

气象服务关键技术 in 三峡水资源开发利用中的应用

孟英杰^{1,2}, 王海燕^{1,2}, 王继竹^{1,2}

¹武汉中心气象台, 湖北 武汉

²长江流域气象中心, 湖北 武汉

Email: 6294940@qq.com

收稿日期: 2021年6月3日; 录用日期: 2021年8月16日; 发布日期: 2021年8月26日

摘要

三峡是我国重要的水利工程, 加强三峡水资源开发利用的关键气象服务能力具有重要意义。针对三峡工程水资源开发利用需求, 立足解决降水预报精细化程度和洪水预见期不够, 气象预报与洪水预估结合度低等关键问题, 通过开展零时刻至延伸期无缝隙的网格降水预报预测和水文气象耦合技术的研究与应用, 建设并完善监测、预报、制作于一体的长江流域业务智能平台等方式, 提升了长江流域定量降水预报、洪水天气预判、洪水风险预估的预报服务能力, 为三峡水文资源调度计划决策提供了重要的技术支撑, 带来了较为显著的社会经济效益。

关键词

三峡水库, 融合降水, 高分辨率预报, 延伸期预报, 洪水预估

Application of the Key Techniques of Meteorological Service in Water Resources Exploitation of TGR

Yingjie Meng^{1,2}, Haiyan Wang^{1,2}, Jizhu Wang^{1,2}

¹Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan Hubei

²Meteorological Center of Yangtze River, Wuhan Hubei

Email: 6294940@qq.com

Received: Jun. 3rd, 2021; accepted: Aug. 16th, 2021; published: Aug. 26th, 2021

Abstract

Three Gorges Reservoir (TGR) is an important water conservancy project in China. It is of great significance.

作者简介: 孟英杰(1978-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文气象预报相关工作。

ance to strengthen the key techniques of meteorological service in water resources exploitation of TGR. Based on the demands of water resources development and utilization of TGR, the main task is to enhancing the level of prediction ability such as the precision of precipitation forecast, the prediction period of flood forecast, the combination of them and so on. Through the development of grid precipitation forecast technology from monitoring to extended period forecast, research and application of hydro meteorological coupling technology, development of integrated system for Yangtze River basin, building service mechanism, the capability of precipitation forecast, flood prediction and flood risk prediction in the Yangtze River basin has been improved. It provides an important technical support for the decision-making of the TGR dispatching plan and brings remarkable social and economic benefits.

Keywords

TGR, Combined Precipitation, High Resolution Forecast, Extension Period Forecast, Flood Forecast

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

三峡水库是我国重要的水利工程战略要地,也是我国西南地区的生态涵养区。其上游流域面积达 100 万 km²,年径流为 4510 亿 m³。随着上游梯级枢纽向家坝、溪洛渡、白鹤滩水电站先后建设并投入联合调度运行,三峡水利工程已经成为世界上规模最大,运行调度最复杂的水电站群,涉及防洪、通航、发电、泥沙防治、生态调度等诸多方面。由于流域面积大,气候复杂,围绕运行调度的气象服务难度和需求相当大。三峡水利枢纽工程的气象服务关键技术一直聚焦于降水预报预测技术发展及应用、洪水预估业务产品和业务平台的应用开发。

近年来,随着精细化气象预报技术的发展、水文气象交叉学科的不断融合以及信息化技术的快速迭代应用,围绕三峡水利枢纽梯级调度工程气象服务先后发展出适合流域服务的无缝隙网格化降水预报、洪水预估技术及智能化的服务平台,并在此基础上建立气象水文业务融合服务机制,大幅提升了三峡水库调度中的降水预报精度和洪水预见期。特别是 2020 年长江流域先后经历中下游超长梅雨和上游超强降水,在应对长江上游干流第 5 号洪水期间,气象服务为上游水库群联合调度决策提供了有力支撑,避免上游洪峰叠加形成超百年一遇大洪水,有效减轻了中下游防洪压力,避免了荆江分洪区的启用,发挥了防洪减灾的关键作用。

长江流域网格降水预报预测技术、水文气象融合技术以及以此为技术支撑的长江流域业务智能化一体化平台,为三峡工程水资源的气象服务流程化开发与利用,提供了重要技术参考。

2. 气象服务关键技术

2.1. 长江流域网格降水预报预测技术

长江流域精细化面雨量预报和水文模型的雨量驱动需要定量降水预报,随着网格化降水预报预测技术逐步成熟,使得精细化水文预报预测成为可能。降水是微尺度到天气尺度之间不同尺度复杂物理过程共同作用的结果,针对不同预报时效,流域降水预报预测技术不尽相同。

采用大数据挖掘、机器学习算法等技术,结合多源降水协同算法建立流域降水智能网格预报技术,使得长江流域精细化降水预报预测实现了降水由流域分区面雨量预报跨度到精细化网格预报转变,预报时效延伸到 0~10 天,空间分辨率为 5 公里,时间分辨率为 1~6 小时,达到提升流域降水预报精度目的。

2.1.1. 长江流域多源资料融合降水估算

多源资料融合降水估算是精细化网格短时临近预报服务的基础,运用雷达、卫星等遥感估算降水时,因其高时空分辨率、高精度等优点被广泛应用。很多学者与单位机构开展相关技术研究。美国国家海洋和大气管理局(NOAA)发展了一系列雷达和卫星降水资料的误差订正技术,包括单部雷达特性的局地误差订正[1],空间一致情况下的平均场误差订正[2],和雷达、卫星与地面观测资料之间互相融合的技术[3][4][5],推出覆盖美国本土高分辨率定量降水估算产品。研究卫星、雷达与地面观测融合技术过程中,国内研究单位客观考虑站点距离与角度智能型分析方法订正,开展基于地面观测降水订正卫星反演降水系统误差方法和最优插值方法分析的应用试验[6][7]。近年来,不少研究学者开始探讨地面、雷达和卫星三源降水融合技术[8]。

