

北京市永定河地下水库水资源储蓄能力研究

王立发¹, 邢国章¹, 江 剑¹, 郝奇琛²

(1.北京市地质工程勘察院, 北京 100048; 2.中国地质大学, 北京 100083)

摘 要:北京市永定河冲洪积扇中上部, 具备建设地下水库的基本条件。本文在确定永定河地下水库水资源人工补给方式的基础上, 分析了各方式的入渗能力, 提出了地下水库的人工补给方案, 利用地下水数值模拟的预测结果和有效储水率计算公式, 首次研究了地下水库的储水能力, 分析了永定河地下水库的水资源补给效果。结果表明, 永定河地下水库水资源人工补给能力最大可达 $18.93\text{m}^3/\text{s}$, 回灌地表水 $2.42\times 108\text{m}^3$ 的情况下地下水位最大回升32m, 地下水储存量增加 $2.09\times 108\text{m}^3$, 回灌后1年和5年的有效蓄水率分别为78.6%和46.8%, 北京永定河地下水库具有较好水资源回灌能力、储存能力, 地下水人工调蓄能够起到明显的效果。

关键词:永定河地下水库; 地下水人工补给; 回灌能力; 储存能力

中图分类号: P641.2 文献标识码: A 文章编号: 1007-1903 (2013) 01-0018-05

0 引言

建设地下水库对地下水进行人工补给, 是国内外调节水资源供需时空不均、增加可利用水资源量、改善地质环境的一项重要举措^[1-3]。国外地下水库研究历史较久, 1889年美国开始采用人工干预手段增加地下水储存量的研究, 到2002年7月建成的ASR(含水层储存恢复)系统有100个以上^[4]; 日本提出了利用地下水坝建设地下水库的概念, 在长崎、福井县、福冈县等地建立了10余座有坝地下水库^[5,6]; 荷兰发展一种人工回灌和出水系统ARPS(Artificial Recharge-Pumping Systems)^[7]; 此外法国、巴西、瑞典、德国、沙特、利比亚等国均有地下水库的研究及实践工作。国内20世纪50年代末上海、北京、天津等地开始地下水人工补给的实践; 70年代后提出了地下水调蓄和人工补给的概念, 进行了地下水库相关的调查、试验、调蓄方案研究等工作^[8], 在河北、山东、新疆、辽宁等地修建了多处地下水库^[9]; 经多年研究, 我国在地下水库的概念、分类、组成和建库条件、回补渗流、工程建设、运行管理等理

论、实践方面都取得了很大的发展。

北京市是以地下水作为主要供水水源的大都市, 地下水供水量常年占到总供水量的2/3左右, 地下水多年处于超采状态, 环境地质问题严重。北京建设地下水库, 为确保南水北调后北京地表水和南水北调水的高效利用, 增强水资源可持续利用能力, 有效修复超采地下水的环境问题提供了途径。北京市西部地带地层颗粒粗大、结构单一, 是南水北调中线末端, 分布有市水源一、二、三、四、七厂等水源地, 建设永定河地下水库对南水北调水的合理配置、城市供水安全保障、改善地质环境具有重要意义。

永定河地下水库的勘察研究需解决“灌得下、存得住、取得出、用得好”的问题^[10], 因此, 本文对永定河地下水库水资源人工补给方式进行了调查, 对人工补给方式的入渗能力进行了分析, 结合调蓄水源、输水途径提出了水资源调蓄方案, 根据地下水数值模拟结果, 首次计算地下水库的有效储水率, 重点分析了地下水库的蓄水性能及调蓄效果, 研究成果为地下水库的设计、实施提供了依据。

