

通过永定河渗漏补给地下水的适宜性评估研究

曹欣怡, 翟远征, 李木子, 潘成忠, 郑富新, 芦红, 夏雪莲, 滕彦国, 王金生

The suitability assessment of groundwater recharge by leakage of the Yongding River

CAO Xinyi, ZHAI Yuanzheng, LI Muzi, PAN Chengzhong, ZHENG Fuxin, LU Hong, XIA Xuelian, TENG Yanguo, and WANG Jinsheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107069>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

永定河生态补水的地下水位动态响应

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

胡立堂, 郭建丽, 张寿全, 孙康宁, 杨郑秋 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 5-11

海原盆地地下水咸化特征和控制因素

Groundwater salinization characteristics and controlling factors in the Haiyuan Basin

王雨山, 李成, 李海学, 程旭学, 刘伟坡, 张梦南 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 10-17

“开敞系统”下单向冻融试验装置的研制与应用

Development and application of the unidirectional freezing-thawing test device under the “open-system conditions”

陈新瑞, 宋玲, 孙雯, 许清峰, 刘沛凯, 惠强, 李鑫鑫, 吴浩 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 69-78

伊犁河支流大西沟河水与地下水转化关系研究

A study of the conversion between the Daxigou river and groundwater

张琛, 段磊, 刘明明, 李瑛, 宋浩 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 18-18

同位素技术解析安阳河与地下水相互作用

Isotope analyses of the interaction between the Anyang River and groundwater

张敏, 平建华, 禹言, 黄先贵, 朱亚强, 程玉刚 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 31-39

西北内陆盆地降水入渗补给季节性变化——以新疆昌吉地下水均衡试验场为例

Seasonal variation in recharge of infiltration from precipitation for the inland basins of northwestern China: taking the Changji groundwater balance test station in Xinjiang as an example

齐子萱, 周金龙, 季彦桢, 孙英, 王新中, 郑玉莲 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 12-20



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202107069

曹欣怡, 翟远征, 李木子, 等. 通过永定河渗漏补给地下水的适宜性评估研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 20-29.

CAO Xinyi, ZHAI Yuanzheng, LI Muzi, *et al.* The suitability assessment of groundwater recharge by leakage of the Yongding River[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 20-29.

通过永定河渗漏补给地下水的适宜性评估研究

曹欣怡¹, 翟远征¹, 李木子², 潘成忠¹, 郑富新¹, 芦红¹, 夏雪莲¹, 滕彦国¹, 王金生¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 受气候变化和人类活动等因素的综合影响, 地下水超采和含水层水量亏空已成为备受关注的全球性问题。为了弥补含水层水量亏空和促进地下水资源涵养, 已探索出多种人为干预地下水补给的措施, 其中通过河道开展地下水人工补给由于具有明显优势而受到重视。已有实践表明, 受渗漏补给潜力和包气带调蓄能力等的限制, 并不是所有河流或河段都适宜开展地下水人工补给工作。目前缺乏为大家广泛接受的适宜性评估方法。本研究以永定河生态补水为契机, 以北京平原段河道和下伏含水层为研究区开展了案例研究, 并用实测数据对研究结果进行了检验。应用指标体系法建立的适宜性评估模型(LMBGITSC模型)包括河床土地利用类型、河床介质类型、河床宽度、河床地形坡度、包气带介质类型、包气带厚度、包气带给水度、包气带水平渗透性等 8 个指标。案例研究结果表明, 沿河流流向, 通过河道渗漏补给地下水的适宜性由好变差(防渗河段除外)。该规律主要受渗漏补给潜力和包气带调蓄能力控制, 因此适宜性也呈现出“阶梯式”演变规律。检验结果表明所建的评估方法适用性较好。该方法具有可移植性, 因此也可为其他同类地区提供参考。

关键词: 河道补水; 地下水补给; 适宜性评估; 指标体系法; 永定河

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)01-0020-10

The suitability assessment of groundwater recharge by leakage of the Yongding River

CAO Xinyi¹, ZHAI Yuanzheng¹, LI Muzi², PAN Chengzhong¹, ZHENG Fuxin¹, LU Hong¹,
XIA Xuelian¹, TENG Yanguo¹, WANG Jinsheng¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Due to the effect of climate changes and human activities, groundwater over-exploitation and aquifer depletion have become global issues of concern. Artificial recharge of groundwater through a river has been paid more attention among a variety of artificial intervention measures. It is found that not all rivers or river reaches are suitable for artificial recharge of groundwater owing to the limitations of recharge potential by infiltration and storage capacity of the vadose zone. At present, there is still a lack of widely accepted suitability assessment methods. In this study, the Yongding River in the Beijing Plain section and the underlying aquifer are taken as the study area and the case study is carried out. Moreover, the measured data are used to verify the results. The suitability assessment model (LMBGITSC model) constructed by the index system method includes eight indexes: land use types of riverbed, sediment types of riverbed, channel width, channel topographic slope, medium types of

收稿日期: 2021-07-29; 修订日期: 2021-09-18

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2018ZX07101005-04); 国家自然科学基金项目(41831283)

第一作者: 曹欣怡(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事地下水研究工作。E-mail: 18844120690@163.com

通讯作者: 翟远征(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事地下水研究工作。E-mail: diszyz@163.com

the vadose zone, thickness of the vadose zone, specific yield of the vadose zone and horizontal permeability of the vadose zone. The results show that the suitability of groundwater recharge in the Yongding River changes from good degree to medium degree along the river flow direction (except the reaches carried out anti-seepage engineering), presenting a "step-type" evolution law. The proposed method is of good applicability and can also provide reference for similar regions.