长江流域多源资料融合降水估算以美国气候预测中心研发实时卫星反演降水系统CMOPRH(CPC MOR-PHing technique)的 0.05° 卫星反演降水产品和中国气象局气象探测中心研制的 0.05° 雷达定量降水估测产品为基础[9],采用概率密度函数匹配法订正雷达估测、卫星反演降水产品的系统性偏差,通过贝叶斯模型平均方法将雷达估测和卫星反演降水产品结合形成一个完整的背景场,使用最优插值方法融入地面观测实况,形成空间分辨率5公里,时间分辨率1小时,覆盖长江流域的地面-卫星-雷达三源降水融合产品(图1)。

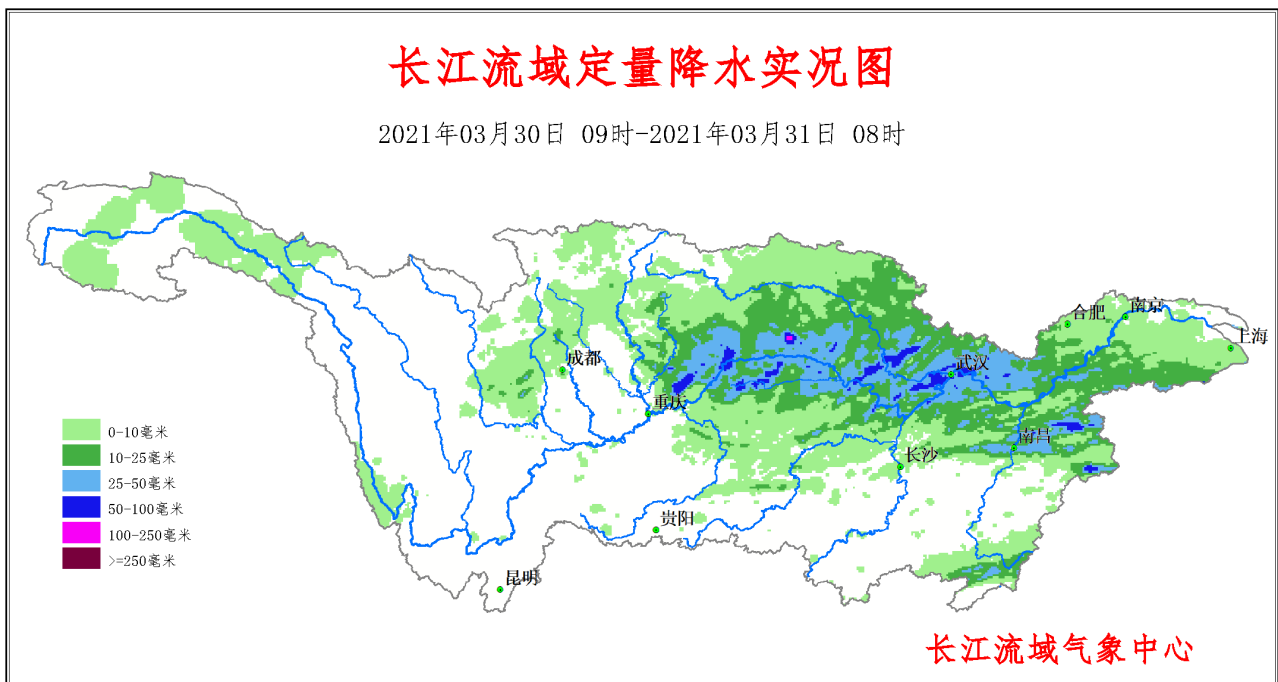


Figure 1. CMA Multi-source merged precipitation in the Yangtze River basin

图 1. 长江流域三源降水融合产品图

三源降水融合产品能够较完整的覆盖长江流域,很好保留雷达高分辨率的降水结构特征,其估量值与地面观测降水相近,空间分布型和量值均优于卫星或雷达等单一融合实况降水产品,平均估算绝对误差要小3~4 mm[10]。具有高时效、高精度的三源降水融合产品弥补了三峡水库上游流域高原山地地区,特别是金沙江流域等地,气象观测站点相对稀少的问题,较好的满足了水资源应用气象监测、预报等业务需求,为开展精细化网格预报提供了重要技术支撑。

2.1.2. 长江流域中短期高分辨率降水预报技术

数值天气预报是中短期高分辨率定量降水预报最有效的方法之一。目前先进且应用广泛的数值天气预报模

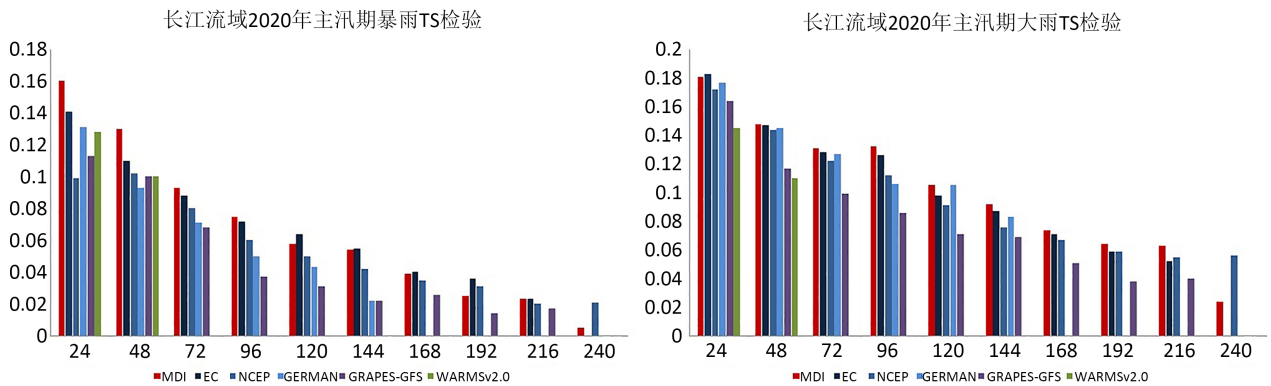


Figure 3. Rainstorm forecast accuracy among various modes in the Yangtze River Basin from June to August 2020 ((a) Rainstorm forecast accuracy; (b) Heavy rain forecast accuracy)

