

基于调蓄试验及数值模拟的 北京市西郊地下水库人工补给效果评估

刘记来^{1,2}, 刘 超³, 黄天明¹, 王素芬³, 杜春龙³, 季明锋³

(1.中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
2.北京市地质工程勘察院, 北京 100037; 3.北京市水文总站, 北京 100089)

摘 要:地下水库人工补给的效果评估对于水资源调蓄具有重要意义。本文利用回灌试验和数值模拟研究了北京市西郊地下水水库永定河河道入渗能力。结果表明在调蓄水源为 $3.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 时,永定河河道入渗补给量为 $2.39 \times 10^8 \text{ m}^3$,河道入渗率高达 72.5%,调蓄能力强。三家店水库弃水后河道入渗影响范围为 188 km^2 ,对地下水补给效果明显。可见永定河河道是比较理想的人工调蓄场所,使得南水北调中线工程向北京输水后水资源在丰水年地下水人工补给成为可能。

关键词:地下水库;调蓄试验;西郊地区;地下水数值模拟

中图分类号:P641.25

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2010)03-0033-05

1 引言

随着工农业生产发展以及人口快速增长,人类对水的需求越来越大^[1]。在人们所需的供水水源中,地下水是最为稳定可靠的水源,所以得到了极大的开采利用。然而由于地下水过量开采必然导致地下水水位下降,形成区域性降落漏斗,并且逐年加大,使地下水资源日趋枯竭。为了增加地下水的补给量,采用地下水人工补给措施,人为地调节地下水的开采、补给关系,可以较好地阻止地下水水位下降。从 20 世纪 30 年代以后,对含水层进行直接补给的方法已在很多国家受到广泛重视。近 40 年来世界各国对地下水人工回灌技术极为重视,发展十分迅速,该技术已由单纯增加地下水补给量发展到地下储能、地热开发、控制地表沉降、防治海水入侵和污水处理等。目前国际上把较为盛行的地下水回灌和再利用技术统称为 ASR (Aquifer Storage and Recovery)^[2]。在瑞典、荷兰和德国西部的地下储水库分别可提供该国总供水量的 25%、22%和 40%以上^[3]。实践证明利用含水层进行水资源调蓄是可行的、费用低廉的供水解决方法,不但可保证供水的稳定,而且在许多情况下起到改善水质的作用^[4]。

为缓解水资源不足和调蓄地表径流,从 80 年代起,北京在西郊开展了地下水人工补给的试验研究工作^[5-6],对地下水人工回灌后水动力场、水温度场、水质变化和回灌堵塞问题进行了研究,王新娟等^[7]和张安京等^[8]运用数值模拟模型对北京西郊砂石坑、大口井和河道回灌方案进行模拟预测,提出了一些工程方案。南水北调进京后,北京水资源发生根本性转变,在平水年和丰水年水资源盈余,可人为地将南水北调的余水和本地盈余地

表水等回灌到地下水库中,地下水库中储备的地下水资源可弥补特殊条件、突发事件下南水北调水和地表水资源的不足,提高北京市的供水保证程度。但是随着城市发展,在西郊地区已有的砂石坑被填埋并开发成商业和住宅用地,同时大口井回灌容易引起堵塞等问题,从已进行的大口井人工试验回灌来看,回灌水量比较小,地下水库对其响应的范围和水位升幅有限。曾已有的河道调蓄实验结果分析,河道调蓄是比较理想的方式。另外,在调蓄试验进行中,各水源并持续开采,回灌造成地下水位上升幅度与实际回灌幅度有差别,因此在进行调蓄效果评价时需要消除地下水开采、降雨入渗等影响因素对回灌的影响。本文对 1995~1996 年官厅水库向永定河下泄 $3.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 弃水量时地下水监测成果的基础上^[9],建立数值模拟模型,通过调蓄模型进行识别验证后,对西郊地下水库影响程度进行分析,分别计算弃水和未弃水条件下地下水位变化趋势,科学评价河道弃水入渗地下水位上升程度和影响范围,可以作为一种大型回灌试验的评价方法。

