

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008027

永定河生态补水的地下水位动态响应

胡立堂^{1,2,3}, 郭建丽^{1,2}, 张寿全³, 孙康宁^{1,2}, 杨郑秋^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875; 3. 首都经济贸易大学高等财经研究院, 北京 100070)

摘要: 永定河流域生态修复是京津冀协同发展的重要议题, 地下水位对生态补水动态响应的研究是关键的科学问题。以2020年春季永定河生态补水实践为研究基础, 采用地下水均衡分析、相关分析和聚类分析等多种技术手段, 详细讨论了不同河段河道渗漏损失、地下水动态变化与控制因素。研究发现, 2020年春季大流量生态补水河道的渗漏损失率(20%~40%)比2016年(30%~60%)和2019年(41%~58%)的小流量生态补水低; 生态补水条件下, 77眼观测井地下水动态呈现显著回升、变化不显著和持续下降三种变化规律; 根据影响因素划定了河道渗漏补给主控型、河道渗漏和降水主控型、河道渗漏-降水-地下水开采用作用明显型、河道渗漏-降水-地下水开采用作用不明显型4种类型。其中, 河道渗漏补给主控型的监测井在补水期的地下水位迅速升高, 升幅一般在1~19 m之间, 最大达20 m, 而且存在明显的滞后性。这些规律可为制定科学的生态补水方案提供技术参考。

关键词: 生态补水; 永定河; 地下水动态; 聚类分析; 滞后性

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)05-0005-07

Response of groundwater regime to ecological water replenishment of the Yongding River

HU Litang^{1,2,3}, GUO Jianli^{1,2}, ZHANG Shouquan³, SUN Kangning^{1,2}, YANG Zhengqiu^{1,2}

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation Ministry, Beijing 100875, China; 3. Higher Institute of Finance and Economics, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China)

Abstract: Ecological restoration of the Yongding River Basin is an important issue in the Coordinated Development of Beijing-Tianjin-Hebei Region, and the study of the response of groundwater regime to ecological water replenishment is one of key scientific issues. In this paper, based on the practice of ecological water replenishment of the Yongding River in 2020, multiple methods, including water balance analysis, correlation analysis and cluster analysis, are employed to analyze the loss rate of the river for different reaches, patterns of groundwater level changes and the controlling factors in detail. It is found that the river leakage loss rate (20%~40%) with large-flow ecological water replenishment in 2020 is lower than those with small-flow replenishment in 2016 (30%~60%) and 2019 (41%~58%). At the same time, under the condition of ecological water replenishment, the groundwater dynamics of 77 observation wells in the study area showed the patterns with three types, which are the type of significant recovery, the type of no significant change and the type of continuous decline. According to the controlling factors, four types of groundwater changes are classified, which are the type of river leakage recharge, the type of river leakage recharge and precipitation, the type of distinct impacts under the controlling factors, and the type of unobvious impacts under the

收稿日期: 2020-08-10; 修订日期: 2020-08-15

基金项目: 北京市科技计划(Z191100006919001); 国家自然科学基金资助项目(41877173; 41831283)

第一作者: 胡立堂(1976-), 男, 教授, 博导, 主要从事地下水数值模拟和渗流计算方面的研究。E-mail: litanghu@bnu.edu.cn

controlling factors. The groundwater level under the type of river leakage recharge gets rise rapidly, and the general increased water level is 1 ~ 19 m with the maximum of about 20 m. Meanwhile, obvious delay in the groundwater levels in monitoring wells with responses to leakage are also demonstrated. These findings may provide technical references for the formulation of scientific ecological water replenishment scheme.

Keywords: ecological water replenishment; the Yongding River; groundwater regime; cluster analysis; delay effect

