

张家川水源地不同取水方式对比分析

丁天生, 陈枭萌, 徐嘉璐

(长安大学 环境与工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 经过对研究区的水文地质条件进行分析, 设计了3种开采方式: 廊道、辐射井、渗流井。建立研究区的地下水流三维数值模拟, 计算出廊道、辐射井、渗流井的允许开采量分别为: 0.65、0.68、1.18 万 m^3/d 。通过对比分析, 表明渗流井与相同技术条件下的廊道及辐射井相比, 出水量大, 供水保证率高, 并且在建议开采量下含水层的水位降深在允许范围内。最终选定渗流井作为张家川水源地地下水的开采方式, 对研究区地下水的开发利用具有很好的指导作用。

关键词: 允许开采量; “渗流-管流”耦合模型; 廊道; 辐射井; 渗流井

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)04-0041-04

Contrast analysis of different water ways in water source region of Zhangjiachuan

DING Tiansheng, CHEN Xiaomeng, XU Jialu

(School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on a brief analysis of hydrogeological conditions in study area, the paper designed three exploiting ways such as gallery, radial well and seepage well. Through setting up three-dimensional numerical model of groundwater in the area, the reasonable yields of gallery, radial well and seepage well are 6500, 6800 and 11 800 m^3/d . Through contrast analysis, the simulation results suggested that seepage well has the most amount of water and the highest water supply guarantee rate and the water drawdown under the reasonable yield should be within the allowable range. The seepage well is finally selected as the exploiting way of Zhangjiachuan water source region, which has good directive function for the development and utilization of groundwater in the study area.

Key words: reasonable yield; coupled model of seepage and pipe flow; gallery; radial well; seepage well

地下水的开采方式有很多种, 例如廊道、辐射井、渗流井等。与管井相比, 非管井集水建筑物在地下水开发利用及水环境修复中的应用日益增多, 并以其高产、高效、低耗、好管理、供水总体成本相对较低等众多优势, 凸现在人们面前, 但非管井取水工程结构复杂, 建设成本较高, 技术不成熟, 因此在确定开采方式的时候要根据当地的水文地质条件合理选取, 实现以水资源可持续利用支持社会经济可持续发展的战略目标^[1]。

1 研究区水文地质概况

神木县位于陕西省北端, 地处黄河中游, 秦晋蒙

三省(区)接壤地带, 矿产资源丰富, 是国家级陕北能源化工基地的核心区域。张家川水源地位于神木县东南部的黄河河谷区, 为干旱半干旱地区, 地势较为平坦, 第四系冲洪积含水层厚度大, 冲洪积物颗粒粗, 孔隙率大, 透水性好, 地下水主要赋存于砂砾卵石层的孔隙内。含水层平均厚度为 8.2 m, 水位埋深 1~2 m。地下水赋存条件从一级阶地后缘到前缘逐渐变好, 天然条件下, 地下水主要接受大气降水入渗和农灌区回归补给, 排泄方式主要是少量的人工开采和地下水浅埋区的潜水蒸发蒸腾排泄。在今后进行地下水开采之后, 将会激发黄河河水大量渗漏补给地下水, 主要的排泄方式则会变成人工开采。

收稿日期: 2013-03-19; 修回日期: 2013-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972154)

作者简介: 丁天生(1989-), 男, 山西运城人, 硕士生, 研究方向: 地下水科学与工程。

通讯作者: 王玮(1970-), 男, 江西乐平人, 副教授, 硕士生导师, 从事水资源与环境的教学与科研工作。

2 研究区边界概化

根据以上研究区水文地质条件,研究区东部边界为黄河,在天然条件下,地下水在接受大气降水入渗补给后向黄河排泄,在未来开采条件下,将激发黄河河水大量渗漏补给地下水,可将黄河概化为第三类河流边界。西部边界为低山丘陵区与黄河河谷区分界线,基岩透水性差,加之地形破碎,可概化为隔水边界。考虑到黄河水面宽广、纵向延伸长,取水工程正常工作时不会影响到黄河上、下游边界,故将各漫滩上、下游边界概化为一类定水头边界。研究区的顶面为潜水面,在该面上发生着降水入渗、潜水蒸发等垂向水交换作用,可概化为潜水面边界。底面为三叠系完整基岩,基岩结构致密,裂隙不发育,构成区域隔水底板^[2]。黄河设定为第三类边界,平水期水位值为 40 m,枯水期水位值为 39 m。河床底部淤积层(泥皮)的渗透性能采用淤积层的垂向渗透系数与厚度的比值来表示。而河流渗透性能为河床底部淤积层的垂向渗透系数与厚度的比值乘以剖分单元格中河流的面积,区内黄河河床淤积层(泥皮)厚 1 cm,渗透系数根据邻区资料并结合经验取值为 0.01 m/d,如图 1 所示。

