

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0038

李志强,王亚娟,温子希,等.潮白河春季生态补水及地下水响应[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(2):375-384. LI Z Q, WANG Y J, WEN Z X, et al. Ecological water replenishment and groundwater response in Chaobai River in spring[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(2): 375-384. (in Chinese)

潮白河春季生态补水及地下水响应

李志强¹,王亚娟²,温子希²,张秋兰¹,崔亚莉¹,张琳琳¹,
杨国军²,张莉娜²,刘翠珠²,董鹤²

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083;2. 北京市水文总站,北京 100089)

摘要:以2021年春季潮白河生态补水为研究基础,利用GMS-Ugrid模块构建非结构地下水流模型,评价生态补水效果和地下水响应。潮白河生态补水总量(至2021年5月27日)为2.06亿m³,补水入渗量为1.57亿m³(约占76%)。补水后1个月内,研究区第一含水层系统储存量增加了1.49亿m³;以水位0为影响范围分界线,补水影响面积达到842.8 km²。距河道不同位置观测井滞后响应时间也不同,离河道3 km观测井水位抬升明显,滞后响应时间较短(3~6 d);远离河道地下水响应的滞后性明显,离河道6 km观测井滞后响应时间较长(18~30 d)。

关键词:生态补水;潮白河;影响范围;滞后响应

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



地下水资源是水资源的重要组成部分。对于北京而言,地下水资源既是首都发展的基础性资源,更是北京市发展的战略资源和重要保障^[1-4]。潮白河冲洪积扇中上游地区是北京市地下水资源最丰富的地区,在城市供水中占据了重要地位。由于多年连续超采,地下水位持续下降^[5-8]。2014年12月南水北调中线工程正式通水,截至2021年3月已累计向北京供水超过62亿m³,在缓解北京市供水紧张局面的同时,也为地下水的涵养提供了契机^[9-11],2015年通过小中河向怀河及潮白河牛栏山地区补水,通过北上台及大水峪水库对潮白河地区进行试验性补水,共引水3700多万m³;2016—2019年均通过南水北调中线工程引水及水库放水对潮白河流域进行补水。为贯彻落实京津冀协同发展战略,深入落实北京城市总体规划,大力推进北京市委市政府“用生态的方法解决生态的问题”、积极推进“藏水于地”的部署要求,2021年春季对潮白河实

施了1个月试验性生态补水,本文即基于此次生态补水展开相关研究。

南水北调水进京后,在满足居民生活基本用水的情况下,按照“喝、存、补”的原则,部分来水通过水库放水、自然河道补水的方式对水源地进行回补。补水后地下水水位、水量、水质各方面对生态补水动态响应的研究成为关注重点。比如:永定河生态补水工程中,李海军等^[12]和汤万龙等^[13]利用监测数据分析补水期间水位、水质的变化,运用水均衡法分析生态补水对地下水储存量的影响;胡立堂等^[14]对永定河补水后地下水动态变化和补水滞后性进行分析,划分了观测孔地下水动态类型,为补水方案提供参考;霍丽涛等^[15]则以2015—2016年潮白河调水回补地下水为例,分析了观测孔水位变化和水质变化。除了利用监测数据分析补水对地下水的影响外,学者们还通过建立模型的手段对补水动态响应进行研究,其中:朱冰等^[16]、彭

收稿日期:2021-08-05 修回日期:2021-10-22 网络出版时间:2021-11-05

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.tv.20211104.1215.004.html

基金项目:国家科技基础资源调查专项(2017FY100405)

作者简介:李志强(1995—),男,湖南郴州人,主要从事水资源评价研究。E-mail:lizhiq@cugb.edu.cn

通信作者:崔亚莉(1962—),女,北京人,教授,博士,主要从事水资源评价、数值模拟等研究。E-mail:cuiyl@cugb.edu.cn

勃等^[17]和刘波等^[18]采用 Visual Modflow 软件构建黄河三角洲地下水数值模型,模拟分析湿地生态恢复区生态补水对地下水的影响;Sun 等^[19]基于人工神经网络等机器学习建立地下水模型预测了永定河补水入渗条件下地下水位变化。可见构建地下水数值模型能较好地实现对地下水动态的模拟,有利于分析生态补水效果。GMS 是由多种模块构成的一款可视化地下水数值模拟软件,处理功能强大,适用范围广泛,是使用最多的地下水模拟平台之一^[20-21]。本文采用 GMS 软件构建潮白河流域地下水数值模型,模拟分析地下水对 2021 年春季潮白河生态补水的动态响应,以期科学实施生态

补水工程提供参考。

1 研究区概况

研究区位于北京市东北部,包括密云、怀柔、顺义 3 个区县的部分平原区,研究范围及边界条件见图 1,总体地形西北高、东南低,地面由北向南倾斜。研究区属温带大陆性半湿润季风气候,多年平均气温为 11.7℃,日极端最高气温可达 41.3℃,日极端最低气温可低至 -23.3℃。年均(2000—2020 年)降水量为 542.58 mm,见图 2,全年降水最多的月份为 6—9 月,降水量占年降水总量的 82%以上。

