

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.03.004

石川河地下水库建库条件分析及地下水位动态预测

李 璇,束龙仓,鲁程鹏,石文凯

(淮海大学水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘要:通过分析富平县石川河河谷阶地区的自然地理、气象、水文、地质等条件以及地下水资源开发利用情况,建立了水文地质结构三维模型,论证了建立石川河地下水库的可行性,初步计算了地下水库库容约为 4.95 亿 m³。利用 Visual MODFLOW 软件建立了地下水库库区的地下水数值模型,预测了不同降水和开采条件下,进行人工回灌 0.52 亿 m³/a、10 年后地下水库库区的地下水位变化情况。结果表明,库区内的地下水位将大范围的抬升,大部分地区与 1959 年的水位相近,可基本满足当地的用水需求。

关键词:地下水库;建库条件;数值模拟;地下水位动态;石川河
中图分类号:P641.8;TV62⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2017)03-0013-06

Analysis of groundwater reservoir construction conditions and prediction of groundwater level variation in Shichuan River groundwater reservoir

LI Xuan, SHU Longcang, LU Chengpeng, SHI Wenkai
(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on analyses of physiographic, meteorological, hydrological, and geological conditions, as well as groundwater resources development and utilization in the valley terrace of the Shichuan River, in Fuping County, a three-dimensional hydrogeological structure model was built, and the feasibility of the establishment of the Shichuan River groundwater reservoir was demonstrated. The storage capability of the groundwater reservoir was about 4.95×10⁸ m³. The variation of groundwater level ten years after the implementation of artificial recharge with the amount of 0.52×10⁸ m³ per year under different precipitation and pumping conditions was predicted through groundwater numerical simulation with the Visual MODFLOW software. The results show that the groundwater level of the reservoir would rise considerably, with the water levels in most parts of the reservoir area approximating the level in 1959, indicating that the local water demand could be basically satisfied.

Key words: groundwater reservoir; reservoir construction conditions; numerical simulation; groundwater level variation; Shichuan River

地下水库是以岩土体空隙为储水空间,在人工干预作用下形成的具有一定调蓄能力的水资源开发利用工程^[1]。19 世纪末,欧美国家开始研究利用含水层储存和回采地下水,1936 年美国加州已开始使用地下水库^[2-4]。我国在 1975 年兴建了第一个地下水库—南宫地下水库,此后,为了解决北方地区的干旱和海水入侵问题,陆续兴建了山东王河等地下水

库^[5]。相比于地表水库,地下水库具有蒸发量少、不易受污染等特点。与具有天然调蓄能力的含水层相比,在人工干预下,地下水库的调蓄规模与强度均有质的提升。利用地下水库进行人工调蓄,可以增加地下水补给,实现地下水资源的可持续利用,同时也可以改善水质、保护生态环境,避免引发环境地质问题^[6-9]。

陕西省富平县石川河河谷阶地区的地表水资

基金项目:国家自然科学基金(41572210)
作者简介:李璇(1992—),女,硕士研究生,研究方向为地下水数值模拟。E-mail:michelle-00@163.com
通信作者:束龙仓,教授。E-mail:lcsu@hhu.edu.cn

严重匮乏,地下水成为主要的供水水源。从 20 世纪 60 年代开始,大量开发地下水以满足工农业的用水需求,导致区域内的潜水水位大幅度下降,制约了当地社会和经济的发展。修建地下水库对保障石川河河谷阶地区的社会、经济和生态环境的协调发展具有重大意义。笔者通过分析石川河河谷阶地区的水文地质条件,建立水文地质结构三维模型,论证建立石川河地下水库的可行性,并对地下水库的库容进行初步计算。利用 Visual MODFLOW 软件构建地下水库库区的地下水数值模型,对不同降水和开采条件下进行人工回灌后的地下水位变化情况进行预测,以期为水资源的合理开发利用提供理论依据。

