

盘塘水源地渗流井取水方式下地下水允许开采量计算

陈泉萌^{1,2}, 杨海瑞¹, 王玮¹, 徐嘉璐¹, 郭倩¹, 牟海斌¹

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 新疆环境保护科学研究院, 新疆, 乌鲁木齐, 830011)

摘要: 介绍了渗流井的结构和井流特征, 通过引入等效渗透系数, 构建“渗流—管流”耦合模型, 建立了渗流井取水的数学模型。以陕西省神木县盘塘水源地为例, 用地下水三维有限差分法对水源地地下水允许开采量进行了计算。结果表明, 盘塘水源地渗流井开采方式下, 地下水允许开采量为 92 400 m³/d, 枯水期允许开采量为 56 200 m³/d。通过对比不同取水方式下的允许开采量, 认为渗流井取水方式较管井、辐射井等取水方式具有出水量大, 易管理等优势。在干旱半干旱的地区, 渗流井具有明显优于其他取水结构的特点。

关键词: 渗流井; 允许开采量; 等效渗透系数; “渗流—管流”耦合模型; 盘塘水源地

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)03-0190-05

中图分类号: P641

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.037

Calculation of Allowable Groundwater Yield from Seepage Wells in Pantang Water Source Region

CHEN Xiao-meng^{1,2}, YANG Hai-rui¹, WANG Wei¹, XU Jia-lu¹, GUO Qian¹, MOU Hai-bin¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Xinjiang Academy of Environmental Protection Science, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: After a brief introduction of the structure and flow characters of seepage wells, a mathematic model of coupled seepage and pipe flow is developed by adapting the equivalent hydraulic conductivity. By taking the Pantang water source region of Shenmu County as an example, the model is used to get allowable groundwater yield by the 3-D finite difference method of groundwater flow. Results show that newly added allowable yield from seepage wells is 92 400 m³/d, and the newly added allowable yield in dry season is 56 200 m³/d. By allowable yields of different fetching water methods, seepage well is better than tube well and radial collector well, which is not only suitable for water yield, but also easy for management. In the arid and semiarid area, seepage well is much better than other fetching water methods.

Keywords: seepage well; allowable yield; equivalent hydraulic conductivity; coupled seepage and pipe flow model; Pantang water source region

在中国乃至全世界, 水资源问题以及与其相关的水环境问题日益成为制约地区经济发展和社会进步的瓶颈。怎样解决水资源问题, 最现实的办法仍然是进一步开发与合理利用陆地上的地表水和地下水资源, 尤其是在干旱半干旱地区的陕北, 由于地表水资源相对匮乏, 常常考虑开采地下水资源。而在开采地下水资源时, 开采方式的选取是一个值得探讨的问题^[1]。

天然河床渗流井取水工程是近年来发展起来的

一种集取河流渗漏补给量的新技术, 是利用天然河床砂砾石层的净化作用, 将河水转化为地下水, 以获得水资源的工程^[2]。在中国最早渗流井取水技术的应用是在 1994 年在四川省广元市溶剂厂, 此后, 渗流井的取水原理、设计思路、施工方法等得到了进一步发展, 但都并没有涉及到渗流井的取水效果的模拟和计算。2009 年王玮等^[3]通过对渗流井的井流特征进行分析, 引入等效渗透系数, 构建了关于渗流井取水的“渗流—管流”耦合模型, 建立并提出了渗流井取水的

收稿日期: 2013-05-24

修回日期: 2013-09-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“非管井集水建筑物取水机理的物理模拟及计算模型研究”(40972154)

作者简介: 陈泉萌(1988—), 女(汉族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 硕士研究生, 研究方向为地下水资源与环境。E-mail: 61579435@qq.com。

通信作者: 王玮(1970—), 男(汉族), 江西省乐平市人, 博士, 硕士生导师, 教授, 主要从事水资源与环境方面的教学与科研工作。E-mail: 61579435@qq.com。

