

大庆西部地下水位降落漏斗区 水资源人工调蓄方案

高淑琴^{1,2}, 苏小四^{1,2}, 杜新强¹, 谢 轶^{1,2}, 齐素文³

1. 吉林大学 环境与资源学院/水资源与环境研究所, 长春 130026

2. 教育部城市环境与可持续发展联合研究中心 吉林大学分中心, 长春 130026

3. 大庆石油管理局 供水公司, 黑龙江 大庆 163000

摘要:对地下水资源的长期大量集中开采形成了区域性地下水位降落漏斗, 地下水的超采引发了一系列环境地质问题。利用降落漏斗区腾空的地下储水空间进行水资源的人工调蓄可使地下水位得到恢复。以地下水为主要供水水源的大庆市目前已形成了东西两个大的区域性地下水位降落漏斗, 必须进行地下水人工调蓄。设计并模拟了现状开采、逐年压缩分别在现采和压采基础之上进行人工回灌等4种人工调蓄方案, 对大庆西部地下水位降落漏斗区进行水资源人工调蓄。结果表明, 压缩开采和人工回灌均可加速降落漏斗区地下水位的恢复, 在逐年压缩地下水开采量5%的情况下实施人工回灌($0.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$), 地下水位恢复效果最明显, 到2010年末, 漏斗中心地下水位可回升7.7~10.3 m。

关键词:降落漏斗; 人工调蓄; 人工回灌; 大庆西部

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 1671-5888(2008)02-0261-07

Artificial Regulation Groundwater Depression Cone in West of Daqing

GAO Shu-qin^{1,2}, SU Xiao-si^{1,2}, DU Xin-qiang¹, XIE Yi^{1,2}, QI Su-wen³

1. College of Environment and Resources/Institute of Water Resources and Environment, Jilin University, Changchun 130026, China

2. Branch of Jilin University, Joint Research Center of Urban Environment and Sustainable Development, Ministry of Education, Changchun 130026, China

3. Water Supply Company, Daqing Petroleum Administration Bureau, Daqing, Heilongjiang 163000, China

Abstract: Large quantity of continuously groundwater pumping in an area forms regional groundwater depression cone, and overexploitation leads to a series of environmental and geological problems. Groundwater level can be recovered by artificial regulation of water resource in the empty underground space of the depression cone. Artificial regulation in groundwater depression cone is significant to Daqing, where groundwater is the main water supply resource. The authors designed and simulated four artificial regulation projects in the depression cone zone in west of Daqing, which are current pumping, reduced pumping, and artificial recharge based on current and reduced pumping. The result indicates

收稿日期: 2007-05-08

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAB14B04); 黑龙江省大庆市水务局委托项目; 南京水利科学研究院开放流动研究基金(YK90510); 国土资源部水资源与水环境问题重点实验室资助

作者简介: 高淑琴(1982—), 女, 山西柳林人, 博士研究生, 主要从事地下水循环与演化研究, E-mail: gaoshuqin2003@163.com

通讯联系人: 苏小四(1971—), 男, 安徽巢湖人, 副教授, 博士, 主要从事地下水资源评价与同位素水文地球化学研究, E-mail: suxiaosi@jlu.edu.cn.

that reducing the exploitation quantity and using artificial recharge methods can accelerate the recovery of depression cone. When reducing the quantity of groundwater pumping by 5% every year and executing artificial recharge($0.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$), the recovery effect of groundwater level is more obvious than other projects, and groundwater level of the centre of depression cone will be recovered by 7.7–10.3 m up to the end of 2010.

