

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20222532

飞云江流域抗旱调度及数字孪生研究与应用

周小丽¹, 张仁贡², 黄东洋³, 陈善佳³

(1. 浙江同济科技职业学院, 浙江 杭州 311231; 2. 浙江禹贡信息科技有限公司, 浙江 杭州 310002;
3. 温州市水利局, 浙江 温州 325000)

摘要: 针对近几年飞云江流域出现较严重旱情,反调节水库调节库容无法有效利用,调度时效性和科学性无法有效保障等影响温州地区近600万人供水安全的问题,建立了飞云江流域抗旱调度模型及数据中心,引用流域多个水库的实时降雨数据、水位数据、供水流量数据及生态流量数据,引入了气象数据,包括1、3、6 h短临网格预报数据及1、3、7、15、30、90 d等降雨中长期预报数据,结合流域水土墒情、水库及流域蒸发情况等,采用支持向量回归计算方法(SVR),开发了基于SPARK组件分布式的数字孪生业务系统,实现了可供水量预警、抗旱水位预警、抗旱天数预警和生态流量预警,增加利用反调节库容 $2.80 \times 10^6 \text{ m}^3$,备用库容 $2.93 \times 10^6 \text{ m}^3$,为飞云江流域的抗旱决策、科学调度和“四预”实现提供了数据基础和技术支撑。

关键词: 飞云江流域;抗旱;调度规则;数字孪生;多尺度预警

中图分类号: TV697.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)10-0006-04

1 工程概况

飞云江流域是浙江省八大流域之一,总体供水工程主要由1座大型主水库(珊溪水库),1座中型反调节水库(赵山渡水库),2座小型反调节水库(百万山水库和九龙湖水库),1座备用水源地水库(百丈漈水库)组成,流域分布见图1。珊溪水库年设计供水量 $7.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,赵山渡水库可调节库容 $4.27 \times 10^6 \text{ m}^3$,百万山水库和九龙湖水库可调节库容分别为 2.25×10^6 、 $5.5 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。百丈漈水库可供库容 $2.93 \times 10^6 \text{ m}^3$,通过泗溪支

流由岔口镇汇入赵山渡水库,岔口水文站可监控实时水位及流量。同时,赵山渡水库还有一条主要溪流(玉泉溪)在上林乡汇入,上林水文站可监控实时水位,5座水库及2座水文站的上下游关系见图2,图2中的实时数据为2022年9月11日的实测及主要统计数据。引水工程从赵山渡水库开始引流,经过渠系为温州市近600万人供水,同时为瑞安江北灌区灌溉供水和瑞安塘河等生态供水,供水范围为温州市区、瑞安、平阳、苍南、龙港、文成等9个县(市、区)。近些年,该工程调度过程中出现的主要问题包括:①未建立抗旱调度模型,抗旱预警预报尚未实现;②未建设数字孪生系统,影响了“四预”完整性;③未建设数据中心,数据汇



图1 飞云江流域主要供水工程分布图

Fig.1 Distribution of main water supply projects in Feiyun River Basin

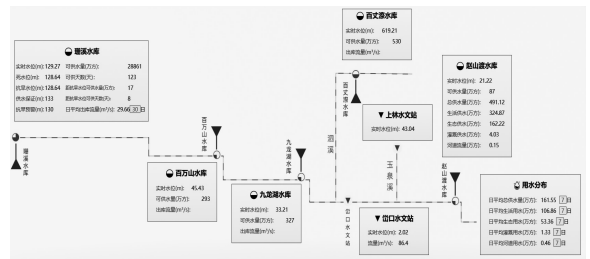


图2 飞云江流域水库关系及实时数据

Fig.2 Relationship and real-time data of Feiyun River reservoir

收稿日期: 2022-12-04, 修回日期: 2023-01-30

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”重大科研攻关计划(2023C03189); 国家自然科学基金项目(61873240)

