

文章编号:1671-6833(2014)05-0124-05

地温空调井布局方式对地下水流场和温度场的影响分析

窦明¹, 张彦¹, 米庆彬¹, 任辉², 邓元玲², 张华云²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 安阳市水利局, 河南 安阳 455000)

摘要:作为一种新能源利用技术,地温空调系统近年来得到了快速发展和应用,然而其大规模的开发利用容易造成局部地下水系统动态平衡被打破,并由此引发一系列的负面影响.为了评估不同布局方式对地下水造成的影响程度,笔者以安阳市某地温空调井为研究对象,建立了地下水数值模型,在地下水地温空调井“1抽1回”、“1抽2回”和“2抽3回”三种布局方式下,对地温空调系统运行后的地下水流场和温度场进行了模拟计算分析.模拟结果表明,抽水井与回灌井的合理配比和布局对地下水流场和温度场有较大的影响,1抽2回的布局方式是最适合该地区的布局方式.

关键词:地温空调;布局方式;地下水流场;温度场

中图分类号: P641.5⁺5

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.029

0 引言

地温空调系统是一种利用地下浅层地热资源,既可供热又可制冷的高效节能空调系统.通过建造抽水井将地下水抽出,经提取热量或释放热量后,再由回灌井回灌入地下.王慧玲对地下水热泵系统的地下水流场和温度场进行模拟计算分析,得到不同抽回灌模式下的地下水流场和温度场的演化规律^[1];付志敏等通过对地源热泵工程含水介质水-热耦合运移进行模拟,得到最合理的井距、抽注水轴线与地下水流的角度及抽注层面选择等方案^[2];杨武成等通过采用不同变量对合理井距进行模拟研究,得到温度场的变化范围受井距和抽回灌量影响明显并呈一定的规律性^[3];田良河通过对不同的布井方案分析,得到选择直线型布井,抽回灌井连线平行于天然水力坡度方向,且天然水力坡度由抽水井指向回灌井的方式效果最好^[4];刘立才等运用数值法求得地温空调系统运行过程中地下水的温度变化,并用定量化的手段科学评价了场地抽回灌井的布局及其可行性^[5];胡继华等利用含水层储能的一般特点,分析了流贯通和热贯通并建立地下水流动和热量运输的耦合数值模型^[6];于林弘通过模拟三

种不同抽回灌方式下,不同井距的抽回灌井布置方案,得到随着抽回灌井井距的增加,抽水井温度受热贯通现象的影响越来越弱^[7];赵立杰等通过抽水及回灌试验所获成果计算含水层的渗透系数及回灌渗透系数,并求得合理的布井方案^[8].以上研究虽然从不同的视角对抽回灌井布局、地下水流场和温度场方面作了详细的分析,但受地下水问题复杂性的影响,均有一定的适用条件和局限性.为了研究地温空调井布局方式对地下水系统的影响,以安阳市地区作为研究对象,采用 MODFLOW,通过设置不同的布局方式情景,对地下水流场和温度场的演化规律进行模拟分析,其结果在地温空调井布局方式方面对今后安阳市地温空调系统的发展提供了依据.

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

安阳市处于太行山脉与华北平原交界的过渡地带,地势总趋势是西高东低,自西向东呈阶梯状下降,大致以京广铁路为界.西部为山丘区,兼有小型盆地,由于山丘区断裂、沟谷、溶蚀裂隙和小型溶洞十分发育,山间盆地较平坦,因此有利于降水和地表水对地下水的入渗补给,地下水与地表

收稿日期:2014-06-11;修订日期:2014-08-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1304509);河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(13IRTSTHN030)

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.

水相互转化密切.东部为冲积平原,平原区广泛分布着承压水,承压含水层主要由砂砾石与中粗砂层组成,隔水顶、底板多由粉质黏土组成,且连续性较差,含水层产状复杂;主要是接受垂向补给和侧向径流补给,人工开采是该层地下水排泄的主要方式.

安阳市地温资源丰富,目前安阳市市区内的地温空调开发规模大概有 127.4 万 m^2 ,年取水量达到了 2 001.3 万 m^3 ,地温空调项目有 43 个,其中抽水井有 100 眼,回水井有 171 眼.安阳市地区的地温空调井布局方式有“1 抽 1 回”、“1 抽 3 回”、“1 抽 2 回”、“2 抽 3 回”和“3 抽 5 回”.但由于安阳市水文地质条件的因素,其主要的布局方式为“1 抽 1 回”、“1 抽 2 回”和“2 抽 3 回”,并且其所占比例分别为 26.92%、63.46%、9.62%.

1.2 研究方法

笔者通过应用数值模拟的方法,在合理的假设条件下,地温空调抽回灌井采用不同布局方式,对研究区域地下水流场和温度场演化规律进行了模拟分析.