Key words: depression cone; artificial regulation; artificial recharge; west of Daqing

地下水是水资源的重要组成部分,由于其水质良好、分布广泛、变化稳定以及便于利用^[1],成为很多地区主要的甚至是唯一的供水水源^[2-3]。由于对地下水资源的长期大量集中开采,目前我国已形成区域地下水位降落漏斗 100 多个,面积达 15 万 km^2 ^[4],并引发了诸如荒漠化^[5-10]、地面沉降及地裂缝^[11]等一系列环境地质问题。这些与地下水位有关的生态环境问题,急需通过地下水人工调蓄进行控制和改善;同时大量的地下水位降落漏斗区的疏干含水层,为水资源人工调蓄腾空了巨大的闲置空间。因此,利用这些闲置空间通过压缩开采量和实施地下水人工回灌等人工调蓄手段,将地下水位控制和稳定在一定水平,可以储存水资源、恢复超采区,还可以达到改善环境的目的。

大庆市境内地表水资源极为有限,城市供水之中嫩江引水量所占的比重逐年增加(2004 年大庆市用水总量中,58.36%为地下水,41.64%为地表水;生活用水中,40%为地下水,60%为地表水;工业用水中,50%为地下水,50%为地表水),一旦出现突发性威胁地表供水安全的事件,则城市供水只能全部依靠地下水资源。因此,对于大庆市而言,利用地下水位降落漏斗区进行水资源安全储备,建立地下水库,更是保障应急条件下的城市供水安全的一项重要措施。

1 研究区概况

大庆市由于地表水资源贫乏,地下水一直是城市工业、生活用水的主要供水水源^[12],特别是油田西部地区,自大庆油田开发建设以来,地下水担负着油田的主要供水任务^[13],30 多年的地下水开采,已形成了较大范围的地下水位降落漏斗,到 2004 年,漏斗面积达 2 159.86 km^2 。

西部地下水位降落漏斗区的主要开采目的层为第四系白土山组和第三系泰康组含水层,该含水岩组厚度大(80~150 m,局部可大于 200 m),透水性强(渗透系数 40~50 m/d),富水性好(单井涌水量

3 000~8 000 m^3/d ,最大可达 10 000 m^3/d)。泰康组底部为近 20 m 厚的致密泥岩层,是良好的隔水层;白土山组含水层顶板可接受上覆潜水含水层的越流补给(图 1)。

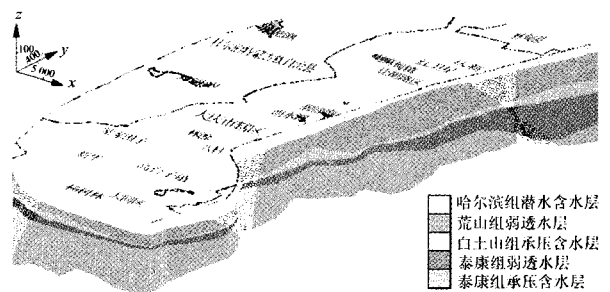


图 1 大庆市西部降落漏斗区含水层结构图

Fig. 1 Aquifer structure picture of groundwater reservoir in west of Daqing

研究区从 1975 年形成相对稳定的地下水水位降落漏斗以来,随着地下水开采量的增加,地下水位降落漏斗在区域上基本上没有大的变化,但多年来漏斗中心区水位一直持续下降,至 1998 年漏斗中心区地下水水位下降到历史最低点,地下水位埋深达 48.73 m。从 2000 年后由于加强地下水科学管理,大力开发利用地表水水源(开始引入嫩江水源),减少对地下水的开采(相继关闭了一些地下水源地),使地下水水位逐渐恢复,2000 年和 2003 年漏斗区中心水位埋深分别回升到 41.50 m 和 35.03 m (图 2)^[14]。

地下水位降落漏斗的形成,加剧了研究区地表沙化、荒漠化、植被枯萎等生态环境问题,导致部分地区地下水水质恶化,同时也存在着地面沉降、地裂缝等潜在的环境地质问题^[12]。

