

文章编号:1671-6833(2017)05-0076-05

地温空调井群运行对地下水影响的实验与模型研究

窦 明<sup>1</sup>, 曹亚新<sup>1</sup>, 米庆彬<sup>2</sup>, 朱志刚<sup>3</sup>, 付 博<sup>3</sup>

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 产业技术研究院有限公司, 河南 郑州 450001; 3. 安阳市水利局, 河南 安阳 455000)

**摘 要:** 为了探析地温空调开发利用对地下水系统的影响, 以安阳市第五人民医院地温空调项目为研究对象, 设计了 2 抽 4 回和 2 抽 2 回两种模式进行实验, 构建了地下水动力学模型和水热耦合数学模型, 然后对两种抽回灌模式下地温空调项目运行对地下水流程和温度场的影响进行了模拟; 分析了不同抽回灌模式对地下水水位、水温的影响, 并探索其变化过程和影响机理. 研究表明: 在不同抽回灌模式下, 地温空调项目对地下含水层流场和温度场的影响存在差异, 且单井回灌量越大, 影响范围和幅度越大; 另外在不同的运行时段, 地下水传热的主导方式也有所不同.

**关键词:** 地温空调; 抽回灌实验; 数值模拟; 影响评价; 机理分析

**中图分类号:** P641. 8      **文献标志码:** A      doi:10. 13705/j. issn. 1671-6833. 2017. 05. 005

0 引言

自地温空调技术推广应用以来, 其节能环保、高效的特点得到了广大用户的青睐, 已经成功应用于许多领域, 前景广阔. 然而作为一项新技术, 人们对其还缺乏全面科学的认识, 项目设计不合理和不合理运行也引发了一些问题<sup>[1-2]</sup>. 国内外学者针对出现的问题作了大量研究, 目前主要是通过建立地下水系统模型, 分析地温空调对地下水流程的影响<sup>[3-4]</sup>, 对不同布井模式下地下水温度场的变化趋势和热贯通发生特征进行模拟分析了地温空调井抽回灌对地下水流程和温度场的影响<sup>[5-9]</sup>. 此外, 一些学者也定量研究了地温空调系统在不同运行条件下对地下水环境的影响程度<sup>[10-13]</sup>. 已有研究虽然对地温空调项目的运行影响进行了相关研究, 但一些数学模型考虑的因素不全面, 难以充分描述抽回灌地下水系统的变化, 另外关于地温空调运行对地下水系统的影响机理研究也较少. 基于此, 笔者以安阳市第五人民医院地温空调项目为研究对象开展抽回灌实验, 模拟系统在不同抽回灌模式下地下水流程和温度场的变化情况, 探析不同抽回灌模式对地下水水位、水

温的影响, 以期地为地温空调项目的设计和管理提供理论依据.

1 实验设计及数据采集分析

1.1 实验项目概况

安阳市第五人民医院地温空调项目处于洹河冲积扇极强富水区, 地下水为第四系孔隙水. 区域含水层为卵砾石层, 顶板埋深 30 ~ 50 m, 厚度 30 m 左右, 给水度为 0. 23 ~ 0. 29. 项目有 2 眼抽水井, 4 眼回灌井, 3 眼观测孔. 井群布局呈近线状, 井间距 25 m 左右, 井深 100 m, 日常采用 2 抽 4 回无压自流回灌的运行方式.

1.2 实验方案设计及实验过程

结合实验项目抽回灌井和监测井的实际运行情况, 设计 2 抽 4 回和 2 抽 2 回两种运行模式进行对比, 共设置了 6 个监测点, 包括 5 个水位监测点 (1#、2#井和 1#、2#、3#观测孔)、3 个水量监测点 (1#、2#、3#井)、5 个水温监测点 (2#、3#井和 1#、2#、3#观测孔). 实验区域的抽回灌井、观测孔位置分布如图 1 所示.

依据实验设计, 首先以 2 抽 4 回为实验模式, 此时系统已运行一段时间, 为稳定流实验, 每隔

收稿日期:2017-02-21; 修订日期:2017-05-01  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51679218; U1304509); 郑州大学优秀青年教师发展基金(1521323001); 安阳市水利局项目  
作者简介:窦明(1975—), 男, 山东桓台人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事水资源与水环境研究, E-mail: dou\_ming@163. com.