永定河被誉为北京的“母亲河”。在1950年代后期,随着官厅水库等水利设施的修建,永定河流域的河道径流受水库控制。1970年以来,由于水质恶化等原因,官厅水库供水能力逐渐减弱,永定河径流也随之逐渐减小,直至最终断流^[1]。到1990年,永定河的生态环境保护逐渐受到重视。进入21世纪后,北京市政府开始进行永定河生态环境的修复和治理。2001年,北京市政府颁布《21世纪初期(2001—2005年)首都水资源可持续利用规划》,对官厅水库进行综合治理,在三家店建设水质净化工程。2005年北京市政府对京郊各区县的功能进行了定位,将门头沟、平谷、怀柔、密云及延庆五个区县定位为北京市的生态涵养区,其中与永定河关系最为密切的是门头沟区和石景山区。2009年,《永定河绿色生态走廊建设规划》的出台,对永定河生态走廊的建设进行了规划,根据永定河北京段的官厅山峡段、平原城市段及平原郊野段河道的特点,分别对这三段河道的修复治理方式、景观布局做出了不同的规划,同时启动了“五湖一线”工程。2014年,为加强环渤海及京津冀地区经济协作,永定河被列入水利部津冀协同发展专项规划生态修复治理10条重点河流之首。2016年,国家发展和改革委员会、水利部、国家林业局印发《永定河综合治理与生态修复总体方案》,要求恢复永定河生态功能区建议,逐步将永定河恢复为“流动、绿色、清洁、安全”的河。2017年,山西、北京、河北、天津等省份合作成立流域综合治理公司,对永定河进行全流域整体治理^[2]。自2014年底南水北调中线工程通水以来,北京的供水压力得到了极大的缓解,通过采取限制地下水开采、直接补水、置换挤占的环境用水等措施,永定河生态环境正不断改善,河道复流,地表水和地下水良性循环关系逐步恢复。

永定河生态补水自2016年开始实施。2016年和2019年官厅水库分别累积下泄水量 $2.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $2.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。永定河生态补水的科学实施涉及到地下水、生态、成本效益等多方面因素的综合考虑,是一个复杂的系统工程。首先,生态补水涉及到经济效益与成本的关系,从地下水位恢复的角度,希望补水越多

越好,但涉及的补水成本将越高;永定河自官厅水库向三家店、卢沟桥及下游流动过程中,会渗漏相当一部分水量,渗漏水量与补水量和补水过程、水文地质条件有着直接的关系;此外,永定河生态补水后河道周边地下水如何响应亟待研究,涉及到地下水位恢复规律和基于水质安全的水位合理阈值的划定;还有,生态补水后生态环境的改善涉及到了地表水、地下水和生态方面的考虑。本研究将主要关注地下水方面。早在生态补水工程实施之前,部分学者对北京永定河地下水位的回升规律进行了相关研究。王立发等^[3]利用地下水数值模拟和有效储水率计算公式,对北京市永定河地下水水库资源储蓄能力进行研究,认为北京永定河地下水水库具有较好水资源回灌能力、储存能力。张院等^[4]进行了北京西郊地区地下水恢复适宜水位分析,确定了1983年枯水期流场为地下水位恢复的适宜水位。Hao等^[5]采用数值模型评价了北京永定河冲积扇中上部人工补给情景的适用性和有效性。郝奇琛等^[6]建立了北京永定河冲洪积扇地区地下水人工回灌系统优化模型,求得最优回灌方案。杨小芳等^[7]建立了地下水数值模型,分析河流补水过程对地下水位抬升的影响,得出潜水含水层的渗透系数、给水度、河道入渗补给强度和大气降水入渗补给系数为地下水位预测模型的主控参数。Hu等^[8]曾建立了永定河再生水回补的地下水量和溶质迁移模型,对不同河道衬砌情景进行分析,发现没有衬砌的永定河渗漏可以大大提高地下水位,而通过土工膜衬砌的河道可以有效地控制渗水和溶质在含水层中的扩散。

2020年4月20日—5月14日北京市水务局成功实施了春季永定河生态补水工作,实现了北京境内170 km河段25年来首次全线通水^[9]。相比2016—2019年的永定河生态补水,2020年在官厅水库的永定河径流量由约 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 达到了 $100 \text{ m}^3/\text{s}$,河道的演进范围也由原卢沟桥下游约18 km变化为北京全境。该次补水受到国内众多管理者和学者的广泛关注。这次永定河生态补水相当于大型的水力学试验,从实践层面揭示了水文和水文地质系统对于永定河生态补水的

