

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.06.006

雨量数据缺失条件下基于实测流量的北京市“23·7”极端暴雨降水反演

张旭旻, 陈颖冰, 李永坤, 卢亚静, 薛志春, 胡晓静

(北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要: 以永定河与大清河流域雨量站损毁严重、实测降水数据可靠性较差的 5 个典型中小流域为研究对象, 基于北京市“23·7”极端暴雨实测流量数据, 利用动态系统响应曲线(DSRC)反演方法对实际降水量进行反演, 并采用均方根误差(RMSE)、PEARSON 相关系数与纳什效率系数作为评价指标检验反演方法的有效性, 同时通过统计分析实测降水(反演前)、反演降水(反演后)与实际降水(利用多源数据融合后的降水数据近似)不同历时的降水特征值对反演降水的准确性进行评价。结果表明: DSRC 反演方法在 5 个典型流域中均能够对流域面平均降水过程进行有效反演, 反演前后的降水过程与实际降水过程的平均 RMSE 分别为 5.97、3.86 mm, 平均 PEARSON 相关系数分别为 0.67 与 0.82, 平均纳什效率系数分别为 0.27 与 0.67; DSRC 反演方法对降水特征值的反演效果与新安江模型模拟效果以及雨量站实测雨峰的准确度密切相关; 在雨量站数据传输中断后, DSRC 反演方法仍能够对实际降水进行有效反演, 反演的降水过程表现出明显的连续性特征。

关键词: 动态系统响应曲线; 降水反演; “23·7”极端暴雨; 北京市

中图分类号: TV124; P333

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2024)06-0038-07

Precipitation retrieval of the “23·7” extreme rainstorm in Beijing based on measured discharge under the deficiency of rainfall data

ZHANG Xumin, CHEN Yingbing, LI Yongkun, LU Yajing, XUE Zhichun, HU Xiaojing

(Beijing Water Science & Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: This paper utilized the method of dynamic system response curve (DSRC) to retrieve the real precipitation of the “23·7” extreme rainstorm in Beijing based on the observed discharge data in 5 typical watersheds with severely damaged rain stations and poor reliability of measured rainfall of Yongding River and Daqing River Basins. Several indices including the Root Mean Square Error (RMSE), PEARSON correlation coefficient (R), and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) were employed to validate the effectiveness of the DSRC method. The characteristics within different duration of the observed rainfall (before inversion) and the retrieved rainfall (after inversion) were both summarized and compared to the actual rainfall (approximated by the multi-source precipitation fusion), to demonstrate the accuracy of the inversion series. Results shows that the DSRC method can effectively retrieve the average areal precipitation process, while the average RMSE between the observed and actual series and between the retrieved and actual rainfall are 5.97, 3.86 mm, respectively. The average R are 0.67 and 0.82, and the average NSE are 0.27 and 0.67. The retrieval performance of the DSRC method is closely related to the XAJ model simulation performance and whether the rain-gauge station can accurately capture the peak rainfall. Even in the case of rain-gauge station damages and the data transmission interruption, the DSRC method is still able to retrieve the actual precipitation which exhibits significant continuity characteristics.

Key words: dynamic system response curve (DSRC); precipitation inversion; “23·7” extreme rainstorm; Beijing

基金项目: 北京市科技计划课题(Z231100003823005, Z201100008220005)

作者简介: 张旭旻(1998—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: 2277877769@qq.com

通信作者: 李永坤(1987—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事流域水文模拟研究。E-mail: dxj521@yeah.net

引用本文: 张旭旻, 陈颖冰, 李永坤, 等. 雨量数据缺失条件下基于实测流量的北京市“23·7”极端暴雨降水反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 38-44.

ZHANG Xumin, CHEN Yingbing, LI Yongkun, et al. Precipitation retrieval of the “23·7” extreme rainstorm in Beijing based on measured discharge under the deficiency of rainfall data[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(6): 38-44.

