

大渡河流域汛期涨水阶段径流相似性预报

谭乔凤,施颖,闻昕,杨杉

(河海大学水利水电学院,江苏南京 210098)

摘要:以大渡河流域干流上游丹巴断面为例,对流域涨水规律进行全面分析,结合产汇流特征和下游电站调度需求,利用遍历组合寻优方法确定了涨水模式分类阈值和涨水判断条件,提出了基于“形-值”相似的分类别涨水径流预报方案,实现了预见期为10 d的径流逐日滚动预报。结果表明:2019—2021年,大渡河流域汛期大雨、中雨、小雨的涨水识别准确率分别达到100%、93.18%、84.81%;相比于不考虑涨水条件识别的基础预报方案,分类别涨水预报方案在不同涨水模式下的径流预报平均相对误差降低了0.45%~6.81%;预见期为1、5、10 d的径流预报平均相对误差分别为3.39%、9.64%、12.29%,纳什效率系数分别达到0.99、0.95、0.91,该方法具有较高的预报精度。

关键词:涨水识别;相似性预报;径流滚动预报;大渡河流域

中图分类号:P338

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)06-0139-09

Runoff similarity forecast during water rise stage of flood season in the Dadu River Basin//TAN Qiaofeng, SHI Ying, WEN Xin, YANG Shan (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the Danba Section upstream of the main stream of the Dadu River Basin as an example, a comprehensive analysis of the water rise law in the basin was conducted. Combining the characteristics of runoff and the scheduling needs of downstream power stations, the threshold for water rise mode classification and the conditions for water rise judgment were determined using the traversal combination optimization method. A classified water rise runoff forecasting scheme based on “form-value” similarity was proposed, achieving a daily rolling forecast of runoff with a prediction period of 10 d. The results showed that from 2019 to 2021, the accuracy of identifying rising water in heavy rain, moderate rain, and light rain during the flood season in the Dadu River Basin reached 100%, 93.18%, and 84.81%, respectively. Compared with the basic forecasting scheme that does not consider the identification of water rise conditions, the average relative error of runoff forecasting for different water rise modes is reduced by 0.45% to 6.81% for the classified water rise runoff forecasting scheme. The average relative errors of runoff forecasts with forecast periods of 1, 5, and 10 d are 3.39%, 9.64%, 12.29%, respectively, and the Nash efficiency coefficients reach 0.99, 0.95, and 0.91, respectively. This method has high forecast accuracy.

Key words: water rise identification; similarity forecast; runoff rolling forecast; Dadu River Basin

大渡河流域地处青藏高原与四川盆地的过渡地带,被季风区、青藏高原区和西北干旱半干旱区环绕^[1-3]。受中小尺度地形影响,流域内天气系统复杂,气象预报难度大,来水不确定性强,所在西南地区被称为径流预报难度“天花板”^[4]。大渡河流域地形狭长且起伏大,支流众多且汇流不集中,主汛期天气恶劣,阵性局地暴雨频发,降雨强度大,落区重复,区域洪水组成复杂多样,长历时大洪量洪水与尖瘦洪峰型洪水叠加,导致汛期涨水成因复杂,涨水预报难度大。同时,涨水阶段是实施洪水资源化利用

和精准防洪调度的关键时期^[5-7],涨水预报对大渡河流域提高精益化调度水平至关重要^[8-11]。

径流预报模型可以分为物理驱动模型和数据驱动模型。物理驱动模型^[12-13]从径流的物理成因出发,通过一系列含参数的数学物理方程描述产汇流过程,且每个参数都有明确的物理意义,但当流域自然地理环境或产汇流条件复杂时,模型参数率定困难^[14-15]。数据驱动模型^[16]是以建立输入、输出数据最优数学关系为目标的黑箱子方法,无须考虑径流形成的物理机制,但预报精度依赖可靠且海量的样

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFE0105200)

作者简介:谭乔凤(1991—),女,教授,博士,主要从事水库调度及水文预报研究。E-mail:qiaofengt@126.com

通信作者:闻昕(1987—),男,教授,博士,主要从事水库调度及水文预报研究。E-mail:njwenxin@163.com

本数据,且预报可解释性差^[17-18]。大渡河流域在物理驱动模型和数据驱动模型上都有丰富的尝试,例如:罗玮等^[19-20]深度挖掘产汇流成因,构建了流域WRF-新安江径流预报模型和SWAT径流预报模型;李佳等^[21-22]构建了基于数据驱动的AdaBoost径流预报模型和LSTM径流预报模型。但无论是物理驱动模型,还是数据驱动模型,在大渡河流域的应用都存在预报精度瓶颈。近几年,大渡河流域融合两类模型优势^[23],考虑产汇流物理成因,利用数据挖掘技术寻找相似性样本,利用“参考过去预测未来”的基本思想,提供可解释的径流预报成果,取得较好的应用效果。例如:谭乔凤等^[24]构建了流域降雨-径流相似性预报模型,实现了丹巴断面未来7d径流逐日滚动预测,整体预报效果较好;牟时宇等^[25]对比了不同预见期下相似性预报模型、新安江-融雪洪水预报模型和概率预报模型在大渡河流域的预报效果,结果表明相似性预报模型在退水阶段取得了较突出的预报效果,但涨水阶段预报精度有待于进一步提升。

鉴于此,本文以大渡河流域干流上游丹巴断面为例,分析总结流域涨水规律,构建通用的涨水模式划分框架,并确定涨水模式分类的临界切换阈值和涨水判断条件,构建基于“形-值”相似的分类别汛期径流预报模型,以期突破大渡河流域径流预报精度瓶颈,为大渡河流域下游发电、防洪调度提供重要支撑。

1 研究区概况与数据来源

大渡河流域位于四川省中西部,北纬 $28^{\circ}15' \sim 33^{\circ}33'$ 、东经 $99^{\circ}42' \sim 103^{\circ}48'$ 。大渡河全长1062 km,年径流量高达470亿 m^3 ,拥有十分丰富的水能资源,是国家规划的十三大水电基地之一。丹巴断面是大渡河流域干流上游的重要水文站点之一,丹巴断面以上流域面积52763 km^2 ,占流域总面积68%,多年平均降水量为700 mm左右,降雨多集中在6—9月,气候变化明显,干湿季分明,属于川西高原气候区^[26]。丹巴断面的径流大小可反映大渡河河源区对中下游水库入库径流的贡献情况,因此选取丹巴断面作为预报对象。研究区及具体站点位置见图1。