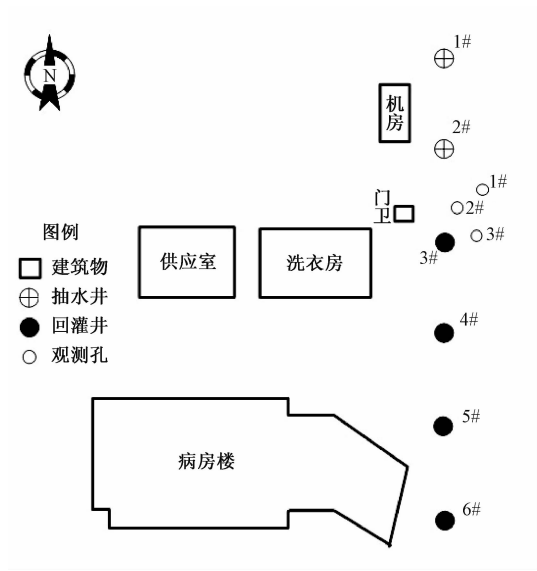


图 1 实验区域井位布置平面图

Fig.1 Experimental area location map of wells

1 h 分别监测水量、水温和水位埋深,获取 4 组监测数据后关闭 4#、6#回灌井,将运行模式变为 2 抽 2 回。接着于第二天相同时间开展实验,此次为非稳定流实验,监测方法和监测点与之前相同。

2 地下水系统数学模型建立

笔者利用地下水数值模拟软件 GMS 构建地下水系统数学模型,模拟预测不同抽回灌模式的地下水系统变化过程。

2.1 数学模型介绍

2.1.1 水动力学模型

水动力学方程需要考虑渗流定律、连续方程、Darcy 定律等。模型模拟计算时,地下水流动系统可概化为含水层为水平结构、非均质、各向异性、三维稳定流系统。地下水运动的基本微分方程<sup>[8]</sup>为:

$$\left\{\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)-\omega=\mu_e\frac{\partial h}{\partial t};\\&H(x,y,z,t)=H_0(x,y,z,t),\quad(x,y,z)\in V;\\&H(x,y,z,t)=H_0(x,y,z,t),\quad(x,y,z)\in S;\\&q_n=q\cdot n=q_b(x,y,z,t),\quad(x,y,z)\in S,\end{aligned}\right.$$

(1)

式中: $K_{xx}$ 、 $K_{yy}$ 、 $K_{zz}$ 为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的渗透系数; $h$  为水头; $\omega$  为源汇项; $\mu_e$  为储水系数; $H_0(x,y,z,t)$  为某一已知函数; $V$  为渗流区域; $S$  为三维区域的边界曲面; $q$  为边界面上沿法线方向的单位面积流入量; $n$  为边界外法线的单位矢量。

2.1.2 水热耦合模型

地温空调系统水源经过利用后与原含水层水体形成温度差,使得地下含水层中发生了水热耦合过程。含水层中的传热方式主要包括热对流、热传导和热弥散。模型中假设地下水与含水层骨架的热动平衡是瞬时完成的,且忽略自然对流的影响,则水热耦合数学模型可用如下方程<sup>[8]</sup>进行描述:

$$\left\{\begin{aligned}&n\rho_0\beta_p c_f \theta \frac{\partial P}{\partial t}+n\rho_0\beta_r \frac{\partial \theta}{\partial t}+\rho_a b c_i \theta \frac{\partial P}{\partial t}+n\rho c_f \frac{\partial \theta}{\partial t}-\\&\rho_s c_s T a_b \frac{\partial P}{\partial t}+(1-n)\rho_s c_s \frac{\partial \theta}{\partial t}=\Delta\cdot(nK_f+\\&(1-n)K_s)\times I\cdot\nabla\cdot\theta+\nabla\cdot nD_H\nabla\cdot\theta-\\&\nabla\cdot n\rho\rho_i\nu\theta+q p^* c_i \theta^*,\quad(x,y,z)\in V\\&\theta(x,y,z,t)|_{t=0}=\theta_0(x,y,z),\quad(x,y,z)\in V\\&\theta(x,y,z,t)|_{\Gamma_1}=\theta_1(x,y,z),\quad(x,y,z)\in\Gamma_1,\\&t\geq 0\\&q'_n|_{\Gamma_2}=(q'_x,q'_y,q'_z),\quad(x,y,z)\in\Gamma_2,\\&t\geq 0\end{aligned}\right.$$