1 研究区概况

1.1 自然地理、气象及水文条件

富平县石川河河谷阶地区位于陕西省关中盆地中部,地理位置为东经 $108^{\circ}57' \sim 109^{\circ}19'$,北纬 $34^{\circ}41' \sim 34^{\circ}55'$,地处内陆,属暖温带大陆性半干旱半湿润季风气候区,多年平均降水量 533.2 mm。富平县石川河流域属黄河流域渭河水系,境内主要有石川河、温泉河、顺阳河、赵氏河 4 条季节性河流,近年来 4 条河均已无常流量。石川河是区内最大的河流,属渭河一级支流,河谷阶地区面积为 132.31 km^2 ,近年来,岔口以下地区石川河已无常流量,基本断流。石川河河谷阶地区,中间低洼,且比较开阔,最宽处约 6.5 km;河谷平原出口小,位于黄村一带,河谷平原两侧多为黄土台塬所封闭,高差 20 ~ 50 m,导水性差异较大,形成相对隔水的边界,具有较好的封闭构造。石川河阶地为堆积阶地,阶地堆积物为砂质黏土、黏质砂土和沙砾卵石层。石川河地下水库位置及库区范围见图 1。



图 1 石川河地下水库位置及库区范围

1.2 地下水资源开发利用情况

由于石川河河谷阶地区的地表水资源短缺,地下水被大量开采,以潜水为主,导致地下水位不断下

降。1978—2013 年区域内的地下水开采量及地下水位埋深变化见图 2,由图 2 可见其地下水开采量具有年际变化大的特点。其中,1987 年地下水开采量最大,为 $7.22 \times 10^7 \text{ m}^3$,2004 年开采量最小,为 $2.43 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。1978—2002 年为地下水集中开采期,地下水年均开采量约为 $5.07 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$,在此期间,地下水位急剧下降,根据 41 眼观测井中的地下水位埋深资料,全区地下水位下降 5.70 ~ 44.93 m,平均下降约 21.95 m。2003—2013 年,地下水开采量及地下水位埋深基本维持平稳的状态。由此可见,在石川河河谷阶地区,人工开采对其地下水位动态变化具有强烈的影响,由于过量地开采地下水,区域内的地下水量长期处于负均衡的状态。区域内的水资源开发利用问题,除了供给水源较单一之外,还有水资源利用效率较低、调蓄设施不足等问题,修建地下水库进行水资源的人工调蓄是解决以上问题的有效途径。

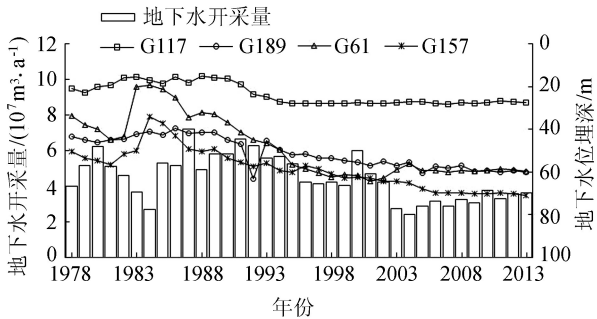


图 2 1978—2013 年石川河河谷阶地区地下水开采量及地下水位埋深变化

2 地下水库建库条件分析

2.1 水文地质条件

石川河地下水库库区的地层主要为第四系,上部广泛分布有中更新世晚期、上更新世及全新世的厚层沙砾卵石层,两侧塬区与河谷区底部为中更新世洪积的厚层黏土、砂质黏土夹薄砂层或风积的黄土层,下游出口处与渭河冲积平原接触地带为含泥量大的石川河冲洪积层与渭河细粒相的冲湖积层交互沉积。研究区含水层主要由第四纪全新世冲积的沙砾卵石层及中更新世晚期洪积沙砾卵石层组成,冲、洪积层间无稳定隔水层分布,可视为统一的潜水含水岩组,A—A'(图 1)水文地质剖面见图 3。由于近几十年来,过度开发利用地下水导致潜水位不断下降,部分地区甚至接近含水层底板,已经疏干的沙砾卵石层是实施人工补给的良好目的层,为地下水库的建设提供了良好的储水空间。