图 3. 长江流域 2020 年 6~8 月各模式降雨预报质量((a) 暴雨预报质量; (b) 大雨预报质量)

始场、资料同化技术、物理参数化方案与产品分辨率等方面存在差异，因而不同类型的数值天气预报模式在模拟能力上各具特色[13]，不同降水强度的预报误差会影响不同地区降水强度的预报性能[14] [15]。研究学者应用超级集合预报技术，对各天气预报中心的模式预报结果进行集成[16] [17]，发现多模式集成预报效果优于单个中心的预报，虽然对平均海平面气压、地面气温等连续变量要素的改进效果较好，但对降水场的改进效果并不理想[18]，由于该方法过度拟合某几个样本距平的极大值，影响了各模式权重系数真实反映模式的预报能力。

因此，基于集成思想，采取动态检验，优选集成的思路，应用多种大尺度和中尺度模式降水预报产品，根据流域汇水以及气候特点等因素将空间精细分区，经过实时动态检验，建立各区的分级、分时效降水预报性能排序，采用模糊逻辑法和邻域法等技术建立约束条件，降低空漏报等误差，建立了长江流域短中期(0~10 d)最优集成高分辨率降水预报产品 MDI (Model dynamic integration)，其中空间精度达到 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ ，时间精度达到逐 3 小时。从 2020 年主汛期的预报效果和 MDI 产品 TS 检验结果的空间分布来看(图 2)，长江流域 39 个分区中乌江下游、渠江、汉江石泉以上，清江、澧水、皇庄以下，鄂东北、陆水、修水、抚河、饶河、长下干、滁河、青弋水阳江等 14 个子流域的暴雨预报 TS 评分达到 20% 以上，优于 ECMWF 数值预报产品。从 MDI 产品的分级降水 TS 检验来看(图 3)，MDI 产品对较强降水的预报效果较好，大雨以上的降水预报 24 h~216 h 的预报质量均高于其他单一数值预报产品。

2.1.3. 长江流域延伸期降水预测技术

全球气候变暖对地球系统的水循环有一定影响，极端气候事件的产生变率与平均气候变率相比，前者更为复杂。近年来，长江流域多次极端降水气候事件对三峡水利枢纽的生产调度带来了严峻的考验，因此，在长江流域极端降水气候事件的成因诊断[19]和极端降水面雨量的概率预测[20] [21]上展开了深入研究。成因诊断分析方面，根据极端降水偏少(偏多)事件的同期大气环流资料，利用合成、相关分析等方法进行成因分析，最后得出典型环流系统配置，利用聚类方法，进行典型环流分类。通过分析极端降水偏少事件发生前的大气环流、海洋、高原积雪等特征，得出长江流域极端降水偏少事件的前兆信号，从而建立金沙江夏季极端降水环流诊断模型。降水面雨量的概率预测技术方面，依托多模式滚动产品，采用最优子集回归统计预测方法、前期气候特征相似组合法、动力模式降尺度法中的 EOF 分析迭代法、BP 典型相关法及动力气候模式集成的概率预测方法，建立长江流域极端降水面雨量的概率预报产品。

长江流域逐日面雨量概率预报及检验评估表明，上游东部、中下游概率预测评分较高，且提前 5 天左右对月极端降水有较好的预报能力。2020 年 3 月 10 日，开始为三峡水库的消落提供(5 月 1 日~6 月 10 日)降水趋势预测(图 4)。4 月 10 日，发布长江流域主汛期旱涝趋势预测服务材料，明确梅雨期长江中下游可能发生暴雨洪涝灾害，预测会出现较重汛情。2020 年主汛期期间，较为准确的预测出中长期金沙江、长江上游等区域的降水过

程。这些预测结果是以三峡水库为核心的长江上游水库群联合调度的强有力支撑，最大限度减少了防洪减灾中的社会经济损失。

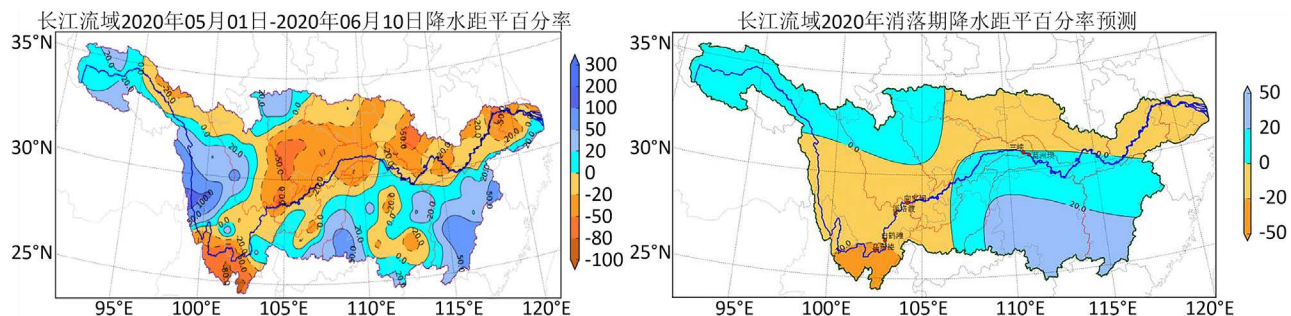


Figure 4. Comparison of precipitation prediction and actual situation in the Yangtze River basin ((a) Precipitation prediction; (b) Actual situation)

