

# 基于地下水回灌试验及数值模拟的 秦岭山前洪积扇地下水调蓄功能研究

康华, 王友林, 金光

(陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 实施秦岭山前截洪引渗工程, 充分利用地下水调蓄能力, 对于解决水资源时空分布不均、改善关中地区水资源短缺、提高水资源利用率有重要意义。为进一步研究秦岭山前洪积扇地下水调蓄功能, 选取太平河洪积扇进行地下水回灌试验, 并使用 Visual MODFLOW 软件对调蓄功能进行数值模拟。结果表明: 在所设计的4种调蓄方式下, 平均调蓄深度约为10 m, 太平河、秦岭山前洪积扇调蓄估算量分别为3374.8万 $\text{m}^3$ 、27.04亿 $\text{m}^3$ , 如适度加强补采, 可激发更大调蓄潜力。

**关键词:** 地下水库; 调蓄; 回灌试验; 数值模拟; 秦岭山前洪积扇

中图分类号: P641.25

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)01-0140-04

## Research on capacity of adjustment and storage of underground reservoir at pluvial fan area in front of Qinling mountain based on groundwater injection test and numerical simulation

KANG Hua, WANG Youlin, JIN Guang

(Geology Survey Center of Shaanxi Province, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** The implementation of flood intercepting and leakage engineering in front of Qinling mountain and full use of storage adjustment capacity of underground reservoir have important significance to solve the problem of uneven time and space distribution of water resources, ameliorate the shortage situation of water resources in Guanzhong area and improve utilization rate of water resources. In order to further research the function of storage and adjustment of underground reservoir in pluvial fan area ahead of Qinling Mountain, the paper selected the pluvial fan zone of Taiping River to carry out groundwater injection experiment, and used Visual MODFLOW software to carry out numerical simulation to the function of storage and adjustment capacity. The results show that under the four modes of designed storage and adjustment, the average regulation depth is about 10 m, the estimated regulation amount of Taiping River and the pluvial fan in front of Qinling mountain is  $3374.8 \times 10^4 \text{m}^3$ ,  $27.04 \times 10^8 \text{m}^3$  respectively. If recharging is moderately strengthen, the bigger storage adjustment potential can be inspired.

**Key words:** underground reservoir; storage adjustment; injection experiment; numerical simulation; pluvial fan ahead of Qingling mountain

## 1 研究背景

关中地区是陕西省社会经济最发达的地区,也是我国北方缺水地区之一。秦岭北坡水系发育,习有“七十二峪”之称,山前冲洪积扇中上游,松散堆积物颗粒粗、厚度大,具有较大的储水空间;下游区,地层

颗粒变细,似潜伏式天然截流坝,使冲洪积扇形成巨型地下水库<sup>[1]</sup>。每年雨洪季节和丰水年,大量地表径流流失,这无疑是一种极大的浪费<sup>[2]</sup>,实施秦岭山前截洪引渗工程,充分利用地下水调蓄能力,可有效解决水资源时空分布不均、改善关中地区水资源短缺问题、提高水资源利用率<sup>[3]</sup>。我国人工补给地下水

工作还处于起步阶段,目前,在北京市西郊<sup>[2]</sup>、永定河洪积扇<sup>[4]</sup>、甘肃敦煌盆地<sup>[5]</sup>、陕西涝河洪积扇<sup>[1]</sup>、辽宁大小凌河扇地<sup>[6]</sup>、山东大沽河沿岸<sup>[7]</sup>、沈阳市<sup>[8]</sup>等均进行了地下水回灌试验及相应的调蓄能力研究,并取得一定成效。为进一步研究秦岭山前地下水回灌调蓄功能,本次选取太平河洪积扇进行地下水回灌试验,该示范工程填补了秦岭山前地下水回灌研究没有实际工程数据支撑的空白,试验为数值法评价地下水回灌调蓄能力提供计算依据,也为进一步深入研究提供了更加切实准确的试验参数。

## 2 试验区水文地质条件

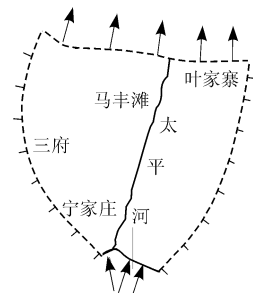
试验区位于太平河洪积扇太平河东侧户县马丰滩附近,洪积扇后部为巨厚的漂卵石层,厚度可达 300 m,中部为砾卵石层,厚度约 200 m,至洪积扇前缘,受岩相影响,卵砾石层迅速变薄,层次增多,颗粒变细,主要由粉质粘土、粘土及细砂组成,具有典型的洪积扇地质结构,为一天然地下水回灌。洪积扇中上部的潜水主要补给来源为太平河水、大气降水、灌溉水和侧向径流等,潜水接受补给后又以水平径流方式补给冲积扇前缘的潜水和承压水,主要通过人工开采、蒸发蒸腾以及侧向径流等方式排泄。洪积扇中后部地下水位低于河床,使该段河流成为地上“悬河”,河水在此段大量渗漏,甚至断流,为回灌试验提供了很好的入渗通道。根据野外踏勘,太平河两岸扇区有很多采石废弃沙坑,坑深约 3~5 m,面积 1000~20 000 m<sup>2</sup>,其坑壁上部为 20~50 cm 的薄层表土,下部为渗透性极好的松散砂卵石层,这些废弃沙坑为地下水回灌提供了良好的场所。

