一个新的高分辨率洪涝动力数值监测预报系统

汪君^①, 王会军^{①*}, HONG Yang^②

① 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029;

② School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, Norman, OK 73072, USA

* 联系人, E-mail: wanghj@mail.iap.ac.cn

2015-07-09 收稿, 2015-08-24 修回, 2015-08-28 接受, 2016-01-18 网络版发表

国家自然科学基金(41421004, 41210007)资助

摘要 基于简单的分布式水文模型CREST和多种卫星遥感资料及站点观测资料等, 建立了一个高分辨率的动力数值洪涝灾害预报系统. 该系统包含数据输入、水文模型、模式输出以及结果验证4部分. 数据输入使用了高分辨率卫星遥感DEM等地表下垫面数据作为边界条件, 使用时空分辨率和精度都较好的CMORPH卫星遥感降水资料作为驱动数据, 驱动分布式水文模型CREST实时运行, 以监测和预报中国地区尤其是无站点观测或者站点较少地区的洪涝灾害. 对2008~2011年的水文基本变量后报结果结合不同流域水文站点的水文过程线分析验证表明, 水平空间分辨率1 km的系统能够较好地后报中国地区的基本水文过程, 能够较好地后报如实际蒸散发、土壤湿度、地表径流等基本水文变量; 系统能够较好地模拟和后报河道径流量涨落过程; 能够较好地后报洪峰及其对应的流量. 同时, 经过几次洪涝灾害事件的分析验证, 表明系统能较好地监测、预报洪涝发生的时间及其影响的范围, 从而可以为防灾减灾提供参考依据.

关键词 洪涝灾害, 高分辨率数值预报, 卫星遥感降水, 分布式水文模型

中国是气象(气候)灾害频发的地区之一, 每年因气象(气候)灾害造成的经济损失平均在2000亿元以上^[1~3], 尤其是中国地处东亚季风区, 在雨季来临时多发暴雨、大暴雨, 而由降水引发的洪涝灾害等频繁发生, 给人民的生命财产安全带来巨大威胁. 事实上洪涝灾害是中国及世界范围内最常见且危害最大的一类自然灾害, 20世纪90年代以来仅洪涝灾害造成中国经济损失年均达1000亿元以上, 在各种自然灾害经济损失中约占62%, 相当于同期中国年均国民生产总值1.5%左右^[4,5]. 鉴于洪涝灾害的巨大危害性, 及时地监测和预报洪涝灾害是非常必要的^[6,7].

传统的洪涝监测, 主要依赖分布于各流域上水文站点的观测; 而预报, 则主要是基于站点其上游的观测降水与站点水流量(如径流量)之间的降水-径流统计关系, 从而经验性地预报站点的水流量. 水文模型随

后也逐渐应用到水文监测、预报中, 但是降水资料仍来自站点观测. 由于观测站点的分布多不均匀, 且大多分布在中国东部平原地区^[8], 因此对无观测站点或者少观测站点的流域, 其降水就要借助其他方法. 目前国内常用的方法有单位线、空间插值、数据同化等方法^[8,9], 但这些方法只是对实际情况的一种近似估计. 为解决站点分布不均甚至没有站点的情况, 有些学者将地基雷达降水用到水文模型中去, 一定程度上弥补了观测站点分布不均带来的问题^[10~13]. 但是中国地基雷达分布仍然是不均匀的, 而且扫描仰角受到复杂地形的限制, 覆盖面积大大受限^[14].

随着卫星遥感技术的发展, 卫星遥感降水质量的稳步提高, 卫星遥感降水逐步可应用到水文预测中来. Hong等人^[15,16]在2006年提出将TRMM卫星遥感降水用在水文模型中的设想, 以监测和预报洪涝

引用格式: 汪君, 王会军, Hong Y. 一个新的高分辨率洪涝动力数值监测预报系统. 科学通报, 2016, 61: 518–528

Wang J, Wang H J, Hong Y. A high-resolution flood forecasting and monitoring system for China using satellite remote sensing data (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 518–528, doi: 10.1360/N972015-00489

灾害. 这种方案充分利用了卫星遥感时空覆盖度的优势, 可以用于空间尺度跨度较大的洪涝监测和预报工作^[17-19]. 但在Hong的工作中, 使用的卫星降水资料 TRMM-3B42RT^[20], 其水平空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 更新时间间隔为3 h, 对监测全球尺度的洪涝灾害来讲, 基本满足需求. 但是如果更详细、更精确地了解发生洪涝的时间和地点, 则需要更高空间分辨率和更短时间间隔的资料.

另一方面, Hong的洪涝监测预警模型采用了较为简单的NCRS-CN^[21]水文统计关系, 其本质是一个简单的统计公式; 同时, 由于对下垫面的描述基本上也是简单的经验性的描述, 因此在地表径流产生的过程模拟上不可避免会带来较大的误差, 而且不能模拟产流、汇流、下渗、蒸散发以及地下水径流等过程^[15,16]. 为了克服这些不足, 需要引入一个较为细致的描述径流、产流、汇流等物理过程的分布式水文模型, 并尽量减少对经验公式、统计关系等的依赖以便较好地应用到不同的流域和地区. 同时这个模型应该只需要简单输入数据, 计算也应该较为简单、计算速度较快, 以便能够用于面积较大的区域并采用较高的时空分辨率^[22,23].

