

不同回灌补源模式下石川河富平地下水库数值模拟

张紫瑶^{1,2}, 王继玲^{1,2}, 周维博^{1,2}, 冯缠利³, 高建辉³

(1. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘 要: 石川河富平地区地下水长期处于采补失衡状态, 大范围含水层被疏干, 形成区域性降落漏斗, 针对拟建的石川河富平地下水库, 设置 5 种开采回灌方案, 建立地下水流数值模型模拟不同方案下地下水库水位和蓄水库容变化情况。结果表明: 各回灌方案在消除降落漏斗的同时, 均能较好地恢复地下水水位, 且不超过地下水库的调蓄上限水位; 回灌量相同、回灌方式不同时, 逐日回灌方式的水位恢复效果优于灌期+非灌期回灌方式, 较 2018 年地下水水位平均抬升 13.55 m, 蓄水库容增加 $2.99 \times 10^8 \text{ m}^3$; 回灌量不同时, 较大回灌量对地下水水位的影响大于回灌方式, 即泾惠渠水源回灌时, 水位抬升程度最大, 为 19.77 m, 蓄水库容相应增加 $4.36 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。模拟结果可为地下水库的调蓄与运行提供参考。

关键词: 地下水库; 回灌补源模式; 地下水流数值模拟; 蓄水库容; 石川河; 富平地区

中图分类号: TV62⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)02-0054-07

Numerical simulation of Shichuan River Fuping Groundwater Reservoir under different recharge source modes

ZAHNG Ziyao^{1,2}, WANG Jiling^{1,2}, ZHOU Weibo^{1,2}, FENG Chanli³, GAO Jianhui³

(1. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region (Chang'an University), Ministry of Education, Xi'an 710054, China; 3. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an 710001, China)

Abstract: The groundwater in the Fuping area of the Shichuan River Basin has been in an unbalanced state for a long time and a large area of aquifer has been drained, forming a regional landing funnel. In view of the proposed Shichuan River Fuping Groundwater Reservoir, we set up five kinds of mining recharge schemes to establish a groundwater flow numerical model for the simulation of the groundwater reservoir water level and water storage capacity change under different schemes. The results show that all the five schemes can both eliminate the landing funnel and restore the water level at the same time without exceeding the upper water level limit of the groundwater reservoir; with the same recharge amount and different recharge methods, the water level recovery effect of daily recharge is better than that of recharge in irrigation and non-irrigation period, the average groundwater level is 13.55 m higher than that of 2018, and the storage capacity is increased by $299 \times 10^6 \text{ m}^3$. Under different recharge amounts, the influence of the larger recharge amount on the groundwater level is greater than that of the recharge method, i. e., the water level rises the highest when the recharge source is Jinhui Canal Irrigation and the recharge amount is 19.77 m, and the storage capacity is increased by $436 \times 10^6 \text{ m}^3$ correspondingly. The simulation results can provide a reference for the regulation, storage and operation of groundwater reservoirs.

Key words: groundwater reservoir; recharge source mode; numerical simulation of groundwater flow; water storage capacity; Shichuan River; Fuping region

收稿日期: 2021-12-08; 修回日期: 2022-03-29

基金项目: 陕西省水利科技计划项目 (2021slkj-16)

作者简介: 张紫瑶 (1997-), 女, 山东蓬莱人, 硕士研究生, 主要从事地下水方面的研究。

通讯作者: 周维博 (1956-), 男, 陕西乾县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源与水环境和地下水方面的研究。

1 研究背景

陕西省石川河富平地区地表水资源短缺,至2018年,地下水年均供水量为 $4\,189 \times 10^4 \text{ m}^3$,其中约85%用于工农业生产,长期大量开采地下水,造成石川河河谷区大范围潜水含水层被疏干。为满足富平地区水资源开发利用需求,于20世纪70年代后期提出建设石川河富平地下水水库,并通过水文地质勘察,查明了库区内潜水含水层岩性结构和补径排条件^[1-2]。2017年,李璇等^[3]、石文凯等^[4]根据前人的资料成果,进一步论证了石川河河谷区地下水水库建库的可行性并模拟了不同调蓄方案地下水动态和库容情况,但未明确提出补给水源。

