

韩佳芮, 严中伟, 矫梅燕, 等. 以用户为导向的交互式预报系统及应用研究[J]. 气象, 2011, 37(6): 649-658.

# 以用户为导向的交互式预报系统及应用研究<sup>\*</sup>

韩佳芮<sup>1,2</sup> 严中伟<sup>2</sup> 矫梅燕<sup>3</sup> 叶 谦<sup>4</sup> 赵琳娜<sup>5</sup>

1 中国气象局培训中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 中国气象局, 北京 100081

4 科罗拉多大学, 美国 90304

5 国家气象中心, 北京 100081

**提 要:** 基于近年来涌现的有关新一代气象预报系统发展的认识, 本文提出用户导向的交互式预报系统的概念模型。新系统强调在用户信息分析的基础上, 发展从用户出发再回到用户不断自我改善的预报流程。系统组成的关键模块包括: 用户端风险决策动态需求分析模块、物理预测模块、用户目标量的降尺度模块, 用户端专业耦合模块及用户风险决策模块。文中阐述了系统中各模块间的联系、用户端信息在系统中的反馈作用以及具体的“交互式”方式。以临沂地区水文用户为例, 以引发洪涝的降水事件为预报对象, 利用 TIGGE 全球超集合预报, 初步构建了一个临沂水文用户导向的可能致洪降水交互式预报系统。这个具备迭代式自我完善功能的新型预报系统包含了汛期随时变化的用户决策信息、由前期影响雨量和当前水文条件决定的可变致洪降水阈值以及一个动态的用户端预报水平和不确定性评估模块。初步结果表明, 结合用户端信息的预报优于未考虑用户信息的预报结果, 从而更直接地帮助用户进行防汛决策。个例研究也为发展更完整的用户导向预报系统提供了参考。

**关键词:** 用户端信息, 以用户为导向, 交互式预报系统, TIGGE, 集合预报

## Developing a User-Oriented Interactive Forecast System

HAN Jiarui<sup>1,2</sup> YAN Zhongwei<sup>2</sup> JIAO Meiyuan<sup>3</sup> YE Qian<sup>4</sup> ZHAO Linna<sup>5</sup>

1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 China Meteorological Administration, Beijing 100081

4 Colorado University, Boulder CO 90304, USA

5 National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** A framework of dynamic user-oriented interactive forecast system is proposed. The new-generation forecast system contains an initial user-end module for configuring the dynamic forecast target, the physical predictive, downscaling components, user-end professional models, and a user-oriented assessing module in association with decision-making at the user-end. A case study involving application of current global ensemble forecasts (TIGGE) of rainfall for hydrological users in Linyi, a region rich in rivers and reservoirs in eastern China, is conducted in order to highlight interactive involvement of the user-end information during forecast process. An iteratively self-improving forecast system, involving changing decision-making information throughout a flood season, a changing threshold for flood-leading rainfall depending on previous weather and concurrent hydrological conditions, and a dynamic user-oriented assessing process of

\* 公益性行业(气象)科研专项“面向 TIGGE 的集合预报关键应用技术研究(GYHY200706001)”和“基于多模式集合预报的交互式应用技术研究(GYHY200906007)”资助

2010 年 4 月 9 日收稿; 2010 年 7 月 4 日收修定稿

第一作者: 韩佳芮, 主要从事以用户为导向的交互式预报系统和气象服务的相关研究工作. Email: hanjr@cma.gov.cn

concurrent skill and uncertainty of the prediction, is built up. It is demonstrated how a forecast of flood-leading rainfall leads to a better warning signal for the user with interactive involvement of the user-end than without.

**Key words:** user-end information, user-oriented, interactive forecast system, TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble), ensemble forecast

## 引言

过去近一个世纪里,尤其是最近的 20—30 年以来,随着人们对大气运动规律认识的深入和数值天气预报模式的发展及观测技术手段的提高,气象预报预测水平有了显著的提高。目前气象界仍在为提高预报预测水平而开展多方面的努力,如发展无缝隙观测网络和目标观测技术、提高各种观测资料的同化水平、改进模式参数化等。然而,由于天气气候系统的混沌本质,确定性预报水平的再提高变得越来越困难,尤其是对一些局地发生的突发性、转折性天气过程的预报结果往往不尽人意<sup>[1-3]</sup>。而正是这些突发性小概率极端天气事件常常给国民经济人民生活带来巨大的损失。

气象预测的目的是帮助用户在自然风险条件下应用具有不确定性的预报信息进行趋利避害的决策。在现有气象业务水平上,任何预报都难以完美。更重要的是,由于缺乏对用户端信息的考虑,在特殊情况下即使相当“准确”的预报也难以达到正确的警示效果,无助于提高用户应用不确定信息的能力<sup>[4-5]</sup>,因而无法达到帮助用户实际决策的目的<sup>[6]</sup>。

对大多数极端天气事件而言,气象预测“不准”已是常识,用户的大量决策必须基于不确定的气象风险条件根据“趋利避害”的原则作出,也就是说,结合用户决策信息,恰当利用气象预测不确定性,可以提高气象预报的价值。近年来在气象界得以迅猛发展的集合预报,为分析预报不确定性提供了基础,而根据用户信息的反馈,以提高用户端应用水平为导向,则能够大大增加预报水平的改进余地<sup>[2]</sup>。

近年来,这类基于预报不确定性,结合用户需求信息,构建以用户为导向预报系统的思想逐步发展起来<sup>[7-9]</sup>,即:新的预报系统不仅需要提高气象学意义上的预报质量,更需要考虑用户的具体需求,实现从“用户到预报再到用户”的循环式预报链条。此类思想已被国际学术界广泛接受,并得到积极推广,如世界天气研究计划(WWRP)下的 TIGGE 计划