2 人工调蓄方法

为恢复大庆西部降落漏斗区地下水位,对区域水资源进行人工调蓄,建立大庆市后备水源地,设计如下 4 种水资源调蓄方案:① 维持漏斗区现状年地

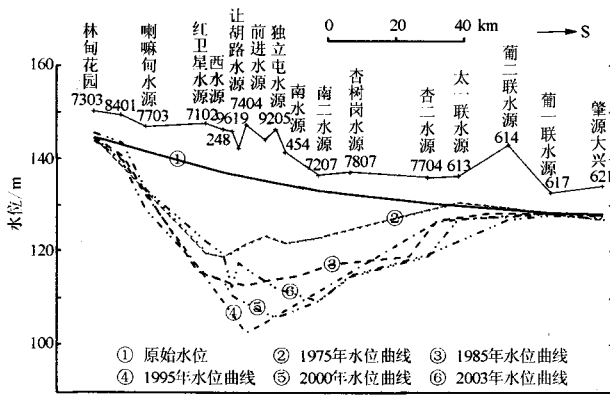


图2 大庆西部降落漏斗区地下水位变化剖面图

Fig. 2 Profile of groundwater level of depression cone in west of Daqing

下水开采量,依靠含水层天然调蓄能力进行自然恢复;② 制定合理的压缩开采方案,恢复降落漏斗区地下水位;③ 在维持漏斗区现状地下水开采量的基础上实施人工回灌,对降落漏斗区地下水位进行恢复;④ 在压采方案的基础上实施人工回灌,恢复降落漏斗区地下水位。

水资源人工调蓄的模拟采用地下水流数值模拟模型。模拟计算区面积 $4\,967.55\text{ km}^2$,包含了规划的地下水库库区。模拟含水层为潜水含水层(第四系哈尔滨组潜水含水层)和承压含水层(第四系白土山组承压含水层和第三系泰康组承压含水层),两者通过厚度 $20\sim 70\text{ m}$ 不等、区域上分布较为稳定的中更新统荒山组粘性土层发生水力联系。含水层介质为非均质各向同性,地下水流为符合达西定律的平面二维非稳定流。模型上部为潜水面边界,底部为隔水边界,东部边界承压水为隔水边界、潜水为一类水头边界,其余侧向边界为一类水头边界。

地下水流数值模拟模型识别和验证结果表明:所建立的水文地质概念模型、数学模型以及水文地质参数的选取正确反映了区域水文地质条件以及地下水运动特征,可以进行人工调蓄方案的模拟。

2.1 维持现状开采

维持现状开采,即在依靠含水层天然调蓄能力恢复地下水位时,降落漏斗区含水层仍提供正常的用水,维持现状年(2004年)地下水开采量($1.34 \times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$)。

哈尔滨组潜水含水层的越流补给是研究区承压含水层的主要补给来源之一(占承压含水层总补给

量的 $40\%\pm$),而大气降水入渗补给量占潜水含水层补给总量的 $70\%\pm$ 。因此,在维持现状地下水开采量不变的情况下,大气降水是影响降落漏斗区地下水位恢复的一个主要因素。分别采取大气降水量为多年平均降水量(429.36 mm)、保证率为 25% (482.9 mm)、 50% (427.4 mm)、 75% (362.4 mm)和 95% (267.6 mm)的降水量,研究依靠含水层天然调蓄能力,漏斗区地下水位的恢复情况。

通过对不同方案进行模拟可以看出,到2010年,在不同大气降水量条件下,漏斗区地下水流场总体趋势一致,但水位恢复情况不尽相同。在地下水集中开采区,地下水位受大气降水的影响要比边界处明显,这主要是因为长期大量的地下水开采所形成的地下水位降落漏斗为地下水的储存提供了空间。受地下水位降落漏斗影响,地下水位降落漏斗区接受的大气降水在入渗补给地下调蓄含水层后向漏斗中心汇集,因而漏斗中心处地下水位上升较漏斗边缘明显。

从地下水位恢复流场图(图略)和典型地下水水源地水位动态变化曲线(图3)可以看出,降水保证率越高,大气降水对漏斗区水资源调蓄的影响越小,水位恢复速度越慢。在降落漏斗边缘,最高降水保证率和最低降水保证率下大气降水对降落漏斗区水资源调蓄的影响很小,反映到地下水位的动态变化,最高地下水位和最低地下水位相差不到 0.1 m ;在降落漏斗中心,最高降水保证率和最低降水保证率下大气降水对降落漏斗区水资源调蓄的影响相对漏斗边缘要明显,最高地下水位和最低地下水位相差 $0.3\sim 0.6\text{ m}$ 。造成这种现象的主要原因是:在潜水含水层与承压含水层之间广泛分布有厚度为 $20\sim 70\text{ m}$ 的弱透土层,该弱透土层减弱并滞后了潜水含水层对承压含水层的补给能力,从而减弱了大气降水对承压含水层水资源调蓄的影响。