地下水数值模型主要是对地温空调采用不同布局方式下的地下水流场和温度场进行模拟计算,以定量推求地温空调项目的运行对地下水位及水温的影响.在地温空调系统在运行过程中,所抽取的置换冷量(或热量)后的地下水须回灌到同一含水层,地下水流场和温度场的变化范围通常集中于抽水、回灌井附近一定区域内.进行模拟计算时,选定以抽水、回灌井为中心的适当范围即可.

1.2.1 地下水流场模拟

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为^[9-11]:

$$\begin{cases} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \omega = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \right. \\ H(x,y,z,t) = H_0(x,y,z,t), & (x,y,z) \in \Omega \\ H(x,y,z,t) = H_0(x,y,z,t), & (x,y,z) \in S \\ q_n = q\mathbf{n} = -q_b(x,y,z,t) \end{cases}$$

(1)

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 为 x 、 y 、 z 方向的渗透系数, LT^{-1} ; h 为水头, L ; ω 为源汇项,表示单位体积含水层在单位时间流出或者流入地下水的体积, T^{-1} ; S_s 为储水系数,其物理意义为含水层地下水水头降低(或者升高)一个单位时,由于含水层垂向压缩和地下水弹性膨胀从单位体积含水层释放(或者储

存进去)的水的体积; $H_0(x,y,z,t)$ 为某一已知函数; Ω 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; \mathbf{n} 为边界外法线的单位矢量.

1.2.2 地下水温度场模拟

模拟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,则热量传输数学模型可用如下方程进行描述^[9-11]

$$\begin{cases} n\rho_0\beta_p\beta\frac{\partial P}{\partial t}+n\rho_0\beta_f\frac{\partial \theta}{\partial t}+\rho a_b c_f\beta\frac{\partial P}{\partial t}+n\rho c_f\frac{\partial \theta}{\partial t}-\rho_s c_s T a_b\frac{\partial P}{\partial t}+(1-n)\rho_s c_s\frac{\partial \theta}{\partial t}= \\ \Delta\cdot(nK_f+(1-n)K_s)\times I\nabla\theta+\nabla\cdot nD_H\nabla\theta-\nabla\cdot n\rho\rho_f\theta+q\rho^*c_f\theta^*,(x,y,z)\in\Omega,t\geq 0 \\ \theta(x,y,z,t)|_{z=0}=\theta_0(x,y,z), & (x,y,z)\in\Omega \\ \theta(x,y,z,t)|_{\Gamma_1}=\theta_1(x,y,z,t), & (x,y,z)\in\Gamma_1, t\geq 0 \\ q_{h,n}|_{\Gamma_2}=(q_{h,x},q_{h,y},q_{h,z}), & (x,y,z)\in\Gamma_2, t\geq 0 \end{cases}$$

(2)

式中: I 为 3 阶单位矩阵; D_H 为热动力弥散系数张量; c_s 为孔隙介质比热容; c_f 为流体比热容; ρ_s 为孔隙介质密度; K_f 为流体热导率; K_s 为孔隙介质热导率; θ_0 为渗流区初始温度分布; θ_1 为已知温度边界的温度分布; Γ_1 、 Γ_2 为边界条件; $q_{h,n}$ 为热流边界流量.

1.2.3 情景设计

通过对安阳市地温空调项目调研分析,地温空调项目抽、回灌井井径的规格基本上是一致的,并且其井径的规格可以分为以下 4 种,即小于 30 cm、30 cm、60 cm 和大于 60 cm,各种井径所占比分别为 2.17%、56.53%、28.26%、13.04%.另外,在安阳市地温空调项目中,抽回灌井井管所使用的管材一般为水泥管、混凝土管和钢管,这三种管材所占比分别为 18.61%、9.31%、72.08%.

结合以上分析,由于井径为 30 cm 和管材为钢管在安阳市地温空调项目中运用的最广泛,所以在考虑不同布局方式时将二者作为定值,不再进行设定.另外对于钢管,其滤水管孔隙率一般为 25% 左右.故对不同布局方式的情景设计见表 1.依据设计出的情景,结合水文地质条件,模拟不同情景下地下水流场和温度场的演变规律.

表 1 模拟情景设置
Tab.1 Simulation scenario settings

情景	井径/cm	孔隙率/%	布局方式
情景 1	30	25	1 抽 1 回
情景 2	30	25	1 抽 2 回
情景 3	30	25	2 抽 3 回

2 实例应用

笔者以安阳市南湾湖商务酒店地温空调工程

为例,其位于安阳市殷都区文峰大道南侧,属于地下水强富水区.地层表层多为黄土状土,地下水接受补给较慢,含水岩组主要为洹河(安阳河)冲洪积扇松散砂卵石层,位于冲洪积扇主体带的中下游,地下水自西向东流.主要含水层顶板埋深 52 m 左右,地下水埋深在 40~50 m,含水层厚度 30~40 m.含水层上部为黏性土,含水介质为砂、卵砾石,其中卵砾石成分为灰岩、石英砂岩,磨圆度较好,分选一般.