(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) 所提出的“交互式预测系统(Global Interactive Forecast System, GIFS)”就是该类思想的代表<sup>[2]</sup>。进一步地,叶笃正等<sup>[10]</sup>提出了耦合用户端信息发展气象预报体系的构想,强调了在改善用户端应用水平的同时,还可通过用户端反馈促成整体预报水平的提高。这些思想无疑丰富了用户主导预报系统的内涵。

然而,尽管学术界已开始重视用户主导预报的意义,却仍然缺乏如何发展这种新型预测系统的具体思路。其中特别薄弱的环节在于,如何有效地构建从用户端到物理气象预测系统的联系。

基于前人的研究和研究中存在的问题,本文将着重讨论用户导向交互式预报系统的概念模型及其关键组成模块;并以临沂水文用户为例,在充分调研用户端信息的基础上,提出在预测过程中联系用户端与决策有关的信息的具体方案;以引发局地洪涝的降水事件概率为预测目标,尝试把 TIGGE 全球集合预报信息转化到决策有用信息的实现途径,从中提炼出用户导向预报系统的一个具体实践范例。

## 1 以用户为导向的交互式预报预测系统的基本框架

对用户来说,忽视决策应用需求的预报结果不仅没有价值,还可能带来负面影响<sup>[11]</sup>。因此,用户导向预测系统首先需要以用户端信息分析为前提,确定与用户决策应用相匹配的预报目标,有针对性地开展科研和业务应用<sup>[12]</sup>。这方面正是现有预报研究业务工作的薄弱环节。因此,下面先就如何开展用户端信息分析作一专门讨论,再提出构建用户导向预测系统的原则框架,并简述系统各基本模块及其与用户端信息的联系。

### 1.1 用户端信息分类及其在预测系统中的作用

用户端信息可分为两类:客观物理环境相关信息和气象风险决策相关信息。

客观物理环境相关信息大都可以通过用户端实际观测和应用数据来获得,如某水库的即时观测降水量,流域内土壤湿度,下垫面状况以及用户长期的历史天气气候观测和预测资料等。这些信息可以较直接地应用到现行物理预报模式中,随时为模式积分提供更为确切的初、边值条件,同时也是检验预报结果、评估现有预测系统针对特定用户需求存在的缺陷等方面的基础。

气象风险决策相关信息主要指在风险决策中用户的具体需求、用户所面对的气象风险相关信息及应对风险的决策规则等。特别是对用户决策具有决定性影响的关键气象因素,相关的环境、地理要素及相应决策规则。

通过对气象风险决策相关信息的研究,有助于明确随时变化的、用户所需的具体预报目标,从而确立预测系统的具体预报方案,如用户所需预报的时空尺度,预报要素,特别是影响用户重大决策的关键气象阈值等。需要指出的是,关键气象阈值在一些情况下可能是相当确定的,例如风力是否达到 4 级以上对于颐和园是否开放湖上游船具有决定性意义。但在很多情况下,用户决策有关的气象阈值是随着用户端具体情况变化而变化的。

考虑用户需求随时而变,就要注意到,气象预测模式对不同时空尺度,不同阈值的预测目标量、不同天气气候背景等条件下的预测能力也不相同<sup>[13-14]</sup>。因此,基于用户端信息建立动态的预报预测评估系统是必要的。这个用户端动态评估系统,不仅将更确切地把预测不确定性传达至用户帮助有关决策,还可以为改善现有预测系统存在的缺陷提供更完善的分析基础。

### 1.2 以用户为导向的气象预测系统的运作原则

叶笃正等<sup>[10]</sup>提出耦合用户端应用信息的新颖预报预测系统框架。在此基础上,结合上述讨论,提出图 1 所示的一个包含更具体用户导向含义的预测系统框架。在这里我们偏重于中短期天气预报及其应用,由于集合预报的优越性<sup>[14]</sup>,我们更多地强调以集合预报为基础发展用户模块。

用户导向预测系统的运作从原则上说应该包含如下过程:

(1) 首先根据用户具体决策需求和决策环境对用户端信息进行分析,由此确定动态的预报目标量,即用户所需的关键气象要素及其风险阈值等。这里

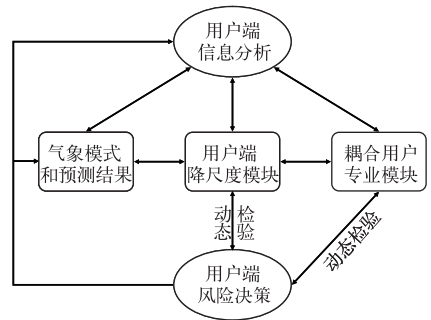


图 1 用户导向交互式预报模型基本框图

Fig. 1 A schematic user-oriented forecasting system

强调“动态”,是指决策需求随天气系统的发展和相应环境的变化而变化。

(2) 针对用户所需的预报要素及其时空尺度,分析初始场敏感扰动分布规律,确定集合预报所需扰动初始场,积分模式以获得大量集合预报结果;过程中还可运用适应性(关键区域)观测及其同化等技术,不断改进预报结果。

(3) 对模式预报结果进行降尺度处理,现行预报系统的格点预报与特定用户端的站点预报存在差异,用户预报目标量也不一定是模式直接输出要素,因而需要根据用户端信息通过耦合区域气象模式的方式(动力降尺度)或根据前期预测评估等分析对模式输出结果修正和加工(统计降尺度)。

