

康龙熙, 李巍, 李建新, 等. 基于动态损失的水动力学模型在永定河生态补水过程中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 909-919. KANG L X, LI W, LI J X, et al. Application of hydrodynamic model based on dynamic loss in the ecological water replenishment process of Yongding River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 909-919. (in Chinese)

基于动态损失的水动力学模型 在永定河生态补水过程中的应用

康龙熙¹, 李巍^{2,3}, 李建新², 蔡思宇⁴

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 水利部海河水利委员会, 天津 300171;
3. 天津市龙网科技发展有限公司, 天津 300000; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 为精准模拟一维水动力学过程, 基于明渠非恒定流的水动力模型, 提出耦合改进考斯加科夫(Kostiakov)公式, 考虑实际河道渗漏损失动态变化。在同一时间步长上, 将水动力模型计算流量作为损失模型流量边界条件, 通过损失经验参数 a 和 b 计算得出此时间步长河道损失量, 对水动力河道损失参数进行实时修正。以永定河流域 2022—2024 年 4 场实测补水数据对模型精度进行检验, 分析海河“23·7”流域性特大洪水(简称“23·7”洪水)前后永定河河道生态变化特点。结果表明: 该模型在永定河流域具有良好适用性, 相对误差的绝对值最小为 0.004, 最大为 0.218; “23·7”洪水对永定河河道冲刷作用明显, 河道形状发生明显改变, 河道糙率与河道下渗损失较洪水冲刷前均减小, 永定河下游流域较洪水冲刷前以小流量补水即可实现全流域通水, 可为永定河下游生态调水提供参考。

关键词: 动态损失; 水动力; 补水过程模拟; Kostiakov 经验公式; 永定河

中图分类号: TV131 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0090

永定河是海河水系的重要支流, 是首都北京的“母亲河”, 是国家四大重点防洪江河之一, 具有重要的战略地位和功能作用, 是海河流域京津冀区域重要水源涵养区、生态屏障和生态廊道^[1]。通过建立永定河下游一维水动力模型, 模拟径流变化情况, 对永定河生态治理具有重要意义。河道渗透损失是水动力模型中一项非常关键的参数指标^[2], 直接影响下游断面过水量, 对湖泊沙石坑的填续和模拟径流过程有着直接的影响。赵然杭等^[3]采用积分学方法及广义简约梯度法对考斯加科夫(Kostiakov)经验公式进行改进, 并成功将其应用于南水北调东线梁济运河段输水流量损失的估算。魏红等^[4]提出了进行河道渗漏量估算的新方法“入渗速率面积法”, 并将该法成功应用于 2020 年秋季补水调度中。卢明龙等^[5]采用综合损失系数对大型明渠输水水头损失进行估算。Edhisono 等^[6]分析了河道横断面和

河道长度因素对贝纳南河(Benanain Rive)堰流输水损失的影响。Kulkarni 等^[7]采用水动力模型对都德恒河(Dudhganga)右岸干渠输水损失进行计算。常规一维水动力模型通常采用定值损失, 而实际河道渗漏损失受多方面因素影响, 随径流状态动态变化。为实现符合实际河道的动态损失, 更加精准地模拟径流变化过程, 本研究对河道段采用耦合改进的 Kostiakov 经验公式水量损失模型, 通过水动力模型计算得到实时水量, 对应此流量下的河道渗漏损失量, 对一维水动力模拟计算过程中渗漏损失量参数进行实时修正, 使水动力模型能够根据实时流量动态调整渗漏损失; 根据永定河实际地形条件, 对三家店至京良路湖坑部分建立水量平衡模型与水动力模型耦合, 以提高一维水动力模型模拟精度^[8]。以 2022—2024 年 4 场补水对模型进行验证, 并分析海河“23·7”流域性特大洪水(简称“23·7”洪水)永

收稿日期: 2024-05-15 修回日期: 2024-08-22 网络出版时间: 2024-09-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240912.1055.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0101100); 国家自然科学基金项目(52394234; 52209045)

作者简介: 康龙熙(2000—), 男, 河南洛阳人, 主要从事水文水资源研究。E-mail: klongxi@163.com

通信作者: 李巍(1969—), 男, 天津人, 高级工程师, 主要从事水利信息化研究。E-mail: liwei@lonwin.cn

定河河道特征变化。

1 研究区概况

永定河上游有桑干河、洋河两大支流。桑干河发源于山西高原北部宁武县管涔山,洋河发源于内蒙古高原南缘,两河于河北省怀来县朱官屯汇合称永定河。河流流经北京、河北和天津,是京津冀重要的水源涵养区、生态廊道和生态屏障,流域总面积 47 856 km²。永定河官厅以下流域为官厅水库至屈家店,全长 267 km,河道途经山峡段、湖泊

砂石坑和平原段 3 部分。其中:官厅至三家店区段位于山峡区,山区段山体较高且陡峭,河道蜿蜒,同时受多个水库控制^[9];三家店至京良路由 5 个景观湖和 3 个大型砂石坑组成;京良路至屈家店为平原段,多为砂质河床,河道常年干涸,下渗量较大。流域作为北方干旱河流,由当地水、再生水、引江水和引黄水多水源供水。该流域属温带大陆性季风气候,四季分明,年内降水多集中在 6—9 月,多年平均降水量 360~650 mm,呈现明显的季节性特点^[10],研究区概况见图 1。

