

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0060

王艺霖,靳燕国,陈晓楠,等. LSTM神经网络和量纲分析法在弧形闸门过流计算中的对比[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022,20(3):590-599. WANG Y L, JIN Y G, CHEN X N, et al. Comparison between LSTM neural network and dimensional analysis method in discharge calculation of arc gates[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022,20(3):590-599. (in Chinese)

LSTM神经网络和量纲分析法 在弧形闸门过流计算中的对比

王艺霖¹,靳燕国²,陈晓楠²,段春青³,张召¹,雷晓辉¹,常文娟¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038;2. 南水北调中线干线工程建设管理局,北京 100038;3. 北京市水务局政务服务中心,北京 100071)

摘要:为保障工程建筑物的合理设计、输水渠道的科学调控及调水系统的安全运行,需对弧形闸门过闸流量进行精确计算。以南水北调中线工程干渠59座节制闸为研究对象,建立基于量纲分析法和长短期记忆神经网络两种不同的弧形闸门流量计算模型,选取2018—2019年2h时间尺度的原始观测数据作为模型输入,对比分析两种模型闸门流量计算的绝对误差、平均相对误差、均方根误差及纳什效率系数。结果表明:对于工程整体而言,长短期记忆神经网络方法的误差结果略优于量纲分析法,两者流量平均相对误差分别为2%~2.5%和3%~4%。另外,量纲分析法受水位波动影响较大,更适用于中线工程中下游(中、小流量)的闸门过流计算;长短期记忆神经网络方法受水位波动的影响相对略小,更适用于中线工程中上游(大、中流量)的闸门过流计算。该研究为南水北调中线工程闸门水力计算及调度运行提供了科学依据。

关键词:南水北调中线工程;弧形闸门;流量计算;量纲分析;LSTM神经网络

中图分类号:TV68 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



节制闸是明渠调水工程的一种重要控制建筑物,其通过调节闸门开启度来控制渠道的水位和流量^[1],闸门的安全性能和使用性能一直备受关注^[2]。其中,弧形闸门因其具有重量轻、启门力小、过闸水流流态更稳定、操作和维护简单等优点^[3],在各大明渠调水工程中得到了广泛应用。过闸流量的精确计算对于工程建筑物的设计和运用、渠道的水力控制、输水系统水力特性分析等均具有重要意义。

基于能量方程,目前已存在较多的弧形闸门过流经验公式,常见的有武水公式^[4-5]、南科院公式^[6]、清华大学公式^[7]、Henry公式^[8]等。以上经验公式虽已得到较为广泛的应用,但在适用条件和参数率

定方面仍然存在一定局限性。由于弧形闸门结构相对复杂,经验公式中流量系数、淹没系数等参数的率定自身已具有一定的难度,加之该系数随水流状态的变化而变化,故流态切换时个别经验公式将不再适用。另外,经验公式的闸门流量系数多为闸门开度及上、下游水头差的函数,且关系式大多为非线性关系,率定过程中涉及一系列迭代问题,使得参数率定过程繁冗复杂而误差较大。鉴于经验过流公式存在的诸多问题,近些年又提出了基于量纲分析的过流计算方法,较多专家学者将两者进行了对比。郭永鑫等^[9]针对闸孔出流的不同流态,分别建立了经验系数模型和量纲分析模型,结果表明不同流态下

收稿日期:2021-12-19 修回日期:2022-04-07 网络出版时间:2022-04-12

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220411.1021.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(51779268)

作者简介:王艺霖(1998—),女,四川内江人,主要从事调水工程水力调控研究。E-mail:1151025008@qq.com

通信作者:陈晓楠(1979—),男,河北沙河人,正高级工程师,博士,主要从事输水调度运行管理、水资源管理研究。E-mail:chenxiaonan@nsbd.cn

量纲分析模型流量计算误差比经验系数模型低5%左右。崔巍等^[10]基于常规弧形闸门过流公式,进一步推导了基于量纲分析的弧形闸门无量纲关系式,并得到无量纲闸门参数相对于常规过流公式参数率定误差减小约10%的结论。Metzler^[11]、Toch^[12]和Bijankhan等^[13]采用传统能量公式和量纲分析法分别率定了过闸流量与闸门开度、闸前水深、闸后水深等各因素之间的关系,评估了不同方法对于闸门水力计算的影响效果,发现量纲分析法具有参数率定过程相对简易、计算精度较高的特点。刘孟凯等^[14]通过弧形闸门水槽试验,对比分析了基于能量方程和量纲分析的流量计算公式,结果表明了传统闸门水力计算公式的计算精度比率定后的量纲分析公式稍差,且率定工作更为复杂。由此可见,量纲分析法能够有效避免经验公式的一些缺点,故此本文选用量纲分析法构建弧形闸门过流计算模型。

近年来,大数据、人工智能等新一代信息技术的快速发展引领了众多行业的技术变革,机器学习、深度学习、强化学习等通过数据驱动的先进技术方法逐渐受到了学者的青睐。其中,长短期记忆网络作为一种特殊的循环神经网络,具有较为强大的时间序列处理能力,可以选择性地保留前面若干时刻的信息,能够满足时间序列动态预测的要求^[15],该方法已在股票预测^[16-17]、网络安全^[18]、语义识别^[19]等行业得到了广泛应用,而在水利行业,尤其是长距离调水工程中则应用较少。由于闸门流量与闸门开度、上下游水深等要素之间具有较强的相关性^[20],基于此,本文构建长短期记忆神经网络模型,充分发挥该方法的优点,通过长序列历史数据得到与闸门流量间的映射关系,并对其进行实时计算。

南水北调中线工程自通水以来,已积累了长序列历史水情数据,数据量充分满足模型构建需求。因此,以中线工程为研究对象,在常规闸门流量公式基础上,从机理和数据两个不同层面提出了改进的流量计算方法,并通过对比分析得到不同方法下南水北调中线工程弧形闸门流量计算的误差效果及适用条件,为该工程的水力计算及调度运行提供科学依据。