基金项目: 国家重点研究基础发展计划“973”项目(2010CB428804); 北京市2010科委计划项目(D10110604720000)。

作者简介: 王立发(1973—), 男, 本科, 主要从事地下水、浅层地温能合理开发利用研究。

1 区域概况

研究区位于北京西部地带,西部与西北部为山区,为相对不透水的砂页岩和火山岩。东部平原为永定河冲洪积扇,受永定河冲洪积作用影响第四系厚度由西北10余米向东南增厚到300余米,岩性为卵砾石、砂及粘性土,从冲洪积扇顶部之前缘含水层由单一结构、2~3层结构逐渐变化为多层结构。昆明湖、紫竹院、陶然亭、西红门一线以西地区为单一含水层分布区,地层岩性为砂卵石、砂砾石夹薄层粘性土,颗粒粗、富水性大,单井出水量一般可达 $5000\text{m}^3/\text{d}$ 以上;以东地区为2~3层砂卵砾石及多层砂结构分布区,地层颗粒逐渐变细,层次增多,含水层由2~3层砂卵砾石层变成多层砂组成,地下水类型由单一潜水转化为潜水和承压水,单井出水量均由 $3000\text{m}^3/\text{d}$ 减少到 $500\text{m}^3/\text{d}$ 以下。区域地下水接受山前侧向河流入渗、降水入渗和灌溉回归补给,向东、东南径流;地下水排泄以开采为主,有侧向流出和少量潜水蒸发。

永定河冲洪积扇地下水储量丰富且水质优良,分布有北京市第一、二、三、四和石景山、丰台等水厂大中型水源地,在北京城市供水中具有不可忽视的地位。由于多年超量开采,地下水位呈下降趋势。地下水位多年变化图(图1)显示20世纪70年代水位开始下降,80年代中期水位持续降低到峰值,1999年后北京遭遇连续枯水年,地表水锐减,地下水承担了更多的供水任务,地下水位普遍下降了10~15m。地下水位下降导致的降落漏斗、水质恶化、湿地退化、地面沉降等地质环境问题日趋严重^[1]。

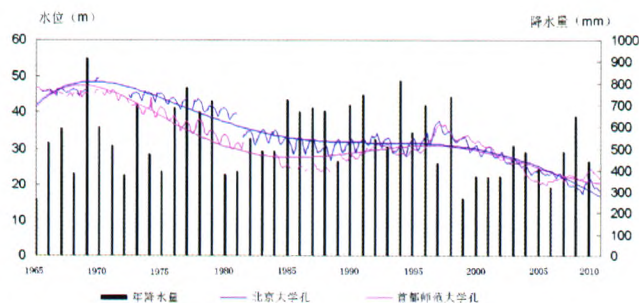


图1 北京西部地区地下水位动态变化曲线

2 地下水水库空间特征

地下水水库的范围圈定要求适宜的水文地质条件,包

括相对隔水的边界、一定厚度与范围的含水层等,以保证调蓄水源在一段时间内存储在库内。根据北京市西部地带地质条件与永定河冲洪积扇地层岩性、结构、分布、水力特性,考虑开采条件,圈定了北京市永定河地下水水库的分布范围,位置见图2。

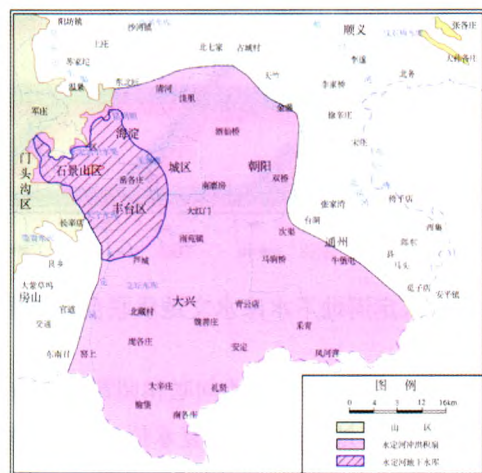


图2 北京永定河地下水水库位置图

地下水库西部和西北部为北京西山,为石炭—二叠系及侏罗系的砂页岩和火山岩,组成了不透水边界;东部自北向南由昆明湖、紫竹院、陶然亭至西红门一线以西,南部由西红门经狼垡至南岗洼,是永定河冲洪积扇溢出带,地层渗透性能减弱,是地下水的天然边界;水库底部为第四系冰碛泥砾或第三系半胶结的砂砾岩、泥岩,为不透水边界,水库面积约为 333km^2 。

受古地形及河道多次改道的影响,永定河地下水水库内部第四系沉积物厚度变化很大,由数十米至200余米不等,岩性山前为残、坡积粉土夹碎石,平原为卵砾石、砂及薄层粘性土;含水层为单双层砂卵石结构(图3),含水层颗粒粗,累计最大厚度在70m左右,导水性、富水性好,渗透系数在 $100\sim 500\text{m}/\text{d}$,水位下降5m单井出水量在 $3000\sim 5000\text{m}^3/\text{d}$ 。永定河地下水水库较为封闭的边界条件与地下水良好的恢复条件为水资源的储存提供了良好的基础。