Keywords: river water supply; groundwater recharge; suitability assessment; index system method; Yongding River

地下水是人类非常重要的用水来源,甚至是某些干旱半干旱地区的唯一饮用水源。近年来,在人类活动和气候变化的双重影响下,很多地区的地下水位持续下降,引发了地面沉降、海水入侵、地裂缝等地质灾害^[1]。地下水超采和含水层水量亏空成为备受关注的全球性问题。缓解现状的途径可概括为减少地下水的开采和增加补给方面^[2]。在人口密集区,单靠减少地下水开采解决该问题的作用有限。人为干扰地下水补给措施被日益关注^[3-6]。地下水人工回灌已在很多地区被广泛应用。回灌方式包括通过将地表水注入盆地、河道、沟壑使其下渗补给地下水和向竖井中注水直接补给地下水^[7-8]。其中,相对于竖井回灌,通过河道渗漏补给地下水的方式不会发生堵塞、入渗条件好、无需占用额外的土地资源、效果良好^[9],因而受到广泛关注。

已有实践表明,河道渗漏受河床介质类型、河床过水断面面积、含水层赋存条件和地下水开采强度等多种因素的影响,并不是所有河流或河段都适宜开展地下水人工补给工作^[10-14]。国内外研究集中在河道渗漏规律^[15]、河道渗漏补给量^[16-17]、河道渗漏对地下水的影响^[18-19]、地下水调蓄潜力^[7,20-21]等方面。然而通过河道补水渗漏补给地下水是一个系统工程,它受到地表条件和地下条件的共同作用,不能割裂。目前尚缺乏综合的、为大家广泛接受的考虑各类地表条件和地下条件的补水适宜性定量评估方法。

本研究以永定河生态补水^[22-23]为契机,以北京平原段河道和下伏含水层为研究区,旨在建立通过河道渗漏补给地下水的适宜性评估方法,通过在永定河北京平原段的应用,为永定河生态补水提供科学依据,并为此类通过河道补水渗漏补给地下水的工程提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

永定河是海河流域的主要河流系统之一,由发源

于山西省的桑干河和发源于内蒙古的洋河 2 条支流汇聚而成,最终流入渤海。永定河北京段可分为山峡段(108.5 km)、平原北段(18.4 km)和平原南段(60.8 km)。官厅坝下到三家店为山峡段,三家店以下为平原段,流经门头沟、石景山、丰台、房山和大兴 5 个区^[18-19]。本文以永定河北京平原段(三家店到梁各庄)为研究区(图 1),研究通过永定河渗漏补给地下水的适宜性。

研究区为暖温带半干旱大陆性季风气候,多年平均气温 11.7℃,多年平均降水量 584.7 mm,年际变化较大^[24],年蒸发量 1 500 ~ 2 200 mm。该区北部的第四系沉积物较薄,岩性颗粒较粗,主要为砂卵砾石,层次单一,向南逐渐演变为粉细砂,岩层也由单层增加到多层。含水层主要接受大气降水、地表水、城市排水管网渗漏的补给和山区侧向补给,其中大气降水是最主要的补给。地下水排泄以人工开采为主,还包括从侧向边界的流出和蒸发排泄^[25-26]。

1.2 评估方法

1.2.1 方法框架

通过河道补水补给地下水的适宜性主要受渗漏补给潜力和包气带的调蓄能力控制。河水渗漏补给地下水的潜力越大,蒸散损耗越小,补水效率越高;包气带的调蓄能力越大,能够接纳的水量越大,越能有效补给地下水水位下降区,使地下水位逐渐恢复(图 2)。基于此思路,设计评估方法的流程总体上包括:评估范围划定、渗漏补给潜力评估、包气带调蓄能力评估、适宜性等级划分和成图、结果分析与检验 5 个步骤,检验工作可以在有条件的地区开展,以使评估结果更具有参考价值(图 3)。