本文收集整理了2009—2021年的大渡河流域丹巴断面日径流量数据和上游各雨量站日降水量数据。由于未收集到历史预报降水量数据,预报降水量数据都由实测降水量数据代替。以2009—2018年汛期(5—10月)数据为历史样本,对2019—2021年汛期10d逐日径流进行滚动预报。

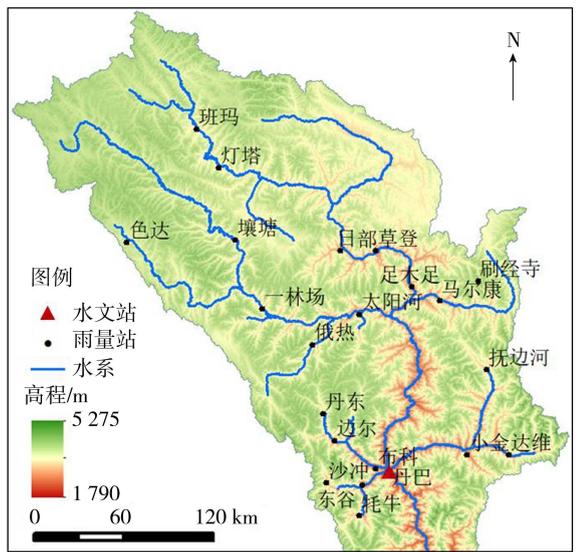


图1 研究区及站点位置

Fig.1 Location of study area and sites

2 研究方法

2.1 预报因子识别

根据产汇流理论,影响洪水过程的主要因素包括下垫面条件、前期土壤含水量、降水量及其时空分配等^[27-28]。研究区土壤含水量目前尚无直接监测数据,考虑到前期径流可以间接反映初始土壤含水量,且大渡河流域汛期以暴雨洪水为主,结合信息的易获取性,汛期径流预报因子主要考虑降水量和前期径流量。

丹巴断面上游共有21个雨量站,若再叠加考虑降雨影响滞时,数据时空维度较高,很难捕捉和量化降雨相似性。本文结合流域降雨、径流的空间响应关系,将流域划分为若干个子区域,建立各子区域点雨量到面雨量的空间映射关系,以降低降水量数据输入维度^[29],提高相似性样本的搜索效率。子区域*i*面雨量 P_i 通过各站点加权平均得到,其权重按照大渡河流域各站点的泰森多边形的面积占全流域面积的比值确定。将丹巴断面以上区域分为5个子区域:区域1包括色达、壤塘、一林场3个雨量站;区域2包括班玛、灯塔2个雨量站;区域3包括俄热、太阳河2个雨量站;区域4包括日部、草登、足木足、刷经寺、马尔康5个雨量站;区域5包括丹东、边尔、布科、东谷、沙冲、牦牛、抚边河、小金、达维9个雨量站。

考虑到降水量与预报断面径流量存在滞时效应^[30],本文结合流域产汇流规律,分析上游降水量与预报断面径流量的Pearson相关关系,初步确定上游降水量对预报断面径流量的影响滞时为1~3d;通过对预报断面径流量进行自相关分析和偏自

相关分析,初步确定前期径流量对预报断面径流量的影响滞时为 2 d。最终影响滞时结合模型参数率定进行确定。

2.2 涨水条件识别

2.2.1 涨水规律分析

收集整理大渡河流域丹巴断面历史实测降雨、径流数据,对涨水规律进行全面分析,以 2009-06-21 至 2009-07-21、2014-05-30 至 2014-06-29、2019-06-22 至 2019-07-22、2020-07-20 至 2020-08-19 共 4 段不同年份的典型径流过程为例分析丹巴断面涨水规律,降雨及径流过程见图 2(图中数字标号代表不同涨水过程)。

a. 情况 1:不同起涨流量下,下垫面饱和程度不同,涨水增幅不同。起涨流量较大时,下垫面较饱和,相同降水量引起的涨水增幅更大。例如,2009 年 7 月 3 日径流量为 $1\ 833\ \text{m}^3/\text{s}$,降水量为 $11.39\ \text{mm}$,7 月 4 日涨水增幅为 $135\ \text{m}^3/\text{s}$ (图(a)中③),而 2009 年 7 月 8 日径流量为 $2\ 284\ \text{m}^3/\text{s}$,降水量为 $12.17\ \text{mm}$,7 月 9 日涨水增幅为 $394\ \text{m}^3/\text{s}$ (图(a)中③);2014 年 6 月 4 日径流量为 $1\ 016\ \text{m}^3/\text{s}$,降水量为 $15.93\ \text{mm}$,6 月 5 日涨水增幅为 $110\ \text{m}^3/\text{s}$ (图(b)中②),而 2014 年 6 月 12 日径流量为 $2\ 123\ \text{m}^3/\text{s}$,降水量为 $16.43\ \text{mm}$,6 月 13 日涨水增幅为 $726\ \text{m}^3/\text{s}$ (图(b)中②)。

b. 情况 2:前期总降水量量级达到一定程度时,会引起涨幅较大的涨水。例如,4 段典型案例中前 1 d 降水量超过 $14\ \text{mm}$ 就会引起涨水,2009 年

7 月 15 日、2014 年 6 月 25 日、2019 年 7 月 6 日、2020 年 8 月 11 日的降水量分别为 14.01 、 15.05 、 15.97 、 $16.18\ \text{mm}$,都引起了后续 1 d 的涨水现象(图(a)中④、图(b)中③、图(c)中③、图(d)中⑤)。

c. 情况 3:前期降水量级未达到情况 2 的程度,也可能存在两种涨水情景。情景 1,前 1 d 径流量增幅小,前期总降水量达到一定程度,会引起当日涨水。这是由于上游降雨与预报断面径流的滞时效应,使得上游前期降雨产流未能及时汇集、流经到预报断面上,直到当日才出现涨水。例如,2009 年 6 月 29 日,前 2 d 降水量达到 $12.28\ \text{mm}$,前 1 d 径流量降低了 $83\ \text{m}^3/\text{s}$,而在当日引起了 $293\ \text{m}^3/\text{s}$ 的涨水(图(a)中②);2020 年 7 月 26 日,前 2 d 降水量达到了 $9.67\ \text{mm}$,前 1 d 径流量增加了 $13\ \text{m}^3/\text{s}$,并在当日引起了 $211\ \text{m}^3/\text{s}$ 的涨水(图(d)中①)。情景 2,前 1 d 径流量增幅大时,往往下垫面饱和程度较高,只要前 1 d 或者当日降水量达到一定量级,就会引起快速涨水。例如,2014 年 6 月 11 日,前 1 d 径流量增幅为 $419\ \text{m}^3/\text{s}$,且当日降水量达到 $12.83\ \text{mm}$,引起了当日 $148\ \text{m}^3/\text{s}$ 的涨水(图(b)中②);2019 年 7 月 1 日,前 1 d 径流量增幅为 $443\ \text{m}^3/\text{s}$,且前 1 d 降水量达到 $8.05\ \text{mm}$,引起了当日 $406\ \text{m}^3/\text{s}$ 的涨水(图(c)中①)。