据统计永定河地下水水库范围内地下水开采量每年约 $60\times 10^8\text{m}^3$,1999年以来连续超采已使本区地下水位普遍下降10~15m,腾出巨大的储水空间。与地表水库类似,地下水水库的水资源储存受其特征水位的控制,以保证地下水

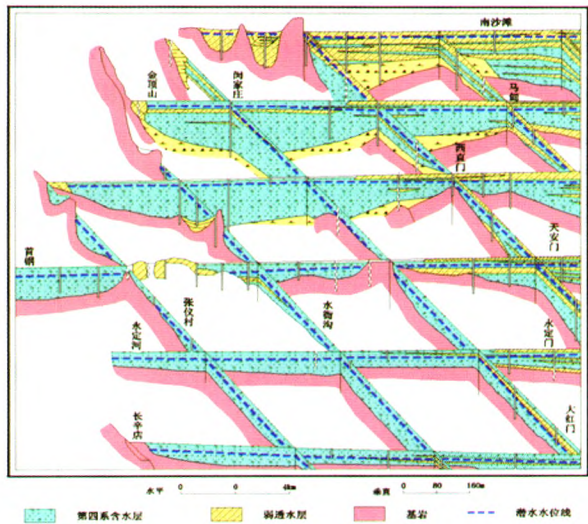


图3 永定河地下水水库水文地质联合剖面图

库建设和运行不引发环境地质问题和调蓄效益的发挥。北京地区地下水库地下水的可恢复水位(限制高水位)受市政建筑地下室、垃圾填埋场等地下工程及地下水天然恢复性能限制,1983年6月的地下水位可以作为北京地区地下水水库的限高水位^[12]。经计算,2010年永定河地下水水库的可调蓄库容达 $9.6\times10^8\text{m}^3$ 。

3 人工补给方式与能力

采用适当的方式将水资源回灌是地下水水库建设研究的重要内容,20世纪60—80年代北京开展了大量的水资源回灌试验工作^[13],并在1980年建立了北京西黄村回灌试验站。以往工作成果显示引水渠、河道、砂石坑、地表水库、管井等均是北京水资源回灌的有效方式。统筹考虑水源、引水条件、河渠衬砌、整治及未来规划用途等条件,永定河地下水库可利用的人工回灌方式具体为西黄村、老山、廖公庄、北坞4个砂石坑和南旱河河道与支渠,并可在南旱河、永定河引水渠两侧修建大口井回灌,其中4个砂石坑具体参数见表1,南旱河及其支渠长7150m,河床宽2.8~9m,坡度在 $24^{\circ}\sim33^{\circ}$;大口井推荐为井径为4m,井间距为50m,滤管长度25m。

由于北京市目前属于缺水情况,不能进行回灌试验,历史上曾多次利用库区内的各种方式进行回灌试验,取得了丰富的数据,由于各方式水文地质条件基本一致,其

表1 永定河地下水水库砂石坑参数表

名称	西黄村砂石坑	老山砂石坑	廖公庄砂石坑	北坞砂石坑
地理位置	西黄村北	晋元庄桥东南	廖公庄村北	北坞村路与万安东路交叉口西南
平均坑深 (m)	8.1	25	21	7.2
坑底面积 (m ²)	23673	301793	39153	47604
坑壁面积 (m ²)	10974	83756	28937	12821
坑壁坡度	$26^{\circ}\sim32^{\circ}$	$38^{\circ}\sim43^{\circ}$	$25^{\circ}\sim37^{\circ}$	$21^{\circ}\sim29^{\circ}$
蓄水容积 (10 ⁴ m ³)	21	300	66	20

入渗能力仅与其入渗的侧面、底面及植被覆盖等参数相关,本文将选取的砂石坑、河道、大口井与历史试验回灌方式参数进行对比,确定了目前人工补给地下水可利用方式的入渗能力(表2),其中大口井可最多修建180眼,入渗能力为 $9\text{m}^3/\text{s}$ 。经研究可知永定河地下水水库回灌能力可达 $18.93\text{m}^3/\text{s}$ 。