## 3 数值模拟模型建立与识别

### 3.1 概念模型

模拟区属太平河冲洪积扇中上部,基本为单一的潜水含水层系统,可将该地下水回灌系统概化为非均质潜水二维非稳定流。南部边界可得到地下水侧向径流及基岩裂隙水少量补给,划定为流量边界;北部根据水位统测情况,划定为已知水头边界;东西两侧选择两条流线作为人工隔水边界,面积为 12.98 km<sup>2</sup>,见图 1。

模拟区顶部边界为潜水面,接受大气降水入渗、河流入渗、农田灌溉水入渗等补给,并发生潜水蒸发排泄等垂向水量交换。据物探资料,太平河冲洪积扇区潜水含水层厚度在 290 m 左右,因此以实测的天然流场为基准,向下延伸在 290 m 作为地下水回灌底界。



++++ 隔水边界 --- 给定水头边界 —— 流量边界

图 1 评价区模拟范围及模型边界条件示意图

### 3.2 数值模型

依据水文地质概念模型,建立试验区地下水回灌数学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( T \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^m \delta_i W_i - \sum_{j=1}^n \delta_j Q_j + \\ \varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \mu \frac{\partial h}{\partial t} & (x, y) \in \Omega, t > 0 \\ h|_{t=0} = h_0(x, y) & (x, y) \in \Omega \\ h|_{\text{北部边界}} = h_1 & t > 0 \\ T \frac{\partial h}{\partial n} |_{\text{南部边界}} = q & t > 0 \\ \frac{\partial h}{\partial n} |_{\text{东西侧边界}} = 0 & t > 0 \end{cases}$$

式中:  $h$  为潜水位高程, m;  $T$  为导水系数, m<sup>2</sup>/d;  $\mu$  为给水度;  $h_0$  为初始水位, m;  $h_1$  为定水头边界的水位, m;  $q$  为定流量边界的单宽流量, m<sup>3</sup>/(d·m);  $W_i$  为第  $i$  段河水渗漏量, m<sup>3</sup>/d;  $Q_j$  为第  $j$  个开采井的开采量, m<sup>3</sup>/d;  $\varepsilon_1$  为降水与灌溉水补给强度, m<sup>3</sup>/(d·m<sup>2</sup>);  $\varepsilon_2$  为地下水蒸发强度 m<sup>3</sup>/(d·m<sup>2</sup>);  $\delta_i$  为  $\delta$  函数;  $\Omega$  为计算区域(面积 12.98 km<sup>2</sup>)。

本次模拟采用加拿大 WHI 公司开发的 Visual MODFLOW 软件。

### 3.3 模型检验

本次地下水数值模型校正,利用回灌试验中实测的监测孔水位数据进行拟合,本着模拟水位动态和流场与实测基本一致的原则,对模型进行反复调试校正,拟合曲线见图 2。

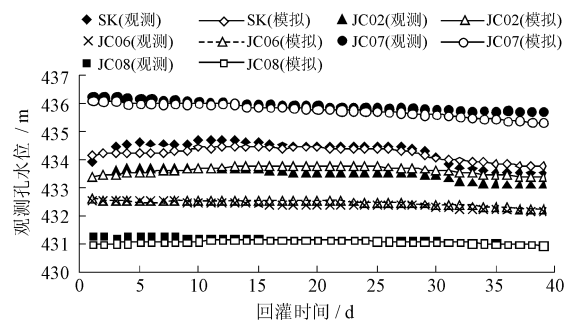


图 2 回灌试验观测孔水位拟合曲线

由2图可见,本次模型计算的水头变化趋势与实测基本一致,表明本次建立的地下水数值模型能够正确刻画模拟区的地下水流动特征,可用于进行地下水库调蓄功能评价。

## 4 试验过程及水位变化

试验主渗坑为距离太平河约200 m,面积约10 000 m<sup>2</sup>的废弃沙坑,回灌水源为太平河河水。4台砂石泵抽水至渗坑进行回灌,2012年10月27日正式开始,11月24日结束,共计29 d,累计回灌水量13.18万m<sup>3</sup>,平均回灌水量4 545 m<sup>3</sup>/d,回灌期间利用附近民井和有地下水出露的坑塘为观测点,对水位变化情况进行定时监测,并记录流量表数据,水位观测工作持续到停止回灌后10 d。