2.2.2 涨水模式与涨水判断条件

从涨水规律可以看出,不同量级的径流量和降水量对涨水产生有不同程度的影响,因此本文对径流量等级和降雨等级进行划分,进而确定涨水模式。

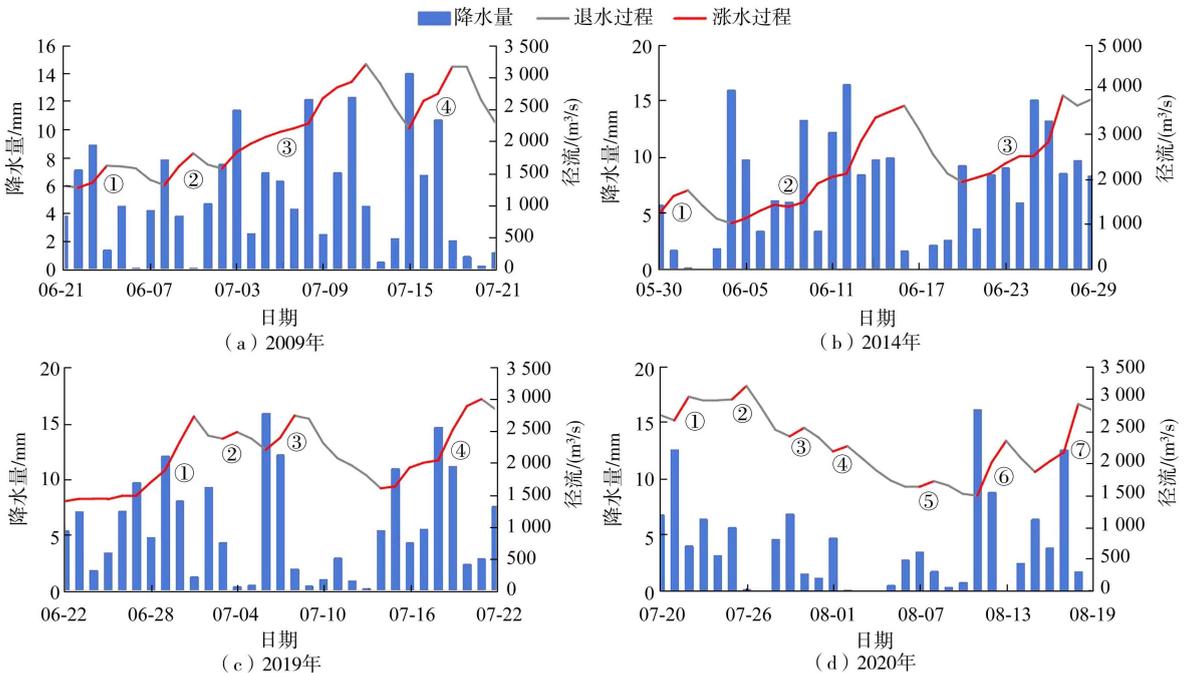


图 2 丹巴断面不同年份典型降雨及径流过程

Fig. 2 Typical precipitation and runoff process of Danba Section in different years

径流量等级划分需结合流域产汇流特征和下游电站调度需求,丹巴断面汛期历史径流量为 200 ~ 5000 m³/s,3000 m³/s 以上的涨水多为暴雨洪水,3000 m³/s 以下涨水成因更加复杂多变。丹巴断面下游的猴子岩电站来水大于 1000 m³/s 时,猴子岩电站将进入防洪调度模式,因此,前 1 d 径流量 Q_{t-1} 对实现洪水资源化利用和精准防洪调度意义重大。综合考虑丹巴断面产汇流特征以及猴子岩电站调度需求,将丹巴断面径流量划分为 I、II、III 等级,分别对应 $Q_{t-1} \geq 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2000 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{t-1} < 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1000 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q_{t-1} < 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。降雨等级划分需先确定前期降雨影响时段,进而确定大雨、中雨、小雨 3 种降雨等级的阈值。考虑到上游降雨对丹巴断面径流的影响滞时为 2~3 d,确定前期降雨影响时段为 3 d,进而构建需考虑的不同降水情况:前 1 d 降水量 P_{t-1} 、前 2 d 降水量和 $P_{t-2} + P_{t-1}$ 、前 3 d 降水量和 $P_{t-3} + P_{t-2} + P_{t-1}$ 、当日降水量 P_t 、前 1 d 降水量与当日降水量之和 $P_{t-1} + P_t$ 、前 2 d 降水量与当日降水量之和 $P_{t-2} + P_{t-1} + P_t$ 。降雨等级阈值通过遍历寻优得到,不同径流量等级与不同降雨等级结合,构成不同涨水模式。研究区涨水模式见表 1。

确定涨水模式后,进一步确定涨水判断条件的阈值。在大雨条件下一定会引起涨水,无须另设涨水判断条件;对于中雨,可分为前期径流量增幅小、前期径流量增幅大两种情况;对于小雨,也可分为前期径流量增幅小、前期径流量增幅大两种情况;在径流等级为 I 级的条件下,大雨和中雨的涨水识别条件可以完全覆盖该径流等级下的所有涨水状态,故该径流等级没有小雨的情况,具体见表 2。采用识别率和准确率两个指标来衡量涨水条件的优劣。识别率为涨水过程识别正确场次与历史总涨水场次的比值;准确率为涨水过程识别正确场次与识别总场次的比值。以识别率、准确率之和最大为目标通过遍历组合寻优确定径流等级和降雨等级划分参数。