受台风“杜苏芮”影响,2023年海河发生“23·7”流域性特大洪水^[1],暴雨过程中,永定河与大清河流域受灾严重,流域内部分中小流域雨量站损毁或数据传输中断,导致实测降水数据缺失,给后续洪水调查与水文分析研究造成较大阻碍。

针对中小流域雨量站实测数据缺失的问题,目前所采用的主要方法可分为两类:一是收集多源降水数据,采用不同数据融合算法,对多源降水数据进行融合^[2-4]。该方法的优点是能够充分考虑不同数据源的降水特征,结果准确度较高。但该方法需要收集大量降水数据,无法满足快速确定降水量级与重现期的需求,且该方法往往未考虑所收集数据的误差问题,导致不同数据源的误差被杂糅。二是基于中尺度气象模型模拟结果,利用动力或统计降尺度方法,对气象模型模拟降水进行降尺度。动力降尺度方法具有较强的物理基础,但在应用过程中需要大量的计算资源,且计算量级随分辨率提升呈指数级增长^[5];统计降尺度方法可以较快地获得降尺度后的降水数据,但统计降尺度方法受限于历史数据,导致该方法在反演极端暴雨方面应用效果较差^[6]。

降水校正研究与降水反演研究相似,区别在于降水校正基于实测降水数据,对降水量进行适当的校正,从而得到更好的模型模拟流量过程,而降水反演则是在实测降水数据缺失的条件下获取准确可靠的降水数据。动态系统响应曲线(dynamic system response curve, DSRC)反演方法作为水文学中应用效果较好的校正方法^[7-9],其在假设实测降水存在误差的基础上,基于模型模拟流量与实测流量过程,通过系统响应曲线对实测降水量进行校正,之后再对校正后的降水输入到模型系统中对模拟流量过程进行校正^[10]。该方法基于所采用的水文模型的物理机理,对降水进行基于物理规律的校正^[11],已成功应用于参数率定^[12-13]、面平均降水量校正等研究中^[9]。在本次暴雨洪水过程中,雨量站实测降水数据可靠性较低、误差较大,与DSRC反演方法的假设相吻合。DSRC反演方法相较于传统的降水反演方法,能够对降水进行基于物理规律的快速反演,且不增加额外参数。

为了尽可能快速地对实际降水量进行基于物理规律的反演,得到准确可靠的降水数据,进而掌握降水量级及重现期,为后续洪水调查与水文分析研究提供可靠基础,本文选取永定河与大清河流域中雨量站损毁严重、实测降水数据可靠性较差的5个典型中小流域作为研究对象,基于新安江模型模拟结果与实测流量过程,应用DSRC反演方法对“23·7”极端暴雨实际降水量进行反演,以期在缺失实测降水数据条件下快速掌握降水量级及重现期提供科学依据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

本文根据雨量站损毁程度及控制水文站点重要程度,在永定河与大清河流域中共选取5个典型中小流域进行流域面平均降水反演研究。其中斋堂水库流域、青白口流域、雁翅流域与三家店流域位于永定河流域,流域面积分别为354、550、759、1 641 km²;漫水河流域位于大清河流域,流域面积653 km²。三家店流域上游为青白口与雁翅流域,青白口流域上游为斋堂水库流域。5个中小流域位置相近,水文气象特征相似,均属于温带季风性气候,流域年降水量为370~650 mm,多年平均水面蒸发量为1 800 mm。降水年内分布极不均匀,汛期降水量约占全年降水量的80%。流域内水系及站点分布如图1所示。

