

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221805

大规模生态补水对长期断流河道永定河北京段入渗能力的影响

苟少杰^{1,2}, 仇文顺³, 李 述³, 杨默远¹, 李晓琳¹, 王 赫^{1,4}, 黎光和⁵

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 北京市水资源调度管理事务中心, 北京 100195;
4. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 5. 重庆市开州区水利局, 重庆 405400)

摘要: 针对大规模生态补水(永定河北京段4次生态补水)对长期断流河道的影响,建立了MIKE 11水动力模型,通过情景模拟分析量化评估了补水前后径流与入渗能力的变化特征。结果表明,官厅水库入库径流序列可分为天然、人类弱干扰、人类强干扰3个阶段,在2019~2020年3次生态补水期间,永定河北京段主要断面流量远大于人类强干扰阶段的生态流量;2021年秋季生态补水的渗透系数和渗漏量损失最低,表明通过连续3年的大规模生态补水,永定河的河道渗漏量明显减少;以2021年秋季生态补水为例,建立了槽蓄量与补水流量、淹没面积与补水流量、淹没面积与槽蓄量、渗透系数与补水流量的拟合函数,可为后续永定河生态补水的开展提供一定的指导。研究结果能有效指导永定河北京段生态补水方案的优化制定,为永定河流域综合治理和华北地区长期断流河道生态修复提供借鉴。

关键词: 生态补水;永定河流域;MIKE 11;渗透系数

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0035-04

1 概况

永定河是海河流域七大水系之一,流经山西、内蒙古、河北、北京、天津五省(市),处于干旱与湿润气候的过渡地带,属中纬度大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽湿润,冬季寒冷干燥^[1]。流域多年平均降雨量在370~650 mm之间,80%左右集中在汛期。永定河全长约747 km,总流域面积约 $4.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中北京段(官厅水库坝下至崔指挥营出境)全长169.7 km,流域面积3 152 km²,高程介于22.3~425.0 m之间^[2]。永定河北京段通常分为3段,其中从官厅水库至三家店为官厅山峡段,长92 km,高差340 m;三家店至南六环定水桥为平原城市河段,河道长37 km;南六环至崔指挥营出境段为平原郊野河段,长度为41 km。从官厅水库坝下至崔指挥营出境沿程主要建有珠窝水库、落坡岭水库、三家店拦河闸、卢沟桥拦河闸、滞洪水库等。永定河作为北京市的重要水源地,对北京市的生态环境和可持续发展意义重大。但近些年永定河经常

断流,地表干枯、河床沙化、植被退化等问题已严重影响其生态服务功能的发挥。为此,水利部分别于2019年春季、2020年春季、2020年秋季、2021年秋季开展了4次永定河生态补水工作,有效缓解了永定河流域缺水的紧张局面。目前对永定河生态补水的研究主要从补水量、地下水动态特征、生境质量、补水方案优化等方面进行分析比较,缺少对补水前后区域水文特征的分析与补水后河道渗漏情况的分析。因此,本文在4次生态补水的基础上,对比分析了同时段永定河生态补水前后径流的变化情况,建立了生态补水的MIKE 11水动力模型与水量平衡模型,通过率定水动力模型,进行了4次生态补水的水量平衡分析与恒定流补水分析,研究了常态化补水后河道的渗漏情况,旨在为后续永定河生态补水方案的制定与研究提供借鉴。

2 数据收集及模型构建

2.1 数据收集

官厅水库位于永定河北京段上游,是永定河

收稿日期: 2022-08-31, 修回日期: 2022-09-27

作者简介: 苟少杰(1998-),男,硕士研究生,研究方向为水资源系统工程, E-mail: 1220245100@qq.com

通讯作者: 李晓琳(1991-),女,博士、高级工程师,研究方向为水文水资源, E-mail: lxleen@outlook.com

北京段生态补水的主要水源,对整个河道的径流起调节与控制作用,雁翅、陇驾庄、三家店、卢沟桥、南六环等站点是永定河北京段的关键监测断面。因此,本文收集汇总了官厅水库 1956~2021 年入库径流数据和 2019~2021 年 4 次永定河生态补水关键断面的流量监测数据等开展研究。

