

徐佳琪, 吴悦, 仇文顺, 等. 永定河北京段生态补水流量及模式[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(4): 669-678. XU J Q, WU Y, QIU W S, et al. Ecological water replenishment and discharge mode in Beijing section of the Yongding River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 669-678. (in Chinese)

永定河北京段生态补水流量及模式

徐佳琪¹, 吴悦¹, 仇文顺², 李述², 王梦瑶², 时洋¹, 魏加华¹

(1. 清华大学 水圈科学与水利工程全国重点实验室, 水利部水圈科学重点实验室, 北京, 100084;

2. 北京市水资源调度管理事务中心, 北京 100089)

摘要:以永定河北京段为例, 建立水文学和水力学相结合的水流演进模型, 利用生态补水实测监测数据率定并验证模型。利用建立的模型研究永定河北京段的生态补水规律及模式, 结果表明: 在持续稳定流量补水条件下, 固安(出境断面)通水后 11 d 左右达到稳定状态, 停止放水后可维持河道 12~13 d 有水; 在持续稳定流量下, 随着补水流量的增大, 河道首次贯通的时间和损失水量占比均降低, 且降低速率逐渐减缓, 官厅补水下泄流量以 30~35 m³/s 为宜; 在生态补水总水量受限条件下, 先以大流量下泄再调整为小流量的补水方式, 对快速实现全线通水、河道渗漏回补地下水等效果更佳; 平原段同步加入再生水和南水北调水, 将进一步缩短全线通水时间; 在官厅水库和平原段再生水、南水北调水向河道补水 2.24 亿~4.14 亿 m³ 条件下, 全线通水时间约需要 15 d, 固安断面出境水量约 1.05 亿~2.22 亿 m³, 蒸发和渗漏水量 1.19 亿~1.93 亿 m³, 且补水水量越大, 下渗和蒸发水量的占比越低; 卢沟桥-六环路河段的人渗能力最强。本研究对永定河北京段生态补水水量、下泄过程及补水方式的确定具有实践意义。

关键词: 永定河; 生态补水; 马斯京根; MIKE 11 HD; 水量平衡

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0066

为解决永定河河道断流、生态系统退化、地下水水位下降严重等问题, 水利部、海河水利委员会、北京市和河北省大力推进永定河流域的生态修复与环境治理, 2019 年以来开展了多次生态补水工作, 尤其是华北地区陆续开展了生态补水的尝试, 如永定河引黄生态补水、滹沱河生态补水等^[1-2]。魏健等^[3]通过环境需水量和生态需水量计算, 提出永定河官厅山峡段不同阶段河流生态修复的生态需水量, 未来 3 个典型枯水年(对应来水频率 75%、90% 和 95%)最低生态补水量分别为 4.88 亿、6.11 亿和 6.37 亿 m³; 邵慧芳等^[4]基于水量平衡模型对比分析永定河北京段不同可配置水源、不同入渗条件下的生态补水效果, 提出首次通水由官厅水库 40~70 m³/s 大流量集中补水, 首次通水后官厅水库 5~6 m³/s、平原南段分段补水, 全年 270 d 不断流; 孙冉等^[5]基于河道水力学模型量化生态补水中的损失水量, 提出

流量介于 40~80 m³/s、同时采取小流量和大流量交替补水的建议。

现阶段, 我国华北和西北地区进行生态补水, 主要是统筹安排一定的生态水量, 利用工程调节补充河道因缺水而受损的生态系统。目前已开展的生态补水多为应急补水, 规模和时间均有限, 生态补水理论和调控方法研究不多。尤其是华北平原, 南水北调东中线工程正式通水以来, 为受水区河湖复苏、地表-地下水协同修复提供了条件, 但在水资源不足、生态需水得不到充分满足的条件下, 如何合理确定生态补水过程、流量及模式, 具有重要的理论和应用价值。

本文探索开展基于河道水流贯通、地下水涵养和水生态系统指示物种用水需求下的补水流量及模式研究, 深化生态补水规律认识。2019 年之前永定河北京段常年断流, 实测径流时间序列有限, 为

收稿日期: 2023-02-23 修回日期: 2023-07-16 网络出版时间: 2023-07-19

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230718.1739.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3204600); 国家自然科学基金项目(U2243232)。

作者简介: 徐佳琪(1999—), 女, 河北唐山人, 博士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: xjq21@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者: 仇文顺(1967—), 男, 辽宁北宁人, 高级工程师, 主要从事工程管理、水资源调度管理及水务信息化研究。E-mail: 13701064834@139.com

魏加华(1971—), 男, 陕西汉中, 教授, 博士, 主要从事水资源与水信息研究。E-mail: weijiahua@tsinghua.edu.cn

了反映全河道、完整补水时期的河道水流演进规律, 指导生态补水方案编制和调度管理, 需要建立河道生态补水的水流演进模型, 以研究河道不同补水量、不同流量过程下的沿程流量水位变化规律, 解析生态补水的流量过程及出境、渗漏损失等水量去向。永定河山峡段和平原段各具特征, 资料详尽程度不一, 水文学与水力学相结合的方法具有计算效率高、基础数据需求低的特点, 且水文学与水力学模型各自具备其优势与适用性^[6]。本文利用马斯京根和一维水动力学模型, 建立适用于永定河北京段的生态补水水流演进模型, 开展补水规律研究, 以确定生态补水流量范围及补水下泄过程。

1 研究区概况

永定河贯穿北京西南部, 在北京境内的流域面积 3 110 km², 干流河道长 172 km。自官厅水库起流经官厅山峡, 进入北京市, 于三家店出山峡进入平原段, 后流入河北省廊坊市。2019—2022 年, 永定河北京段开展了 4 次生态补水(表 1)。2019 年春季首次补水为小流量“以水探路”; 2020 年两次较大流量的集中补水分别实现了“以水开路”和“以水验路”; 2022 年继续小流量、长历时补水, 完成永定河连山通海目标。目前永定河生态补水还处于探索阶段。