2.3 汛期径流预报

2.3.1 基于“形-值”相似的径流预报模型

相似性预报的基本原理为:客观世界的发生发展存在一定的联系,未来的发生发展过程在历史中可以找到相似的发生发展过程。在一定地理环境条件下,相似天气系统所产生的降雨、径流等过程也是相似的,因此,本文基于当前降雨、径流过程与历史降雨、径流过程的相似性特征构建汛期径流预报模型。 t 时刻的径流 Q_t 受降水量和前期径流量的影响,降水量、前期径流量施加的影响序列可表征为降水量特征矢量 \mathbf{P} 和前期径流量特征矢量 \mathbf{Q} 。 \mathbf{P} 为考虑 l 个子区域面雨量施加的影响序列 $(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_l)$,其中第 i 个子区域面雨量施加的影响序列 $\mathbf{P}_i = (P_{i,t-c_{p,i}+1}, P_{i,t-c_{p,i}+2}, \dots, P_{i,t})$, $c_{p,i}$ 为第 i 个子区域面雨量与预报断面径流的响应滞时; \mathbf{Q} 为考虑前期径流施加的影响序列 $(Q_{t-c_q}, Q_{t-c_q+1}, \dots, Q_{t-1})$, c_q 为前期径流与预报断面径流的影响滞时。 \mathbf{P} 、 \mathbf{Q} 共同构成特征矢量组 \mathbf{V}_t ,且 \mathbf{V}_t 与 Q_t 一一对应。

通过相似量化指标衡量降水量、径流量样本间的相似程度,在已有的特征矢量组 \mathbf{V}_t 中,设有 k 个历史特征矢量组 $\mathbf{V}_{r,1}, \mathbf{V}_{r,2}, \dots, \mathbf{V}_{r,k}$,与当前特征矢量组 \mathbf{V}_t 的相似量化指标分别为 $D_1, D_2, \dots, D_k, D_j (j=1, 2, \dots, k)$ 越小,表明 $\mathbf{V}_{r,j}$ 与 \mathbf{V}_t 越相似,则对应历史相似过程的后续值 $Q_{r,j}$ 与 Q_t 相似的可能性越大,从而利用 $Q_{r,j}$ 对 t 时刻径流 Q_t 进行预报,表达式为

$$Q_t = \sum_{j=1}^k W_j Q_{r,j} \quad (1)$$

其中 $W_j = \frac{1}{D_j} / \sum_{j=1}^k \frac{1}{D_j}$

式中 W_j 为样本权重,本文采用倒数法确定相似样本的权重。

相似性预报本质上是“全等”预报。选择相似样本时,有时两个样本形状很相似,但其平均值的大小可能相差很大,在空间可能是上下两个互不相交

表 1 研究区涨水模式

Table 1 Water rise pattern in study area

径流等级	大雨	中雨	小雨
I	$P_{t-2} + P_{t-1} > 20 \text{ mm}$	$15 \text{ mm} < P_{t-2} + P_{t-1} \leq 20 \text{ mm}$	
II	$P_{t-2} + P_{t-1} > 17 \text{ mm}$	$13 \text{ mm} < P_{t-2} + P_{t-1} \leq 17 \text{ mm}$	$11 \text{ mm} < P_{t-2} + P_{t-1} \leq 13 \text{ mm}$
III	$P_{t-2} + P_{t-1} > 15 \text{ mm}$	$13 \text{ mm} < P_{t-2} + P_{t-1} \leq 15 \text{ mm}$	$9.5 \text{ mm} < P_{t-2} + P_{t-1} \leq 13 \text{ mm}$

表 2 涨水判断条件

Table 2 Judgment conditions for water rise

径流等级	中雨		小雨	
	前期径流量增幅小	前期径流量增幅大	前期径流量增幅小	前期径流量增幅大
I	$Q_{t-1} - Q_{t-2} < 150 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{t-1} - Q_{t-2} \geq 150 \text{ m}^3/\text{s}, P_{t-1} > 8 \text{ mm}$		
II	$Q_{t-1} - Q_{t-2} < 100 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{t-1} - Q_{t-2} \geq 100 \text{ m}^3/\text{s}, P_{t-1} > 7 \text{ mm}$	$Q_{t-1} - Q_{t-2} < 165 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{t-1} - Q_{t-2} \geq 165 \text{ m}^3/\text{s}, P_{t-1} > 4.5 \text{ mm}$
III	$Q_{t-1} - Q_{t-2} < 0$	$Q_{t-1} - Q_{t-2} \geq 0, P_{t-1} > 4 \text{ mm}$	$Q_{t-1} - Q_{t-2} < 110 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q_{t-1} - Q_{t-2} \geq 110 \text{ m}^3/\text{s}, P_{t-1} > 3.5 \text{ mm}$

的曲面;有时两个样本即使平均值也相同,但空间分布和涨退趋势可能大不相同。由大渡河流域产汇流原理可知,汛期径流过程不仅与降水量和径流量有关,还与降雨时空分配以及前期径流的时程分布有关,其预报因子具有“形”和“值”的双重特点。因此,本文采用综合考虑“形”相似和“值”相似的最优相似系数来量化降水量、径流样本间的相似程度。其中,“形”相似通过形系数表征,由两样本距平差的绝对值除以两样本距平绝对值的和得到(式(2)),可以衡量样本间的位相和振幅相似性,即衡量样本间的空间分布和涨、退趋势等“形”相似特征。“值”相似通过值系数表征,其主要参考与“形”的相对重要性,用两样本平均值的差的绝对值与其波动程度的对比代表“值”的影响,本文取波动程度为两样本距平绝对值的和(式(3)),可以衡量样本间数量的“值”相似特征。最优相似系数即取量纲1与形系数、值系数之积的差(式(4))。值得注意的是,当某一预报因子只有一维,两样本距平绝对值的和为0,最优相似系数并不适用,此情况下采用欧式距离^[24]来衡量单时段预报因子样本间的相似程度(式(5))。考虑到不同预报因子的影响程度不一,使用不同预报因子加权平均后得到的最优相似性系数作为最终的综合相似性度量指标,其值越小表示当前样本与历史样本越相似。

$$B_{\text{SF}i} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{c_i} |(e_{0i,j} - \bar{e}_{0i}) - (e_{i,j} - \bar{e}_i)|}{\sum_{j=1}^{c_i} (|e_{0i,j} - \bar{e}_{0i}| + |e_{i,j} - \bar{e}_i|)} \quad (2)$$

$$B_{\text{SV}i} = \exp \left[- \frac{c_i |\bar{e}_{0i} - \bar{e}_i|}{\sum_{j=1}^{c_i} (|e_{0i,j} - \bar{e}_{0i}| + |e_{i,j} - \bar{e}_i|)} \right] \quad (3)$$

$$B_{\text{S}i} = 1 - B_{\text{SF}i} B_{\text{SV}i} \quad (4)$$

$$r_i = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{c_i} (e_{i,j} - e_{0i,j})^2}}{\max \left[\sqrt{\sum_{j=1}^{c_i} (e_{i,j} - e_{0i,j})^2} \right]} \quad (5)$$