值得注意的是,在气象模式中耦合用户专业模式(如水文模式),不仅有助于为用户提供所需的专业预报信息(例如,洪水预报),还有助于完善气象预测模式自身的发展。

(4) 结合集合预报及其不确定性信息,通过用户风险决策分析,为用户决策提供参考意见。在此,有必要对预报进行动态检验评估,即基于用户端前期实况信息进行预报评估检验分析,从而推断当前(特定环境背景、决策需求和天气形势下的)目标量(如某种气象阈值)预报结果的可信度,这是用户利用当前预测结果作风险决策所需的重要依据。

## 2 用户导向的交互式预报系统的关键模块

根据上述基本框架,系统的关键组成模块应包括:用户端风险决策动态需求模块、物理预测模块、用

户目标量的降尺度模块,用户端专业耦合模块及用户风险决策模块等。对各模块功能简要说明如下。

**用户端风险决策动态需求模块:**是用户导向交互式预报系统的特征性模块。通过调查研究用户端专业(如水文)观测资料、风险评估和决策需求等方面的信息,找出影响用户决策中的气象相关风险关键量( $T$ ),并结合用户的风险决策过程研究找出该关键量的影响因子和变化规律,以便为预报系统提供与动态决策需求相应的动态预测目标。系统中其他模块均是以该动态预测目标为基础进行设计实施的。因此,用户端风险决策动态需求模块是实现交互预报的基础,与系统中其他模块有直接或间接的联系。

**物理预测模块:**是用户导向交互式预报系统的核心技术支撑。该模块以传统气象预报模式为基础,一般地应该耦合有一个用户端专业模式(如洪水预测所必需的水文模式)。这里要强调的是,由于预报的本质是不确定性,需要开展集合预报,以定量描述气象预测的不确定性<sup>[1,15]</sup>。一些研究和实践表明,包含不确定性信息的概率预报比之“确定性”预报能为用户带来更多的社会经济效益<sup>[16]</sup>。目前,以我国自主研发的 GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 模式系统<sup>[17-18]</sup>为基础,我国的集合预报业务也正在开展。这为开展用户导向的新型预测体系研究提供了基础。

**针对用户预测目标的降尺度模块:**将格点化的气象预报模式输出结果转化为用户尺度上的有用信息。在耦合计算用户专业模式如气象-水文耦合模式时也通常需要更精细尺度上的气象要素场<sup>[19]</sup>。通过在全球模式里嵌套区域模式,称为动力学降尺度,如我国目前已投入业务应用的 GRAPES 系统。目前,统计降尺度仍然是联结模式预报和用户应用的重要手段。其直接含义是在加密观测(如卫星、雷达等非常规资料)的基础上分析不同尺度现象的关系,把给定的大尺度气象信息转换成用户尺度上的预报信息<sup>[20]</sup>。根据用户需求把模式预报(例如 TIGGE 全球集合预报)转换到用户所关心的关键量(如临沂水库区域致洪暴雨的发生概率),本质上也是降尺度,即不同尺度或类型的信息转换。

降尺度分析需要针对不同用户的决策需求来进行,因而该模块也是反映用户端信息的一个特征模块。一些在现有物理预报模块中无法体现的、但可能影响预报结果的信息,可以适当体现在此模块中。

需要注意的是,降尺度所蕴含的不确定性和集合预报所反映的不确定性,并非一回事。如何将各种不确定性适当地传递给用户决策过程中,对于不同用户也会有不同的处理方式。

**用户端专业耦合模块:**不同用户有不同需求,根据用户决策中的需求,在气象模式中耦合用户端的专业模式,将气象要素预报结果(例如降水预报)转化为用户所需的预报信息(例如洪水预报)。以水文用户为例,在防汛工作中不仅参考降水预报,还需要开展洪水预报,为此可在区域气象模式中耦合水文模式<sup>[21]</sup>。广义上这个环节也可以认为是降尺度的一种特殊形式。

**用户端风险决策模块:**预报产品与用户决策应用具体结合的模块。该模块与用户端风险决策动态需求模块相互对应,以物理预测模块为基础,在降尺度技术支持下,通过专业耦合模块,为用户决策提供结合其动态决策需求的预报,并为用户决策提供建议。而在不断的应用分析基础上,可以针对性地改进现行物理预报系统。

该模块无疑是在新系统中联接用户与物理预测模块信息交互的重要环节。其主要功能之一是实施用户对预报水平进行动态评估和校订。这里的“动态”,是强调在不同气象背景下现有模式的预报能力不同,例如在夏季风和冬季西风控制期间的降水预报水平可以大不相同,汛期期间不同天气系统导致的降水过程预报难度也不尽相同。用户在获得某个预测结果的同时,获知以往类似预报结果的可信度,以便在决策应用中做出相应的判断。这样的做法对于其决策是有用的<sup>[22]</sup>。动态评估结果累积到一定程度,一方面可反馈给预报业务/科研人员,为改进物理预报模块提供指导,另一方面可根据以往预报的偏差规律,在用户端直接对预报进行实时偏差订正<sup>[23]</sup>,提高预报结果的可用性。该模块另一重要功能是在应用中通过用户端有关信息的变化调整预报关键量,核实校准系统动态预报目标。

需要强调的是,以用户为导向的交互式预报系统中不同模块之间是相互联系的,有机结合的。其中所强调的“交互式”概念不仅是指预报与用户需求结合的交互过程,也是指风险决策与预报的交互和决策与评估反馈的交互。正是由于不同模块间彼此交互,相互影响,逐步构成自我完善的预报系统。图 2 是上述讨论的一个综合表述。下面将以临沂水文用户为例,开展以用户为导向的交互式预报系