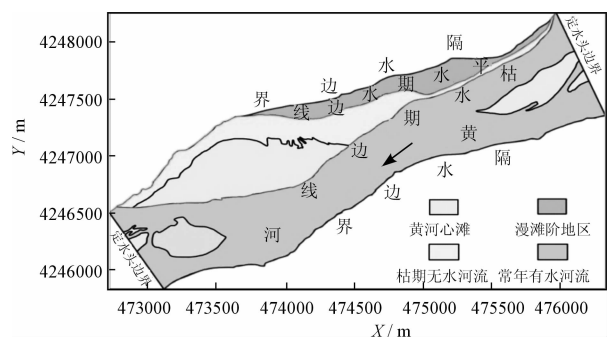


图1 张家川勘查地段概念模型平面图

3 计算结果分析

3.1 计算模型简介

根据研究区的水文地质条件,设计了廊道、辐射井、渗流井 3 种非管井建筑物的取水方案。根据不同的开采方式,建立相对应的模型,采用“渗流-管流”耦合模型对其进行允许开采量计算。

水在廊道、辐射井、渗流井这 3 种地下水取水工程中的流动不仅有渗流,还包括管流。水的流态除了层流外,还包含紊流等多种流态,上述 3 种取水工程的巷道内不全是渗流和层流。陈崇希教授等通过引入等效渗透系数的概念建立起“渗流-管流”耦

合模型^[3-4],将渗流和管流耦合起来,解决了多种流态的地下水流问题。研究区分为两个参数区,水平渗透系数依次为 25.021 47、19.164 17 m/d,垂向渗透系数依次为 1.4500、4.4980 m/d。给水度取 0.15。

3.2 各开采方式下允许开采量计算

3.2.1 廊道开采 各勘查地段的可开采量取决于开采条件下激发的河流渗漏补给量大小。因此,在黄河岸边设计廊道开采方式。在张家川勘查地段沿黄河平水期水边线布设一条长约 1 430 m 的廊道,廊道横截面宽 2 m,高 2 m。在廊道下游尾部布设一口竖井,竖井井壁衬砌不进水。设计廊道顶面埋深分别为 2、3、4、5、6 m,各埋深廊道条件下对应设计竖井降深分别为 1~2、1~3、1~4、1~5、1~6 m,这样各个勘查地段共设计了不同埋深廊道在不同竖井降深条件下的 20 种计算方案。采用“渗流-管流”耦合模型对其进行运算。计算结果分析如下。

计算结果表明,在竖井降深相同的条件下,廊道埋深的大小对廊道出采量的大小影响不大,且随着廊道埋深的减小,廊道计算出水量略有增大。随着竖井降深的增加,廊道计算出水量有显著的增加,但单位竖井降深条件下计算出水量逐渐减小。鉴于此,同时考虑到随廊道埋深增加其施工难度及施工成本将急剧增加,推荐采用埋深 5 m,降深 5 m 的廊道方案开采黄河河谷区的地下水,在该方案作用下,平水期张家川勘查地段廊道计算出水量为 39 173.19 m³/d,建议开采量为 39 100 m³/d。

考虑到黄河流经模型区的河段在每年 6、7 月将出现枯水期,届时黄河水位下降、水边线后退,这将对廊道开采造成一定的影响。为此计算了黄河枯水期条件下推荐廊道取水效果,模型中黄河水边线按枯水期水边线确定,黄河水位下降 1 m。将推荐方案代入模型,计算结果表明在黄河水位下降、水边线后退条件下,廊道取水量显著下降,在竖井水位不变条件下,张家川勘查地段廊道计算出水量减少为 6 519.14 m³/d,枯水期建议开采量为 6 500 m³/d。

3.2.2 辐射井开采 根据前述的数学模型,辐射井计算模型采用数值方法进行求解。在张家川勘查地段设计了 8 眼和 12 眼大口径辐射井两种方案开采地下水。辐射井竖井直径 2 m,距黄河平水期水边线 50 m,每眼辐射井设置 8 根辐射管,其中平行河流的两根辐射管长为 50 m,垂直河流伸向漫滩方向的辐射管长 40 m,其余 5 根辐射管垂直河流呈扇形伸向河床底部,辐射井竖井深度为 26.2 m。