式中: $B_{\text{SF}i}$ 、 $B_{\text{SV}i}$ 、 $B_{\text{S}i}$ 分别为第*i*个预报因子的形系数、值系数和最优相似系数; r_i 为第*i*个预报因子的欧式距离; c_i 为第*i*个预报因子的影响滞时; $e_{i,j}$ 为历史样本第*i*个预报因子的第*j*个元素; \bar{e}_i 为历史样本第*i*个预报因子的 c_i 个元素的均值; $e_{0i,j}$ 为当前样本第*i*个预报因子的第*j*个元素; \bar{e}_{0i} 为当前样本第*i*个预报因子的 c_i 个元素的均值。

2.3.2 预报精度评价指标

本文选择纳什效率系数(NSE)、均方根误差

(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MARE)作为模型预报效果的评价指标。其中,NSE的值域为 $(-\infty, 1]$,其值越趋近于1时,说明预报结果与实测数据越为吻合。RMSE、MAE以及MARE的取值范围均为 $[0, +\infty)$,其值越接近0表示模型的预报结果越准确。

2.3.3 汛期径流预报方案

丹巴断面汛期径流预报涉及两种预报方案。

①分类别涨水预报方案:针对不同涨水模式,分别选择不同的样本库和模型参数,并构建基于“形-值”相似的径流预报模型。其中,样本库是指在所有历史样本中,满足涨水识别条件并实际为涨水的历史样本的集合;模型参数主要考虑降雨特征矢量 \mathbf{P} 、径流特征矢量 \mathbf{Q} 、降水量影响权重 α_1 、径流量影响权重 α_2 、相似样本个数 k ,以1d平均相对误差最小为目标,采用遍历寻优率定最优参数。②基础预报方案:不考虑径流涨水分类,以汛期径流样本作为历史样本库,构建基于“形-值”相似的径流预报模型,模型参数以1d平均相对误差最小为目标进行率定。

预报过程中,需滚动判断当日是否为涨水模式,如为涨水模式则采用分类别涨水预报方案,否则采用基础预报方案。同时,为延长预见期,实时接入降雨预报数据滚动更新降雨相似性,并不断加入模型自身输出的径流预报信息滚动更新前期径流相似性,以此实现未来10d逐日预报。

3 结果与分析

3.1 涨水条件识别

表3为研究区不同涨水模式的涨水条件识别效果。由表3可见,在大雨、中雨、小雨条件下涨水识别率分别为100%、81.67%、80.15%,准确率分别为92.68%、91.59%、75.17%。汛期产流不仅与降雨有关,与下垫面饱和程度也密切相关。降雨等级逐渐降低,流域下垫面饱和程度逐渐降低,汛期涨水与下垫面关系逐渐增强。但由于大渡河流域下垫面条件

表3 研究区不同涨水模式的涨水识别效果

Table 3 Recognition effect of different water rise patterns in study area

径流量等级	降雨等级	历史涨水场次	识别正确场次	识别场次	识别率/%	准确率/%
I	大雨	9	9	10	100	90.00
	中雨	8	8	8	100	90.00
II	大雨	56	56	59	100	94.52
	中雨	52	39	45	75.00	86.67
	小雨	36	24	32	66.67	75.00
III	大雨	125	125	136	100	91.91
	中雨	60	51	54	85.00	94.44
	小雨	100	85	113	85.00	75.22

复杂,此情况下涨水较难把握,故小雨条件下识别率和准确率都较低。发生大雨时是流域实施梯级联合调度和控制防洪调度风险的关键时期,涨水识别准确率较高对流域防洪减灾和科学调度具有重要意义。

3.2 汛期预报方案构建

根据构建的分类别涨水预报方案和基础预报方案,分别对丹巴断面 2019—2021 年汛期涨水模式和非涨水模式径流进行预报,分类别涨水预报方案的模型参数见表 4。由于 2019—2021 年汛期满足径流等级 I 级的涨水仅有 4 场,该径流等级下的不同涨水模式采用一套模型参数。基础预报方案的 P 、 Q 分别为 (P_{t-2}, P_{t-1}, P_t) 、 $(Q_{t-3}, Q_{t-2}, Q_{t-1})$, α_1 、 α_2 、 k 分别为 0.972、0.028、5。由表 4 可见,随着降雨等级的增加,降雨影响程度逐渐增强,前期径流影响程度不断减小,这个现象符合大渡河流域汛期主要为暴雨洪水的一般规律。此外,在同等降雨等级下,由于前期径流增幅大时,下垫面往往更加饱和,此时反映下垫面情况的前期径流的影响权重就会更高,参数率定结果符合产汇流原理。

3.3 涨水预报结果分析

针对丹巴断面 2019—2021 年汛期预见期为 1 d 的、判断为涨水模式的径流分别采用分类别涨水预报方案和基础预报方案进行预报,并将两方案预报结果进行对比,结果见表 5。由表 5 可见,分类别涨水预报方案在不同涨水模式上的平均相对误差降低了 0.45%~6.81%,效果较好。当径流量等级为 I 级时,共识别了 4 场,识别率 100%,准确率 100%,分类别涨水预报方案比基础预报方案平均相对误差减少了 3.52%;当径流量等级为 II 级时,共识别了 41 场,识别率 77.36%,准确率 93.18%,分类别涨水预报方案比基础预报方案平均相对误差减少了

2.67%;当径流量等级为 III 级时,共识别了 67 场,识别率 62.62%,准确率 84.81%,分类别涨水预报方案比基础预报方案平均相对误差减少了 0.37%。各涨水模式下的分类别涨水预报方案与基础预报方案的预报结果对比见图 4,可见,分类别涨水预报方案的预报值与实际值更为接近,整体上涨水预报效果更好。值得注意的是,相似性预报模型在洪水量级较大时表现优异,对指导流域实施科学防洪调度具有重要意义。

表 5 两种方案平均相对误差对比

Table 5 Comparison of average relative error between two schemes

径流量等级	降雨等级	分类别涨水预报方案	基础预报方案
I	大雨	1.85	6.44
	中雨	0.16	0.45
II	大雨	2.78	5.70
	中雨	4.35	6.70
III	小雨	2.40	5.11
	大雨	6.58	6.81
III	中雨	3.80	5.80
	小雨	3.76	4.18