2 研究区概况

研究区位于北京西郊,范围包括石景山区、门头沟平原地区、海淀区、丰台区、宣武区和西城区等地区,面积 400 km^2 ,处于永定河冲洪积扇的中上部(见图 1)。研究区降水的年际、年内变化十分悬殊,最大年降水量达 1406 mm ,最小年降水量仅有 242 mm 。大气降水主要集中在 6~9 月份,可占年降水总量的 85%以上。研究区是北京市重要的地下水源,拥有储量丰富且水质优良的地下水资源,目前市第三水厂、石景山水厂、首钢

收稿日期:2010-03-15

基金项目:2009 年北京市组织部千百万人才资助项目(2009D010002000002)

作者简介:刘记来(1976-),男,湖南新化人,博士研究生,主要从事地下水资源评价工作。

自备井等大型水源地均位于西郊地下水库范围内,供水规模为 $53.5\times 10^4\text{m}^3/\text{d}$,是北京市主要的供水水源地^[10]。长期以来,快速的城市发展导致过量开采地下水;地下水位持续下降说明本地水资源已无法支撑目前城市发展的规模和生产、生活方式,水资源短缺与经济社会发展对水资源需求的增长不相适应。特别1999年以来北京10年干旱,造成西郊地区地下水位急剧下降。

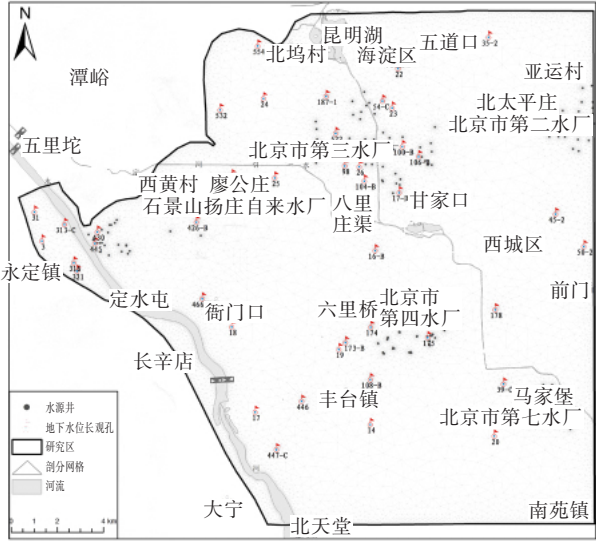


图1 研究区位置及数值模拟模型网格剖分

Fig. 1 The study area and mesh generation for the numerical simulation

3 资料与研究方法

本文所收集的地下水位动态监测资料来自北京市水文地质工程地质大队各年的地下水位年鉴,监测频率为5天一次;气象资料收集了1959~2008年北京海淀区、丰台区和石景山区气象站月平均降水资料;各水源地和自备井开采量资料来自1995年用水调研成果;河道弃水资料出自公开发表的文献^[9];钻孔地层资料来自北京市水文地质工程地质大队。研究方法以GIS和数值模拟为工具,首先以Feflow软件平台,建立西郊地区地下水调蓄数值模拟模型,对模型进行识别验证后,计算弃水后补给地下水资源量和在弃水和未弃水条件下区域地下水水位变化趋势,通过不同条件下地下水位对比,应用GIS技术得出弃水补给地下水的影响范围和水位升幅程度。

4 试验过程及水位变化

弃水过程从1995年10月17日~1996年8月31日,分为三个阶段向永定河河道弃水^[9],见表1。扣除出境水量,永定河总的调蓄水量为 $3.3\times 10^8\text{m}^3$ 。

在弃水过程中进行地下水位观测,每个观测孔的观测频率是5 d/次。通过监测表明,弃水后地下水位大幅度上升,离河道越近,水位上升幅度越大(见图2),距离1.2 km观测孔(466)从