表 1 永定河历次补水情况

Tab. 1 Previous water replenishment situation of the Yongding River

| 补水情况 | 2019年春季 | 2020年春季 | 2020年秋季 | 2022年春季 |
|---|--------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| 补水时长/d (起止日期) | 86 (3月14日—6月7日) | 25 (4月20日—5月14日) | 19 (10月14日—11月10日) | 76 (4月10日—6月15日) |
| 官厅水库累计下泄水量/亿m ³ | 2.23 | 1.64 | 0.67 | 2.3 |
| 官厅水库下泄流量变化过程/(m ³ ·s ⁻¹) | 10-25-30-40 | 40-100 | 40-80-34-26 | 15-60-51-40 |
| 水头到达位置 | 黄良铁路桥下游 800 m | 天津武清永定河新河大桥 下游400 m | 河北廊坊固安G106国道上游 | 屈家店枢纽 |

注: “10-25-30-40”代表水库下泄流量从10 m³/s变化到25 m³/s、30 m³/s和40 m³/s, 表中“40-100”“40-80-34-26”“15-60-51-40”含义相同。

研究利用河道地形、生态补水逐日下泄流量、断面流量-水位等 2019—2022 年的实测数据, 主要流量断面包括官厅水库、雁翅(山峡段测站)、三家

店(山峡与平原分界断面)、六环路(平原段测站)、河北固安(出境断面), 固安断面作为下游水位边界, 见图 1。

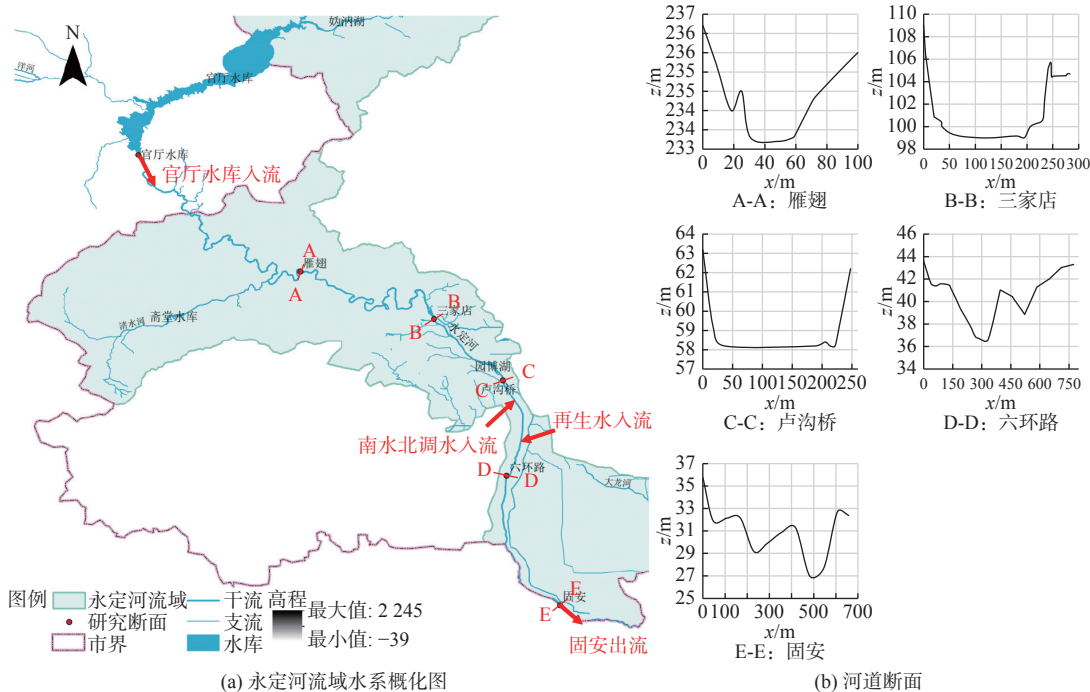


图 1 永定河流域河道研究断面概化图

Fig. 1 Schematic diagram of water system and the research section in Yongding River basin

2 研究方法与模型

2.1 研究方法

2.1.1 水文学方法

马斯京根(Muskingum)法^[7]根据上游水情推求下游的河道流量,可满足河道补水中上游水库放水后的下游断面河道流量过程演算的需要。洪水过程一般水量大、历时短,地下水补给和排泄可以忽略不计^[8],而生态补水流量小且历时长,尤其是长期干涸的河道,沿线地下水埋深大,补水过程中河水下渗回补地下水的占比较大,河道渗漏不可忽略。采用包含渗漏项的水量平衡公式,方程为

$$\frac{dW}{dt} = I - Q - q \quad (1)$$

$$q = f \times I \quad (2)$$

$$W = kQ' = k[xI + (1-x)Q] \quad (3)$$

式中: I 、 Q 分别为河段上游入流量和下游出流量, m^3/s ; q 为渗漏率, m^3/s ; f 为渗漏系数; Q' 为示储流量, m^3/s ; W 为河段的槽蓄量, m^3 ; k 为槽蓄系数; h ; x 为流量比重因子。其中, k 值等于在蓄水量 W 下稳定流状态下的河段传播时间, x 的大小反映河段的调蓄作用大小以及水面线的形状。有学者^[9]得到 $x = \frac{1}{2} - \frac{l}{2L}$, 其中 l 和 L 分别为河段的特征河长和河段长度, 据此推断 x 的取值范围为 $-0.5 \leq x \leq 0.5$ ^[10]。将水量平衡方程和槽蓄方程联立求解即可得到马斯京根流量演算的方程为

$$Q_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 Q_1 \quad (4)$$

式中: I_1 、 I_2 分别为计算时段始、末的入流量, m^3/s ; Q_1 、 Q_2 分别为计算时段始、末的出流量, m^3/s ; Δt 为计算时段长, s 。其中:

$$\begin{cases} C_0 = \frac{-kx + (1-f)\Delta t/2}{k(1-x) + \Delta t/2} \\ C_1 = \frac{kx + (1-f)\Delta t/2}{k(1-x) + \Delta t/2} \\ C_2 = \frac{k(1-x) - \Delta t/2}{k(1-x) + \Delta t/2} \end{cases} \quad (5)$$

通过遗传算法率定参数 k 、 x 、 f 的值^[11], 就能够确定 C_0 、 C_1 、 C_2 , 再代入流量演算方程, 即可由上游河道断面流量演算得到下游河道断面流量。