地下水水库调蓄潜力通常由人工诱发的采补强度确定^[5],然而,由于目的不同,各研究所侧重的方向略有差异。开采机制体现了地下水水库的出水能力, Saieena 等^[6]从地下水开发角度出发,论证了地下水人工调蓄的必要性,同时开采井的布设^[7]和开采分区的划定^[8-9]同样影响地下水水库的流场变化和供水能力。人工回灌及回灌场所的确定则是进一步提升地下水水库调蓄规模与强度、提高补给水源利用效率的重要举措。张春辉等^[10]、李慧等^[11]提出利用雨洪资源进行回灌可在一定程度上满足当地需水,但在枯水年,雨洪回灌量略显不足,且水溶性污染物极易随淋滤作用进入地下水,而引区外优质水源回灌则可弥补雨洪回灌缺陷,不仅能够增加地下水资源量,还可净化地下水水质^[12-13]; Yang 等^[14]、Jasrotia 等^[15]通过调查和数值模型模拟,在确定适宜的人工回灌地带后提出了最优的蓄水方案,明确了人工回灌对周围含水层的影响。坚持引水回灌和科学的开采方案相结合,制定地下水水库调蓄方案^[16],能够有效地控灾减灾并使地下水水库产生最大效益。因此,在进行石川河富平地下水水库的人工调蓄时,进一步确定补给水源条件和未来开采机制对地下水水库的建设尤为重要。

本文结合泾惠渠与东庄水库两种补给水源^[17],建立地下水水库数值模型,在定量分析补给水源条件和开采条件的基础上,选取适宜的回灌地点,模拟不同回灌补源模式下石川河富平地下水水库水位恢复和蓄水库容变化情况,为地下水水库的建设、运行提供理论依据。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

陕西省石川河属渭河一级支流,整体流向为北

西-南东,本研究以富平县境内石川河河谷阶地区域作为研究区,如图1所示。研究区总面积约为 149 km^2 ,地貌类型包括河漫滩和一级、二级阶地,其与两侧塬区高差较大,构成了“肚儿大、口儿小”的适宜修建地下水水库的地质结构。

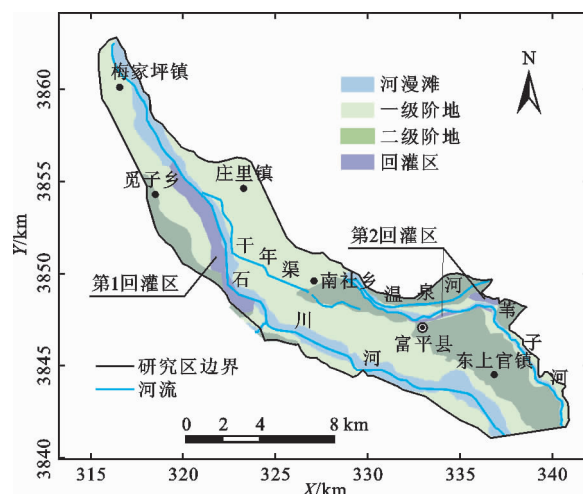


图1 石川河河谷阶地区域地貌及水系分布

石川河河谷区多年平均降雨量为 533.2 mm ,季节性降雨特征明显,夏季炎热多暴雨,间有伏旱,秋季多连绵阴雨,春、冬两季降雨量仅占全年的3.7%。该区地下水埋深较大,平均埋深为 43.94 m ,75%区域埋深大于 35 m ,且在庄里镇、南社乡以及富平县城关街道东南部存在降落漏斗,漏斗中心最大埋深为 72 m 。区内工农业较发达,覆盖了工业布局规划的“三轴四区”,是富平县工商业和农业、副业的主要发展区。

2.2 数据来源

本研究中对现状年2018年和预测年份2029年的水源条件与开采数据的分析分别来源于《石川河富平地下水水库近期水源方案研究报告》和《富平县水资源承载能力监测预警机制》。

3 研究区地下水流数值模型

3.1 研究区水文地质模型及数学描述

石川河河谷区平面范围在WGS1984 UTM 49N的投影坐标下为: $X = 311\,250 \sim 348\,080 \text{ m}$, $Y = 3\,836\,640 \sim 3\,864\,440 \text{ m}$,有效单元格总面积约为 149 km^2 。

研究区地下水体为第四纪潜水含水层潜水,水流服从达西定律。根据水文地质剖面资料,将含水层在垂向上概化为3层,第1层以黄土、粉质黏土为主;第2层为厚 $50 \sim 80 \text{ m}$ 的砂砾卵石层;底部为厚