图 4. 消落期长江流域降水预测与实况对比((a) 预测; (b) 实况)

2.2. 水文气象融合的洪水预估技术

2.2.1. 洪峰降水模型及预判

从天气学预报经验出发，分析 1981 年~2012 年长江流域洪水天气特征，归纳洪水天气模型[22] [23]，建立长江上游中小洪水及长江上游、洞庭湖遭遇洪水天气模型中天气系统特征量，发展客观机器识别算法，实现洪水天气系统自动识别。重点内容有高空槽线、高空脊线、南亚高压、西太平洋副热带高压、低涡、切变线等几种天气系统，计算每个特征量的中心点、轴线以及范围分区，研发客观机器识别算法。

2020 年 8 月，该识别技术准确识别出当月中旬的致洪天气，10 日发布的决策服务材料以及在与三峡集团调度部门召开的视频会议中指出，8 月中旬降水形势为：“长江上游大洪水强降水过程的天气系统为贝湖槽稳定型”，该类天气系统曾导致 2012 年峰值流量达 $71200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的大洪水。实况表明，8 月 11 日~17 日岷沱江流域和嘉陵江流域累积雨量分别为 265 mm 和 175 mm，其中 11 日岷沱江流域日面雨量达到 76 mm，超 1961 年以来历史最大值，四川芦山站 11 日最大小时降水 134.6 mm，刷新四川国家站最大降水纪录。受其影响，长江上游先后于 8 月 14 日、17 日连续形成 4、5 号复式洪水，8 月 20 日三峡出现建库以来最大洪峰，流量达到 $75,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2.2. 水文气象洪水预估技术

预见期降水量会直接影响洪水预报的精度，预见期愈长，预报值影响愈大。如何解决预见期内降雨与洪水预报耦合技术逐渐成为水文气象需要解决的难点之一。金琪等[24]基于致洪暴雨预报，结合水文控制站水位、流量信息，运用多元统计回归模型开展了三峡水库洪水程度分级预估的研究；杨文发等[25]采用降水预报与洪水预报耦合的方法，对 1998 年汛期发生在长江上游三峡区间的一次暴雨洪水过程进行预报试验；崔春光[26]、彭涛等[27]开展定量降水预报及其集合预报产品与水文预报耦合的预报试验，结果表明考虑预见期内的降雨相对于未考虑预见期降雨对洪水预报结果提高具有明显的优势，能延长水文预见期，提高水文预报精度约 40%。

通过结合精细化网格降水预报、降水集合预报与分布式水文模型，开发基于流域网格预报的洪水预报产品，开展洪水预估试验，拓展水文不确定性预报的新方法，该方法最大的优点是能将单一确定性预报转化为可能发生范围的预报，获取更多水文预报信息，一定程度上提高了水文预报结果的可靠性，更好地满足防洪减灾对风险信息的需求。2020 年 7 月对三峡水库 1 号、2 号洪水过程做出了较好的预估(图 5)。其中对 1 号洪水的峰现时间预估较好，仅偏晚 18 h，但洪峰峰值为预估偏弱；对 2 号洪水的洪峰峰值预估较好，实测峰值为 $61,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，预估洪峰为 $64,600 \text{ m}^3/\text{s}$ ，但峰现时间预估偏晚了 30 h。