1995年10月~1996年2月水位上升15 m。

表1 永定河河道弃水过程

Table 1 The drainage process of the Yongdinghe River

阶段	时段	弃水量/(10^8m^3)	出境量/(10^8m^3)
第一阶段	1995-10-17~1996-1-24	2.09	0.54
第二阶段	1996-05-31~1996-6-10	0.47	0
第三阶段	1996-07-09~1996-08-31	1.66	0.38

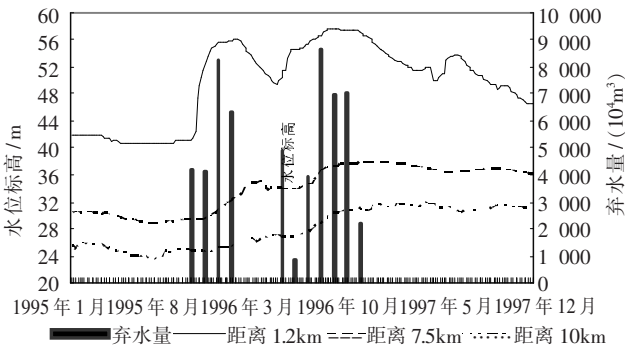


图2 永定河河道弃水与不同距离观测孔动态变化关系

Fig. 2 The drainage of the Yongdinghe River and water level changes at specific distance to river

5 数值模拟模型建立与识别

5.1 概念模型

研究区均由永定河冲洪积扇的砂卵石、砂砾石和含砾石砂组成,其埋藏和分布由西向东呈有规律的变化,按含水层的岩性、结构,大致可以划分为四个含水层组:单层砂卵石砾石含水层,主要分布于永定河河床、河漫滩及一级阶地,位于西钓鱼台~昆明湖以西,含水层渗透性能好,渗透系数 $300\sim 500\text{m}/\text{d}$,大部分地区没有或少量粘性土覆盖;二到三层含卵石砂砾石层主要位于门头村~八里庄~陶然亭~马家堡一带,有2~3层砂卵石砾石含水层,含有透镜状的砂粘土夹层,渗透系数 $50\sim 300\text{m}/\text{d}$;多层中细砂及含砾砂层主要分布在以上地区以东,上覆粘土厚度 $10\sim 15\text{m}$,有4~10层含水层岩性主要为砂砾石及砂层,渗透系数 $30\sim 50\text{m}/\text{d}$ 。

根据上述的水文地质条件、抽水试验成果和钻孔资料(见图3),模型在空间上分为三层,第一层为潜水含水层,底板深度 $40\sim 60\text{m}$;第二层为弱透水层,潜水含水层以下 $5\sim 10\text{m}$;第三层为承压含水层底板深度为 $60\sim 300\text{m}$ 。单一含水层区域为潜水区域,为了适应模拟模型建模的要求,同样划分为三层,但每层的水文地质参数相同。在垂向上除了大气降水补给外,底部含水层与奥陶系灰岩直接接触,接受越流补给。