另外, 由于率定参数适用性以及计算规模的限制等原因, 现有的大部分分布式水文模型还局限于流域尺度^[24-26]. 很少有能适用于中国这样流域众多、幅员辽阔的模型. 因此, 现有的分布式水文模型洪涝预报系统多局限于较小的流域^[27-29].

综上, 卫星遥感降水可以解决观测站点分布不均匀的问题, 还可以克服雷达扫描仰角受地形遮挡的问题, 但是TRMM-3B42RT资料时空分辨率不够高; 水文统计模型适用性不够强, 现有的大部分分布式水文模型也还只局限于流域尺度. 产汇流耦合的分布式蓄满产流模型(coupled routing and excess storage model, CREST)模型计算简单、尺度和区域适用性强, 但是能否用在中国还有待验证. 因此, 我们将采用时空分辨率更高的卫星遥感降水资料去驱动CREST分布式水文模型在全国运行. 一方面, 考察验证CREST模型在中国的适用性; 另一方面, 基于CREST模型和卫星遥感资料建立实时监测和预报洪涝灾害的系统, 考察这个系统的适用性.

1 预报系统的构成

本系统主要由4个主要部分组成, 即高分辨率卫

星遥感输入数据、CREST分布式水文模型、系统输出高分辨率预报水文变量结果以及结果的验证(图1), 下面将4个主要组成部分分别予以介绍.

1.1 CREST水文模型简介

CREST是由University of Oklahoma和NASA SERVIR Project Team(<http://www.servir.net>)联合开发的复合尺度分布式水文模型. 这个模型采用适于多尺度模拟的次网格尺度表示土壤蓄水能力(变量渗透曲线方法), 并使用适于多尺度模拟的产流过程(线性存储方法), 同时还应用了分布式率定参数方法. 模型自开发以来, 在全球多个地方进行了初步验证, 如非洲的Nozia流域^[30]、美国Tarboro流域、巴基斯坦的以及中美洲的部分流域等^[31-34], 结果证明这个模型的适用性比较强、准确性较高同时计算开销也不大, 比较适合用于大尺度的高分辨率水文模拟及预报等工作. 但是, 此模型毕竟原本是为非洲和中美洲所开发, 是否适用于中国, 还有待验证.

1.2 预报系统输入数据

本系统的输入数据主要有静态(或准静态)下垫面数据和动态驱动数据两种. 动态数据包括降水和潜在蒸散发. 其中输入的降水资料可以是站点观测插值到网格的数据, 也可以是雷达反演的数据, 当然还可以是卫星遥感降水. 由前述原因, 在此选择实时高分辨率卫星遥感降水. NOAA CPC(Climat

图1 预报系统的4个主要构成
Figure 1 Main 4 components of the forecasting system

Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration) 的著名卫星遥感降水产品 CMORPH(CPC MORPHING Technique), 是目前质量较好的卫星遥感降水, 其实时降水估计主要来自于多颗极轨卫星上面搭载的微波遥感传感器, 但同时结合了地球轨道静止卫星上搭载的红外传感器资料. CMORPH最高水平空间分辨率为 0.08° 经度 $\times 0.08^{\circ}$ 纬度(约8 km), 更新时间间隔为0.5 h, 是时空分辨率较高且质量也较好的卫星遥感降水产品^[35,36].

而潜在蒸散发资料则可以是实际观测到的蒸发皿蒸发, 也可以是由观测的温度、辐射和风速等计算的潜在蒸散发. 由于实时观测的潜在蒸散发资料较难获得, 在此采用FEWS-NET计算的全球月平均潜在蒸散发资料 (<http://www.fews.net>). FEWS-NET (Famine Early Warning System Network, <http://www.fews.net/Pages/default.aspx>) 是采用 NOAA 的 GDAS (Global Data Assimilation System) 数据同化系统输出的温度、压强、风、湿度等资料根据Penman-Monteith公式计算而来^[37].

系统的地表边界条件(准静态数据)主要是来自HydroSHEDS(Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales, <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/references.php>) 的高分辨率全球数字地形模型(digital elevation model, DEM)和河道方向模型(drainage direction model, DDM)等数据. HydroSHEDS数据是美国地质调查局(USGS)结合NASA的SRTM digital terrain elevation data (DTED) 高分辨率卫星遥感地形数据, SRTM waterbody data

(SWBD), global lakes and wetlands database等数据综合而成的, 这个项目由世界野生动物基金会(World Wildlife Fund, WWF)赞助实施. HydroSHEDS数据共有3"(约90 m)、15"(约500 m)和30"(约1 km)三种分辨率. 由于中国地区幅员辽阔, 面积较大, 为便于实时计算, 本研究使用其中30"(即1 km)分辨率的数据, 图2(a)是本文所用1 km空间分辨率DEM示意图, 图2(b)是2010年系统计算全国径流量年平均分布图, 从图中能看出中国主要的河流分布.

同时, 还用到了部分中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectro-radiometer, MODIS)地面覆被类型数据^[38]与ISSCPII(The International Satellite Land Surface Climatology Project, Initiative II, http://daac.ornl.gov/news/islscp_ii_released_20120410.html) 的地面土壤类型数据, 作为系统运行时参数确定以及结果后处理的参考等.

1.3 预报系统的结果输出

预报系统的输出结果主要有实际蒸散发、径流量、土壤湿度、径流深度等水文变量. 从全国尺度或流域尺度来看, 输出的水文变量空间分布图可以直观地表示不同地区的干湿旱涝情况, 而不同站点的水文过程线结果则能够直观地表示不同站点在不同时刻的流量以及洪峰出现时间等信息, 为防灾减灾提供参考.