石川河下游至出口处渭河一级阶地附近的潜水含水层为全新世早期冲积层和下伏中更新世冲湖积或洪积层。冲积层主要岩性为粉砂、黏质砂土,渗透

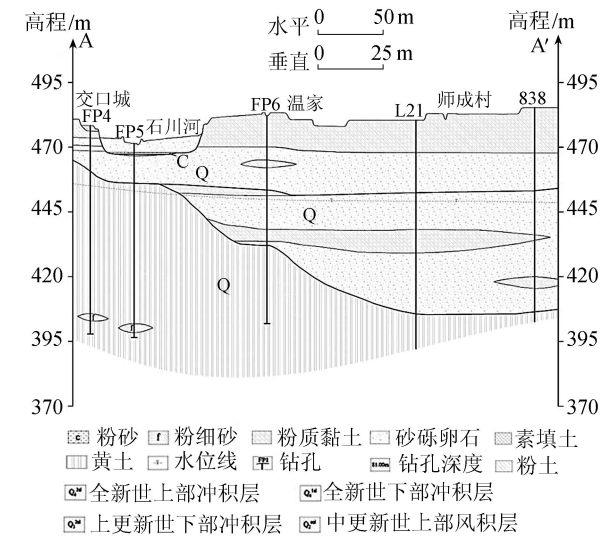


图3 石川河地下水库库区水文地质剖面

性及富水性较差。冲积层以下为中更新世湖积含水层,岩性为细粉砂、黏砂土,呈薄层状,渗透性微弱。石川河出口处的地质结构十分有利于河谷区地下水的贮存。因此,可以考虑修建无坝地下水库。

2.2 储水空间及库容

根据研究区的地质钻孔资料,利用 GMS 软件建立了石川河河谷阶地区的水文地质结构三维可视化模型,研究区水文地质结构三维模型剖面示意图见图4。本区调蓄含水层为潜水含水层,一般以孔隙介质为储水空间且地下水类型为潜水的地下水库库容的计算公式为

$$V = \mu V^* \quad (1)$$

式中: V 为地下水库库容; μ 为潜水含水层给水度; V^* 为库区含水层体积。

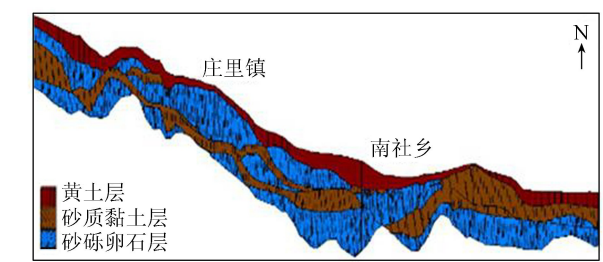


图4 研究区水文地质结构三维模型剖面示意图

在研究区范围内,构成含水层的地层岩性主要为砂砾卵石。由于石川河河道内采砂等人类活动,破坏了分布在河道与漫滩的第四系含水层的连续性以及全新世的砂砾卵石层原有的入渗条件和调蓄功能,这部分含水层已无法作为地下水库的有效储水空间加以利用。通过计算,研究区有效含水层体积为 $4.50 \times 10^9 \text{ m}^3$, μ 取值 0.11, 得到石川河地下水库库容约为 4.95 亿 m^3 。由以上分析可知,区域内的库容条件、水量交换条件、可利用条件、封闭条件基本满足了修建地下水库所需天然储水空间的条

件^[10]。分析水文地质剖面图、水文地质结构三维模型以及抽水试验的结果可知,庄里镇和南社乡地区的含水层较厚,连续性相对较好,富水性较强,单井涌水量约为 $20 \sim 40 \text{ m}^3/\text{h}$,可以将这两个地区附近的河道共同作为地下水库人工调蓄的补给区。外调水源可根据实际情况,由桃曲坡水库、东庄水库、引汉济渭工程等处引水。

3 地下水数值模拟

3.1 水文地质概念模型

地下水数值模拟的计算区以规划建设的地下水库库区为依据,整个数值模拟区域总面积为 132.31 km^2 。研究区地下水开发利用的主要对象是潜水,且石川河地下水库的目的层为潜水含水层,因此本研究只针对潜水进行概化模拟。根据水文地质调查结果和地质钻孔资料分析,地下水流的方向与地表水基本一致,局部受到地形地貌及水文地质结构的控制。研究区潜水接受两侧黄土塬及洪积扇的侧向径流补给,可以刻画为流量边界,赵氏河谷及顺阳洼地附近为隔水边界。