2.2 MIKE 11 模型

MIKE 11HD 模型是 MIKE 软件中模拟明渠水流水动力演变特征的模块,模型构建需要收集研究区的河网数据、断面数据、边界数据与相关参数等,并在 MIKE 11、MIKE Zero 相关模块下制作模型运行时所需文件,最终基于一维恒定流圣维南方程组进行模拟,其基本方程包含连续性方程与动量方程^[3,4]:

$$\begin{cases} \partial Q / \partial x + \partial A / \partial t = q \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + \frac{\partial Q}{\partial t} + g \frac{Q |Q|}{C^2 AR} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, Q 为流量, m^3/s ; x 为距离坐标, m ; A 为过水断面面积, m^2 ; t 为时间, s ; q 为单侧入流量, m^3/s ; C 为谢才系数; R 为水力半径, m ; g 为重力加速度 m/s^2 ; h 为水位, m 。

对于式(1),HD 模型在计算时采用 Abbott 六点隐式差分格式进行离散,并通过追赶法求解^[5]。

2.3 水量平衡模型

水量平衡是定量研究水文现象的基本工具,在水文循环中表现为任一区域(或水体)、任一时段内输入水量与输出水量之差等于其蓄水量的变化量^[6]。根据该原理,水量平衡方程为:

$$W_b + W_j - W_c = W_s = \Delta W + E + R' \quad (2)$$

式中, W_b 为给定时段 Δt 河道的补水水量, m^3 ; W_j 为该时段河道的基流量, m^3 ; W_c 为该时段河道的流出水量, m^3 ; W_s 为该时段河道的损失水量, m^3 ; ΔW 为该时段河道的槽蓄水量, m^3 ; E 为该时段河道的水面蒸发量, m^3 ; R' 为该时段河道的地下水渗漏量, m^3 。

3 结果与分析

3.1 径流分析与阶段划分

通过 Mann-Kendall 趋势检验法(M-K 法),计算官厅水库入库径流序列的统计量 Z 为 -8.268 (显著性水平 0.05),表明 20 世纪 60 年代以来,官厅水库入库径流量呈减少趋势,且趋势明显;该系列最大径流量为 1967 年的 $25.56 \times 10^8 m^3$,最小径流量为 2008 年的 $0.4 \times 10^8 m^3$,径流极值比为 63.9,表明年际径流分布极不均匀。2000 年以后至生态补水前,官厅水库入库年均径流量仅为

$1.67 \times 10^8 m^3$,远不能满足下游河道正常需水,致使河道内生态流量锐减,部分河段出现若干千米的干枯、断流现象,河道内生物生存遭受严重威胁,天然径流已不能满足基本生态需求,亟需通过生态补水恢复河道水生态环境。

采用 Mann-Kendall 突变检验法、有序聚类法、Lee-Heghinian 法^[7,8] 确定官厅水库 1956~2021 年入库径流序列可能发生的变异点为 1970、1980 年。根据生态径流过程推估方法^[9],1970、1980 年两个变异点将水文序列划分为 1956~1970(天然阶段)、1971~1980(人类弱干扰阶段)、1981~2021 年(人类强干扰阶段)。

3.2 生态补水前后流量对比

永定河北京段的生态补水以官厅水库为主要水源,选取同时段官厅水库坝下历史流量过程与 2019~2021 年 4 次生态补水流量过程进行对比分析,结果见图 1。由图 1 可知,生态补水实施前,官厅水库坝下流量从天然阶段到强干扰阶段,呈逐级递减趋势,在生态补水实施后,除 2021 年秋季生态补水外,其他 3 次补水的流量均有显著增高。其中,2019 年春季生态补水平均流量为 $27.02 m^3/s$,高于人类强干扰阶段的平均流量,达到天然阶段流量的 49.9%;2020 年春季补水平均流量为 $57.04 m^3/s$,与天然阶段的平均流量基本持平;2020 年秋季生态补水平均流量为 $27.85 m^3/s$,高于同时期天然径流。由此可见,3 次连续生态补水对永定河北京段河道的生态流量有了明显恢复。2021 年秋季官厅水库下泄流量较小是由于该次补水官厅水库执行小流量方案,南水北调与小红门作为主要补水水源。