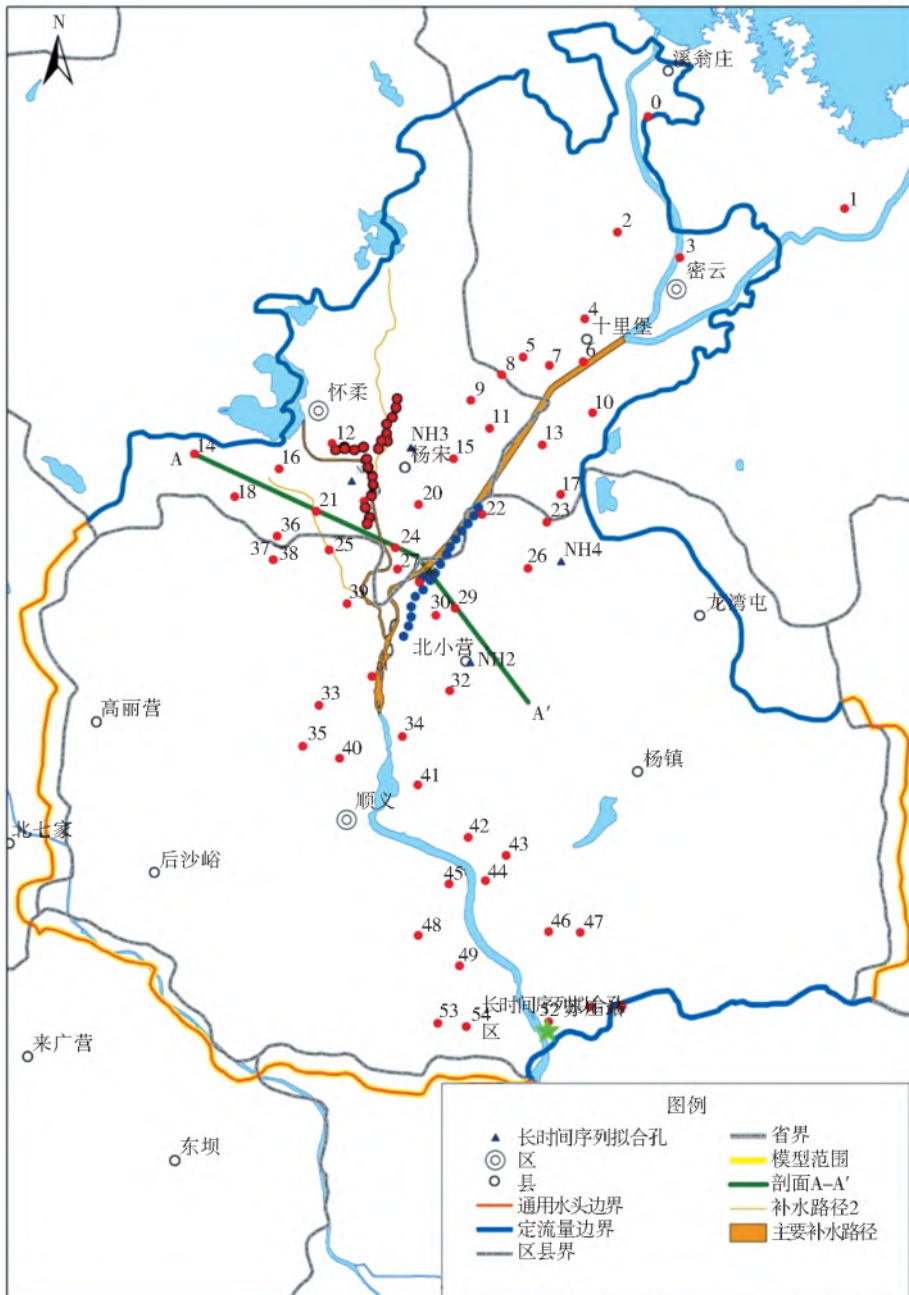


图 1 研究区范围及边界条件

Fig. 1 Study area and boundary condition

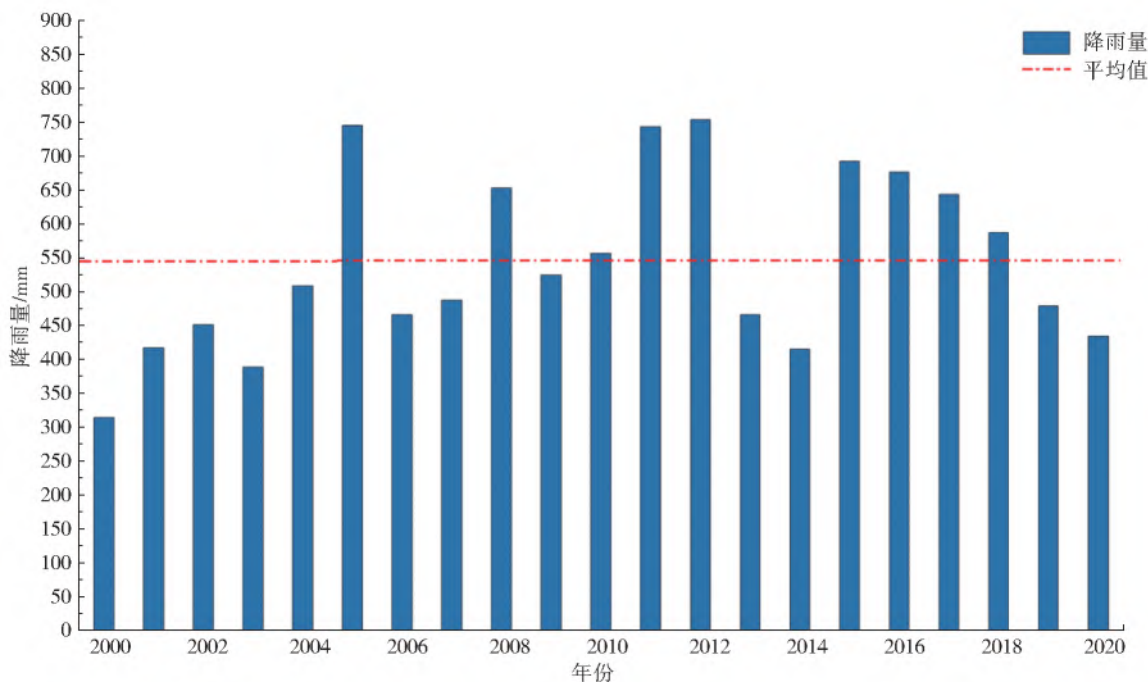


图2 2000年至2020年苏庄站降雨量

Fig. 2 Rainfall at Suzhuang station from 2000 to 2020

研究区内主要水系为潮白河水系。上游为潮河和白河。白河发源于河北省沽源县,流经赤城县,进入北京境内,由延庆、怀柔汇入密云水库;潮河发源于河北省丰宁县,经滦平、密云注入密云水库。潮河、白河出库后在密云县河槽村汇合为潮白河^[22]。根据前人研究成果^[23],依据地貌单元、地层沉积环境、地下水的赋存条件以及水力联系等特征,研究区属于潮白河地下水子系统,在平原区以及山间沟谷地带普遍分布有第四系松散沉积物,主要特征为北薄南厚,东薄西厚;颗粒从北向南由粗变细;层次也由单一到多层。根据地下水埋藏条件、水动力特征和水质特征,以及该区水文地质和开采利用条件,把第四系松散沉积岩类细分为单一结构的砂卵砾石层、2~3层结构的砂卵砾石层、多层结构的砂砾石层夹少量砂层。

2 数据及研究方法

2.1 数据基础

地下水模型构建主要需要钻孔资料、补给项、排泄项和模型校准数据等。为构建长时间序列地下水模型,主要数据如下。

收集研究区 DEM 高程数据、100 个钻孔资料和 5 条剖面,结合开采层位选取相对稳定厚度较大的隔水层顶板作为分层界线来确定主要含水层的顶底板标高。

含水介质参数和水文地质参数初值根据抽水试验、相关水文地质报告及前人研究成果^[23]确定。

密云、怀柔、顺义 3 区县的气象站 2000—2020 年日尺度降雨量数据。

密云、怀柔、顺义 3 区县 2000—2020 年工业、生活、农业年开采量;怀柔应急水源地、水源八厂、潮-怀应急水源地等集中水源地开采量。

密云、怀柔、顺义 3 区县内长观孔位置及 2000—2020 年逐月水位埋深。补水期间(2021 年 4 月 30 日—5 月 27 日)监测井日尺度地下水位监测数据。