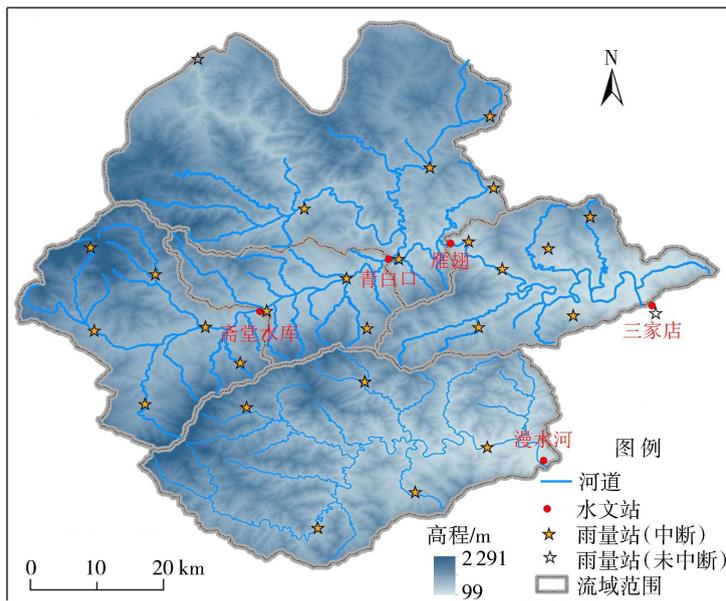


图1 研究区域水系及站点分布

Fig. 1 Distribution of rivers and stations in the study watersheds

1.2 数据来源

受到极端暴雨影响,研究流域内 27 个雨量站中有 25 个存在损毁或数据传输中断情况,其中大清河流域数据中断时间集中于 7 月 30 日 22:00 至 31 日 5:00,永定河流域数据中断时间主要集中于 7 月 31 日 9:00—13:00。本次降水过程中,雨量站实测数据可靠性较低,因此本文使用的降水数据集共分为两套:第一套为实测降水数据集,数据来源于降水过程中雨量站实测数据;第二套为实际降水数据集,数据集通过收集水文、气象、规划和自然资源委员会实测数据、睿思降水预报产品(分辨率 500 m)以及 ECMWF 中长期预报结果(分辨率 0.1°)等多源降水数据,对损毁或数据传输中断的雨量站实测数据进行插补得到,以此近似实际降水数据。水文站流量数据来源于北京市水文总站实测数据。

2 模型与方法

2.1 新安江模型

新安江模型已被广泛应用于中国的黄河、长江、淮河等主要流域(湿润地区)的径流模拟和水资源规划研究中,主要用于洪水预报、水文站网设计和可用水量估算等^[14-17]。新安江模型中,土壤含水量对产流计算至关重要。由于流域地貌特征差异导致土壤含水量分布不均匀,所以产流量的分布通常也不均匀。为了考虑土壤含水量分布的不均匀性,新安江模型在计算总径流时提出了蓄水容量曲线的概念,并采用自由水水箱进行分水源计算,线性水库进行坡地汇流计算,最后利用马斯京根法进行河道汇流^[18]。为了全面分析 DSRC 反演方法在降水反演研究中的适用性,本文对新安江模型进行了简化处理,即去除了分水源与坡地汇流计算。模型各参数的物理意义、取值范围和参数敏感性分析,详见文献^[14,19]。

本文选取的 5 个中小流域均为半干旱流域,新安江模型的适用性较差。但由于“23·7”极端暴雨之前,北京市 7 月 20—22 日发生了面平均降水量达 33.6 mm 的前期降水,5 个代表流域的面平均降水量位于 31.9~65.8 mm 之间,各流域内土壤均接近饱和状态,含水量较小,满足新安江模型适用条件。

基于各流域历史日数据与时段数据,开展新安江模型参数率定。率定后的参数取值见表 1。由于斋堂水库、青白口、雁翅与三家店流域距离较近,下垫面条件相似。因此 4 个流域的产流参数一致,只有汇流参数有小幅度变化。

表 1 各流域新安江模型参数率定结果

Table 1 Calibration results of parameters in the Xin'anjiang model for each watershed

流域名称	k_e	C	W_{lm}/mm	W_M/mm	B	W_{um}/mm	K/h	X
斋堂水库流域	0.87	0.16	100	280	0.4	20	3	0.15
青白口流域	0.87	0.16	100	280	0.4	20	4	0.48
雁翅流域	0.87	0.16	100	280	0.4	20	5	0.35
三家店流域	0.87	0.16	100	280	0.4	20	6	0.45
漫水河流域	0.87	0.16	80	200	0.4	20	3	0.45

注: k_e 为流域蒸散发折算系数; C 为深层蒸散发折算系数; W_{lm} 为下层张力水容量; W_M 为流域平均张力水容量; B 为张力水蓄水容量曲线方次; W_{um} 为上层张力水容量; K 、 X 为马斯京根法演算参数。

2.2 DSRC 反演方法

DSRC 反演方法是一种基于所用水文模型物理基础,向信息源头追溯的反馈反演方法^[20]。该方法将水文模型视为一个系统,利用系统响应曲线构建系统输入(实测降水)误差与输出(流域出口断面流量过程)误差间函数关系,基于系统输出误差,利用最小二乘法对系统输入误差进行反演。将反演的系统输入误差与原始系统输入叠加,即可得到反演后系统输入。