2.1.2 水力学方法

圣维南提出非恒定流偏微分方程, 描述一维非恒定流运动规律。圣维南方程组由连续方程以及动量守恒方程组成^[12-14]:

$$\begin{cases} B_s \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{aQ^2}{A} \right) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: B_s 为河道的断面宽度, m ; h 为河道断面水位, m ; Q 为河道断面流量, m^3/s ; t 为时间坐标, s ; x 为空间坐标, m ; q 为河道旁侧入流量, m^3/s ; A 为河道过水断面面积, m^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; K 为河道断面流量模数, $K = CA\sqrt{R}$, C 为河道断面谢才系数; R 为断面水力半径, m ; δ 为动量校正系数。

MIKE 11 HD 模型利用六点中心 Abbott-Ionescu 隐式差分法离散圣维南方程, 利用“追赶法”求解差分方程, 从而求解一维非恒定流的河道^[15-16]。计算时水位 h 和流量 Q 在同一时间步长之下交替计算, 因此计算水位 h 和计算流量 Q 无法同时在某点得到。水位点 h 布设在断面位置处, 相邻的两个计算水位点之间布设一个计算流量点 Q , 距离不一。该方法为无条件稳定, 可以节省计算时间^[17]。

2.1.3 模型精度评价方法

选用均方根误差(E_{RMS})和纳什效率系数(E_{NS})评估模型精度^[18]。 E_{RMS} 用于描述观测值和模拟值时序数据间的偏差^[19], 值越小表示模型性能越好; E_{NS} 用于评估模型的预测能力^[20], 值越接近最大值 1 模拟精度越高。 E_{RMS} 和 E_{NS} 计算公式为

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N}} \quad (7)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

式中: P_i 、 O_i 分别代表模拟值和实测值; \bar{O} 为实测值的平均值; N 为样本总数。

参考《水文情报预报规范》^[21]洪水预报精度评定采用的洪峰流量、洪峰出现时间、洪量和洪水过程等指标, 生态补水水流演进过程用峰值流量、峰值出现时间和径流量三者的相对误差 δ 评价模拟效果, δ 计算见式(9), 小于 20% 时认为是合格预报; 用流量过程确定性系数 R^2 表示预报和实测过程之间的吻合程度见式(10)。

$$\delta = \frac{P_i - O_i}{O_i} \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

2.2 河道一维水文-水力学模型构建

水文学方法模型简单且计算量小,流量仅取决于时间,忽略系统内部的不均匀性和河道水流运动规律^[22],即使没有河段的断面资料和粗糙度、比降等数据,水文学方法仍然适用。水力学方法中流量被看作是时间和空间的函数,可同时演算断面水位与流量,且能反映断面形状及糙率等河道特征的影响,演算结果更精确。因此,水文学和水力学方法之间存在准确性和复杂性之间的权衡^[23]。从应用角度看,在缺少断面资料或对演算结果要求不严格的情况下适宜选用水文学方法,在需要同时演算流量和流量数据或对演算精度要求较高的情况下适宜选用水力学方法。

永定河北京段以三家店为界。上游为山峡段,河段地形较复杂,缺乏实测的断面资料,且系统内部的水流运动过程对本研究的影响不大,采用水文学模型模拟三家店流量作为下游模型的输入;水文学模型的输入数据为 2019—2022 年永定河北京段补水的实测流量数据,采用遗传算法率定。下游为平原段,河道宽度及断面面积更大,河道特征会影响流量,采用水力学模型模拟沿程流量及水位关系。建立永定河平原段的 MIKE 11 HD 模型,输入数据为 2019—2022 年补水实测流量、水位数据,和水文学模型输出的三家店流量数据。根据河道实测地形资料确定三家店至固安的河网文件、断面文件、边界文件以及参数文件,率定其糙率系数及渗漏系数。

2.3 模型精度评价

2.3.1 马斯京根模型精度

考虑到地层岩性导致的渗漏系数差异,将永定河山峡段划分官厅水库-雁翅和雁翅-三家店两个河段建立马斯京根模型。将官厅水库和雁翅 2019—2020 年补水期(共 338 d)流量数据用作模型率定,2021—2022 年补水期流量数据用作模型验证(共 148 d)。将雁翅和三家店 2019—2021 年 11 月中旬补水期(共 186 d)流量数据用作模型率定,2021 年 11 月中旬—2022 年补水期流量数据用作模型验证(共 62 d)。官厅-雁翅段率定和验证时段的 E_{NS} 分别为 0.98 和 0.92, E_{RMS} 分别为 3.18 和 5.66; 雁翅-三

家店段率定和验证时段的 E_{NS} 分别为 0.90 和 0.89, E_{RMS} 分别为 7.90 和 6.61。这是因为雁翅-三家店段的实测数据相对较少,导致模拟结果和实测数值之间的偏差更大,精度低于官厅-雁翅段。山峡段模型实测和模拟流量过程见图 2(a)。参数组合取值见表 2。

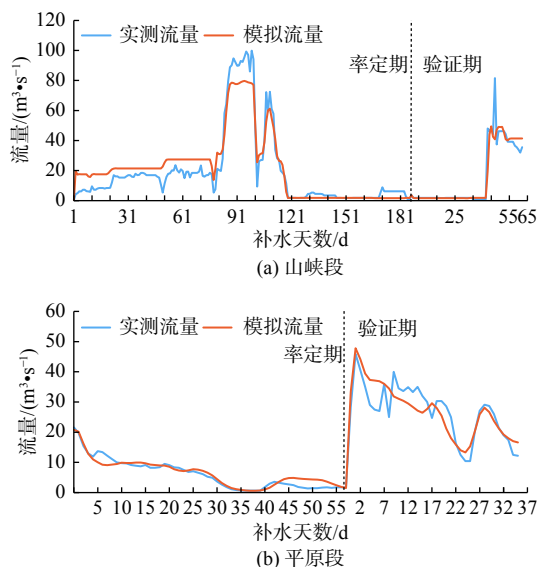


图 2 模型流量模拟效果

Fig. 2 The flow simulation effect of the model

表 2 马斯京根模型参数取值

Tab. 2 Parameter values of Muskingum model

| 参数 | x | k | f | C_0 | C_1 | C_2 |
|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 官厅-雁翅 | -0.499 | 0.327 | 0.001 | 0.669 | 0.340 | -0.010 |
| 雁翅-三家店 | -0.018 | 0.384 | 0.186 | 0.464 | 0.449 | -0.122 |