数学模型和计算模型。渗流井目前在陕北地区已被多处水源地所采用,尤其是在干旱半干旱地区的第四系冲积含水层厚度较小的河谷区,其单井出水量远远大于传统的管井^[4]。

渗流井取水工程与其他取水工程相比,结构较为复杂,该取水工程的建设成本高,是近几年来才发展起来的技术,没有成熟的取水量计算模型,对于影响渗流井取水量的因素尚不确定,也没有定量的研究成果。为此,对渗流井的取水机理、影响因素及计算模型展开研究,建立渗流井取水的三维有限差分数值模型,通过对比研究得出渗流井取水效果的可靠性,对于在陕北地区指导渗流井取水工程的勘探、设计及施工有着积极的理论指导意义,这也对该地区水资源的合理开发利用起到不可估量的积极作用。

1 研究区概况

黄河中游河谷区河谷宽度小,第四系厚度小,如陕西省神木县境内第四系冲积层厚度约为11 m。神木县位于陕西省北部,晋、陕、蒙3省(区)接壤地带,是国家级陕北能源化工基地的核心区域,神木县东南部的盘塘水源地,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,结构松散,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。河漫滩第四系冲积层厚度一般为9~13 m,含水层岩性以中细砂、粗砂和砂砾卵石为主,富水性好,水位埋藏浅,一般为1~3 m。河漫滩第四系除接受大气降雨入渗补给和一级阶地冲积含水层的侧向径流补给外,开采状态下可激发得到黄河地表水的渗漏补给,尤其是黄河漫滩近河地带,地下水赋存条件好。一级阶地冲洪积含水层岩性以砂砾卵石和粉土为主,颗粒相对较细,孔隙率相对较小,透水性一般,水位埋深较大,含水层厚度相对较小。在黄河岸边低山丘陵区,由于地势高,地形破碎,地表的风积黄土和黄河高阶地厚度较薄,补给条件差,赋水性极差,为透水不含水地层。

2 计算模型的建立

2.1 渗流井结构

渗流井由竖井、平巷、硐室和辐射孔组成^[5],单口渗流井一般包括4~6个硐室,视具体条件而定。硐室由平巷连接,辐射孔位于硐室的顶部及侧面,辐射孔主要伸入河床底部。

根据神木县条件类似地区,本次计算设计渗流井10口,单口渗流井由5个硐室组成,各硐室之间相距70 m,单根辐射孔进入第四系长度约为1~3 m,各硐

室及竖井均由平巷连接,硐室位置沿黄河平水期水边线布设,竖井距平水期水边线约40 m,平巷沿黄河平水期水边线布设。

2.2 “渗流—管流”耦合模型

渗流井工作时,在“井—含水层”系统中一般是多种流态并存,其中在含水层介质中地下水流动型态一般为低雷诺数($Re < 1 \sim 10$)的层流,其中渗流的水头损失与渗流速度呈线性关系,符合达西定律。而在“平巷—硐室—辐射管”(“井管”)中,因其水力半径较大,其水流的雷诺数一般较大,因而其中的水流一般为紊流。即分为5个区:层流区、层流到光滑紊流的过渡区、光滑紊流区、光滑紊流到紊流的过渡区和紊流区。水流的水头损失与平均流速间的关系可能为1次方(层流区)、1.75次方(光滑紊流区)和2次方(紊流区)^[6-7]。

由于渗流井的辐射孔、平巷、硐室等的边界条件不易确定,在“井管”中可能存在层流与紊流,为了将“井管”内外不同介质不同流态耦合起来,可采用陈崇希等^[6]提出的等效渗透系数 K_e 的概念。

当水流为层流时,“井管”中的等效渗透系数 K_1 可表示为:

$$K_1 = \frac{d^2 g}{32\mu} \quad (1)$$

式中: g ——重力加速度(m/s^2); d ——“井管”直径(m); μ ——水的动力黏滞系数(m^2/s)。

当水流呈紊流状态时,“井管”中的等效渗透系数可表示为:

$$K_n = \frac{2gd}{fv} \quad (2)$$

式中: f ——摩擦系数; v ——“井管”的渗流速度(m/s); g ——重力加速度(m/s^2)。

这样使得当水流为紊流流态时,“井管”流动定律也具有与达西定律相同的表达形式。

通过引入紊流状态等效渗透系数的概念,将其流动定律表示为达西定律的形式,将整个“井—含水层”系统5个流态区(1个渗流区和4个紊流区)的流动规律统一地用达西定律形式来表示,这样将“井管”视为“井—含水层”系统中透水性很强的含水介质,就将渗流和管流耦合起来了。据此可建立描述地下水向渗流井流动的稳定流数学模型^[8-9](不考虑除河流渗漏补给外的源汇项):