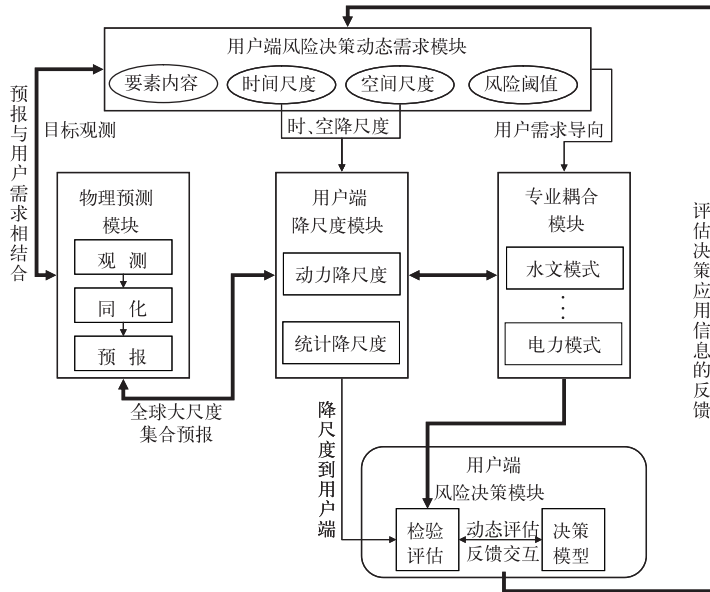


图 2 用户导向预测系统基本模块及其间联系示意  
 Fig. 2 Schematic relationships between basic modules of a user-oriented forecasting system

统的一个范例性的分析。

### 3 以临沂水文用户为导向的交互预报系统

临沂地区(32°~37°N、114°~121°E, 17250.98 km<sup>2</sup>)地处淮河流域,共有 37 座大中型水库和数百个小水库,是我国东部少有的水库富集区之一。由于其北部为山区,每年汛期(6 月 1 日至 9 月 30 日)降雨之后,易发洪水,对当地民众生命财产安全造成巨大威胁。为深入了解用户,帮助当地水文部门进行防汛决策,我们分别在 2008 年 11 月(非汛期)和 2009 年 7 月(汛期)调研临沂水文用户风险决策及其与气象的联系。通过调研得知,由于降水具有较强局地性,不仅给临沂气象部门的预报带来很大的困难,也致使当地水文部门在防汛工作中多依靠降水实况,并不使用预报。下面围绕用户防汛决策中关键气象因素,即致洪暴雨,探讨发展用户导向交互式预报系统的具体构建工作。

#### 3.1 临沂水文用户风险决策动态需求模块的构建

一般认为,50 mm·d<sup>-1</sup>以上的暴雨事件可能致洪<sup>[24]</sup>,临沂水文用户须对此部署防汛应对工作。由于决策环境的差异,致洪降水的阈值可大不相同,当

前期有大范围持续降雨时,对用户来说较小降雨也可能致洪。鉴于降雨致洪的重要作用,防汛工作中用户将可能致洪的降雨作为是否泄洪的重要参考之一,因此,本文将致洪降水(Flood-Leading Rainfall, FLR)作为预报的关键量,当预报结果就关键量显示足够大的预警信息时,就会影响用户决策。与气象定义的暴雨标准不同,致洪降水的阈值(FLR Threshold, FLRT)随各种因素不断变化,主要可归纳为三个方面:水文情况(H)、天气情况(W)和用户具体决策环境条件(D)。用函数关系表示为:

$$FLRT = f(H, W, D, t) \quad (1)$$

天气、水文和用户具体决策条件本身也包括很多因素,随时变化。对临沂水文用户来说,H 相关信息主要包括:当地流域面积、土壤饱和程度以及相关地形、植被等下垫面情况。W 相关信息主要包括:降雨中心、降雨位置、降雨强度、范围和持续时间等。D 主要是指用户端的决策条件和规则等。实际上 FLRT 涉及很多的研究内容,在此根据临沂的实地情况,进行简化处理。一般认为,暴雨(50 mm·d<sup>-1</sup>)致洪,临沂水文用户也将此阈值作为其洪水预报的启动线,因此可设 FLRT 的初值为 50 mm·d<sup>-1</sup>。

H 相关信息中最重要的是前期影响降雨量(Pa)。流域前期降雨是影响土壤含水量<sup>[25]</sup>和洪水产流<sup>[26]</sup>的主要因素。目前,通用流域前期影响降雨

量( $Pa$ )来代表雨前的土壤含水量<sup>[27]</sup>。

其计算公式为:

$$Pa_n = (Pa_{n-1} + Pa_{n-2} \times \gamma) \times \gamma \quad (2)$$

式中, $Pa_n$ 为前 $n$ 天的前期降雨量, $\gamma$ 为前期雨量日折算系数。根据经验,临沂当地 $\gamma$ 取 0.85。经验认为,当 $Pa_n$ 累积到一定极值 $\delta$ ,即 $Pa_n \geq \delta$ 时,土壤基本饱和,降雨产流增多,此时,降雨的致洪风险会加大,相应地, $FLRT$ 会降低。临沂地区 $\delta$ 的经验值为 60 mm,当 $Pa_n \geq 60$  mm(计算过程中,当 $Pa_n > 60$  mm时,取 $Pa_n = 60$  mm代入下一步计算。即 60 mm为 $Pa_n$ 的极值),可以取 $FLRT = 30 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ (有其他地区如 Rijnland 甚至可以取值为 $15 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ [28])。