为准确刻画辐射井复杂的结构,首先采用长方体单元对计算域进行精细的剖分,张家川漫滩区沿东西方向剖分为 724 列,沿南北方向剖分为 486 行,单层活动单元个数为 131 597 个,实际代表水平面积 3.29 km²,剖分网间距 5 m,垂向上剖分为 11 层,第四系含水层为 4 层,基岩裂隙含水层剖分 7 层,总活动单元个数为 1 447 567 个。在剖分网格的基础上,采用“渗流-管流”耦合模型建立起勘查地段辐射井取水数值模型并进行计算,计算结果见表 1。

表 1 辐射井取水水量计算结果 万 m³/d

计算期	井数	单井作用		群井作用	
		总出水量	建议开采量	总出水量	建议开采量
平水期	8	2.2321	2.2	2.1160	2.10
	10	2.7723	2.7	2.4993	2.40
枯水期	8	0.8927	0.8	0.6318	0.63
	10	1.1200	1.1	0.6870	0.68

对比 8 眼辐射井方案中单井作用与群井共同作用下的各辐射井取水水量计算结果可知,由于在布设辐射井时考虑了各辐射井间不产生显著影响,各辐射井间相互干扰小,群井作用下辐射井总出水量平水期减少 1 161.03 m³/d,仅仅减少了 5.2%,群井作用下辐射井总出水量枯水期减少 2 609.12 m³/d,减少了 29.2%。

对比 10 眼辐射井方案中单井作用与群井共同作用下的各辐射井取水水量计算结果可知,虽然增加辐射井数量会使得相邻两辐射井之间的距离减小,但在平水期各辐射井间相互干扰却没有显著增加,计算结果表明群井作用下平水期辐射井总出水量减少 2 729.67 m³/d,减少了 9.85%,枯水期减少 4 329.73 m³/d,减少了 38.66%。由计算结果可见,增加辐射井数量能显著增加勘查地段辐射井的总出水量,考虑到井与井之间的影响以及经济因素,因此不建议设计过多的井。

综合分析之后,确定了研究区的辐射井开采方式采用 10 眼辐射井方案开采研究区的地下水资源,建议平水期正常开采量 24 000 m³/d,枯水期开采量 6 800 m³/d。

3.2.3 渗流井开采 根据研究区内水文地质条件、参数等,在模型区布设了 3 眼(竖井间距 750 m)和 4 眼(竖井间距 500 m)渗流井两种方案。各渗流井设计硐室 5 个,硐室平面位置位于黄河平水期水边线,硐室间间距为 70 m,各硐室向斜上方施工辐射孔,单根辐射孔进入第四系含水层长度 1~3 m,辐射孔

主要布设在黄河河床方向,平巷顺黄河平水期水边线布设,竖井据黄河水边线 40 m,渗流井平面图如图 2 所示。

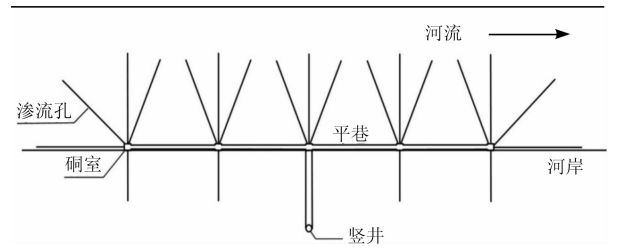


图 2 渗流井平面示意图

为准确刻画渗流井复杂的结构,首先采用长方体单元对计算域进行精细的剖分,在模型区沿东西方向剖分为 724 列,沿南北方向剖分为 486 行,剖分网间距 5 m,单层活动单元个数为 131 597 个,实际代表水平面积 3.290 km²。垂向上共 40 m,剖分为 8 层,第四系含水层剖分为 4 层,基岩裂隙含水层剖分为 4 层,总活动单元个数为 1 052 776 个,平巷埋深 20.3 m,竖井深度 27.2 m。在剖分网格的基础上,采用“渗流-管流”耦合模型建立起勘查地段辐射井取水数值模型^[5-6]并进行计算,计算结果见表 2。

表 2 渗流井取水水量计算结果 万 m³/d

计算期	井数	单井作用		群井作用	
		总出水量	建议开采量	总出水量	建议开采量
平水期	3	2.6137	2.60	2.6126	2.60
	4	3.5933	3.57	3.5738	3.55
枯水期	3	0.9343	0.91	0.9060	0.89
	4	1.3346	1.31	1.2123	1.18

对比 3 眼渗流井方案中单井作用与群井共同作用下的各渗流井取水水量计算结果可知,由于在布设渗流井时考虑了各渗流井间不产生显著影响,各渗流井间相互干扰小,张家川勘查地段群井作用下各渗流井出水量平水期衰减量仅为 11.15 m³/d,仅仅衰减了 0.04%,群井作用下各渗流井出水量枯水期衰减量仅为 282.91 m³/d,仅仅衰减了 3.0%。