南水北调 2015—2021 年补水路径及补水具体情况数据。

数据主要来源为北京市水文总站,其他未说明数据均采用前人研究数据^[23]。

2.2 研究方法

2.2.1 模型原理

GMS(groundwater modeling simulation)软件是国内外常用的地下水流模拟软件,其包含的 MODFLOW 程序,是基于有限差分法刻画地下水流运动规律的计算机程序。此程序具体求解方法是通过把研究区域进行空间和时间上的离散,建立每个网格单元的水均衡方程式,所有网格单元的方程联立成大型的线性方程组,耦合初始条件及边界条件后,迭代求解方程组即可求得每个网格单元的水头值。GMS 10.0 版本以后,嵌入了 MODFLOW-USG(MODFLOW-Unstructured Grid)程序,该程序基于体积有限差分法对网格进行剖分^[24-25]。区别

于以往剖分方式,MODFLOW-USG 程序对单元格的定义不再局限于行、列、层,剖分方式更加灵活多变,可以使用任何类型的网格,即剖分时具有任意的面和节点的单元格,这种特性可以使得尖灭等地质特征进行更真实建模,这也促使在进行网格剖分时可以对重点关注区域(如河道、集中水源地)进行局部加密处理。

2.2.2 模型建立

根据对研究区水文地质等条件的分析,确定模拟范围为北起密云水库山前一线,南至顺义区苏庄;东西界限为顺义行政区划界限各外推约 1 km²。模型总面积约 1 440 km²。

研究区北、西北、东北 3 个方向接受山区侧向补给,为自然边界,边界流入量根据资料确定;南部与平原区接壤,与平原区的地下水发生水量交换,为通用水头边界,边界流入流出量根据模型通用水头包计算得到。潜水面为该模型的上边界,地下水通过此边界得到降水入渗补给、山前侧向补给、河水渗漏补给、灌溉回归入渗补给、渠系管网等入渗补给、生态补水等。模型的底边界为基岩,故将其看作不透水边界。

此次模型网格加密方法选择的二叉树网格剖分,对补水河道、重点关注的水源八厂、怀柔应急水源地等地进行了加密。其中,基础网格为 200 m×200 m,细化网格 100 m×100 m。空间上将模型分为四层:第一层为潜水含水层;其他层为承压水含水层。模型期为 2000 年 1 月至 2020 年 12 月,以 1 个月为 1 个应力期,共 252 个应力期;选择 2000 年 1 月至 2011 年 12 月为模型识别期,2012 年 1 月至 2020 年 12 月作为模型验证期,以 2000 年 1 月流场作为初始流场,建立长时间序列地下水流模型。

模型中面状补给项包括降雨入渗补给和灌溉回归渗漏补给,面状排泄项包括蒸发和部分人工开采(如工业、生活、农业开采)。降雨入渗补给根据每个降雨入渗分区把降雨量处理成为降雨强度,降雨入渗分区依据降雨入渗系数不同划分,利用 RCH(recharge)程序包处理输入模型。蒸发项则将蒸发量处理为蒸发强度,用 EVT(evapotranspiration)程序包处理输入模型。渗漏补给和部分人工开采则以注水井或抽水井的形式将数据处理成相应格式用井(Well)程序包输入模型。线状的补排项主要有山前侧向补给量、南水北调补给水量和部分通用水头边界流入流出量,如山前侧向补给量主要应用达西(Darcy)定律计算得到每个网格的补给量,应用 ArcGIS 将数据拓扑到相应位置网格中心点上,并计算转换成单个网格上的井流量,利用 Well 模块处

理。通用水头边界的流入流出量根据 Darcy 定律和流场形态,通过 GHB(general head boundary)程序包计算得出后代入模型。

2.2.3 识别及验证

利用同时期的地下水流场或者长观孔历时曲线来拟合模拟水位,识别地下水流模型中水文地质参数、边界值和其他源汇项,使模型愈加符合研究区的水文地质条件,以便更精确地定量研究模拟区的补给与排泄,预报给定水资源开发利用方案下的地下水位变化。利用区内 4 个长时间序列观测孔对地下水流模型进行参数率定,模型主要参数率定结果见表 1。选取国内外研究常用的评价因子决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)作为评价模型参数优化的评价标准。 R^2 越接近 1,表明模拟值越接近实测值,模拟效果越好;RMSE 则反映了模型的模拟值与真实观测值的接近程度^[26]。模型验证结果(图 3)显示:4 个观测孔决定系数范围为 0.93~0.97;NH₁、NH₂、NH₃ 三孔的 RMSE 范围为 3.19~3.78,另一个孔的 RMSE 为 6.97,受开采和边界流入量影响,数值偏大。评价因子 R^2 和 RMSE 值表明模型源汇项、参数基本合理,验证了模型的可靠性,模型可以用于生态补水过程分析。

表 1 模型主要参数率定结果

Tab. 1 Calibration results of main parameters of model

参数类型	取值范围
降雨入渗补给系数	0.14~0.65
潜水含水层水平渗透系数/(m·d ⁻¹)	5~150
给水度	0.05~0.24
承压含水层水平渗透系数/(m·d ⁻¹)	10~150
储水率	$2 \times 10^{-7} \sim 1.8 \times 10^{-6}$

3 潮白河流域生态补水的模型应用

3.1 潮白河春季生态补水概况

潮白河流域试验性补水在 2014 年底开始实施,利用“密云水库调蓄工程”,在汛期通过小中河向怀河及潮白河牛栏山地区补水,通过北上台水库和大水峪水库向潮白河地区补水。2018 年 9 月,南水引水及水库放水累计引水量达到 4.56 亿 m³;截至 2019 年 9 月,南水引水及水库放水累计引水量超过 5.7 亿 m³。2021 年 4 月 30 日起,潮白河流域实施 22 年来的首次较大规模试验性补水,主要通过白河、潮河、雁栖河、怀河、小中河向白河干流集中补水,计划补水总量达到 2.4 亿 m³。截至 2021 年 5 月 27 日,累计出库及南水北调放水总量达 2.06 亿 m³。