1 模型方法

弧形闸门水力结构见图1。

对于经验公式,流量计算表示为

$$Q = \sigma M B e \sqrt{2gH_0} \quad (1)$$

式中: Q 为过闸流量, m^3/s ; σ 为淹没系数; M 为闸门综合流量系数; B 为过水断面宽度, m ; e 为闸门开度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; H_0 为闸前水深, m 。

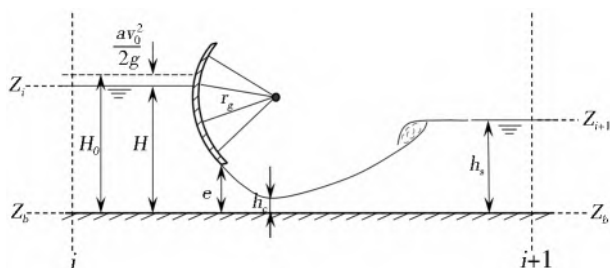


图1 弧形闸门

Fig. 1 Arc gate

1.1 量纲分析法

由于受闸门型式、渠道结构布置、上下游水流条件等因素的影响,经验公式更多适合于闸孔自由出流条件下的流量计算,对于淹没出流则不太通用^[21]。基于此,Chadwick等^[22]首次采用量纲分析的方法对闸门过流特性进行计算,对于弧形闸门,在淹没流情况下,单宽流量 q 是闸门开度 e 、重力加速度 g 、过闸前后能量差 H_E 和绝对黏性系数 μ 的函数,其函数关系为

$$q = f(e, g, H_E, \mu) \quad (2)$$

式中: $H_E = E_0 - H_2$; H_0 表示闸门上游水深, m ; H_2 表示闸门下游水深, m 。若流态为自由出流,则 $H_2 = 0$ 。

假定过闸流量具有如下形式,其中 a 、 b 、 c 、 d 和 m 为常数系数。

$$q = m(e^a g^b H_E^c \mu^d) \quad (3)$$

通过量纲分析可转化为

$$(q^2/g)^{1/3} = m^{2/3} e (H_E/e)^{2c/3} \quad (4)$$

化简得到

$$K/e = i (H_E/e)^j \quad (5)$$

式中: $K = (q^2/g)^{1/3}$, $i = m^{2/3}$, $j = 2c/3$ 。

通过等式变换,按照常规闸门过流公式的形式,推导出基于量纲分析法的弧形闸门过流公式为

$$Q = B \sqrt{g \left[e i \left(\frac{H_E}{e} \right)^j \right]^3} \quad (6)$$

为了便于闸门系数的率定,对公式(5)等式两边取对数,可转化为 $\lg(H_E/e)$ 与 $\lg(K/e)$ 之间的线性关系为

$$\lg(K/e) = \lg i + j \lg(H_E/e) \quad (7)$$

令 $y = \lg(K/e)$, $x = \lg(H_E/e)$, $a = j$, $b = \lg i$,则式(7)简化为线性方程

$$y = ax + b \quad (8)$$

可以看出,系数率定最终转化为简单线性关系式中斜率和截距的拟合,相较于常规弧形闸门过流

公式的系数率定,该方法更加简便。

1.2 长短期记忆(LSTM)神经网络

LSTM 最早由 Hochreiter 等^[23]提出,是一种特

殊的递归神经网络(recurrent neural networks,简称 RNN)变体^[24],与其具有相似的循环结构,见图 2。

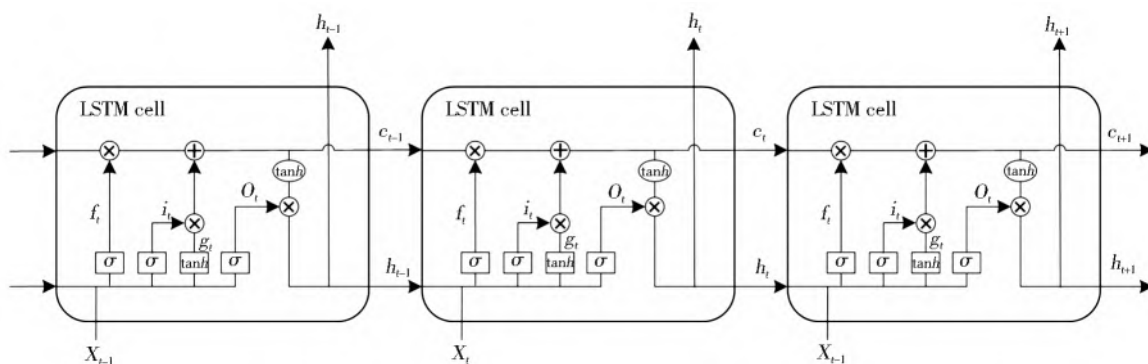


图 2 LSTM 单元结构

Fig. 2 Cell structure of LSTM

相比普通的 RNN, LSTM 在隐含层各神经元中增加了“记忆块”,将反向传播中的累积转化为累加,削弱了过程中梯度消失或梯度爆炸的问题,具有较好的记忆信息控制^[25-26]。其门控结构原理如下。

遗忘门(forget gate):输入上一时间序列的隐藏状态和当前时间序列输入信息,得到遗忘门输出信息,公式为

$$f_t = \sigma(W_f h_{t-1} + U_f x_t + b_f) \quad (9)$$

输入门(input gate): h_{t-1} 和 x_t 经过 sigmoid 层和 tanh 层得到 i_t 和 g_t ,这两个变量传递所需的新信息从而更新细胞记忆,公式为

$$i_t = \sigma(W_i h_{t-1} + U_i x_t + b_i) \quad (10)$$

$$g_t = \tanh(W_c h_{t-1} + U_c x_t + b_c) \quad (11)$$

$$C_t = C_{t-1} \odot f_t + i_t \odot g_t \quad (12)$$

输出门(output gate): h_{t-1} 和 x_t 首先经过 Sigmoid 层得到细胞状态的输出部分,其次经过 tanh 层进行数据处理,得到更新后细胞状态 h_t ,公式为

$$o_t = \sigma(W_o h_{t-1} + U_o x_t + b_o) \quad (13)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(C_t) \quad (14)$$