1.2.2 评估指标体系建立

从渗漏补给潜力和包气带的调蓄能力 2 个方面选择评估指标(图 3),建立 LMBGITSC 通过河道渗漏补给地下水的适宜性评估模型。

河床的土地利用类型会影响河水的下渗过程。存在硬化防渗层的河段,水很难下渗,补水效果最差;有河水覆盖的河段,其下部的河床和包气带含水率较

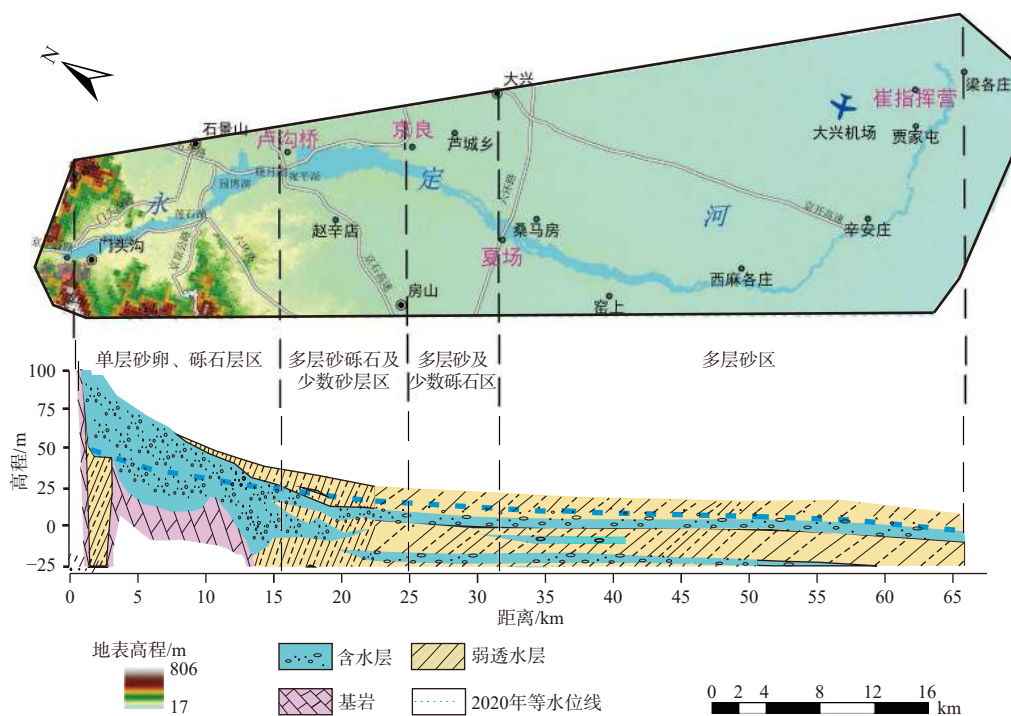


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

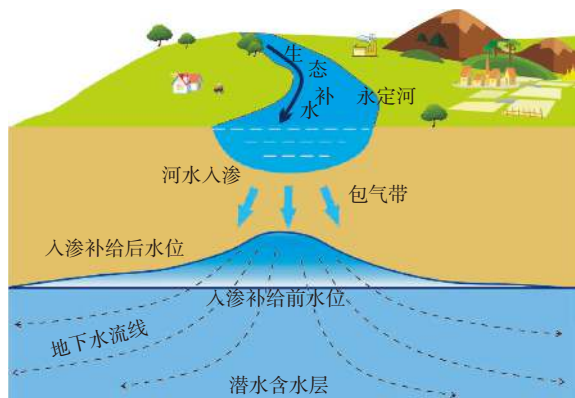


图 2 河水入渗补给地下水

Fig. 2 River water infiltrating to recharge groundwater

大,且水面蒸发大,河道补水后,对地下水的补给效果也较差^[4]。已经长有林草的断流河段,补水后河水较易下渗,但是植被具有一定的截流作用,相对于裸地,水较难下渗。因此,将河床土地利用类型划分为已硬化段、水域、林草地和裸地 4 类。

河床的介质类型在很大程度上影响河水的下渗过程。比如淤泥质的河床,其河水和地下水的水力联系相对较弱,容易形成脱节型河流。将河床介质分为以下 10 类:非胀缩和非凝聚性黏土、黏质壤土(黏土)、粉质壤土、壤土、砂质壤土(砂土)、胀缩或凝聚性黏土、粉砂和细砂、砾石/中砂和粗砂、卵砾石、河

床薄或缺失。

河宽宽度对河道补水后的河水下渗过程的影响主要由可下渗面积体现,河床越宽,单位长度河段内河水下渗面积越大,可下渗的水分越多,对地下水的补给量越大。

河床地形坡度对于水分下渗过程的影响主要是地形坡度大时,产生的径流量大,下渗水量减少,不利于河水下渗补给地下水^[3]。

包气带是指潜水水位以上或承压含水层顶板以上、土壤层以下的非饱和区或非连续饱和区。包气带介质类型会影响河水的垂向入渗。包气带介质分为以下 10 种类型:黏土、亚黏土、亚砂土、粉砂、粉细砂、细砂、中砂、粗砂、砂砾石、卵砾石。颗粒粒径越大、越松散,河水越容易下渗补给地下水。

包气带厚度指从地表到地下水位距离。通过河道补水补给地下水时,包气带厚度越大,潜在的包气带调蓄能力越大,补水效率更大。虽然包气带厚度会影响河水的入渗时间,但是对通过河道补水渗漏补给地下水来说,包气带厚度只是影响水抵达地下水面的时间,即厚度越大,所需的时间越长,但是并不会显著影响补给量,因为漏到地下的水在重力作用下只能向地下水水面处入渗,最终成为狭义的“地下水”;也不会影响地下储水空间的“接纳能力”,因为接纳能力仅

性为目标层 A , 渗漏补给潜力和包气带调蓄能力为准则层, 分别记为 B_1 、 B_2 , 河床土地利用类型、河床介质类型、河床宽度、河床地形坡度、包气带介质类型、包气带厚度、包气带给水度、包气带水平渗透性为指标层, 分别记为 $C_1 \sim C_8$ 。渗漏补给潜力是通过河道补水渗漏补给地下水的前提, 若水分不能下渗, 则无法对地下水进行补给, 因此认为渗漏补给潜力比包气带的调蓄能力更重要。采用 1~9 标度法^[28]进行赋值。据此确定准则层权重矩阵(表 2)。通过两两对比各指标的相对重要性, 确定指标层权重矩阵(表 3~表 4)。