8~12 m 稳定分布的粉质黏土层,其隔水性能良好,按不透水边界处理。

根据上述已有资料,将模拟区的地下水概化为非均质、各向同性的三维非稳定流,数学模型可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[K_{xx}\frac{\partial H}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[K_{yy}\frac{\partial H}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[K_{zz}\frac{\partial H}{\partial z}\right]=S_s\frac{\partial H}{\partial t}\quad(1)$$

$$((x,y,z)\in\Omega,t\geq 0)$$

$$H(x,y,z,t)|_{t=0}=H_0(x,y,z)\quad(2)$$

$$((x,y,z)\in\Omega,t\geq 0)$$

$$\begin{cases} H|_{\Gamma_0}=z \\ -(K+W)\frac{\partial H}{\partial z}+W|_{\Gamma_0}=\mu\frac{\partial H}{\partial t} \end{cases}\quad(3)$$

$$((x,y,z)\in\Gamma_0,t\geq 0)$$

$$K\frac{\partial H(x,y,z)}{\partial n}|_{\Gamma_2}=q(x,y,z,t)\quad(4)$$

$$((x,y,z)\in\Gamma_2,t\geq 0)$$

式中: Ω 为渗流区域; K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 分别为含水层 x 、 y 、 z 方向的渗透系数,m/d; H 为渗流水头,m; S_s 为弹性释水率; Γ_0 为潜水面边界; W 为垂向入渗补给强度,m²/d; μ 为给水度; Γ_2 为第二类边界; q 为给定边界上单位面积的侧向补给量,m³/(d·m²)。

由于河谷区地下水遭长期超采,潜水水位较低,主要受周围洼地、塬区和洪积扇的侧向补给,因此研究区边界主要为二类流量边界。渠道渗漏为线源,水库渗漏、地表降水入渗和灌溉水回归为面源,研究区机井密布,故将开采井设为面汇。本区极限蒸发深度为4~5 m,而在石川河谷漫滩区局部地段,最小水位埋深为5~10 m^[18],故不考虑潜水蒸发影响。根据地貌类型和地下水水位埋深变化情况,确定出研究区大气降水入渗系数及分区^[18]和边界条件,如图2所示。

3.2 模型的识别与验证

模型识别期为2018年1月1日-12月31日,

初始流场通过2018年1月的地下水监测数据插值生成,并利用2019年1月1日-12月31日的地下水水位数据进行验证。经过反复调试,地下水水位拟合程度较好,与实测情况基本一致,如图3所示。选取研究区内的G117#、41167835#、41167930#3个观测井(观测井位置见图3)对地下水水位的模拟计算值进行验证,验证结果如图4所示。

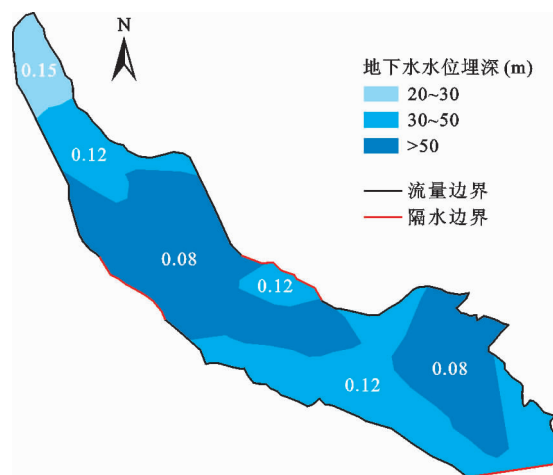


图2 研究区降水入渗系数分区和边界条件(单位:m/d)

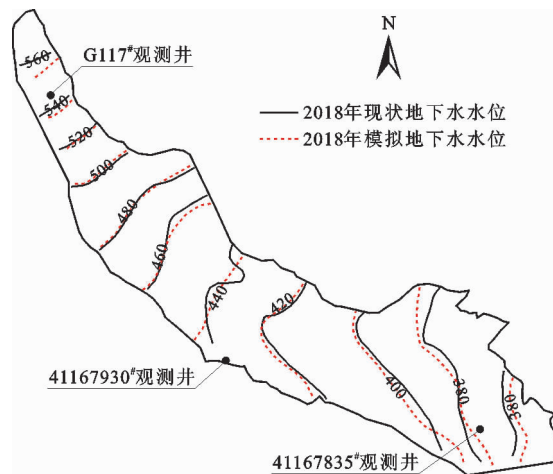


图3 2018年研究区地下水水位模拟结果(单位:m)