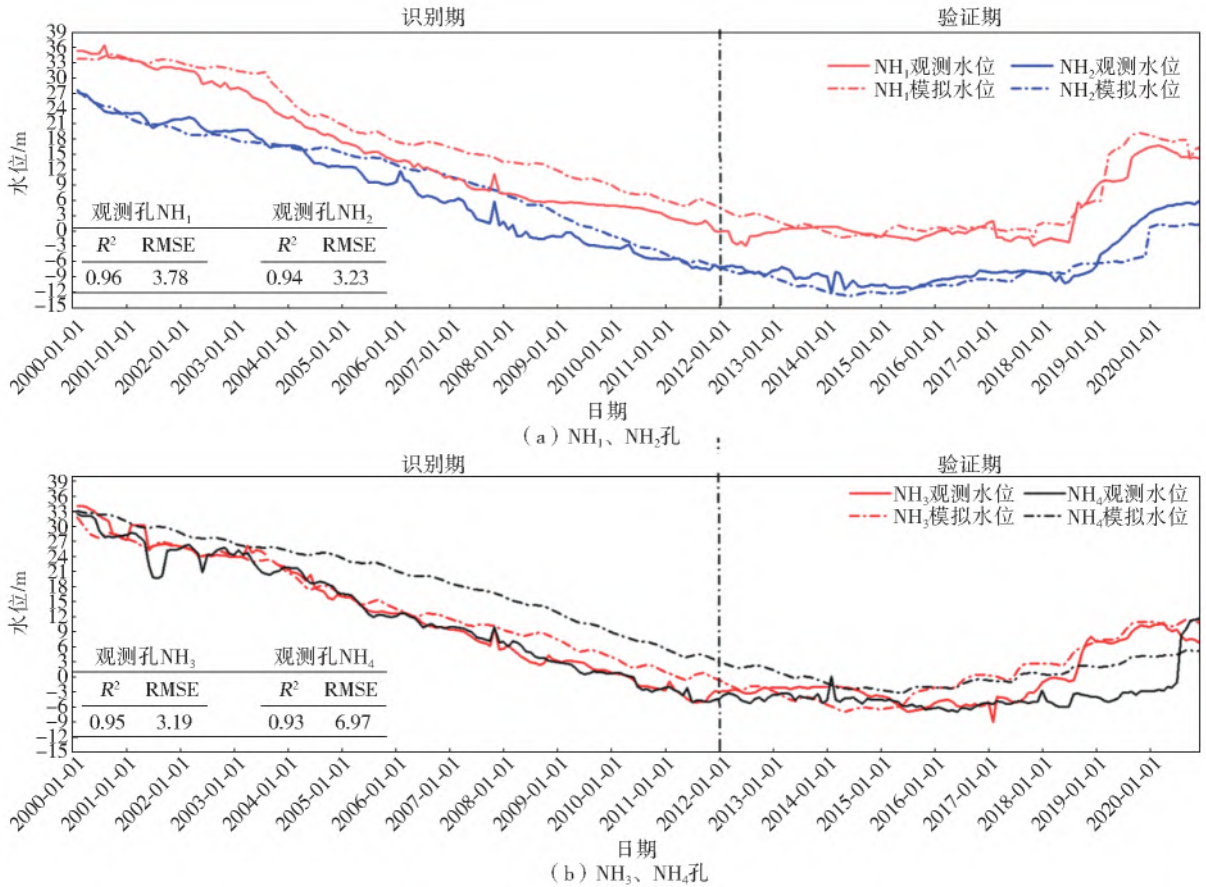


图3 长时间序列模型水位拟合结果

Fig. 3 Validation results of groundwater level of long series model

3.2 潮白河春季生态补水模拟

在长时间序列地下水流模型的基础上,将模型应用于潮白河流域2021年春季试验性生态补水中,模型边界条件及参数不变,预测期为2021年4月30日—2021年7月31日,1d为1个应力期,共93个应力期;初始流场为2021年4月末流场。补水期内(2021年4月30日—5月27日)无降水,为了充分体现地下水对生态补水的响应过程,补水期结束后的模型应力期内也没有考虑降水的影响,故模型补给项主要包括灌溉入渗、侧向流入、水库渗漏及潮白河对河道补水;研究区内长期超采至今,导致地下水埋深大于蒸发极限埋深(4 m),故排泄项未考虑蒸发,主要为人工开采。将数据处理成相应的格式输入到GMS中,利用模型分析评价潮白河2021年春季生态补水效果和地下水响应。

4 结果与讨论

4.1 地下水水位响应

本次补水沿潮白河流域10 km范围内共布置了65眼观测井作为补水监测井,对所搜集的监测数据进行水位拟合,误差基本在0~1 m的可接受范

围内,其中4眼观测井拟合情况见图4。模型模拟水位和实际水位数据较为接近,模型参数和源汇项基本符合实际情况。分析拟合孔水位变化可知:7号孔反应迅速,补水后不久水位即开始上升,这与该孔位于上游且离河道较近有关;其他拟合孔水位在补水一段时间后,水位上升明显。截取剖面A-A',见图5,随着时间的推移,到7月31日距离主河道两岸的水位开始消散,而距离河道较远的地方水位逐渐回升。24号和27号拟合水位出现0~1 m波动,拟合效果一般,可能是在补水初期受到怀柔应急水源地和水源八厂开采的影响。

4.2 补水影响范围

根据模型运行结果,考虑生态补水作为单一变量影响地下水水位动态的变化。在补水预测模型基础上,考虑研究区无补水情形下的地下水水位。将两者补水期末的水位相减得到补水期间动态水位抬升图,见图6。分析可知,补水期末,沿着补水路径周围水位均有所上升,最大上升幅度接近18 m。以水位抬升值大于0划定此次补水的影响范围,计算得到研究区内的影响面积约为842.8 km²,占研究区总面积的58.6%。靠近潮白河干流沿岸地下水水位上升幅度大于10 m,影响面积约为44.2 km²,占比约为3%。