1.4 预报结果的验证

为了验证预报系统的输出结果, 使用了多种不

图2 中国地区1 km水平空间分辨率地形图DEM(a)以及2010年平均径流分布图(b)

Figure 2 (a) Digital elevation model map with 1 km spatial resolution in China and (b) yearly mean runoff during year 2010 hind-casted by the forecasting system

同来源的数据,其中包括站点观测资料、卫星遥感反演数据、经过模式同化的再分析数据等。

(i) 水文站观测数据. 使用的径流量观测资料主要来自水利部水文局主办的全国实时水雨情信息网(<http://xxfb.hydroinfo.gov.cn/>),时段为2010年1月1日~2011年12月31日,其中既有中国主要江河水文站每日的流量、水位及降水信息,也有每个月主要的水文事件的总结报告.使用的站点尽量选取在受人为干扰较小的流域、且数据比较齐全的站点。

洪涝灾害受灾情况包括受灾面积、受灾人口以及造成的经济损失等信息则来自由国家测绘地理信息局地理信息与地图司、民政部救灾救济司主持,中国测绘科学研究院和民政部国家减灾中心承办的全国灾情查询通报信息系统(<http://zaiqing.casm.ac.cn/>),其中除了有洪涝灾害的相关信息,还有旱灾、低温冰冻、雪灾以及地震、山体滑坡等自然灾害的相关信息。

(ii) 地表蒸散发数据. 实际蒸散发又叫蒸腾蒸发量,是地面上植物的叶面散发(蒸腾)与植株间土壤蒸发量之和,也就是灌溉工程中的作物需水量.它既是地表热量平衡的组成部分,又是水量平衡的组成部分,而地表热量、水分收支很大程度上决定着天气、气候的变化;因此对陆面蒸散发的研究,一直是国内外地学、水文学等关心的焦点问题之一,特别是近年来随着地表能量和物质循环研究的进一步深入以及水资源缺乏问题的日益严峻,蒸散发问题越来越受到人们的重视.蒸散发的计算涉及到地表能量循环和物质循环的很多环节,不仅包含简单的地下水-土壤-大气间的相互作用,还包括了陆面植被复杂的生理过程,因此实际计算中有很多简化的模型.CREST模型可以简单地处理蒸散发计算中涉及热量和水分循环的一些过程,但是由于目前没有陆面植被的相关过程模块,因此模型中实际蒸散发的计算是简单地根据潜在蒸散发与实际土壤含水量来动态确定的.而计算所需潜在蒸散发则如前所述,使用FEWS-NET计算的全球月平均数据。

MODIS MOD16潜在蒸散发和实际蒸散发数据是美国蒙大拿大学(University of Montana)的Mu等人^[37]采用改进的Penman-Monteith公式对高分辨率MODIS卫星遥感资料计算所得,其空间分辨率为500 m或1 km,更新时间间隔为8 d;在时间间隔8 d的结果基础上得到每月和每年实际蒸散发值^[39,40]。

(iii) 土壤湿度数据. 土壤湿度即土壤含水量的

量度,对农作物等植被来说土壤湿度决定了其水分供应的状况;湿度太低,植被没有水分支持,可能凋萎和死亡;而湿度太高则影响土壤通气性,影响植被的呼吸、生长等生命活动.除了对植被的影响,土壤湿度也会对地表水分蒸散等造成影响,从而影响到陆气潜热通量等.总之,土壤含水量也是影响陆气水分、能量循环的一个较为关键的量.CREST模型也能输出土壤湿度,和其他复杂的陆面水文模型不同,这个输出的土壤湿度是在简单考虑了降水、蒸散发、产流与汇流等水文过程的基础上得到的,而且是地下土壤层含水量的平均值,基本没有考虑不同深度土壤的差异,也没有考虑复杂的水热过程。

2 预报系统的后报检验与分析

使用上述基于卫星遥感的地面DEM和MODIS地表覆被等资料和2008~2011年4年的CMORPH高分辨率卫星遥感降水驱动预报系统运行,后报了中国地区近几年的基本水文状况,包括潜在蒸散发、实际蒸散发、土壤湿度、地表径流和地表径流深度等结果,这些结果可以为当前全国地表基本水文状况提供参考,还可以作为洪涝、干旱等灾害的辅助参考依据.以下将首先简单验证分析系统输出基本水文变量如实际蒸散发、土壤湿度、河流径流量等结果。

本文选择了ERA-Interim中的土壤湿度作为模型输出土壤湿度的参考.ERA-Interim是欧洲中尺度天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的一套较新的再分析资料,是在之前的ERA-40和ERA-15基础上发展而来的新一代再分析资料.时间范围为自1989年以来至今,其空间分辨率为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$ (T255),除了分辨率提高以外,这套资料在其他很多方面也有改进^[41~43]。

2.1 基本水文变量的后报结果分析

图2(b)是2010年全国平均径流量,由图中径流量的大小基本可以分辨出中国主要的一些河流来,如年径流量排名较前的长江、珠江、黑龙江、雅鲁藏布江、澜沧江、怒江、黄河、闽江、淮河、钱塘江干流等及其主要支流,以及其他如海河、辽河、岷江、伊犁河、塔里木河等较大的江河.值得注意的是,在塔里木盆地塔里木河以南的和田地区的和田河,其值约在 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$,与黄领梅等人^[44]估计的年平均径流量量级相当.另外,从图2(b)还可以看出,在青藏高