对于“23·7”极端暴雨,假如有 m 个时段降水,其相应的面平均降水误差序列为 $\mathbf{E}_p = (e_{p1}, e_{p2}, \dots, e_{pm})$; 假如有 L 个时段的流量系列,流量的误差序列为 $\mathbf{E}_Q = (e_{Q1}, e_{Q2}, \dots, e_{QL})$,则面平均降水误差与流量误差之间的关系可以表达为

$$\mathbf{E}_Q = \mathbf{S}\mathbf{E}_p \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ S_{L1} & \cdots & S_{Lm} \end{bmatrix}$$

式中 S 为系统响应矩阵。

对于一般性的面平均降水误差与流量误差系统响应模式,如式(1),其面平均降水误差的最小二乘法估计为

$$E'_p = (S^T S)^{-1} S^T E_Q \quad (2)$$

式中 E'_p 为面平均降水误差的估计向量。

反演之后的面平均降水量系列可以表示为

$$P' = P + E'_p \quad (3)$$

式中 P' 为反演后面平均降水量; P 为实测面平均降水序列。

当利用系统响应曲线针对降水量进行反演时,可以称为降水系统响应曲线反演方法,为便于叙述,如没有特别说明,以下 DSRC 反演方法均指降水系统响应曲线反演方法。

2.3 评价指标

选取 RMSE、 R 、NSE 作为评价指标,通过计算和对比实测降水与实际降水、反演降水与实际降水两组序列之间的各项指标值,对 DSRC 反演方法的效果进行检验,同时通过统计实测降水、反演降水与实际降水不同历时的降水特征值对反演降水的准确性进行评价。

3 降水反演效果分析与讨论

对 5 个研究流域分别建立新安江模型模拟“23·7”洪水过程,然后基于模拟流量过程与实测流量过程对实际降水量进行反演,通过计算反演前(实测降水与实际降水)、反演后(反演降水与实际降水)的各项评价指标,对 DSRC 反演方法的实际应用效果进行全面分析。

由表 2 可知,采用 DSRC 反演方法对流域面平均降水进行反演后,5 个流域的 RMSE 均有所减小,反演前后的 RMSE 均值分别为 5.97、3.86 mm,表明 DSRC 反演方法可以对流域面平均降水量进行有效反演。反演降水量与实际降水量之间的 R 均值为 0.82,相较于反演前有明显提升,提升约 0.15。反演后 NSE 的平均值为 0.67,相较于反演前提升 0.4。

表 2 降水反演效果评价指标统计结果

Table 2 Statistic results of evaluation indicators for the effectiveness of precipitation inversion

流域名称	反演前			反演后		
	RMSE/mm	R	NSE	RMSE/mm	R	NSE
斋堂水库流域	6.00	0.66	0.21	3.43	0.88	0.77
青白口流域	5.80	0.66	0.22	3.80	0.77	0.60
雁翅流域	4.36	0.68	0.37	3.24	0.80	0.64
三家店流域	3.93	0.80	0.53	3.40	0.86	0.73
漫水河流域	9.78	0.55	0.03	5.41	0.80	0.63

为了更直观地展示反演效果,分别对

比了 5 个流域反演前后降水量与实际降水量的过程线,如图 2 所示。DSRC 反演方法对降水的反演效果以数据传输中断时间为界可以明显分为两部分。在实测降水数据传输中断前,雨量站实测降水较准确,尽管基于 DSRC 反演方法所反演的降水与实际降水拟合程度也较高,但相对优势并不显著。在大部分雨量站数据传输中断后,DSRC 反演方法反演后的降水数据相较于反演前降水数据体现出明显优势。反演后的降水数据能够在降水量上对数据传输中断后的实际降水进行有效反演,但在降水过程的反演上依旧存在不足,无法完全复现实际降水量的锯齿状波动,而是保留了与流量过程相似的明显的连续性特征。原因在于,DSRC 反演方法需要基于实测流量过程与有误差的实测降水过程进行反演^[21]。当降水数据未中断时,DSRC 反演方法可以综合考虑流量数据的连续性与降水数据的独立性,但当实测降水数据因传输问题而中断后,DSRC 反演方法则无法考虑降水数据的独立性,只能基于流量数据对降水进行反演,从而导致在数据传输中断后反演降水数据体现出了明显的连续性特征。

图 3 为校正后流量过程(将反演后的降水输入新安江模型计算所得)、新安江原始计算结果(模拟流量)与实测流量过程的对比结果。校正后流量过程在降水数据传输中断时刻前与原始模拟结果表现相似,校正效果并不显著。但在降水数据传输中断后,DSRC 反演方法对新安江模型模拟结果进行了显著校正,有效复现了数据中断后的流量过程。校正前、校正后 5 个流域的平均 NSE 分别为 -0.46 与 0.84。