观测孔水位随时间的变化曲线见图2,由图2可以可出,随着灌水量增加,个别观测点水位略有上升,但整体呈下降趋势,主要原因有:①回灌试验在11月进行,为枯水期,水位本身处于下降阶段;②太平河洪积扇含水层储水空间大、能力强,而回灌水源不足,灌水量偏小。试验期水位变幅呈向心环状分布,离主渗坑越远水位降幅越大,试验区地下水位降幅明显小于区域水位降幅量。主渗坑水位随着回灌量增大逐渐升高,至灌水停止时,水位增幅0.93 m,与主渗坑相距最近的JC02监测点水位涨幅0.068 m,相距较近的JC06点受回灌影响水位降幅较小,为0.181 m,而与主渗坑相距较远的JC07、JC08观测点,水位降幅分别为0.372、0.224 m。停泵9 d后,主渗坑水位低于原始水位,稳定于433.49 m,下降了0.88 m,与此同时JC02、JC06、JC07、JC08点处水位分别下降了0.297、0.320、0.465、0.320 m。

## 5 地下水库调蓄功能评价

### 5.1 地下水库调蓄方式

为模拟地下水库调蓄功能,按照群井强采、枯采丰补的方式,设计了如下开采、补给方案。

开采:按400 m间距布设100~200 m深度的管井23眼,在枯水期即11月、12月、1月、2月进行连续强采。设计单井开采量分别为2 000、4 000 m<sup>3</sup>/d。

补给:由相关气象、水文资料可知,太平河汛期处于7、8、9三个月,平均洪峰流量大约为142.8 m<sup>3</sup>/s,假设①每月发生洪水1次,每次洪峰持续1 d,则拦洪量为12 337 920 m<sup>3</sup>/月,有计划地将拦蓄洪水引入扇体上游废弃沙坑进行人工回灌,回灌系数

采用降雨入渗系数0.428,则汛期平均每天对地下水的补给量为176 021 m<sup>3</sup>。假设②每月发生洪水1次,每次洪峰持续2 d,则汛期平均每天对地下水的补给量为352 042 m<sup>3</sup>。调蓄方式汇总见表1。

表1 调蓄方式汇总表

编号	丰水期回灌补给量	枯水期单井开采量
方案1	176021	2000
方案2	176021	4000
方案3	352042	2000
方案4	352042	4000

### 5.2 模拟结果

预测期间,降雨、蒸发数据均采用多年平均值,预测期为24个月,应力期为30 d,预测起始时间为第一年11月。

当枯水期单井开采量分别为2 000、4 000 m<sup>3</sup>/d,丰水期人工回灌补给量为17 6021 m<sup>3</sup>/d时,处于洪积扇中部的G3观测孔水位第一谷值出现在预测后第2年6月底,相对初始水位降深分别为14.76、15.20 m,经过3个月水位分别回升至441.74、441.52 m,回升变幅为6.48、6.70 m。第二谷值出现在第3年6月底,相对第一峰值水位降深分别为7.95、9.41 m,经过3个月水位回升至441.03、440.72 m,回升变幅为7.24、8.61 m。

当枯水期单井开采量分别为2 000、4 000 m<sup>3</sup>/d,丰水期人工回灌补给量为352 042 m<sup>3</sup>/d时,G3观测孔水位第一谷值出现时间、低水位及降深与丰水期补给量为176 021 m<sup>3</sup>/d时相同,经过3个月水位分别回升至447.76、447.52 m,回升变幅为12.50、12.70 m。第二谷值出现在第3年6月底,相对第一峰值水位降深分别为13.22、13.71 m,经过3个月水位回升至447.34、447.10 m,回升变幅为12.80、13.29 m。

当丰水期补给量增加一倍,以单井开采量为4 000 m<sup>3</sup>/d为例,G3观测孔水位第二次降深从9.41 m增大到13.71 m,最大回升变幅从8.61 m增大到13.29 m,这说明太平河地下水库拥有巨大的储水空间,加大丰水期补给量相当于将更多水储存于地下水库中,增强了其调蓄功能。