原的东部和川西地区、四川盆地、长三角地区、珠三角地区、三江平原、松嫩平原以及山东半岛以西的华北平原存在着大量平均径流量大于 $10\text{ m}^3/\text{s}$ 的地区,证明这些地区河流众多,水资源比较丰富,这与实际情况是比较相符的。

图3是2010年7月MODIS MOD16A2月平均实际蒸散发(AET)与潜在蒸散发(PET)的比值及CREST模型计算的蒸散发与使用的潜在蒸散发资料比值的对比。由图3可见,总体上CREST输出AET与PET的比值分布与MODIS反演的比值基本一致,在华南、华东、长江中下游地区、东北以及西北的少部分地区存在较大区域的大值区。而在内蒙古、新疆、西藏的大部分地区以及云南的部分地区存在较大面积的低值区。这说明模型能够较好地后报中国的实际蒸散发过程,能够较好地刻画实际蒸散发在中国的地域区别。然而,系统后报的实际蒸散发也有一些误差,例如从数值上来看,后报结果比MODIS反演结果稍偏小一些,这可能是由于模型中没有完善的陆面植被模块,从而只能使用简单的参数化过程所致。

图4是2010年7月ERA-Interim再分析土壤湿度与CREST模型计算土壤湿度对比。从图4来看,两者的空间分布还是非常相似的。ERA-Interim土壤湿度与CREST土壤湿度对比,大值区基本分布在漠河-腾冲线以东、青藏高原北部以及天山山脉以北的伊犁河谷地区等,而内蒙古中部直到柴达木盆地以西的大部分地区则湿度较低,尤其是阿拉善高原、塔克拉玛干沙漠等地湿度尤其低。而且还可以看到,在再分析资

料中云南北部和四川南部有个面积较小的低值区,模型也能清楚地再现这个低值区。当然,模型结果和再分析资料相比也有一些不同的地方,例如在山东半岛,再分析资料显示土壤湿度偏低,然而模型输出土壤湿度则较高。总体上,模型对土壤湿度的后报结果还是相当好的。当然,CREST模型中没有详细的植被动力学模块,这对植被冠层、枝干和根部对水分的截流等效果无法较为准确地描述,会影响对土壤水分的计算。另外,ERA-Interim的分辨率虽然在再分析资料中算比较高的,但是和本文模型的分辨率相比还是低得多,这对结果的比较也有一定的影响。

以上粗略地检验了预报系统对中国地区基本的水文量如实际蒸散发、土壤湿度、径流量等变量的后报能力,认为预报系统能较好地后报这些变量的空间分布形态以及基本量值。虽然对某些量如实际蒸散发的量值后报有偏差,一方面这些偏差的可能原因在于输入资料的量值偏差或者分辨率的不适配,另一方面,所用CREST模型本身的结构和物理过程模块还较简单。

2.2 径流水文结果的后报结果分析

海南加积水文站位于万泉河下游,具体地理位置为 $110^{\circ}28'E$, $19^{\circ}14'N$,海拔9 m左右。图5是2010~2011年海南加积水文站的日降水与流量过程线图,由图可以看到,加积站在全年大部分时间流量很小,小于 $100\text{ m}^3/\text{s}$,同时对应的降水也较小,基本小于 100 mm/d ;而在9~10月期间会有较大的降水,日

图3 2010年7月MODIS MOD16A2反演实际蒸散发(AET)与潜在蒸散发(PET)比值(a)与系统后报值(b)对比

Figure 3 (a) Ratio of actual evapotranspiration and potential evapotranspiration in July, 2010 retrieved from MODIS and (b) hind-casted by the forecasting system

图4 2010年7月ERA-Interim再分析土壤湿度(a)与CREST模型土壤湿度(b)对比
Figure 4 (a) Soil moisture from ERA-Interim reanalysis and (b) hind-casted by the forecasting system

图5 海南加积水文站水文过程图, 包括日降水量序列、观测日平均径流量序列和系统后报日平均径流量序列
Figure 5 Hydrograph including daily rainfall, daily stream-flow of the hydrology station in Jiaji, Hainan

降水可能超过200 mm/d, 同时河流流量很大, 可以超过4000 m³/s. CREST模型基本上再现了这种流量的季节变化, 与观测流量的时间相关系数可以达到0.69; 在实际流量较小的时候, 例如5~8月, CREST后报的流量稍大于实际的流量, 但是在几个较大洪峰时系统后报流量小于观测流量. 系统后报流量与观测流量变化基本是同步的, 没有较大的位相差别, 但是在2010年6月初的一次降雨过程(日降水超过100 mm)系统后报有一次较大的流量过程(约1000 m³/s), 实际观测中却没有这样的过程, 这可能与水坝蓄水等人类活动有关.