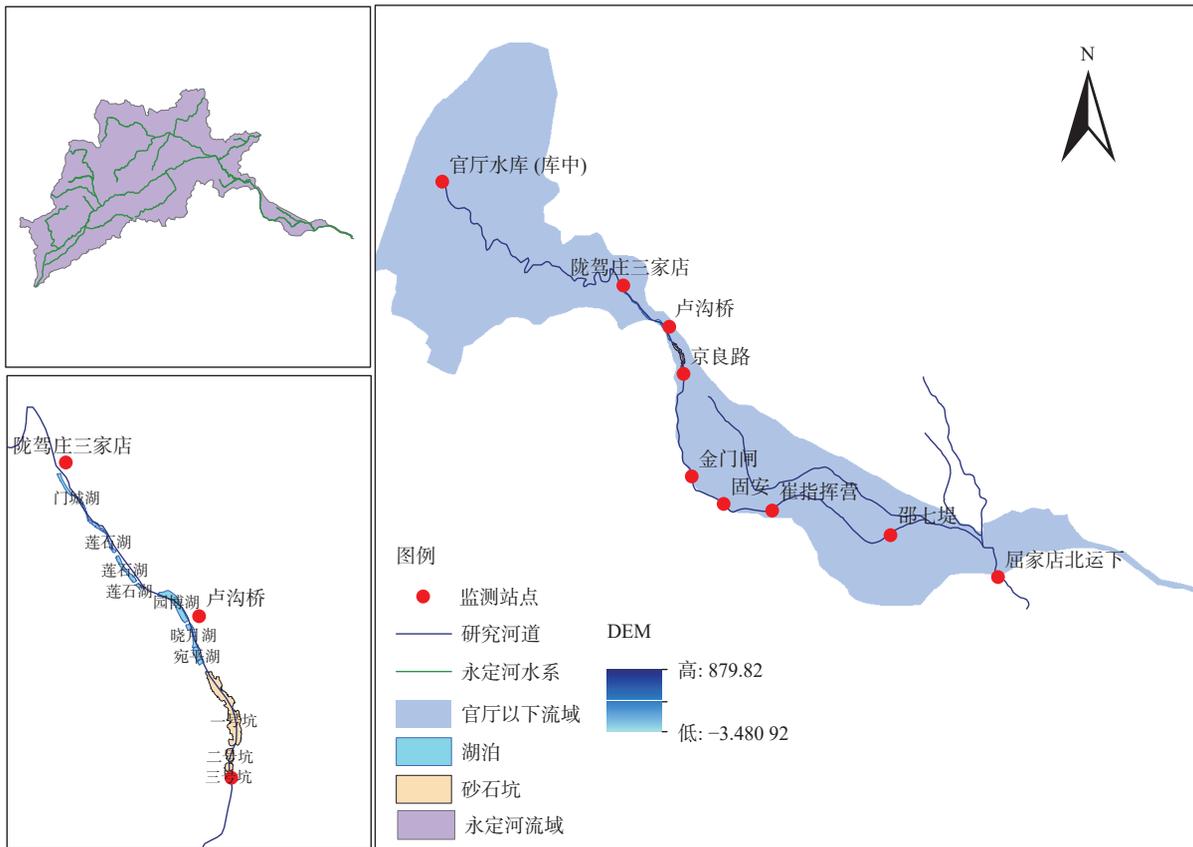


图 1 研究区域概况

Fig. 1 Overview map of the study area

2 水动力模型

2.1 数据资料

2.1.1 工程资料

永定河官厅水库下游流域的主要水工建筑物包括珠窝水库、落坡岭水库、三家店拦河闸和卢沟桥拦河闸等,为多控制工程调节,需要模拟的河段较长,河道下垫面情况多变^[11]。模型建模涉及的工程资料见表 1。

2.1.2 生态补水资料

收集了官厅水库下游流域 2022 年秋季(9 月 20 日—10 月 30 日)、2023 年春季(2 月 24 日—4 月

22 日)、2023 年秋季(10 月 1 日—12 月 4 日)和 2024 年春季(3 月 13 日—4 月 30 日)的 4 场实测补水数据,收集的官厅水库断面至屈家店断面共计 8 个关键站点的补水流量过程见图 2。

2.2 计算方法

2.2.1 水动力模型

动力波方程组包括连续方程与运动方程。通过分析压力、重力、沿程阻力和惯性力对水流的共同作用,得到控制体内动量的增量、流入控制体的动量与作用与控制体上的冲量条件,由动量守恒推导其运动方程,并结合质量守恒定律推导的连续方程,

得到最终的动力波方程组^[12](即完整的圣维南方程组)用以描述水流的时空变化,其表达式为

$$\begin{cases} B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial z}{\partial x} + gAS_f = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: B 为断面宽度, m ; x 为空间步长(即断面间的距离), m ; t 为时间步长, s ; A 为断面面积, m^2 ; Q 为断面过流流量, m^3/s ; u 为断面平均流速, m/s ; Z 为河道断面水位, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; S_f 为摩阻力, N 。

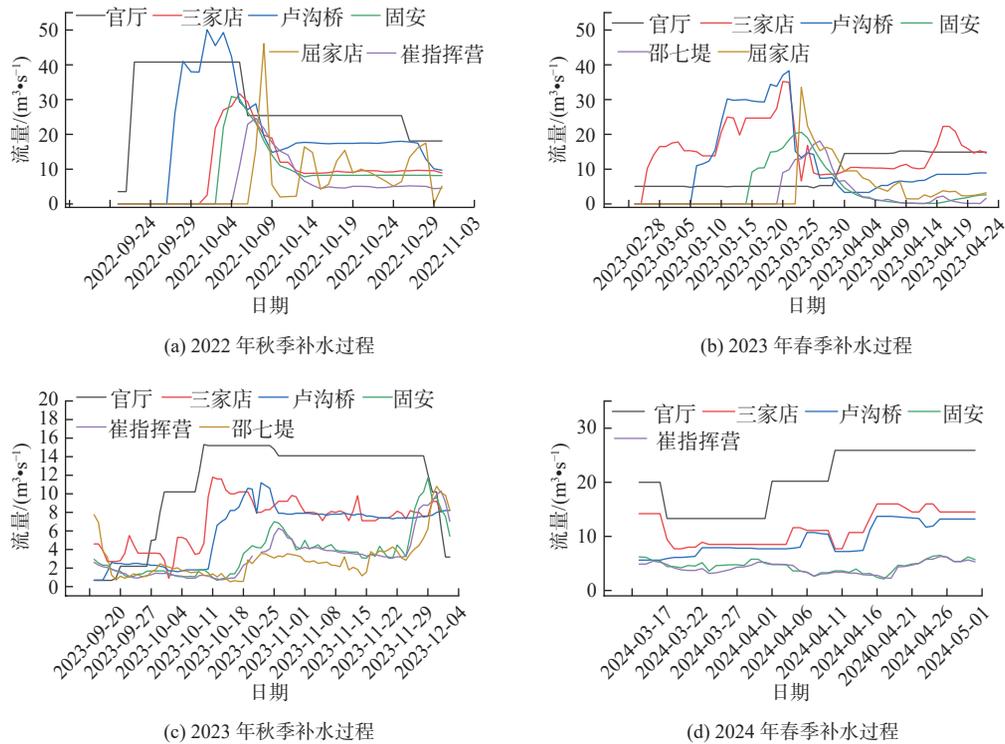


图2 官厅水库下游流域生态补水资料

Fig. 2 Ecological water supplement data of downstream basin of Guanting reservoir

方程组的求解。采用具有结构简单、收敛速度快、无条件稳定以及对时间步长没有限制等优点的Preissman 隐式格式对方程组进行差分求解,Preissman 格式离散见图3。