表 2 准则层权重矩阵

Table 2 Weight matrix of the criterion layer

评估指标	B_1	B_2
B_1	1	3
B_2	1/3	1

表 3 B_1 - C 权重矩阵Table 3 Weight matrix of B_1 - C

评估指标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
C_1	1	3	7	9	3
C_2	1/3	1	3	5	1
C_3	1/7	1/3	1	3	1/5
C_4	1/9	1/5	1/3	1	1/7
C_5	1/3	1	5	7	1

表 4 B_2 - C 权重矩阵Table 4 Weight matrix of B_2 - C

评估指标	C_6	C_7	C_8
C_6	1	3	1/3
C_7	1/3	1	1/5
C_8	3	5	1

利用方根法计算判断矩阵的最大特征值和特征向量, 并进行一致性检验, 经过层次总排序后获得最终各指标的权重值^[29](表 5)。

表 5 各评估指标权重

Table 5 Weights of each evaluation index

评估指标	权重
C_1	0.365
C_2	0.141
C_3	0.050
C_4	0.026
C_5	0.168
C_6	0.065
C_7	0.026
C_8	0.159

1.2.5 适宜性评估结果

适宜性指数 RI 表示为:

$$RI = \frac{W_L R_L + W_M R_M + W_B R_B + W_G R_G + W_I R_I + W_T R_T + W_S R_S + W_C R_C}{W_L R_L + W_M R_M + W_B R_B + W_G R_G + W_I R_I + W_T R_T + W_S R_S + W_C R_C} \quad (1)$$

式中: RI ——适宜性指数;

W ——相应指标的权重;

R ——相应指标的评分值;

L ——河床土地利用类型;

M ——河床介质类型;

W ——河床宽度;

G ——河床地形坡度;

I ——包气带介质类型;

T ——包气带厚度;

S ——包气带给水度;

C ——包气带水平渗透性。

根据 RI 将评估区通过河道渗漏补给地下水的适宜性划分为五个等级(表 6)。利用 ArcGIS 计算得到评估区通过河道渗漏补给地下水的适宜性分区图。

表 6 通过河道补水渗漏补给地下水的适宜性分级

Table 6 Classification of the suitability of groundwater recharge by leakage of a river

适宜性指数 RI	等级	适宜性评估
8~10分	I级	优等适宜区
7~8分	II级	良好适宜区
6~7分	III级	中等适宜区
5~6分	IV级	较差适宜区
<5分	V级	最差适宜区

1.3 数据来源

河床土地利用类型和河床宽度数据通过遥感影像解译得到。河床介质类型和包气带介质类型根据研究区水文地质剖面图和相关文献资料获得。根据研究区的 DEM 高程数据在 ArcGIS 中进行坡度计算得到河床地形坡度。包气带厚度根据从北京水务局获取的地下水位埋深数据得到。包气带给水度和包气带水平渗透性数据根据实测数据和经验值综合得到。

2 结果与讨论

2.1 参数分区和评分

根据本次建立的方法, 利用获取的研究区河床土地利用类型、河床介质类型、河床宽度、河床地形坡度、包气带介质类型、包气带厚度、包气带给水度、包气带水平渗透性数据, 绘制各指标分区图, 并根据表 1 为各个指标赋值(图 4)。河床土地利用类型多为林草地, 除了五湖的防渗层外, 部分河段为水域。河床介质由北向南颗粒逐渐变细。河床宽度主要为 500~1 000 m 及 1 000 m 以上, 河床地形坡度较平缓, 基本在 0~2 %

之间。包气带介质类型服从冲洪积扇岩性由扇顶到前缘的变化规律,由卵砾石逐渐变为颗粒较细的粉细砂,给水度、包气带水平渗透性也因此由北到南逐渐减小。包气带厚度从北到南也逐渐减小。