四川金溪位于106°21'E, 31°07'N, 海拔约315 m, 位于嘉陵江的中下游, 四川盆地的东边; 嘉陵江是长江支流中面积最大的河流, 且其流量仅次于岷江、长

度仅次于汉水. 金溪站的降水主要集中在5~10月(图S1), 最大日降水可以超过300 mm, 平日流量小于1000 m³/s, 汛期可达2000 m³/s, 最大甚至上万. 从图S1来看, CREST模型后报的径流量变化曲线比观测径流量曲线平滑的多, 在几个较大的洪峰如2010年7月末和2011年7月初的2次洪峰, 对应日降水超过200 mm, CREST模型虽然也有较大变化幅度, 但是与实际观测相比还是小了很多, 观测流量超过6000 m³/s, 甚至8000 m³/s, 而后报的流量则在2000~3000 m³/s; 造成这种偏差的可能原因一方面是由于水文模型自身的一些物理过程的误差, 另一方面CMORPH降水对极端降水可能会有低估. 而在2010年8月末的一次较大流量过程中, 对应的降水很小, 降水应该是来自上游地区, CREST模型也较好地再现了这个流量的

变化过程,虽然总量仍然偏小,但是变化形态基本一致.总体看来,虽然系统后报的流量总体偏小一些,变化幅度较为平缓一些,但是对金溪站的流量变化过程还是基本能较好地后报,两年时间序列的相关系数为0.48,相对偏差为-8.11%.

珠江是中国南方最大河系,全长2320 km,是中国境内第三长的河流,按年流量则为中国第二大河,水系支流众多,水道纵横交错,但主要由西江、北江、东江三条河流组成,其干流西江发源于云南省沾益县马雄山.其汛期长、径流稳定、水量大、上游落差较大、水能充足.马陇水文站位于西江上游支流刁江之上,经纬度为108°23'E, 24°15'N, 海拔157 m.全年汛期为4~10月,年际变化较大.图S2是2010~2011年的水文过程线图,可以看到2010年降水较多、且降水量较大,最大日降水量甚至超过200 mm,因此径流总体较大,最大超过800 m³/s,而2011年降水则较少,且降水较均匀,没有突发的大暴雨,因此径流变化总体较平缓,且峰值较小.系统后报值总体和实际观测值非常接近、契合得非常好;但是在几次洪峰过程变化幅度上略有偏差,如2010年6月末一次特大暴雨过程,系统后报值比实际观测大很多,而在2011年的几次强降水过程中后报径流量则比实际观测小一些;但总体说来对整个水文过程的后报还是较好的,相关系数达到0.74,相对偏差为-15%.

虽然CREST水文模型比较简单,且缺乏一些必要的陆面生态、动力学和热力学过程,但是仍然可以较好地模拟实际的水文过程,从而为洪涝灾害的监测和预报打下了较好的基础.

以上从预报系统后报不同地区、不同流域的站点径流量水文过程以及从全国实际蒸散发、土壤湿度、全国径流量分布等方面验证了CREST模型对不同地区水文过程的后报能力,认为CREST模型能较好地后报不同地区的水文过程,尤其是各基本变量的空间分布以及不同地区河流径流量的时间变化.以下将以径流深度为指标监测与预报洪涝灾害,并与实际洪涝灾害情况进行验证分析.

2.3 几次洪涝灾害的后报结果分析

受较强西南暖湿气流的影响,北京时间2008年4月18日8时~20日8时(UTC2008年4月18日00时~20日00时),淮河上游出现一次强降雨过程,淮北及大别山区普降大到暴雨,雨量为50~150 mm,最大点雨量

河南信阳王堂177 mm.受降雨影响,淮河上游发生了2008年首次超警洪水.22日9时24分,淮河干流2008年第1号洪峰通过王家坝水文站(安徽王家坝),洪峰水位27.78 m,超过警戒水位(27.50 m)0.28 m,最大流量3140 m³/s(22日5时),为自1964年以来最大一次春汛,1952年有实测记录以来历史同期第三位洪水.图6是这次过程对应的观测累积降水量、CMORPH累积降水量分布以及CREST模型输出日平均径流分布和地表径流深度的空间分布.CMORPH卫星遥感降水空间分布和观测降水的分布几乎是一致的,在湖北、安徽、江苏等地有一个明显的降水带,最大降水150 mm以上,但是CMORPH降水值明显比观测降水小,尤其是40 mm以上降水的面积比观测降水小得多.而同时也能较明显地看到在河道之外有大片区域的地表径流超过5 m³/s,对应的地表径流深度可达50 mm/d,最大可达85 mm/d以上,表明有中等程度的洪涝发生.CREST模型所输出王家坝站流量峰值出现在23日0时,比实际观测时间晚,且值要小一些,为2949 m³/s.虽然CMORPH降水总体较实际观测偏小,但是仍能较好地再现实际降水的空间分布,且由其驱动运行的CREST模型能较好地反映洪涝灾害的发生范围和程度.但由于降水的偏差以及水文模型本身的误差,后报的径流量峰值有较大偏差,且峰值时间也有一定的偏差.

受冷暖空气共同影响,2008年4月11~13日,广西东南部普降大到暴雨,局部出现短历时特大暴雨,最大日雨量达222 mm,最大2 h雨量达145 mm.受强降雨影响,玉林市区发生比较严重的内涝,部分街道水深超过半米.南流江、北流河发生明显涨水过程,其中南流江上游发生超警戒洪水,横江水文站13日13时洪峰水位64.24 m,超过警戒水位1.54 m,相应流量742 m³/s.图S3是这次事件对应的累积降水、日平均径流量和径流深度,CMORPH降水和观测降水有较大差异,比实际观测降水大,且大值的范围也有较大差异,尤其是在广西东部和广东省西南部,实际观测只有50 mm左右,但CMORPH降水达140 mm以上.横江水文站处于降水区的边缘,但是由于上游降水较大,因此发生超警戒洪水,观测洪峰流量出现在13日13时,而模型中洪峰出现在13日12时,时间对应得很好,但是由于CMORPH降水较实际降水偏大,因此模型中洪峰流量也偏大,达1505 m³/s.玉林市在横江东北部,正是降水最多的地区,其日平均径流量达