响应。但前人尚未对2016年以来生态补水的地下水位响应规律进行深入分析。早在2012年7月21日北京暴雨事件后,中国北方典型洪积扇区大流量补给对地下水位动态影响机制受到学者关注,但还不存在系统的地表径流和地下水动态数据监测。2020年永定河生态补水的地表水和地下水信息的监测支撑了地下水动态响应规律的研究。本研究以永定河流域(北京段)为研究区,利用生态补水期间日尺度的降水量、河道径流和地下水位等监测数据深入揭示地下水位恢复和动态响应的机制,为制定科学的生态补水方案提供技术参考。

1 研究区概况

永定河上游分南北两大支流,北支为发源于内蒙古兴和县的洋河,南支为发源于山西省宁县的桑干河,两大支流在朱官屯汇合后称永定河,于官厅水库下游流入北京市境。本研究区域在永定河北京段(图1),

按河段特点可分为官厅山峡段(官厅水库至三家店段)、平原北段(三家店至卢沟桥段)、平原南段(卢沟桥至市界崔指挥营段)。

永定河流域北京段属温带大陆性季风气候,多年平均气温为12.35℃,多年平均降水量约513mm。研究区春季干燥;夏季气温高,降雨量多,75%的降水集中在6—9月。永定河山峡段的地下水属于西山岩溶水系统,主要为奥陶系含水岩组,厚度较大,埋藏深度不一,且区内断裂、褶皱交错,部分地区可能存在与第四系地下水直接接触的“天窗”区。永定河平原段的地下水主要赋存于第四系含水层中,岩性主要为受河流冲洪积作用形成的砂及砂卵砾石,从山前冲洪积扇顶部到下部平原区,含水层结构逐渐由单一潜水层逐渐过渡到多层,含水层颗粒也逐渐由粗变细。研究区地下水主要接受大气降水、地表水、山区侧向和城市覆盖区供、排水管网渗漏的补给;地下水排泄以开采为主,有侧向流出和少量的潜水蒸发。

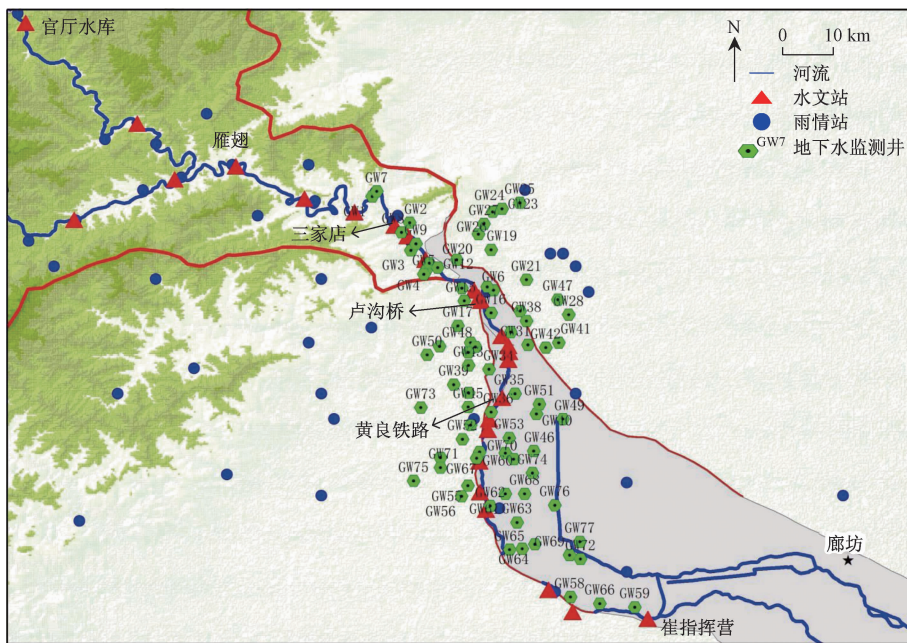


图1 研究区范围

Fig.1 Map of study area

2 研究方法和数据

2.1 地下水位动态变化的影响因素评价

地下水均衡分析是地下水位动态的基础,因此以地下水均衡为基础,采用皮尔逊相关系数法依次分析地下水位动态变化序列与主要影响因素的关系,识别主控因素。以永定河北京段为研究区,某时段(t)地下水位(h)变化主要受到降水入渗补给、河流入渗补给