(2)

式中: $n$  为孔隙度; $\rho$  为研究区孔隙介质密度; $\rho_0$  为渗流区初始孔隙介质密度; $\rho_s$  为孔隙介质密度; $I$  为 3 阶单位矩阵; $D_H$  为热动力弥散系数张量; $c_s$  为孔隙固体介质比热容; $c_w$  为水的比热容; $P$  为流体压力; $\beta_p$  为热膨胀系数; $\beta_r$  为渗流边界热膨胀系数; $K_w$  为水的热导率; $K_s$  为孔隙介质热导率; $\theta$  为研究区温度; $\theta_0$  为渗流区初始温度分布; $\theta_1$  为已知温度边界的温度分布; $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$  为边界条件; $q'_n$  为热流边界流量。

2.1.3 模型计算条件输入

模拟区域设为 40 000 m<sup>2</sup>,模型边界设为定水头,含水层由上到下概化为 3 层,分别为潜水含水层(30 m)、承压含水层(30 m)、弱透水层(40 m)。井群线状分布,井间距为 25 m,边界条件如表 1 所示。

表 1 边界条件输入值

Tab.1 Input value of boundary conditions

井深/ m	抽水井 流量	回灌井流量(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )		背景 温度/ ℃	回水 温度/ ℃
	(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	2 抽 2 回	2 抽 4 回		
100	635.0	635.0	317.5	15.5	12.6

2.2 模型参数率定与结果验证

利用构建的数值模型计算抽回灌过程地下水

水位、水温值,与实测结果对比拟合,率定模型参数. 由于1#、2#观测孔受到的干扰程度小,监测误差也较小. 笔者以2抽2回模式下1#、2#观测孔的监测水位和水温数值进行水动力学和水热耦合模型的参数率定. 经率定,水平渗透系数为112 m/d,垂直渗透系数为20 m/d,孔隙率为0.23,纵向热弥散度为0.2,横向热弥散度为0.8.

以2抽4回模式下1#、2#观测孔的监测水位和水温数据对模型进行验证,结果如图2(a)、(b)所示. 采用最大相对误差( $\lambda_{\max}$ )和平均相对误差( $\lambda_{\text{ave}}$ )对验证结果进行分析,水位的 $\lambda_{\max}$ 为2.6%, $\lambda_{\text{ave}}$ 为1.1%;水温的 $\lambda_{\max}$ 为4.1%, $\lambda_{\text{ave}}$ 为2.1%,可见模型计算结果的误差不大. 由此说明,地下水水流场和温度场模型建立合理,且模型模拟精度较高.