以峰值流量、峰值出现时间、径流量和流量过程评价生态补水模型的模拟效果(表 3)。在两段模型的交集模拟时间内,整个山峡段模型的峰值流量 δ 为 0.25,峰值出现时间均在同一天内;山峡段模拟的总出流量为 4.18 亿 m^3 ,实际总出流量为 3.90 亿 m^3 ,模拟出流量略大于实测,径流量 δ 为 0.07, R^2 为 0.90。认为山峡段模型峰值流量的模拟能力相对不足,对水量和流量过程模拟更精确。

表 3 永定河水流演进模型模拟精度

Tab. 3 Simulation accuracy of the Yongding River water flow evolution model

| 评价指标 | 山峡段 | 平原段 |
|-------------------|------|-------|
| 峰值流量相对误差 δ | 0.25 | -0.04 |
| 峰值出现时间误差/d | 0 | 0 |
| 径流量相对误差 δ | 0.07 | 0.02 |
| 流量过程确定性系数 R^2 | 0.90 | 0.93 |

2.3.2 MIKE 11 HD 模型精度

永定河平原段河道的入流水源除三家店外,还有再生水、南水北调中线工程向永定河平原段补水(以下简称“南水”)。将三家店流量、再生水及南水补水流量作为研究河段入流流量,固安水位作为出流断面水位用于模型率定和验证。将2021年秋季补水期(共58 d)用作模型率定,2022年春季(共36 d)用作模型验证。率定时段的 E_{NS} 为0.91, E_{RMS} 为1.51;验证时段的 E_{NS} 为0.67, E_{RMS} 为4.98。糙率三家店-六环路河段为0.20,六环路-固安河段为0.18。平原段率定及验证精度不如山峡段精度高,可能原因是实测水位数据量的限制和三家店拦河闸及卢沟桥拦河闸的人工闸门调控影响,导致出流断面的实际流量过程波动更为复杂。实测和模拟流量过程见图2(b)。

参数率定和验证时段内,平原段模型的峰值流量 δ 为-0.04,峰值出现时间在同一天内;平原段模拟的总出流量为1.17亿 m^3 ,实际总出流量为1.14亿 m^3 ,模拟出流量略大于实测,径流量 δ 为0.02, R^2 为0.93。平原段模型的预报与实测过程之间吻合程度较高,见表3。

整体上,水文学和水力学模型均能较为准确地模拟流量变化趋势及数值大小,可以准确反映补水过程及水量均衡要素,表明所建立的模型及其参数能够满足对生态补水流量过程的模拟需求。

3 生态补水规律研究

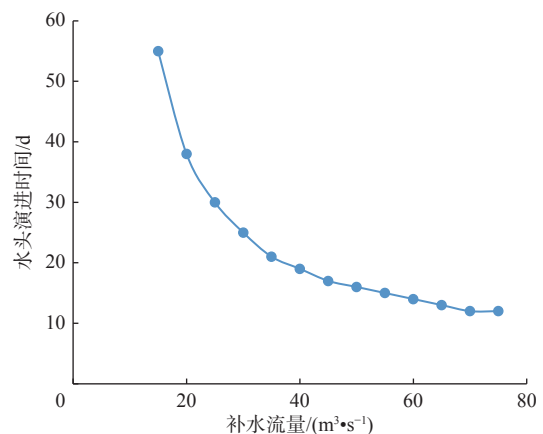
利用建立的水流演进模型,探索生态补水的流量-水头演进时间、水量损失规律,并结合研究区域实际,提出适宜的补水方式,确定生态补水适宜水量和流量过程,为今后制定永定河河道生态补水方案提供科学参考。

3.1 生态补水适宜流量

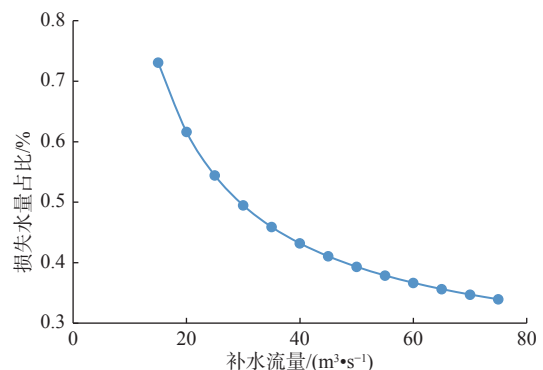
补水流量与通水时间、稳定流量、损失水量之间存在复杂的相关关系。为明确不同补水流量下的水头演进速度、损失水量占比等,模拟官厅水库不同下泄流量下的流量过程及均衡要素,绘制拟合曲线,进而选择时间和损失水量均在理想范围内的流量区间,获得适宜补水流量并推算补水周期(即一次补水自开始至终止放水所经历的时间)。水头演进时间为自官厅放水至固安断面有水流通过所用的天数(d)。损失水量包括渗漏水量、蒸发损失和槽蓄变化量,以渗漏水量为主,其中河道渗漏水

量主要回补地下水,对地下水恢复有积极意义。

在持续稳定流量下,通水后约11 d达到稳定状态。停止放水后河道将维持有水约12~13 d,之后固安断面流量将减小为0。流量与水头演进时间、达到稳定后日均损失水量占比之间的关系见图3。随着流量的增大,通水时间和损失水量占比均降低,且降低速率逐渐减缓。因此,为将北京段全线通水时间控制在较小的天数(25 d以内),同时实现有效的地下水回补(损失占比大于0.45%),将官厅补水流量控制在30~35 m^3/s 为宜。



(a) 水头演进时间随补水流量变化



(b) 损失水量占比随补水流量变化

图3 不同补水流量的补水效果

Fig. 3 Water replenishment effect of different replenishment flow

补水起止时间主要依据最适宜物候、生境的时间确定。近年来永定河通过万家寨引黄和官厅、南水以及再生水等补水,河道已经形成了局部全年有水的水生生物栖息地。河道生态补水时机应尽量满足生物繁殖对物理环境的需求。根据孙涛等的研究,淡水鱼繁殖期为4—6月,其鱼卵为半浮性卵^[24],沉入水底过久会死亡,生态补水脉冲过程使鱼卵更不容易沉底,能够提升繁殖率。另外,鸟类繁殖高峰期大约在5—7月,3—4月植物生长需水量旺盛。综合考虑动植物生长需求、河湖复苏、结冰期、汛前防洪库容预留等因素,选定生态补水以