作者简介: 周小丽(1973-),女,硕士、副教授,研究方向为计算机应用技术,E-mail:372864883@qq.com

通讯作者: 张仁贡(1975-),男,博士、正高级工程师,研究方向为水利信息化,E-mail:25577928@qq.com

聚与共享不够全面,流域调度无数字化通道,调度权限受限等。为解决这些问题,开展了流域抗旱调度及数字孪生技术研究,并结合水利部数字化孪生流域要求及浙江省水利数字化的要求,打造数字孪生系统及场景,并在实践中得到应用,发挥了比较明显的作用。

2 数学模型

2.1 关键参数

飞云江流域抗旱调度模型涉及 10 多个可配置参数,其中 7 个关键参数如下。

(1)实时水位(H_s)。获取 1 次/h 的库区实时监测数据,并依据库容特性方程计算对应的实时库容 V_s 。

(2)抗旱水位(H_k)。最新水行政主管部门规定的抗旱报警水位,对应的水库抗旱库容为 V_k 。

(3)日平均出库流量(Q_c)。由于珊溪水库出库流量均为水电站发电出流,水电站共有 4 台机组,则 4 台机组的发电流量总和为珊溪水库出库流量。日平均出库流量(Q_c)指最近 1 h 倒推 24 h 的珊溪水库出库流量平均值。

(4)周平均渠系总供水量(Q_z)。赵山渡水库渠系日总供水量为生活供水(Q_h)、生态供水(Q_s)和灌溉供水(Q_g)之和。为了增加评估的精确度,取最近 7 d 的日平均渠系总供水量,即周平均渠系总供水量 Q_z 。

(5)预报抗旱水位 H_{f1} 、 H_{f2} 。在抗旱水位(H_k)之前需要设置两个预报抗旱水位阈值 H_{f1} 、 H_{f2} ,则有 $H_{f1} > H_{f2} > H_k$,其中 H_{f1} 为黄色预警水位, H_{f2} 为红色预警水位。

(6)预报来水量(Q_L)。采用水文模型计算各水库在集雨面积内的预报降雨量之和作为流域调度的预报来水量(Q_L)。为了加强预报来水量的计算精度和预见期,接入了流域高精度气象预报数据,包括 1、3、6 h 短临预报数据及 1、3、7、15、30、90 d 等降雨中长期预报数据,其中 1、3 h 预报数据为 1 km 网格预报数据^[1]。

(7)备用补流(Q_b)。通过岔口水文站实时监测百丈深水库下泄流量来保证水行政主管部门核定的生态基流。

2.2 模型建立

模型在遵循先保证生活用水,后保证重要生态用水,再考虑农业灌溉用水及其他供水原则的基础上^[2],考虑流域降雨、水位、流量及气象预报等实时数据,结合流域各个水库工程的特性数

据^[3]和实际需求,建立流域抗旱调度数学模型:

$$T_k = \begin{cases} (V_s - V_k + Q_L + Q_b)/Q_c & H_s > H_{f1} \\ \frac{V_s - V_k + Q_L + Q_b}{Q_h + K_1 Q_s} & H_{f1} \geq H_s \geq H_{f2} \\ \frac{V_s - V_k + Q_L + Q_b}{Q_h + K_2 Q_s} & H_{f2} > H_s > H_k \\ (V_s - V_k + Q_L + Q_b)/Q_h & H_k \geq H_s \end{cases} \quad (1)$$

