 黄土区人类活动影响下的产汇流模拟研究[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(3): 101–108.
- [42] HUANG X, LIAO W, LEI X, et al. Simulating the impacts of land–use change on a large–scale runoff using the

- easy distributed hydrological model[J]. HKIE Transactions, 2014, 21(2): 122-134.
- [43] CHANDRAMOULI V, RAMAN H. Multireservoir modeling with dynamic programming and neural networks [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2001, 127(2): 89-98.
- [44] YOUNG G K. Finding reservoir operating rules[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1967, 93(6): 297-322.
- [45] GÜNTNER A, KROL S M, DE ARAÚJO J C, et al. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region[J]. Hydrological Science Journal, 2004, 49(5): 901-918.
- [46] 初京刚. 基于多源信息的分布式水文模拟及优化算法应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [47] 雷晓辉, 王浩, 廖卫红, 等. 非一致性条件下的水文模拟及预报关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [48] APOSTOLOPOULOS T K, GEORGAKAKOS K P. Parallel computation for streamflow prediction with distributed hydrologic models [J]. Journal of Hydrology, 1997, 197(1/4): 1-24.
- [49] BEVEN K. Changing ideas in hydrology – The case of physicallybased models [J]. Journal of Hydrology, 1989, 105(1/2): 157-172.
- [50] CARPENTER T M, GEORGAKAKOS K P, SPERFSLAGEA J A. On the parametric and NEXRAD-radar sensitivities of a distributed hydrologic model suitable for operational use [J]. Journal of Hydrology, 2001, 253(1/4): 169-193.
- [51] HORN J, NAFPLIOTIS N, GOLDBERG D E. A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization [C]//Proceedings of 1st IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Computation Intelligence, Piscataway, NJ, 1994.
- [52] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Proceedings of the sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. IEEE, 2002.
- [53] DUAN Q, SOROOSHIAN S, GUPTA V K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models [J]. Water Resources Research, 1992, 28(4): 1015-1031.
- [54] TOLSON B A, SHOEMAKER C A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration[J]. Water Resources Research, 2007, 43(1): W01413.
- [55] VRUGT J A, GUPTA H V, BOUTEN W, et al. A shuffled complex evolution metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters[J]. Water Resources Research, 2003, 39(8): 1201-1216.
- [56] HUANG X M, LIAO W H, LEI X H, et al. Parameter Optimization of the Easy Distributed Hydrological Model with a Modified Dynamically Dimensioned Search Algorithm[J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 52(2): 98-110.
- [57] WESTRA S, THYER M, LEONARD M, et al. A strategy for diagnosing and interpreting hydrological model non-stationarity [J]. Water Resources Research, 2014, 50(6): 5090-5113.
- [58] WALLNER M, HABERLANDT U. Non-stationary hydrological model parameters: a framework based on SOM-B [J]. Hydrological Processes, 2015, 29: 3145-3161.
- [59] 王中根, 夏军, 刘昌明, 等. 分布式水文模型的参数率定及敏感性分析探讨[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 649-655.
- [60] 李宗礼, 孙伟, 王中根, 等. 基于人机联合优化的SWAT模型参数率定方法研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(5): 77-82.
- [61] MORADKHANI H, SOROOSHIAN S, GUPTA H V, et al. Dual state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter [J]. Advances in Water Resources, 2005, 28(2): 135-47.
- [62] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Journal of Basic Engineering Transactions, 1960, 82: 35-45.
- [63] 葛守西, 程海云, 李玉荣. 水动力学模型卡尔曼滤波实时校正技术[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 687-693.
- [64] CHAWAH P, SOURICE A, PLANTIER G, et al. Real time and adaptive Kalman filter for joint nanometric displacement estimation, parameters tracking and drift correction of EFFPI sensor systems [C]//Sensors. IEEE, 2011: 882-885.
- [65] LV H, HOU T, HORTON R, et al. The streamflow estimation using the Xinanjiang rainfall runoff model and dual state-parameter estimation method[J]. Journal of Hydrology, 2013, 480(10): 2-14.