表2 地下水人工补给方式入渗能力表

回灌方式	入渗能力 (m ³ /s)	回灌方式	入渗能力 (m ³ /s)
西黄村砂石坑	0.93	北坞砂石坑	1.30
老山砂石坑	5.25	南旱河及支渠	0.90
廖公庄砂石坑	1.55	大口井 (单井能力*井数)	0.05×180

4 回灌方案数值模拟与效果

考虑水资源调蓄的水源、输水方式、回灌方式,本文提出了永定河地下水水库水资源回灌的工程方案。永定河地下水水库人工回灌的水源有官厅水库水、南水北调水,官厅水库水可通过永定河—三家店水库—永定河引水渠输送至砂石坑、大口井;南水北调水可从团城湖放水经南旱河渠道及河道引入到砂石坑与大口井。地下水水库人工回灌引起地下水位上升必须在合理的限度之下,即不对公共设施

产生危害和不产生次生环境地质问题。因此，永定河地下水库需要确定回灌方案中启用大口井的数目及各回灌方式的回灌时间，保证回灌后地下水位不超过限高水位。为研究地下水库调蓄效果及储存能力，本文建立了永定河地下水库的地下水数值模型，模型的范围及各回灌方式分布位置见图4。根据各回灌方式的入渗能力研究成果，采用数值模型进行试算，最终确定方案的回灌时间最长为8个月，大口井启用132眼，总回灌量为 $2.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。利用调蓄模型，以2010年6月实测水位作为初始水位，分别对回灌和无回灌条件下的地下水变化进行模拟预测，对比论证了方案实施的效果。

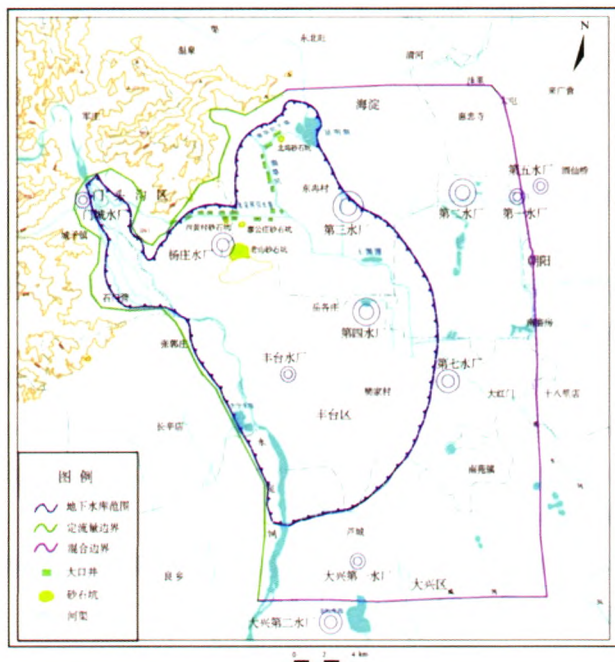


图4 模型范围及回灌位置图

数值模型结果显示，人工回灌8个月后地下水位明显上升，回灌结束时水位最大升幅为32m，影响范围为 191.2 km^2 ；结束后两年水位最大升幅仍达5m，影响范围是 343.2 km^2 ，大部分水源地都在水位上升的影响范围内（图5），对保障水源地供水能力会产生积极影响。

随着水位的上升永定河地下水库内地下水储存量随之增加。地下水均衡结果显示，回灌结束时与无回灌同期对比地下水库储存量增加了 $2.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，回灌结束两年后地下水库储存量仍然比无回灌同期多 $19383.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。水资源回灌有效的改变了地下水的亏损状态，回灌之前