在维持现状开采的条件下,主要开采水源地水井2010年末的地下水位与2004年末地下水位相比,均有一定的上升,此种上升是因为2000—2004年地下水压缩开采(表1)的后续影响结果。但即使是在降水保证率为 25% 的情况下,升幅仍小于 3.05 m ,并且各水源地水位上升时段主要集中在2005年和2006年,2006年以后地下水位降落漏斗中心地下水位相对稳定,承压含水层地下水的补排量达到平衡状态。因此,在维持现状开采的情况下,要使降落漏斗区地下水位依靠天然调蓄能力进行恢复很

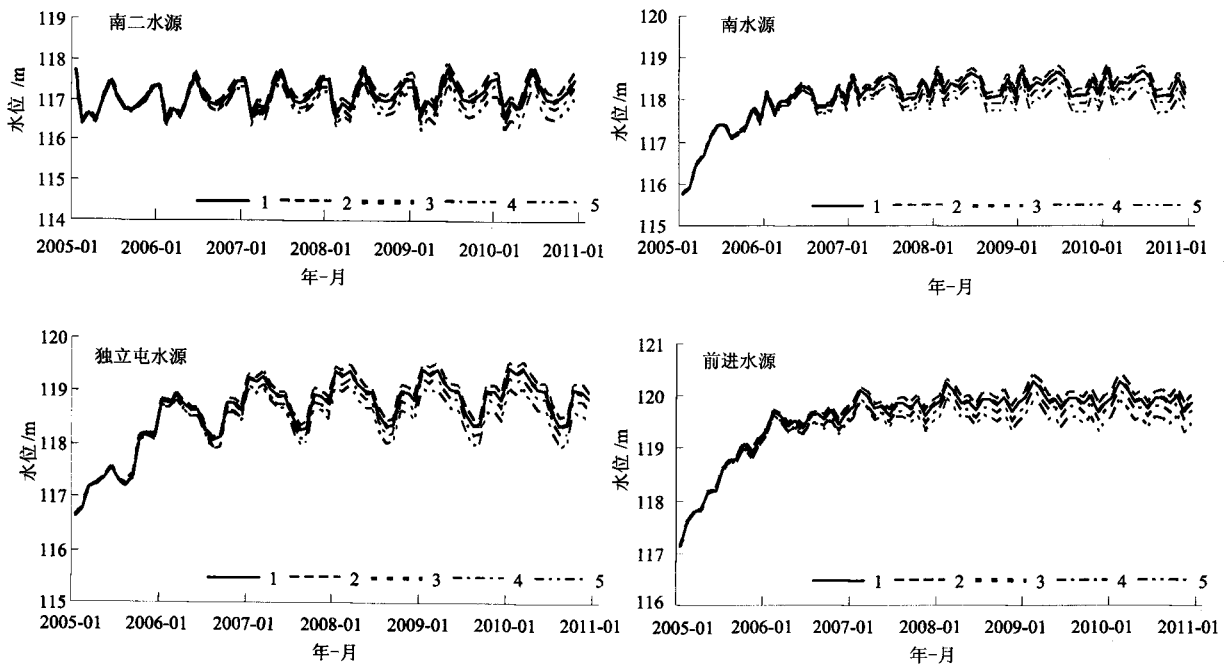


图 3 不同降水条件下主要代表性水源地地下水位动态变化预测曲线

Fig. 3 Prediction curve of groundwater level of main water resources under different precipitation

1. 多年平均降水量; 2. 降水保证率 25%; 3. 降水保证率 50%; 4. 降水保证率 75%; 5. 降水保证率 95%

难。

表 1 大庆西部地下水降落漏斗区主要水源地地下水开采量变化情况

Table 1 Quantity of groundwater pumping of main water resources in depression cone in west of Daqing