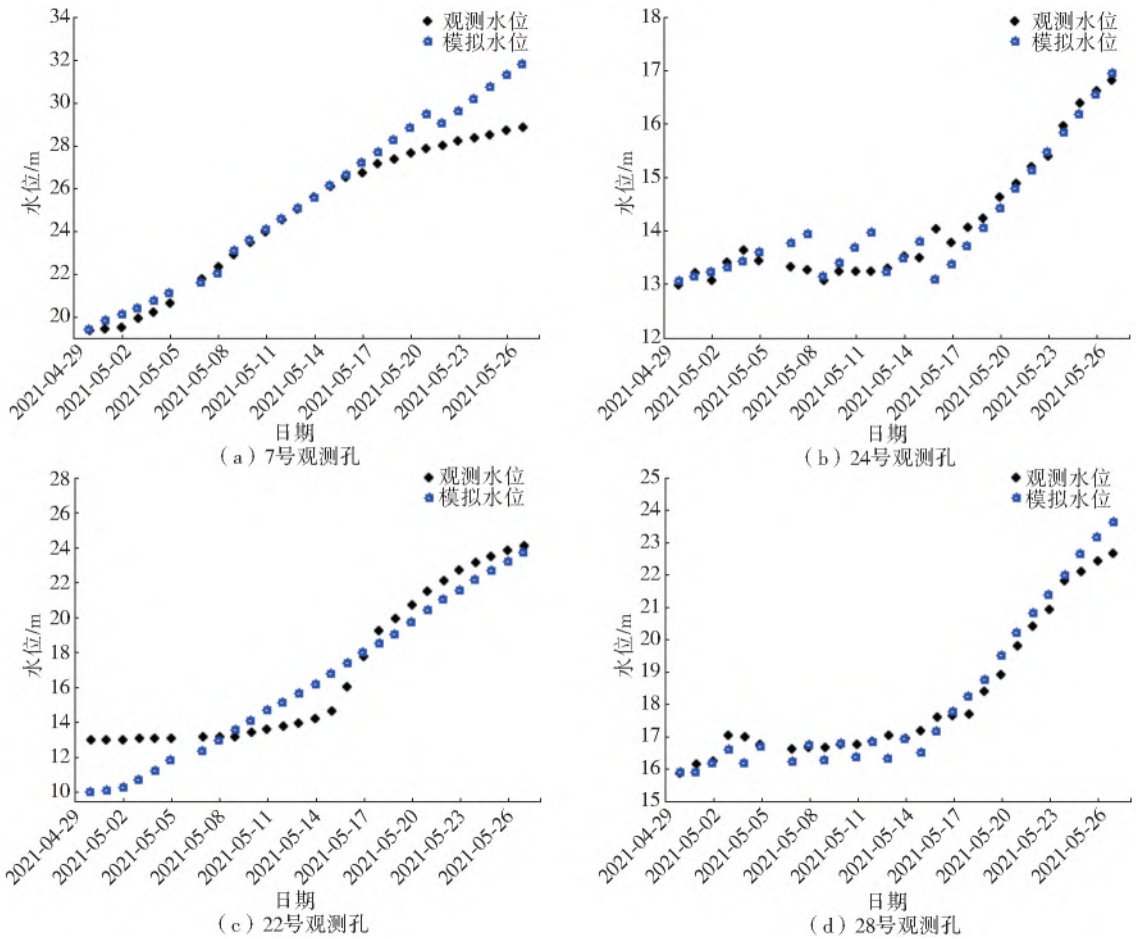


图 4 观测孔水位响应及拟合结果

Fig. 4 Water level response and fitting results of observation well

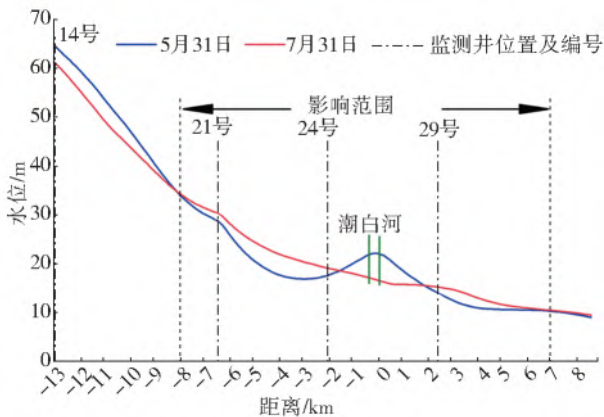


图 5 A-A' 剖面水位变化

Fig. 5 Water level change of A-A' profile

4.3 补水对储存量的影响

补水期间,补水对地下水的入渗是研究区的主要补给来源。根据补水期间地下水观测资料,确定观测孔初始水位值和补水期末水位差值,圈定各观测孔所控制的面积,取用相应的给水度,算出整个研究区的储存量变化值。

$$\Delta Q_{\text{储}} = \sum_{i=1}^n \mu_i \Delta h_i F_i \quad (1)$$

式中: $\Delta Q_{\text{储}}$ 为储存量的变化量, m^3 ; μ_i 为第 i 个观

测孔所对应的给水度; Δh_i 为第 i 个观测孔的水位差值, m ; F_i 为第 i 个观测孔所圈定的面积大小, km^2 。

根据式 1 计算可知,在总水量为 2.06 亿 m^3 的前提下,补水渗漏补给地下水量为 1.57 亿 m^3 (约占总水量的 76%),研究区第一含水层系统储存量增加了 1.49 亿 m^3 。由此可见,生态补水对于潮白河冲洪积扇地区地下水的恢复具有重要的意义。

4.4 地下水位的滞后效应

地下水的抬升和生态补水有着密切的联系,但是地下水水位的回升需要一定的时间,即存在一定的滞后性^[26]。根据现有监测井分布特点,选取距离潮白河河道两岸的 4 个观测井分析地下水水位对补水的滞后响应,见图 7,南岸为 13 号 (3 km)、17 号 (6 km),北岸为 11 号 (3 km)、19 号 (6 km)。对比同侧观测井可以发现:13 号、11 号观测井离河道较近,对补水的响应及时,水位抬升迅速,响应滞后时间较快 ($t_0 = 3 \text{ d}$, $t_2 = 6 \text{ d}$); 17 号、9 号距离河道较远,地下水响应时间较慢 ($t_1 = 30 \text{ d}$, $t_3 = 18 \text{ d}$),水位上升趋势较平缓。13 号观测井响应滞后时间最短,水位上升最多,分析其原因