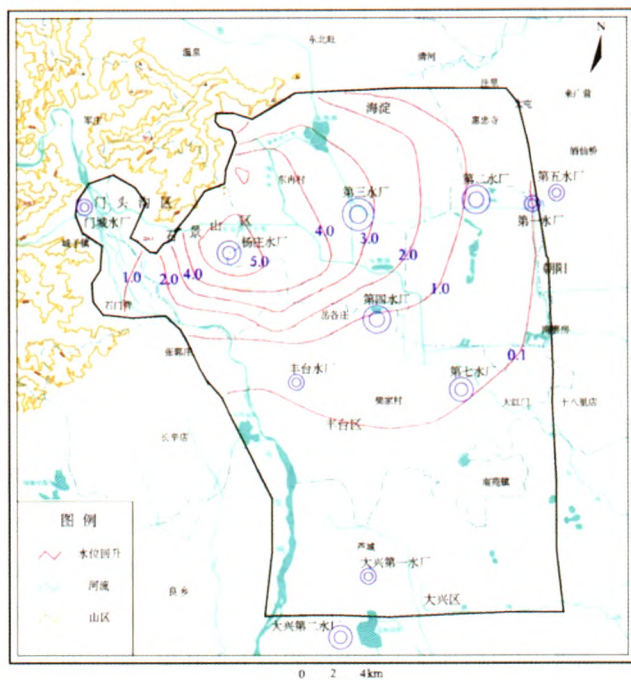


图5 回灌后两年与同期无回灌水位对比图

模拟区地下水均衡处于负均衡状态，地下水亏损量为 $4971.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，回灌条件下地下水均衡处于正均衡状态，地下水储量增加为 $1.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，水资源人工回灌起到了良好的资源效益。

5 地下水库储水能力

永定河地下水库作为无坝型地下水库，储水能力研究对其十分重要。地下水库作为储水工程，回灌的水资源大部分储存在库中，但少量会以边界流出、蒸发等形式消耗，水库有效蓄水量会随时间发生变化，为了定量研究地下水库的储水能力，本文提出有效蓄水率的计算公式（1），即在一定时间内由于水资源回灌引起地下水储存资源量的增加量与回灌量的比值，其中回灌水引起的地下水储存量的增加值可以利用数值模拟预测回灌与无回灌条件的储存量变化求出。

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Q_{\text{储}}^i - \sum_{i=1}^n \Delta Q_{\text{储}}^2}{Q_{\text{灌}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： β —有效蓄水率； $\Delta Q_{\text{储}}^1$ —回灌后每个应力期储存量的变化量； $\Delta Q_{\text{储}}^2$ —无回灌时每个应力期储存量的

变化量; $Q_{\text{灌}}$ —总回灌量; i —应力期。

利用建立的调蓄模型对调蓄方案进行模拟分析, 计算得出回灌后不同时间的有效蓄水率及有效蓄水率随时间变化图(图6)。回灌后1年地水库有效蓄水率为78.6%, 随着时间的延长有效蓄水率逐渐减小, 3年后仍有66.2%的回灌量储存在地下水库范围内, 5年后有效蓄水率仍可达到46.8%。说明北京西郊地下水库具有优良的蓄水性能, 若能有效进行地下水回灌, 其较好的调蓄能力也将为北京地下水战略储备发挥重要作用。

由图中可以看出, 有效蓄水率随着时间的延长逐渐减小, 且前期减小速率明显大于后期。原因是回灌刚结束时水力梯度较大, 促使边界流出迅速增加, 随时间延长水力梯度变小, 边界流出量的增加量也变小。因此, 回灌后在一定时间内增加地下水库区的地下水开采, 库区地下水资源量能得到更充分的利用。值得注意的是, 流出地下水库的回灌水量并不是无效的消耗, 永定河冲洪积扇中下游含水层颗粒较细, 依据地下水渗流理论计算流出库区的回灌水将在超过50年的时间流出北京平原, 回灌水将对中下游的地下水起到良好的补充作用。

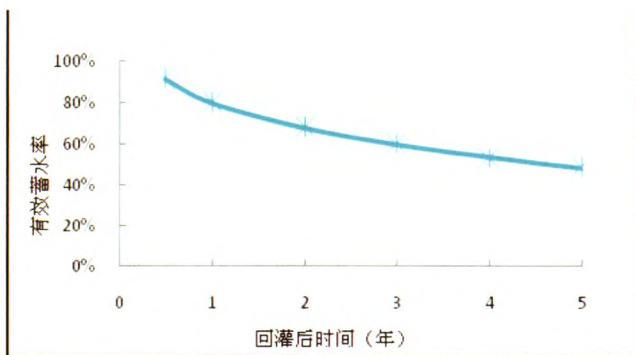


图6 有效蓄水率随时间变化图

6 结论

北京市西部的永定河冲洪积扇中上部地带, 具备建设永定河地下水库的地质、水文地质条件, 采用砂石坑、河渠及大口井的方式进行回灌, 总入渗能力可达 $18.93\text{m}^3/\text{s}$ 。在回灌 $2.42\times 10^8\text{m}^3$ 水资源后, 地下水库地下水位最大升幅达32m, 储存资源量可增加 $2.09\times 10^8\text{m}^3$, 回灌后5年内有效蓄水率在46.8%~78.6%之间, 地下水调蓄效果显著, 蓄