和地下水开采等因素的影响:

$$A \frac{\partial h}{\partial t} = P + Q_{11} + Q_r - Q_w - Q_{12} \quad (1)$$

式中: h ——地下水位;

t ——时间;

A ——研究区面积;

P ——降水入渗补给;

Q_{11} ——地下水侧向流入量;

Q_r ——永定河等河渠的入渗补给量;

Q_w ——地下水开采量;

Q_{12} ——地下水侧向流出量。

在分析各观测井的地下水位恢复时间序列数据($Y(t)$)与各影响因素的时间序列数据($X(t)$)之间的关系时,采用了皮尔逊相关系数法表示^[10]:

$$PR(X, Y) = \frac{Cov(X(t), Y(t))}{\sqrt{Var[X(t)]Var[Y(t)]}} \quad (2)$$

式中: PR ——皮尔逊相关系数;

Cov ——协方差;

Var ——方差。

2.2 地下水位动态类型的聚类划分

在获得观测井水位与主要影响因素的皮尔逊相关系数之后,采用 K-Means 聚类算法进一步研究观测井地下水位动态变化与控制因素的关系。K-Means 聚类算法将数据空间划分为 Voronoi 单元,该变换将观测井数据分为 k 个簇。其中每个观测井均属于某个聚类,位于同一集群中的观测井意味着水位变化具有相似的主要控制因素^[11]。

2.3 地下水位变化对生态补水响应的滞后性

地下水位对单次或连续降水事件的响应研究是水文地质学的一个基础内容,其中地下水位响应的滞后性是受关注的热点问题之一^[12]。连续型的生态补水会对地下水系统产生持续的河道渗漏补给,不同位置的观测井水位会出现不同的响应(图2)。生态补水从 t_0 时刻开始,观测井 1、2 和 3 的地下水位回升分别从 t_1, t_2, t_3 开始有明显变化,因此观测井 1、2 和 3 的滞后响应时间分别为 $(t_1 - t_0)$, $(t_2 - t_0)$ 和 $(t_3 - t_0)$,但在生态补水期结束后,对于封闭系统,如果地下水其他源汇项不发生变化,地下水位将逐渐回落至某个值。由于永定河山峡段主要是裂隙和岩溶区,地下水位动态监测井少,因此在本研究中将永定河从官厅水库至永定河渠引水前的三家店的径流之差作为渗漏补给的水源,以此分析生态补水期地下水位恢复状况。

2.4 数据基础

针对 2020 年春季生态补水期,收集了同期的降水、地表径流、地下水位动态和主要水厂供水的日尺度数据。

(1) 选取研究区内 10 个雨量站作为代表站,获得 2020 年 4 月 19 日—6 月 1 日的日降水数据(图 1)。

(2) 包括永定河生态补水区 16 个径流站的日径流数据(图 1),选取雁翅站、三家店闸站、卢沟桥站和黄良铁路站 4 个具有代表性的站点 2020 年 4 月 19

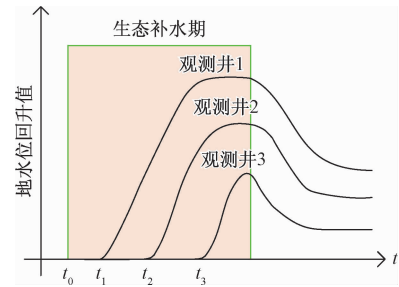


图 2 持续生态补水后不同位置观测井水位滞后响应的示意图
Fig. 2 Schematic diagram of delay effect of groundwater level within observation wells at different locations in response to continuous ecological water replenishment