3—6 月最佳。

3.2 补水方式

不同的流量下泄过程会导致补水效果的差异。在补水水量一定的前提下,探索不同放水方式、不同水源的补水效果,进而确定适宜的补水方式,以发挥资源的最大效用。

生态补水可以采用稳定持续流量或阶梯式流量放水。稳定持续流量补水闸控操作简便,可以稳定流量过程、稳定河道主流通流,安全性较高。阶梯

式流量补水过程通过控制下泄流量过程,脉冲驱动水头快速推进,冲淤刷槽,能提高河流-漫滩系统的动态连通性及种群多样性。研究以 d 为单位,故忽略了闸门启闭时间对流量的影响。研究设置相同补水水量下的 8 种放水方式对比,分别为持续稳定流量、波动流量、先增后减的阶梯式流量、双峰阶梯式流量、单增流量、先减后增的倒阶梯式流量、单减流量和双峰单减流量,见图 4。

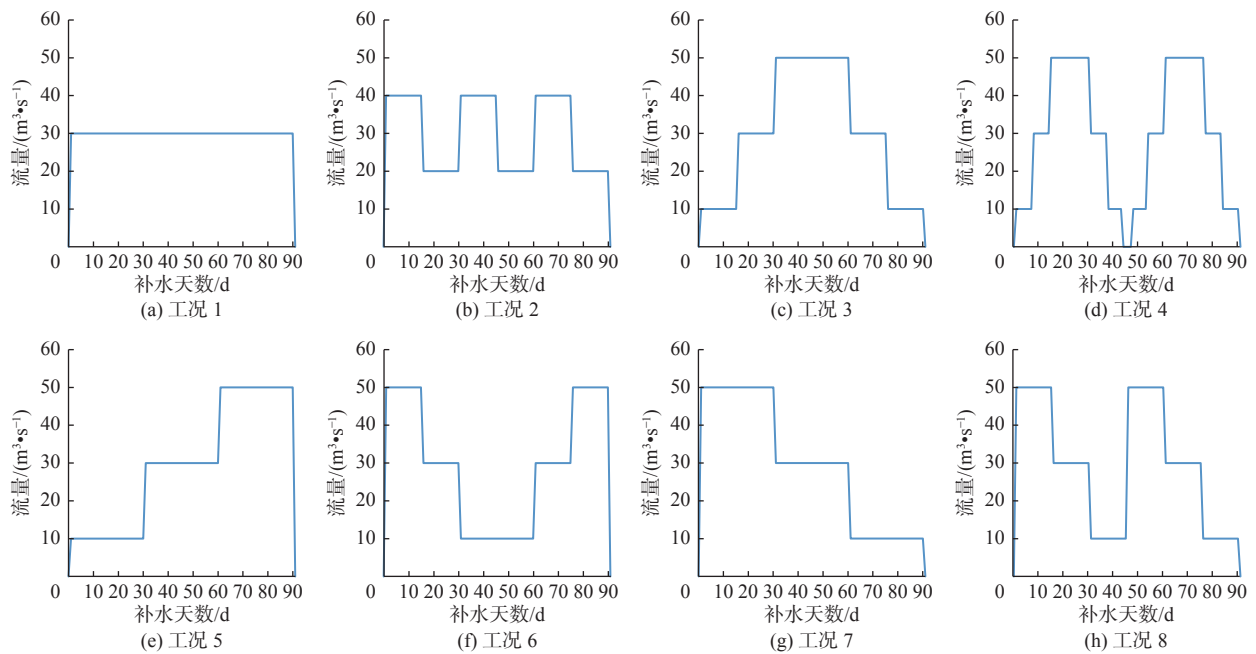


图 4 不同水库放水方式的流量过程

Fig. 4 Flow process of different reservoir discharge modes

根据模拟结果(表 4):在一定的补水水量下先以大流量放水的工况(工况 6、7、8)通水时间更快,且损失水量占比更大;小流量逐步增大的放水方式(工况 3、4、5)全线通水时间更慢,损失水量占比也更低,而持续(工况 1)或波动流量(工况 2)的效果位

于二者之间。因此,先以大流量放水在全线通水时间和地下水回补效果方面更具优势。综合考虑通水速度、地下水回补量和实际补水工作中闸门控制的难易程度,工况 7 更适合作为上游水库的放水方式。

表 4 不同补水方式下的效果

Tab. 4 Water supplement effect of different reservoir drainage methods

| 工况 | 补水方式 | 水头演进时间/d | 固安最大流量/(m³·s⁻¹) | 出流量/亿m³ | 损失水量/亿m³ | 损失水量占比/% |
|----|--------|----------|-----------------|---------|----------|----------|
| 1 | 持续稳定流量 | 25 | 15.15 | 0.90 | 1.43 | 0.61 |
| 2 | 波动流量 | 19 | 22.72 | 0.89 | 1.44 | 0.62 |
| 3 | 阶梯式流量 | 34 | 30.34 | 0.99 | 1.35 | 0.58 |
| 4 | 双峰阶梯流量 | 24 | 30.34 | 0.95 | 1.38 | 0.59 |
| 5 | 单增流量 | 46 | 30.34 | 1.02 | 1.32 | 0.56 |
| 6 | 倒阶梯式流量 | 16 | 30.34 | 0.88 | 1.45 | 0.62 |
| 7 | 单减流量 | 16 | 30.34 | 0.89 | 1.44 | 0.62 |
| 8 | 双峰单减流量 | 16 | 30.34 | 0.89 | 1.44 | 0.62 |

除官厅水库补水外,平原段卢沟桥测站以下利用再生水、南水补水见表5,在相同补水总量下,工况2中下游再生水及南水的补充可以缩短水头演进

时间,更快实现全线通水。平原南段渗漏性相对较差,水量损失较小,损失量占比显著降低。

表5 不同补水水源的补水效果
Tab. 5 Water supplement effect of different water sources

| 工况 | 补水水源 | 水头演进时间/d | 固安稳定流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 出流量/亿 m^3 | 损失水量/亿 m^3 | 损失水量占比/% |
|----|-------------|----------|---|--------------------|---------------------|----------|
| 1 | 官厅水库 | 25 | 15.15 | 0.90 | 1.43 | 0.61 |
| 2 | 官厅水库+再生水+南水 | 22 | 16.79 | 1.03 | 1.31 | 0.56 |