为了进一步检验反演降水数据的准确性,统计分析了 5 个流域不同历时的降水特征值。分析发现 DSRC 反演方法对 5 个流域不同历时降水特征值的反演效果可分为 3 类,表 3 为 3 类代表流域的降水特征

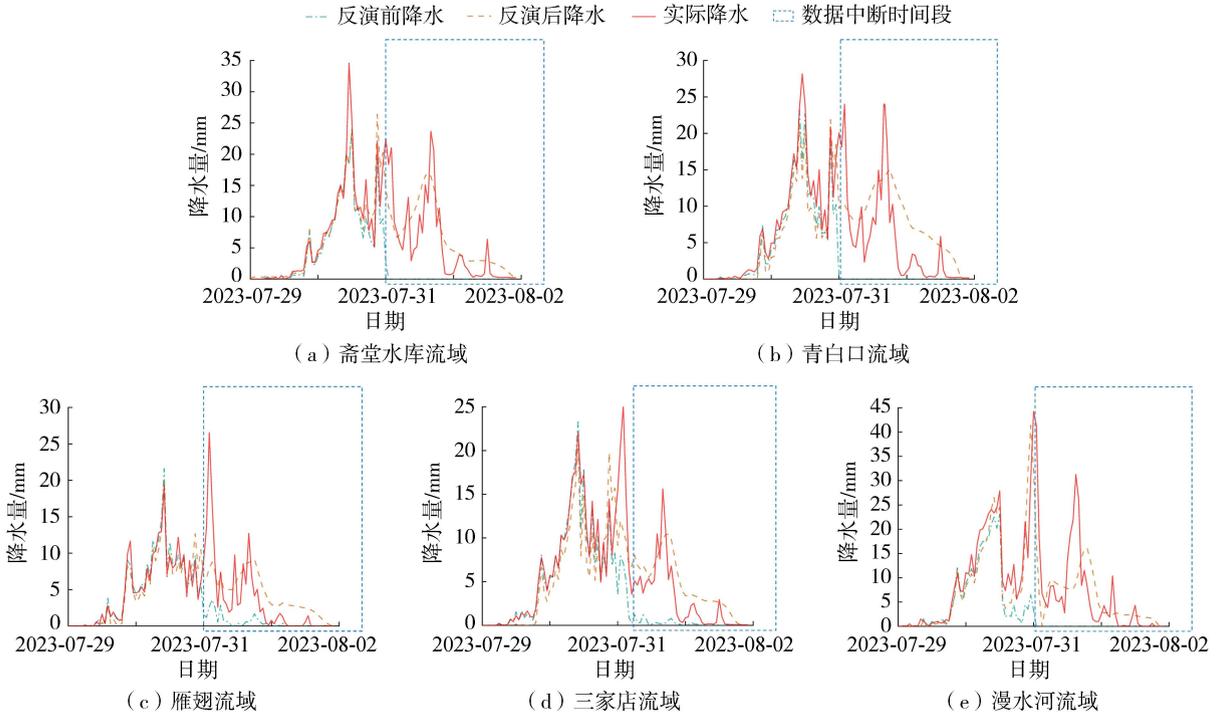


图2 反演前后降水量与实际降水量过程线对比

Fig. 2 Comparison of precipitation before and after inversion compared with the actual precipitation