日—6 月 1 日的日径流量数据以及 2016 年和 2019 年的年径流数据,分析河道渗漏规律。

(3) 收集到春季补水期的 77 眼监测井的日尺度地下水位,数据系列自 2020 年 4 月 19 日—6 月 1 日。大部分井为潜水井。

(4) 收集到主要水厂 2020 年 4 月 19 日—6 月 1 日的日供水数据。

3 结果与讨论

3.1 永定河流域生态补水过程河道渗漏规律分析

河道渗漏损失量与永定河生态补水方案和地下水位动态变化密切相关。为探究永定河北京段雁翅村至三家店水库山峡段以及三家店以下平原北段和南段各段河道渗漏规律,根据永定河北京段径流监测站点数据,选取雁翅站、三家店闸站、卢沟桥站和黄良铁路站 4 个具有代表性的站点 2016 年、2019 年和 2020 年部分流量数据进行分析。研究结果见图 3(a),雁翅站至三家店闸区间,2019 年河道渗漏损失率约为 41% (雁翅站平均径流量约为 $34 \text{ m}^3/\text{s}$),2020 年河道渗漏损失约为 22% (雁翅站平均径流量约为 $102 \text{ m}^3/\text{s}$,其径流见图 3(b)),2016 年只有年河道径流数据,其渗漏损失率估计为 30%;三家店闸至卢沟桥区间,2019 年河道渗漏损失约为 58% (三家店闸平均径流量约为 $20 \text{ m}^3/\text{s}$),2020 年河道渗漏损失率只有约 20% (三家店闸平均径流量约为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$);卢沟桥至黄良铁路区间,河道渗漏损失率与径流量密切相关,在 2016 年近 60%,在 2020 年平均损失率约为 40%。从趋势上可知,雁翅站至三家店闸区间,2016—2020 年的生态补水方案下的渗漏损失率呈减少趋势;三家店闸至卢沟桥区间,2016—2020 年的渗漏损失率呈现明显的衰减趋势;卢沟桥至黄良铁路区间,2020 年的平均渗漏损

失率(40%)比 2016 年(约 58%)低。因此说明,2020 年大流量补水方案(雁翅站平均径流量约为 $102 \text{ m}^3/\text{s}$)比 2016 和 2019 年的小流量补水方案(雁翅站平均径流量约为 $34 \text{ m}^3/\text{s}$)的河道渗漏损失率低,其衰减规律并不呈现线性减小(图 3),似指数衰减趋势。从平均渗漏损失率看,雁翅至三家店闸区段的河道渗漏损失率略高于三家店至卢沟桥区段。

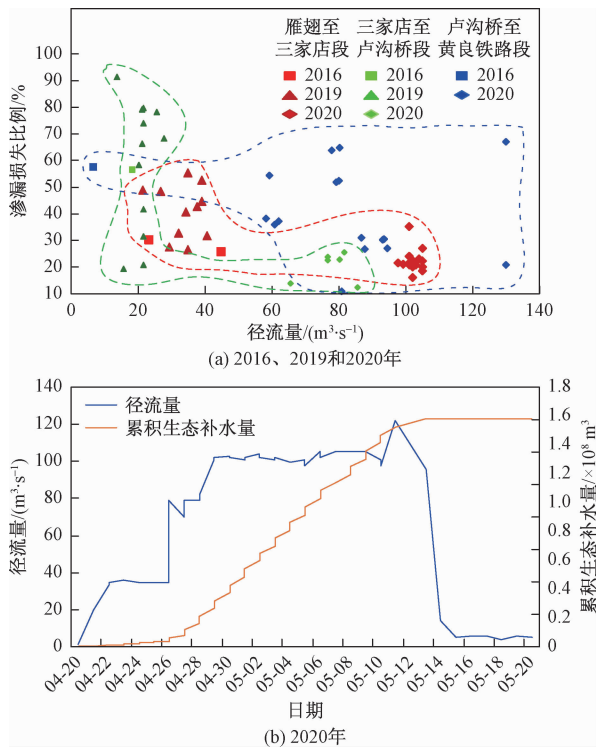


图 3 2016、2019 和 2020 年永定河生态补水不同河段径流量与渗漏量关系

Fig. 3 Relationship between river runoff and leakage rate in different reaches of the Yongding river under the ecological water replenishment in 2016, 2019 and 2020

3.2 地下水位动态变化规律

2020 年 4 月 20 日生态补水开始,研究区 77 眼观测井地下水位回升值随时间变化的曲线,见图 4。从图 4 中发现,地下水动态可大致分为几类,一部分观测井地下水位回升明显,如 GW1、GW3、GW4、GW5、GW6、GW7、GW8、GW9、GW10、GW11 至 GW16 孔;一部分观测井地下水位变化不明显,如 GW24、GW25、GW29 孔;还有一部分观测井地下水位持续下降,如 GW2、GW17、GW22 等孔(其中 GW17、GW30、GW39 和 GW43 孔在 4 月 20 日水位小幅度升高是生态补水前的地下水系统响应,因为地表水由官厅水库至落坡岭需要 1 d 才能到达)。陈家庄的 GW1 孔地下水位回升值最大,至 6 月 1 日水位已回升约 20 m,其次为龙泉