式中, T_k 为珊溪水库水位离抗旱水位的天数; K_1 、 K_2 分别为逐级生态供水系数。

相关边界约束条件如下:①依据 2020 年温政办 62 号文件《关于印发温州市防汛防台抗旱应急预案的通知》,划定 $H_k = 128.64$ m 为珊溪水库的抗旱水位。②依据水行政部门核定的生态流量最小值(生态基流)设置预警线。③依据流域长期运行经验数据,90 d 累计降雨小于 120 mm,除去土壤吸收及蒸发,可以设定预报来水量 $Q_L = 0$ 。④按照抗旱水位预警设定,设 $H_{f1} = 133$ m, $H_{f2} = 130$ m。抗旱天数阈值可设 $T_1 = 45$ d、 $T_2 = 30$ d,其中 T_1 为蓝色抗旱预警阈值, T_2 为橙色抗旱预警阈值。⑤按照流域调度经验,结合瑞安生态供水的实际情况,原则上当 $H_{f1} > H_s > H_{f2}$ 时,为逐级减少生态供水,优先停止或减少通过赵山渡高湖电站发电的生态供水;当 $H_{f2} > H_s > H_k$ 时,停止温州塘河和瑞安塘河的生态供水;当 $H_k > H_s$ 时,停止飞云江流域整体生态供水^[4]。逐级生态供水系数 K_1 的区间宜为 $[0.5, 0.7]$, K_2 的区间宜为 $[0.2, 0.4]$ 。

2.3 计算规则

针对预报来水量 Q_L ,一般情况下,抗旱时期,仅中长期连续降雨或暴雨时才计算预报来水量,根据历史运行经验,如 90 d 累计降雨小于 120 mm,除去土壤吸收及蒸发,计算预报来水量意义不大,可以令 $Q_L = 0$ 。目前取 $H_{f1} = 133$ m, $H_{f2} = 130$ m。 K 为逐渐生态供水系数^[5]。结合实际情况,在早期由于灌溉供水(Q_g)较少,可以令 $Q_g = 0$ 。离抗旱水位的天数 T_k 计算公式为:

$$T_k = \begin{cases} (V_s - V_k + Q_L)/Q_c & H_s > H_{f1} \\ \frac{V_s - V_k + Q_L}{Q_h + K Q_s} & K = 0.6; H_{f1} \geq H_s \geq H_{f2} \\ \frac{V_s - V_k + Q_L}{Q_h + K Q_s} & K = 0.3; H_{f2} > H_s > H_k \\ (V_s - V_k + Q_L)/Q_h & H_k \geq H_s \end{cases} \quad (2)$$

当 $T_k \leq T_1$ 时,为蓝色抗旱预警;当 $T_k \leq T_2$ 时,为黄色抗旱预警;当 $T_k \leq 0$ 时,为橙色抗旱预警。 T_1 、 T_2 为阈值($T_1 > T_2 > 0$),如设 $T_1 = 45$ d, $T_2 = 30$ d 等。

原则上当 $H_{f1} \geq H_s \geq H_{f2}$ 时,为逐级减少生态供水,优先停止或减少通过高湖电站发电的生态供水;当 $H_{f2} > H_s > H_k$ 时,停止温州塘河和瑞安塘河的生态供水;当 $H_k \geq H_s$ 时,停止飞云江生态供水。

2.4 计算方法

研究涉及集雨泰森多边形法、气象预报累加算法、汇流出流新安江水文模型算法等^[6],本文重点论述计算预报来水量及抗旱水位的支持向量回归(SVR)算法。SVR 算法是在支持向量机(SVM)的基础上提出的回归预测模型,SVR 旨在找到一超平面,最小化损失函数(图 3)。

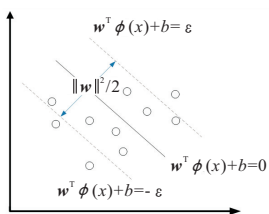


图 3 SVR 的超平面图

Fig. 3 Hyperplan of SVR

其中超平面函数为:

$$f(x) = w^T \phi(x) + b \quad (3)$$

式中, w 为权重系数的向量; b 为偏置常数; $\phi(x)$ 为最小损失函数。

σ 为核函数,即将 x 映射到高维特征空间。SVR 的优化问题如下:

$$\begin{cases} \min(\|w\|^2/2) \\ |y_i - (w^T \phi(x_i) + b)| \leq \epsilon \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (4)$$