3.2 数学模型

根据对研究区实际水文地质条件的详细分析,在不考虑水的密度变化的条件下,将研究区的潜水概化为服从渗流的连续性方程和达西定律的非均质各向同性的二维非稳定地下水流,其数学模型为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[K(H-B) \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(H-B) \frac{\partial H}{\partial y} \right] + W = \mu \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y) \in D, t \geq 0 \\ H(x, y, t) \Big|_{t=0} = H_0(x, y) & (x, y) \in D \\ K(H-B) \frac{\partial H(x, y)}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = q(x, y, t) & (x, y) \in \Gamma_2, t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: K 为含水层渗透系数; H 为潜水水位; B 为含水层底板高程; W 为单位时间单位面积内在垂向上流入或流出的水量; t 为时间; D 为渗流区域; Γ_2 为第二类边界; n 为边界 Γ_2 的外法线方向; q 为边界 Γ_2 上单位宽度的侧向补给量。

3.3 参数确定

利用 Visual MODFLOW 软件对所建模型进行求解^[11-13]。根据研究区域大小及计算精度要求,在平面上将研究区分为 100 行 $\times$ 100 列,每个网格的大小为 $347.27 \text{ m} \times 245.56 \text{ m}$,有效单元格共计 1 548 个。在垂向上,将含水层概化为一层,根据地质钻孔资料

确定含水层的底板高程。本次模拟中,在抽水试验、双环渗水试验以及水文地质钻探资料的基础上,对研究区的渗透系数和给水度进行分区(图 5),具体赋值见表 1。研究区的潜水主要补给项有大气降水入渗补给、田间灌溉回归水入渗补给、研究区外流入研究区的地下水侧向径流补给、河渠渗漏补给、水库渗漏补给、越流补给。潜水的主要排泄方式为人工开采、越流排泄。

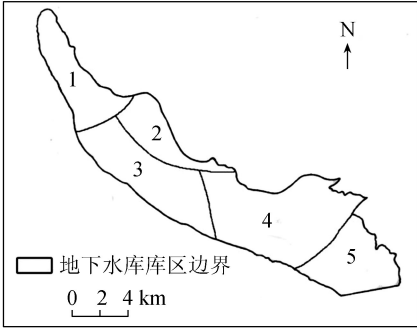


图 5 水文地质参数分区

表 1 水文地质参数赋值

分区	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	给水度
1	15	0.12
2	13	0.09
3	18	0.11
4	8	0.10
5	5	0.08

3.4 模型的校正与验证

模型的校正期为 2012 年 1 月 1 日—12 月 31 日,验证期为 2013 年 1 月 1 日—12 月 31 日。模型的校正期被划分为 12 个应力期,验证期也划分为 12 个应力期,一个应力期的时间为一个自然月。其中,富平县 2012 年和 2013 年的降水量分别 403.5 mm 和 398.2 mm,根据 2012 年的地下水位统测资料确定初始流场。在模型的校正期,不断调整各个分区的参数,得到较为符合实际的流场后,再进行模型验证。图 6 为 2012 年 12 月实测与模拟的地下水位等值线对比,从图 6 中可以看出地下水位模拟结果与实测情况基本吻合,地下水模拟流场与实测流场形态一致,拟合程度较好。

选取 G117、G189、G61、G157 4 个具有代表性的观测井进行模型的验证。各个观测井中,校正期的地下水位埋深观测值与模拟值的对比结果见图 7,验证期的拟合误差见表 2。由图 7 和表 2 可见,各观测井中的模拟水位变化过程与观测的结果较为吻合,观测值和模拟值的绝对误差小于 0.5 m。水均衡计算结果见表 3,其中,大气降水入渗补给是最主要的补给项,人工开采是主要的排泄项。根据模拟结果的分析,与实际情况基本相符,因此,可以认为