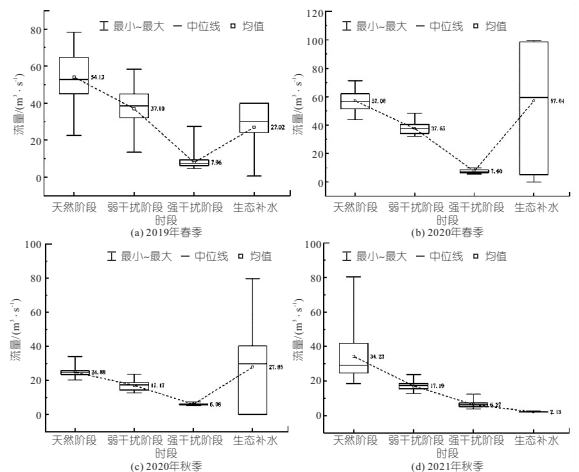


图 1 历史流量与生态补水流量对比
Fig. 1 Comparison of historical flow and ecological water supply flow

3.3 水动力模型率定

通过 MIKE 11 HD 模型对 4 次生态补水关

键断面的流量分别进行模拟,选取绝对误差、相对误差、KGE 系数^[10]、确定性系数 R^2 共 4 个判断指标来量化模拟精度。通过分析关键站点的流量率定结果及判断指标的计算结果(图 2),在生态

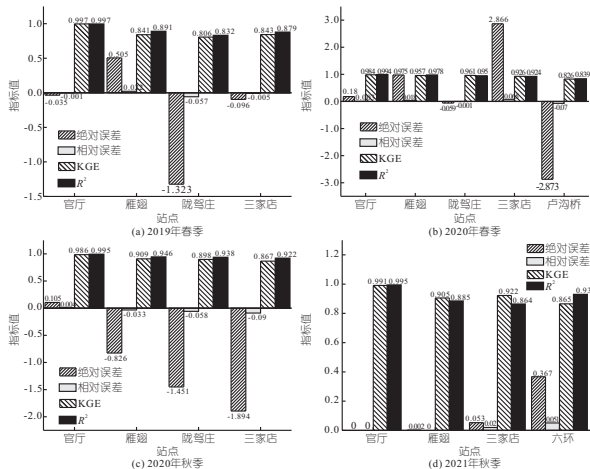


图 2 指标计算结果汇总

Fig. 2 Summary of index calculation results

补水期间,除人为进行大流量脉冲试验外,模型模拟的流量过程与实测流量过程较为吻合;由图 2 可知,4 次生态补水的 KGE 系数、 R^2 均大于 0.75,说明模型的参数值符合精度要求^[10],模拟效果良好,可用于后续生态补水计算。

3.4 水量平衡分析

为便于 4 次生态补水对比,选取 2019~2021 年生态补水期间官厅至三家店各河段水量进行统计汇总,见表 1。利用水量平衡模型对河道水量进行计算表明,4 次生态补水均满足水量平衡原理,进一步验证了水动力模型的可靠性与准确性。

3.5 生态补水期间的入渗能力对比分析

图 3 为 4 次生态补水过程中各河段的日均渗漏量占日均损失量的比例,图 4 为 4 次生态补水不同河段的渗透系数与收水率变化情况。

由图 3、4 可知:①由不同河段对比可知,4 次生态补水中,雁翅至陇驾庄段的日均渗漏量占各

表 1 四次生态补水对比分析

Tab. 1 Comparative analysis of four ecological water replenishment

补水时段	指标	官厅	官厅至雁翅	雁翅	雁翅至陇驾庄	陇驾庄	陇驾庄至三家店	三家店
2019 年春季	过水量	23 310.99		19 929.75				
	损失水量		3 381.24		903.69		1 525.77	
	蒸发量		50.49		52.98		46.72	
	槽蓄量		33.74		48.72		125.62	
	渗漏水量		3 297.01		801.99		1 353.43	
	过水量							
2020 年春季	过水量	16 497.52		16 107.56		15 678.20		13 451.54
	损失水量		389.96		429.36		2226.66	
	蒸发量		19.49		21.06		16.50	
	槽蓄量		14.03		37.54		120.86	
	渗漏水量		356.44		370.76		2 089.30	
	过水量							
2020 年秋季	过水量	6 762.85		5 926	5 709.25		4 653.38	
	损失水量		836.85		216.75		1 055.87	
	蒸发量		12.83		13.40		11.79	
	槽蓄量		0		8.44		2.99	
	渗漏水量		824.02		194.91		1 041.09	
	过水量							
2021 年秋季	过水量	2 039.55		4 382.12		4 365.68		2 587.15
	损失水量		2 739.74		229.68		58.03	
	蒸发量		397.17		246.12		1 836.56	
	槽蓄量		25.17		41.45		46.46	
	渗漏水量		12.88		31.78		134.21	
	渗漏水量		359.12		172.89		1 655.89	