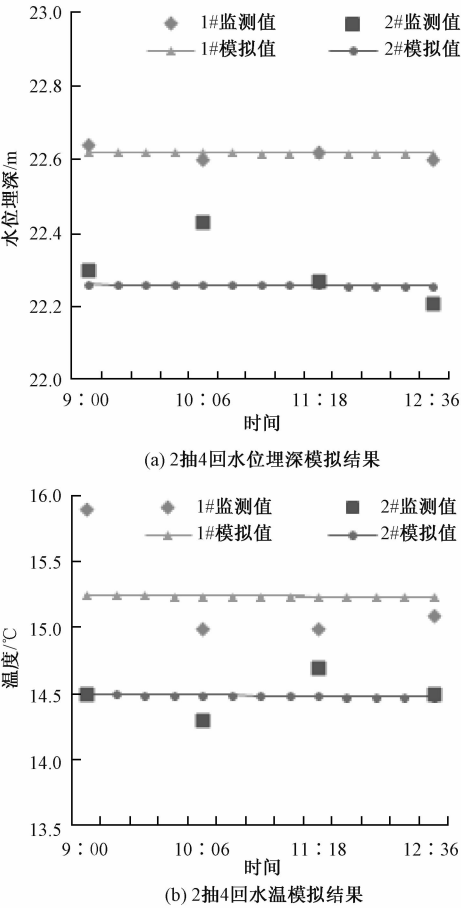


图2 模型验证结果

Fig.2 The results of model verification

2.3 机理分析

2.3.1 水位变化的机理分析

在总抽回灌水量相同的条件下,对两种运行模式的系统运行一个周期(即120 d)后的地下水流场进行模拟,结果如图3所示.

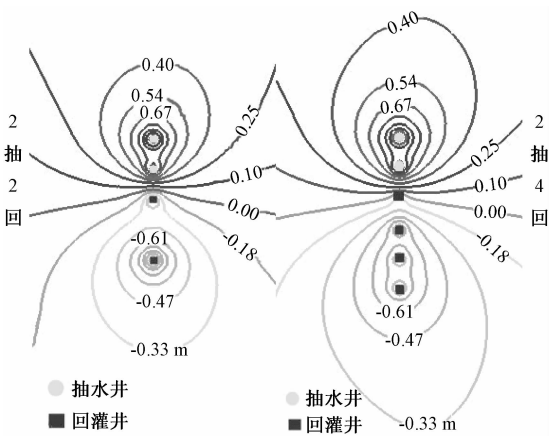


图3 不同抽回灌模式下水位降深图

Fig.3 The figure of groundwater drawdown in different patterns

由图3可见,两种模式对抽水井周围水位影响区别较小,而对回灌井周围水位影响区别较大. 如2抽2回模式下抽水井水位的最大降幅为1.42 m,2抽4回模式下为1.47 m,两者相差仅为0.05 m;而回灌井水位升幅分别为1.26 m和0.95 m,两者相差0.31 m. 两种模式下抽回灌井水位差分别为2.68 m和2.42 m,相差0.26 m,即2抽2回模式下地下水流场的变化幅度较2抽4回明显. 究其成因:由于回灌水在含水层中以渗流作用向周围运动,2抽2回模式下单井回灌量比2抽4回大,而地下水含水层的渗透系数一定,使得回水在回灌井中长时间滞留而不能快速扩散到周围含水层,导致回灌井中水位不断上升,从而造成2抽2回模式下回灌井中的反向漏斗降深大于2抽4回,即回灌井越少,单井回水量越大,对地下水流场的影响幅度越大.

就影响范围而言,在抽水井周围,两者形成的降落漏斗范围基本相同,而在回灌井周围,2抽4回模式下的影响范围略大于2抽2回. 如2抽2回和2抽4回模式下回灌井水位上升0.33 m的影响半径分别约为65 m和70 m. 究其成因:由于回水在含水层的渗流速率较小,导致运移距离有限,因此单个回灌井对周围水位的影响范围也较小. 而2抽4回模式比2抽2回模式多了两个回灌井,且这些回灌井距离较近,不同回灌井的影响范围相互叠加,使得其影响面积较大. 在其他条件相同的情况下,井群数量越多、分布范围越大,对区域水位的影响范围也越大.