所建立的模型能够真实反映研究区地下水实际的运动规律,可应用于研究区地下水位预测。

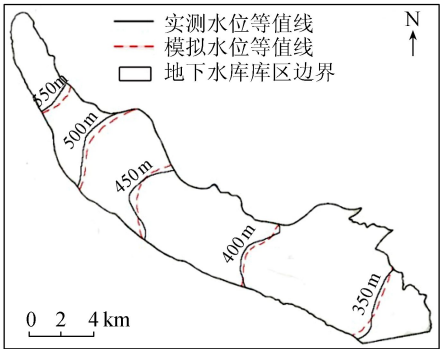


图 6 2012 年 12 月实测与模拟地下水位等值线对比

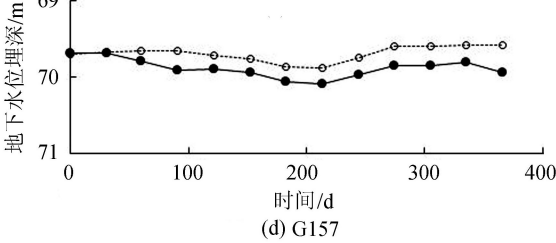
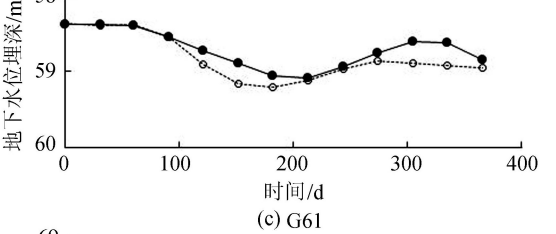
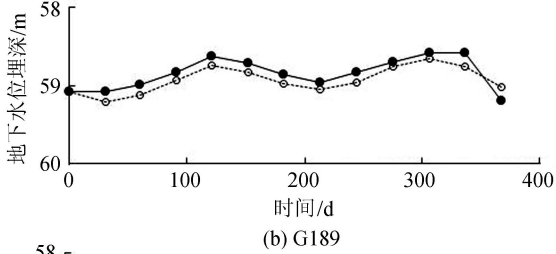
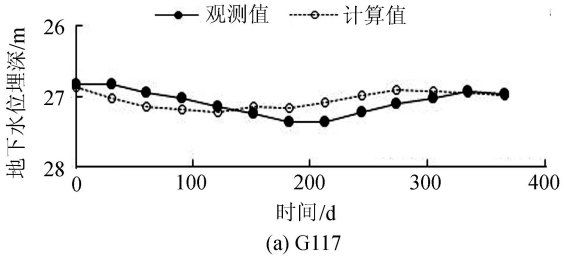


图 7 校正期各观测井地下水位埋深观测值与模拟值对比

表 2 验证期各观测井地下水位埋深观测值与模拟值拟合误差

观测井	2013-06-30			2013-12-31		
	观测值	计算值	误差	观测值	计算值	误差
G117	27.22	27.24	-0.02	27.69	27.62	0.07
G189	58.89	58.96	-0.07	59.49	59.14	0.35
G61	58.82	58.87	-0.05	59.03	58.58	0.45
G157	69.12	69.29	-0.17	69.07	68.8	0.27

表 3 计算区模拟期水均衡计算 万 m³/a

水均衡项	2012 年	2013 年
补给项	大气降水补给	732.30
	渠道渗漏补给	413.90
	水库渗漏补给	56.51
	灌溉回归水	644.43
	侧向径流	188.45
排泄项	越流补给	512.05
	人工开采	3598.30
	越流排泄	59.12
水均衡结果		-1109.78

4 地下水位动态预测

研究区潜水的主要补给项是降水补给,主要的排泄项是人工开采,降水量和开采量的变化对于地下水动态的影响较大。根据研究区的实际情况,预测地下水库实施人工回灌 10 年后,不同降水条件以及不同开采条件的方案下地下水位的变化情况。

根据现状的腾空库容及水均衡计算结果估算,在地下水库开始运行的 10 年内,所需的回灌补给量大约为 5.20 亿 m³。根据富平县 1960—2013 年的降水资料绘制降水频率曲线见图 8,进而确定丰水年、平水年和枯水年的降水量。通过分析,得到降水保证率为 25%、50%、75% 对应的降水量分别为 596.65 mm、503.93 mm、425.73 mm,并以此来计算不同情景下的大气降水入渗补给量。研究区的工农业十分发达,地下水开采量较大,2009—2013 年的平均开采量为 3.48×10⁷ m³/a。由于地下水是研究区的主要供水水源,保护地下水资源和保障工农业用水需求之间存在矛盾。在未来开采地下水的过程中,可能会维持现状开采,可能为了保护生态环境而减少开采量,也可能为了经济发展而增加开采。为了预测不同开采条件下的地下水位变化情况,模型中设定了维持现状开采、减少 20% 现状开采量、增加 20% 现状开采量的情景。具体方案及回灌 10 年后各观测井中地下水位埋深的预测结果见表 4。