务北的 GW7 孔(回升约 16m),园博园的 GW14 孔(回升约 11 m)。至 6 月 1 日,位于东安村的 GW77 孔地下水水位仍下降近 5 m,其次是前柳的 GW71 孔(近 3 m)。由数据资料可知,生态补水期降水量较少,不是影响大幅度地下水水位恢复的控制因素,地下水水位恢复主要受到河道渗漏补给影响,而平原南段部分孔地下水水位受地下水开采影响。图 5 显示了 6 月 1 日地下水水位回升值的等值线,其中有 2 处明显的地下水水位上升区。其一为三家店水文站以上河段周边 3 ~ 5 km,地下水上升幅度大(1 ~ 19 m),自河段上游至下游的地下水水力梯度大;其二为卢沟桥水文站的河段周边(2 ~ 16 m),地下水水位上升幅度自河段处向周边逐渐减小。在卢沟桥水文站约 10 km 的下游地段,除了局部河道周边(如崔指挥营段附近)地下水水位略有上升外,地下水水位下降幅度基本在 1 ~ 3 m。

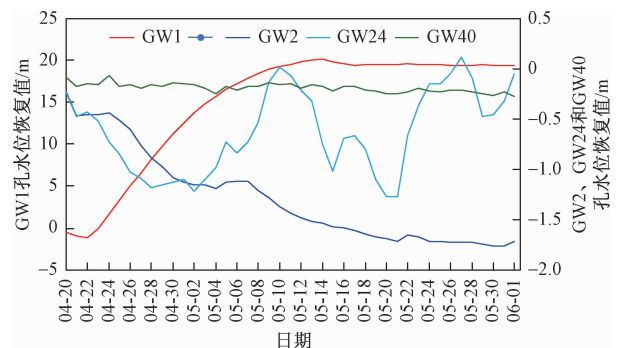


图 4 2020 年春季生态补水期地下水位回升值随时间变化(正值表示上升,负值表示下降)

Fig. 4 Change of groundwater recovery with time during the ecological water replenishment period in the spring of 2020 (positive value represents water is ascending and negative value represents water is descending)

3.3 地下水动态类型划分

根据式(1),将 77 眼观测井的地下水水位动态处理为日水位变幅(当天减前一天),结合渗漏补给量(以雁翅与三家店的河道渗漏量计算)、降水量和城市主要水厂日供水量的数据系列(图 6)进行分类分析。首先采用皮尔逊相关系数法分析相关关系,在获得相关系数后,采用 K-Means 聚类算法进一步进行分析,累积生态补水量见图 3(b),共补水约 $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。通过计算,将地下水水位恢复的空间数据划分为 4 种类型,每个井点属于某个聚类,结果见图 5。第 I 类(绿色原点)类型为河道渗漏补给主控型,河道渗漏补给为主控因素,该类型主要分布在陈家庄到卢沟桥距离永定河 3 km 范围内,距离河床较近,河道渗漏可及时补给

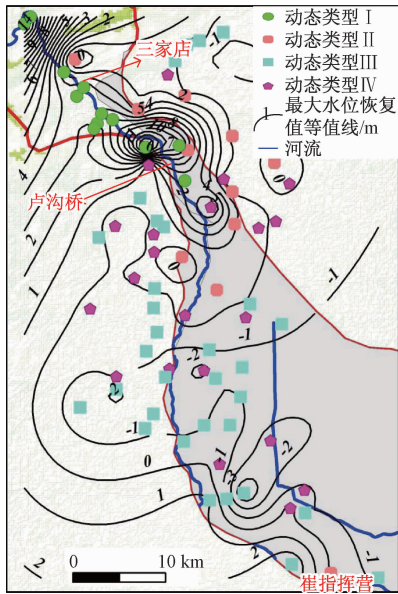


图5 地下水位动态类型划分和2020年6月1日水位恢复等值线

Fig. 5 Classification of groundwater regimes and contour map of groundwater recovery on June 1, 2020