5.2 数值模拟模型

对于上述非均质、各向异性、空间三维结构、非稳定地下水流系统,采用地下水流连续性方程及其定解条件式(1)来描述。

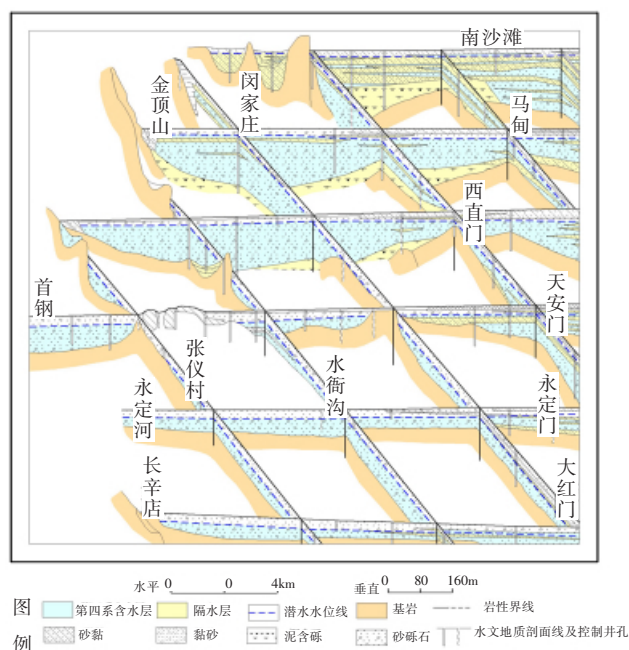


图3 研究区水文地质联合剖面图

Fig. 3 Three-dimensional hydrogeology section for the study area

选择地下水模型软件 FELOW 求解该定解问题,以建立工作区地下水数值模拟模型。

$$\begin{cases}
 S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{(h_s - h)}{\sigma} + \varepsilon & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\
 \mu \frac{\partial h}{\partial t} = K_x \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial h}{\partial z} (K_z + p) + p & x, y, z \in \Gamma_0, t \geq 0 \\
 h(x, y, z, t) \big|_{t=0} = h_0 & x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\
 K_n \frac{\partial h}{\partial n} \big|_{\Gamma_1} = q(x, y, t) & x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0 \\
 \frac{\partial h}{\partial n} \big|_{\Gamma_4} = 0 & x, y, z \in \Gamma_4, t \geq 0
 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Ω 为渗流区域; h 为含水层的水位标高(m); K_x, K_y, K_z 为分别为 x, y, z 方向的渗透系数(m/d); K_n 为边界面法向方向的渗透系数(m/d); S 为承压含水层储水系数(1/d); μ 为潜水含水层的重力给水度; ε 为含水层的源汇项(1/d); p 为潜水面的降水等(1/d); h_0 为含水层的初始水位分布(m); Γ_0 为渗流区域的上边界,即地下水的自由表面; Γ_2 为渗流区域的侧向边界和永定河入渗补给边界; Γ_4 为渗流区域的下边界,即承压含水层底部的隔水边界; $\vec{n}$ 为边界面的法线方向; $q(x, y, z, t)$ 为定义为二类边界的单宽流量($\text{m}^2/\text{d} \cdot \text{m}$),流入为正,流出为负,隔水边界为0,采用不规则三角剖分,剖分后的模拟区共140284个结点,200433个单元格,见图1。

5.3 模型识别与验证

模型的识别和检验过程采用试估-校正法,它属于反求水文

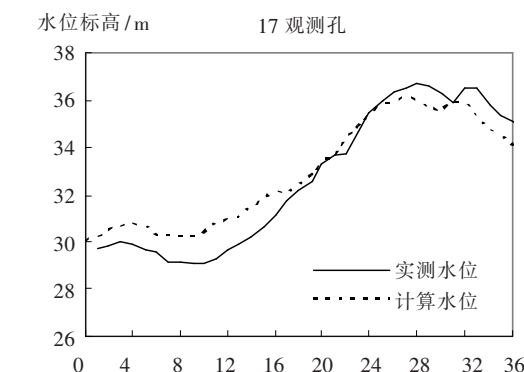
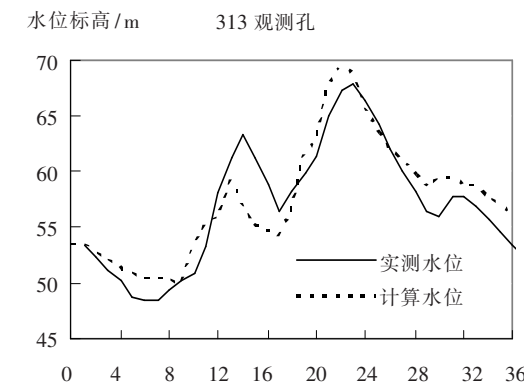
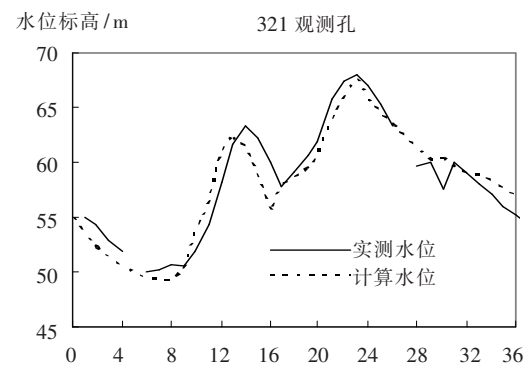
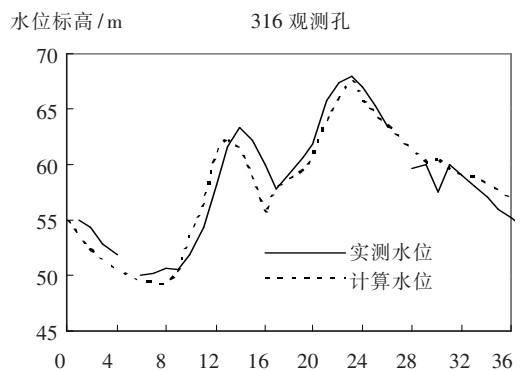