对比 5 眼渗流井方案中单井作用与群井共同作用下的各渗流井取水水量计算结果可知,虽然增加一个渗流井会使得相邻两渗流井之间的距离减小,但各渗流井间相互干扰却没有显著增加,张家川勘查地段群井作用下各渗流井出水量平水期衰减量为 195.18 m³/d,仅仅衰减了 0.54%,群井作用下各渗流井出水量枯水期衰减量较平水期大,为 1223.18

m^3/d , 衰减了 9.16%。

通过对比黄河平水期与枯水期渗流井取水量计算结果可以看出, 虽然当枯水期黄河水边线后退时, 各渗流井设计辐射孔多位于黄河之下, 但由于黄河水边线后退时也伴随着水位下降, 这必将导致黄河水渗漏补给时的水力坡度变小, 进而使得各渗流井出水量显著减小。

综合考虑渗流井建设成本、取水点数目、单井出水量、总出水量等因素, 建议在渗流井开采方式中采用 4 眼渗流井方案开采区内地下水资源, 平水期正常开采量 $3.55 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 枯水期开采量 $1.18 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

4 开采方案的选取

研究区在廊道开采方式下平水期可开采地下水总量为 $3.91 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 枯水期的总开采量为 $0.65 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。枯水季节黄河水边线后退时, 总开采量减少了 83.4%, 衰减十分剧烈, 且开挖廊道会破坏河床, 影响河流行洪能力, 人工回填滤层易淤积, 导致出水量下降。

研究区在辐射井开采方式下平水期可开采地下水总量为 $2.4 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 枯水期的总开采量为 $0.68 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。枯水季节黄河水边线后退时, 总开采量减少了 72.5%, 衰减十分剧烈。

研究区在渗流井开采方式下平水期可开采地下水总量为 $3.55 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 枯水期的总开采量为 $1.18 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。枯水季节黄河水边线后退时, 总开采量减少了 66.7%, 衰减量相对较小。

对比 3 种开采方式可以看出: 渗流井和廊道两种取水方式在布渗漏补给的范围比辐射井大, 渗流井的取水效果明显优于比辐射井, 而且辐射井的取水点多而分散, 不好管理。为此建议采用渗流井方式开采区内地下水, 4 眼渗流井平水期正常取水量 $3.55 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 枯水期正常取水量 $1.18 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 。

根据黄河水文站流量长观资料, 黄河流域区内多年平均流量为 $951.87 \text{ m}^3/\text{s}$, 最枯流量 $24.3 \text{ m}^3/\text{s}$, 远大于推荐开采方案下的河流渗漏补给量, 且黄河与地下水水力联系较为密切, 计算过程中也考虑了

枯水季节黄河水边线后退对渗流井取水量的影响。同时计算研究区地下水容积储存量为 203.32 万 m^3 , 单位储存量为 18.32 万 m^3 , 仅地下水位下降 1 m 所释放出的水量可维持该地段 $2.87 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ 的渗流井枯水季节开采量 6 d 左右, 所以区内平水期条件下开采量、枯水季节黄河水边线后退条件下开采量是有补给保证的。

5 结 语

通过分析研究区的水文地质条件, 设计了 3 种开采方式, 并计算了各开采方式开采地下水的总量, 对比 3 种开采方式的取水效果后, 渗流井以其高产、低耗、好管理、供水总体成本低等众多优势凸显出来。最终确定在张家川水源地采用 4 眼渗流井开采地下水, 允许开采量为 1.18 万 m^3 。

由计算结果知, 枯水季节黄河水边线后退较大, 渗流井的出水量将衰减也较大, 建议在渗流井的基础上, 配以一定的蓄水工程设施, 将渗流井所获取的河流渗漏补给量储存在蓄水工程内, 这样可以通过以丰补歉、调节平衡的方式增大区内可供利用的水资源总量。

参考文献:

- [1] 陈鹏, 王玮, 刘基, 等. 南河底水源地取水方式选取对比分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(5): 11-14.
- [2] 郭东屏. 地下水动力学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994.
- [3] 陈崇希, 万军伟, 詹红兵, 等. “渗流-管流耦合模型”的物理模拟及其数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(1): 1-8.
- [4] 陈崇希, 胡立堂. 渗流-管流耦合模型及其应用综述[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 70-75.
- [5] 王玮, 畅俊斌, 王俊杰. 渗流井取水方式地下水允许开采量计算[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(1): 35-39+43.
- [6] 王玮. 渗流井取水计算模型及其应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2010.
- [7] 李俊亭. 地下水流数值模拟[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 56-63.