图6 2008年4月淮河上游一次洪涝过程的累积观测降水(a)、CMORPH降水(b)、日平均径流量(c)和日平均地表径流深度(d)。黑点为王家坝水文站所在

Figure 6 Observed rainfall (a), CMORPH rainfall (b), daily mean streamflow (c) and daily mean surface free water depth (d) of Huaihe River upstream during a flood in April 2008. The black dot is the position of Wanjiaba hydrology station

10 m^3/s 以上, 地表径流深度30 mm/d以上, 为轻度涝。

受冷暖空气共同影响, 6月7~17日, 珠江流域自西向东连续发生了3次强降雨过程, 全流域11 d累积面平均雨量为253 mm, 其中西江支流桂江、柳江、北江、东江、三角洲地区面平均雨量300~360 mm, 降雨笼罩面积300 mm以上22万平方千米, 400 mm以上9.6万平方千米, 500 mm以上3.2万平方千米, 过程最大点雨量达837 mm. 多个站点水位超过警戒线, 甚至超过有建站观测以来的最大记录. CMORPH降水在这几天总量比观测降水小很多, 尤其是其中300 mm降水以上的区域面积比观测小了很多, 只有大约1.1万平方千米, 甚至比观测500 mm以上的面积还要小. 但是100 mm以上的面积两者相当, 相差不超过10%, 空间分布也极其相似. 模型输出的河流径流量比实际观测小很多, 如苍梧站洪峰时流量高达14200 m^3/s , 但系统后报最大只有6700 m^3/s , 且洪峰出现时间也晚20 h左右; 系统后报的桂林阳朔站等径流量也比观测值小. 由于CMORPH降水资料比实际降水小很多, 所以系统后报径流深度大多只有30 mm/d, 只有少数地方超过50 mm/d. 由于降水资料与实际降水

有较大偏差, 所以后报出来的径流量和径流深度与实际偏小.

3 总结与讨论

本文首先使用多种高分辨率卫星遥感资料驱动分布式水文模型CREST运行, 建立起中国实时的高分辨率洪涝监测、预报系统. 其中实时输入数据主要有甚高时空分辨率的卫星降水CMORPH和月平均FFWS-NET潜在蒸散发资料. 而下边界数据则是多种高分辨率卫星遥感数据如DEM、植被类型等.

系统模拟、预报的蒸散发、土壤湿度、河道径流量等水文学基本变量空间分布及时间演变基本合理. 虽然在量值上和实际观测有一定的偏差, 但是空间分布和观测相比是非常一致的. 通过不同地区的多个水文站点2 a左右的水文过程线(流量过程线)来看, 系统能较好地模拟、预报这些站点的流量涨落. 在有的站点对流量的变化幅度模拟存在较明显偏差, 但是对其变化的位相变化模拟还是比较准确的, 表明系统的模拟效能总体还是比较好的. 值得注意的是, 由于系统中所用水文模型的热力学过程处理比较简

单,因此导致对蒸散发的模拟有一定的偏差;同时对由融雪、冰冻等热力学原因引起的水文过程无法正确地模拟、预报,因此对北方冬春季河流径流量等的模拟和预报是有较大偏差的。

通过对系统后报水文变量结果的分析,同时对2008~2011年的几次洪涝进行了验证分析,认为这个洪涝灾害监测、预报系统还是基本能正确地得到洪涝灾害的信息,能监测和预报洪涝发生的时间和波及的范围,有较大的实用价值。但是具体的洪涝灾害分级和定量判定(例如重现期的估计)等还需要更多的工作。

由于采用的卫星遥感降水数据和遥感DEM的误

差,以及由于系统所用模型某些物理模块过于简化等原因,导致系统后报结果相对实际观测还有一定偏差。为了减小这种偏差,则需要更高精度的遥感数据以及改进模型的物理模块等。

此外,本系统实时运行,可以准实时地监测全国的洪涝情况,对河道洪峰则有一定的预报提前量,具体预报时效则与流域大小和上游降水地距离等因素有关。为了进一步延长洪涝预报的预见期,还可以进一步加强水文气象的学科结合,加大定量降水预报(quantitative precipitation forecast, QPF)如WRF(weather research forecasting model)等气象模式预报降水的研究应用,增加洪水预报的时效。