注:2021 年生态补水期间各河段有天然水源补给;2020 年春季生态补水总量包括清水河补给的 $182 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

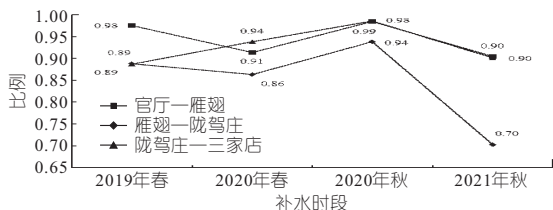


图 3 日均渗漏量与日均损失量对比
Fig. 3 Comparison of daily average leakage and daily average loss

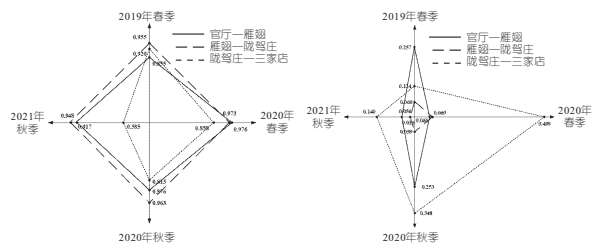


图 4 四次生态补水参数对比

Fig. 4 Comparison of four ecological water supplement parameters

河段损失量的比例均最小;由不同补水场次对比可知,4 次生态补水各河段日均渗漏量占损失量的比例均在 0.7 以上,最大可达到 0.99,进一步表明永定河北京段河道渗漏问题十分严重;从整体上看,2020 年秋季的日均渗漏量占损失量的比例最高,2021 年秋季最低。②由图 4(a)可知,官厅至雁翅段与雁翅至陇驾庄段所构成的两个四边

形,形态较稳定,各轴的顶点值相差不大,表明 4 次生态补水以上两段的收水率差别不大,2021 年秋季陇驾庄至三家店收水率偏小是由于此次生态补水时间较长,蒸发、渗漏量的总量偏大,导致收水率相对较低。由图 4(b)可知,3 个四边形中左轴各顶点的值整体小于其他顶点值,表明 2021 年

秋季生态补水各河段的渗透系数总体上小于其他 3 次。由永定河同位素示踪试验与地下水自动监测井监测试验^[11]可知,永定河河水与其周边地下水之间存在显著的水力联系,永定河生态补水可有效补给河道周边区域地下水,在生态补水实施后,河道两岸地下水均有不同程度的升幅,进一步说明随着生态补水工程的开展,永定河北京段河道的地下水水位有了明显的抬升,导致河道渗透量有降低的趋势。

3.6 恒定流情景模拟分析

在已率定模型的基础上,设置不同恒定流量补水情景,探讨 4 次生态补水官厅至三家店段补水流量、槽蓄量、淹没面积之间的关系及 4 次生态补水渗透系数与日均渗透量的变化情况。情景设计方案 1~10 官厅出库流量分别为 10、20、30、40、45、50、55、60、65、70 m³/s,其中补水量—渗透量—水位关系见图 5,补水流量—渗透系数关系见图 6。图 6 中,柱状图代表渗透系数,折线图代表日均渗透量。

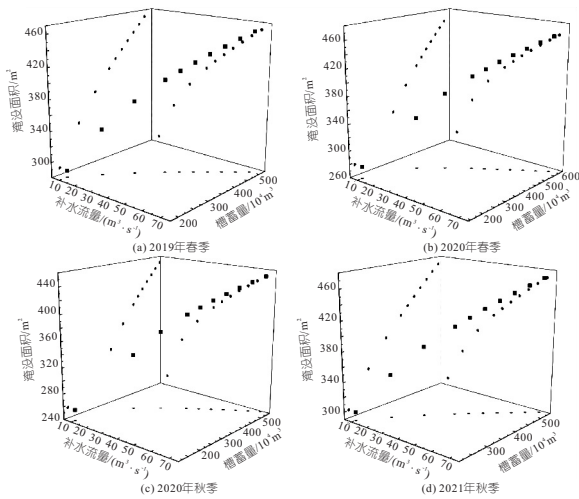


图 5 补水流量—槽蓄量—淹没面积关系曲线
Fig. 5 The relationship curve of replenishment flow-tank storage-submerged area