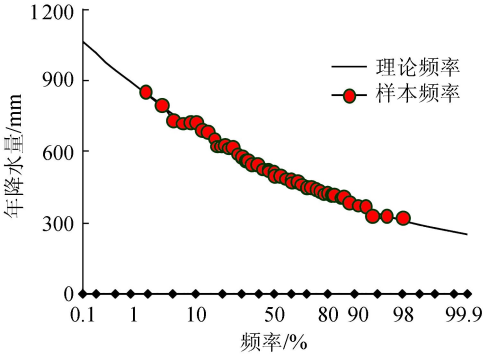


图 8 降水频率曲线

表 4 模拟方案及回灌 10 年后地下水位埋深预测结果

方案	不同情景		各观测井地下水位埋深/m			
	降水条件	开采条件	G117	G189	G61	G157
1	丰水年	减少 20% 开采量	19.12	20.16	21.59	30.98
2	丰水年	维持现状开采量	19.85	22.28	22.42	32.26
3	丰水年	增加 20% 开采量	20.62	23.72	23.04	35.93
4	平水年	减少 20% 开采量	20.07	20.69	22.23	32.56
5	平水年	维持现状开采量	20.79	22.87	22.84	33.90
6	平水年	增加 20% 开采量	21.56	24.20	23.43	37.18
7	枯水年	减少 20% 开采量	20.88	21.05	22.58	33.91
8	枯水年	维持现状开采量	21.59	23.20	23.18	35.30
9	枯水年	增加 20% 开采量	22.36	24.59	23.77	38.19

由表 4 可见,观测井 G117 位于上游的梅家坪镇白马村,相对于其他位置而言,恢复效果一般;观测井 G189 和 G61 分别位于觅子乡东尚村和庄里镇西关村,沙砾卵石层较厚,含水层的渗透性较好,且距离回灌位置庄里较近,因而地下水位的恢复效果非常明显;观测井 G157 位于东上官乡余湾,上覆黄土层相对较厚,沙砾卵石层较薄,恢复效果较差。根据研究区较早的地下水位埋深统计资料,1959 年 G117、G189、G61、G157 的地下水位埋深分别为 15.25 m、22.64 m、20.00 m、18.15 m。与之相比,在大部分情景中,恢复后的地下水位埋深与 1959 年的基本接近,除了下游东上官乡之外,这与其距离回灌区较远且含水层的渗透性较弱有关。在不同降水条件下,地下水位埋深的恢复效果基本相近。开采条件相同时进行人工回灌,丰、枯两季的地下水位埋深差值为 0.73 ~ 3.04 m;降水条件相同时,在不同开采条件下进行人工回灌,在减少 20% 开采量与增加 20% 开采量时,地下水位埋深相差 1.19 ~ 4.95 m,对于回灌效果来说,差异并不是十分明显。因此,在地下水库运行后,可以根据用水需求,在合理范围内适当增加开采量。整体来讲,利用地下水库进行人工调蓄能够使石川河河谷阶地的地下水位恢复到较为理想的结果,基本可以满足日常的生活和生产需求。

5 结 论

石川河河谷阶地区地下水的边界近似封闭,地下水径流条件较好,沙砾卵石层较厚,地下水位埋深较大,提供了充足的储水空间,在下游河流出口处,含水层较薄,渗透性较差,适宜修建无坝地下水库。通过建立水文地质结构三维模型,进一步了解储水空间的分布特征,初步计算地下水库的库容约为 4.95 亿 m³。在庄里和南社地区,沙砾卵石层相对较厚且较为连续,适宜作为地下水库人工调蓄的补给区。

在分析水文地质条件及水均衡计算的基础上,建立了石川河地下水库的地下水数值模型,利用模

型模拟了不同降水及开采的条件下,地下水库以0.52 亿 m³/a 回灌 10 年的情景。结果表明,除了下游东上官乡,全区大部分地区的地下水位埋深与1959 年的较为相近,地下水位的恢复效果显著,基本满足了当地的用水需求。这将对合理有效地开发利用水资源、治理地下水的超采现状、保护地下水资源及生态环境、推进社会和经济的和谐发展起到了重要作用。地下水库具体的调蓄方案还需进行大型入渗试验并确定回灌水源后进行深入研究。

参考文献:

[1] 李砚阁,束龙仓,刘玉峰,等. 地下水库建设研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社,2007.

[2] DAVID R, PYNE G. Groundwater recharge and wells: a guide to aquifer storage recovery [M]. Florida: Lewis Publishing,1995.