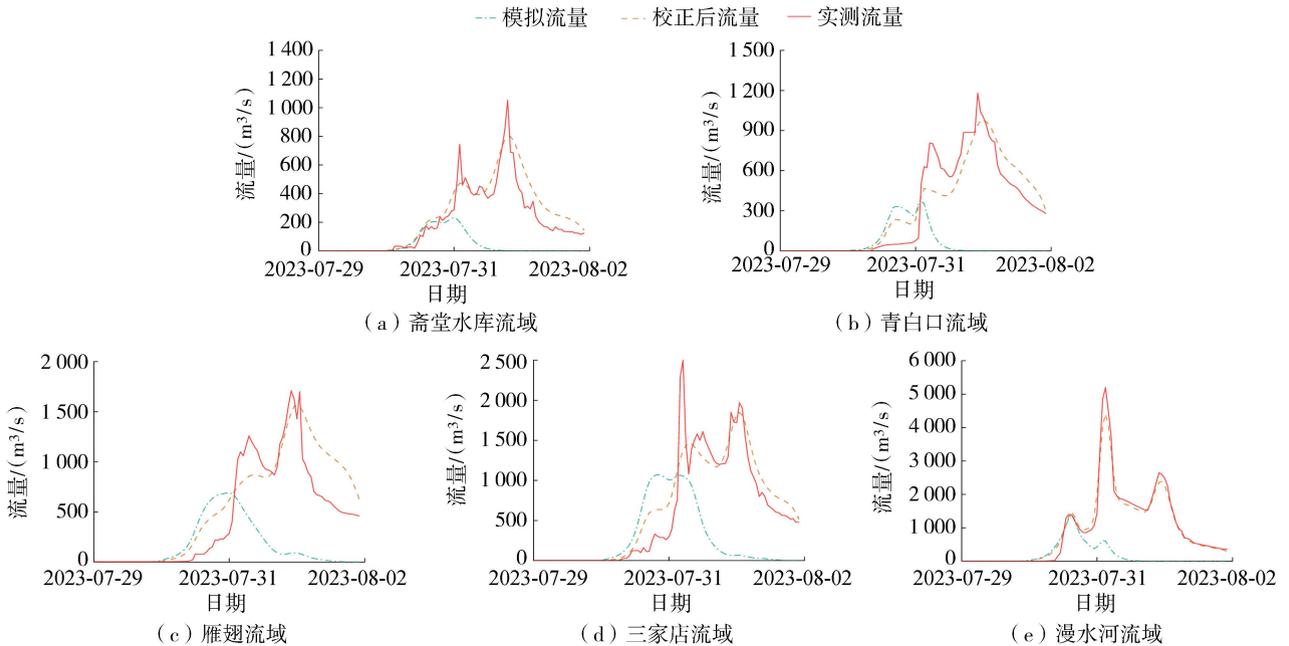


图3 反演前后流量与实测流量对比

Fig. 3 Comparison of discharge before and after inversion compared with the observed discharge

值。从不同历时降水特征值的统计结果来看,绝大部分反演降水相较于实测降水更接近于实际降水。斋堂水库流域以最大24 h为界限,当历时小于24 h时,改善效果较小,当历时大于24 h时,改善效果明显。同样,三家店流域也存在以最大24 h为界限的现象,当历时小于24 h时,反演降水特征值与实际降水特征值之间的误差略高于实测降水特征值,当历时大于24 h时,反演降水与实际降水特征值之间的吻合程度则明显优于实测降水。漫水河流域则不存在反演降水特征值相较于实测降水特征值的改善效果以24 h为分界的现象,反演降水特征值均明显优于实测降水特征值。其原因在于DSRC反演方法需要根据实测流量与模拟流量的误差对降水量进行反演。当模拟流量小于实测流量时,DSRC反演方法会适当修大降水量,反之则修小

降水量。因此 DSRC 反演方法反演结果与模型模拟值密切相关,即与新安江模型参数密切相关。斋堂水库流域模拟洪峰流量偏低,且洪峰流量对应成峰时段的降水量,而最大 1 h 降水量往往位于成峰时段之间,因此会将最大 1 h 降水量修大。而三家店流域所模拟的洪峰流量较实测洪峰偏大,因此 DSRC 反演方法会将最大 1 h 降水量修小,导致反演降水特征值误差反而略高于实测降水。

表 3 代表流域降水特征值统计

单位:mm

Table 3 Statistics of precipitation characteristic values for representative watersheds

unit:mm

降水特征值	斋堂水库流域			三家店流域			漫水河流域		
	实测降水	反演降水	实际降水	实测降水	反演降水	实际降水	实测降水	反演降水	实际降水
最大 1 h	23.9	26.4	34.6	23.3	20.2	25.1	23.1	41.4	44.2
最大 3 h	62.5	64.4	79.0	58.8	50.1	61.2	65.8	105.2	115.7
最大 6 h	103.7	103.7	121.2	101.2	84.1	103.8	122.5	148.7	169.5
最大 12 h	161.3	173.4	192.5	164.0	133.6	167.9	201.7	206.3	236.8
最大 24 h	254.0	322.4	355.8	255.5	264.2	318.5	263.3	384.7	453.2
最大 3 d	276.9	630.1	597.6	320.4	496.1	501.6	292.5	677.5	763.6
总降水	276.9	641.8	601.5	320.4	496.7	505.7	292.5	685.4	769.4