水性能较好。永定河地下水库水文地质条件、回灌方式与能力、储水性能及调蓄效果的研究分析, 为永定河地下水库的设计、实施提供了依据。

参考文献

- [1]李砚阁. 地下水库建设研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2007:4~8.
- [2]郑德凤,王本德.地下水库调蓄能力综合评价方法探讨[J].水利学报,2004(10):2.
- [3]戴长雷,迟宝明.地下水库调蓄能力分析[J].水文地质工程地质,2003 (02):37.
- [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.
- [5]Jha M. K. , Chikamori K. , Kamii Y. Effectiveness of the Kamo river for artificially recharging the Takaoka aquifer, Tosa city, Japan[J]. International Agricultural Engineering Journal, 1998,7(2) .
- [6]杜新强,廖资生,李砚阁等. 地下水库调蓄水资源的研究现状与展望[J]. 科技进步与对策,2005(02):178.
- [7]Jonoski A,Zhou Yangxiao,Nonner J.Meijer S. Model-aided design and optimization of artificial recharge-pumping systems [J]. Hydrological Sciences, Journal, 1997, 42(6): 937~953.
- [8]赵天石.关于地下水库几个问题的探讨[J].水文地质工程地质,2002(5):65.
- [9]朱思远, 田军仓,李全东.地下水库的研究现状和发展趋势[J].节水灌溉, 2008(4):23~27.
- [10]北京市地质矿产勘查开发局.北京市地勘局关于开展我市地下水库勘查工作的意见(京地[2011]42号).2011:5~23.
- [11]李会安,窦艳兵.南水北调水进京后北京市地下水利用与保护[J]. 水利规划与设计,2006(5):19~20.
- [12]崔 瑜, 李 宇,谢振华等.北京市平原区地下水养蓄控高水位及其约束下的地下水库调蓄空间计算[J]. 城市地质, 2009,4(1):11~17.
- [13]刘家祥,蔡巧生.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(3):1~6.

(下转第31页)

A Study on Soil Environment and Geological Background in Pinggu's Peach Place of Production

YANG Quanhe, FENG Hui, HUANG Yong, HU Shengying

(Beijing Institute of Geo-exploration and Technology, Beijing 102218)

Abstract: Soil material composition is controlled by rock types of soil-forming rock and mineral composition. The plain terrain in Pinggu possesses the climate and soil condition which is good for growing peaches. This is mainly related to the special geological background in Pinggu District. Many beneficial elements content is more than the other areas in Beijing. The mineral elements content of peaches has diversity in Pinggu's different aeries. And the mineral elements content in eastern plain Region is the most abundant.

Keywords: Soil; Peach; Geological background; Suitability

(上接第22页)

Study on the Infiltration and the Storage Capability of Artificial Adjustment on the Yongding River Groundwater Reservoir in Beijing

WANG Lifa¹, XING Guozhang¹, WANG Jian¹, HAO Qichen²

(1. Beijing Institute of Geological and Prospecting Engineering, Beijing 100048;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract: The upper-middle of the Yongding River alluvial-proluvial fan meets the basic requirements to establish a groundwater reservoir. Based on the investigating thoroughly of the artificial recharge methods of the Yongding River groundwater reservoir, this paper further analyzes the infiltration ability of all recharge methods, proposes the corresponding artificial recharge engineer scheme. By the results of the numerical simulation of groundwater and the effective water storage rate formula, the groundwater storage capacity of the reservoir was first studied, and the effect of recharge of groundwater reservoir was analyzed. The result demonstrated that the maximum of recharge ability is $18.93\text{m}^3/\text{s}$ and the maximum of groundwater level rise is 32m, the groundwater storage is recovered about $2.09 \times 10^8\text{m}^3$ when the total artificial recharge quantity was $2.42 \times 10^8\text{m}^3$. The effective water storage rate was respectively about 78.6% and 46.8% after 1 and 5 years. It indicated that the groundwater reservoir have preferable adjustment effect, recharge ability and storage capacity.

Keywords: The Yongding River Groundwater Reservoir; Artificial recharge of groundwater; Recharge ability; Storage capacity