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{he} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{he} \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{ve} \frac{\partial H}{\partial z}) = 0$$

$$[(x, y, z) \in D] \quad (3)$$

式中: x, y, z ——坐标变量; H ——地下水位标高(m); K_{he}, K_{ve} ——水平渗透系数和垂向渗透系数; D ——计算区范围。

上下游两侧定水头边界:

$$H(x, y, z) | \Gamma_1 = H_1(x, y, z) \quad (4)$$

式中: H_1 ——第一类边界水位标高(m); Γ_1 ——一类边界。

河谷两侧及含水层底板隔水边界:

$$\frac{\partial H}{\partial n} \Gamma_2 = 0 \quad (5)$$

式中: n ——二类边界外法线方向单位向量; Γ_2 ——二类边界

河流边界:

$$\frac{K_r}{M_r} (H_r - H) = q_r \quad (6)$$

式中: K_r ——河床淤积层的垂向渗透系数; M_r ——河床淤积层的厚度(m); H_r ——河流水位(m); q_r ——河流单位面积的渗漏补给量(m/d)。

潜水面边界:

$$\left. \begin{aligned} H &= z \\ \frac{\partial H}{\partial n_p} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: n_p ——潜水面内法线方向单位向量。

竖井边界, $\left\{ \begin{array}{l} \text{定降探抽水} \\ \text{定流量抽水} \end{array} \right.$

$$\left. \begin{aligned} H(x, y, z) &= H_s \\ \lim_{r \rightarrow r_w} \int_0^{2\pi} \left(\int_0^M r K \frac{\partial H}{\partial r} dz \right) d\theta &= Q_s \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: Q_s ——渗流井的开采量(m^3/d); H_s ——渗流井抽水动水位(m); r ——抽水井径向距离(m)。

$$K_e = \begin{cases} K & (\text{含水层中的渗透系数, 层流}) \\ K_1 & (\text{"井管"中的等效渗透系数, 层流}) \\ K_n & (\text{"井管"中的等效渗透系数, 紊流}) \end{cases} \quad (9)$$

2.3 边界概化

研究区东部边界为黄河, 将其概化为第Ⅲ类河流边界, 在天然状态下, 地下水在接受大气降水入渗补给后向黄河排泄, 在渗流井开采条件下, 将激发黄河河水大量渗漏补给地下水。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, 且地形破碎, 可将其概化为隔水边界。

由于黄河水面较宽广, 纵向延伸较长, 渗流井正常工作时不会影响到黄河上游和下游边界, 故将研究区黄河的上游及下游边界概化为Ⅰ类定水头边界。研究区的顶面发生着降水入渗、潜水蒸发等垂向交换作用, 可将其概化为潜水面边界。研究区的底面为三叠系完整基岩, 其结构致密, 裂隙不发育, 可概化为区域隔水底板。

2.4 模型定义

根据文中的边界条件的概化, 对研究区采用矩形

规则网格进行剖分, 利用数学模型可建立研究区三维有限差分数值模型。本次研究采用基于有限差分法的 MODFLOW 对数学模型进行数值求解。

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, 研究区沿东西方向剖分为 382 列, 沿南北方向剖分为 996 行, 剖分网间距为 5 m, 单层活动单元个数为 135 804 个, 实际代表水平面积 3.396 km^2 , 垂向上共 40 m, 剖分为 12 层, 第四系含水层剖分为 4 层, 基岩裂隙含水层剖分为 8 层, 总活动单元个数为 1 629 648 个, 平巷埋深 20 m, 竖井深度 26 m。根据钻孔抽水试验和双环渗水试验资料确定研究区第四系含水层的水平渗透系数从上游到下游依次为: 12.57, 16.02, 10.43, 30.56 m/d, 垂向渗透系数依次为 0.6, 1, 1.5, 0.7 m/d, 基岩中渗透系数为 1.5 m/d。设定黄河为第Ⅲ类边界, 平水期水位值为 40 m, 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。河谷两侧及含水层底部为隔水边界, 顶部为潜水面边界。