是从补水初期开始最先受到补水入渗持续的影响,17号观测井响应滞后时间最长,水位上升缓

慢,其原因是距河道较远且仅受到潮白河干流补水的影响。

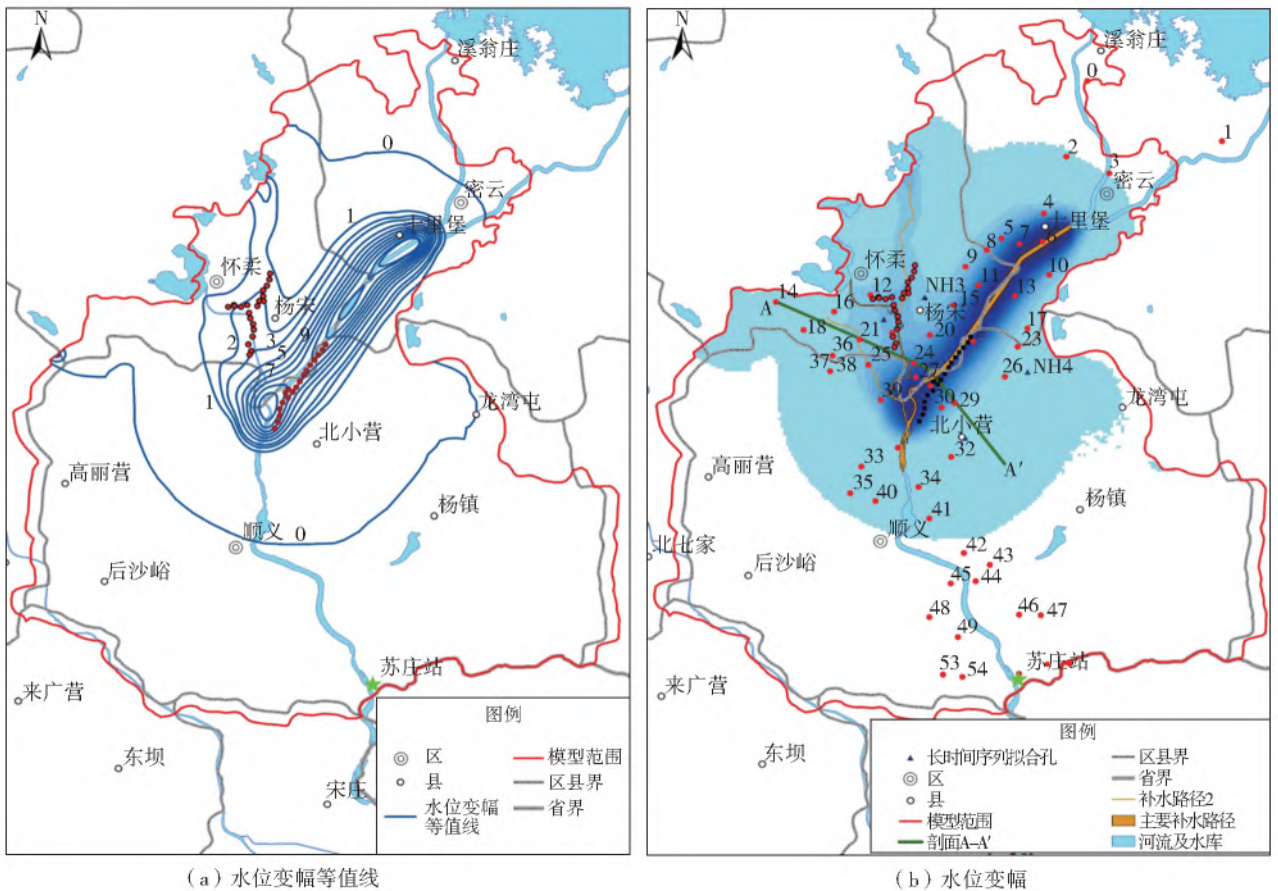


图6 补水期末水位变幅

Fig. 6 Water level change at the end of replenishment period

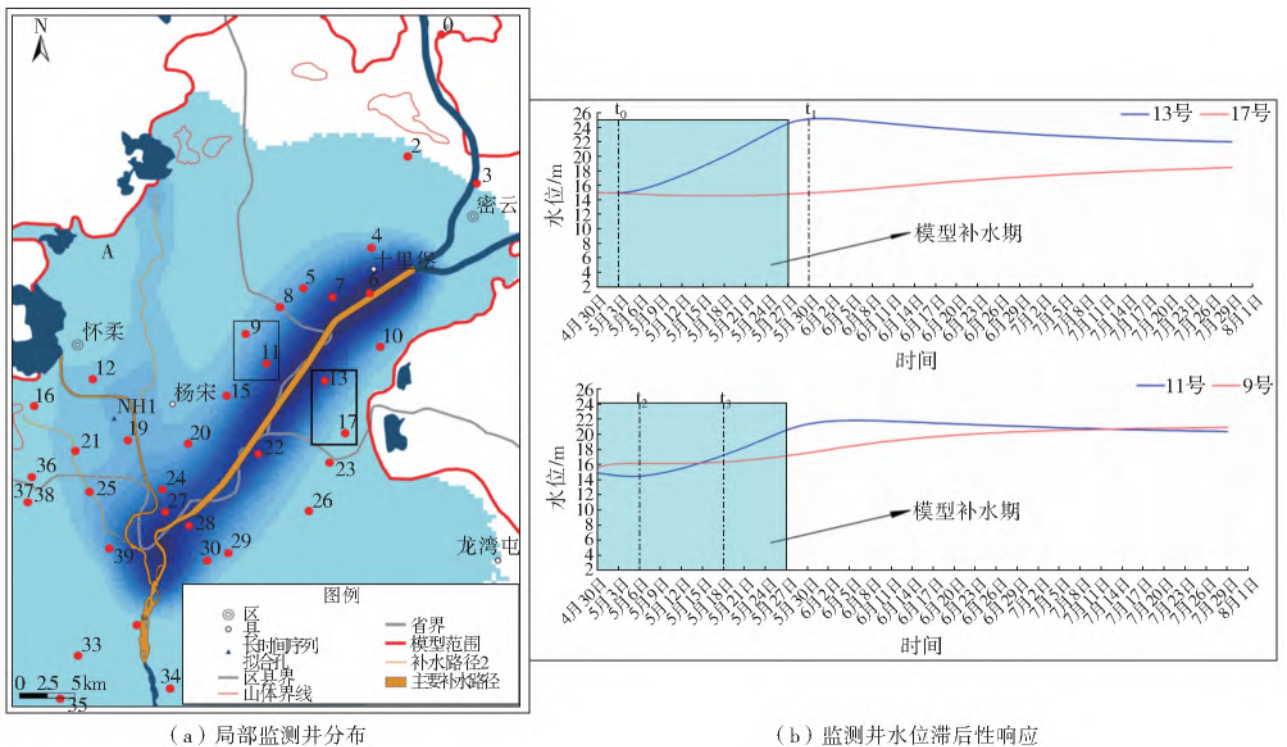


图7 观测井水位滞后响应

Fig. 7 Delay effect of groundwater level within observation wells

5 结 论

补水对研究区范围内水位的抬升有明显效果,考虑有补水和无补水情形,补水后最大抬升值接近 18 m。以水位抬升 0 为分界线,划分此次补水影响范围约为 842.8 km²,占研究区总面积的 58.6%,补水效果较好。