$W$  相关信息中较为重要的是降雨落区等信息。在调查中发现,降雨落区影响降水致洪的风险大小。由于临沂北部为山区,洪水生成具有源短流急的特点。当降雨落区处在临沂中上游区域,降雨致洪风险大,即使小量级的降雨也会威胁到当地的安全,因此可设 $FLRT = 30 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。当降雨落区主要集中在下游时,主要影响其下游的江苏省,对临沂地区的 $FLRT$ 影响很小,可令 $FLRT = 50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。临沂地区上中下游的大致划分如图 3 所示。

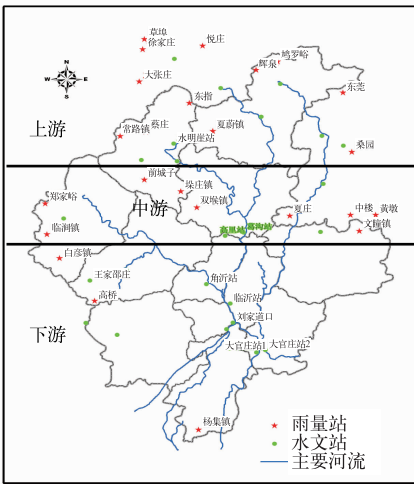


图 3 临沂流域上中下游大致划分  
Fig. 3 The upper, middle and lower reaches in Linyi Basin

$D$  决策条件中关键者是水库水位。水库水位是水库管理决策中基本条件, $FLRT$ 也与之有密切联系。根据《防汛水库运行控制指标》临沂各水库设置如下临界水位(由低到高):汛中限制水位 $<$ 汛中允许超蓄水位 $<$ 汛末计划蓄水位(兴利水位) $<$ 警戒水

位。相应 $FLRT$ 如图 4 所示,解释如下。

汛中限制水位:汛期前,各水库必须保证水库水位在汛限水位以下,是水库水位的正常状况,相应地, $FLRT$ 为初始值 $50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

汛中允许超蓄水位:汛期中,各水库可蓄水到的最高水位,当汛中水库水位超过此指标,水库需要酌量开闸,降雨的致洪风险变大,相应地, $FLRT = 30 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

汛末计划蓄水位(兴利水位):为兴利,汛末各水库蓄水到的最高水位,但在汛中水位超过此指标,水库必须开闸放水,因此, $FLRT = 0.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

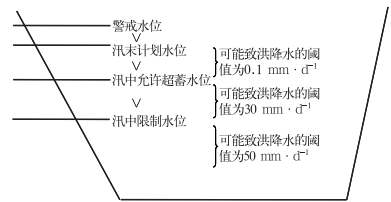


图 4 不同水库水位与致洪降水阈值 $FLRT$ 的关系

Fig. 4 The relationship between the reservoir operating water level and  $FLRT$

FL: Flood Limiting water level;  
FPM: Flood Permissible Maximum water level; FWM: Flood Warning Maximum water level; FLRT: Flood-Leading Rainfall Threshold

根据上述分析,初步构建出用户端风险决策动态需求的基本模块。根据用户信息确定出动态的可能致洪降雨阈值,即 $FLRT$ 的三个预报目标阈值: $50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $30 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $0.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。需要强调的是, $FLRT$ 应为随多因子变化的函数,但为简要说明用户端提供的动态预报目标,本文对 $FLRT$ 简化处理。并将预报时空尺度锁定在临沂区域未来 24 小时。

### 3.2 以临沂水文用户为导向的预测系统雏形

基于用户端风险决策动态需求模块提供的预报目标,考虑现有预报模式产品(TIGGE)的局限性,我们通过降尺度分析把 TIGGE 结果转换为临沂区域 $FLRT$ 以上降水事件发生概率的预报。并基于该区域多站实测降水,分别针对暴雨( $50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),大雨( $30 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )和小雨( $0.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )进行评估工作。

物理预测模块结果主要包括 TIGGE 中中国气象局(CMA)(BABJ,15 个预报成员)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)(ECMF,51 个预报成员)、美国国家环境预报中心(NCEP)(KWBC,21 个预报成员)三大模式集合预报产品(00 时次,24 小时预报),以及三大集合预报中心集合的超集合预报产品(87 个预报成员)。为方便比较,目前所有模式预报产品统一转化到  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  的格点上。由于模式在不同降雨阈值上预报能力不同<sup>[29]</sup>,可以分别针对不同的 FL-RT 预报结果进行偏差订正。

用户目标量的降尺度模块通过三条途径来实现。其一是利用 GRAPES 区域模式在全球集合预报结果驱动下进行动力降尺度预报。区域耦合模式的运用有利于提高局部 FLRT 事件的预测能力。其二是针对临沂区域( $3 \times 3$  格距),通过统计分析,将 TIGGE 集合预报结果直接转化为区域 FLRT 事

件的发生概率预报。也可以在 GRAPES 区域气象模式中耦合用户端专业模块即水文模式 XXT(Xinnanjiang X Topmodel)<sup>[30]</sup>,可为用户直接提供洪水径流预报。

用户端风险决策模块一方面作为产品输出端口将预报产品与用户决策应用相结合,另一方面,通过用户应用结果的反馈,对预报产品进行动态评估检验。由于现有 TIGGE 资料有限,还无法开展大量试验分析。但理论上,实时的动态预报评估检验结果可以记录在数据库中,在系统不断运行应用中逐步积累,获得更完善的评估校验结果。此外,应用中用户产生的新需求也会反馈回至用户风险决策需求模块,调整动态关键量的确定。这也是用户导向预测系统实现“自我改善”的本意所在。图 5 勾勒出临沂水文用户导向的交互式预报系统概况。