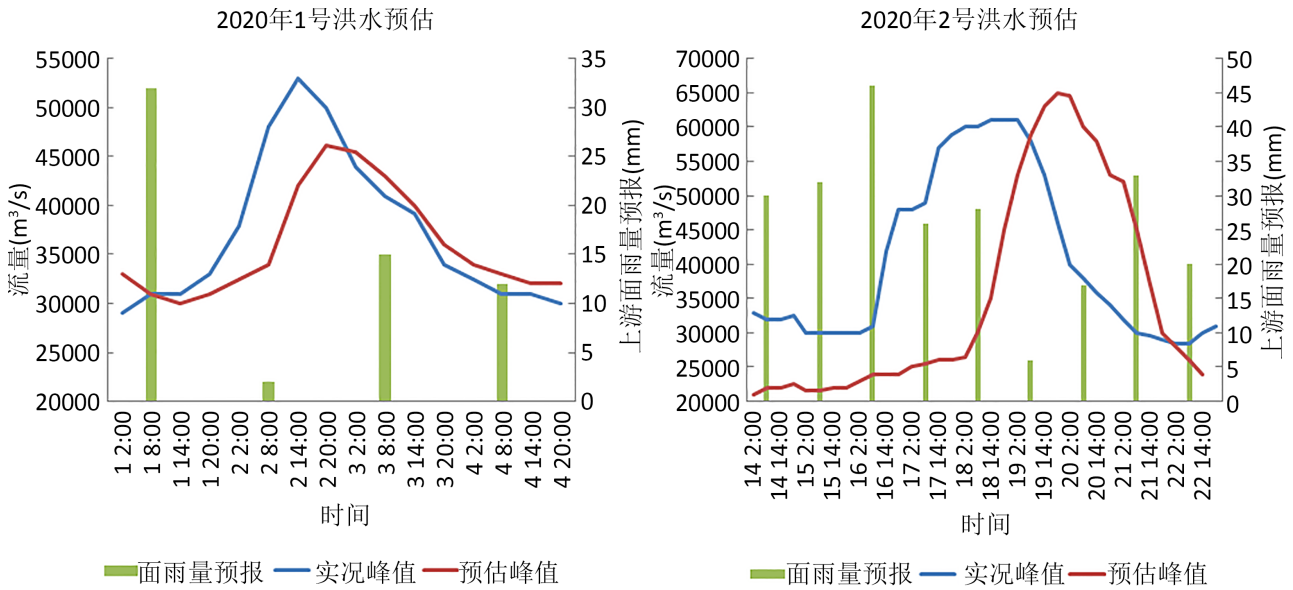


Figure 5. Comparison of forecast and actual situation of TGR No. 1 and No. 2 flood peaks in 2020 ((a) Flood No. 1; (b) Flood No. 2)
 图 5. 三峡水库 2020 年 1 号和 2 号洪峰预报和实况对比图((a) 1 号洪水; (b) 2 号洪水)

3. 长江流域气象服务平台及应用效益

3.1. 长江流域业务智能化一体化平台

不论是预报预测技术还是服务规程，最终都需要快速智能的应用于预报服务当中。在发展气象预报预测技术的同时，还着力开展了长江流域综合业务平台的研制。应用计算机技术和海量数据处理技术，结合水利部门水库调度规程，凝练水雨情实况监测报警和洪水预估预警等规则，建立降水预报订正协同算法、洪水天气模型比对算法以及面雨量预报检验评估方法，开发了长江流域气象服务一体化业务平台，实现了气象水文实况信息联动分析、预报服务智能提示、网格降水预报订正、服务产品快速集成、制作发布便捷高效、预报检验评估实时反馈的综合性平台，提升了长江流域气象预报服务能力，为气象服务三峡水库水资源调度利益最优化提供稳定可靠的平台系统支撑。

3.1.1. 海量气象水文信息高效实时监测查询

建立了长江流域自动站观测、天气雷达、气象卫星以及水情等信息的监测与报警功能。凝练流域气象服务中水雨情关注阈值、致洪天气阈值对比和洪水天气型预报相结合的关键气象服务启动规则，实现智能提示功能(图 6)。针对气象观测资料数据量大、空间密度高、检索条件复杂等特点，采用基于 FLEX 的 WebGIS 框架，结合针对万级站点观测数据的空间索引和表分区设置，实现数万个站点气象要素填图、色斑图生成等实时显示，具有响应时间短、操作平滑、显示效果丰富等特点，对长江流域 2 万余个区域自动气象站的填图显示响应不超过 5 秒，有效解决了传统 WebGIS 在海量数据检索及显示上的性能瓶颈，为用户提供了良好的交互界面及操作体验。

3.1.2. 长江流域高分辨率格点预报交互订正

平台以数值预报格点产品和客观格点预报产品为基础，建立空间协同算法、时间协同算法、面雨量联动计算和快速显示方法，实现长江流域格点预报交互订正。其中空间协同算法主要是针对订正过程中，区域修改后，区域内格点值的分布需要符合客观天气规律，而不是统一修改区域内格点值为同一数值。主算法包括根据区域内待赋值格点到权重点与边界点距离进行反比例权重插值得到待赋值格点值、根据选中区域内的客观背景场降