该项目工程布局的方式是 1 抽 2 回,井深 100 m 左右,井径为 30 cm,管材为钢管,出水井温度一般为 15℃,回水井温度冬夏分别为 11℃、24℃,地下水埋深为 32.5 m.由于所选的项目工程范围较小,且处在一个比较完整的水文地质单元,模拟时将其区域含水层概化为一层,假设含水层为均质各向异性.在模拟计算时,在目标区域内设置 70 m×70 m 的方形地区内设置了 1 抽 1 回、1 抽 2 回和 2 抽 3 回 3 种不同的布局方式.根据《安阳市南湾湖大酒店地温空调工程水资源论证报告》,可设定满足地温空调系统正常运转的取水量为 400 m³/d,两口回水井回灌量均为 200 m³/d;三口回水井回灌量分别为 140、140、120 m³/d.为了满足模拟计算和分析的要求,设置模拟时间分别为 48、240 和 720 h.另外,对目标区域内的监测数据进行参数率定,模型率定参数见表 2.

表 2 模型参数率定值

Tab.2 Calibrating value of parameters in the model

参数	数值	参数	数值
水平渗透系数 /(m·d ⁻¹)	350	横向弥散度/m	20
垂向渗透系数 /(m·d ⁻¹)	50	纵向弥散度/m	10
孔隙度	0.25	时间步长/d	1

2.1 对地下水流场的影响

根据以上设计抽回灌井布局方式的情景,运用地下水数值模型模拟得到研究目标区域不同情景下的地下水流场的变化过程,如图 1 所示.

由图 1 可以看出,对于同一抽回灌的布局方式,随着模拟时间增加,从抽水井中抽取的水量和回灌到含水层中的水量增加,抽、回灌井对地下水的影响范围也逐渐扩大,并且抽水井的水位降深下降的幅度有增大的趋势,回灌井的水位降深上升的幅度也有增大的趋势.如 1 抽 1 回的布局方式下,240 h 和 720 h 时抽水井点处水位降深变幅

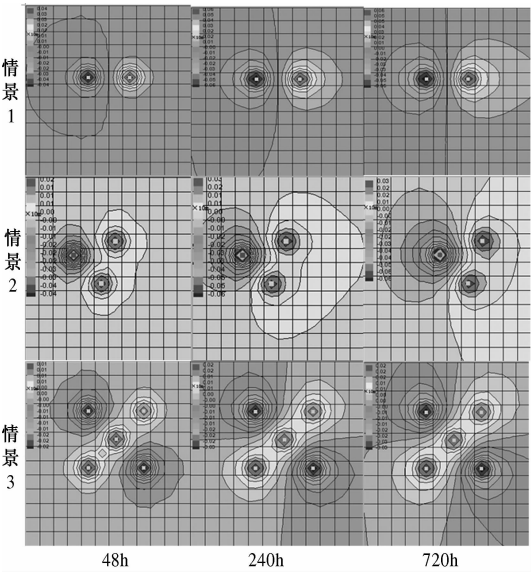


图 1 不同布局方式下地下水水位降深图

Fig.1 The figure of groundwater drawdown in different layouts

下降到了 0.6 m;240 h 和 720 h 时回灌井点处水位降深变幅上升到了 0.6 m.1 抽 2 回的布局方式下,240 h 和 720 h 时抽水井点处水位降深变幅下降到了 0.6 m;240 h 和 720 h 时回灌井点处水位降深变幅上升到了 0.3 m.2 抽 3 回的布局方式下,240 h 和 720 h 时抽水井点处水位降深变幅下降到了 0.3 m;240 h 和 720 h 时回灌井点处水位降深变幅上升到了 0.2 m.

另外,从每种布局方式下的后两张模拟图可以看出,在 1 抽 1 回和 2 抽 3 回的布局方式下,在模拟时间为 240 h 和 720 h 时,抽、回灌井周围的水位降深梯度几乎一致,同时此时抽、回灌井的影响半径变化缓慢,说明抽、回灌井之间在 240 h 左右的时候出现流贯通,形成了强迫对流.而在 1 抽 2 回的布局方式下,在模拟时间为 240 h 和 720 h 时,抽、回灌井周围的水位降深梯度变化较大,同时此时抽、回灌井的影响半径变化明显,说明抽、回灌井之间在 720 h 左右的时候还没有形成流贯通.通过对比发现,1 抽 2 回的布局方式出现流贯通的时间相对较晚.