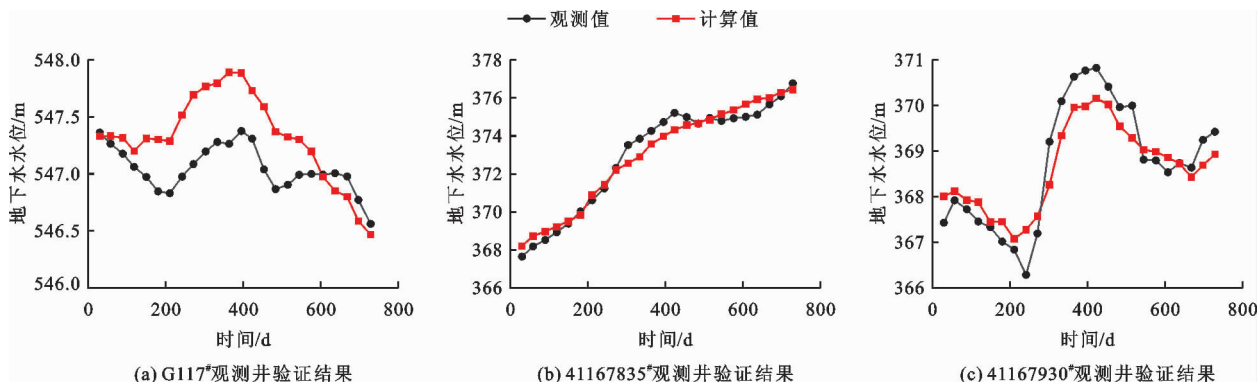


图4 地下水水位模拟计算值验证结果

由图 4 可见,G117[#]、41167835[#]、41167930[#]观测井计算水位与相应观测水位均呈现大致相同的变化趋势,计算水位误差在 $\pm 0.5\text{ m}$ 以内的分别占 75.00%、70.83%、62.50%,所有误差均在 $\pm 1\text{ m}$ 以内,表明该模型能够合理地模拟库区孔隙水流总体变化趋势,为下一步回灌开采方案的制订奠定了良好的基础。

根据水文地质钻探、抽水试验和双环渗水试验,将研究区划分为 6 个参数区(图 5),第 1、3 层为同一个参数区(1[#]参数区),第 2 层划分为 5 个参数区(2[#]~6[#]参数区),并通过试估-校正法确定最终的水文地质参数。各参数区水文地质参数值见表 1。

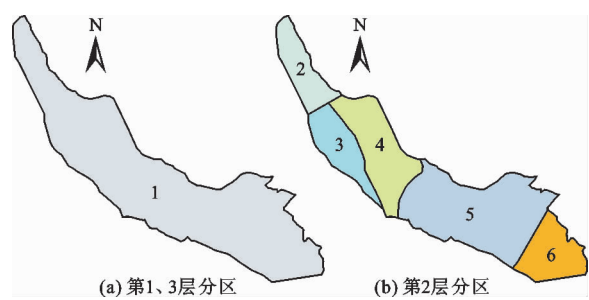


图 5 研究区水文地质参数分区

表 1 研究区各参数区水文地质参数值

参数区编号	渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)	给水度
1	0.5	0.03
2	9	0.13
3	15	0.10
4	10	0.26
5	7	0.10
6	4	0.22

4 地下水库补源回灌方案模拟

4.1 回灌条件分析

通过地下水库补水水源方案论证,采用泾惠渠与东庄水库两种补源进行回灌,石川河补水工程布设如图 6 所示。根据水源方案设计地下水人工回灌补源模式,以实现地下水良性循环和水资源可持续利用。

4.1.1 补源条件分析 泾惠渠灌区渠系工程末端已延伸到石川河干流,结合西郊水库,具备向地下水库补水的条件。按照泾惠渠灌区水源方案现状有效灌溉面积,灌溉期灌溉后剩余水量可向地下水库补水 $0.33 \times 10^8\text{ m}^3$,补水天数为 86 d;非灌期可向地下水库补水 $1.03 \times 10^8\text{ m}^3$,补水天数为 149 d,年补水

量为 $1.36 \times 10^8\text{ m}^3$ ^[17]。考虑 15% 输水损失和地层岩性,以年均流量的 30% 作为生态补水,直接泄放到河道内,则泾惠渠水源向地下水库回灌量为:灌期回灌量为 $0.156 \times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,非灌期回灌量为 $0.487 \times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 。从渠首到地下水库回灌点利用已成线路和新建补水线路进行回灌,回灌时长和水量则平均分配到各月。