2.5 盘塘水源地渗流井取水允许开采量计算

2.5.1 开采方案 根据不同参数模拟计算结果, 地下水开采资源量主要由激发的河水渗漏补给量组成。为了保证各渗流井正常出水量且相互不产生影响, 本次设计渗流井间距为 500 m。结合盘塘水源地的实际范围大小和水文地质条件, 研究区可布设渗流井共 10 眼, 可计算渗流井在竖井降深为 5 m 时的总开采量。在剖分网的基础上, 采用“渗流—管流耦合模型”建立起渗流井取水数值模型来计算盘塘水源地地下水允许开采量。

2.5.2 计算结果 经计算, 盘塘水源地 10 眼渗流井在平水期时的出水量见表 1。计算结果表明, 10 眼渗流井平水期总出水量为 92 821.89 m^3/d , 建议正常开采量 92 400 m^3/d (表 1)。此时, 渗流井开采形成的降深场见图 1, 第 8 口渗流井(PT_8)所形成降深场见图 2。

考虑到黄河在流经盘塘水源地河谷区的河段在每年 6—7 月会出现枯水期, 在枯水期时, 黄河水边线后退至黄河枯水期水边线, 黄河水位下降 1 m, 由于渗流井沿黄河平水期水边线布设, 各渗流井的辐射孔大多都位于黄河河床之下, 这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, 因此研究区 10 眼渗流井枯水期出水量为 56 673.34 m^3/d , 建议开采量为 56 200 m^3/d 。此时, 渗流井开采形成的降深场见图 3, 第 8 口渗流井(PT_8)所形成降深场见图 4。

表 1 渗流井(10眼)群井作用下取水量计算结果

编号	出水量组成/(m ³ ·d ⁻¹)							总出水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	建议开采量/ (m ³ ·d ⁻¹)
	硖室 1	硖室 2	硖室 3	硖室 4	硖室 5	平巷	竖井		
PT ₁	1 633.54	1 288.75	1 298.11	1 356.33	1 821.59	20.42	1.26	7 420.00	7 400.00
PT ₂	1 818.63	1 433.26	1 416.25	1 415.62	1,829.82	24.67	1.30	7 939.56	7 900.00
PT ₃	1 832.14	1 425.61	1 435.46	1 425.91	1 865.17	23.84	1.31	8 009.46	8 000.00
PT ₄	2 223.48	1 733.86	1 733.20	1 739.04	2 086.51	26.70	1.39	9 544.19	9 500.00
PT ₅	2 194.92	1 727.55	1 711.08	1 740.91	2 221.02	26.43	1.37	9 623.29	9 600.00
PT ₆	2 169.75	1 723.67	1 722.38	1 730.92	2 192.33	28.89	1.38	9 569.32	9 500.00
PT ₇	2 178.82	1 738.04	1 735.35	1 746.53	2 121.06	30.34	1.41	9 551.56	9 500.00
PT ₈	2 444.25	1 919.34	1 755.82	1 745.18	2 101.13	31.38	1.50	9 998.60	9 900.00
PT ₉	2 397.33	1 905.63	1 917.76	1 927.30	2 456.26	31.46	1.60	10 637.35	10 600.00
PT ₁₀	2 473.03	1 866.69	1 853.92	1 863.40	2 445.42	25.87	0.24	10 528.56	10 500.00
合计								92 821.89	92 400.00