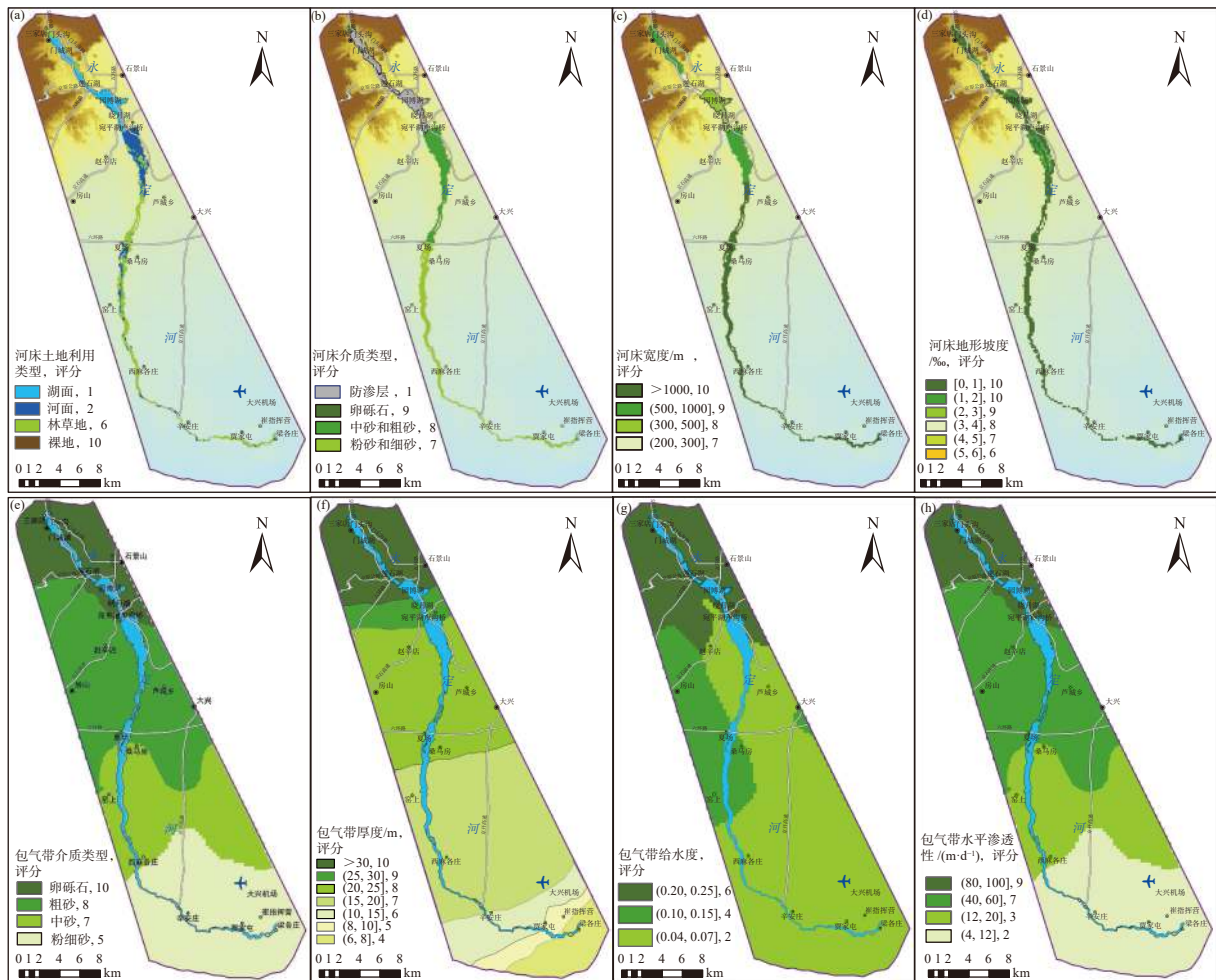


图 4 永定河补水适宜性评估指标分区

Fig. 4 Assessment indexes partitions of the water supply suitability in the Yongding River

2.2 适宜性分区

根据式(1),在 ArcGIS 中叠加计算各评估指标,根据计算出的适宜性指数 RI 值和表 6 进行永定河补水适宜性分区,并绘制永定河补水适宜性分区图(图 5)。

研究区补水条件较好,因此适宜性分区图只包含前 4 个等级。根据评估结果可以看出,永定河最适宜进行补水的河段为三家店到南六环段(除五湖防渗段外),这主要是由于永定河上游包气带岩性为砂卵砾石,渗透性好,水文地质条件好,利于河水的下渗,且该段包气带较厚,给水度和渗透系数较大,加上近些年地下水超采严重,含水层亏空大,具有良好的调蓄能力,补水效率高。中间的五湖段由于实施了防渗工程,阻挡了河水下渗,所以不利于补水。南六环到西麻各庄之间由于河床宽度较大、河床地形坡度平缓,

且水文地质条件较好,含水层亏空较大,可以补给更多的水量,因此,较适宜补水,但总体不及上游河段。西麻各庄到梁各庄段河床渗透性一般,介质类型主要为粉细砂,不利于河水的下渗及侧向运移,且包气带厚度较小,含水层亏空较小,因此该河段进行补水的适宜性为中等。

2.3 结果检验

2.3.1 结果与实测数据对比

从 2020 年实测地下水位变幅(图 6)可以看出,永定河进行生态补水 1 个月后和 2 个月后,三家店到南六环段两岸延伸地区的地下水水位出现了明显的上升,说明在该河段进行河道补水后,河水可以下渗到地下水面,有效补给含水层。对比本研究得到的适宜性分区,除了防渗段外,三家店到南六环河段均为优

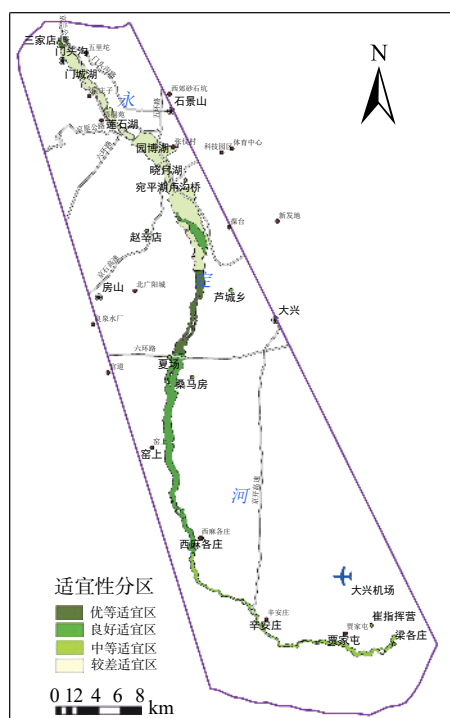


图 5 通过永定河渗漏补给地下水的适宜性分区

Fig. 5 Suitability indexes partitions of groundwater recharge by leakage of the Yongding River