参考文献

- 1 Ye D Z, Huang R H. Advances, results and problems of the project "investigation on laws, causes and predictions of droughts and in the Yellow River valley and the Yangtze River valley of China" (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 1991, 6: 24-29 [叶笃正, 黄荣辉. 我国长江黄河两流域旱涝规律成因与预测研究的进展、成果与问题. *地球科学进展*, 1991, 6: 24-29]
- 2 Huang R H. The study in characteristic, attribution, and prediction of climatic disasters in China (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 1999, 14: 188-192 [黄荣辉. 我国气候灾害的特征, 成因和预测研究进展. *中国科学院院刊*, 1999, 14: 188-192]
- 3 Huang R H, Zhou L T. Research on the characteristics, formation mechanism and prediction of severe climatic disasters in China (in Chinese). *J Nat Disasters*, 2002, 11: 1-9 [黄荣辉, 周连童. 我国重大气候灾害特征, 形成机理和预测研究. *自然灾害学报*, 2002, 11: 1-9]
- 4 Ding Y H, Zhang J Y. *Heavy Rainfalls and Floods* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2009 [丁一汇, 张建云. 暴雨洪涝. 北京: 气象出版社, 2009]
- 5 The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *The Flood in 1998 of China* (in Chinese). Beijing: China Water & Power Press, 1999 [中华人民共和国水利部. 中国'98大洪水. 北京: 水利水电出版社, 1999]
- 6 Wang H J, Matsuno T, Kurihara Y. Ensemble hindcast experiments for the flood period over China in 1998 by use of the CCSR/NIES atmospheric general circulation model. *J Meteorol Soc Jpn*, 2000, 78: 357-365
- 7 Wang H J. Characteristics of the atmospheric general circulation in three flooding years in China (in Chinese). *Q J Appl Meteorol*, 2009, 11: 79-86 [王会军. 关于我国几个大水年大气环流特征的几点思考. *应用气象学报*, 2000, 11: 79-86]
- 8 Tan G, Xia J, Li X. Hydrological prediction in ungauged basins (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2004, 26: 192-196 [谈戈, 夏军, 李新. 无资料地区水文预报研究的方法与出路. *冰川冻土*, 2004, 26: 192-196]
- 9 Liu S X, Xia J, Mo X G. Advances in predictions in ungauged basins (in Chinese). *Water Res Hydropower Eng*, 2005, 36: 9-12 [刘苏峡, 夏军, 莫兴国. 无资料流域水文预报(PUB计划)研究进展. *水利水电技术*, 2005, 36: 9-12]
- 10 Yang D, Koike T, Tanizawa H. Application of a distributed hydrological model and weather radar observations for flood management in the upper Tone River of Japan. *Hydrol Process*, 2004, 18: 3119-3132
- 11 Lu M, Koike T, Hayakawa N. Distributed XinAnJiang model using radar measured rainfall data. In: *Proceedings of International Conference on Water Resources & Environmental Research: Towards the 21st Century*, 1996, 1: 29-36
- 12 Yilmaz K K, Hogue T S, Hsu K, et al. Intercomparison of rain gauge, radar, and satellite-based precipitation estimates with emphasis on hydrologic forecasting. *J Hydrometeorol*, 2005, 6: 497-517
- 13 Young C B, Bradley A A, Krajewski W F, et al. Evaluating NEXRAD multisensor precipitation estimates for operational hydrologic forecasting. *J Hydrometeorol*, 2000, 1: 241-254
- 14 Wang S D, Pei C, Guo Z M, et al. Evaluations on Chinese next generation radars coverage and terrain blockage based on SRTM data (in Chinese). *Clim Environ Res*, 2011, 16: 459-468 [王曙东, 裴翀, 郭志梅, 等. 基于SRTM数据的中国新一代天气雷达覆盖和地形遮挡评估. *气候与环境研究*, 2011, 16: 459-468]
- 15 Hong Y, Adler R F, Hossain F, et al. A first approach to global runoff simulation using satellite rainfall estimation. *Water Resour Res*, 2007, 43: W8502, doi: 10.1029/2006WR005739

- 16 Hong Y, Adler R F, Negri A, et al. Flood and landslide applications of near real-time satellite rainfall products. *Nat Hazards*, 2007, 43: 285–294
- 17 Hossain F, Katiyar N, Hong Y, et al. The emerging role of satellite rainfall data in improving the hydro-political situation of flood monitoring in the under-developed regions of the world. *Nat Hazards*, 2007, 43: 199–210
- 18 Yong B, Ren L L, Hong Y, et al. Hydrologic evaluation of multisatellite precipitation analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: A case study in Laohahe basin, China. *Water Resour Res*, 2010, 46: W7542, doi: 10.1029/2009WR008965
- 19 Yong B, Hong Y, Ren L L, et al. Assessment of evolving TRMM-based multi-satellite real-time precipitation estimation methods and their impacts on hydrologic prediction in a high latitude basin. *J Geophys Res*, 2012, 117: D09108, doi: 10.1029/2011JD017069
- 20 Huffman G J, Bolvin D T, Nelkin E J, et al. The TRMM multisatellite precipitation analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *J Hydrometeorol*, 2007, 8: 38–55
- 21 Cronshey R. Urban hydrology for small watersheds. Technical Report. US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Conservation Engineering Division, 1986
- 22 de Roo A P J, Gouweleeuw B, Thielen J, et al. Development of a European flood forecasting system. *Int J River Basin Manag*, 2003, 1: 49–59
- 23 Gourley J J, Erlingis J M, Hong Y, et al. Evaluation of tools used for monitoring and forecasting flash floods in the United States. *Weather Forecast*, 2012, 27: 158–173
- 24 Werner M, Reggiani P, de Roo A, et al. Flood forecasting and warning at the river basin and at the European scale. *Nat Hazards*, 2005, 36: 25–42
- 25 Looper J P, Vieux B E. An assessment of distributed flash flood forecasting accuracy using radar and rain gauge input for a physics-based distributed hydrologic model. *J Hydrol*, 2012, 412–413: 114–132
- 26 Moreno H A, Vivoni E R, Gochis D J. Limits to flood forecasting in the Colorado front range for two summer convection periods using radar nowcasting and a distributed hydrologic model. *J Hydrometeorol*, 2013, 14: 1075–1097
- 27 Zhao L N, Liu Y, Dang H F, et al. The progress on application of ensemble prediction to flood forecasting (in Chinese). *J Appl Meteorol*, 2014, 6: 641–653 [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. *应用气象学报*, 2014, 6: 641–653]
- 28 Bao H J, Zhao L N. Flood forecast of Huaihe River based on TIGGE ensemble predictions (in Chinese). *J Hydraulic Eng*, 2012, 2: 216–224 [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, 2: 216–224]
- 29 Cui C G, Peng T, Yin Z Y, et al. Research progress on storm and flood forecasting (in Chinese). *Adv Meteorol Sci Technol*, 2011, 2: 32–37 [崔春光, 彭涛, 殷志远, 等. 暴雨洪涝预报研究的若干进展. *气象科技进展*, 2011, 2: 32–37]
- 30 Wang J H, Hong Y, Li L, et al. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model. *Hydrol Sci J*, 2011, 56: 84–98
- 31 Li L, Wang J H, Hao Z C. Parameter tolerance to forcing data, case study of Coupled Routing and Excess STorage (CREST) hydrological model in Head region of Yellow River of China. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2010, 12: 6170
- 32 Wang J H, Li L, Hao Z C. Transferability of hydrological model parameters between basins and global runoff simulation. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2010, 12: 6171
- 33 Khan S I, Hong Y, Wang J H, et al. Satellite remote sensing and hydrologic modeling for flood inundation mapping in lake Victoria Basin: Implications for hydrologic prediction in ungauged basins. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, 49: 85–95
- 34 Xue L, Fan Z, Hao Z, et al. The applicability analysis on runoff simulation using global average monthly evaporation data. In: *IEEE 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE)*, 2011. 830–833
- 35 Joyce R J, Janowiak J E, Xie P P, et al. CPC MORPHING Technique (CMORPH). *Measur Precipitation From Space*, 2007: 307–317
- 36 Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J Hydrometeorol*, 2004, 5: 487–503
- 37 Monteith J L. Evaporation and environment. *Symp Soc Exp Biol*, 1965, 19: 205–234
- 38 Friedl M A, Mciver D K, Hodges J, et al. Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. *Remote Sens Environ*, 2002, 83: 287–302
- 39 Mu Q, Heinsch F A, Zhao M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sens Environ*, 2007, 111: 519–536
- 40 Mu Q, Zhao M, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sens Environ*, 2011, 115: 1781–1800
- 41 Berrisford P, Dee D, Fielding K, et al. The ERA-Interim Archive. *ERA Report Series*. 2009, 1
- 42 Betts A K, Köhler M, Zhang Y. Comparison of river basin hydrometeorology in ERA-Interim and ERA-40 reanalyses with observations. *J Geophys Res*, 2009, 114: D2101