虚线区域外的数据点到虚线边界的距离为残差(ξ),损失函数计算公式为:

$$L_\epsilon \xi = \begin{cases} 0 & |\xi| < \epsilon \\ |\xi| - \epsilon & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

引入松弛变量将优化问题转化为如下形式,以提高方法的鲁棒性:

$$\begin{cases} \min(\|w\|^2/2) + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \xi_i^*) \\ y_i - (w^T \phi(x_i) + b) \leq \epsilon + \xi_i \\ y_i - (w^T \phi(x_i) + b) > \epsilon + \xi_i^* \end{cases} \quad (6)$$

具体预测步骤如下。

步骤 1 获取降雨预报数据,通过集雨面积,结合泰森多边形,计算降雨量之和。

步骤 2 将降雨量之和、水土墒值、蒸发值归一化,计算预报来水量,使预处理的数据限定在一定范围内,从而消除奇异样本数据导致的不良影响。

步骤 3 用 SVR 模型拟合输入和每座水库的日出库流量输出。

步骤 4 用训练好的模型对飞云江流域 6 座水库的日出库流量进行预测。

2.5 预警触发

模型计算结果将触发以下多尺度预警值。

(1) 水库可供水量预警。设置多个水库可供水量预警值,不同级别采用不同颜色进行预警,如黄色、橙色、红色等。

(2) 抗旱水位预警。在距离抗旱水位较近并高于抗旱水位的多个位置设置预警水位,不同级别采用不同颜色进行预警,如黄色、橙色、红色等。

(3) 抗旱天数预警。针对抗旱水位对应的不同库容情况,依据最近平均用水量进行计算,采用可用天数设置不同的预警等级,对应不同的颜色进行预警,如采用黄色、橙色、红色等。

(4) 生态流量预警。依据水行政部门核定的生态流量最小值(生态基流)设置几条预警线。如窑口站考核断面生态基流为 $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$,当断面流量降至比生态基流大 20% 并呈继续下降趋势时,发布蓝色预警;当断面流量降至比生态基流大 10% 并呈继续下降趋势时,发布橙色预警;当断面流量降至等于生态基流时,发布红色预警。

3 应用实践

在建立飞云江流域数据底板和数据中心的基础上,将珊溪公司、文成县水利局、百万山、九溪等各类历史数据和实时数据^[7],通过接口服务多跨协同汇聚到数据中心,2022 年 6 月上线运行了飞云江流域数字孪生系统,采用 SPARK 分布式组件技术封装各类数据、模型及算法,开发了 30 多个组件,可以配置抗旱形势、数字调度、水能利用、工程监管等流域数字孪生场景^[8]。

自 2022 年 10 月 26 日开始,中央气象台继续发布气象干旱橙色预警,浙江南部等地进入特旱时期,为温州地区供水的珊溪水库,其水资源情况倍受关注,尤其需要数字孪生系统^[9]提供珊溪水库水位、总可供水量及可供天数、离抗旱水位可供天数等重要指标情况。

数字孪生系统模型组件计算显示,2022 年 9 月 13 日,珊溪水库水位将降低到 133 m,为黄色

预警。2022 年 10 月 15 日,水位将降低到 130 m,为橙色预警。2022 年 11 月 6 日,水位将降低到 128.64 m,为红色报警。上述预测结果与后续实际基本吻合,误差皆在 1 h 之内。并实施以下调度。

(1)2022 年 9 月 13 日,黄色预警后,百丈漈水库作为备用水源地,停止发电、旅游、生态及灌溉等用水。赵山渡水库停止向瑞安江北灌区供水,瑞安塘河生态供水减少到原来的 0.6 倍。