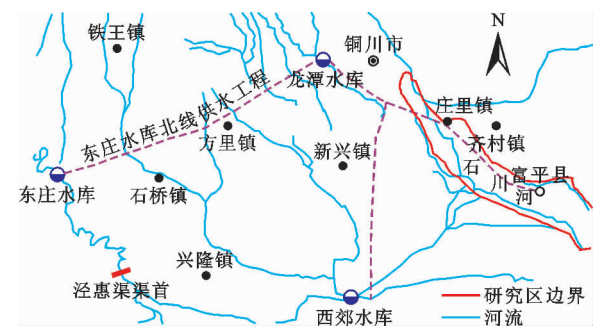


图 6 石川河补水工程布设示意图

东庄水库拦沙期在满足基本的防洪减淤、供水、泾河渭河生态泄流要求的基础上,具有年补水 $0.999 \times 10^8\text{ m}^3$ 的能力,其中包括漏斗恢复量 $0.423 \times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ (按 10 a 漏斗恢复期考虑)和维持采补平衡水量 $0.576 \times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 。其输水路线较长,输水损失较大,按照 30% 考虑。回灌工程起点初步拟定为龙潭水库,由于该库水位较高,依此从龙潭水库通过压力管道可自流输水至地下水库范围内任何地点,供水保证率可达 95%,结合地层岩性,东庄水库年回灌量为 $0.528 \times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ 。

4.1.2 回灌区分析 选取地下水水位埋深、坡度、含水层厚度、含水层渗透系数等指标,采用多指标综合评价法进行回灌地点适宜性分析,选出最佳回灌区,如图 1 所示。第 1 回灌区位于石川河河漫滩,位于石川河的中上游,砂卵石层连续性好,回灌面积为 7.24 km^2 ;第 2 回灌区河谷漫滩的砂砾卵石层与下伏含水层完全沟通,不需进行大规模的剥离黄土,且疏干的砂砾卵石层厚度较大,其河源顺流而下 1.74 km^2 范围。当补源的水引入回灌点时,以自流方式顺河流流向沿河道缓慢渗入地下。

4.2 开采条件分析

根据富平县水资源承载力的相关研究^[19],富平县地下水开采包括浅层水和深层水,为防治地下水超采,本次地下水开采量仅分析浅层水。为达到允许开采量,2029 年地下水开采量较 2018 年(开采量为 $0.340 \times 10^8\text{ m}^3$)需减少 $0.124 \times 10^8\text{ m}^3$,故设置开采条件为缩采 12%;在水资源承载力不超载的前提

下,设置开采条件为维持现状开采。

4.3 回灌方案设置

根据上述分析,设置两种开采方式与两种回灌方式,其中回灌的处理方式为:在河道沿线回灌区设置正水量脉冲(补为正),将回灌入渗量概化为降水

量的函数进行求算,表现人为干预的方式和强度。本次回灌方案的模拟,以 2018 年为现状年,采用东庄水库和泾惠渠为补给水源,模拟 2020—2029 年研究区地下水水位和库容恢复情况。具体回灌方案设置见表 2。

表 2 研究区地下水库回灌方案设置

方案	开采方式	回灌方式	回灌量/ $10^8 (\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	回灌时长/d
1	维持现状开采	灌期 + 非灌期	$0.156 + 0.487$	$86 + 149$
2	压缩现状开采 12%	灌期 + 非灌期	$0.156 + 0.487$	$86 + 149$
3	维持现状开采	逐日回灌	0.528	365
4	压缩现状开采 12%	逐日回灌	0.528	365
5	维持现状开采	灌期 + 非灌期	$0.128 + 0.399$	$86 + 149$

5 结果分析与讨论

5.1 结果分析

采用 Surfer 软件求得两个等水位面间的体积^[20],结合水文地质参数及分区,计算给水度的加权平均值,则以体积与给水度的乘积作为蓄水库容。据相关资料^[21],研究区水位埋深在 5~15 m 时,不会引起土壤盐渍化,且不会对农业生产和建筑物产生影响。自 1959 年起,石川河河谷区地下水开采量大幅增加,地下水水位开始出现连续下降趋势,因此,将 1959 年地下水水位作为调蓄上限水位,此时研究区仍存在漏斗,按天然水力坡度对漏斗区(埋深超过 15 m 的观测井)调整后进行插值,最终得出研究区调蓄上限水位。