截至 2021 年 5 月 27 日,潮白河春季试验性生态补水总量达 2.06 亿 m³,补水下渗补给地下水量为 1.57 亿 m³,约占补水总量的 76%。补水 1 个月后,第一含水层系统储存量增加了 1.49 亿 m³。生态补水对于潮白河冲洪积扇地区地下水的恢复具有重要的意义。

地下水水位对补水的响应存在一定的滞后性。离河道距离越近,响应越迅速,反之越慢。

致谢:

感谢北京市水文总站对此次研究提供的数据资料。

参考文献(References):

[1] 陈培钧,吕晓俭,谢振华.北京地下水资源与首都持续发展[J].北京地质,1999(4):1-6. (CHEN P J, LYU X J, XIE Z H. Groundwater resources in Beijing related to the capital's development [J]. Beijing Geology, 1999 (4): 1-6. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: JBDZ. 0. 1999-04-000.

[2] 廖强,张士锋,陈俊旭.北京市水资源短缺风险等级评价与预测[J].资源科学,2013,35(1):140-147. (LIAO Q, ZHANG S F, CHEN J X. Risk assessment and prediction of water shortages in Beijing [J]. Resources Science, 2013, 35(1): 140-147. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: ZRZY. 0. 2013-01-021.

[3] 王丽亚.北京平原区地下水可持续利用模型研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014. (WANG L Y. A model study of groundwater sustainability in Beijing plain area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014. (in Chinese))

[4] 李鹏,王新娟,孙颖,等.气候变化对北京地下水资源的影响分析[J].节水灌溉,2017(5):80-83,89. (LI PENG, WANG X J, SUN Y. Analysis of the influence of climate change on groundwater resources in Beijing [J]. Water Saving Irrigation, 2017(5): 80-83, 89. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: JSJU. 0. 2017-05-019.

[5] 王新娟,李鹏,刘久荣,等.超采对北京市潮白河冲洪积扇中上部地区地下水质的影响[J].现代地质,2016,30(2):470-477. (WANG X J, LI P, LIU J R, et al. Effect

of over-exploitation on underground water quality in the upper part of the Chaobai River alluvial fan in Beijing [J]. Geoscience, 2016, 30(2): 470-477. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-8527. 2016. 02. 024.

[6] 万思成,李琼芳,虞美秀,等.北京市平原地区地下水动态变化规律及影响因素分析[J].水电能源科学,2013,31(12):46-50. (WANG S C, LI Q F, YU M X, et al. Groundwater dynamic changing characteristics and its influence factors of Beijing plain area [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(12): 46-50. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: SDNY. 0. 2013-12-012.

[7] 孙爱华.北京市潮白河流域地下水回灌利用技术研究[D].长春:吉林大学,2016. (SUN A H. Research on the technology of groundwater recharge and utilization in Chaobai River basin, Beijing City [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese))

[8] 秦欢欢.北京平原地面沉降数值模拟情景分析[J].地质科技情报,2019,38(1):221-227. (QIN H H. Numerical simulation and scenario analysis of land subsidence in Beijing plain [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2019, 38(1): 221-227. (in Chinese)) DOI: 10. 19509/j. cnki. dzkq. 2019. 0124.

[9] 张景华,范久达,李世君.南水北调进京后怀柔应急水源地地下水资源涵养研究[J].城市地质,2015,10(2):17-20. (ZHANG J H, FAN J D, LI S J. Research on the groundwater resources conservation of Huairou emergency water source after the South-to-North Water Transfer into Beijing [J]. Urban Geology, 2015, 10(2): 17-20. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: CSDZ. 0. 2015-02-004.

[10] 李阳,张景华,董佩,等.怀柔应急备用地下水源地减采热备影响分析[J].城市地质,2016,11(4):66-70. (LI Y, ZHANG J H, DONG P, et al. Analysis on the influence to reduce exploitation of the Huairou emergency wellhead [J]. Urban Geology, 2016, 11(4): 66-70. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-1903. 2016. 04. 012.

[11] 王树芳,李捷,刘元章,等.南水北调对北京地下水涵养的影响[J].中国水利,2019(7):26-30. (WANG S F, LI J, LIU Y Z, et al. Impact of South-to-North Water Transfer on groundwater recovery in Beijing [J]. China Water Resources, 2019 (7): 26-30. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: SLZG. 0. 2019-07-008.

[12] 李海军,崔一娇,任永强,等.永定河 2020 年春季生态补水对北京地下水涵养效果分析[J].城市地质,2021,16(2):133-138. (LI H J, CUI Y J, REN Y Q, et al. Analysis on the effect of ecological water replenishment of Yongding River in spring 2020 on groundwater conservation in Beijing [J]. Urban Geolo-