3.3 生态补水水量及流量过程

生态补水目标主要是补充永定河北京段关键季节的生态用水,保持河道的常态流淌,进一步涵养和提升流域内水生态环境,实现地表-地下协同修复。北京市属于水资源严重紧缺的超大型城市,水资源有限且需优先满足城市生活生产供水,实际可用于生态补水的水量并不充裕,现阶段生态补水只能是“以供定需”。在生态补水总量有限的条件下,河道补水主要受限于来水条件和可用于生态的水量。2020年降水接近偏枯水年,以2020年3—5月的官厅水库下泄水量1.76亿 m^3 作为补水下限;根据《永定河综合治理与生态修复总体方案》^[25]的测算结果,永定河三家店控制站基本生态环境需水量2.60亿 m^3 ,以此作为河道生态补水目标^[26],满足基本生态环境需水量的官厅下泄水量将作为模拟的水量上限,根据已建立的山峡段流量演进模型推算得到北京段生态补水量上限为3.26亿 m^3 。以0.3亿 m^3 作为水量变幅间隔。在总水量有限、常态化生态补水条件下,过大的下泄流量会使水流快速通过河道,补水效果欠佳,测算确定官厅水库出库流量峰值控制在60.0 m^3/s 。根据永定河地形资料,利用明渠均匀流计算公式求解谢才系数并估算安全过流流量,经验证关键断面均能满足60.0 m^3/s 的过流要求。

根据供水和生态需水情况,在来水较为丰沛的

年份还可以适当将再生水和南水用于永定河河道补水。基于当前再生水厂建设和南水北调中线水源穿永定河倒虹吸引水工程能力^[25,27],每年可向永定河补充再生水0.75亿 m^3 ,南水北调中线水源连通永定河河道的最大年供水能力约2亿 m^3 。

设计永定河北京段的河道补水情景,演绎分析可能的的水头演进时间和水量均衡效果,以及对地下水环境的影响。官厅水库下泄水量分别设置为1.76亿、2.06亿、2.36亿、2.66亿、2.96亿和3.26亿 m^3 ,按照通水快、地下水回补量大且闸门控制较为简便的单减流量放水方式补水,补水周期按照适宜流量计算。同时平原段加入2.38 m^3/s 再生水与6.34 m^3/s 南水持续流量补水。

上述情景模拟的结果见表6和图5。全线通水时间均为15d左右,停止补水后的维持有水时间为12~14d。三家店、卢沟桥、六环路和固安断面可能产生的最大流量为36.66、31.90、36.20和33.02 m^3/s 。总补水水量2.24亿~4.14亿 m^3 ,出流量在1.05亿~2.22亿 m^3 ,损失水量1.19亿~1.93亿 m^3 。随着补水水量的增大,损失水量在总补水水量中的占比降低,总补水水量2.24亿 m^3 时占比最大(0.53%)。忽略槽蓄变化,约1.19亿 m^3 水量回补地下和蒸发。总补水水量4.14亿 m^3 时损失占比最小(0.47%)。

表6 不同补水情景模拟结果
Tab. 6 Simulation results of water supplement scenario

| 工况 | 官厅补水水量/亿 m^3 | 总补水水量/亿 m^3 | 补水周期/d | 流量变化过程($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) | 水头演进时间/d | 出流量/亿 m^3 | 损失水量/亿 m^3 | 损失水量占比/% |
|----|-----------------------|----------------------|--------|--|----------|--------------------|---------------------|----------|
| 1 | 1.76 | 2.24 | 63 | 42.3-32.3-22.3 | 15 | 1.05 | 1.19 | 0.53 |
| 2 | 2.06 | 2.62 | 73 | 42.7-32.7-22.7 | 15 | 1.28 | 1.33 | 0.51 |
| 3 | 2.36 | 3.00 | 84 | 42.5-32.5-22.5 | 15 | 1.52 | 1.48 | 0.49 |
| 4 | 2.66 | 3.38 | 95 | 42.4-32.4-22.4 | 15 | 1.75 | 1.63 | 0.48 |
| 5 | 2.96 | 3.76 | 105 | 42.6-32.6-22.6 | 15 | 1.98 | 1.78 | 0.47 |
| 6 | 3.26 | 4.14 | 116 | 42.5-32.5-22.5 | 15 | 2.22 | 1.93 | 0.47 |