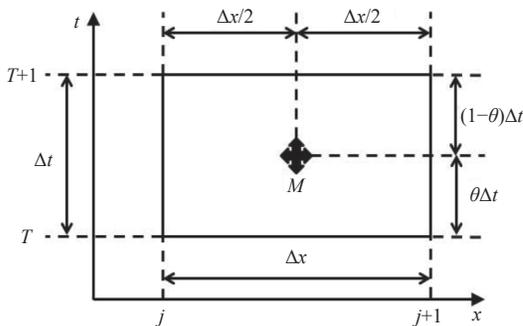


图3 四点式差分隐式格式

Fig. 3 Four point weighted implicit difference scheme diagram

表1 工程资料汇总

Tab. 1 Engineering data summary

数据分类	数据内容	数据范围	坐标及精度
下垫面数据	高精度DEM	永定河全流域范围	2 m
	土地利用、土壤数据		1 km
河道数据	河道DEM	永定河干流河道	2 m
	河道断面形状数据	永定河干流河道	测点扫描河道数据
	湖坑库容曲线	五湖三坑	2 m精度DEM提取
遥感数据	资源三号卫星、高分一号卫星	永定河全流域范围	2 m

$$Q_{n+1,j+1} - Q_{n+1,j} + C_j Z_{n+1,j+1} + C_j Z_{n+1,j} = D_j \quad (2)$$

$$E_j Q_{n+1,j} - F_j Z_{n+1,j} + G_j Q_{n+1,j+1} + F_j Z_{n+1,j+1} = \varphi_j \quad (3)$$

式中: j 和 $j+1$ 表示第 j 个和第 $j+1$ 个截面; n 和 $n+1$ 表示第 n 和 $n+1$ 时刻; $Q_{n+1,j}$ 和 $Z_{n+1,j}$ 分别表示 $n+1$ 时刻的第 j 个断面的流量和水位; 系数 C 、 D 、 E 、 F 、 G 和 φ 由的水力参数计算得到, 其表达式为

$$C_j = \frac{B_{n,j+\frac{1}{2}} \Delta x_j}{2\Delta t\theta} \quad (4)$$

$$D_j = \frac{q_{j+\frac{1}{2}} \Delta x_j}{\theta} - \frac{1-\theta}{\theta} (Q_{n,j+1} - Q_{n,j}) + C_j (Z_{n,j+1} + Z_{n,j}) \quad (5)$$

$$E_j = \frac{\Delta x_j}{2\theta\Delta t} - (\alpha u)_{n,j} + \left(\frac{g|u|}{2\theta c^2 R} \right)_{n,j} \Delta x_j \quad (6)$$

$$G_j = \frac{\Delta x_j}{2\theta\Delta t} + (\alpha u)_{n,j+1} + \left(\frac{g|u|}{2\theta c^2 R} \right)_{n,j+1} \Delta x_i \quad (7)$$

$$F_j = (gA)_{n,j+\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$\varphi_j = \frac{\Delta x_i}{2\theta\Delta t} (Q_{n,j+1} + Q_{n,j}) - \frac{1-\theta}{\theta} [(\alpha u\theta)_{n,j+1} - (\alpha uQ)_{n,j}] - \frac{1-\theta}{\theta} (gA)_{n,j+\frac{1}{2}} (Z_{n,j+1} - Z_{n,j}) \quad (9)$$

式(4)~(9)中: α 为动量校正系数; B 为水面宽度, m; R 为水力半径, m; u 为断面平均流速, m/s; c 为谢才系数; q 为旁侧入流, m^3/s ; θ 为加权系数, $0 \leq \theta \leq 1$, 为保证模型的计算稳定性, 参数校准后 θ 取 0.6; Δt 为时间步长, s; Δx 为空间步长, m。

2.2.2 水量损失模型

渠道输水损失的主要影响因素有土壤条件、断面形式、水力特性、地下水埋深、衬砌条件和流量等^[13]。Kostiakov 经验公式考虑了流量和土壤条件对于损失的影响, 表达式为

$$S = 0.01PQ^{1-m} \quad (10)$$

式中: S 为单位渠长渗漏损失量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km})$; Q 为流量, m^3/s ; P 和 m 为经验常数。

实际输水过程中, 每千米渠长上的损失流量随流量的变化而变化, 输水损失具有沿程变化的动态特点, 因此通过积分思想表征其动态变化特点^[14]。引入积分学方法, 构建改进 Kostiakov 经验公式基本形式为

$$y = (\chi^a + abL)^{\frac{1}{a}} \quad (11)$$

式中: y 为非线性回归方程求出的毛流量, m^3/s ; x 为自变量净流量, m^3/s ; a 和 b 为改进经验公式的参数; L 为渠段长度, m。进一步演变为如下基本形式:

$$S_{\text{损}} = (x^a + abL)^{\frac{1}{a}} - x \quad (12)$$

式中: $S_{\text{损}}$ 为输水损失量, m^3/s 。通过实时流量数据计算出对应流量下河道实际的渗漏损失量。

2.2.3 水量平衡模型

基于湖坑库容曲线, 以流量入流过程为边界条件, 考虑湖坑填蓄和渗漏损失建立水量平衡模型对湖坑填蓄过程进行模拟。现有常规渗漏量计算方法一般涉及参数多、计算结果准确性较差, 因此迫切需要提出简单可靠的渗漏量计算方法。考虑湖泊和砂石坑综合入渗能力进行湖坑渗漏量评价^[15], 提出“入渗速率面积法”, 该方法直接利用河水入渗速率与水面面积相乘获得渗漏量, 简单易用, 表达式为

$$W = IA \quad (13)$$

式中: W 为河道渗漏量, m^3/d ; A 为水面面积, m^2 ; I 为

河水入渗速率, m/d 。在本研究中用于水量平衡模型湖泊和砂石坑实时渗漏损失量确定。

2.3 耦合水动力模型

2.3.1 初始条件

由于景观湖与砂石坑的蓄量较大, 对于水头的演进有着迟滞作用, 因此, 其初始条件将对模型的模拟精度有着较大的影响^[16]。对于这类无资料的湖泊, 由于没有水位监测条件, 无法通过水位库容曲线反推初始库容。通过遥感图像提取的水面面积反推初始库容, 提取的不同场次湖泊和砂石坑水面面积见表 2 和表 3。

表 2 不同场次湖泊水面面积

Tab. 2 Water surface area of lakes in different fields 单位: 万 m^2

补水场次	门城湖	莲石湖	园博湖	晓月湖	宛平湖
2022年秋	38.63	72.45	134.54	37.90	33.97
2023年春	56.33	84.57	146.29	46.57	37.84
2023年秋	56.07	63.13	146.18	44.48	24.14
2024年春	29.56	58.05	142.19	44.37	40.43

表 3 不同场次砂石坑水面面积

Tab. 3 Water surface area of sand pit in different times 单位: 万 m^2

补水场次	1号砂石坑	2号砂石坑	3号砂石坑
2022年秋	270.86	20.17	4.59
2023年春	280.43	23.35	4.13
2023年秋	323.57	29.42	18.64
2024年春	336.85	29.33	11.17

利用补水开始前的卫星遥感数据反演水面面积, 结合水库水位蓄量计算模型以及 DEM 高程数据计算出的水位蓄量关系曲线(以门城湖和 2 号坑为例)见图 4, 以提取出的水面面积对应的库容作为模型湖泊与砂石坑初始条件^[17]。

统计 4 场补水场次对应水面面积变化情况见图 5。

2.3.2 断面数据

模型官厅坝下至屈家店共计 455 个断面。从官厅水库以下至屈家店采用海河水利委员会实测断面, 断面间距为 500 m。其中, 官厅至三家店取 208 个断面, 京良路至崔指挥营取 101 个断面, 崔指挥营至屈家店取 146 个断面。