漫水河流域反演降水特征值改善效果明显优于斋堂水库流域与三家店流域。其原因在于,漫水河流域雨峰出现时间在实测数据传输中断之后。实测降水数据的不同历时降水特征值并不是实际的特征值。而反演降水数据则较好地复现了数据中断后的实际降水过程,因此漫水河流域反演降水特征值的改善效果要明显优于另外两个流域。

为了进一步验证当数据传输中断后,DSRC 反演方法的有效性,分别统计分析了 5 个流域在数据传输中断后的反演前后与实际降水的不同历时特征值,表 4 为其中代表性流域的特征值,由于数据中断后,部分流域的后续降水历时不足 3 d,因此只统计了最大 1 h 至最大 24 h 的降水特征值。

表 4 代表流域数据中断后降水特征值统计

单位:mm

Table 4 Statistics of precipitation characteristic values for representative watersheds after data interruption

unit:mm

降水特征值	斋堂水库流域			三家店流域			漫水河流域		
	实测降水	反演降水	实际降水	实测降水	反演降水	实际降水	实测降水	反演降水	实际降水
最大 1 h	3.0	17.0	23.7	7.9	12.0	25.1	6.5	41.4	44.2
最大 3 h	3.0	49.9	61.9	20.1	32.5	61.2	14.4	105.2	115.7
最大 6 h	3.0	93.6	91.3	24.8	57.5	85.9	19.9	148.7	169.5
最大 12 h	3.0	157.1	135.0	28.7	96.8	115.1	30.5	186.4	225.4
最大 24 h	3.0	254.4	239.4	32.1	188.4	187.7	30.5	314.4	371.6
总降水	3.0	314.1	267.3	32.9	237.4	202.6	30.5	421.9	456.4

由表 4 可知,在不同流域中,当降水数据传输中断后 DSRC 反演方法均能对降水进行有效反演,且从同一流域不同历时的降水特征值统计结果来看,随着历时增长,反演降水特征值与实际降水特征值间的相对误差逐渐减小,表明了 DSRC 反演方法在反演较长历时降水量方面能够取得更好的效果。

4 结 论

a. DSRC 反演方法在 5 个典型流域中均能够对流域面平均降水过程进行有效反演,反演前后的降水过程与实际降水过程的平均 RMSE 分别为 5.97/3.86 mm,平均 PEARSON 相关系数分别为 0.67 与 0.82,平均 Nash 效率系数分别为 0.27 与 0.67。

b. DSRC 反演方法对降水特征值的反演效果与新安江模型模拟效果以及雨量站是否准确测得雨峰量值密切相关。

c. 在雨量站数据传输中断后,DSRC 反演方法能够对实际降水过程进行较为准确的反演,但反演后的降水过程具有由实测流量过程引起的明显的连续性特征。

参考文献:

- [1] 张启义. 北京房山区“23·7”特大暴雨灾害的成因及启示[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(10): 43-47. (ZHANG Qiyi. The cause and enlightenment of the “23·7” extremely rainstorm disaster in Fangshan district of Beijing city[J]. China Flood &