水源地名称	地下水开采量/10 ⁴ m ³				
	2000	2001	2002	2003	2004
喇嘛甸水源	938.19	594.41	0	0	0
红卫星水源	1 101.58	921.39	720.61	719.91	692.06
西水源	1 911.40	1 584.48	1 586.6	1 349.04	1 322.69
齐家水源	2 084.23	2 339.11	1 175.19	242.27	0
让胡路水源	1 057.95	1 016.55	983.59	866.13	196.01
前进水源	1 755.76	1 668.81	1 654.45	1 549.18	1 146.47
独立屯水源	369.81	155.47	201.47	108.18	239.46
南水源	1 773.24	1 808.52	1 699.29	1 581.22	1 199.4
南二水源	2 883.55	2 990.27	2 473.57	2 223.8	1 613.32
杏树岗水源	2 119.53	1 489.77	1 325.2	1 217.01	1 184.66
杏二水源	2 155.81	1 973.39	1 835.41	1 324.31	1 071.93

2.2 压缩开采

压缩开采,即制定合理的地下水压缩开采方案,恢复降落漏斗区地下水位。

大庆市自 2000 年以来已经开始压缩地下水开

采量,并分别于 2002 年 9 月和 2004 年 5 月关闭了喇嘛甸水源和齐家水源。研究区其它主要水源地压缩量已达 31%~50%(表 1)。因此,地下水开采量不宜继续大幅压缩,人为拟定压采速率为 5%,即 2005—2010 年大庆西部地下水降落漏斗区地下水开采量分别为 1.34、1.34、1.27、1.21、1.14、1.07 亿 m³。

模拟结果表明,在地下水开采量逐年压缩 5% 的条件下,受地下水开采量削减的影响,承压含水层年补给量大于年排泄量,水源地的地下水位呈现逐渐持续升高现象,到 2010 年末地下水位降落漏斗中心的南二水源、南水源、独立屯水源和前进水源地下水位普遍回升到 120.7 m、121.7 m、122.3 m 和 123.2 m(图 4)。与现状年相比,地下水位分别回升 3.1 m、5.9 m、5.7 m 和 6.1 m,水位升幅比较小。

2.3 在现状开采基础上进行人工回灌

在现状开采的基础上进行人工回灌,即在地下水位降落漏斗区实行人工回灌恢复地下水水位的同时,降落漏斗区含水层仍提供正常的用水(1.34×10⁸ m³/a)。

人工回灌水源为位于降落漏斗区西部的龙虎泡水库,其水源来自嫩江,水质较好。由于调蓄目标含水层(白土山组含水层和泰康组含水层)为承压含水

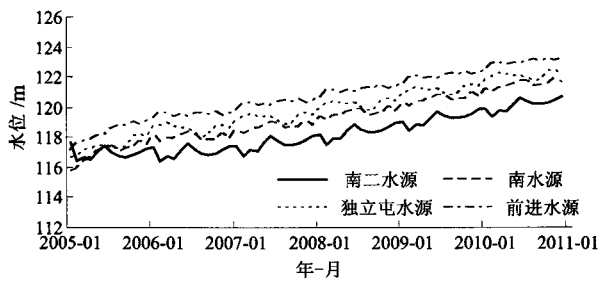


图4 降落漏斗中心主要代表性水源地地下水位动态变化预测曲线(压缩开采)

Fig. 4 Prediction curve of groundwater level of main water resource in the centre of depression cone (reduced pumping)

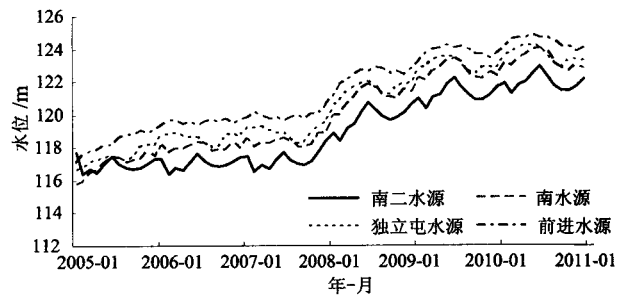


图5 降落漏斗中心主要代表性水源地地下水位动态变化预测曲线(现状开采+人工回灌)

Fig. 5 Prediction curve of groundwater level of main water resource in the centre of depression cone (artificial recharge based on current pumping)