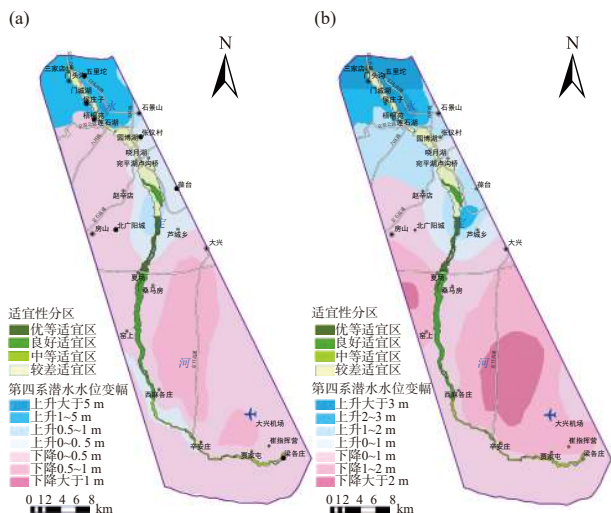


图 6 补水开始一个月后 (a) 和两个月后 (b) 的地下水位变幅 (改编自文献 [19])

Fig. 6 Variation of groundwater level one month (a) and two months (b) after the start of water supply (adapted from [19])

等适宜区,说明在该河段的非防段进行河道补水可以有效补给地下水。虽然防渗层阻碍了河水的下渗,但是由于该河段位于冲洪积扇的扇顶,包气带介质类型为砂卵砾石,其垂向和水平方向的渗透性都很大,非常利于河水的下渗和地下水的侧向迁移。因此河水从非防渗段下渗后可以快速地向四周进行横向扩展,

从而使该河段两岸的地下水位都明显上升。并且在河流水位较高时,水流可以超越防渗层高度,发生河道内的侧渗。可以看出,在补水 2 个月后,南六环以上河段地下水位上升区的范围明显扩大,说明河水对地下水产生了有效的侧向补给。同时,除了三家店到梧桐苑段,芦城乡东侧局部区域地下水的升幅相对较大,与该段为优等适宜区相吻合,进一步验证了本模型的正确性。

虽然根据评估结果,南六环到梁各庄的适宜性较好,但是地下水水位下降了,这主要与该河段两岸地区的地下水动态成因类型有关。该河段地下水动态主要受河流入渗、降水和地下水开采 3 种因素的影响,而上游河段主要受河流入渗和降水的影响^[30]。由于 6 月前降水量小,地下水水位受降水影响不大^[18],3—5 月是春灌时期,农作物需水量大,开采量大,往年同期地下水水位呈下降趋势。因此,该河段两岸地下水水位的下降原因是河水入渗补给量远小于开采量。另一原因是,从三家店放水后,经过上游河段的河水下渗过程,到达下游河段的河道过水量大大减小,地下水得到的有效补给量也随之大大减少。

2.3.2 渗漏补给潜力

通过河道渗漏产生的地下水补给量是衡量渗漏补给潜力的直接指标。据研究,2019 年补水后三家店—北广阳城段的地下水补给量可达 $1.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[17],三家店—卢沟桥河道渗漏损失率约为 58%。2020 年补水后卢沟桥—南六环路的河道渗漏损失率约 40%^[18]。由此可以说明三家店—南六环段渗漏补给潜力非常大。从地下水水位变幅来看(图 6),梧桐苑以上河段地下水水位的升幅最大,梧桐苑到南六环段次之,这主要由该河段的河床介质和包气带介质类型决定。河水的下渗能够引起地下水水位变化,但是河水由地表经过包气带下渗到达地下水面需要一定的时间,即地下水水位对河道补水的响应存在滞后性。地下水响应越快,说明包气带的导水能力越强,含水层越容易得到补给。因此,地下水水位上升的滞后时间能够反映包气带的导水能力。4 月 23 日地表水头到达位于城市段的石景山莲石湖,4 月 27 日地下水水位开始上升,滞后时间约为 4 d。5 月 8 日地表水头到达永定河郊野段的大兴赵村,5 月 24 日地下水水位开始上升,滞后时间约为 16 d^[19]。这也证明永定河北京段上游河段包气带导水能力更强,渗漏补给潜力更大,更适宜开展地下水补水工程。

2.3.3 包气带的调蓄能力

包气带的调蓄能力主要与包气带厚度和渗透性有关。据研究,上游三家店水库一卢沟桥一大兴段对含水层的横向影响范围由大变小,夏场以上河段影响范围可达 10 km^[22]。说明上游河段的河水下渗后可以迅速向河道两侧运移,补给面积更大,包气带的调蓄能力更强,从而补水效率更大。

从地下水水位的涨落速度看,(图 6),三家店到梧桐苑段的地下水水位在补水 1 个月后迅速上升,而在 2 个月之后,水位出现回落,说明该段包气带的调蓄能力强,地下水可以向四周横向运移,迅速消化大量入渗的河水。而梧桐苑到南六环段相比于补水 1 个月后,2 个月后的地下水水位出现小幅上升,说明该段河道补水有效补给了含水层,且补给到上游三家店到梧桐苑段的地下水也向该段发生了运移。