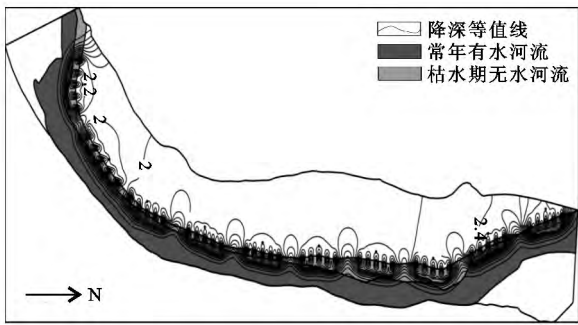


图 1 平水期平巷所在层平面降深等值线

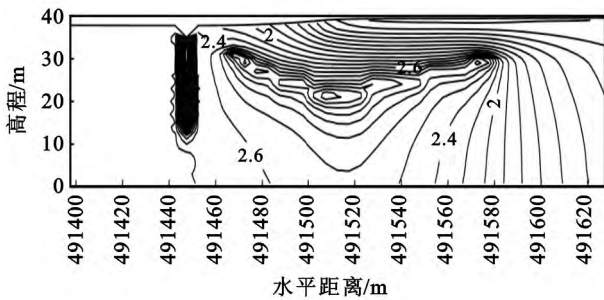


图 2 PT₈ 号渗流井平水期横剖面降深等值线

注: 水平距离采用的西安 80 投影平面直角坐标系的 Y 坐标值。下同。

下的各井出水量(表 2),对比分析研究区 10 眼渗流井中单井作用与群井共同作用下的各渗流井取水量计算结果可知,区内群井作用下各渗流井出水量平水期衰减量为 1 596.45 m³/d,相对于单井作用之和仅衰减了 2%,群井作用下各渗流井出水量枯水期衰减量为 6 119.78 m³/d,相对于单井作用之和仅衰减了 9.7%。这说明,在研究区使用渗流井开采水资源,各渗流井间的相互干扰程度很小,即使 10 口井全开,各渗流井的供水保证率不会有显著下降,都能够安全高效地运行。

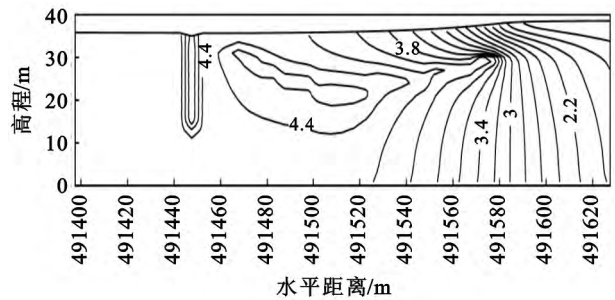


图 4 PT₈ 号渗流井枯水期横剖面降深等值线

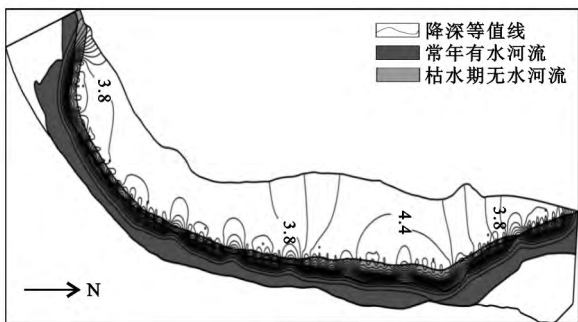


图 3 枯水期平巷所在层平面降深等值线

为了验证渗流井取水效果,本文在研究过程还分别对管井及辐射井取水结构建立了稳定流数值模型(管井开采方案为 46 眼开采井,单井开采量平水期为 1 100 m³/d,枯水期时建立非稳定流数值模型,减小单井出水量,关闭个别干涸单井;辐射井开采方案采用 30 眼辐射井,竖井降深 5 m),在平水期和枯水期分别进行模拟计算。用管井及辐射井模拟结果与渗流井模拟结果进行对比分析,可得到在相同的开采技术条件下:平水期时,管井开采方案出水量为 33 960 m³/d,辐射井开采方案出水量为 70 490 m³/d,渗流井开采方案的总出水量是管井取水结构的 2.72 倍,是辐射井取水结构的 1.31 倍;在枯水期,管井方案出水量为 30 640 m³/d,辐射井方案出水量为

2.5.3 结果分析 在计算水源地 10 眼渗流井群井作用下的允许开采量后,分别对 10 眼渗流井建立三维有限差分稳定流数值模型,计算出单口渗流井作用

37 810 m³/d, 渗流井取水方案的总出水量是管井取水结构的 1.83 倍, 是辐射井取水结构的 1.49 倍。由于渗流井取水结构的辐射孔是延伸到黄河河床以下的, 其枯水期出水量衰减率为 39.18%, 而辐射井枯水期的出水量衰减率高达 46.35%, 则在枯水期, 渗

流井的供水保证率远高于辐射井。管井施工简单且成本较低, 但是根据计算结果可知管井开采方式随着抽水量的增加, 其降深显著增大, 且管井的取水效果较差。在水资源严重短缺的干旱半干旱地区, 渗流井取水结构在总出水量方面的优越性非常明显。