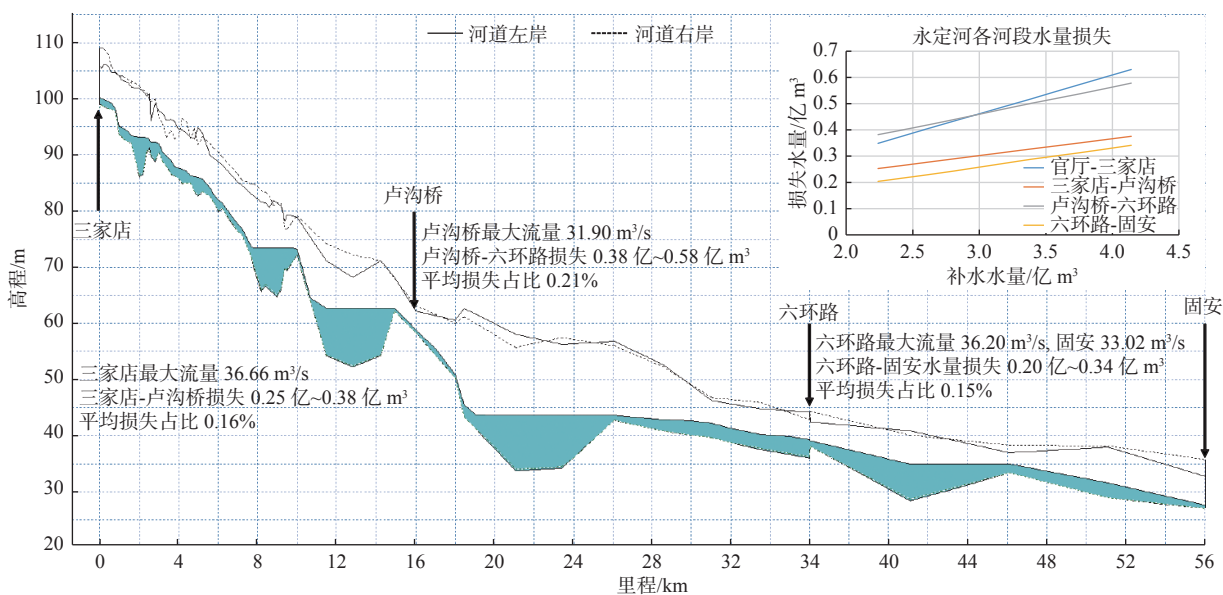


图 5 永定河平原段纵剖面及各河段水量损失

Fig. 5 Longitudinal section of the Yongding River plain section and water loss of each section

山峡段的平均损失水量约 0.49 亿 m^3 , 占比 0.20% , 单位 km 的损失水量为 456 m^3 。平原段的河道高程及补水稳定状态下的水位纵剖面见图 5, 三家店-卢沟桥段、卢沟桥-六环路段和六环路-固安段的平均损失水量占比分别为 0.16% 、 0.21% 和 0.15% , 卢沟桥-六环路段水量回补至地下的能力最强, 平均损失水量为 0.31 亿 m^3 , 每公里损失 2400 m^3 。

4 结论

以永定河北京段生态补水为研究对象, 建立了水文学和水力学耦合的生态补水水流演进模型, 利用 2019—2022 年实测补水数据率定并验证模型。统计分析生态补水沿程变化规律, 探讨适宜的补水流量范围、过程、方式及补水水量, 主要结论如下:

建立的永定河山峡段马斯京根模型和平原段一维水动力学模型均能准确反映流量变化趋势及数值大小。山峡段在率定和验证期的 E_{NS} 均大于 0.89 ; 平原段在验证期的 E_{NS} 为 0.67 , 可能与实测水位数据量的限制和河道闸门人工调控影响有关。山峡段模型峰值流量的模拟能力相对不足 ($\delta=0.25$), 对水量和流量过程的模拟更精确 ($R^2=0.90$)。平原段模型预报与实测过程之间的吻合程度较高 ($R^2=0.93$)。

以水头演进时间和地下水回补量作为考察指标, 确定了适宜的流量范围。在持续流量下, 固安断面通水后 11 d 左右达到稳定状态, 停止放水后河道将

继续维持有水约 $12\sim 13 \text{ d}$ 。随着流量增大, 通水时间和损失水量占比均降低, 且降低速率逐渐减缓。为将北京段全线通水时间控制在 25 d 内, 且损失占比大于 0.45% 以实现有效的地下水回补, 可将官厅补水流量控制在 $30\sim 35 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

先大流量下泄再稳定到小流量补水的方式, 在全线贯通时间、地下水回补效果等方面更具优势。具体而言: 先以大流量补水再逐步降低的方式全线通水速度更快, 损失水量占比更大, 其次为持续或波动流量; 先以小流量补水再逐步增大的补水方式需要更长的时间通水, 损失水量占比也更低。

在水利工程及河道过流能力允许, 且符合生态可供水量和物候特征条件下, 确定永定河北京段河道生态补水以 3—6 月为宜, 官厅水库出库水量为 $1.76 \text{ 亿}\sim 3.26 \text{ 亿 m}^3$, 出库流量峰值不超过 $60.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。再生水和南水北调中线工程每年分别可向永定河河道提供 0.75 亿 和 2 亿 m^3 。以 0.3 亿 m^3 为间隔, 按照通水快、地下水回补量大的单减流量放水方式补水, 同时平原段加入再生水与南水, 模拟 6 种情景下的补水效果。全线通水时间为 15 d 左右, 且补水水量越大, 下渗和蒸发水量在总补水水量中的占比越低, 卢沟桥-六环路段水量回补至地下的能力最强。

参考文献:

- [1] 陈利者, 于洋. 2019—2020 年永定河流域生态水量调度综述[C]. 2021 第九届中国水生态大会, 2021: 64-71. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2021.024666](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2021.024666)