受“23·7”洪水影响, 河道地形发生了较大变化, 河道特征变化明显, 断面变化情况见表 4。

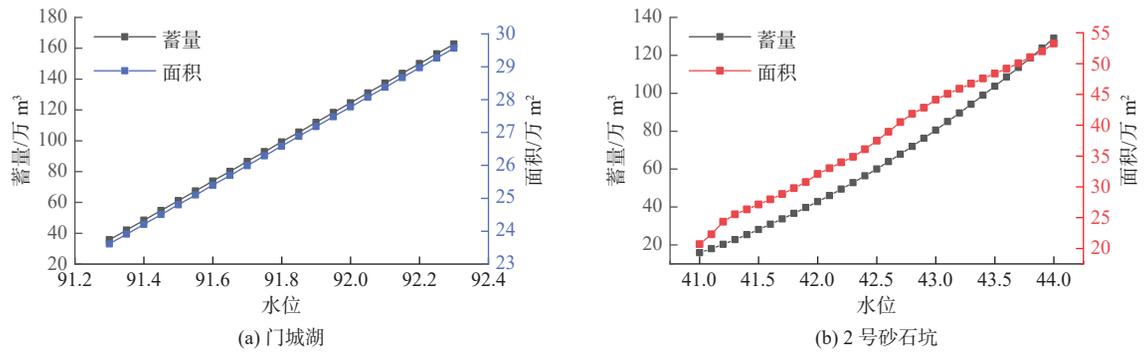


图4 湖坑库容曲线

Fig. 4 Reservoir capacity curves of lakes and gravel pits

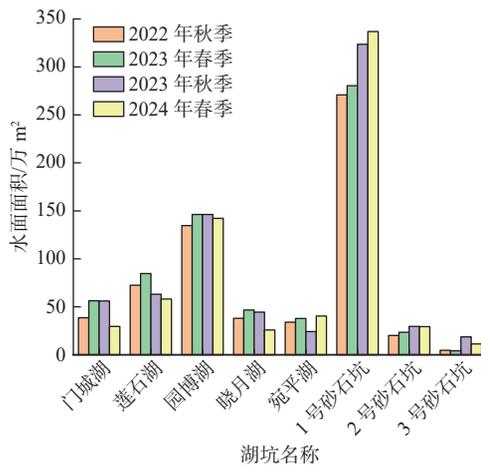


图5 湖坑水面面积统计

Fig. 5 Statistics of water surface area of lakes and gravel pits

由断面形状对比可明显看出,“23·7”洪水冲刷前后河道断面发生明显改变,官厅至三家店段、京良路至屈家店段河道形状与底部高程需要针对洪水冲刷前后地形数据建立不同地形数据的水动力学模型^[18]。

2.3.3 边界条件及相关参数

边界条件。边界条件是模型与外部的相互作用,决定模型的正常运行,模型中体现为一个河流的起始处与结束处。设置官厅下游模型的边界条件,上边界为官厅水库坝下流量过程(下泄流量),下边界为屈家店断面水位边界。其他河流或其他水源对研究河段补水,采用侧向入流方式进行边界条件设置^[19],见图6。

表4 洪水前后河道断面变化

Tab. 4 Change of river section before and after flood

断面位置名称	断面位置	灾前河道断面	灾后河道断面
1号坑			
金门闸			
大旺村			

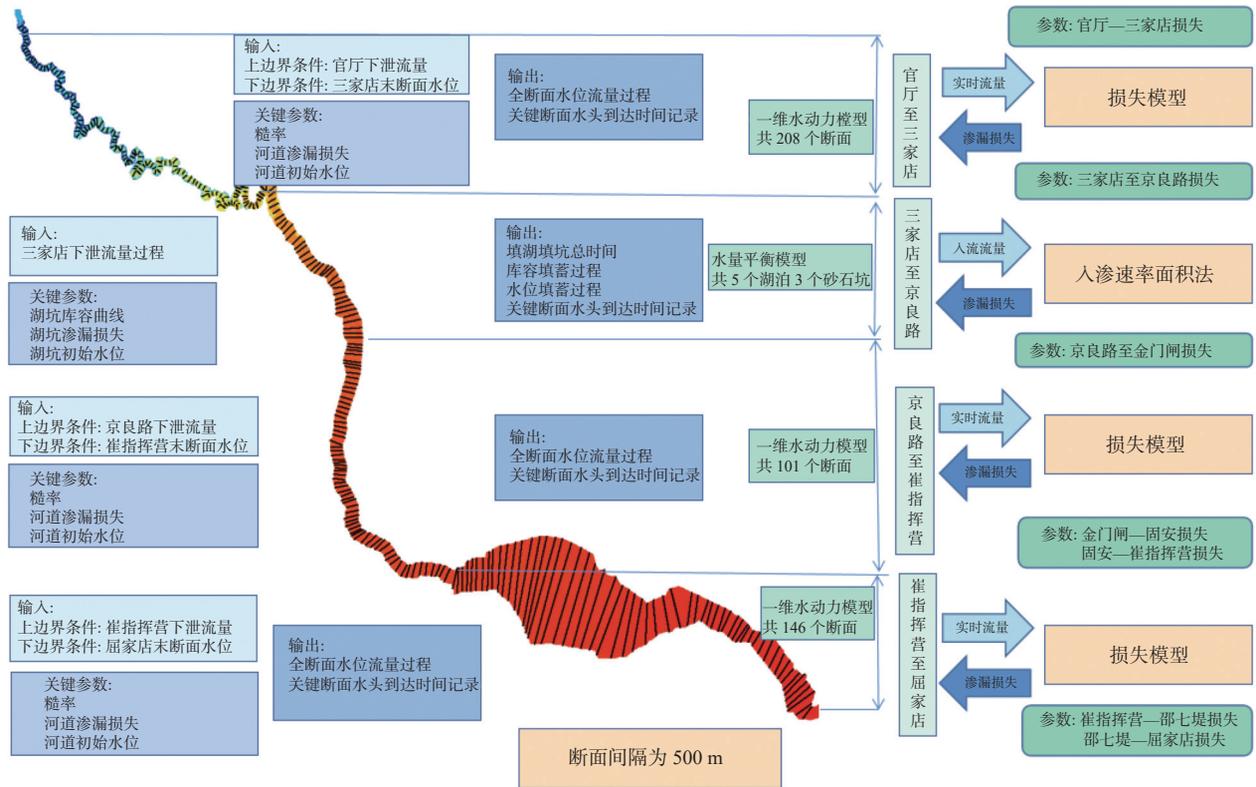


图 6 水动力模型概化

Fig. 6 Hydrodynamic model generalization diagram

参数设置。河床糙率和河道渗漏损失是水动力模型计算中非常重要的参数。由于永定河官厅至屈家店段全长 267 km, 需要模拟的河段极长, 且河

道下垫面情况多变^[20]。因此, 根据河道下垫面变化情况以及测站间距^[21], 将河道分为 6 段(图 7), 分别设置河床糙率和损失模型参数 a 、 b 。