式(9)~(14)中: W_f 、 W_i 、 W_o 分别表示从遗忘门、输入门、输出门到输入的权重矩阵; U_f 、 U_i 、 U_o 分别表示从遗忘门、输入门、输出门到隐藏层的权重矩阵; b_f 、 b_i 、 b_o 分别表示遗忘门、输入门、输出门的偏置向量; g_t 表示 tanh 层输出; \odot 表示矩阵元素积。

由于闸门过流计算具有较强的非线性,可基于南水北调中线工程长序列历史水情数据,构建 LSTM 模型以描述弧形闸门水流过闸时的非线性关系,从而直接或间接得到过闸流量的时间序列。LSTM 模型包括了训练、验证和测试 3 个阶段。经过数据归一化处理,为保持独立同分布的特性,将数据按 7 : 2 : 1 顺序划分为训练集、验证集、测试

集。由于闸门流量公式中,过闸流量与闸前水位、闸后水位、闸门开度具有较强的相关性,其间的具体函数关系无须推求,可直接用黑箱模型代替,故以 0 时刻至 t 时刻的闸门开度、1 时刻至 $t+1$ 时刻的闸前水位、闸后水位以及过闸流量作为模型输入,该输入是一个 $4 \times t$ 的二维矩阵。二维矩阵输入到模型后:首先经过一层输出维度为 32 的 LSTM 层,得到 4×32 的二维中间变量;其次经过输出维度为 64 的 LSTM 层,得到 4×64 的二维中间变量,将其展平为 256 的一维变量;最后经过全连接层得到模型流量计算结果,即模型输出。可以看出,该方法进行闸门流量计算时,无须进行参数率定,可直接辨识出闸门流量与其他过流特性之间的映射关系。且该方法具有较强的自适应特点,可随着数据的更新,自适应调整模型参数,避免了不断进行参数率定的不便,极大程度减轻了流量计算的工作量,提高了可靠性。

2 基于机理及数据的过闸流量计算

由于南水北调中线工程首末两端闸门分别连接上游水库、下游泵站等非渠道建筑物,其过流特性相较于工程中其余闸门会受到一定程度的影响,因此为控制环境变量,仅以工程总干渠中间 59 座节制闸为研究对象。经对历史数据分析,中线工程闸门处的流态多为淹没处理,故剔除其中自由出流数据,选取 2018 年 1 月至 2019 年 12 月共 2 年 2 h 时间尺度的实测数据作为模型输入,采用量纲分析法和 LSTM 神经网络 2 种方法对各闸门进行过闸流量计算,从中线工程的角度对比分析 2 种方法的计算效果及适用情况。

2.1 量纲分析闸门参数率定

以 $\lg(H_E/e)$ 为横轴, $\lg(K/e)$ 为纵轴,绘制历史

数据点并进行线性拟合。限于文章篇幅,仅以磁河倒虹吸出口节制闸(50号)、沙河(北)倒虹吸出口节制

闸(51号)、漠道沟倒虹吸出口节制闸(52号)3个节制闸为例,展示闸门过流系数拟合曲线结果见图3。

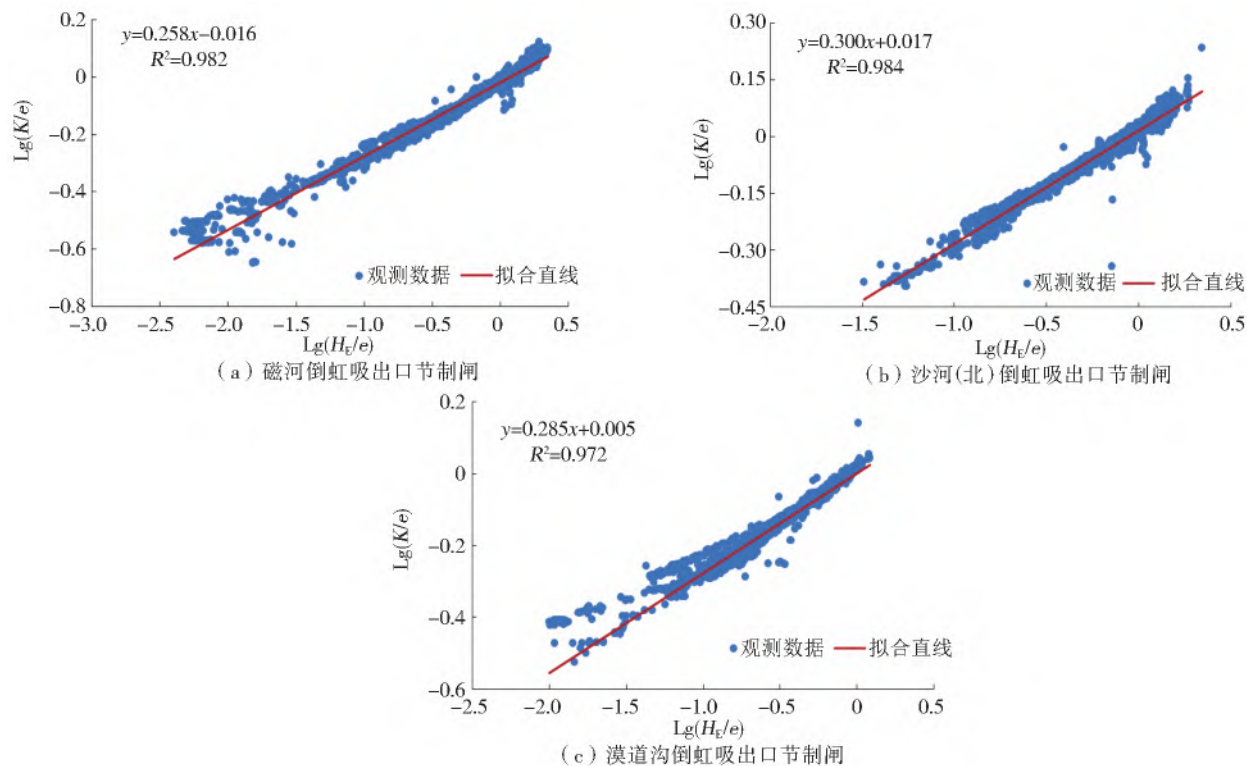


图3 3个节制闸量纲分析闸门过流系数率定结果

Fig.3 Calibration results of overflow coefficient of dimensional analysis method for 3 control gates