- [2] 王哲,付宇,朱静思,等.华北典型河道地下水回补效果评价[J].*吉林大学学报(地球科学版)*, 2021, 51(3): 843-853. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.2020078.
- [3] 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. DOI: CNKI:SUN:XBSZ.0.2020-01-010.
- [4] 邵惠芳,刘军梅,刘培斌,等.永定河北京段生态补水调配方案研究[J].*水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(7): 62-72. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.07.007.
- [5] 孙冉,潘兴瑶,王俊文,等.永定河(北京段)河道生态补水效益分析与方案评估[J].*中国农村水利水电*, 2021(6): 19-24. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.06.004.
- [6] 江春波,周琦,申言霞,等.山区流域洪涝预报水文与水动力耦合模型研究进展[J].*水利学报*, 2021, 52(10): 1137-1150. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210003.
- [7] MCCARTHY F D. Aboriginal relics and their preservation[J]. *Mankind*, 1938, 2(5): 120-126. DOI: 10.1111/j.1835-9310.1938.tb00948.x.
- [8] COLLINS S L, CHRISTELIS V, JACKSON C R, et al. Towards integrated flood inundation modelling in groundwater-dominated catchments[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591(4): 125755. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125755.
- [9] 庄一鸿,林三益.水文预报[M].北京:水利电力出版社,1986.
- [10] 李匡,付力,胡宇丰,等.马斯京根法参数C₀、C₁、C₂取值范围的确定[J].*南水北调与水利科技*, 2012, 10(5): 43-45,55. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.05043.
- [11] NOROUZI H, BAZARGAN J. Calculation of water depth during flood in rivers using linear Muskingum method and particle swarm optimization (PSO) algorithm[J]. *Water Resources Management*, 2022, 36(11): 4343-4361. DOI: 10.1007/S11269-022-03257-3.
- [12] KUMAR D N, BALIARSINGH F, RAJU K S. Extended Muskingum method for flood routing[J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2011, 5(2): 127-135. DOI: 10.1016/j.jher.2010.08.003.
- [13] 修海峰,吴联志.基于MIKE II的平原河网洪水演进水动力研究[J].*南水北调与水利科技*, 2012, 10(6): 151-154. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.06151.
- [14] 李雁鹏,吴玮,张如锋,等.MIKE11模型在河道生态修复方案优选中的应用[J].*水电能源科学*, 2019, 37(11): 41-45. DOI: CNKI:SUN:SDNY.0.2019-11-010.
- [15] 肖扬帆,周曼,胡挺,等.基于MIKE11的三峡库区洪水演进模拟及洪水传播规律研究[J].*水电能源科学*, 2022, 40(10): 74-77,194. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20212203.
- [16] 王领元.丹麦MIKE11水动力模块在河网模拟计算中的应用研究[J].*中国水运(学术版)*, 2007(2): 106-107. DOI: CNKI:SUN:SYZB.0.2007-02-043.
- [17] 吴天蛟,杨汉波,李哲,等.基于MIKE11的三峡库区洪水演进模拟[J].*水力发电学报*, 2014, 33(2): 51-57. DOI: CNKI:SUN:SFXB.0.2014-02-009.
- [18] HAN H, MORRISON R R. Improved runoff forecasting performance through error predictions using a deep-learning approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 608: 127653. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127653.
- [19] ZHAO X, WANG S X, LI T. Review of evaluation criteria and main methods of wind power forecasting[J]. *Energy Procedia*, 2011, 12: 761-769. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.10.102.
- [20] HU L T, XU Z X, HUANG W D. Development of a river-groundwater interaction model and its application to a catchment in northwestern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 483-500. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.10.028.
- [21] 中华人民共和国水利部.水文情报预报规范:GB/T 22482—2008[S].北京:中国标准出版社.
- [22] 杨甜甜,梁国华,何斌,等.基于水文水动力学耦合的洪水预报模型研究及应用[J].*南水北调与水利科技*, 2017, 15(1): 72-78. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2017.01.013.
- [23] NIAZKAR M, ZAKWAN M. Parameter estimation of a new four-parameter Muskingum flood routing model[J]. *Computers in Earth and Environmental Sciences*, 2022: 337-349. DOI: 10.1016/B978-0-323-89861-4.00005-1. DOI: 10.1016/B978-0-323-89861-4.00005-1
- [24] 孙涛,杨志峰.基于生态目标的河道生态环境需水量计算[J].*环境科学*, 2005(5): 43-48. DOI: 10.13227/j.hjxk.2005.05.009.
- [25] 中华人民共和国国家发展和改革委员会,中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家林业局.永定河综合治理与生态修复总体方案[Z], 2016.
- [26] 党晓戈,王世岩,刘畅,等.基于MIKE11闸坝联合调控的北运河生态流量保障模拟[J].*中国农村水利水电*, 2021(7): 94-100. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.07.015.
- [27] 张君伟,万超,杜国志,等.永定河生态用水保障机制研究[J].*北京水务*, 2020(5): 1-4. DOI: 10.19671/j.1673-4637.2020.05.001.

Ecological water replenishment and discharge mode in Beijing section of the Yongding River

XU Jiaqi¹, WU Yue¹, QIU Wenshun², LI Shu², WANG Mengyao², SHI Yang¹, WEI Jiahua¹

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Key Laboratory of Hydrosphere Sciences of the Ministry of Water Resources, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Water Resources Dispatching Management Center, Beijing Water Authority, Beijing 100089, China)

Abstract: Ecological water replenishment (EWR) is an important way for river and lake recovery, ecological restoration, and river function maintenance. Attempts have been made to replenish ecological water, such as transferring water from the Yellow River to the Yongding River (YDR) and transferring water from the Yangtze River to the Hutuo River. However, in the arid area of northern China, the river has water only for a limited time. The runoff characteristics in the process of EWR have great uncertainty. Therefore, it is important to study the EWR law and water discharge mode under the limited ecological water supply.

A one-dimensional flow evolution model based on the Muskingum method and the Saint-Venant equation group was established by taking Beijing section of the YDR as an example. The impact of complex terrain conditions could be avoided in the modeling of the mountain gorge section, and the flow process changes caused by the river channel characteristics in the plain section could be fully reflected. The measured EWR monitoring data were used to calibrate and verify the model to accurately reflect the flow change and the water quantity balance.

The results show that: (1) Under the mode of continuous and stable flow replenishment, the water supply in Gu'an (exit section) reaches a stable state in about 11 d, and may continue to maintain water for about 12-13 d after the water discharge was stopped. (2) With the increase of the flow rate, the duration of the river with water and the proportion of water loss decreased, and the rate of decrease gradually slow down. The optimal EWR flow was 30-35 m³/s. (3) The total amount of EWR was limited, and water release with a large flow first was more advantageous in terms of the whole line water supply time and groundwater leakage effect. (4) Adding reclaimed water and water from South-to-North Water Transfers Project (SNWTP) in the plain section may further shorten the water supply time. (5) Assessing the ecological water supply capacity of the Guanting Reservoir, reclaimed water, and water from SNWTP, the designed water supply is in the range of 2.24×10^8 - 4.14×10^8 m³. The whole line of the Beijing section of the YDR will be open to water for about 15 d, with an outflow of 1.05×10^8 - 2.22×10^8 m³, groundwater recharge, and evaporation of 1.19×10^8 - 1.93×10^8 m³. The larger the amount of EWR water, the lower the proportion of infiltration and evaporation water. The Lugouqiao - Liuhuanlu section had the strongest infiltration capacity.

This study has practical significance for the determination of EWR quantity, discharge process, and water discharge mode of Beijing section of the YDR. The E_{NS} of simulated and measured data suggests that the model can accurately reflect the flow change and the water quantity balance. It shows that with the increase of the flow, the water supply time and the proportion of water loss decrease, and the optimal flow range of Guanting Reservoir is 30-35 m³/s. The water supply mode of first discharging a large flow and then stabilizing to a small flow has the advantages of fast water flow, large amount of groundwater recharge, and simple gate control, which is a suitable discharge mode for the EWR in river courses.

Key words: Yongding River; ecological water replenishment; Muskingum; MIKE 11 HD; water balance