图4 观测孔计算水位与观测水位对比曲线

Fig. 4 Relative curves between the calculating value and observing value in the observation hole

地质参数的简介方法之一。模拟期为1995年1月1日~1996年12月31日,验证期为1997年1月1日~1997年12月31日。分

为 36 个时段进行模拟,经反复拟合计算,模拟水位中 79.6% 的误差小于 1m(表 2 和图 4),识别和验证后模型所计算的流场与实际流场吻合,长观孔的计算水位动态变化与实测的水位动态变化曲线趋于一致。所建立的模拟模型达到模型的精度要求,符合实际的水文地质条件,反映了地下水系统的水力特征,可利用模型进行水资源评价和地下水位预测分析。

表2 北京西郊地区观测孔实测与计算水位误差

Table 2 The errors between observed and estimated water level in western suburbs of Beijing			
误差范围	0~1m	1~2m	2~3m
个数	35	6	3
比例/%	79.6	13.6	6.8

6 地下水库调蓄评价

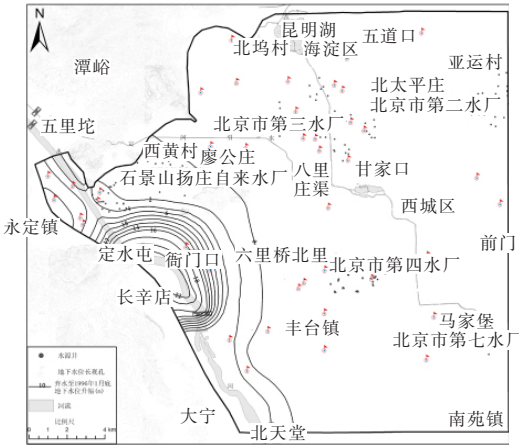
6.1 入渗补给量评价

对模型模拟期内(1995.1~1996.12)研究区地下水系统源汇项统计及均衡分析结果见表 3,在整个模拟期内,降雨入渗量为 $5.46\times10^8\text{m}^3$,占总补给量的 46.68%;永定河入渗补给量为 $2.39\times10^8\text{m}^3$,占总补给量的 20.47%;山前侧向补给量为 $2.17\times10^8\text{m}^3$,占总补给量的 18.52%,因此降水入渗补给、永定河弃水入渗和边界侧渗补给为工作区地下水的主要补给来源,占 85.67%。人工开采量为 $8.06\times10^8\text{m}^3$,占总排泄量的 83.03%;侧向流出占 16.97%。人工开采是为地下水排泄的主要方式。

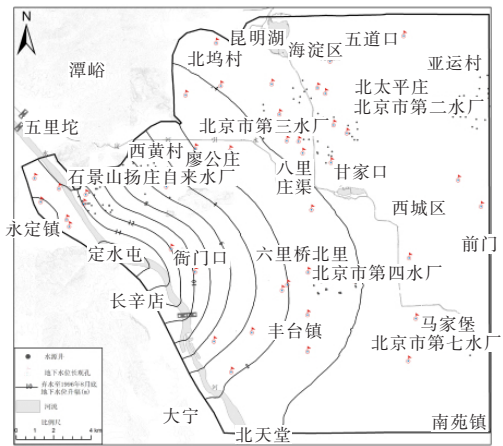
从以上分析得出,模拟期内永定河入渗补给量为 $2.39\times10^8\text{m}^3$,期间向永定河调蓄水量为 $3.3\times10^8\text{m}^3$,因此河道入渗率为 72.5%。