综上所述,在其他条件相同时,地温空调系统抽回灌主要通过渗流作用影响地下水流场的水位分布. 不同抽回灌模式下,单井回灌量越

大,回灌井周围水位变化就越明显;由于回灌井水位上升引起的反降落漏斗会相互叠加,所以回灌井分布范围越大,叠加面积越大,影响范围也越大。

2.3.2 水温变化的机理分析

在地下水流场模拟的基础上,对两种运行模式下一个制热周期的地下水温度场变化过程进行模拟,分别获取运行至30、60、90、120 d的水温分布情况,结果如图4所示。

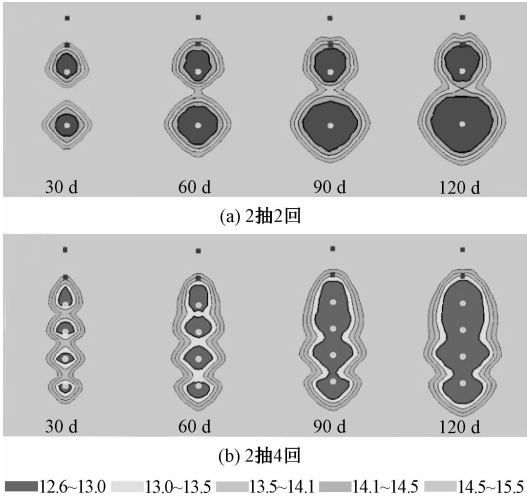


图4 不同抽回灌模式下温度场变化图

Fig.4 The figure of groundwater temperature field in different patterns

由图4可见,不同抽回灌模式的地温空调系统在运行一个周期后对地下水温度场的影响范围相差较大.总体上灌入含水层中的冷水团以回灌井为中心向四周扩散,水温从回灌井中心向外逐渐升高.这主要是由于回灌水与原地下水存在一定的温度差异,含水层内部发生了复杂的传热过程.图4中还可以看出,在抽回灌形成的局部地下水强对流作用下,回灌井周围的温度场并不是以井为中心均匀向外扩散的,而是被地下水流场拉伸,呈近椭圆状向抽水井一侧靠拢。

对于同一抽回灌模式,随着运行时间的增加,回灌冷水通过传热作用与原含水层热水发生热交互影响,冷水团不断向外扩散,范围逐渐扩大,最终冷水锋面影响到了抽水井,部分抽水井周围的水温下降大于2℃,形成热贯通<sup>[14]</sup>.如在2抽2回模式下,刚开始运行时,含水层孔隙未被充满,地下水流场和温度场处于稳定状态,波动不大.随着回灌井源源不断地注入冷水,回水开始沿各孔隙通道流动,此时地下水温度场主要受热弥散的作用,温度变化快;当运行到30 d时,回灌井周围

含水层孔隙通道已基本流通,但由于人工抽回灌引起的水头差形成了局部强烈的对流场,且水温分布不均匀,地下水主要以相邻水体之间的对流换热作用为主,水温变化很快;当运行到60 d时,抽水井周围水温已经受到回灌水温的影响,在含水层渗流作用下,冷热水接触频繁,此时热传导作用逐渐占据主导地位,对流换热作用越来越不显著,水温变化较快;当运行到90 d时,随着回灌水位升高,回灌压力增大,横向渗流速率减弱,此时主要为热传导作用,其他传热作用已十分微弱,所以温度变化比较缓慢,地下水温度场趋于稳定状态.2抽4回模式的传热过程基本相同,但该模式下由于单井回灌量较小,30 d到90 d以对流换热为主,即对流换热作用时间较2抽2回模式长;当运行90 d时,热传导作用才逐渐占据主导地位,对流换热作用不再显著.由此可见,同一抽回灌模式下,系统运行过程中回灌水不断进入含水层与高温度的原地下水混合,使区域地下水水温降低,距离回灌井最近的抽水井达到热贯通,且随着运行时间的增加,影响范围增大的幅度逐渐减小,说明不同时间段的传热效果有所不同。

在2抽2回和2抽4回不同抽回灌模式下冷水团的影响半径分别约为:15 m、10 m(30 d);25 m、20 m(60 d);30 m、25 m(90 d);35 m、30 m(120 d),即2抽2回模式下60 d已经形成了热贯通现象,而2抽4回模式下90 d才形成热贯通现象.可见在同一运行时段,当回灌井越少时,单井回灌量越大,由此产生的对流换热作用越强,越容易形成热贯通.因此,2抽2回模式的系统对地下水温度场的影响范围大于2抽4回模式的,即回灌井数量越多,对地下水温度场产生的影响范围越小,这也说明地下水温度场的变化受单井回灌量影响显著。

综上所述,随着运行时间的增加,地温空调系统对地下水温度场的影响范围以回灌井为中心不断向外扩大,且前期影响范围变化较快,后期变化缓慢.即热弥散作用对温度场的影响最为显著,对流换热作用次之,热传导作用最弱.此外,单井回灌量越大,对地下水温度场的影响也越大。

3 结论

(1)单井回灌量越大,回灌井周围水位变化越明显;回灌井越多,影响范围越大,即增加井的数量可以缓解抽回灌对地下水流场的影响程度,但会增大影响范围。

(2)热弥散作用对温度场的影响最为显著,对流换热作用次之,热传导作用最弱.此外,地下水温度场变化的大小受回灌量影响明显,单井回灌量越大,越容易形成热贯通.