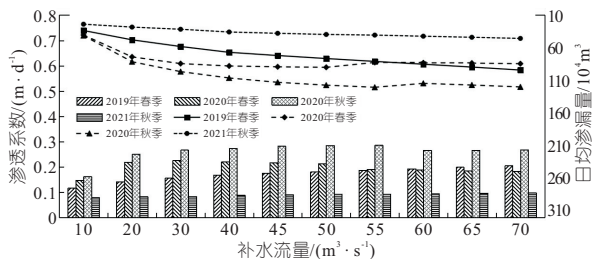


图 6 4 次生态补水渗透系数与日均渗透量汇总
Fig. 6 Summary of permeability coefficient and daily average leakage of four ecological water supplements

由图 5、6 可知:①补水流量、槽蓄量与淹没面积三者之间呈正比关系,补水流量越大,槽蓄量越大,淹没面积越大;4 次生态补水的渗透系数与日

均渗透量随补水流量的改变,呈现相同的变化趋势,其中 2021 年秋季补水的渗透系数与日均渗透量在 4 次补水中最低。②以 2021 年秋季补水为例,槽蓄量与补水流量、淹没面积与补水流量、淹没面积与槽蓄量、渗透系数与补水流量的拟合函数分别为 $Q=5.02q+186.67$ 、 $S=2.69q+291.69$ 、 $S=0.54Q+190.19$ 、 $k=0.0003q+0.0753$ 。拟合函数可为后续永定河生态补水的开展提供一定的指导,为永定河流域综合治理与生态修复探索提供技术支持。

4 结论

a. 以官厅水库为主要水源的 2019~2020 年 3 次生态补水期间,永定河北京段主要断面的流量远大于人类强干扰阶段的生态流量。

b. 2021 年秋季补水各河段渗透量占总损失量的比例最小,且在相同补水流量下,渗透系数均小于其他各次补水,表明经 3 次大规模补水后,永定河北京段的河道渗透量有了明显的减少。

c. 本文所得到的生态补水过程中槽蓄量、补水流量、淹没面积、渗透系数之间的拟合函数可为今后永定河生态补水的开展提供指导与技术支持。

参考文献:

- [1] 胡新宇,申媛媛,褚婷雯,等. 生态补水下的永定河流域地下水水位变化规律[J/OL]. 现代地质:1-15. DOI:10.19657/j.geoscience.1000-8527.2021.155.
- [2] 顾斌杰. 永定河(北京段)生态修复及其效果评价[D]. 北京:清华大学,2016.
- [3] 麻蓉. 引汉济渭秦岭输水隧洞水力、水质动态模拟分析[D]. 西安:西安理工大学,2018.
- [4] 陈鹏,黎光和,贾强,等. 潮白河生态补水的分段河道蓄水与渗漏模拟分析[J]. 北京水务,2021(6):31-36.
- [5] 衣秀勇,关春曼,果有娜,等. DHI MIKE FLOOD 洪水模拟技术应用与研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2014.
- [6] 沈冰,黄红虎,夏军,等. 水文学原理(第 2 版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [7] 王文亚. 变化环境下无定河流域水文干旱演变规律及驱动机制分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [8] 王璨,周秀平,王文圣. 窟野河洪水序列变异点综合诊断[J]. 水电能源科学,2012,30(7):50-53.
- [9] 魏健,潘兴瑶,孔刚,等. 基于生态补水的缺水河流生态修复研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):64-69,76.
- [10] 慕鹏飞. 未来气候情景对跨流域调水工程的影响与风险评价[D]. 西安:西安理工大学,2021.

后,结果精度均有所提高。使用先序遍历树结构算法将复杂河型上的断面排序,并制作计算脚本后可大幅提高计算效率,可为河道演变分析计算提供可靠的软件基础。

b. 随着实测断面与地形资料的不断积累,机器学习等人工智能方法在进一步提高槽蓄量计算结果精度上具有更大优势,不仅可为固定断面优化布设提供更多依据,也为下一步研究提供了方向。

参考文献:

[1] 白亮,王伟,原松,等. 基于断面法的长江分汊河道冲淤计算方法[J]. 人民长江,2021,52(10):7-12.