地下水,地下水补给来源主要为地表水渗漏。第Ⅱ类(五角星)类型为河道渗漏和降水主控型,河道渗漏和降水均是主要因素,地下水位动态受补给条件限制,有明显的滞后,主要分布在卢沟桥下游的平原南段。第Ⅲ类(蓝色方块)类型为河道渗漏-降水-地下水开采作用明显型,河道渗漏、降水和地下水开采共同作用,地下水位动态与三者有一定的相关系数。第Ⅳ类(红色圆点)类型为河道渗漏-降水-地下水开采作用不明显型,河道渗漏、降水和地下水开采共同作用,但地下水位动态与三者的相关系数很差(也可能受表1中其他源汇项数据影响),主要分布在距离永定河较远的位置。

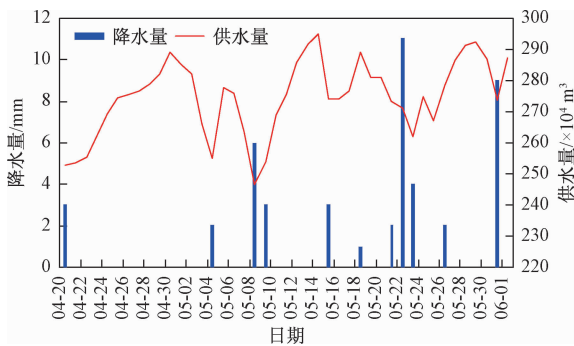


图6 2020年生态补水期降水量和供水量随时间变化

Fig. 6 Changes of precipitation and water supply with time during the ecological replenishment period of 2020

3.4 地下水位动态响应的滞后性

河道渗漏对地下水位的变化有直接关系,但地下水位的回升需要一定时间,即存在一定的滞后性。以地下水动态类型划分的第一类型为基础,选取受河道渗漏主要影响的12口地下水监测井进行分析。这些监测点均位于陈家庄至卢沟桥段距离永定河3公里范围内,与渗漏补给量具有较强相关性。通过对河道渗漏量的时间序列数据进行逐次移动0 d,1~20 d(该值可间接反映地下水位动态的滞后天数),再分析其与地下水位动态的关系,发现这12眼井地下水位动态与河道渗漏量存在很好的相关性,相关系数基本在0.60以上,最高达0.80。河道渗漏量时间序列的偏移天数也影响着相关系数。选择了3眼典型孔(GW1、GW14和GW16)分析了地下水位动态变化对渗漏的滞后响应(图7)。位于河道周边的GW1井,可以及时对渗漏补给产生响应,地下水位迅速回升,最后趋于稳定,不存在滞后效应。GW14井地下水的响应较为缓慢(滞后约10 d),当渗漏补给到达该含水层时,地下水位回升,然后开始下降。GW16井距离河道较远,地下水位响应也明显滞后(滞后约17 d),地下水位回升没有GW14井的大。

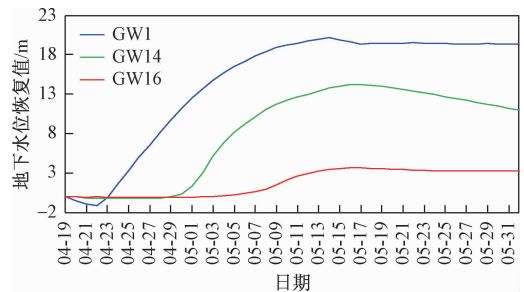


图7 2020年生态补水期3个典型观测井地下水位动态的滞后响应

Fig. 7 Delay effect of groundwater regimes within 3 typical observation wells during the ecological replenishment period in 2020

4 结论

(1)永定河河道渗漏损失率与生态补水流量及其地质条件密切相关,在2020年春季官厅水库约 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 生态补水情景时河道平均河道渗漏损失率约20%~40%,该值比2016年(30%~60%)和2019年(41%~58%)生态补水情景(官厅水库河道径流量约 $40\text{ m}^3/\text{s}$)的平均渗漏损失率小,卢沟桥断面以上的河道渗漏损失与补水流量近似呈指数衰减关系。

(2)2020年4月20日永定河生态补水开始,至6

月1日,河道周边77眼观测井地下水位动态呈现不同规律,包括显著回升、变化不显著和持续下降三种规律,其中水位上升区主要在三家店水文站上游和卢沟桥水文站周边,水位上升值最大约为20 m。