参考文献:

[1] 杨武成,李国正,陈赫.沈阳市地下水源热泵应用中存在的问题与对策[J].水资源保护,2012,28(3): 88-91.

[2] 范思源.水源热泵空调应用对地下水系统影响及对策[J].河南水利与南水北调,2013,36(5): 1231-1238.

[3] 韦婷,车晓慧,韩玉杰.水源热泵井群布置方案对地下水水流场影响分析[J].地下水,2014,36(3): 31-33.

[4] 方静涛,周炳强,黄贤龙,等.群井抽灌系统空间布置对水源热泵系统影响研究[J].中国水运,2012,12(10): 263-264.

[5] 于水,公辉,冯国会.地下水源热泵对地下水温度场影响模拟与分析[J].建筑节能,2016,44(10): 1-4.

[6] 张淑秘,高青.地下水源热泵不同布井模式下地下水温度场变化模拟分析[J].水电能源科学,2013,31(8): 149-151.

[7] 王慧玲,王文峰,王峰,等.地下水地源热泵系统应用对地温场的影响[J].水文地质工程地质,2011,38(3): 134-138.

[8] 窦明,张彦,米庆彬,等.地温空调井布局方式对地下水水流场和温度场的影响分析[J].郑州大学学报(工学版),2014,35(5): 124-128.

[9] 王琰,骆祖江,李伟,等.浅层地温能开发与地下水环境影响模拟预测[J].太阳能学报,2015,36(5): 1231-1238.

[10] KIM J S, NAM Y J. A numerical study on system performance of groundwater heat pumps[J]. Energies, 2016, 9(1): 1-14.

[11] 张淑秘.地域和抽灌水温差对地下水源热泵系统的影响[J].制冷与空调,2013,13(9): 38-40.

[12] 米庆彬,付博,韩涛,等.地温空调成井工艺参数对地下水系统的影响[J].人民黄河,2014,36(9): 44-47.

[13] PARK B H, BAE G O, LEE K K. Importance of thermal dispersivity in designing groundwater heat pump (GWHP) system: field and numerical study[J]. Renewable energy, 2015, 83: 270-279.

[14] 朱天奎.地下水含水层蓄能特性模拟实验研究[D].长春:吉林大学汽车工程学院,2013.

Experimental and Modeling Study on Influence of Ground Temperature  
Air-conditioning Well Group Operation to Groundwater Flow

DOU Ming<sup>1</sup>, CAO Yaxin<sup>1</sup>, MI Qingbin<sup>2</sup>, ZHU Zhigang<sup>3</sup>, FU Bo<sup>3</sup>

(1. School of Water Conservancy & Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Zhengzhou University Research Institute of Industrial Technology Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China;

3. Water Conservancy Bureau of Anyang, Anyang 455000, China)

**Abstract:** This paper used the Anyang Fifth People's Hospital as the case of study. The experiments were implemented with the patterns of "2 pumping wells and 2 recharging wells" and "2 pumping wells and 4 recharging wells". The change of groundwater flow field and temperature field in the two patterns designed in ground temperature air-conditioning project operation were simulated by using a groundwater hydrodynamic model and a hydrothermal coupling mathematical model. Results indicated that the influence of ground temperature air-conditioning project on groundwater flow field and temperature field were very different in different pumping-recharging patterns. The increase of single-well recharge quantity enhanced the influence scope and range, making it easier to form heat transfixion. The way of groundwater transferring heat via groundwater also varied during different running periods.

**Key words:** ground temperature air-conditioning; pumping-recharging experiment; numerical simulation; impact assessment; mechanism analysis