层,其上覆第四系荒山组粘性土弱透水层,地层厚度较大(约50~100 m),因而采用井灌方法将龙虎泡水库可提供的剩余蓄水量($0.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)全部回灌地下。考虑回灌水源温度,选择每年10月到次年5月进行地下水人工回灌。为了获得明显的注水效果,将注水井均匀布设于龙虎泡管线南侧。通过研究补给水源与地下水之间物理亲和力、化学亲和力、生物相适性、毒理学因素等,以及人工补给过程中的地球化学反应可以得出,注入水与含水层中的地下水混合后,可使地下水的矿化度有所降低,不会导致地下水水质的突变和水质级别的降低^[15]。

模拟结果表明,在维持现状开采条件下,从2007年开始实施地下水人工补给,注水量为 $0.45 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 时,承压含水层地下水处于正均衡状态,水位持续上升,到2010年末,地下水位降落漏斗区地下水位的上升已很明显,地下水位降落漏斗中心的南二水源、南水源、独立屯水源和前进水源地带地下水位分别普遍升至122.2 m、122.7 m、123.2 m和124 m(图5)。与现状年相比,地下水位分别回升4.5 m、7.0 m、6.6 m和6.9 m。

2.4 在压采基础上进行人工回灌

在压采的基础上进行人工回灌,即从2007年开始逐年压缩地下水开采量5%(表1)的同时,实施人工回灌,回灌方案同2.3中人工回灌方案。

模拟结果表明,在逐年压缩地下水开采量5%的同时进行人工注水的条件下,地下水位降落漏斗中心的南二水源、南水源、独立屯水源和前进水源地带地下水位分别普遍升至125.4 m、126.3 m、126.7 m和127.5 m(图6),与现状年相比,地下水位分别回

升7.7 m、10.5 m、10.1 m和10.3 m。水位恢复速度比维持现状开采条件下的人工回灌快,水位恢复效果更好。

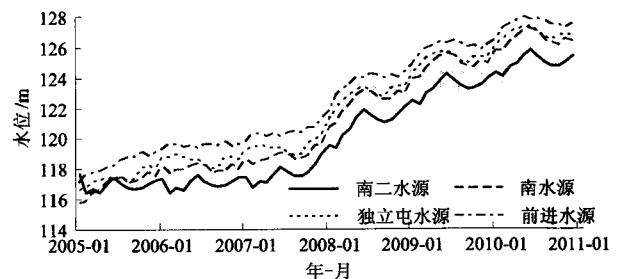


图6 降落漏斗中心主要代表性水源地地下水位动态变化预测曲线(压缩开采+人工回灌)

Fig. 6 Prediction curve of groundwater level of main water resource in the centre of depression cone (artificial recharge based on reduced pumping)

2.5 调蓄方案对比

对比各调蓄方案(图7)可以看出,压缩开采地下水,可以加速降落漏斗区地下水位的恢复,但单纯依靠压缩开采恢复地下水位,水位升幅比较小。人工回灌的实施,使降落漏斗区地下水位有明显回升。在维持现状开采的同时进行人工回灌,降落漏斗中心地下水位与维持现状开采相比,可升高4.46 m左右;在压采的同时进行人工回灌,降落漏斗中心地下水位与压缩开采相比,可升高4.47 m左右。