通过曲线拟合公式计算得到中线59座节制闸 闸门过流系数率定结果统计见表1。

表1 中线干渠59座节制闸闸门无量纲过流系数率定结果

Tab.1 Calibration results of overflow coefficient of dimensional analysis method for 59 control gates in the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project

节制闸编号	节制闸名称	拟合公式	流量系数 i	流量系数 j	决定系数 R^2
2	刁河渡槽进口	$y=0.265x+0.053$	1.129	0.265	0.976
3	湍河渡槽进口	$y=0.241x+0.014$	1.033	0.241	0.902
4	严陵河渡槽进口	$y=0.297x+0.067$	1.166	0.297	0.980
5	淇河倒虹吸出口	$y=0.201x+0.014$	1.032	0.210	0.941
6	十二里河渡槽进口	$y=0.311x+0.055$	1.134	0.311	0.991
7	白河倒虹吸出口	$y=0.204x-0.025$	0.944	0.204	0.877
8	东赵河倒虹吸出口	$y=0.237x+0.036$	1.086	0.237	0.957
9	黄金河倒虹吸出口	$y=0.203x+0.020$	1.046	0.203	0.926
10	草墩河倒虹吸进口	$y=0.277x+0.058$	1.142	0.277	0.958
11	澧河渡槽进口	$y=0.303x-0.026$	0.942	0.303	0.983
12	澎河渡槽进口	$y=0.286x+0.017$	1.040	0.286	0.957
13	沙河渡槽进口	$y=0.300x-0.014$	0.968	0.300	0.978
14	玉带河倒虹吸出口	$y=0.204x-0.026$	0.942	0.204	0.978
15	北汝河倒虹吸出口	$y=0.196x-0.058$	0.876	0.196	0.959
16	兰河涵洞进口	$y=0.286x+0.020$	1.048	0.286	0.995
17	颍河倒虹吸出口	$y=0.222x-0.027$	0.940	0.222	0.961
18	小洪河倒虹吸出口	$y=0.233x-0.033$	0.928	0.233	0.976
19	双泊河渡槽进口	$y=0.334x-0.058$	0.875	0.334	0.973

表 1(续)
Tab. 1 (Continued)

节制闸编号	节制闸名称	拟合公式	流量系数 i	流量系数 j	决定系数 R^2
20	梅河倒虹吸出口	$y=0.168x-0.010$	0.976	0.168	0.945
21	丈八沟倒虹吸出口	$y=0.202x-0.030$	0.933	0.202	0.899
22	潮河倒虹吸出口	$y=0.259x-0.015$	0.967	0.259	0.955
23	金水河倒虹吸出口	$y=0.198x-0.130$	0.742	0.198	0.875
24	须水河倒虹吸出口	$y=0.256x-0.108$	0.781	0.256	0.933
25	索河渡槽进口	$y=0.254x+0.056$	1.137	0.254	0.980
26	穿黄隧洞出口	$y=0.303x-0.291$	0.512	0.303	0.864
27	济河倒虹吸出口	$y=0.249x+0.078$	1.198	0.249	0.968
28	闫河倒虹吸出口	$y=0.241x+0.071$	1.179	0.241	0.949
29	溃城寨河倒虹吸出口	$y=0.159x+0.010$	1.024	0.159	0.804
30	峪河暗渠进口	$y=0.301x-0.025$	0.943	0.301	0.976
31	黄水河支倒虹吸出口	$y=0.211x+0.014$	1.032	0.211	0.940
32	孟坟河倒虹吸出口	$y=0.258x+0.069$	1.172	0.258	0.976
33	香泉河倒虹吸出口	$y=0.242x+0.056$	1.138	0.242	0.977
34	淇河倒虹吸出口	$y=0.181x+0.045$	1.110	0.181	0.960
35	汤河涵洞式渡槽进口	$y=0.263x-0.013$	0.971	0.263	0.975
36	安阳河倒虹吸出口	$y=0.213x-0.015$	0.967	0.213	0.943
37	漳河倒虹吸出口	$y=0.244x+0.012$	1.027	0.244	0.959
38	牯牛河南支渡槽进口	$y=0.290x+0.044$	1.105	0.290	0.992
39	沁河倒虹吸出口	$y=0.198x+0.002$	1.004	0.198	0.908
40	洺河渡槽进口	$y=0.274x+0.076$	1.192	0.274	0.988
41	南沙河倒虹吸出口	$y=0.227x-0.059$	0.873	0.227	0.972
42	七里河倒虹吸出口	$y=0.254x-0.048$	0.896	0.254	0.933
43	白马河倒虹吸出口	$y=0.253x-0.030$	0.933	0.253	0.980
44	李阳河倒虹吸出口	$y=0.259x+0.008$	1.018	0.259	0.989
45	午河渡槽进口	$y=0.345x-0.060$	0.871	0.345	0.966
46	槐河(一)倒虹吸出口	$y=0.265x+0.004$	1.009	0.265	0.979
47	洹河倒虹吸出口	$y=0.275x+0.010$	1.023	0.275	0.985
48	古运河暗渠进口	$y=0.428x+0.005$	1.012	0.428	0.926
49	滹沱河倒虹吸出口	$y=0.258x+0.006$	1.013	0.258	0.923
50	磁河倒虹吸出口	$y=0.258x-0.016$	0.975	0.277	0.982
51	沙河(北)倒虹吸出口	$y=0.300x+0.017$	1.043	0.309	0.984
52	漠道沟倒虹吸出口	$y=0.285x+0.005$	1.016	0.287	0.972
53	唐河倒虹吸出口	$y=0.255x+0.003$	1.008	0.255	0.970
54	放水河渡槽进口	$y=0.297x+0.046$	1.113	0.297	0.985
55	蒲阳河倒虹吸出口	$y=0.330x+0.017$	1.041	0.330	0.996
56	岗头隧洞进口	$y=0.309x-0.069$	0.854	0.309	0.974
57	西黑山	$y=0.351x+0.004$	1.009	0.351	0.975
58	瀑河倒虹吸出口	$y=0.261x-0.094$	0.805	0.261	0.920
59	北易水倒虹吸出口	$y=0.264x-0.017$	0.961	0.264	0.931
60	坟庄河倒虹吸出口	$y=0.308x-0.004$	0.991	0.308	0.928