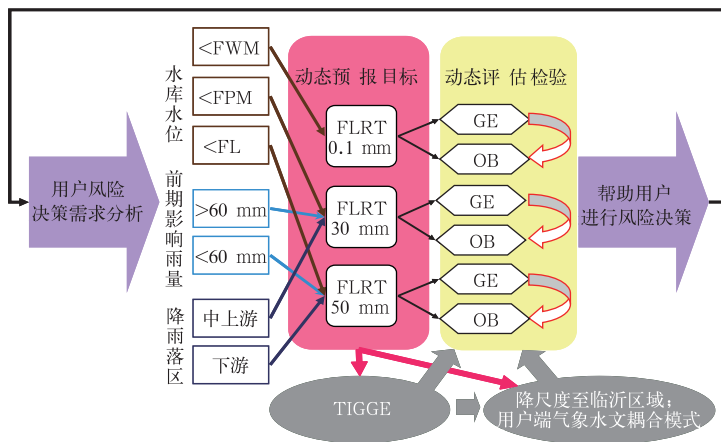


图 5 临沂水文用户导向的交互式预报系统概要示意图  
该系统强调在用户信息分析的基础上,发展从用户出发再回到用户、不断自我改善的预报流程

水库水位:汛中限制水位(FL),汛中允许超蓄水位(FPM),  
汛末计划蓄水位(FWM);可能致洪降水(FLRT);  
针对特定降雨阈值的集合预报(GE);观测(降雨)

Fig. 5 Schematic Linyi hydrological-user-oriented interactive forecasting system

Flood Limiting water level (FL); Flood Permissible Maximum water level (FPM); Flood Warning Maximum water level (FWM);  
Flood-Leading Rainfall Threshold (FLRT); Grand Ensemble forecast on specific rainfall threshold (GE); Observations (OB)

### 3.3 初步结果分析

用户端风险决策动态需求模块是用户为导向的预报预测系统的特征模块,而用户风险决策信息反馈对预报的作用则是该系统与传统预报系统的主要

区别,因此,下面主要以用户风险决策需求分析模块和用户风险决策模块为重点,简介临沂水文用户交互式预测系统的一些结果,说明该系统预报与传统预报的区别。为简单起见,在系统中所考虑的用户信息中以前期影响雨量为主,而降雨落区和水库水

位两类主要涉及到降尺度和实时反馈等研究内容,暂不予考虑。

研究个案主要选取 2008 年 7 月 9—26 日期间的降雨过程,根据临沂水文用户汛期防汛工作的需求,本文将基于 TIGGE 三大中心的集合预报产品(CMA,ECMWF,NCEP 及三大中心的超集合预报产品)对该时间内段临沂区域未来 1 日的可能致洪降雨进行概率预报。

由于遍布水库河道周围的水文雨量站更能反映用户局地区域的降雨状况,本文主要以临沂水文站降水实况为基础计算前期影响雨量,与预报结果进行比对。根据前期影响雨量公式(1)的计算得到,前期影响雨量在 23 日和 24 日达到 60 mm 的极值,相应地  $FLRT$  由  $50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  调整为  $30 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,实际上  $FLRT$  的变化,代表着预报目标的动态变化和调整(如图 6 所示)。

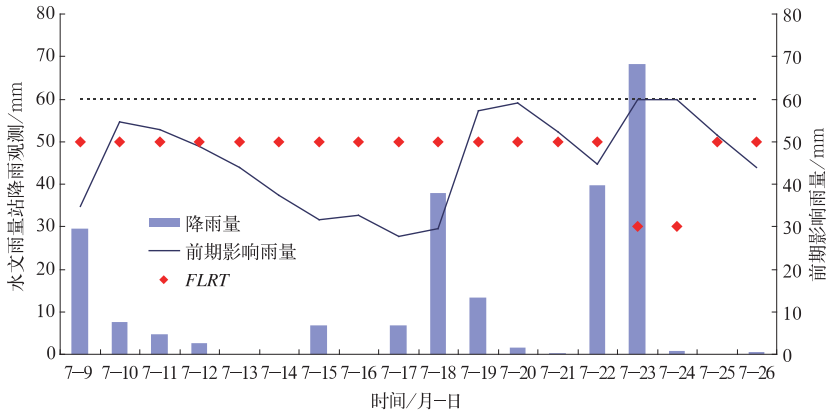


图 6 临沂流域 2008 年 7 月 9—26 日期间的前期影响雨量及相应的可能致洪降水阈值

Fig. 6 The effective preceding rainfall and FLRT, 9—26 July 2008, Linyi Basin

将这样的结果代入可能致洪降水预报系统中,结果显示:在 7 月 23 日未考虑用户信息的可能致洪降水概率预报仅为 0.2(图 7a),而考虑用户端信息的概率预报为 0.48 左右(图 7b)。考虑用户端信息的预报结果明显高于未考虑用户信息的,与临沂地区洪水径流的对比发现,考虑用户端信息的预报对次日发生的洪峰有更强的预警作用,临沂水文用户可以根据该预报结果进行相应的防汛筹备工作。这在一定程度上说明考虑用户端信息的可能致洪降水概率预报对用户防汛决策是有帮助有意义的(图 7a, b)。

需要说明的是,从 FLRT 预报到用户决策是复杂的非线性过程,就该个例分析来说,FLRT 概率预报还未能天气学意义上提高预报的准确率,而是通过考虑用户端信息确定特定的预报目标,针对该目标有的放矢地分析集合预报,从而提高特定用户端的预报价值。文中所给出的范例仅示意性的说明用户信息对预报系统的导向作用,并通过简化的预报结果对比分析说明用户导向的意义。实际用户决策的过程相当复杂,涉及到更为复杂的因素,还需在