(3)根据地下水均衡原理和相关分析与聚类分析方法,2020年春季永定河生态补水的77眼监测井的地下水位动态被分为4种类型:河道渗漏补给主控型、河道渗漏和降水主控型、河道渗漏—降水—地下水开采作用明显型、河道渗漏—降水—地下水开采作用不明显型。受河道渗漏补给主控型的地下水位动态监测井主要位于自雁翅站到卢沟桥下游5 km左右的河道周边。

(4)通过12眼河道渗漏补给主控型的监测井地下水动态分析发现,从河道上游至下游地下水位动态响应存在明显的滞后性。

永定河生态补水是地下水动态变化的外因,而地质条件是地下水动态变化的内因。对于地质条件的控制作用尚待进一步研究;永定河生态补水流量仍需从河道径流、地下水动态和生态响应方面综合研究。

参考文献(References):

- [1] 张琳. 民国以来永定河流域北京段生态环境变迁研究[D]. 北京:北京林业大学, 2015. [ZHANG L. On the ecological change of the Beijing section of the Yongding River Basin: from the republican period to present [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015. (in Chinese)]
- [2] 纪玉琨,武春侠,朱毕生. 新时期永定河流域生态修复思考[J]. 水利发展研究, 2018, 8(11): 31-34. [JI Y K, WU C X, ZHU B S. Ecological restoration of Yongding River Basin in the new period [J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(11): 31-34. (in Chinese)]
- [3] 王立发,邢国章,江剑,等. 北京市永定河地下水库水资源储蓄能力研究[J]. 城市地质, 2013, 8(1): 18-22. [WANG L F, XING G Z, JIANG J, et al. Study on water resources storage capacity of Yongding River underground reservoir in Beijing [J]. Urban Geology, 2013, 8(1): 18-22. (in Chinese)]
- [4] 张院,寇文杰,刘凯,等. 北京西郊地区地下水恢复适宜水位分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 108-111. [ZHANG Y, KOU W J, LIU K, et al. Analysis of suitable groundwater recovery level in western part of Beijing [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(5): 108-111. (in Chinese)]
- [5] HAO Q C, SHAO J L, CUI Y L, et al. Applicability of artificial recharge of groundwater in the Yongding River alluvial fan in Beijing through numerical simulation[J]. Journal of Earth Science, 2014, 25(3): 575-586.
- [6] 郝奇琛,邵景力,李宇,等. 基于遗传算法的地下水人工回灌系统优化——以北京永定河冲洪积扇为例[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 67-71. [HAO Q C, SHAO J L, LI Y, et al. Optimization of artificial recharge of groundwater system based on parallel genetic algorithm—a case study in the alluvial fan of Yongding River in Beijing [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 67-71. (in Chinese)]
- [7] 杨小芳,王明玉,王丽亚,等. 永定河生态修复地下水位主控因素与数值模拟预测不确定性[J]. 中国科学院大学学报, 2015, 32(2): 192-199. [YANG X F, WANG M Y, WANG L Y, et al. Investigation of key controlling factors and numerical simulation uncertainty of the groundwater level accompanying with Yongding River ecological restoration [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(2): 192-199. (in Chinese)]
- [8] HU H Z, MAO X M, YANG Q. Impacts of Yongding river ecological restoration on the groundwater environment: scenario prediction [J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-15.
- [9] 潘安君. 永定河“以水开路、用水引路”生态补水探索[J]. 北京水务, 2020(3): 1-3. [PAN A J. Exploration on ecological water replenishment of Yongding River by “opening the way with water and leading the way with water” [J]. Beijing Water Affairs, 2020(3): 1-3. (in Chinese)]
- [10] 尚守忠. 北京地区地下水动态预测方法[J]. 水文地质工程地质, 1983(2): 13-18. [SHANG S Z. Groundwater dynamic prediction method in Beijing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1983(2): 13-18. (in Chinese)]
- [11] 向东进. 实用多元统计分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2005. [XIANG D J. Applied multivariate statistical analysis [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2005. (in Chinese)]
- [12] 王大纯. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995. [WANG D C. Fundamentals of hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. (in Chinese)]