注:表格中, y 表示 $\lg(K/e)$, x 表示 $\lg(H_E/e)$;为与工程中闸门编号一致,故以表中节制闸编号从 2 号开始

通过以上参数率定结果可以看出, $\lg(K/e)$ 与 $\lg(H_E/e)$ 呈较好的正向线性关系,拟合曲线与实测数据吻合较好,大部分节制闸的确定性系数 R^2 大

于 0.95,表明量纲分析闸门过流系数率定结果较为可靠。

从表 1 可进一步发现:峪河节制闸以北,各节制

闸闸门过流系数率定结果均在 0.9 以上,结果较好;峪河节制闸以南,部分节制闸(如:溃城寨河倒虹吸出口节制闸(29号)、穿黄隧洞出口节制闸(26号)、金水河倒虹吸出口节制闸(23号)、白河倒虹吸出口节制闸(7号))的确定系数 R^2 低于 0.9,拟合结果相对其他节制闸较差。经分析,以上 4 个闸门参数率定结果较差的可能原因如下。

对于穿黄隧洞出口节制闸(26号),该节制闸连接中线工程直径最大的穿黄隧洞,由于隧洞输水过程对压强、温度等外界影响较为敏感,出口处水位波动较大,数据集相对离散。

对于溃城寨河倒虹吸出口节制闸(29号)、金水河倒虹吸出口节制闸(23号)、白河倒虹吸出口节制闸(7号),观察用于参数率定的原始数据,发现自变量和因变量间的线性关系并不明显,估计为检测设备系统偏差导致,加之此处存在较多闸门检修情况,破坏了数据的一致性。

综上所述,中、下游参数率定结果整体优于上游,因此该方法更适用于中、小流量情况下的闸门过流系数拟合。

2.2 弧形闸门流量计算

选取 2019 年 4 月整月 2 h 时间间隔的实测闸前水位、闸后水位及闸门开度等数据,利用参数率定后的量纲分析模型、训练后的 LSTM 模型进行闸门流量计算,并采用平均绝对误差、平均相对误差、均方根误差 3 个指标进行比较,结果见图 4 至图 6。

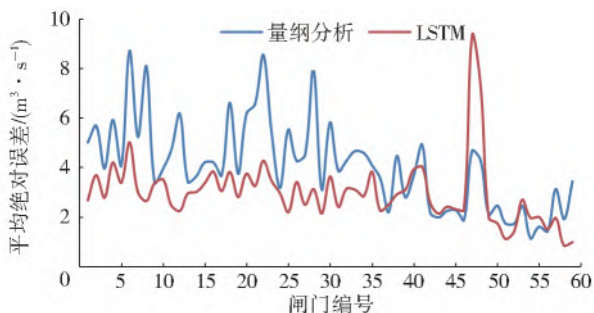


图 4 流量平均绝对误差对比

Fig. 4 Comparison of average absolute error of discharge

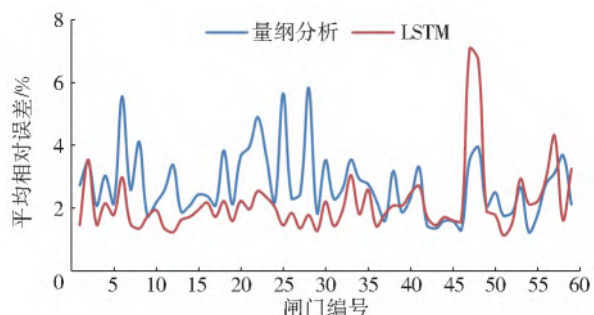


图 5 流量平均相对误差对比

Fig. 5 Comparison of average relative error of discharge

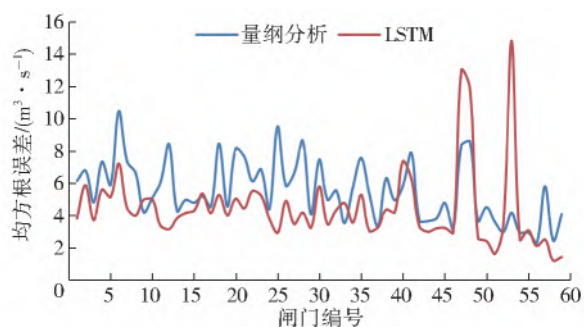


图 6 流量均方根误差对比

Fig. 6 Comparison of root mean square errors of discharge

根据模型计算结果,采用纳什效率系数评估 2 种方法计算精度,其取值范围一般为 0~1,值越接近 1 表明模型可信度越高。2 种方法计算所得纳什效率系数结果见表 2。

通过以上结果图表可以得出如下结论。

量纲分析法:对于安阳河以南的上、中游节制闸(36号节制闸以前),闸门流量计算平均绝对误差 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,平均相对误差 4% 左右,均方根误差 $6 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,纳什效率系数约 0.97;对于安阳河以北的中、下游节制闸,流量平均绝对误差 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,平均相对误差 2.8% 左右,均方根误差 $4.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,纳什效率系数约 0.93。

LSTM 神经网络:对于安阳河以南的上、中游节制闸,闸门流量计算平均绝对误差 $3 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,平均相对误差 2% 左右,均方根误差 $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,纳什效率系数约 0.99;对于安阳河以北的中、下游节制闸,流量平均绝对误差 $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,平均相对误差 2.5% 左右,均方根误差 $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右,纳什效率系数约 0.96。