- [66] EVENSEN G . Data Assimilation: The Ensemble Kalman Filter[M] . Springer-Verlag New York, Inc, 2006 .
- [67] XIE X H, ZHANG D X . Data assimilation for distributed hydrological catchment modeling via ensemble Kalman filter [J] . Advances in Water Resources, 2010, 33(6): 678–690 .
- [68] MCMILLAN H K, HREINSSON E, CLARK M P, et al . Operational hydrological data assimilation with the recursive ensemble Kalman filter [J] . Hydrology & Earth System Sciences, 2013, 17(1): 21–38 .
- [69] MORADKHANI H, SOROOSHIAN S, GUPTA H V, et al . Dual state-parameter estimation of hydrological models using ensemble Kalman filter[J] . Advances in Water Resources, 2005, 28(2): 135–147 .
- [70] ZHAO T T G, WANG Q J, BENNETT J C, et al . Quantifying predictive uncertainty of streamflow forecasts based on a Bayesian joint probability model[J] . Journal of Hydrology, 2015, 528: 329–340 .
- [71] 赵琳娜, 刘莹, 党皓飞, 等 . 集合数值预报在洪水预报中的应用进展[J] . 应用气象学报, 2014, 6: 641–653 .
- [72] BAO H J, ZHAO L N . Development and Application of an Atmospheric-Hydrologic-Hydraulic Flood Forecasting Model Driven by TIGGE Ensemble Forecasts[J] . Journal of Meteorological Research, 2012, 26(1): 93–102 .
- [73] XU J W, ZHANG W C, ZHENG Z Y, et al . Early Flood Warning for Linyi Watershed by the GRAPES/XXT Model Using TIGGE Data [J] . Journal of Meteorological Research, 2012, 26(1): 103–111 .
- [74] 吴娟, 陆桂华, 吴志勇 . 基于多模式降水集成的陆气耦合洪水预报[J] . 水文, 2012, 32(5): 1–6 .
- [75] SEO K W, WILSON C R, FAMIGLIETTI J S, et al . Terrestrial water mass load changes from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) [J] . Water Resources Research, 2006, 42(5): 173–180 .
- [76] BOGNER K, PAPPENBERGER F, THIELEN J, et al . Wavelet based error correction and predictive uncertainty of a hydrological forecasting system [J] . EGU General Assembly, 2010, 12: 10245 .
- [77] 姜迪, 智海, 赵琳娜, 等 . 通用线性模型在气象水文集合预报后处理中的应用[J] . 大气科学学报, 2014, 37(2): 229–236 .

Advances in hydro-meteorological forecast under changing environment

LEI Xiaohui¹, WANG Hao¹, LIAO Weihong¹, YANG Mingxiang¹, GUI Ziling^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the change of global climate and underlying surface characteristics, and increasing human activities, hydro-meteorological factors such as precipitation, evaporation, and runoff, etc., are directly affected, therefore the assumption of stationarity may no longer exist. In a changing environment, the conventional runoff predicting methods become invalid, which brings challenges to accurate hydro-meteorological forecast. A review of hydro-meteorological forecast research under a changing environment is presented from the aspects of precipitation data fusion, numerical weather forecast, watershed hydrological model, parameterization, data assimilation and ensemble forecast. Much relevant research has been studied, and a lot of achievements have been achieved. The future research on hydrological forecast under changing environment will mainly focus on the following direction: (1) to further improve the accuracy and spatial resolution of precipitation forecast; (2) structure improvement and uncertainty analysis of hydrological models; (3) description methods of hydrological forecast error and reliability.

Keywords: non-stationarity; hydro-meteorological forecast; numerical weather forecast; watershed hydrological model; parameterization; data assimilation; ensemble forecast

(责任编辑: 杨 虹)