### 5.3 调蓄量

由模拟结果图3可知,在本次所设计的调蓄方式下,位于洪积扇中心位置的G3观测孔水位降深及回升变幅平均值约为10 m,故将太平河洪积扇地

下水库平均调蓄深度确定为 10 m, 太平河冲洪积扇具有调蓄地段的面积 12.98 km<sup>2</sup>, 给水度为 0.26(据《陕西省户县平原区农田供水水文地质勘查报告》), 则调蓄估算量为 3 374.8 万 m<sup>3</sup>。需要说明的是, 该调蓄量根据本次所设计的调蓄方案得来, 根据已有钻孔资料, 太平河洪积扇潜水含水层厚度约 290 m, 蕴藏着巨大的储水空间和开发利用潜力, 如果能通过修建滞洪坝、地表水库、渗水池、渗水渠等方式在丰水期增加引渗量, 在枯水期加大开采量, 则可以使地下水库的调蓄功能得到更好的发挥, 进一步激发其调蓄能力, 获得更大调蓄量。

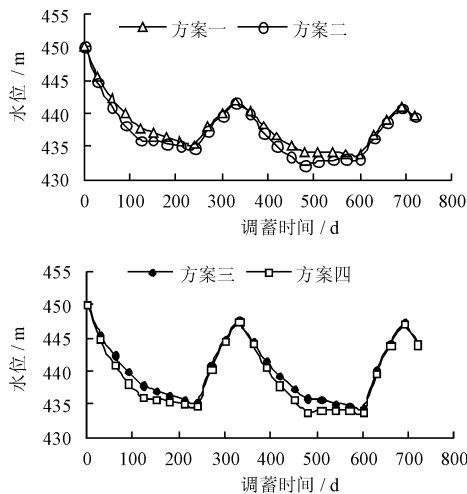


图3 水位历时曲线

秦岭山前具有调蓄能力的面积为 1 040 km<sup>2</sup>, 山前石头河、汤峪河、黑河、涝河、泮河、浐河、灞河、沈河、零河、赤水河、罗敷河等年均径流量分别为 4.48、1.37、6.26、1.23、2.59、0.29、5.27、0.43、0.19、0.61 和 0.33 亿 m<sup>3</sup>/a。根据本次在石头河、汤峪河、黑河及太平河等洪积扇所做的激电测深资料可知, 各洪积扇区水文地质条件类似, 含水层岩性相近, 平均含水层厚度均大于 200 m, 可以考虑应用太平河洪积扇调蓄模拟结果对整个秦岭山前调蓄量进行估算, 若给水度以 0.26 计, 调蓄深度为 10 m, 则调蓄量估算为 27.04 亿 m<sup>3</sup>。

## 6 结 语

根据本次初步研究成果, 秦岭北坡山前洪积扇,

水系发育, 调蓄条件优越, 调蓄能力强。为充分发挥地下水库调蓄功能, 应加强蓄水工程建设, 最大限度将丰水期多余水量储存起来, 并采用工程措施将部分洪水有计划下渗补给地下水, 以大量增加地下水资源量, 备枯水期使用。另外, 需适度增加开采量, 尤其在每年的汛前应增大开采强度, 腾出库容。这是合理开发利用本区水资源, 解决关中近、远期供水需求矛盾以及缓解黄河下游断流的重要途径之一<sup>[3,9]</sup>。鉴于本次回灌试验受项目周期、资金限制, 试验规模小、时间短, 获取的试验参数代表性不强, 建议下一步在秦岭山前洪积扇选择 2~3 处典型地段继续开展地下水回灌试验, 研究洪积扇不同地段、河水不同物理性质条件下入渗机能, 为进一步研究秦岭山前地下水库调蓄能力及截洪引渗工程建设提供更加准确的试验参数。

## 参考文献:

- [1] 王文科, 孔金玲, 王 钊, 等. 关中盆地秦岭山前地下水库调蓄功能模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(4): 5-9.
- [2] 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): 70-72, 84.
- [3] 仇小强. 秦岭山前截洪引渗与地下水库调蓄功能研究——以涝河冲洪积扇为例[D]. 西安: 西北大学, 2006, 86-88.
- [4] 郝奇琛, 邵景力, 谢振华, 等. 北京永定河冲洪积扇地下水人工调蓄研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(4): 12-18.
- [5] 刘 畅, 成建梅, 苏春利, 等. 敦煌月牙泉地区人工回灌下的地下水动态模拟[J]. 水资源保护, 2013, 29(2): 22-27+75.
- [6] 秦善长, 秦 龙. 凌海市大小凌河扇地下水人工回灌试验研究[J]. 吉林水利, 2005, (10): 23-25.
- [7] 李秀东, 葛会萍, 周进福. 莱西市大沽河沿岸地下水回灌补源措施[J]. 山东水利, 2007(3): 21-22.
- [8] 陈曦, 马秀成, 杨 维, 等. 沈阳市地下水人工回灌试验过程及其分析[J]. 工程勘察, 1995(3): 24-28.
- [9] 刘记来, 刘超, 黄天明, 等. 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[J]. 水文, 2010, 30(3): 33-37.