由此可得,对工程整体而言,LSTM 方法的流量计算结果略优于量纲分析法。但从工程局部上看,安阳河以南上、中游各节制闸采用 LSTM 方法得到的过闸流量平均绝对误差、平均相对误差以及均方根误差均小于量纲分析法,而安阳河以北有 14 座节制闸结果相反,量纲分析法计算得到的流量误差更小。

因此,综上所述表明:基于 LSTM 神经网络的流量计算方法对于南水北调中线工程大、中流量的计算更为适用。相反,量纲分析法则表现为中线工程中、下游的流量误差偏小于上游,因此表明量纲分析法更适用于工程中、小流量的计算,同时也印证了闸门过流系数率定时中、小流量确定系数更高的结果。

表 2 2 种方法纳什效率系数对比

Tab. 2 Comparison of the Nash efficiency coefficients (NSE) of the two methods

节编号	节制闸名称	流量计算方法 NSE		节编号	节制闸名称	流量计算方法 NSE	
		量纲分析	LSTM			量纲分析	LSTM
2	刁河渡槽进口	0.981	0.996	32	孟坟河倒虹吸出口	0.983	0.994
3	湍河渡槽进口	0.969	0.990	33	香泉河倒虹吸出口	0.977	0.990
4	严陵河渡槽进口	0.991	0.996	34	淇河倒虹吸出口	0.912	0.988
5	淇河倒虹吸出口	0.981	0.991	35	汤河涵洞式渡槽进口	0.971	0.992
6	十二里河渡槽进口	0.987	0.993	36	安阳河倒虹吸出口	0.938	0.982
7	白河倒虹吸出口	0.950	0.987	37	漳河倒虹吸出口	0.981	0.994
8	东赵河倒虹吸出口	0.983	0.994	38	牯牛河南支渡槽进口	0.898	0.993
9	黄金河倒虹吸出口	0.957	0.995	39	沁河倒虹吸出口	0.901	0.987
10	草墩河倒虹吸进口	0.994	0.992	40	洛河渡槽进口	0.953	0.989
11	澧河渡槽进口	0.989	0.992	41	南沙河倒虹吸出口	0.909	0.966
12	澎河渡槽进口	0.985	0.996	42	七里河倒虹吸出口	0.878	0.976
13	沙河渡槽进口	0.972	0.996	43	白马河倒虹吸出口	0.979	0.993
14	玉带河倒虹吸出口	0.993	0.994	44	李阳河倒虹吸出口	0.972	0.994
15	北汝河倒虹吸出口	0.989	0.993	45	午河渡槽进口	0.977	0.993
16	兰河涵洞进口	0.988	0.993	46	槐河(一)倒虹吸出口	0.956	0.994
17	颍河倒虹吸出口	0.987	0.988	47	洹河倒虹吸出口	0.967	0.994
18	小洪河倒虹吸出口	0.992	0.993	48	古运河暗渠进口	0.893	0.812
19	双泊河渡槽进口	0.963	0.987	49	漳沱河倒虹吸出口	0.874	0.836
20	梅河倒虹吸出口	0.990	0.993	50	磁河倒虹吸出口	0.965	0.989
21	丈八沟倒虹吸出口	0.965	0.989	51	沙河(北)倒虹吸出口	0.871	0.988
22	潮河倒虹吸出口	0.969	0.991	52	漠道沟倒虹吸出口	0.980	0.995
23	金水河倒虹吸出口	0.944	0.985	53	唐河倒虹吸出口	0.977	0.978
24	须水河倒虹吸出口	0.970	0.986	54	放水河渡槽进口	0.922	0.682
25	索河渡槽进口	0.989	0.993	55	蒲阳河倒虹吸出口	0.980	0.988
26	穿黄隧洞出口	0.959	0.996	56	岗头隧洞进口	0.970	0.958
27	济河倒虹吸出口	0.983	0.988	57	西黑山	0.942	0.973
28	闫河倒虹吸出口	0.978	0.994	58	瀑河倒虹吸出口	0.837	0.949
29	溃城寨河倒虹吸出口	0.956	0.991	59	北易水倒虹吸出口	0.800	0.986
30	峪河暗渠进口	0.997	0.995	60	坟庄河倒虹吸出口	0.738	0.979
31	黄水河支倒虹吸出口	0.954	0.983				

3 结 论

以南水北调中线工程总干渠 59 座节制闸为研究对象,基于 2 种弧形闸门流量计算方法的结果对比及分析,得到主要结论如下。

参数率定方面:量纲分析法只包含 2 个参数,且易于线性化,相较于常规的闸门过闸流量公式参数率定更加简单和经济;LSTM 方法无须进行参数率定,进一步减少了计算的工作量。

流量计算精度方面:对于工程整体而言,LSTM 方法的误差结果略优于量纲分析法,但相差不大;流量平均相对误差分别为 2%~2.5%和 3%~4%。

方法适用性方面:量纲分析法受水位波动影响较大,该方法对于中线工程中下游(中、小流量)的计算更为适用;LSTM 方法受水位波动的影响相对略小,该方法更适用于中线工程中上游(大、中流量)的计算。

参考文献(References):

- [1] 龙岩,雷晓辉,杨艺琳,等.南水北调工程突发水污染事件分级体系研究[J].水力发电学报,2019,38(3):12-22. (LONG Y, LEI X H, YANG Y L, et al. Classification system of water pollution emergencies in South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(3): 12-22. (in Chinese))