(2)2022 年 10 月 15 日,橙色预警后,瑞安塘河生态供水减少到原来的 0.3 倍。

(3)2022 年 11 月 6 日,触发了红色报警及温州启动了Ⅳ级供水应急响应。

依据预报来水量、各水库库容特性及历史供水量进行模型计算,算出各水库及水文站的调度出库(或站点)流量,为流域调度提供了科学决策依据,系统预测界面见图 4。



图 4 6 座水库的出库水量预测界面图

Fig. 4 Prediction interface of outgoing water volume of six reservoirs

4 结论

a. 以温州市飞云江流域为重点研究对象,开展抗旱调度及数字孪生技术研究与实践,结果表明建立流域抗旱调度模型,通过模型计算预报来水量、可供水量、抗旱天数等,实现流域旱情预警预报,为早期水资源科学调度和配置提供了科学依据。

b. 采用 SVR 算法,结合传统的泰森多边形法、气象预报滚动时差法、汇流出流新安江水文模型算法等,可以满足抗旱模型计算的实时性要求,达到预警预报的精度。此外,引入气象短临网格降雨预报和中长期降雨预报,可以增加汇流计算的精度和抗旱预报的预见期。

c. 建设流域抗旱数字孪生系统,建设数据中心和数据底板,有利于加强“四预”功能和调度能力。

参考文献:

[1] 黄薇,陈进. 长江流域控制性水库联合调度体制及机制探讨——以湘江抗旱调度为例[J]. 长江科学院

院报,2010,27(12):12-16.

- [2] 刘国富,金建乐,陈海荣. 基于气象数值预报的水库调度预警方法:CN201910978414. 4[P]. 2020-04-10.
- [3] 李英海,董晓华,刘冀,等. 考虑抗旱补水需求的三峡水库提前蓄水方案研究[J]. 水电能源科学,2013,31(8):63-65.
- [4] 张先起,赵玥,郑志文,等. 基于 VMD-AVOA-LSS-VM 模型的月降水量预测研究[J]. 水电能源科学,2022,40(12):1-5.
- [5] 罗成鑫,丁伟,张弛,等. 水库分级分期早限水位设计与控制研究[J]. 水利学报,2022(3):348-357.
- [6] 武见,李克飞,赵麦换,等. 应对干旱的黄河梯级水库群水量调度规则研究[J]. 2017,39(11):34-37,94.
- [7] 陈德勇. 灯塔市防汛抗旱指挥调度决策系统模拟研究[J]. 黑龙江水利科技,2020,48(2):73-75.
- [8] 宋健蛟,李传旗,梁吉欣,等. 防汛抗旱决策支持系统框架设计及应用[J]. 四川水利,2022,43(1):162-165.
- [9] WANG YU, SHANG WENXIU, PENG SHAOMING. Yellow River basin drought response system based on the prediction and operation of cascade reservoirs[J]. Advances in water science, 2019, 30(2): 175-185.

(下转第 5 页)

时空分布。

c. 本文仅考虑了降水影响下的干旱特征时空分布, 然而干旱形成的原因复杂多变, 可联合其他径流、蒸散发等干旱影响因素进一步探究漳河上游干旱事件变化。

参考文献:

- [1] 徐明. 漳河上游流域子流域划分研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
- [2] 漳河上游管理局. 漳河要闻[EB/OL]. [2022. 10. 10]. <http://www.hwcc.gov.cn/zhsyj/jgyw/>.
- [3] 赵安周, 张安兵, 王冬利, 等. 海河流域干旱时空变化及驱动因素分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(4): 859-872.
- [4] 吴伟伟. 基于 Z 指数的晋中地区干旱变化特征及成因分析[J]. 水文, 2022, 42(2): 91-95, 101.
- [5] 相恺政, 赵安周, 胡小枫, 等. 1980-2019 年海河流域气象干旱和农业干旱变化及传播特征[J]. 水资源与

水工程学报, 2022, 33(2): 194-202.