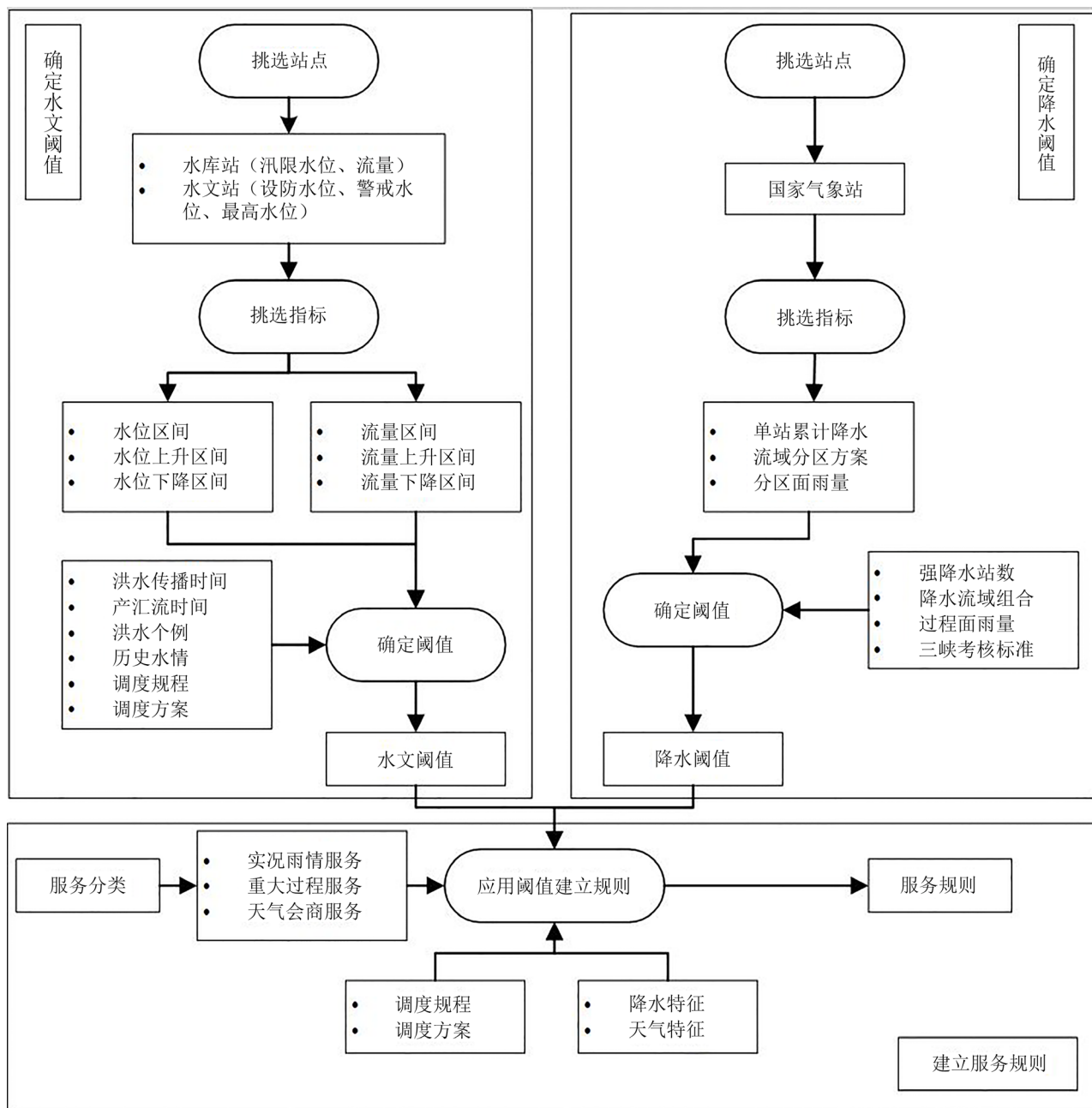


Figure 6. Schematic diagram of forecast service rules based on linkage analysis of meteorological and hydrological facts
图 6. 基于气象水文实况联动分析的预报服务规则示意图

水分布和赋值区间对区域内的格点进行赋值、根据设定值对选定区域内的网格值修改为设定值或按设定值进行增减。协同算法分为向上时间协同与向下时间协同。面雨量联动计算主要是在预报订正过程中，流域分区面雨量计算与格点订正进行同步联动，每一步骤的格点修订直接反馈到流域面雨量。网格预报 WebGIS 显示方面采取 Canvas 方式和地图缩放动态抽稀技术，保证网格预报的时空分辨率的绘制。

通过内存高速缓存和数据压缩，快速调取客观网格预报背景场数据，以 Canvas 渲染技术实现网格预报的无延迟渲染绘制作作为预报订正背景场，对网格预报进行方便快捷的交互修订，修订生成的产品将根据时间协同规则智能生成 1 小时、3 小时、6 小时、12 小时的格点预报产品。

3.1.3. 长江流域服务产品制作与分发

长江流域服务产品模板根据不同产品类型进行分类管理、建立模板库和支持多版本管理模式，其格式主要为 Word、PPT、制图模板格式等。后台通过 POI (Office Java 操作类) 读取产品模板，依次遍历文档中的 ES 表达式，提取计算方法和参数，调用后台数据接口生成图片、表格、文字对文档中的标签进行替换，再通过 PageOffice 实现 Web 端的 Word 产品显示。

通过标准发布引擎，预先定义的产品发布策略，调用对应驱动接口，采用短信、网页、电子邮件等方式发布服务产品，将产品推送到不同用户组手中，满足不同用户多种方式接收常规天气预报信息的需求。目前是借助多种发布接口，实现一键式多渠道快速发布。

3.1.4. 长江流域预报产品实时检验评估

长江流域预报产品实时检验评估目的是提供主客观、多模式预报实时联动计算对比，为预报员进行模式研判、提升预报准确率提供科学评价参考依据。主要按照检验评定规则对各类预报产品的内容进行检验与评价，并根据检验产品的内容和类型设计和规划数据库表。检验数据表包括丰富的字段设计，主要分为原始数据、中间计算结果和检验结果三类，方便后期验证检验流程的正确性；另外检验表针对时间建立了多个冗余字段，作为统计查询的分组字段来提高查询速度；设计站号、时间等索引提高检索速度。建立站点与格点的对应关系和计算系数，后台程序启动时一次性缓存各类对应关系，当进行检验计算时，实现实况站点和格点数据的快速对应查询，从而提高检验数据的提取速度，随后根据不同的检验方法计算入库。检验评价结果通过 Web 页面以表格、专题图、直方图等形式提供用户使用。

3.1.5. 打通水文气象智能协同业务模式

在三峡水库调度气象服务的业务模式上，气象与服务对象之间不再是单向型、输出式的。在中国气象局和三峡集团合作的大框架下，通过机制保障、会商联动、业务融合等措施，变革资源使用模式、气象三峡互动模式，利用大数据、云计算和人工智能等先进技术，打造以气象云平台为基础的智能共享 + 服务协同平台，三峡水库调度不再重复自建气象系统，实现数据实时同步、平台双方共用、业务深度融合。

3.2. 气象关键技术服务三峡水资源应用效益显著

3.2.1. 防洪抗旱效益明显

在三峡水资源开发利用气象服务中，通过技术创新、平台革新和机制完善，长江流域气象中心 24 h 强降水预报质量大幅提升，预报服务质量考核持续保持首列，延伸期预报和月关键期预测质量稳定，稳中有升；工作智能提醒、产品自动制作、服务一键发布的一体化平台实现了系统交互的智能化，气象服务工作效率大幅提升。通过提供长时效、高精度的长江上游降水预报预测，为三峡水库及时开展水库预蓄和规避洪汛风险提供决策依据，对 2012 年以来多次洪峰过程提前预判，为长江防总运用三峡水库开展防汛调度和应急抢险提供了强有力的技术支撑，防洪抗旱效益显著。在 2020 年 7 月，气象服务支撑水利部门在长江 3 次编号洪水过程中调度三峡水库拦蓄洪水约 146 亿 m^3 ，成功与洞庭湖洪水错峰，避免洞庭湖附近蓄滞洪区运用和鄱阳湖湖口超保证水位；同年 8 月，在应对长江上游第 4、5 号复式洪水过程中，气象服务支撑上游水库群联合调度决策，避免了上游洪峰叠加形成超百年一遇的大洪水，确保三峡水库在 $75,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 的建库来最大库洪峰流量下顺利过峰，同时最大削峰率达 34.1%，有力减轻了中下游防洪压力，避免了荆江分洪区的启用，发挥了重要的防洪减灾效益。