上述 5 种回灌方案至 2029 年与 2018 年现状年相比地下水动态情况见表 3;模拟不同回灌方案下 2029 年研究区地下水水位与现状年相比的变化情况如图 7 所示。

表 3 2029 年各回灌方案与 2018 年现状年相比地下水动态情况

方案	水位平均 变幅/m	给水度	蓄水库容 变幅/ 10^8 m^3	与上限水位 差值/m
1	19.77	0.15	4.36	-10.46
2	23.43	0.15	5.17	-6.81
3	13.55	0.15	2.99	-16.55
4	19.33	0.15	4.26	-11.37
5	13.52	0.15	2.98	-16.68

表 3 显示,在进行人工回灌时,地下水水位和蓄水库容均有所回升,且 5 种方案地下水水位回升幅

度均大于 13 m。结合图 7 所示的地下水水位情况,人工回灌情景下地下水水位仍下降的区域位于第 1 回灌区上游,即梅家坪镇,这是由于水流流向为北南东方向,人工回灌不能有效补给上游地区,但与无回灌情况相比,下降趋势减缓。

由图 7(a)可见,在维持现状开采量开采,泾惠渠补源按灌期回灌 86 d、回灌量 $0.156 \times 10^8 \text{ m}^3$,非灌期回灌 149 d、回灌量 $0.487 \times 10^8 \text{ m}^3$ 进行回灌时(方案 1),研究区整体各年补给量均大于排泄量,较 2018 年现状年水位明显抬升。方案 1 地下水水位平均升高 19.77 m,蓄水库容增加 $4.36 \times 10^8 \text{ m}^3$,与调蓄上限水位的水位差为 10.46 m(表 3);在方案 1 基础上缩减 12% 开采量时(方案 2),地下水水位等值线向下游偏移,在回灌区位置补给水丘面积增大,说明开采量减少有助于地下水水位的抬升。方案 2 地下水水位平均抬升 23.43 m,蓄水库容增加 $5.17 \times 10^8 \text{ m}^3$,其最接近上限水位,仅相差 6.81 m(表 3)。

由图 7(b)可见,维持现状开采条件下,东庄水库以年回灌量 $0.528 \times 10^8 \text{ m}^3$ 进行逐日回灌时(方案 3),地下水处于正均衡状态,尚未出现补给水丘。方案 3 地下水水位平均抬升 13.55 m,蓄水库容相应增加 $2.99 \times 10^8 \text{ m}^3$,且与上限水位相差 16.55 m;在方案 3 基础上缩减 12% 开采量时(方案 4),地下水水位回升较明显,平均升幅为 19.33 m,蓄水库容增加 $4.26 \times 10^8 \text{ m}^3$,与上限水位的差距缩小为 11.37 m。方案 3、4 的地下水水流场变化均匀,表明地下水流速较为稳定。

综合图 7(c)和表 3 可知,在维持现状开采量开采,东庄水库按灌期回灌 86 d、回灌量 $0.128 \times 10^8 \text{ m}^3$,非灌期回灌 149 d、回灌量 $0.399 \times 10^8 \text{ m}^3$ 进行