6.2 河道入渗影响范围评价

为了科学评价河道入渗时研究区的水位上升幅度,在对模拟进行识别和验证后,分别预测了弃水和未弃水条件下的研究区地下水位变化,通过弃水期末地下水位对比,可以得出河道入渗影响范围(图 5),第一阶段水位最大升幅为 22m,河道入渗影响范围为 85km^2 ;到第三阶段永定河水位最大升幅为 16m,河道入渗影响范围为 188km^2 。



(a)第一阶段



(b)第三阶段

图 5 弃水后不同时间段水位升幅图

Fig. 5 The water level rise after the first drainage (a)and the third (b)

7 结语

通过对北京西郊地区河道入渗试验和数值模拟结果可以得出如下结论:

表3 1995~1996年地下水系统均衡表 (单位: 10^4m^3)

均衡项		1995 年		1996 年		模拟期 (1995.1~1996.12)	
		资源量	比例 / %	资源量	比例 / %	资源量	比例 / %
补给	降水入渗量	23 980	47.35	30 610	46.18	54 590	46.68
	永定河入渗补给	8 190	16.17	15 750	23.76	23 940	20.47
	山前侧向补给量	9 821	19.39	11 830	17.85	21 651	18.52
	京密引水渠昆玉河入渗	3 524	6.96	3 241	4.89	6 765	5.79
	永定河引水渠入渗	1 250	2.47	1 200	1.81	2 450	2.10
	基岩顶托补给	3 883	7.67	3 658	5.52	7 541	6.45
总补给量		50 648	100	66 289	100	116 937	100
排泄	人工开采量	40 980	83.74	39 670	82.31	80 650	83.03
	侧向流出量	7 956	16.26	8 527	17.69	16 483	16.97
	总排泄量	48 936	100	48 197	100	97 133	100
含水层存储量变化量		1 712		18 092		19 804	

(1)通过向永定河弃水入渗试验三家店水库向永定河弃水 $3.3\times 10^8\text{m}^3$,永定河河道入渗补给量为 $2.39\times 10^8\text{m}^3$,河道入渗率为72.5%,弃水后河道最大入渗影响范围为 188km^2 ,表明永定河道调蓄能力强,影响范围大,对地下水补给效果明显,是比较理想的人工调蓄场所。

(2)北京地区由于水资源时空分布上的不平衡,而且南水北调中线工程向北京输水后水资源在丰水年有盈余,所以使得地下水人工补给成为可能。通过地表水、地下水和外调水联合调蓄,把年际分配不均匀的补给量转变为城市供水所需的均衡供水量。

综上所述,北京西郊地区进行河道人工调蓄得天独厚,其水文地质条件、河渠系统分布,地下水厂设施、回灌水源和地层的渗透能力等都是建立地下水库的良好条件。建议相关部门在南水北调进京前开展河道调蓄工程的规划和水文地质勘察工作。

参考文献:

- [1] 杨树清. 21世纪中国和世界水危机及对策[M]. 天津:天津大学出版社, 2004.(YANG Shu-qing. China and the World Water Crisis and Countermeasures in the 21st Century[M]. Tianjin:Tianjin University Press,2004.(in Chinese))
- [2] GALE IN, WILLIAMS AT, GAUS I, et al. ASR-UK:Elucidating the Hydrogeological Issues Associated with Aquifer Storage and Recovery in the UK [M]. London:UK Water Industry Research Limited, 2002.
- [3] 许广明,刘立军,费宇红,等. 华北平原地下水调蓄研究[J]. 资源科学, 2009,31(3):375-381.(XU Guang-ming, LIU Li-jun, FEI Yu-hong, et al. Research on the adjustment of groundwater storage in north China plain[J]. Resources Science,2009,31(3):375-381.(in Chinese))
- [4] 韩再生. 为可持续利用而管理含水层补给-第四届国际地下水人工补给会议综述 [J]. 水文地质工程地质. 2002, 29 (6):72-73.(HAN Zai-sheng. The management of aquifer recharge for sustainable groundwater use: Review of the fourth international conference on groundwater artificial recharge [J]. Hydrogeology and Engineering Geology. 2002,29(6): 72-73.(in Chinese))
- [5] 刘家祥,蔡巧生. 北京西郊地下水库研究[M]. 北京:地质出版社, 1988.(LIU Jia-xiang, CAI Qiao-sheng. Study on Groundwater Reservoir in Xijiao, Beijing [M]. Beijing:Geological Publishing House,1988. (in Chinese))
- [6] 王新娟,许苗娟,周训. 北京市西郊区地表水地下水联合调蓄模型研究 [J]. 勘察科学技术. 2005, (5):16-19.(WANG Xin-juan, XU Miao-juan, ZHOU Xun. Model research of united dispatching of surface water and groundwater in the western urban and outskirts of Beijing[J]. Site Investigation Science and Technology. 2005,(5): 16-19.(in Chinese))
- [7] 王新娟,谢振华,周训,等. 北京西郊地区大口井人工回灌的模拟研究 [J]. 水文地质工程地质. 2005,32 (1):70-73.(WANG Xin-juan, XIE Zhen-hua, ZHOU Xun, et al. Simulation of artificial injection the large-diameter wells in the western outskirt of Beijing [J]. Hydrogeology and Engineering Geology. 2005,32 (1):70-73. (in Chinese))
- [8] 张安京,叶超,李宇,等. 北京地下水[M]. 北京:地质出版社.2008.(ZHANG An-jing, YE Chao, LI Yu. et al. Beijing Groundwater [M]. Beijing:Geological Publishing House,2008.(in Chinese))
- [9] 北京市水文总站. 两大水库回灌地下水效益显著 [J]. 北京水利, 1996, (6):61.(Beijing Hydrological Station. The remarkable benefit from two big water reservoir to recharge groundwater. Beijing Water Source[J]. 1996,(6):61.(in Chinese))
- [10] 刘家祥,蔡巧生,吕晓俭,等. 北京西郊地下水人工回灌试验研究 [J]. 水文地质工程地质,1988,(1):1-7.(LIU Jia-xiang, CAI Qiao-sheng, LV Xiao-jian, et al. The experiment on groundwater artificial recharge in Xijiao, Beijing[J]. Hydrogeology and Engineering Geology. 1988,(1):1-7.(in Chinese))

Evaluation of Artificial Recharge to Groundwater Reservoir in Beijing Western Suburbs Based on Regulation and Storage Experiment and Numerical Simulation

LIU Ji-lai^{1,2}, LIU Chao³, HUANG Tian-ming¹, WANG Su-fen³, DU Chun-long³, JI Ming-feng³

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Beijing Institute of Geological Engineering, Beijing 100037, China; 3. Beijing Hydrology Service, Beijing 100038, China)

Abstract: The assessment of effect on artificial recharge to groundwater reservoirs is of great significance to water resources regulation and storage. In this paper, regulation and storage experiment and numerical simulation were used to assess infiltration capacity of the Yongdinghe River bed to the groundwater reservoir in the western suburbs. The results show that the infiltration capacity is as high as $2.39\times 10^8\text{m}^3$, about 72.5% of input water amount of $3.30\times 10^8\text{m}^3$, suggesting that the Yongdinghe River bed has high regulation and storage capability. After the Sanjiadian Reservoir drainages the water to the Yongding River bed, the scope of infiltration is 188km^2 , suggesting significant effect on groundwater recharge. The Yongding River bed is an ideal artificial regulation and storage site, making it possible for remainder water in wet year after the middle line of the South-to-North Water Diversion to artificially recharge groundwater.

Key words: groundwater reservoir; regulation and storage experiment; western suburbs; groundwater numerical simulation