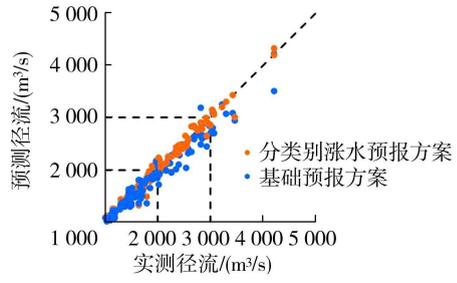


图 4 两种方案预报结果对比

Fig. 4 Comparison of forecast results between two schemes

3.4 滚动预报结果分析

表 6 为分类别涨水预报方案和基础预报方案的滚动预报精度评价结果。由表 6 可见,与基础预报

表 4 分类别涨水预报方案的模型参数

Table 4 Model parameters for classified water rise forecasting schemes

径流量等级	涨水判断条件	P	Q	α_1	α_2	k
I	大雨					
	中雨-前期径流增幅小	(P_{t-1}, P_t)	$(Q_{t-3}, Q_{t-2}, Q_{t-1})$	0.980	0.020	2
	中雨-前期径流增幅大					
II	大雨	$(P_{t-3}, P_{t-2}, P_{t-1}, P_t)$	$(Q_{t-3}, Q_{t-2}, Q_{t-1})$	0.890	0.110	2
	中雨-前期径流增幅小	(P_{t-2}, P_{t-1}, P_t)	$(Q_{t-4}, Q_{t-3}, Q_{t-2}, Q_{t-1})$	0.580	0.420	3
	中雨-前期径流增幅大	(P_{t-2}, P_{t-1}, P_t)	$(Q_{t-3}, Q_{t-2}, Q_{t-1})$	0.570	0.430	2
	小雨-前期径流增幅小	(P_{t-2}, P_{t-1}, P_t)	$(Q_{t-4}, Q_{t-3}, Q_{t-2}, Q_{t-1})$	0.305	0.695	2
	小雨-前期径流增幅大	(P_{t-2}, P_{t-1}, P_t)	$(Q_{t-4}, Q_{t-3}, Q_{t-2}, Q_{t-1})$	0.280	0.720	2
III	大雨	$(P_{t-3}, P_{t-2}, P_{t-1}, P_t)$	(Q_{t-2}, Q_{t-1})	0.510	0.490	3
	中雨-前期径流增幅小	(P_{t-2}, P_{t-1}, P_t)	$(Q_{t-4}, Q_{t-3}, Q_{t-2}, Q_{t-1})$	0.430	0.570	2
	中雨-前期径流增幅大	(P_{t-1}, P_t)	$(Q_{t-3}, Q_{t-2}, Q_{t-1})$	0.405	0.595	3
	小雨-前期径流增幅小	$(P_{t-3}, P_{t-2}, P_{t-1}, P_t)$	(Q_{t-2}, Q_{t-1})	0.330	0.670	3
	小雨-前期径流增幅大	(P_{t-2}, P_{t-1}, P_t)	(Q_{t-2}, Q_{t-1})	0.320	0.680	2

方案相比,分类别涨水预报方案在预见期为1d的情况下, RMSE 降低了 $15.50 \text{ m}^3/\text{s}$, MAE 降低了 $7.38 \text{ m}^3/\text{s}$;在预见期5d的情况下, RMSE 降低了 $12.59 \text{ m}^3/\text{s}$, MAE 降低了 $8.77 \text{ m}^3/\text{s}$;在预见期为10d的情况下, RMSE 降低了 $16.20 \text{ m}^3/\text{s}$, MAE 降低了 $9.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 。同时,预见期为1d的情况下 NSE 大于0.99, MARE 小于3.50%;预见期5d的情况下 NSE 大于0.94, MARE 小于10.00%;预见期为10d的情况下 NSE 大于0.91, MARE 小于12.50%。可见,分类别涨水预报方案可有效提高汛期径流预报精度并延长预见期。

本文采用实测降雨代替预报降雨建立预报模型,为评估降雨预报偏差对径流预报精度的影响,分析了10%~90%的降雨预报偏差下分类别涨水预报方案的10d滚动预报效果,结果见图5。由图5可

见,随着降雨预报偏差增大,径流预报精度整体呈下降趋势,表明提高降雨预报精度对径流预报至关重要。同时,在40%的降雨预报偏差内,径流预报结果的 MARE 仅降低了0.35%, MAE 仅降低了 $5.79 \text{ m}^3/\text{s}$,可见在一定的降雨预报偏差内,分类别涨水预报方案仍保持较好的预报效果。

图6为分类别涨水预报方案下2019、2020、2021年典型洪水场次的滚动预报结果,图例中日期代表以该日期为起点的未来10d的预报过程。由图6可见,分类别涨水预报方案在准确预测洪峰和峰现时间上都有突出效果,可以提前多日发出洪水预警并有效提高洪峰预报精度。同时,该方法是通过搜寻最相似的历史样本进行预报,可查询并分析与当前样本最相似的历史降雨和径流样本以及相应情景下的历史调度过程,为防洪调度会商和发电计

表6 两种方案的预报精度评价结果

Table 6 Prediction accuracy evaluation results of two schemes

预见期/d	分类别涨水预报方案				基础预报方案			
	NSE	RMSE/(m^3/s)	MAE/(m^3/s)	MARE/%	NSE	RMSE/(m^3/s)	MAE/(m^3/s)	MARE/%
1	0.992	72.15	39.90	3.39	0.988	87.68	47.28	3.71
2	0.978	115.93	68.96	5.80	0.969	137.66	78.22	6.15
3	0.966	146.31	89.03	7.48	0.958	160.80	95.59	7.71
4	0.954	169.76	103.78	8.77	0.948	179.14	109.97	8.99
5	0.945	184.72	113.37	9.64	0.937	197.31	122.14	10.03
6	0.938	196.68	122.58	10.43	0.929	210.10	130.50	10.82
7	0.928	212.05	132.15	11.06	0.921	222.81	139.530	11.47
8	0.922	220.34	140.61	11.40	0.912	234.25	146.22	11.87
9	0.914	232.37	145.78	11.85	0.906	242.49	151.48	12.22
10	0.911	236.12	148.42	12.29	0.899	252.32	157.50	12.66