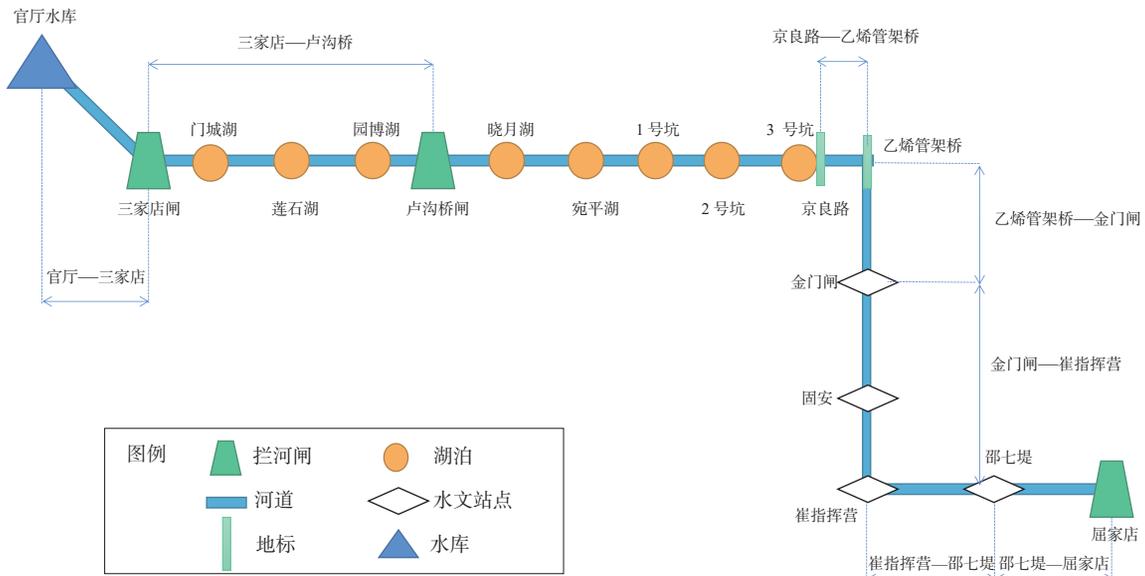


图 7 官厅至屈家店分段情况

Fig. 7 Piecewise diagram

2.3.4 耦合水动力模型

根据永定河实际流域特点, 考虑三家店至京良路主要由门城湖、莲石湖、园博湖、晓月湖、宛平湖以及 1 号砂石坑、2 号砂石坑、3 号砂石坑组成, 河道地形变化较大, 于圣维南方程的一维水动力模型

无法实现对湖坑填蓄过程的模拟。且当水流经过湖坑地形时, 由于地形以及高程变化过大, 导致河道横断面形状和纵向坡降失去连续性。因此, 对于三家店至京良路区段, 考虑采用水量平衡模型并结合水位蓄量曲线对该段进行简化计算, 以时间过程

和流量过程作为模型耦合变量,“入渗速率面积法”确定渗漏损失参数,河道与湖泊、砂石坑的空间位置作为模型耦合的层次关系,串行耦合2个数学模型^[22]。

官厅至三家店采用水动力模型,为三家店至京良路区段湖坑水量平衡模型提供入流过程,再将计算后的出流过程作为京良路至崔指挥营上边界条件进行计算^[23]。通过水动力模型计算当前时间步长下流量值,传递给损失模型,损失模型根据流量值和经验参数 a 和 b ,得出同一时间步长下的损失值,对水动力计算损失量进行修正。模型概化图见图6。

3 模型应用与结果分析

3.1 耦合水动力模型应用

选用2022年至2024年4场补水数据对模型模拟精度进行验证,2022年秋季生态补水数据选择9

月20日至10月30日,2023年春季生态补水数据选择2月24日至4月22日,2023年秋季生态补水数据选择10月1日至12月4日,2024年春季生态补水数据选择3月13日至4月30日;通过4场实测数据进行模拟,验证模型合理性。图8至图11分别为2022年秋季至2024年春季生态补水关键站点的流量率定结果^[24],模型模拟结果与实测数据对比偏差见表5。

3.2 结果分析

糙率变化。由模拟结果分析得到永定河官厅下游不同河段不同补水场次糙率系数见表6^[25],春季和秋季“23·7”洪水前后河道糙率比对见图12,不同季节条件下整体均呈现减小变化,减小变化值为27.85%。河道糙率减小,摩擦阻力降低,导致水流流速增加,改变流态特性^[26]。