- DOI:10.11660/slfdbx.20190302.
- [2] 刘昉,谷欣玉,李文胜,等. 动水关闭的平面事故闸门体型优化试验研究[J]. 农业工程学报,2019,35(12):142-149. (LIU F, GU X Y, LI W S, et al. Structural optimization of emergency plate gate for closure in moving water [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (12): 142-149. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.12.017.
- [3] 马斌,郭乙良. 水工闸门振动研究现状及发展趋势[J]. 水利水电工程学报,2019(2):55-64. (MA B, GUO Y L. Current research status and development trend of hydraulic gate vibration [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(2):55-64. (in Chinese)) DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.008.
- [4] 李景刚,乔雨,陈晓楠,等. 南水北调中线干线节制闸过流公式率定及曲线绘制[J]. 人民长江,2019,50(8):224-227. (LI J G, QIAO Y, CHEN X N, et al. Flow-through equation calibration and curve drawing for Diaohu check gates in Middle Route of South-to-North Water Transfers Project [J]. Yangtze River, 2019, 50 (8): 224-227. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.08.039.
- [5] 王延召,田甜,徐国宾,等. 弧形闸门面板动水压力计算方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(4):102-107. (WANG Y Z, TIAN T, XU G B, et al. Calculation method of panel hydrodynamic pressure of radial gate [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(4):102-107. (in Chinese)) DOI:10.13245/j.hust.210418.
- [6] 管光华,黄一飞,熊骥,等. 平板闸门自由淹没孔流统一流量率定模型[J]. 农业工程学报,2020,36(22):197-204. (GUAN G H, HUANG Y F, XIONG J, et al. Uniform flow rate calibration model for flat gate under free-submerged orifice flow [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (22): 197-204. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.22.022.
- [7] 崔巍,吴鑫,陈文学,等. 大型渠道弧形闸门过流公式测试比较[J]. 灌溉排水学报,2022,41(1):141-146. (CUI W, WU X, CHEN W X, et al. Comparison of different discharge calculation equations for large canal radial gates [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41 (1): 141-146. (in Chinese)) DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2020677.
- [8] 吴景霞,张春晋. 龙抬头式泄洪洞水力特性试验研究与数值模拟[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(7):123-131. (WU J X, ZHANG C J. Experimental study and numerical simulation of hydraulic characteristics of ogee spillway tunnel [J]. Water Resources and Hydro-power Engineering, 2021, 52 (7): 123-131. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.07.013.
- [9] 郭永鑫,汪易森,郭新蕾,等. 基于流态辨识的弧形闸门过流计算[J]. 水利学报,2018,49(8):907-916. (GUO Y X, WANG Y S, GUO X L, et al. New discharge algorithms of radial gates based on the flow regime identification [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (8): 907-916. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20171188.
- [10] 崔巍,陈文学,王晓松,等. 基于量纲分析的弧形闸门过流公式及其应用[J]. 灌溉排水学报,2012,31(5):91-93,131. (CUI W, CHEN W X, WANG X S, et al. Application of flow equation for radial gates based on dimensional analysis method [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31 (5): 91-93, 131. (in Chinese)) DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2012.05.008.
- [11] METZLER D E. A model study of tainter gate operation. [D]. Ames: Iowa State University, 1948.
- [12] TOCH A. Discharge characteristics of tainter gates [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1955, 120 (1): 290-300. DOI: 10.1061/TACEAT.0007240.
- [13] BIJANKHAN M, FERRO V, KOUCHAKZADEH S. New stage-discharge relationships for radial gates [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139 (5): 378-387. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000556.
- [14] 刘孟凯,王长德,闫奕博,等. 弧形闸门过闸流量公式比较分析[J]. 南水北调与水利科技,2009,7(3):18-19,26. (LIU M K, WANG C D, YAN Y B, et al. Analysis and comparison of radial gate flow formulas [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7 (3): 18-19, 26. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;NSBD.0.2009-03-008.
- [15] 孙一清,李德营,殷坤龙,等. 三峡库区堆积层滑坡间歇性活动预测:以白水河滑坡为例[J]. 地质科技情报,2019,38(5):195-203. (SUN Y Q, LI D Y, YIN K L, et al. Intermittent movement prediction of colluvial landslide in the Three Gorges Reservoir: A case study of Baishuihe landslide [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2019, 38 (5): 195-203. (in Chinese)) DOI:10.19509/j.cnki.dzkg.2019.0520.
- [16] 杨青,王晨蔚. 基于深度学习 LSTM神经网络的全球股票指数预测研究[J]. 统计研究,2019,36(3):65-77. (YANG Q, WANG C W. A study on forecast of global stock indices based on deep LSTM neural network [J]. Statistical Research, 2019, 36 (3): 65-77. (in Chinese)) DOI:10.19343/j.cnki.11-1302/c.2019.03.006.

- [17] 李见平. 基于双层 LSTM 模型的股票趋势预测研究[J]. 科技与创新, 2021(7): 50-51. (LI J P. Study on stock trends based on double-layer LSTM model[J]. Science and Technology & Innovation, 2021(7): 50-51. (in Chinese)) DOI:10.15913/j.cnki.kjycx.2021.07.016.
- [18] 张玉清,董颖,柳彩云,等. 深度学习应用于网络空间安全的现状、趋势与展望[J]. 计算机研究与发展, 2018,55(6): 1117-1142. (ZHANG Y Q, DONG Y, LIU C Y, et al. Situation, trends and prospects of deep learning applied to cyberspace security[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(6): 1117-1142. (in Chinese)) DOI: 10.7544/issn1000-1239.2018.20170649.
- [19] GAO L, GUO Z, ZHANG H, et al. Video captioning with attention-based LSTM and semantic consistency[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2017, 19(9): 2045-2055. DOI:10.1109/TMM.2017.2729019.
- [20] 常黎明,胡亚洲,左小益. 特定流量下闸门开度与上游水位关系及计算方法[J]. 人民长江, 2019, 50(S2): 176-178. (CHANG L M, HU Y Z, ZUO X Y. Calculation of relationship between gate opening and upstream water level under specific flow rate[J]. Yangtze River, 2019, 50(S2): 176-178. (in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.S2.041.
- [21] 王蓓. 弧形闸门水力特性影响因素模型试验研究[J]. 吉林水利, 2021(4): 43-46. (WANG B. Model test of influencing factors of radial gate hydraulic characteristics[J]. Jilin Water Resources, 2021(4): 43-46. (in Chinese)) DOI:10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2021.04.011.
- [22] CHADWICK A J, MORFETT J C. Hydraulics in civil engineering[M]. London: Allen & Unwin, 1986. https://www.osti.gov/biblio/7249672.
- [23] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780. DOI:10.1162/neco.1997.9.8.1735.
- [24] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444. DOI: 10.1038/nature14539.
- [25] 张宇帆,艾芊,林琳,等. 基于深度长短时记忆网络的区域级超短期负荷预测方法[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 1884-1892. (ZHANG Y F, AI Q, LIN L, et al. A very short-term load forecasting method based on deep LSTM RNN at zone level[J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 1884-1892. (in Chinese)) DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2101.
- [26] 陈能汪,余镒琦,陈纪新,等. 人工神经网络模型在水质预警中的应用研究进展[J]. 环境科学学报, 2021, 41(12): 4771-4782. (CHEN N W, YU Y Q, CHEN J X, et al. Artificial neural network models for water quality early warning: A review[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(12): 4771-4782. (in Chinese)) DOI:10.13671/j.hjkxxb.2021.0343.