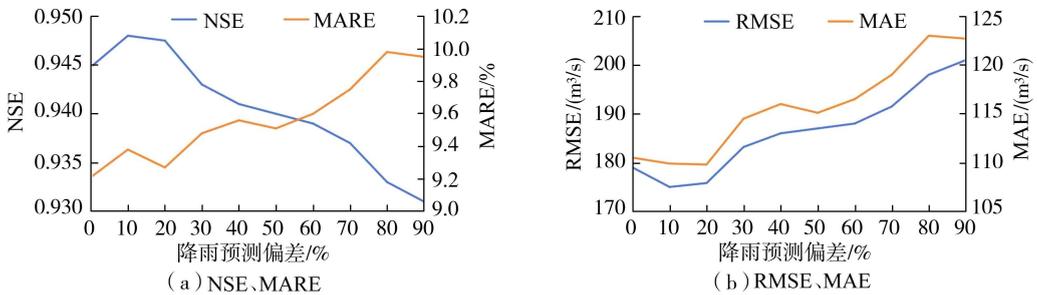


图5 不同降雨偏差下10d滚动预报结果评价指标对比

Fig. 5 Comparison of evaluation indicators of 10d rolling forecast results under different rainfall deviations

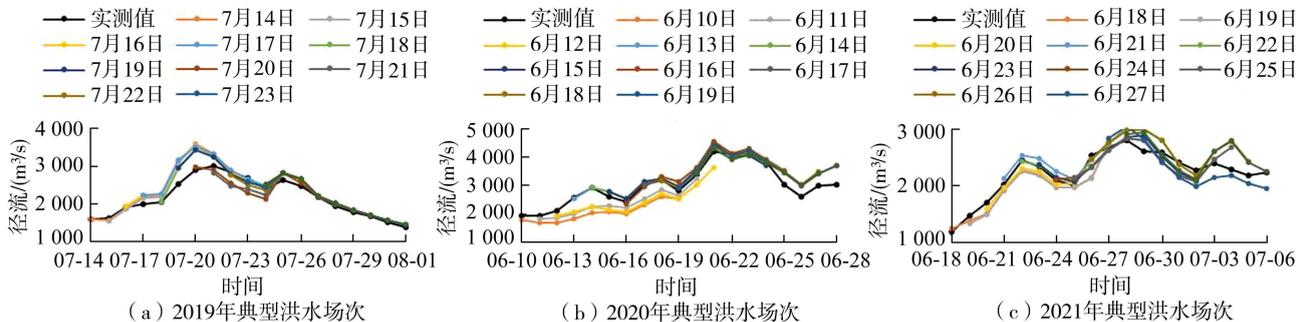


图6 典型场次洪水滚动预报结果

Fig. 6 Rolling flood forecast results for typical floods

划申报提供决策参考,相对于传统数据挖掘方法,预报结果具有可解释性。同时,该方法搜索出的多个历史相似性样本,其后续径流过程可作为未来径流延展和预测的依据,不仅可通过多样本加权平均提供确定值预报信息,还可提供可能出现的最大和最小洪水的区间预报信息,可为流域梯级电站的柔性调度提供理论依据。

4 结 论

a. 大渡河流域丹巴断面不同的前期径流量和降雨等级的涨水规律不同,通常有两种情况:一是前期总降水量达到一定级别时会引起涨水;二是前期降雨等级较小,前1d径流增幅小、前期总降水量达到一定程度会引起涨水,前1d径流增幅大、前1d或者当日降雨达到一定量级也会引起涨水。

b. 不同径流量等级与不同降雨等级组合形成不同涨水模式,2019—2021年研究区汛期不同径流量等级下的大雨、中雨、小雨的涨水识别准确率分别为100%、93.18%、84.81%,识别效果较好。

c. 相比于不考虑涨水模式的基础预报方案,2019—2021年研究区汛期不同涨水模式下的分类别涨水预报方案的平均相对误差降低了0.45%~6.81%,预报精度较高。

d. 分类别涨水预报方案在预见期为1、5、10d的平均相对误差分别为3.39%、9.64%、12.29%,纳什效率指数分别达到0.99、0.95、0.91,可有效延长径流预报预见期。

参考文献:

[1] 张永双,刘筱怡,姚鑫.基于InSAR技术的古滑坡复活早期识别方法研究:以大渡河流域为例[J].水利学报,2020,51(5):545-555.(ZHANG Yongshuang, LIU Xiaoyi, YAO Xin. InSAR-based method for early recognition of ancient landslide reactivation in Dadu River, China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(5):545-555. (in Chinese))

[2] 肖杨,袁淑杰,张碧,等.大渡河流域降水时空分布特征[J].人民长江,2019,50(增刊1):60-67.(XIAO Yang, YUAN Shujie, ZHANG Bi, et al. Spatial-temporal characteristics of precipitation in Dadu River Basin[J]. Yangtze River, 2019, 50(Sup1):60-67. (in Chinese))

[3] 邓建辉,韦晓,戴仕贵,等.泸定地震诱发灾害特征分析[J].工程科学与技术,2024,56(1):117-126.(DENG Jianhui, WEI Xiao, DAI Shigui, et al. Characterization analysis of triggered disasters in the Luding earthquake[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(1):117-126. (in Chinese))

[4] 本报评论员.三问西南天气预报[N].中国气象报,

2021-03-12(004).

[5] 张珂,牛杰帆,李曦,等.洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J].水资源保护,2021,37(1):28-35.(ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):28-35. (in Chinese))

[6] LIU Saiyan, HUANG Shengzhi, XIE Yangyang, et al. Identification of the non-stationarity of floods: changing patterns, causes, and implications [J]. Water Resources Management, 2019, 33(3):939-953.

[7] 刘源,纪昌明,张验科,等.基于Vine Copula的短期径流预报不确定性分析[J].水力发电学报,2022,41(7):95-105.(LIU Yuan, JI Changming, ZHANG Yanke, et al. Vine Copula-based analysis on uncertainty of short-term streamflow forecasting [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(7):95-105. (in Chinese))

[8] 包红军,曹勇,曹爽,等.基于短时临近降水集合预报的中小河流洪水预报研究[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):197-203.(BAO Hongjun, CAO Yong, CAO Shang, et al. Flood forecasting of small and medium-sized rivers based on short-term nowcasting and ensemble precipitation forecasts [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3):197-203. (in Chinese))

[9] TU Yangju, TAO Chunhua, ZHONG Qingxiang, et al. Intelligent operation and management in the Dadu River Basin[J]. River, 2023, 2(1):30-38.