表 2 渗流井(10 眼)单井作用下取水量计算结果

编号	出水量组成/(m ³ ·d ⁻¹)							总出水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	建议开采量/ (m ³ ·d ⁻¹)
	硖室 1	硖室 2	硖室 3	硖室 4	硖室 5	平巷	竖井		
PT ₁	1 671.39	1 299.12	1 303.12	1 358.30	1 822.30	20.63	1.29	7 477.97	7 400
PT ₂	1 872.38	1 453.23	1 433.79	1 435.27	1 867.31	25.19	1.41	8 088.44	8 000
PT ₃	1 891.21	1 451.81	1 454.71	1 445.60	1 907.45	24.62	1.44	8 176.61	8 100
PT ₄	2 273.97	1 759.06	1 755.07	1 762.37	2 138.74	27.53	1.52	9 718.40	9 700
PT ₅	2 248.50	1 753.62	1 737.23	1 764.21	2 268.40	27.29	1.51	9 800.71	9 800
PT ₆	2 208.40	1 745.80	1 741.25	1 752.12	2 244.27	29.66	1.51	9 722.60	9 700
PT ₇	2 213.54	1 756.96	1 752.51	1 764.06	2 160.90	31.05	1.52	9 680.59	9 600
PT ₈	2 538.97	1 943.73	1 770.72	1 762.83	2 143.23	32.22	1.60	10 192.73	10 100
PT ₉	2 477.63	1 935.57	1 942.74	1 958.49	2 546.08	32.52	1.68	10 894.47	10 800
PT ₁₀	2 490.33	1 883.20	1 871.31	1 887.08	2 506.42	26.42	1.63	10 665.82	10 600
合计								94 418.34	93 800

在陕北条件类似的河谷地区, 分布有勘察施工的渗流井, 如榆林市红石峡渗流井工程、绥德县五里店渗流井工程等, 这些地区的含水层条件与盘塘水源地条件相类似, 但含水层渗透性能较弱以及分布面积相对于盘塘水源地较小, 红石峡渗流井工程取水量大于 10 000 m³/d, 五里店渗流井工程取水量大于 3 500 m³/d, 且通过水均衡法计算, 盘塘水源地潜水含水层容积储存量为 5.18×10⁶ m³, 允许开采量占储存量的 1.8%, 说明通过数值模拟法计算所得到的允许开采量是合理可靠的, 表明盘塘水源地渗流井取水工程布设 10 眼渗流井在平水期出水量为 92 400 m³/d, 枯水期出水量为 56 200 m³/d 是合理可行的。

3 结论

(1) 通过引入等效渗透系数, 构建渗流井取水的“渗流—管流”耦合模型, 对盘塘水源地采用三维有限差分数值模型进行模拟计算, 可得到平水期允许开采量为 92 400 m³/d, 枯水期允许开采量为 56 200 m³/d, 通过与条件相似地区允许开采量以及研究区储存量的对比分析表明该计算方法所得结果准确可靠。

(2) 渗流井结构复杂, 其工作过程中, 多种流态并存, 渗流井本身既不能作为等水头边界, 也不能作为等强度边界, 水力条件较为复杂, 很难严格地确定。目前尚没有可行的解析解计算公式, 只能采用数值模型的方法对渗流井开采量进行计算。

(3) 对研究区分别采用管井及辐射井开采方式, 建立三维有限差分数值模型, 得到的结果与渗流井取水效果相比, 说明渗流井取水工程取水量大, 较容易管理, 且利用天然河床作为滤床来净化河水, 变水质差的水为水质较好的水, 具有明显优于其他取水结构的特点。

[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] 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, 2010:1-13.
- [3] 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):35-43.
- [4] 王玮, 刘基, 陈立, 等. 渗流井合理竖井降深确定[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3):281-284.
- [5] Wang Wei, Zhang Ge. Numerical simulation of groundwater flowing to horizontal seepage wells under a river[J]. Hydrogeology Journal, 2007, 15(6):1211-1220.
- [6] 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.
- [7] 刘基. 改进渗流井计算模型及其应用[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- [8] 李俊亭. 地下水流数值模拟[M]. 北京: 地质出版社, 1989:9-20.
- [9] 郭东屏. 地下水动力学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994:78-96.