3 结论

利用地下水位降落漏斗调蓄、储存水资源,建立

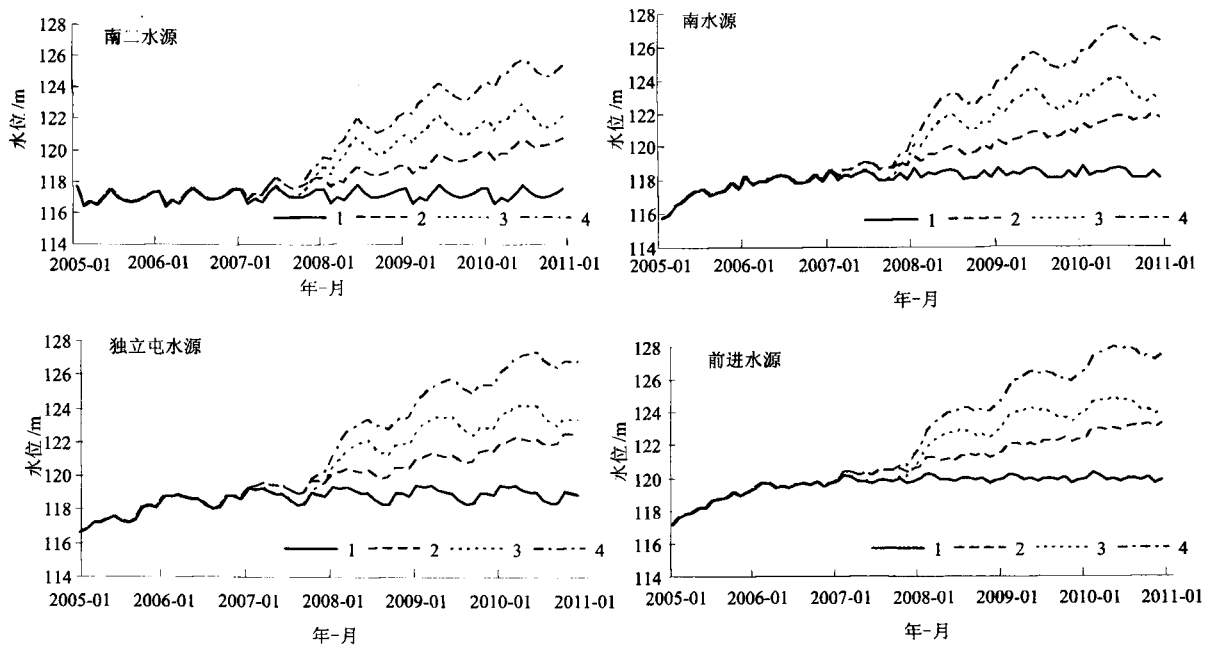


图 7 不同调蓄方案主要代表性水源地地下水位动态变化预测曲线对比

Fig. 7 Comparison of prediction curve of groundwater level of main water resource under different artificial regulation projects

1. 维持现状开采; 2. 逐年压采 5%; 3. 维持现状开采的同时进行人工注水; 4. 逐年压采 5% 的同时进行人工注水

地下水库,作为大庆市后备水源地,可提高大庆市水资源安全保障程度。大庆市西部地下水位降落漏斗区承压含水层地下水位为开采-动态型,在该区进行水资源人工调蓄,可以恢复降落漏斗区地下水位,采取的人工调蓄措施不同,回灌效果各异:(1)在维持现状开采的情况下,要使降落漏斗区地下水位恢复很难;(2)在逐年压缩地下水开采量 5% 的情况下,地下水位有所回升,但升幅比较小;(3)实施人工回灌可加速降落漏斗区地下水位的恢复速度,在维持现状开采的情况下进行人工回灌,可使漏斗中心地下水位恢复 4.5~6.9 m,在逐年压缩地下水开采量 5% 的情况下进行人工回灌,可使漏斗中心地下水位恢复 7.7~10.3 m。因此,适当压缩开采与地下水人工回灌相结合,是研究区地下水人工调蓄的有效方法。

参考文献 (References):

- [1] 王大纯,张人权,史毅虹,等. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社,1995.
WANG Da-chun, ZHANG Ren-quan, SHI Yi-hong, et al. Principles of hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [2] 张菊蓉. 估算蓄水层的人为补给量[J]. 水利科技与经济, 1997, 3(1): 47-50.
- [3] 谢乐云,杨文涛. 浅谈地下水人工补给问题[J]. 西部探矿工程, 2003(9): 174-175.
- [4] 杨琳. 审视地下水资源[J]. 瞭望新闻周刊, 2004(5): 17-18.
- [5] 陈梦熊. 西北干旱区水文系统的演变与荒漠化[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(1): 1-4.
- [6] 李景春,贾伟光,金洪涛. 东北经济区地下水系统退化的环境效应[J]. 地质与资源, 2005, 14(4): 272-274.
- [7] LI Jing-chun, JIA Wei-guang, JIN Hong-tao. Local environmental effect by the degradation of groundwater system in northeast China[J]. Geology and Resources, 1997, 3(1): 47-50.
- [8] ZHANG Ju-rong. Artificial recharge estimation of aquifer[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 1997, 3(1): 47-50.
- [9] XIE Le-yun, YANG Wen-tao. On artificial replenishment of groundwater[J]. West-China Exploration Engineering, 2003(9): 174-175.
- [10] YANG Lin. Survey of groundwater resource[J]. Outlook Weekly, 2004(5): 17-18.
- [11] CHEN Meng-xiong. Variation of hydrologic system in respect to desertification in arid area of northwest China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(1): 1-4.
- [12] LI Jing-chun, JIA Wei-guang, JIN Hong-tao. Local environmental effect by the degradation of groundwater system in northeast China[J]. Geology and Resources, 2005, 14(4): 272-274.