[10] ZHANG Yufang, YA Xijia, WANG Rulin, et al. Assessing and mapping human well-being for sustainable development amid drought and flood hazards: Dadu River Basin of China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(60):90719-90737.

[11] 张旭旻,瞿思敏,李倩,等.基于协整理论的淮河流域上游洪水预报实时校正方法[J].水资源保护,2022,38(6):88-95.(ZHANG Xumin, QU Simin, LI Qian, et al. Real-time correction method of flood forecasting for the upper Huaihe River Basin based on cointegration theory [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6):88-95. (in Chinese))

[12] 王文,马骏.若干水文预报方法综述[J].水利水电科技进展,2005,25(1):56-60.(WANG Wen, MA Jun. Review on some methods for hydrological forecasting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(1):56-60. (in Chinese))

[13] MENG Erhao, HUANG Shengzhi, HUANG Qiang, et al. A robust method for non-stationary streamflow prediction based on improved EMD-SVM model [J]. Journal of Hydrology, 2019, 568:462-478.

[14] 郭玉雪,许月萍,陈浩,等.基于多种递归神经网络的海岛水库径流预报[J].水力发电学报,2021,40(9):14-

26. (GUO Yuxue, XU Yueping, CHEN Hao, et al. Reservoir inflow forecasting for island areas based on multiple recurrent neural networks [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(9): 14-26. (in Chinese))
- [15] 孙娜. 机器学习理论在径流智能预报中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [16] 孙周亮, 刘艳丽, 张建业, 等. 中长期径流预报研究进展与展望[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 136-144. (SUN Zhouliang, LIU Yanli, ZHANG Jianyun, et al. Research progress and prospect of mid-long term runoff prediction [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 136-144. (in Chinese))
- [17] TAYFUR G, SINGH V P, MORAMARCO T, et al. Flood hydrograph prediction using machine learning methods [J]. Water, 2018, 10(8): 968.
- [18] 崔震, 郭生练, 王俊, 等. 基于混合深度学习模型的洪水过程概率预报研究[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 889-897. (CUI Zhen, GUO Shenglian, WANG Jun, et al. Probabilistic forecasting of flood processes based on hybrid deep learning models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(8): 889-897. (in Chinese))
- [19] 罗玮, 朱阳, 陈在妮, 等. 基于 WRF 模式的大渡河流域径流预报模型[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(3): 469-476. (LUO Wei, ZHU Yang, CHEN Zaini, et al. WRF-based runoff forecasting model for Dadu River Basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 469-476. (in Chinese))
- [20] 潘张榕, 郭军红, 付正辉, 等. 基于 CORDEX 区域气候模式的大渡河流域径流模拟[J]. 人民珠江, 2022, 43(8): 54-62. (PAN Zhangrong, GUO Junhong, FU Zhenghui, et al. Runoff simulation of Dadu River Basin based on CORDEX regional climate models [J]. Pearl River, 2022, 43(8): 54-62. (in Chinese))
- [21] 李佳, 曲田, 朱艳军, 等. 基于 AdaBoost 模型的大渡河流域中长期径流预报应用研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(10): 10-13. (LI Jia, QU Tian, ZHU Yanjun, et al. Medium and long term runoff forecast of Daduhe River Basin based on AdaBoost model [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(10): 10-13. (in Chinese))
- [22] 李佳, 曲田, 牟时宇, 等. SMA-LSTM 模型在径流预报中的适用性研究[J]. 水文, 2023, 43(1): 47-51. (LI Jia, QU Tian, MOU Shiyu, et al. Application of long short-term memory neural network optimized by slime mold algorithm in runoff forecast [J]. Journal of China Hydrology, 2023, 43(1): 47-51. (in Chinese))
- [23] 朱喜, 冯欢, 杨杉, 等. 基于降雨径流相似性的短期径流预报研究[J]. 水力发电, 2023, 49(6): 9-13. (ZHU Xi, FENG Huan, YANG Shan, et al. Research on short-term runoff forecast based on rainfall and runoff similarity [J]. Water Power, 2023, 49(6): 9-13. (in Chinese))
- [24] 谭乔凤, 陈然, 朱阳, 等. 基于多因子最近邻抽样回归模型的径流相似性预报[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 521-527. (TAN Qiaofeng, CHEN Ran, ZHU Yang, et al. Runoff similarity forecast based on multi-factor nearest neighbor bootstrapping regressive model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 521-527. (in Chinese))
- [25] 牟时宇, 朱艳军, 杨冬梅, 等. 耦合数值降雨信息的径流预报方法对比[J]. 水力发电, 2022, 48(5): 27-32. (MOU Shiyu, ZHU Yanjun, YANG Dongmei, et al. Comparative study on runoff forecasting methods in upper reaches of Dadu River Basin based on numerical rainfall forecast [J]. Water Power, 2022, 48(5): 27-32. (in Chinese))
- [26] 贺玉彬, 朱畅畅, 陈在妮, 等. 大渡河流域径流预报不确定性溯源及降低控制方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(1): 65-71. (HE Yubin, ZHU Changchang, CHEN Zaini, et al. Runoff forecasting uncertainty traceability analysis and control method research of Dadu River Basin [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(1): 65-71. (in Chinese))
- [27] 葛朝霞, 薛梅, 宋颖玲. 多因子逐步回归周期分析在中长期水文预报中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(3): 255-257. (GE Zhaoxia, XUE Mei, SONG Yingling. Application of multi-factor stepwise regression cycle analysis in medium and long-term hydrological forecast [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(3): 255-257. (in Chinese))
- [28] 吴业楠, 钟平安, 赵云发, 等. 基于灰色关联分析的相似洪水动态展延方法[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 126-130. (WU Yenan, ZHONG Pingan, ZHAO Yunfa, et al. Dynamic extending approach of similar flood based on gray correlation analysis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 126-130. (in Chinese))
- [29] 吴洪石, 石朋, 瞿思敏, 等. 水文相似性研究进展[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 77-86. (WU Hongshi, SHI Peng, QU Simin, et al. Research progress on hydrologic similarity [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 77-86. (in Chinese))
- [30] 闻昕, 陈然, 谭乔凤, 等. 基于多因素相似性的融雪径流预报方法研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(3): 46-59. (WEN Xin, CHEN Ran, TAN Qiaofeng, et al. Study on forecasting method of snowmelt runoff based on multi-factor similarity [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(3): 46-59. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-02-04 编辑: 王芳)