根据各监测点的地下水动态数据(图 7)分析,位于门头沟和石景山区的梧桐苑及以上河段在 2020 年 4 月补水后,6 月地下水水位出现了明显上升,7 月已经下降,说明该段地下水对河道补水的响应非常迅速,也说明包气带调蓄能力巨大。据研究,该地段地下水库的回灌能力可达 $2.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[21]。而同样距离河道较远的大兴区,地下水水位 8 月才开始上升,10 月出现下降趋势,包气带调蓄能力较差。同样距离河道较远的丰台(除张仪村)和房山观测点相比,丰台区的地下水水位 6 月开始逐渐上升,而后受到降雨和冬季补水的影响,持续上升。而房山区的地下水水位 8 月才开始上升。包气带表现出来的调蓄能力从永定河平原段上游向下游逐渐减弱,与水文地质条件从冲洪积扇扇顶到扇缘的变化规律一致,也验证了本模型的补水适宜性分区结果。

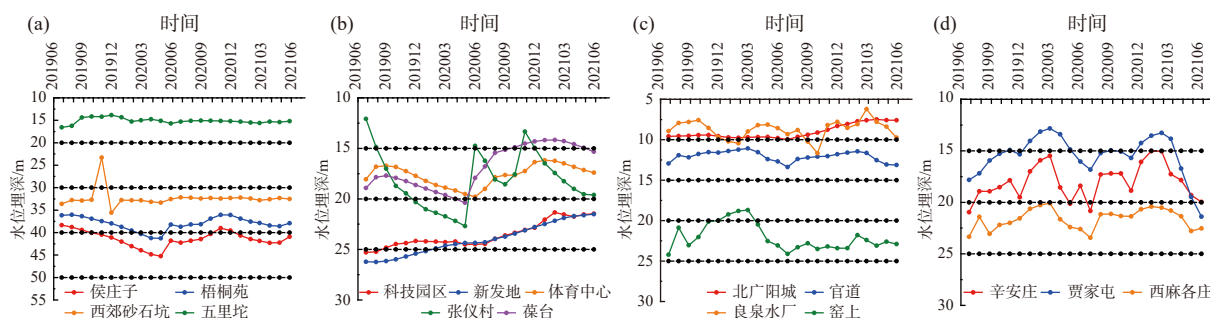


图 7 地下水位埋深的时间变化: (a) 门头沟和石景山区 (b) 丰台区 (c) 房山区 (d) 大兴区

Fig. 7 Temporal variation of groundwater level depth: (a) Mentougou district and Shijingshan district; (b) Fengtai district; (c) Fangshan district; (d) Daxing district

3 结论

(1) 本研究建立了通过河道渗漏补给地下水的适宜性评估模型—LMBGITSC 模型,其中包括河床土地利用类型、河床介质类型、河床宽度、河床地形坡度、包气带介质类型、包气带厚度、包气带给水度、包气带水平渗透性 8 个指标,并利用案例区的实测数据验证了模型的正确性。

(2) 研究结果表明永定河北京平原段整体为砂质高渗漏河道,通过生态补水补给地下水的适宜性总体较好。其中,三家店到南六环段(除五湖防渗段外)为优等适宜区;南六环到西麻各庄段为良好适宜区;西麻各庄到梁各庄段为中等适宜区。

参考文献 (References):

[1] 郭海朋,李文鹏,王丽亚,等. 华北平原地下水位驱动

下的地面沉降现状与研究展望[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 162 - 171. [GUO Haipeng, LI Wenpeng, WANG Liya, et al. Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 162 - 171. (in Chinese with English abstract)]

[2] DILLON P, PAGE D, VANDERZALM J, et al. A critical evaluation of combined engineered and aquifer treatment systems in water recycling[J]. Water Science and Technology, 2008, 57(5): 753 - 762.

[3] JASECHKO S, SEYBOLD H, PERRONE D, et al. Widespread potential loss of streamflow into underlying aquifers across the USA[J]. Nature, 2021, 591(7850): 391 - 395.