[3] 邓铭江,李文鹏,李涛,等. 新疆地下储水构造及地下水库关键技术研究[J]. 第四纪研究,2014,34(5):918-932. (DENG Mingjiang, LI Wenpeng, LI Tao, et al. Investigation of key technologies for underground water storage structures and groundwater reservoirs in Xinjiang [J]. Quaternary Sciences, 2014, 34 (5): 918-932. (in Chinese))

[4] 杜新强,廖资生,李砚阁. 含水层储存和回采技术的研究与应用[J]. 中国给水排水,2004,20(8):24-26. (DU Xinqiang, LIAO Zisheng, LI Yange. Study and application of aquifer storage and recovery technology [J]. China Water & Wastewater,2004,20(8):24-26. (in Chinese))

[5] 李旺林,束龙仓,殷宗泽. 地下水库的概念和设计理论[J]. 水利学报,2006,37(5):613-618. (LI Wanglin, SHU Longcang, YIN Zongze. Concept and design theory of groundwater reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(5):613-618. (in Chinese))

[6] MARIOLAKOS I. Water resources management in the framework of sustainable development[J]. Desalination, 2007,213(1-3):147-151.

[7] DILLON P. Future management of aquifer recharge[J].

Hydrogeology Journal,2005,13(1):313-316.

[8] SHENG Z. An aquifer storage and recovery system with reclaimed wastewater to preserve native groundwater resources in EI Paso, Texas [J]. Journal of Environmental Management,2005,75(4):367-77.

[9] 李伟,李砚阁,龙玉桥. 地下水人工补给井研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41 (5):410-416. (LI Wei, LI Yange, LONG Yuqiao. A review of research on artificial groundwater recharge wells [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2013,41 (5):410-416. (in Chinese))

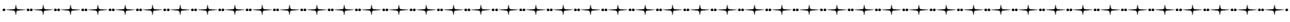
[10] 李旺林,束龙仓,李砚阁. 地下水库蓄水构造的特点分析与探讨[J]. 水文,2006,26(5):16-19. (LI Wanglin, SHU Longcang, LI Yange. Characteristics of water-storing structure of groundwater reservoirs [J]. Journal of China Hydrology,2006,26(5):16-19. (in Chinese))

[11] 彭勃,葛雷,王瑞玲,等. 黄河三角洲刁口河生态补水对地下水影响的模拟分析[J]. 水资源保护,2015,31(5):1-6. (PENG Bo, GE Lei, WANG Ruiling, et al. Simulation analysis on effect of ecological water supplement on groundwater in Diaokou River of Yellow River Delta [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (5):1-6. (in Chinese))

[12] 孙凤荣,温忠辉,束龙仓,等. 宿州市城西水源地地下水限采及其效果分析[J]. 水资源保护,2016,32(1):184-189. (SUN Fengrong, WEN Zhonghui, SHU Longcang, et al. Analysis of groundwater pumping-limit and effect in Chengxi well field in Suzhou City [J]. Water Resources Protection,2016,32(1):184-189. (in Chinese))

[13] 鲁程鹏,束龙仓,刘丽红,等. 基于灵敏度分析的地下水数值模拟精度适应性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38 (1): 26-30. (LU Chengpeng, SHU Longcang, LIU Lihong, et al. Adaptability evaluation of numerical simulation accuracy of groundwater based on sensitivity analysis [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2010,38(1):26-30. (in Chinese))

(收稿日期:2016 - 08 - 30 编辑:王 芳)



· 信息播报 ·

2017 中国水资源高效利用与节水技术论坛将在哈尔滨召开

为贯彻落实五大发展理念和新时期治水思路,以及九部委联合印发的《全民节水行动计划》,实现管水、用水、节水新跨越,提高水资源的利用效率和效益,进一步推进节水型社会建设和水生态文明建设,深入挖掘各行业用水领域的节水典型,在全社会形成节水理念和节水氛围,加快节水企业技术创新,促进节水产品与技术的应用,增进同行业间的交流与合作,在中国水利学会的支持下,由河海大学联合中国水利经济研究会、黑龙江省水利科学研究院共同主办的“2017 中国水资源高效利用与节水技术论坛”,拟于2017 年7 月26—28 日在哈尔滨召开,由《水资源保护》编委会、《水利经济》编委会、黑龙江省水利学会和北京沃特咨询有限公司等承办本次会议。

(本刊编辑部供稿)