- [6] 顾佳帅, 李琼芳, 牛铭媛, 等. 基于多维 Copula 函数的淮河上游气象干旱特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2019(8): 83-87, 92.
- [7] 韩会明, 刘喆玥, 刘成林, 等. 基于 Copula 函数的赣江流域气象干旱特征分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 9-13.
- [8] 刘章君, 郭生练, 许新发, 等. Copula 函数在水文水资源中的研究进展与述评[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 148-159.
- [9] 全国气候与气候变化标准化技术委员会. 气象干旱等级: GB/T 20481-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [10] 周平, 周玉良, 金菊良, 等. 合肥市干旱识别及基于 Copula 的特征值重现期分析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(12): 1-5.
- [11] 潘奇鑫. Copula 函数在宿迁古黄河流域月降雨量模拟中的运用[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.

Application of Copula Function in Analysis of Joint Drought Characteristics in Zhanghe Upstream

SONG Ya-xuan^{a,b}, SUO Mei-qin^{a,b}, LIU Li-bo^{a,b}

(a. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power; b. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The aim of this paper is to describe the drought events in the Zhanghe upstream comprehensively. Firstly, monthly precipitation data were selected to calculate standardized precipitation index. And then, both drought duration and drought severity were identified according to runoff theory. Finally, Copula function was adopted to establish joint distribution between drought duration and drought severity to explore the spatial and temporal distribution of drought characteristics. The results show that the highest frequent drought events in the Zhanghe upstream from 2001 to 2020 is 3 months drought, and the drought severity ranges from 2.24 to 4.92; There is a strong positive correlation between drought duration and drought severity, and Frank Copula function is the most optimal joint distribution function of them; The joint return period of drought characteristics ranges from 18.56-23.94 years, and the northwest and southeast parts of the Zhanghe upstream basin are the two key drought risk areas; The co-occurrence return period of drought characteristics ranges from 22.25-31.94 years, and the northwest, northeast and southeast parts of the Zhanghe upstream basin are the three key drought risk areas. Consequently, it can be obtained that the joint distribution can analyze drought events comprehensively, and thus provide scientific guidance for thorough evaluation of drought.

Key words: Zhanghe upstream; Copula function; drought duration; drought severity; joint distribution

(上接第 9 页)

Research and Application of Drought Control and Digital Twin in Feiyun River Basin

ZHOU Xiao-li¹, ZHANG Ren-gong², HUANG Dong-yang³, CHEN Shan-jia³

(1. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China; 2. Zhejiang Yugong Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310002, China; 3. Wenzhou Water Conservancy Bureau, Wenzhou 325000, China)

Abstract: In view of the relatively serious drought in the Feiyun River basin in recent years, the inability to effectively utilize the regulating capacity of the counter-regulating reservoir, and the inability to effectively guarantee the timeliness and scientificity of the operation, which affect the water supply safety of nearly 6 million people in Wenzhou, the anti-drought operation model and data center of the Feiyun River basin are established. The real-time data of rainfall, water level, water supply flow and ecological flow of multiple reservoirs in the basin are quoted. The meteorological data including 1 h, 3 h, 6 h short-term and imminent grid forecast data, and 1 d, 3 d, 7 d, 15 d, 30 d, 90 d and other long-term rainfall forecast data are introduced. Combined with water and soil moisture in the basin, reservoir and basin evaporation, support vector regression (SVR) calculation method is used to develop a distributed digital twinning business system based on SPARK components, which realizes early warning of available water supply, drought-resistant water level early warning, drought-resistant days early warning and ecological flow early warning, increases the use of the anti-regulation storage capacity of 2.8 million cubic meters and the reserve storage capacity of 2.93 million cubic meters. Thus, it provides data basis and technical support for the drought-resistant decision-making, scientific scheduling and "four pre-" realization in the Feiyun River basin.

Key words: Feiyun River Basin; drought resistance; dispatching rules; digital twin; multi-scale early warning