[4] 费宇红,崔广柏. 地下水人工调蓄研究进展与问题[J]. 水文, 2006, 26(4): 10 - 14. [FEI Yuhong, CUI

- Guangbo. Development and problems: research on artificial adjustment of groundwater storage[J]. *Journal of China Hydrology*, 2006, 26(4): 10 – 14. (in Chinese with English abstract)
- [5] YIN W, TENG Y, ZHAI Y, et al. Suitability for developing riverside groundwater sources along Songhua River, Northeast China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2018, 24(8): 2088 – 2100.
- [6] WANG L, YE X, DU X. Suitability evaluation of river bank filtration along the Second Songhua River, China[J]. *Water*, 2016, 8(5): 176.
- [7] 王兆庚, 郭祺忠, 练继建, 等. 建筑屋面雨水有压回补地下水理念与潜力评估[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 999 – 1009. [WANG Zhaogeng, GUO Qizhong, LIAN Jijian, et al. Concept and assessment of utilizing rooftop rainwater for pressurized groundwater recharge[J]. *Journal of Hydrology Engineering*, 2019, 50(8): 999 – 1009. (in Chinese with English abstract)]
- [8] GHAZAVI R, BABAEI S, ERFANIAN M. Recharge wells site selection for artificial groundwater recharge in an urban area using fuzzy logic technique[J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(12): 3821 – 3834.
- [9] DILLON P, STUYFZAND P, GRISCHEK T, et al. Sixty years of global progress in managed aquifer recharge[J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, 27(1): 1 – 30.
- [10] 席海洋, 冯起, 司建华, 等. 黑河下游额济纳三角洲河道渗漏对地下水补给研究综述[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1241 – 1247. [XI Haiyang, FENG Qi, SI Jianhua, et al. A review of river course leakage in the Ejina delta in the lower reaches of Heihe River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1241 – 1247. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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 Xiaofang, WANG Mingyu, WANG Liya, 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 with English abstract)]
- [12] BOUWER H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering[J]. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 121 – 142.
- [13] 束龙仓, 陶玉飞, 刘佩贵. 考虑水文地质参数不确定性的地下水补给量可靠度计算[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 346 – 350. [SHU Longcang, TAO Yufei, LIU Peigui. Reliability calculation method for groundwater recharge in consideration of uncertainty of hydrogeological parameters[J]. *Journal of Hydrology Engineering*, 2008, 39(3): 346 – 350. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王诏楷, 束龙仓, 刘波, 等. 孔隙结构对地下水回灌颗粒堵塞影响的试验研究[J]. 水利学报, 2021, 52(4): 498 – 506. [WANG Zhaokai, SHU Longcang, LIU Bo, et al. Experimental research on the effects of pore structure on particle clogging of groundwater recharge[J]. *Journal of Hydrology Engineering*, 2021, 52(4): 498 – 506. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 钟媛媛. 汾河上游河道渗漏对晋祠泉域岩溶地下水影响的数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017. [ZHONG Yuanyuan. Numerical simulation research on influence of channel leakage in Fenhe River upstream on karst groundwater in Jinci Spring catchment [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张广朋. 塔里木河干流上中游河床沉积物渗透系数及渗漏水量研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016. [ZHANG Guangpeng. Study on hydraulic conductivity of riverbed sediment and leakage water in upper and middle stream of Tarim River [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 马尧, 杨勇, 胡国金, 等. 永定河(北京段)生态补水对地下水的补给分析[J]. 北京水务, 2020(4): 22 – 27. [MA Yao, YANG Yong, HU Guojin, et al. Analysis of groundwater recharge by ecological water supply project in Yongding River (Beijing Section)[J]. *Beijing Water*, 2020(4): 22 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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. [HU Litang, GUO Jianli, ZHANG Shouquan, 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 with English abstract)]
- [19] 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 Haijun, CUI Yijiao, REN Yongqiang, et al. Analysis on the effect of ecological

- water replenishment of Yongding River in spring 2020 on groundwater conservation in Beijing[J]. *Urban Geology*, 2021, 16(2): 133 – 138. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张景华, 李世君, 李阳, 等. 北京地下水库建库条件及可利用库容初步分析[J]. *城市地质*, 2017, 12(1): 70 – 76. [ZHANG Jinghua, LI Shijun, LI Yang, et al. Analysis of construction conditions and available storage capacity of the underground reservoir in Beijing basin[J]. *Urban Geology*, 2017, 12(1): 70 – 76. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 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 Lifa, XING Guozhang, JIANG Jian, et al. Study on the infiltration and the storage capability of artificial adjustment on the Yongding River groundwater reservoir in Beijing[J]. *Urban Geology*, 2013, 8(1): 18 – 22. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 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. [WANG Jinyan, WANG Caiyuan, LIU Cuizhu, et al. Analysis on changes of hydrological elements of ecological water supply project in Yongding River[J]. *Beijing Water*, 2020(4): 28 – 31. (in Chinese)]
- [23] 杨勇, 谷健芬, 李元春. 永定河长时放水条件下的入渗能力及影响范围分析[J]. *工程勘察*, 2019, 47(6): 29 – 35. [YANG Yong, GU Jianfen, LI Yuanchun. Analysis on infiltration capacity and influence range of Yongding River under the condition of long-time discharge[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2019, 47(6): 29 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [24] ZHAI Y, GUO Y, ZHOU J, et al. The spatio-temporal variability of annual precipitation and its local impact factors during 1724-2010 in Beijing, China[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(4): 2192 – 2201.
- [25] 翟远征, 王金生. 北京市平原区地下水动态要素的时间变化及其启示[J]. *水利学报*, 2012, 43(9): 1034 – 1041. [ZHAI Yuanzheng, WANG Jinsheng. Temporal variations of elements of groundwater regime in Beijing Plain and its implications[J]. *Journal of Hydrology Engineering*, 2012, 43(9): 1034 – 1041. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 翟远征, 王金生, 郇环, 等. 北京市平原区地下水更新能力变化的动态均衡证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012(1): 198 – 205. [ZHAI Yuanzheng, WANG Jinsheng, HUAN Huan, et al. Groundwater dynamic equilibrium evidence for changes of renewability of groundwater in Beijing Plain[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012(1): 198 – 205. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 中国地质调查局. 地下水脆弱性评估技术要求: GWI-D3[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [China Geological Survey. Technical requirements for groundwater vulnerability assessment: GWI-D3 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)]
- [28] 徐晓敏. 层次分析法的运用[J]. *统计与决策*, 2008(1): 156 – 158. [XU Xiaomin. The application of analytic hierarchy Process[J]. *Statistics & Decision*, 2008(1): 156 – 158. (in Chinese)]
- [29] 芦红, 王丽, 杨鑫鑫, 等. 水力压裂对地下水影响的深部脆弱性评估[J]. *地球科学*, 2019, 44(9): 2920 – 2930. [LU Hong, WANG Li, YANG Xinxin, et al. Deep vulnerability assessment of hydraulic fracturing effect on groundwater[J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 2920 – 2930. (in Chinese with English abstract)]
- [30] SUN K, HU L, GUO J, 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(7): 145489.

编辑: 张若琳