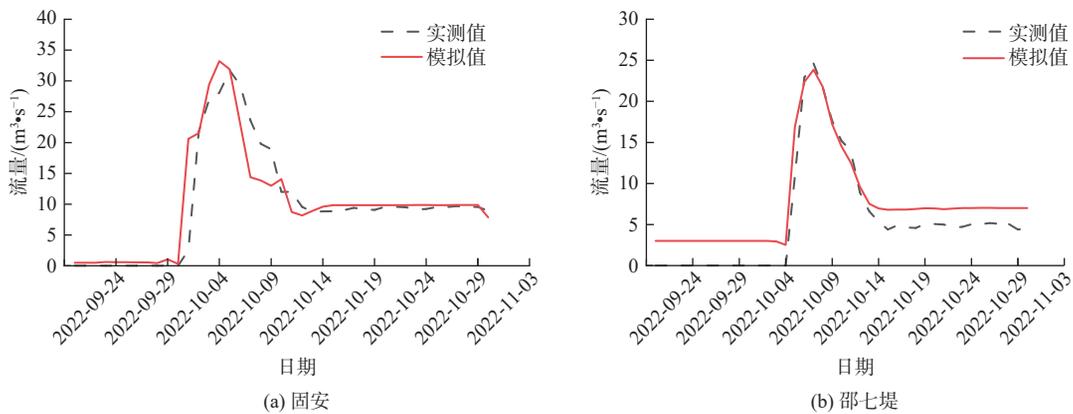


图8 2022年秋季补水率定结果

Fig. 8 Results of autumn recharge rate in 2022

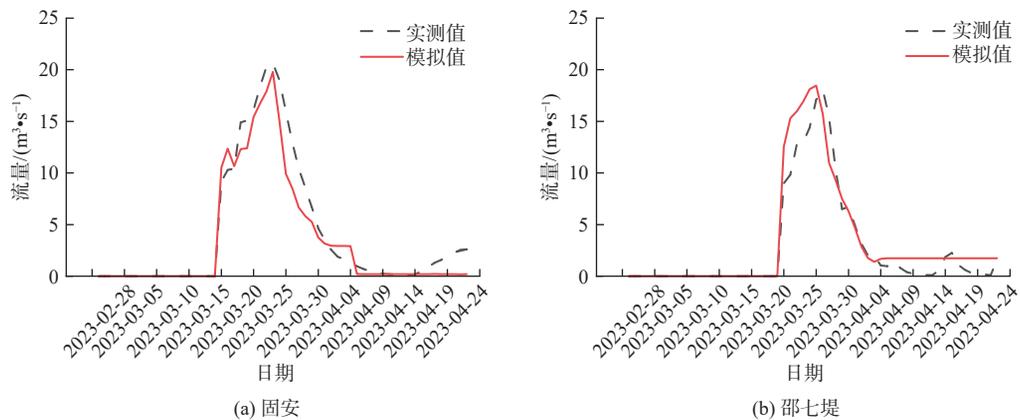


图9 2023年春季补水率定结果

Fig. 9 Results of spring recharge rate in 2023

由图表可知:4场补水各断面流量的绝对误差的绝对值最小为 $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$,最大为 $1.89 \text{ m}^3/\text{s}$;相对误差的绝对值最小为0.004,最大为0.218。最大相对误差来源于2022年秋季邵七堤补水结束后稳定期流量模拟数据,通过实测数据比对,实测流量损失48.4%,经分析是由河道外引水导致。去除稳定

期误差数据后2022年秋季邵七堤相对误差为0.037。耦合水动力模型对“23·7”洪水前后不同季节小时尺度的径流模拟取得了较好的模拟效果^[27],模型参数取值能够很好地反应该河段的实际情况,在永定河官厅下游区域表现出良好的适用性,可用于该河段生态补水研究^[28]。

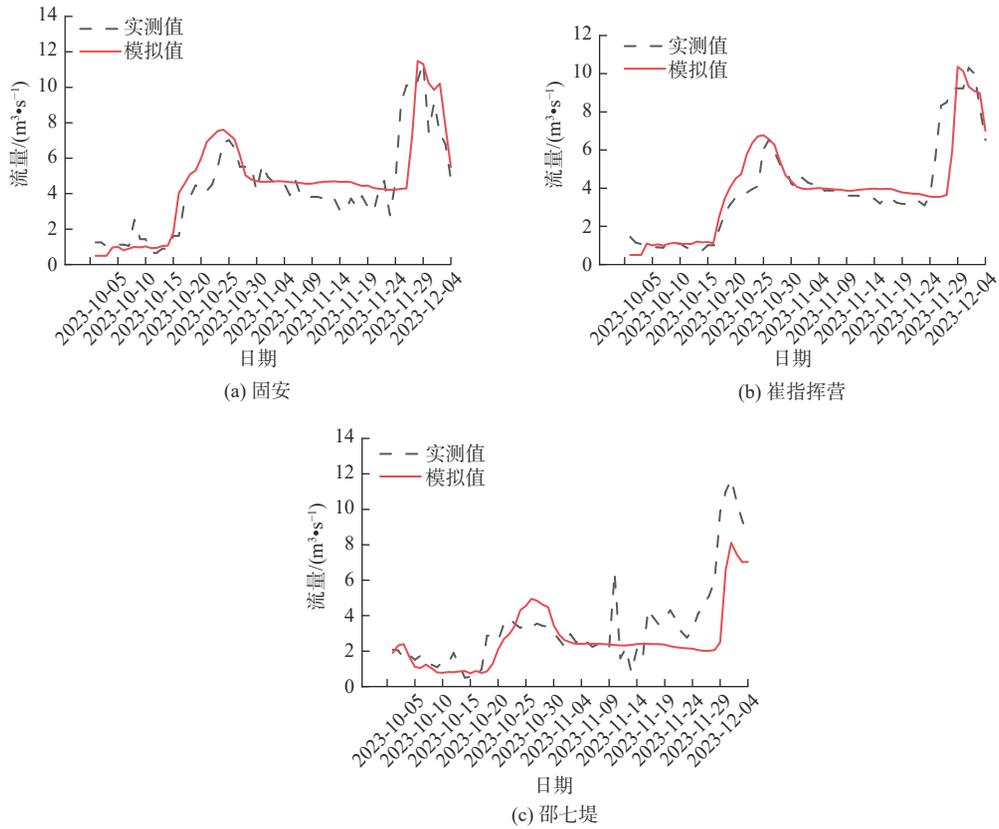


图 10 2023 年秋季补水率定结果

Fig. 10 Results of autumn recharge rate in 2023

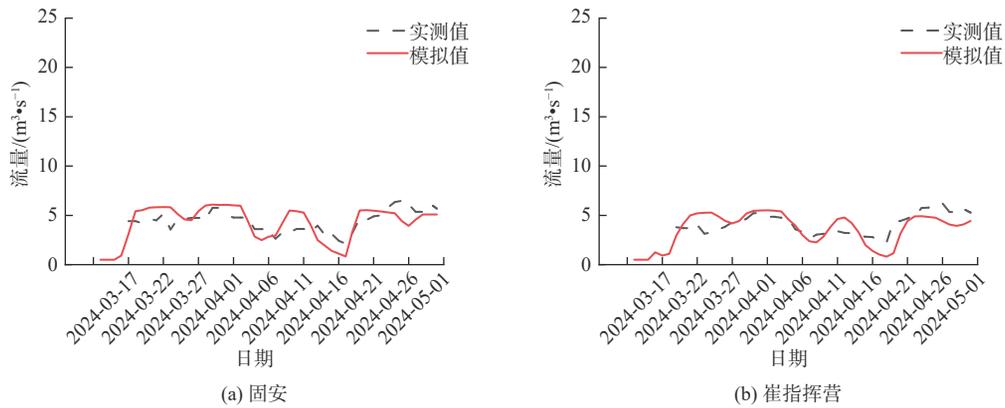


图 11 2024 年春季补水率定结果

Fig. 11 Results of spring recharge rate in 2024

表 5 补水模拟偏差分析

Tab. 5 Deviation analysis of water supplement simulation

补水场次	断面名称	实测流量/(m ³ ·s ⁻¹)	模拟流量/(m ³ ·s ⁻¹)	绝对误差	相对误差
2022年秋季	固安	9.83	9.88	0.04	0.004
	邵七堤	8.65	10.54	1.89	0.218
2023年春季	固安	4.16	3.52	-0.64	-0.154
	邵七堤	2.75	3.29	0.54	0.198
2023年秋季	固安	4.26	4.61	0.35	0.082
	崔指挥营	3.88	3.95	0.07	0.019
2024年春季	固安	4.32	4.34	0.02	0.005
	崔指挥营	4.03	3.74	-0.29	-0.071

表 6 河道糙率统计

Tab. 6 River roughness statistics

区段	补水场次			
	2022年秋季	2023年春季	2023年秋季	2024年春季
官厅坝下—三家店	0.038	0.033	0.033	0.330
京良路—乙烯管架桥	0.076	0.070	0.066	0.050
乙烯管架桥—金门闸	0.076	0.075	0.066	0.050
金门闸—崔指挥营	0.080	0.075	0.040	0.040
崔指挥营—邵七堤	0.030	0.045	0.030	0.035
邵七堤—屈家店	0.065	0.045	0.033	0.035