- 2005, **14**(4): 272 - 274.
- [7] 康尔泗,李新,张济世,等. 甘肃河西地区内陆河流域荒漠化的水资源问题[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(6): 657 - 667.
KANG Er-si, LI Xin, ZHANG Ji-shi, et al. Water resources relating to desertification in the Hexi area of Gansu Province, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(6): 657 - 667.
- [8] 张素珍,张秀兰. 河北省地下水灾害的类型分布及防治对策[J]. 南水北调与水利科技, 2006, **4**(4): 41 - 43.
ZHANG Su-zhen, ZHANG Xiu-lan. Types, distribution, countermeasures of groundwater disasters in Hebei Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, **4**(4): 41 - 43.
- [9] 贾德旺,岳跃华,叶进霞,等. 济宁城区地面沉降演变规律及经济损失估算方法[J]. 山东国土资源, 2006, **22**(11): 38 - 41.
JIA De-wang, YUE Yue-hua, YE Jin-xia, et al. Study on evolution rule of surface subsidence and method of estimating economy loss in Jining district[J]. Land and Resources in Shandong Province, 2006, **22**(11): 38 - 41.
- [10] 王改平,吴学华,杨建,等. 银川平原与地下水相关的生态环境及演变[J]. 宁夏工程技术, 2006, **5**(3): 226 - 229.
WANG Gai-ping, WU Xue-hua, YANG Jian, et al. Some issues on eco-environment and its evolution related to Yinchuan plain with its underground water[J]. Ningxia Engineering Technology, 2006, **5**(3): 226 - 229.
- [11] 许焯霜,余恕国,沈水龙. 地下水开采引起地面沉降预测方法的现状与未来[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, **26**(3): 352 - 356.
- XU Ye-shuang, YU Shu-guo, SHEN Shui-long. State-of-the-art of approaches of predicting land subsidence due to groundwater withdrawal[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, **26**(3): 352 - 356.
- [12] 大庆市水务局,大庆石油管理局供水公司. 大庆市地下水库建设规划[R]. 大庆:大庆市水务局, 2005.
Water Routine Bureau of Daqing, Water Supply Company of Daqing Petroleum Administration Bureau. Construction plan of groundwater reservoir in Daqing[R]. Daqing: Water Routine Bureau of Daqing, 2005.
- [13] 秦延军,宋雷鸣,刘梅侠,等. 大庆油田西部地区地下水动态监测网优化设计[J]. 水文地质工程地质, 2001(2): 21 - 25.
QIN Yan-jun, SONG Lei-ming, LIU Mei-xia, et al. Optimal design of groundwater regime observation network in west of Daqing oilfield[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2001(2): 21 - 25.
- [14] 杜新强. 大庆市地下水位降落漏斗区水资源人工调蓄关键技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2006: 53, 97.
DU Xin-qiang. Study on the key technologies of water resources regulation by groundwater depression cone[D]. Changchun: Jilin University, 2006: 53, 97.
- [15] 杜新强,齐素文,廖资生,等. 人工补给对含水层水质的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, **37**(2): 293 - 297.
DU Xin-qiang, QI Su-wen, LIAO Zi-sheng, et al. Influence of artificial recharge on groundwater quality[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, **37**(2): 293 - 297.