3.2.2. 电力调度电屡创新高

三峡电站总装机容量 2250 万 kW，年设计发电量 882 亿 kW·h，是我国“西电东送”和“南北互供”骨干电源点。在确保三峡水库全面发挥防洪、航运、水资源利用等综合效益的前提下，精准预判、主动服务，助力抓住有力时机开展洪水资源化利用，电站发电量连创新高。2014 年发电量达 988 亿 kW·h，创当年单座水电站

年发电量世界纪录；2017年发电为976.05亿kW·h，再居当年全球单座电站发电量首位；2018年发电量达1016亿千瓦时，首次突破千亿kW·h；2020年全年发电量达到1118亿kW·h，打破了2016年南美洲伊泰普水电站创造的1030.98亿kW·h的单座水电站年发电量世界纪录，成为中国水电引领世界的重要标志。

4. 展望

三峡水资源生态地位与社会地位极为重要，解决三峡水利枢纽梯级调度工程气象服务迫切需求问题具有重大现实意义。目前，以现代计算机技术和海量信息处理技术为依托，以降水预报预测技术和洪水预估技术的发展为生命力，将高效实时气象监测、高分辨率网格预报交互订正、产品制作与分发、预报产品实时评估等重要业务功能融合入一体化的长江流域业务智能业务平台，并在三峡水利枢纽工程水资源气象服务中实现部门间统一规划和资源共享，该模式可为气象服务其他大型水利工程起到了可推广的示范性作用，成果也可为政府、企业、社会组织、公众等多元主体进行科学研究、决策和管理提供强有力支撑。

基金项目

国家重点研发计划(2018YFE0196000)、湖北省气象科技发展基金项目(2019Y02)和中国长江电力股份有限公司项目(2414010001)共同资助。

参考文献

- [1] SEO, D. J., BREIDENBACH, J. P. Real-time correction of spatially nonuniform bias in radar rainfall data using rain gauge measurements. *Journal of Hydrometeorology*, 2002, 3(2): 93-111.
[https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0093:RTCOSN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0093:RTCOSN>2.0.CO;2)
- [2] SEO, D. J., BREIDENBACH, J. P. and Johnson, E. R. Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall data. *Journal of Hydrology*, 1999, 223(3): 131-147. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00106-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00106-7)
- [3] SEO, D. J. Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data. *Journal of Hydrology*, 1998, 208(1): 37-52. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00141-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00141-3)
- [4] KONDRAGUNTA, C., SEO, D. J. Toward integration of satellite precipitation estimates into the multi-sensor precipitation estimator algorithm. 19th Conference on Hydrology, Seattle, 2004.
- [5] ZHANG, J., HOWARD, K., LANGSTON, C., et al. National mosaic and multi-sensor QPE (NMQ) system: Description, results, and future plans. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(10): 1321-1338.
<https://doi.org/10.1175/2011BAMS-D-11-00047.1>
- [6] 潘昞, 沈艳, 宇婧婧, 等. 基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验[J]. *气象学报*, 2012, 70(6): 1381-1389.
PAN Yang, SHEN Yan, YU Jingjing, et al. Analysis of the combined gauge-satellite hourly precipitation over China based on the OI technique. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(6): 1381-1389. (in Chinese)
- [7] 宇婧婧, 沈艳, 潘昞, 等. 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进[J]. *应用气象学报*, 2013, 24(5): 544-553.
YU Jingjing, SHEN Yan, PAN Yang, et al. Improvement of satellite-based precipitation estimates over China—Based on probability density function matching method. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2013, 24(5): 544-553. (in Chinese)
- [8] 高晓荣, 梁建茵, 李春晖, 等. 多平台(雷达、卫星、雨量计)降水信息的融合技术初探[J]. *高原气象*, 2013, 32(2): 2549-2555.
GAO Xiaorong, LIANG Jianyin, LI Chunhui, et al. Preliminary studies on merged techniques based on precipitation information from multiplatform (Radar, Satellite and Rain Gauge). *Plateau Meteorology*, 2013, 32(2): 2549-2555. (in Chinese)
- [9] 潘昞, 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.
PAN Yang, SHEN Yan, YU Jingjing, et al. An experiment of high-resolution gauge-radar-satellite combined precipitation retrieval based on the Bayesian merging method. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(1): 177-186. (in Chinese)
- [10] 许冠宇, 李琳琳, 田刚, 等. 国家级降水融合产品在长江流域的适用性评估[J]. *暴雨灾害*, 2020, 39(4): 400-408.
XU Guanyu, LI Lingling, TIAN Gang, et al. Assessing the applicability of national precipitation merged products in the Yangtze River basin. *Torrential Rain and Disasters*, 2020, 39(4): 400-408. (in Chinese)
- [11] 王晓峰, 许晓林, 徐同, 等. 华东区域数值预报系统对极端降水预报能力的评估[J]. *气象科技进展*, 2017, 7(6): 67-74.