Comparison between LSTM neural network and dimensional analysis method in discharge calculation of arc gates

WANG Yilin¹, JIN Yanguo², CHEN Xiaonan², DUAN Chunqing³, ZHANG Zhao¹, LEI Xiaohui¹, CHANG Wenjuan¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Transfer Middle Route Project, Beijing 100038, China; 3. Beijing Water Affairs Center for Suburbs, Beijing 100071, China)

Abstract: The control gate is an important control hydraulic structure in open channel water transfer project, which controls the water level and discharge of the channel by adjusting the opening of the gate. Currently, the safety performance and service performance of the arc gate have been paid much attention. The arc gate has been widely used in various open channel water transfer projects because of its advantages such as light weight, small lifting force, stable water flow pattern, simple operation and maintenance. Therefore, the accurate calculation of the discharge of arc gate is of great significance to ensure the reasonable design of the engineering building, the scientific control of the water transmission channel and the safe operation of the water transfer system.

In previous studies, the discharge of arc gate was mainly calculated by empirical formula. Due to the complex structure of the arc gate, it was difficult to calibrate the discharge coefficient, submergence coefficient and other parameters in the empirical formula. Besides, the coefficient changed with the change of flow state, so its applicable conditions had certain limitations. In addition, the discharge coefficient of arc gate of the empirical formula was a function of the gate opening degree and the upstream and downstream head difference, and the relationship was mostly nonlinear, which made parameter calibration process complicated and more erroneous. Based on this, the improved arc gate discharge calculation methods are put forward from two different levels of mechanism and data: dimensional analysis method and Long-Short Term Memory neural network.

Since the beginning of water transmission of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project, a long series of his-

torical water situation data have been accumulated, and the amount of data fully meets the needs of model construction. Consequently, taking 59 control gates in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project as the research object, two different discharge calculation method of arc gates based on dimensional analysis method and Long-Short Term Memory neural network (LSTM) were established. Selecting the original observation data of 2-hour time scale from 2018 to 2019, the average absolute error, average relative error, root mean square error and Nash efficiency coefficient of two models were compared and analyzed, which showed that the error results of the Long-Short Term Memory neural network method was a little better than the dimensional analysis method for the project as a whole, with the average relative errors between the two methods were 2%~2.5% and 3%~4%, respectively.

In conclusion, as for parameter calibration, compared with the conventional formula of arc gate discharge, the dimensional analysis method only contained two parameters so that it was simple, economical and easy to linearize. The method of LSTM neural network did not need parameter calibration, which further reduced the workload of calculation. As for method applicability, the dimensional analysis method was greatly affected by the water level fluctuations, and it was more suitable for the overflow calculation of arc gates in the middle and downstream (medium and small discharge) of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. Contrarily, the LSTM neural network method was relatively slightly affected by water level fluctuation, which was more suitable for discharge calculation of arc gates in the middle and upstream (large and medium discharge). This study provided a scientific basis for the hydraulic calculation and scheduling operation of the gates of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. However, the methods used were only verified in the arc gates in the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project. Whether there are other methods with higher calculation accuracy is worthy of further study.

Key words: Middle Route of South-to-North Water Transfer Project; arc gate; discharge calculation; dimensional analysis; Long-Short Term Memory neural network

(上接第 580 页)

model gradually applied to smaller-scale storm simulations and forecasts in various countries and regions. In recent years, Beijing's sub-center has realized the stable and healthy economic and social development of the whole region with the rapid increase of building area and population density, increasing the vulnerability to the effects of storms and floods.

Based on WRF, the numerical weather simulation model was built by considering a more comprehensive optimization of the physical parameterization schemes and applied to Beijing's sub-center. According to the divisions of the Tongzhou District Government concerning water environment management work, the study area included the Chengbei area, Hexi area, Lianghe area, and North canal ecological belt. Three-level two-way nested domains were set according to Lambert Conformal coordinates. Considering cloud microphysical schemes, cumulus convection schemes, planetary boundary layer schemes, and land surface schemes, 16 different parameterization scheme combinations were set. To select the optimal combinations, relative error (E_R), root-mean-square error (E_{RMS}), mean deviation error (E_{MB}) and standard deviation (D_S) were used to evaluate the simulation effects on temporal and spatial scales.

The results showed that different schemes and their combinations had different results, and the simulation results for '7 • 20' were better than those for other rainfalls. The cumulus convective parameterization scheme had the most significant impact on the simulation of heavy rainfall in the study area, and generally, model performance was better when the cumulus parameterization scheme was Grell-Freitas. The combination of the WRF Single-Moment 5-class scheme, the Grell-Freitas scheme, the Yonsei University scheme, the newer version of the Rapid Radiative Transfer Model scheme, the Revised MM5 Monin-Obukhov scheme, the Noah land surface model and the urban canopy model had the best result.

In summary, it is feasible to simulate heavy rainfall by the WRF model. The method could extend the forecast period and provide data support for related research in areas lacking precipitation data. Under the current background of increasing short-duration heavy rainfall, the application of above method to urban flood control had important practical significance. Although the simulation accuracy of the WRF model could meet the requirements of actual operations, there were still some shortcomings that required further excavation and analysis. With the solving of the limitations of observed data, the model performance could be improved further in the future.

Key words: WRF; Beijing; Beijing's sub-center; heavy rainfall; physical parameterization schemes