- 43 Dee D, Uppala S, Department E R. Variational bias correction in ERA-Interim. ECMWF Reports, 2008
- 44 Huang L M, Shen B, Mo S H, et al. Quantitative estimation of annual runoff variation from the Hetian River, Xinjiang (in Chinese). J Xi'an Univ Technol, 2005, 21: 289–292 [黄领梅, 沈冰, 莫淑红, 等. 新疆和田河年径流量变化的定量估算. 西安理工大学学报, 2005, 21: 289–292]

补充材料

图 S1 四川金溪水文站水文过程图

图 S2 广西马陇水文站水文过程图

图 S3 2008 年 4 月广西东南部一次洪涝过程的累积观测降水、CMORPH 降水、日平均径流量和日平均地表径流深度

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

A high-resolution flood forecasting and monitoring system for China using satellite remote sensing data

WANG Jun¹, WANG HuiJun¹, HONG Yang²

¹Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

²School of Civil Engineering and Environmental Science, University of Oklahoma, Norman, OK 73072, USA

Flood disasters occur frequently in China, resulting in property damage and fatalities. To reduce these risks, a high-resolution flood forecasting and monitoring system was developed based on a simple, distributed hydrological model: CREST. There are mainly four parts in this flood forecasting system, which are the data pre-processing and input module, the distributed hydrological model, the results output and post-processing module, as well as the results verification module. The data inputted in this system are high-resolution CMORPH satellite remote sensing precipitation and surface condition data, including ASTER DEM, HWSO soil types and MODIS vegetation and land cover types, or so. Those data were interpolated to 1 km spatial resolution and then used to drive the hydrological model to run. The CREST model was developed to provide rapid online prediction of large area which may be continental scale or even global scale, while it is also applicable at small scales, such as small basins. It can simulate the spatiotemporal variation of water and energy fluxes as long as storages on a regular grid with the grid cell resolution being user-defined, which ranges from meters to kilometers. The results outputted from the forecasting system are hydrological variables like soil moisture, potential and actual evapotranspiration, surface and river runoffs, etc. Results were then applied to GIS system and then translated into flood disaster warning information in the data output and post-processing module of the forecasting system. Both hydrological variables and flood disaster warning information will be tested and verified in the results verification module. With the 1 km horizontal spatial resolution, the forecasting system successfully simulated basic hydrological variables and processes such as actual evapotranspiration, soil moisture, and surface runoff according to the analysis and comparison with observation data. System hindcasted flood disaster information of several flood events were carefully analyzed. The results showed that the hydrographs of several stations hindcasted by the forecasting system demonstrated that the forecasting system can approximately hindcast river runoffs and streamflows. The performance of the forecasting system was tested by analyzing several real cases of flooding in different places in China, and results indicated that the system hindcasted flood information, including flood timing and spatial extent, were useful for disaster preventions and mitigations.

flood disasters, high-resolution numerical model, satellite remote sensing precipitation, distributed hydrological model

doi: 10.1360/N972015-00489