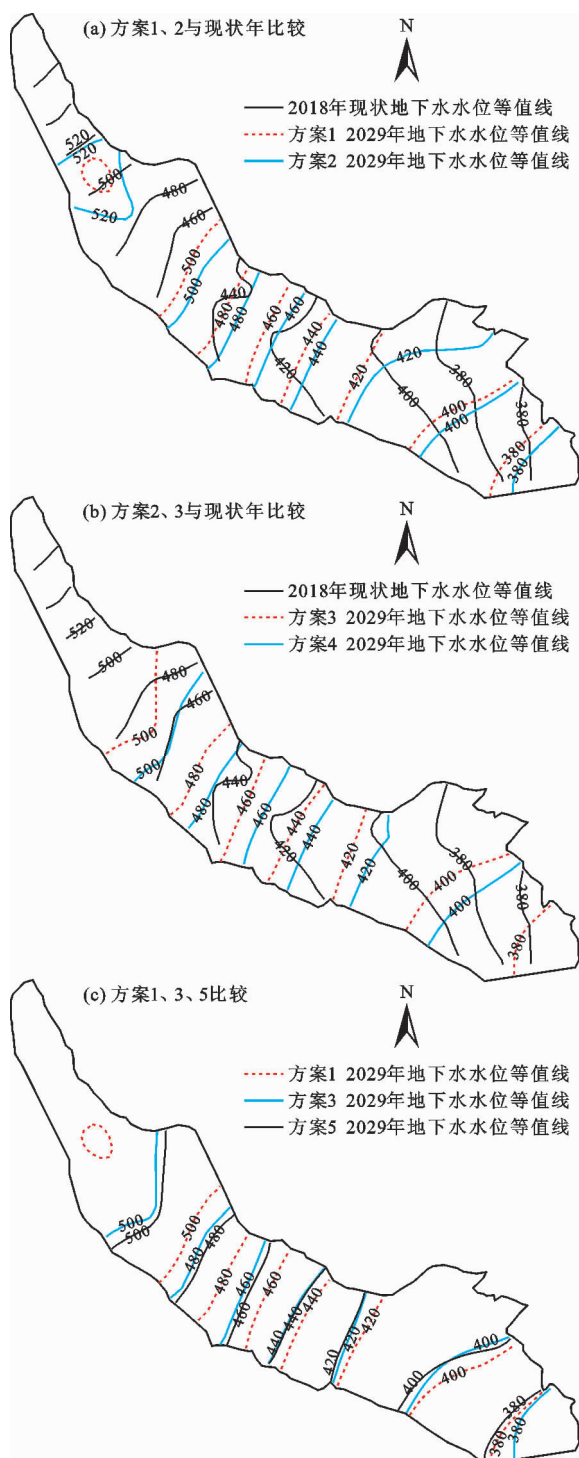


图7 不同回灌方案下2029年研究区地下水水位变化情况(单位:m)

回灌时(方案5),地下水水位平均抬升13.52 m,蓄水库容增加 $2.98 \times 10^8 \text{ m}^3$,而与上限水位差值在5种方案中最大,为16.68 m。与方案1相比,方案5的回灌量小,故地下水水位等值线向上游偏移较大,地下水水位整体抬升程度低于方案1,平均降低了6.25 m;与方案3相比,两方案回灌量相同,回灌方式不同,地下水水位变化出现差异:以430 m等值线

为界,其上游地区方案5的地下水水位抬升程度大于方案3,且差异逐渐减小,至中下游地区,两方案地下水水位等值线出现交叉,在研究区下游末端方案3地下水水位大于方案5。

整体而言,方案5地下水水位恢复程度小于方案3。

综上所述,富平县境内石川河河谷区地下水库建设条件得天独厚,不同回灌补源模式的模拟结果表明,随着回灌量的增加和开采量的减少,地下水水位回升,蓄水库容亦增大。但不同回灌方案下地下水水位抬升及蓄水库容增加的程度有较大差异,其中泾惠渠补源进行回灌且缩减12%开采量(方案2)的模式使地下水恢复效果最佳,维持现状开采、东庄水库按灌期和非灌期回灌方案(方案5)的地下水恢复相对缓慢。回灌量相同时,逐日回灌的影响大于灌期+非灌期回灌;回灌量不同时,回灌量较大、回灌天数少的方案对地下水水位的影响较大,进一步表明了回灌量对地下水水位恢复的主导作用。

5.2 讨论

石川河河谷区干旱缺水,引外调水源对水库进行回灌是恢复地下水系统稳定性的最佳举措,石文凯等^[4]对该地区的人工调蓄研究也表明了回灌与缩采能够较好地恢复地下水漏斗区的水位,本文以构建的数值模型模拟的地下水水位为计算标准,利用Surfer软件计算地下水储量,可反映出模拟末期研究区水位的增减情况,尤其在回灌区附近和缩采时,水位上升较为明显。然而,由于资料的缺乏,建模时忽略了梅家坪镇受上部基岩裂隙水和承压水的补给量,因此与文献^[4]的水均衡法相比,部分地区在持续开采的情况下水位下降,导致Surfer软件计算的平均水量偏小,但本文的模拟方法更突出了不同回灌方式下地下水水位的细节变化,如回灌量与开采量相同时,逐日回灌与灌期+非灌期回灌模拟的结果出现差异。

6 结论

(1)本文通过建立地下水流数值模型,预测不同回灌补源模式下2029年石川河河谷区地下水水位和蓄水库容变化情况。采用泾惠渠与东庄水库两种水源方案和维持现状开采与缩减开采量两种开采方案设置不同的人工调蓄情景进行模拟,结果表明在缩采或增加回灌总量的条件下,地下水水位回升,蓄水库容随之增大;各回灌补源模式下地下水水位抬升均未超过调蓄上限水位。