[2] 沈健,孙苏里,李振林. 断面法计算河道冲淤量方法中断面间距探讨[J]. 人民珠江,2016,37(5):60-62.

[3] 吴昌洪,姚瑶. 基于平面二维数值模拟的长江世业洲分汊河道水流特性研究[J]. 广西水利水电,2020(2):8-17.

[4] 原松,李圣伟,翁正平. DEM在三峡库尾河道演变分析中的应用[J]. 人民长江,2014(2):38-41.

[5] 魏林云,李强,谢静红. 长江下荆江监利河段乌龟洲汉道分流分沙变化及演变特征分析[J]. 水利水电快报,2021,42(2):24-30.

[6] 凌哲,罗龙洪,吕馨怡,等. 长江镇扬河段世业洲左汊口门演变分析与思考[J]. 江苏水利,2021(3):6-10,14.

[7] 金中武,任实,吴华莉,等. 三峡水库淤积排沙及河型转化规律[J]. 长江科学院院报,2020,37(10):9-15,27.

[8] 侯珺,戴巧玉. 河道冲淤量不同计算方法的结果分析[J]. 陕西水利,2021(9):83-85.

[9] 邹振华,黎炎庆,毛北平,等. 松西河水沙特性变化及冲淤响应[J]. 水电能源科学,2019,37(10):30-33,55.

[10] 陈立,崔超,袁晶,等. 长江中游典型顺直分汊河段冲刷调整的特性与机理[J]. 泥沙研究,2023,48(1):1-7.

Study on Improved Method of Calculation Model of Storage Capacity of Complex River Pattern

YUAN Song¹, SHEN Jian²

(1. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Jingjiang Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Changjiang Water Resources Commission, Jingzhou 434000, China)

Abstract: The change of channel storage capacity is an important content of river evolution analysis. In the past, the section method was mostly used for simplified calculation. However, in the complex river pattern with multistage branching or tributaries, the section method often needs to be dealt with separately, and the calculation efficiency is low. By introducing the water surface width ratio of the branching channel, optimizing the distribution of the calculated area of the section at the branching point, adding the section, estimating the storage capacity of the channel in the missing section near the tributary estuary, and using the topographic method to restore the section spacing under different water levels, the calculation model of the section method under the complex river pattern is improved. The comparison results show that the calculation accuracy of tank storage capacity is greatly improved by using the above method, which can provide a reference for batch calculation of tank storage capacity under various complex river types.

Key words: complex river types; branching channel; section spacing; channel storage capacity

(上接第 38 页)

Effect of Large-scale Ecological Water Replenishment on Infiltration Capacity of Beijing Section of Long-term Cut-off River Yongding River

GOU Shao-jie^{1,2}, QIU Wen-shun³, LI Shu³, YANG Mo-yuan¹, LI Xiao-lin¹, WANG He^{1,4}, LI Guang-he⁵

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Beijing Water Resources Management Center, Beijing 100195, China; 4. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 5. Water Conservancy Bureau of Kaizhou District, Chongqing 40400, China)

Abstract: Aiming at the impact of large-scale ecological water replenishment (four times of ecological water replenishment in Beijing section of Yongding River) on the long-term cut-off river, a MIKE 11 hydrodynamic model was established. The variation characteristics of runoff and infiltration capacity before and after water replenishment were quantitatively evaluated by scenario simulation analysis. The results show that the inflow runoff sequence of Guanting Reservoir can be divided into three stages: natural stage, human weak interference stage and human strong interference stage. During the three ecological replenishment periods from 2019 to 2020, the flow of the main section of the Beijing section of Yongding River is much larger than the ecological flow of human strong interference stage. In the autumn of 2021, the loss of permeability coefficient and leakage of ecological water supplement was the lowest, indicating that the leakage of Yongding River was significantly reduced through three consecutive years of large-scale ecological water supplement. Taking the ecological replenishment in autumn of 2021 as an example, the fitting functions of channel storage and replenishment flow, submerged area and replenishment flow, submerged area and channel storage, permeability coefficient and replenishment flow were established, which can provide some guidance for the development of ecological replenishment in Yongding River. The results of this study can effectively guide the optimization and formulation of ecological water supplement scheme in the Beijing section of the Yongding River, and provide reference for the comprehensive management of the Yongding River Basin and the exploration of ecological restoration of long-term river courses in North China.

Key words: ecologic water compensation; Yongding River basin; MIKE 11; permeability coefficient