统计不同补水场次损失模型参数 a 、 b 值, 统计结果见表 7。

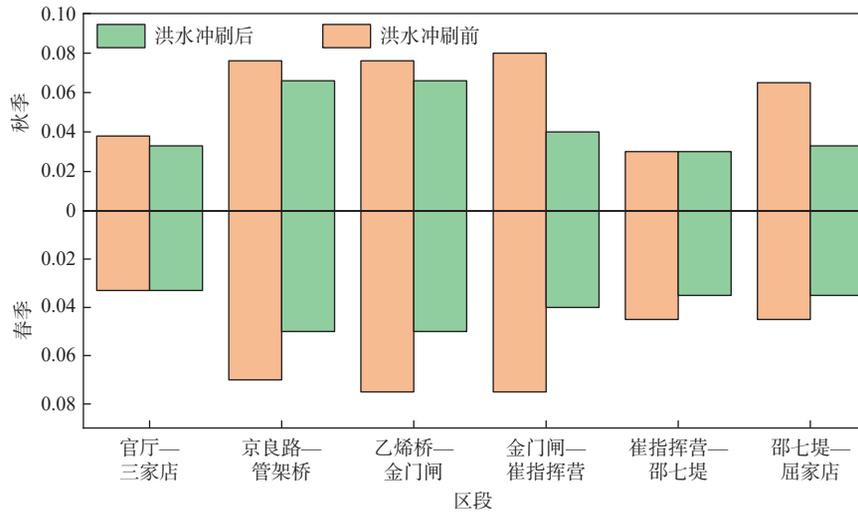


图 12 河道糙率变化

Fig. 12 River roughness change

表 7 损失经验系数统计

Tab. 7 Loss empirical coefficient statistics

区段	补水场次							
	2022年秋季		2023年春季		2023年秋季		2024年春季	
	a	b	a	b	a	b	a	b
官厅坝下—三家店	3.877E-01	1.692E-02	3.605E-01	1.574E-02	3.799E-01	1.658E-02	3.722E-01	1.624E-02
京良路—金门闸	2.923E-01	1.818E-02	2.718E-01	1.691E-02	2.864E-01	1.782E-02	2.806E-01	1.746E-02
金门闸—固安	4.395E-01	3.531E-02	4.087E-01	3.284E-02	4.307E-01	3.460E-02	4.219E-01	3.390E-02
固安—崔指挥营	4.598E-01	1.479E-02	4.276E-01	1.376E-02	4.506E-01	1.450E-02	4.414E-01	1.420E-02
崔指挥营—邵七堤	3.955E-01	1.673E-02	3.678E-01	1.556E-02	3.876E-01	1.639E-02	3.797E-01	1.606E-02
邵七堤—屈家店	4.644E-01	3.602E-02	4.319E-01	3.350E-02	4.551E-01	3.530E-02	4.458E-01	3.458E-02

表 8 入渗速率统计

Tab. 8 Infiltration rate statistics

单位: cm/d

湖坑名称	补水场次			
	2022年秋季	2023年春季	2023年秋季	2024年秋季
门城湖	18.6	18.9	15.5	15.7
莲石湖	18.5	19.1	15.6	15.6
园博湖	18.5	19.1	15.7	15.8
晓月湖	18.7	19.3	15.8	16.0
宛平湖	18.7	19.0	15.6	15.8
1号砂石坑	11.6	11.0	9.0	9.2
2号砂石坑	13.5	11.5	9.4	9.6
3号砂石坑	13.5	11.6	9.5	10.1

湖泊砂石坑入渗速率。由模拟结果分析得到永定河官厅下游湖泊和砂石坑不同补水场次入渗速率^[29]见表 8, 洪水前后入渗速率变化情况见图 13, “23·7”洪水冲刷过后, 永定河官厅下游湖泊渗漏损失较洪水前河段平均减小 20.24%, 砂石坑渗漏损失较洪水前河段平均减小 16.54%。

通过率定洪水前后不同地形数据模型, 对洪水前后水力参数进行比对, 分析河道生态变化, 以卢沟桥下泄 30 m³/s 流量进行模拟。河道断面过水面积减小 57.99 m², 对比灾前河段平均减小 15.47%; 水深减小 0.06 m, 对比灾前河段平均减小 3.02%。

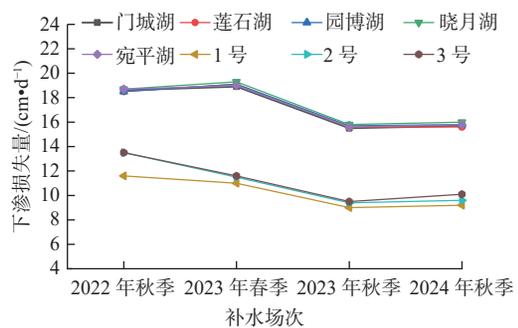


图 13 湖坑下渗损失量变化

Fig. 13 Variation of infiltration loss in lakes and sand-gravel pits

4 结论

研究以永定河下游官厅—屈家店河段为例,构建耦合损失模型的水动力模型,通过对“23·7”洪水前后补水实测数据进行模拟比对,对模拟结果进行讨论,主要结论如下:

采用改进 Kostiakov 经验公式的损失模型,根据经验参数 a 、 b 和水动力模型计算流量得出河道渗漏量,对同一时间步长水动力模型渗漏损失参数进行实时修正。分别利用 2022—2024 年 4 场实测补水数据对模型精度进行验证,模型模拟精度相对误差的绝对值最小为 0.004,最大为 0.218,在不同季节不同河道地形适用效果较为稳定。

针对洪水前后模型模拟结果进行比对,永定河下游“23·7”洪水后较洪水前河道糙率河段平均减小 27.85%,下游湖泊渗漏损失较洪水前河段平均减小 20.24%,砂石坑渗漏损失较洪水前河段平均减小 16.54%。参数相较于“23·7”洪水前流速变大,过水面积与水深受河道渗漏量、糙率和河道底坡变化,呈现一定程度的减小。水头到达时间较洪水前有所提前,永定河下游流域可以小流量补水实现全流域通水。

参考文献:

- [1] 王凯胜,邱颖,陈希红,等. 定河数字孪生流域业务应用场景分析与设计 [J]. 水利信息化, 2024(4): 43-48. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2024.04.008.
- [2] 张帆,蔡宴朋,郭萍,等. 灌区干支渠渗漏估算方法及其在水资源优化配置中的应用 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 140-147. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.4.017.
- [3] 赵然杭,储燕,瞿潇,等. 南水北调东线梁济运河段输水流量损失的经验估算方法 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 48-55. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0006.
- [4] 魏红,刘培斌,姚旭初,等. 永定河平原南段渗透性特征分析 [J]. 北京水务, 2022(S1): 43-48. DOI: 10.19671/j.1673-4637.2022.S1.009.
- [5] 卢明龙,崔巍,陈文学,等. 大型明渠调水工程输水建筑物水头损失测算 [J]. 水电能源科学, 2023, 41(10): 108-110. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230003.
- [6] EDHISONO S, SACHRO S S. Water loss in the Benanain River from temef dam to Haekto and Benanain Weirs in East Nusa Tenggara [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1343(1): 012012. DOI: 10.1088/1755-1315/1343/1/012012.
- [7] KULKARNI A A, NAGARAJAN R. Hydrosatial modelling and simulations for assessing the irrigation canal conveyance losses [J]. Modelling and Simulation in Engineering, 2019, 20191-7.
- [8] 马峰,牛小静,张成,等. 集合参数率定功能的一维水动力模型研究 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2024, 39(2): 227-233. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2024.02.012.
- [9] 胡庆芳,万超,雷振东,等. 永定河流域水文演变与多水源联合优化调度 [J]. 中国水利, 2024(5): 34-40.
- [10] 王槿妍,王材源,刘翠珠,等. 永定河生态补水水文要素变化分析 [J]. 北京水务, 2020(4): 28-31. DOI: 10.19671/j.1673-4637.2020.04.006.
- [11] 马昊然,张海荣,李晓阳,等. 基于 VIC 模型的三峡库区流域小时尺度实时洪水预报 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 309-318. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0033.
- [12] 吴家阳,徐学军,程永光. 一种改进的一维河网水动力解法及其应用 [J/OL]. 工程科学与技术, 1-12 [2024-08-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20240411.1548.001.html>.
- [13] 史德威,程金花,李明峰. 永定河平原南部典型植被土壤优先流特征及其归因 [J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 232-240. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.025.
- [14] 程慧娟,张俊友,王全九. 垂直线源灌不同线源直径下的入渗规律及其模型适用性研究 [J]. 节水灌溉, 2020(6): 29-32. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2020.06.006.
- [15] 孙明珠,张振明. 永定河门头沟段河道生态需水特征研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(6): 729-737. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2023.1006.
- [16] 岳浩,郑永路,徐斌,等. 洪泽湖多目标水量调度决策模型及其应用 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 258-266. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0026.
- [17] 郑鑫源,王逸辰,陈驰. 永定河流域水库资源一体化保护与利用研究 [J]. 水利发展研究, 2023, 23(5): 57-61. DOI: 10.13928/j.cnki.wrdr.2023.05.011.
- [18] 位昊昆,高希超,冯杰,等. 自然河道断面水动力模拟的黎曼求解器改进 [J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(9): 26-37. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2024.09.003.
- [19] 徐存东,任子豪,李智睿,等. 基于 MIKE21 的南河区河网水动力水质耦合模拟研究 [J]. 环境科学与技术, 2022, 45(10): 51-59. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.0926.22.338.
- [20] 季益柱,丁全林,王玲玲,等. 三峡水库一维水动力数值模拟及可视化研究 [J]. 水利水电技术, 2012, 43(11): 21-24. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2012.11.009.

- [21] 何茂林,李瑞,吴盼盼,等. 裸露岩石对喀斯特坡地水土流失及水动力特征的影响 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 103-113. DOI: [10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.04.008](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.04.008).
- [22] 张祖鹏,张泽贤,刘思远,等. 基于一维水动力-水环境耦合模型的长兴港生态流量研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(10): 160-169. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2023.10.014](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2023.10.014).
- [23] 李典,彭振阳,刘国强,等. 河流交汇区水力学特性与水安全研究进展 [J/OL]. *长江科学院院报*, 1-10 [2024-08-17] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20240508.1721.002.html>.
- [24] 易雨君,唐彩虹,张尚弘. 南水北调中线工程典型渠段一维水动力水质模拟与预测 [J]. *水利水电技术*, 2019, 50(2): 14-20. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2019.02.003](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2019.02.003).
- [25] YU Y, HUA T, CHEN L, et al. Divergent changes in vegetation greenness, productivity, and rainfall use efficiency are characteristic of ecological restoration towards high-quality development in the Yellow River basin [J]. *Engineering*, 2024, 34(3): 109-119, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.07.012>.
- [26] YANG Y, RUIPENG Z, DAOMING M, et al. Multiple surface runoff and soil loss responses by sandstone morphologies to land-use and precipitation regimes changes in the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2022, 217.
- [27] 谢亨旺,罗云英,靳伟荣. 渠系水利用系数测算方法研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2020(2): 128-133. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2020.02.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2020.02.026).
- [28] 李哲,郭劲松,方芳,等. 三峡水库澎溪河(小江)回水区一维水动力特征分析 [J]. *重庆大学学报*, 2012, 35(5): 143-150. DOI: [10.11835/j.issn.1000-582X.2012.05.024](https://doi.org/10.11835/j.issn.1000-582X.2012.05.024).
- [29] 胡立堂,郭建丽,张寿全,等. 永定河生态补水的地下水位动态响应 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(5): 5-11. DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008027](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008027).

Application of hydrodynamic model based on dynamic loss in the ecological water replenishment process of Yongding River

KANG Longxi¹, LI Wei^{2,3}, LI Jianxin², CAI Siyu⁴

(1. College of Fluid Machinery Engineering Technology Research Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Haihe River Water Conservancy Commission, Tianjin 300000, China; 3. Tianjin Lonwin Technology Co., Ltd., Tianjin 300171, China; 4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to accurately simulate the one-dimensional hydrodynamic process, a coupled improved Kostiakov formula is proposed based on the hydrodynamic model of open channel unsteady flow. Considering that the river leakage loss is affected by the river flow and the underlying surface conditions of the river, the real flow change process under the river is simulated.

By coupling the loss model and the hydrodynamic model considering the actual river water loss, the calculated flow of the hydrodynamic model is used as the flow boundary condition of the loss model at the same time step. The loss of the time step is calculated by the loss empirical parameters a and b , and the hydrodynamic river loss parameters are corrected in real time. The accuracy of the model was tested by four measured water replenishment data from 2022 to 2024 in the Yongding River basin, and the characteristics of ecological changes in the Yongding River before and after the "23·7" flood were analyzed.

The model has good simulation accuracy in the lower reaches of the Yongding River, and has good applicability in different seasons and different basins. The minimum absolute value of the relative error is 0.004, and the maximum is 0.218, which is within the allowable range of error.

The "23·7" flood has obvious scouring effect on the Yongding River channel, and the shape of the river channel has changed significantly. The roughness of the river channel and the infiltration loss of the river channel are reduced compared with those before the flood scouring. The lower reaches of the Yongding River can realize the water supply of the whole basin with small flow before the flood scouring, which can provide a reference for the ecological water transfer in the lower reaches of the Yongding River.

Key words: dynamic loss; hydrodynamic model; simulation of water replenishment process; Kostiakov empirical formula; Yongding River