- Drought Management,2023,33(10):43-47. (in Chinese))
- [2] 潘飏,谷军霞,徐宾,等.多源降水数据融合研究及应用进展[J].气象科技进展,2018,8(1):143-152. (PAN Yang, GU Junxia, XU Bin, et al. Advances in multi-source precipitation merging research[J]. Advances in Meteorological Science and Technology,2018,8(1):143-152. (in Chinese))
- [3] 孙健,黄鹏程,赵军伟,等.多源降雨数据在重庆市中小流域短期水文预报中的应用[J].水电能源科学,2023,41(6):9-12. (SUM Jian, HUANG Pengcheng, ZHAO Junwei, et al. Application of multi-source precipitation data in short-term hydrological forecast of small and medium-sized watersheds in Chongqing city[J]. Water Resources and Power,2023,41(6):9-12. (in Chinese))
- [4] 南天一,陈杰,丁智威,等.基于深度学习的青藏高原多源降水融合[J].中国科学:地球科学,2023,53(4):836-855. (NAN Tianyi, CHEN Jie, DING Zhiwei, et al. Deep learning-based multi-source precipitation merging for the Tibetan plateau[J]. Scientia Sinica Terrae,2023,53(4):836-855. (in Chinese))
- [5] XU Zhongfeng, HAN Ying, YANG Zongliang. Dynamical downscaling of regional climate: A review of methods and limitations [J]. Science China Earth Sciences,2019,62(2):365-375.
- [6] MARAUN D, WETTERHALL F, IRESON A M, et al. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user[J]. Reviews of Geophysics,2010,48(3):RG3003.
- [7] 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))
- [8] 霍文博,高原,李致家,等.改进的KNN实时校正方法在山区中小流域的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):27-32. (HUO Wenbo, GAO Yuan, LI Zhijia, et al. Application of improved KNN real-time correction method in small and medium-sized basins in mountainous areas[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):27-32. (in Chinese))
- [9] 包为民,顾雨薇,司伟,等.降雨动态系统响应曲线修正方法在黄土区域水沙模拟中的应用[J].湖泊科学,2020,32(2):528-538. (BAO Weimin, GU Yuwei, SI Wei, et al. Application of rainfall dynamic system response curve method for streamflow and sediment simulation in loess region[J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(2):528-538. (in Chinese))
- [10] SI Wei, BAO Weimin, GUPTA H V. Updating real-time flood forecasts via the dynamic system response curve method[J]. Water Resources Research,2015,51(7):5128-5144.
- [11] 包为民,司伟,沈国华,等.基于单位线反演的产流误差修正[J].水科学进展,2012,23(3):317-322. (BAO Weimin, SI Wei, SHEN Guohua, et al. Runoff error updating based on unit hydrograph inversion[J]. Advances in Water Science,2012,23(3):317-322. (in Chinese))
- [12] 瞿思敏,杨庆一,郑何声园,等.系统微分响应参数率定方法在建阳流域SWAT模型中的应用[J].水资源保护,2023,39(2):118-124. (QU Simin, YANG Qingyi, ZHENG-HE Shengyuan, et al. Application of system differential response parameter calibration method in SWAT model of Jianyang basin[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):118-124. (in Chinese))
- [13] 李琼芳,许树洪,周正模,等.基于系统微分响应的暴雨强度公式参数优化[J].水资源保护,2022,38(5):8-16. (LI Qiongfang, XU Shuhong, ZHOU Zhengmo, et al. Parameter optimization of rainstorm intensity formula based on system differential response method[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):8-16. (in Chinese))
- [14] ZHAO Renjun. The Xin'anjiang model applied in China[J]. Journal of Hydrology,1992,135(1/2/3/4):371-381.
- [15] ZHANG Xiaoqin, BAO Weimin, SUN Yiqun. Enhancing the hydrologic system differential response method for flood forecasting correction[J]. Journal of Hydrology,2021,592:125793.
- [16] FANG Yuanhao, ZHANG Xingnan, CORBARI C, et al. Improving the Xin'anjiang hydrological model based on mass-energy balance[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2017,21(7):3359-3375.
- [17] YUAN Feifei. Impacts of climate change on surface hydrology in the source region of the Yellow River [D]. Lund: Lund University,2015.
- [18] ZHAO Renjun. A non-linear system model for basin concentration[J]. Journal of Hydrology,1993,142(1/2/3/4):477-482.
- [19] SONG Xiaomeng, KONG Fanzhe, ZHAN Chesheng, et al. Parameter identification and global sensitivity analysis of Xin'anjiang model using meta-modeling approach[J]. Water Science and Engineering,2013,6(1):1-17.
- [20] 刘可新,包为民,赖善证,等.动态系统响应曲线修正方法在乌溪沟流域的应用[J].中国农村水利水电,2014(12):24-26. (LIU Kexin, BAO Weimin, LAI Shanzheng, et al. The application of the method of dynamic system response curve in Wuxigou basin[J]. China Rural Water and Hydropower,2014(12):24-26. (in Chinese))
- [21] 蒋语珣,瞿思敏,蒋思军,等.系统微分响应误差修正方法在VIC模型中的应用与研究[J].中国农村水利水电,2023(10):96-103. (JIANG Yuxun, QU Simin, JIANG Sijun, et al. Application of and research on system differential response error correction method in VIC model[J]. China Rural Water and Hydropower,2023(10):96-103. (in Chinese))