下一步研究中更多地考虑用户端风险决策的需求及用户具体的决策规则,以发展和完善这一用户导向的预报系统。

## 4 结论和讨论

本文探讨以用户为导向的气象预测系统发展途径。强调根据用户信息分析,发展从用户需求出发再回到用户应用、具备自我改善功能的新型预测系统,提出系统中的关键组成模块及其相互关联的途径。以引发洪涝的降水事件为目标预测量,根据对用户实地调研,尝试性地构建了一个以临沂水文用户为导向的预测系统范例。主要结论有:

(1) 在前人研究的基础上,发展丰富了以用户为导向的交互式概念模型,提出具体的关键组成模块;在对具体用户的实地调研基础上,发展了从“用户端”到“物理预报系统”的联系途径及其反馈链。在新的预报系统中,用户的风险决策需求相关信息将决定集合预报的形成和结果分析,并通过用户端动态预报评估为改进预报系统提供基础。



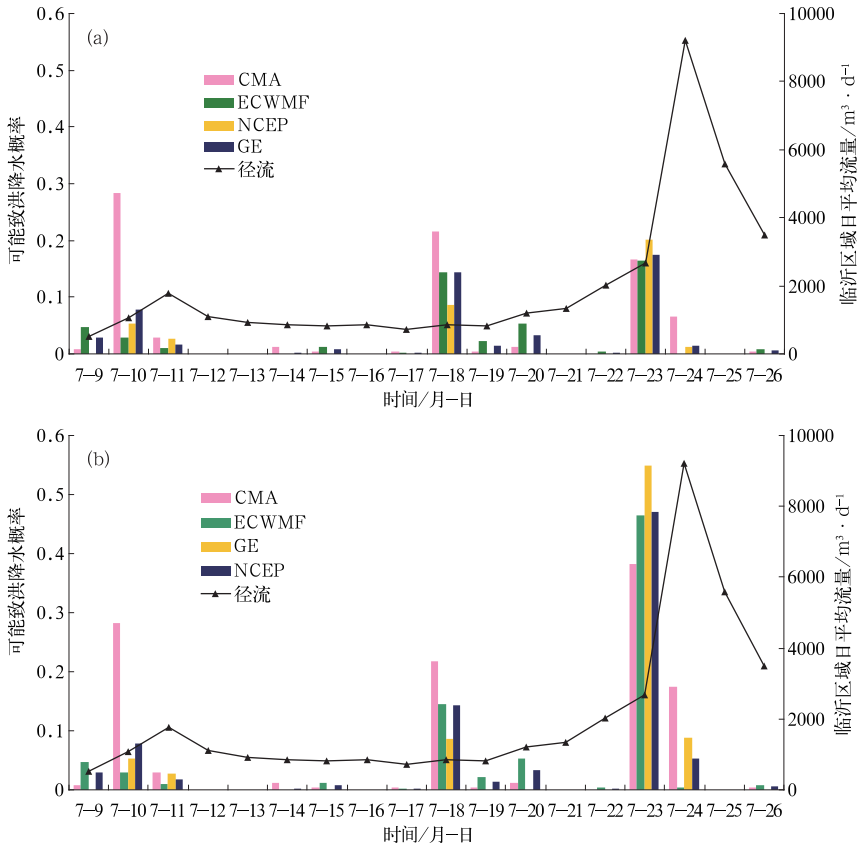


图 7 2008 年 7 月 9—26 日临沂区域,CMA,ECMWF,NCEP 集合预报中心和超集合预报对可能致洪降雨的概率预报与临沂区域日平均径流对比图 (a)和(b)分别是未考虑和考虑用户端反馈信息情况下得到的可能致洪降水概率预报结果。结果表明,在考虑用户信息之后,7 月 23 日可能致洪降雨概率增加到 0.48 左右,明显高于未考虑用户信息的预报概率(低于 0.2),这对 7 月 24 日的洪峰有更强警示作用

Fig. 7 Forecast of the probability of flood-leading rainfall events as a flood-warning precursor in Linyi during 9—26 July 2008, based on CMA, ECMWF, NCEP and grand ensemble products from TIGGE. (a) and (b) show the forecast results without and with consideration of the users' information respectively, and the forecast results of Fig. 7b exhibit a stronger precursor warning of the floods on 24 July

(2) 结合临沂水文用户具体风险决策需求,通过对可能致洪降水阈值的分析,发展了以临沂水文用户为导向的交互式预报模型。建立从用户决策需求到预报系统的具体联系,验证用户信息反馈的重要性及动态评估预报结果的可行性,并将全球大集合预报 TIGGE 产品发展应用于局地水文用户防汛决策,为实践用户导向交互式预报系统提供了一个范例。

需要指出的是,广义地来看,本文给出可能致洪降水的概率(FLRT)预报类似于 TIGGE 结果的某种降尺度分析。然而与一般降尺度意义不同之处在

于,交互式预报中需要不断根据用户信息动态调整预报目标量(尽管本文例子中仅简化地设置了 3 个 FLRT 阈值)。交互式的意义还表现在预报过程中用户信息的参与(如数值预报目标的设定、降尺度关键区域的选取,及专业耦合模式的参数设置等)以及在预报应用中用户端对预报结果的动态评估和反馈,并利用动态评估信息衡量预报的不确定性,提高在用户端的应用水平。这也正是交互式预报系统所强调的“从用户出发开展气象预报再回到用户”交互式预报的理念。