(2) 缩减开采量 12%、泾惠渠补源按灌期 + 非灌进行回灌的模式使地下水恢复效果最佳, 该方案可使地下水水位平均抬升 23.43 m, 蓄水库容增加 $5.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。回灌量相同时, 逐日回灌的影响大于灌期 + 非灌期回灌; 回灌量不同时, 大回灌量对地下水水位的影响超过了回灌天数的影响。

(3) 修建石川河富平地下水库进行人工调蓄是富平地区经济社会可持续发展的长期战略需求, 根据未来经济发展趋势, 人工开采量和补水量在不同年份会发生变动, 模型仅模拟现状开采和缩减开采量方案下的回灌情景, 可为其他地区开展地下水人工调蓄、维护地下水系统安全提供借鉴。对石川河富平地下水库的研究还需进一步加强水源水质的论证, 积极推进水库弃水、再生水和雨洪等补源的利用, 另外还要进行地下水库效益评价以及严格把控地下水水位回升, 以避免造成不良影响, 从而保证地下水库健康高效地运行。

参考文献:

- [1] 汪东云, 刘秀娟, 屈振林. 陕西省富平县石川河地下水库试验工程水文地质研究报告[R]. 陕西: 陕西省地质局第一水文地质队, 1979.
- [2] 吴在宝, 李云峰. 陕西富平石川河谷发育特征及其水文地质问题[J]. 长安大学学报(地球科学版), 1981(2): 80-87.
- [3] 李璇, 束龙仓, 鲁程鹏, 等. 石川河地下水库建库条件分析及地下水位动态预测[J]. 水资源保护, 2017, 33(3): 13-18.
- [4] 石文凯, 温忠辉, 李璇, 等. 基于人工调蓄的石川河河谷疏干含水层恢复效果分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(3): 138-141+112.
- [5] 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(2): 37-40.
- [6] SAIEENA S, KURIEN E K. Studies on groundwater resources using visual MODFLOW—A case study of Kadalundi river basin, Malappuram, Kerala[J]. Indian Journal of Soil Conservation, 2019, 47(1): 21-29.
- [7] 李凤丽, 徐嘉璐, 张游, 等. 母猪河地下水库数值模拟和调蓄分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(11): 204-209.
- [8] 袁冬梅, 齐跃明, 黄光明, 等. 基于水库调蓄和地灾协同控制的地下水资源高效利用研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(2): 149-157.
- [9] 袁冬梅. 岩溶地下水库可开采资源量评价及优化利用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [10] 张春辉, 魏鹏昆, 康辉平, 等. 平潭芦洋埔地下水库数值模拟与调蓄分析[J]. 中国农村水利水电, 2018(3): 8-12+16.
- [11] 李慧, 周维博, 马聪, 等. 泾惠渠灌区地下水调蓄研究[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 828-833.
- [12] 张大胜, 吴劲, 张世伟, 等. 基于数值模拟的北京密怀顺地区地下水资源调蓄研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 627-634.
- [13] ZHANG Dasheng, ZHANG Yongxiang, LIU Licai, et al. Numerical simulation of multi-water-source artificial recharge of aquifer: A case study of the Mi-Huai-Shun Groundwater Reservoir[J]. Water Resources, 2020, 47(3): 399-408.
- [14] YANG Yi, LIU Lichun, LI Binghua, et al. Simulation of storage scheme in the MHS underground reservoir recharged by water from the South-to-North Water Diversion[J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2017, 17(6): 1544-1557.
- [15] JASROTIA A S, KUMAR R, TALOOR A K, et al. Artificial recharge to groundwater using geospatial and groundwater modelling techniques in North Western Himalaya, India[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12: 774.
- [16] 肖霄. 吉林省洮儿河扇形地地下水库人工调蓄理论与技术[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [17] 冯缠利. 石川河富平地下水库近期水源方案研究报告[R]. 咸阳: 陕西省水利电力勘测设计研究院, 2021.
- [18] 赵耀东. 陕西省石川河地下水库关键技术研究[R]. 西安: 地下水监测管理局, 2017.
- [19] 刘亦平. 富平县水资源承载力监测预警机制[R]. 西安: 西安博思节能环保科技有限公司, 2018.
- [20] 罗亦泳, 张立亭, 陈竹安, 等. 基于 Surfer 的数据网格化与体积计算精度分析[J]. 测绘科学, 2009, 34(5): 97-99.
- [21] 刘卫岗. 陕西省石川河流域地下水调蓄研究报告[R]. 西安: 陕西省工程勘察研究院, 2015.