- WANG Xiaofeng, XU Xiaolin, XU Tong, et al. Verification of the extreme precipitation forecast from SMS-WARMSV 2.0. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2017, 7(6): 67-74. (in Chinese)
- [12] 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(6): 773-777.
CHEN Dehui, SHEN Xunshun. Recent progress on graphs research and application. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(6): 773-777. (in Chinese)
- [13] 马雷鸣, 鲍旭炜. 数值天气预报模式物理过程参数化方案的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(7): 679-687.
MA Leiming, BAO Xuwei. Research progress on physical parameterization schemes in numerical weather prediction models. *Advance in Earth Science*, 2017, 32(7): 679-687. (in Chinese)
- [14] 陈博宇, 代刊, 郭云谦. 2013 年汛期 ECMWF 集合统计量产品的降水预报检验与分析[J]. *暴雨灾害*, 2015, 34(1): 64-73.
CHEN Boyu, DAI Kan and GUO Yunqian. Precipitation verification and analysis of ECMWF ensemble statistic products in 2013 flooding season. *Torrential Rain and Disasters*, 2015, 34(1): 64-73. (in Chinese)
- [15] 辛辰, 漆梁波. ECMWF 模式对南方春雨期降水预报的检验和分析[J]. *暴雨灾害*, 2018, 37(4): 383-391.
XIN Chen, QI Liangbo. Verification and analysis on precipitation forecast of ECMWF model during spring rain period in South China. *Torrential Rain and Disasters*, 2018, 37(4): 383-391. (in Chinese)
- [16] 林春泽, 智协飞, 韩艳, 等. 基于 TIGGE 资料的地面气温多模式超级集合预报[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(6): 706-712.
LIN Chunze, ZHI Xiefei, HAN Yan, et al. Multi-model superensemble forecasts of the surface temperature using the TIGGE Data. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(6): 706-712. (in Chinese)
- [17] 陈丽娟, 许力, 王永光. 超级集合思想在汛期降水预测集成中的应用[J]. *气象*, 2005(5): 52-54.
CHEN Lijuan, XU Li and WANG Yonguan. Application of superensemble to precipitation prediction in China during flood season. *Meteorological Monthly*, 2005(5): 52-54. (in Chinese)
- [18] 智协飞, 季晓东, 张璟, 等. 基于 TIGGE 资料的地面气温和降水的多模式集成预报[J]. *大气科学学报*, 2013, 36(3): 257-266.
ZHI Xiefei, JI Xiaodong, ZHANG Jing, et al. Multimodel ensemble forecasts of surface air temperature and precipitation using TIGGE datasets. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2013, 36(3): 257-266. (in Chinese)
- [19] 郭广芬, 杜良敏, 肖莺, 等. 长江流域夏季极端降水时空分布特征[J]. *干旱气象*, 2021, 39(2): 235-243.
GUO Guangfen, DU Liangmin, XIAO Ying, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of summer extreme precipitation in the Yangtze River basin. *Journal of Arid Meteorology*, 2021, 39(2): 235-243. (in Chinese)
- [20] 秦鹏程, 刘敏, 杜良敏, 等. 气候变化对长江上游径流影响预估[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(4): 405-415.
QIN Pengcheng, LIU Min, DU Liangmin, et al. Climate change impacts on runoff in the upper Yangtze River basin. *Climate Change Research*, 2019, 15(4): 405-415. (in Chinese)
- [21] 肖莺, 杜良敏, 张俊. 长江上游面雨量低频特征分析[J]. *人民长江*, 2019, 50(8): 87-90.
XIAO Ying, DU Liangmin and ZHANG Jun. Analysis on low-frequency characteristics of areal rainfall over upper Yangtze River. *Yangtze River*, 2019, 50(8): 87-90. (in Chinese)
- [22] 王海燕, 李波, 李子进, 等. 长江上游中小洪水天气学分型及特征[J]. *暴雨灾害*, 2015, 34(4): 293-301.
WANG Haiyan, LI Bo, LI Zijin, et al. Synoptic patterns and characteristics of medium and small flood events in the upper reach of the Yangtze River. *Torrential Rain and Disasters*, 2015, 34(4): 293-301. (in Chinese)
- [23] 陈璇, 张萍萍, 田刚, 等. 长江上游流域大洪水天气分型特征分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(12): 2142-2152.
CHEN Xuan, ZHANG Pingping, TIAN Gang, et al. Characteristics of various weather system types during big flood in the upper reaches of the Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(12): 2142-2152. (in Chinese)
- [24] 金琪, 王继竹, 高琦, 等. 基于致洪暴雨预报的三峡水库洪水预估系统及试验评估[J]. *灾害学*, 2012, 27(3): 54-58.
JIN Qi, WANG Jizhu, GAO Qi, et al. Flood prediction system of Three Gorges Reservoir based on heavy rains forecast and its evaluation. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(3): 54-58. (in Chinese)
- [25] 杨文发, 李春龙. 降水预报与洪水预报耦合应用初探[J]. *水资源研究*, 2003, 24(1): 38-40.
YANG Wenfa, LI Chunlong. Preliminary study on coupling application of precipitation forecast and flood forecast. *Journal of Water Resources Research*, 2003, 24(1): 38-40. (in Chinese)
- [26] 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[J]. *气象*, 2010, 36(12): 56-61.
CHUI Chunguang, PENG Tao, SHEN Tieyuan, et al. The flood forecast test on QPF coupling with hydrological model in flood season in medium and small catchment. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(12): 56-61. (in Chinese)
- [27] 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[J]. *暴雨灾害*, 2010, 29(3): 274-278.
PENG Tao, LI Jun, YIN Zhiyuan, et al. Preliminary experiment on flood forecast in flood season based on ensemble precipitation prediction products. *Torrential Rain and Disasters*, 2010, 29(3): 274-278. (in Chinese)