总之,以用户为导向的预测系统涉及到多学科

多领域,需要包括人文社会、决策管理、计算机科技、气象、农业、水文及其相关交叉学科协同发展。目前,要完全实现这样的系统,还存在很多困难,例如系统中用户端资料数据的收集,对用户需求的量化等。该系统概念框架本身也还需要在进一步探索中完善。为此,本文述及的很多方面在现有科技水平下,是前瞻性的。要完全实现用户导向预报系统,还有很长的路要走。

**致谢:**研究过程中和临沂气象水文、水利部门以及项目组成员的讨论使作者获益匪浅。特别感谢叶笃正院士在研究和成文过程中给予指导和讨论。

## 参考文献

- [1] 李泽椿,陈德辉. 国家气象中心集合预报数值预报业务系统的发展及应用[J]. 应用气象学报, 2002, 13:1-15.
- [2] Shapiro M A, Thorpe A J. THORPEX International Science Plan[R]. WMO, WWRP, document, 2004, (available at <http://www.wmo.int/thorpex/publications.html>).
- [3] Palmer T N. The economic value of ensemble forecasts as a tool for risk assessment: From days to decades[J]. Q J R Meteor Soc, 2002, 128:747-774.
- [4] Ritchie J W, Zammit C, Beal D. Can seasonal climate forecasting assist in catchment water management decision-making? A case study of the Border Rivers catchment in Australia [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2004, 104: 553-565.
- [5] Dessai S, Hulme M, Lempert R, et al. Do we need better predictions to adapt to a changing climate[J]. Eos Trans A G U, 2009, 90:111.
- [6] Georgakakos K P, Graham N E, Carpenter T M, et al. Integrating climate-hydrology forecasts and multi-objective reservoir management for northern California [J]. Eos, 2005, 86:122-127.
- [7] Stewart T R, Pielke R, Nath R. Understanding user decision making and the value of improved precipitation forecasts-Lessons from a case study[J]. Bull A M S, 2004, 85:223-235.
- [8] Morss R E, Wilhelmi O V, Downton M W, et al. Flood risk, uncertainty, and scientific information for decision making-Lessons from an interdisciplinary project[J]. Bull A M S, 2005, 86:1593-1601.
- [9] Morgan M C, Houghton D D, Keller L M. The future of medium-extended-range weather prediction-Challenges and a vision[J]. Bull A M S, 2007, 88:631-634.
- [10] 叶笃正, 严中伟, 戴新刚, 等. 未来的天气气候预测体系[J]. 气象, 2006, 32:3-8.
- [11] Demuth J L, Grunfest E, Morss R E, et al. Building a community for integrating meteorology and social science [J]. Bull A M S, 2007, 88:1729-1737.
- [12] Stone R C, Meinke H. Weather, climate, and farmers: an overview[J]. Meteorological Applications, 2006, 13:7-20.
- [13] Buizza R, Hollingsworth A, Lalaurette F, et al. Probabilistic predictions of precipitation using the ECMWF ensemble prediction system[J]. Weather and Forecasting, 1999, 14: 168-189.
- [14] 章国材. 中短期天气集合预报问题[J]. 气象, 2004, 30:3-5.
- [15] Gneiting T, Raftery E A. Atmosphere science: weather forecasting with ensemble methods[J]. Science, 2005, 310:248-249.
- [16] Mylne K R. Decision-making from probability forecasts based on forecast value[J]. Meteorological Applications, 2002, 9: 307-315.
- [17] 陈德辉, 沈学顺. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展 [J]. 应用气象学报, 2006, 17:773-777.
- [18] 张人禾, 沈学顺. 中国国家级新一代业务数值预报系统 GRAPES 的发展[J]. 科学通报, 2008, 53:2393-2395.
- [19] Cunderlik J M, Simonovic S P. Inverse flood risk modeling under changing climatic conditions[J]. Hydrological Processes, 2007, 21: 563-577.
- [20] Fowler H J, Blenkinsop S, Tebaldi C. Linking climate change modeling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27:1547-1578.
- [21] Balint G, Csik A, Bartha P, et al. Application of meteorological ensembles for Danube flood forecasting and warning. Transboundary Floods [J]. Reducing Risks Through Flood Management, 2006, 57:57-68.
- [22] De Elía R, Laprise R. Diversity in interpretations of probability: Implications for weather forecasting [J]. Monthly Weather Review, 2005, 133:1129-1143.
- [23] Casati B, Wilson L J, Stephenson D B, et al. Forecast verification: current status and future directions[J]. Meteorological Applications, 2008, 15:3-18.
- [24] 张庆云, 陶诗言, 彭京备. 我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32:815-825.
- [25] 刘金涛, 张佳宝. 前期土壤含水量对水文模拟不确定性影响分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28:519-525.
- [26] 李小雁, 龚家栋. 人工集水面临界产流降雨量确定实验研究 [J]. 水科学进展, 2001, 12:516-522.
- [27] 王浩, 雷晓辉, 秦大庸, 等. 基于人类活动的流域产流模型构建[J]. 资源科学, 2003, 25:14-18.
- [28] Van Andel S J, Price R K, Lobbrecht A H, et al. Ensemble precipitation and water level forecasts for anticipatory water-system control[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9: 776-788.
- [29] 管成功, 王克敏, 陈晓红. 2002—2005 年 T213 数值降水预报产品分析检验[J]. 气象, 2006, 32:70-76.
- [30] 徐精文. 基于蓄水容量曲线和 TOPMODEL 概念的流域水文模型构建及其与 Noah LSM 的耦合研究[D]. 博士学位论文, 2009, 79-83.