- gy, 2021, 16(2): 133-138. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; CSDZ. 0. 2021-02-002.
- [13] 汤万龙,赵国栋,胡庆芳,等. 永定河固安段生态补水水位及水面动态响应[J]. 水利规划与设计, 2021(9): 32-37. (TANG W L, ZHAO G D, HU Q F, et al. Response of water level and surface to ecological water replenishment in Gu'an section of Yongdinghe River [J]. Water Resources Planning and Design, 2021(9): 32-37. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SLGH. 0. 2021-09-009.
- [14] 胡立堂,郭建丽,张寿全,等. 永定河生态补水的地下水水位动态响应[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 5-11. (HU L T, GUO J L, ZHANG S Q, et al. Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 5-11. (in Chinese)) DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 20200802.
- [15] 霍丽涛,王博欣,潘增辉,等. 基于对应分析法的北京密怀顺地区地表水回补地下水环境影响评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(2): 195-203. (HUO L T, WANG B X, PAN Z H, et al. Environmental impact by surface-water recharge of groundwater in Beijing Mihuaishun replenishment area-correspondence analysis[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2020, 56(2): 195-203. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; BSDZ. 0. 2020-02-008.
- [16] 朱冰,束龙仓,刘波,等. 短历时生态输水条件下的地下水系统响应[J]. 水电能源科学, 2011, 29(10): 19-21, 11. (ZHU B, SHU L C, LIU B, et al. Response of groundwater system under condition of short duration ecological water transportation[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(10): 19-21, 11. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SDNY. 0. 2011-10-005.
- [17] 彭勃,葛雷,王瑞玲,等. 黄河三角洲刁口河生态补水对地下水影响的模拟分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(5): 1-6. (PENG B, GE L, WANG R L, et al. Simulation analysis on effect of ecological water supplement on groundwater in Diaokou River of Yellow River Delta[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5): 1-6. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SZYB. 0. 2015-05-001.
- [18] 刘波,彭相楷,束龙仓,等. 黄河三角洲清水沟湿地三次生态补水对地下水的影响分析[J]. 湿地科学, 2015, 13(4): 393-399. (LIU B, PENG X K, SHU L C, et al. An analysis of effect of three water ecological diversions on groundwater of Qing shuigou wetlands in the Yellow River Delta[J]. Wetland Science, 2015, 13(4): 393-399. (in Chinese)) DOI: 10. 13248/j. cnki. wetlandsci. 2015. 04. 002.
- [19] SUN K N, HU L T, GUO J L, et al. Enhancing the understanding of hydrological responses induced by ecological water replenishment using improved machine learning models; A case study in Yongding River [J]. Science of the Total Environment, 2021, 768: 145489. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2021. 145489.
- [20] 李凡,李家科,马越,等. 地下水数值模拟研究与应用进展[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 99-104, 110. (LI F, LI J K, MA Y, et al. The research and application progress of numerical simulation on groundwater[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(1): 99-104, 110. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; XBSZ. 0. 2018-01-016.
- [21] 纪媛媛,周金龙,杨广焱. GMS在我国地下水资源评价与管理中的应用[J]. 地下水, 2013, 35(2): 76-79. (JI Y Y, ZHOU J L, YANG G Y. Application of GMS in groundwater resources evaluation and management in China[J]. Groundwater, 2013, 35(2): 76-79. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; DXSU. 0. 2013-02-032.
- [22] 张琳琳,崔亚莉,梁桂星,等. SWAT-MODFLOW耦合模型在地下水量均衡分析中的应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(6): 176-183. (ZHANG L L, CUI Y L, LIANG G X, et al. Application of SWAT-MODFLOW coupling model in groundwater balance analysis[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6): 176-183. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2020. 0130.
- [23] ZHANG L L, WANG C Y, LIANG G X, et al. Influence of land use change on hydrological cycle; application of SWAT to Su-Mi-Huai area in Beijing, China [J]. Water, 2020, 12(11): 3164. DOI: 10. 3390/w12113164.
- [24] 崔伟哲,郝奇琛,陈康,等. 不同网格加密方法在河流回补地下水模拟中的对比[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(3): 394-404. (CUI W Z, HAO Q C, CHEN K, et al. Comparison of different grid refinement methods in simulation of groundwater recharge by rivers [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(3): 394-404. (in Chinese)) DOI: 10. 19814/j. jese. 2019. 11001.
- [25] PANDAY S, LANGEVIN C D, NISWONGER R G, et al. MODFLOW-USG version 1: An unstructured grid version of MODFLOW for simulation groundwater flow and tightly coupled process using a control volume finite-difference formulation [R]. Reston: USGS, 2013.

[26] 石锦,周脚根,王辉,等. 点源时间序列数据缺失值的估值不确定性分析:以小流域气象和水文数据为例[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 84-92. (SHI J, ZHOU J G, WANG H, et al. Analyzing the uncertainty induced by methods used to calculate the missing

data in time series: A case study based on meteorological and hydrological data in small watershed[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 84-92. (in Chinese)) DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2017. 0421.

Ecological water replenishment and groundwater response in Chaobai River in spring

LI Zhiqiang¹, WANG Yajuan², WEN Zixi², ZHANG Qiulan¹, CUI Yali¹, ZHANG Linlin¹,
YANG Guojun², ZHANG Lina², LIU Cuizhu², DONG He²

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Beijing Hydrological Center, Beijing 100089, China)

Abstract: The middle and upper reaches of the Chaobai River alluvial fan is the area with the most abundant groundwater resources in Beijing, and it occupies an important role in the urban water supply. Due to over exploitation for many years, the groundwater level has decreased continuously and formed a large groundwater level drop funnel. At the same time, it has caused a series of environmental problems such as ground subsidence and groundwater pollution. At the end of 2014, after the middle route of the South-to-North Water Transfer Project was opened officially, it not only eased the shortage of water supply in Beijing, but also provided an opportunity for groundwater conservation. Since April 30, 2021, the Chaobai River basin implemented the first large-scale experimental water replenishment in 22 years. The replenishment of water was an exploratory practice to promote the comprehensive management and ecological restoration of the river basin. It is also an important part of improving the ecological environment of the river basin and promoting the comprehensive management of the overexploitation of groundwater in the river basin.

The research scope was determined by analyzing the hydrogeological conditions in the Chaobai River area borehole data, replenishment items, drainage items and long-term observation hole data. By the Unstructured Grid (USG) module embedded in GMS 10.0 to refine the replenished water channels and water sources, a long-term groundwater flow model from January 2000 to December 2020 was established. To evaluate model accuracy, the determination coefficient (R^2) and root mean square error (RMSE) of evaluation factors was taken as the evaluation criteria for parameter optimization of the evaluation model. After identification and verification of the model by the observation data, the identified model was applied to the spring ecological water replenishment of Chaobai River to evaluate the effect of ecological water replenishment and groundwater response.

The results show that the water level around the replenishment path has risen at the end of the replenishment period. The water level in the case of replenishment minus the water level in the case of no replenishment. The maximum increase is close to 18 m. The area that the water level has a rising value greater than 0 is the impact area in this replenishment. It is calculated that the affected area is about 842.8 km², accounting for 58.6% of the total area of the study area. The groundwater level near the mainstream of Chaobai River rises more than 10 m, and the affected area is about 44.2 km², accounting for about 3%. During the water replenishment period (April 30-May 27, 2021), the total water replenishment volume is 206 million m³, and the groundwater replenishment by water leakage is 157 million m³ (approximately 76% of the total water volume). The storage capacity of the system has increased by 149 million m³ in the first aquifer of the study area. Obvious delay in the groundwater levels in observing wells with responses after water replenishment, and the lag response time of observation wells at different locations of the river channel is different. The water level of observation wells that are 3 km away from the river channel rises obviously, and the lag response time is short (3-6 d and the lag response time of observation wells that are 6 km away from the river channel is longer (18-30 d).

The implementation of ecological water replenishment projects in the Chaobai River basin was conducive to the recovery of water levels on both sides of the river and the restoration of groundwater resources in the region. After replenishing water, the water level rose significantly and the groundwater storage was increased within the water replenishment period. Overall, the replenishment effect was good. There was a time lag in the response of groundwater to replenishment, and the lag response time varies with distance.

Key words: ecological water replenishment; Chaobai River; scope of influence; lagging response