在相同时间,不同抽回灌井布局方式下,抽、回灌井同时运行对地下水水位降深及影响半径都有相对较明显的影响.但总体来讲,地下水水位降深变化呈减小趋势,同时,由 1 抽 1 回和 1 抽 2 回的布局方式对比可以看出,增加回灌井的数量,可以缩小抽水井抽水对地下水含水层的影响范围,也可减小地下水水位降深.造成这种情况的原因是

回灌井数量的增加,增加了相同时间内回灌到含水层中的水量,使得回灌井对地下水的影响范围加大.在 1 抽 2 回和 2 抽 3 回两种布局方式下,后者抽水井、回灌井数量都多于前者,由模拟图可以看出,3 口回水井回水要满足 2 口抽水井的需求,使得回水相对分散,不能很好地回补抽水损失,导致抽水井影响范围扩大.

总体来讲,现有的 3 种布局方式,在相同井径和孔隙率条件下,1 抽 2 回的布局方式下抽水对地下水流场影响效果最小,此布局方式为最优的布局方式.

2.2 对地下水温度场的影响

根据以上设计抽回灌井布局方式的情景,运用地下水数值模型模拟得到研究目标区域不同情景下的地下水温度场的变化过程,如图 2 所示.

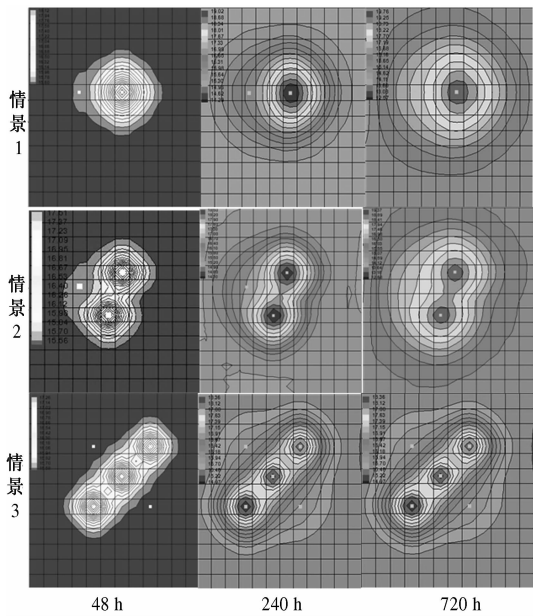


图 2 不同布局下地下水温度场变化图
Fig.2 The figure of groundwater temperature field in different layouts

由图 2 可以看出,对于同一抽回灌井布局方式,随着模拟时间加长,从回灌井回到含水层中的水对地下水温度的影响显著增大,且时间越长,回灌井的持续运行对地下水温度的影响范围越大,温度变化越明显.尤其在 1 抽 2 回的布局方式下,每增加一段时间,其影响范围都有大幅的变化,说明此布局方式下回灌到含水层中的水量最多,回水效率最高.如 1 抽 1 回的布局方式下,48 h、240 h 和 720 h 时回灌井点处的温度分别达到了 18.12 ℃、19.02 ℃ 和 19.76 ℃;1 抽 2 回的布局方式下,48 h、240 h 和 720 h 时回灌井点处的温度分别达

到了 18.5 ℃、19.37 ℃ 和 19.37 ℃;2 抽 3 回的布局方式下,48 h、240 h 和 720 h 时回灌井点处的温度分别达到了 17.26 ℃、18.36 ℃ 和 18.36 ℃.

另外,从每种布局方式下的后两张模拟图可以看出,在 1 抽 1 回和 1 抽 2 回的布局方式下,随着模拟时间的变长,抽水井的温度影响范围变化明显,温度梯度变化比较大,说明抽、回灌井之间在 720 h 的时候还没有出现热贯通.而在 2 抽 3 回的布局方式下,抽水井的温度影响范围变化缓慢,温度梯度变化不大,说明抽、回灌井之间在 240 h 的时候已经形成热贯通.

在相同时间,不同抽回灌井布局方式下,抽、回灌井同时运行对地下水温度的变化同样有相对较明显的影响,影响的总体趋势为回水对温度的影响范围逐渐缩小,温度梯度逐渐变小.由 1 抽 1 回和 1 抽 2 回的布局方式对比可以看出,相同时间间隔下,1 抽 2 回布局方式温度场的变化程度大于 1 抽 1 回的布局方式.综合分析,1 抽 2 回的布局方式是较适宜该地区的井布局.

综合对以上三种布局方式下的地下水流场和温度场变化进行分析可以得出,抽水井与回灌井的合理配比和布局方式对地下水流场和温度场有较大的影响.增加回灌井数量,固然可以提高回灌效率,但容易形成热贯通,不利于能量的利用.因此,1 抽 2 回的布局方式相对较适合地区,这也与该地区的实际情况相符合,1 抽 2 回的布局方式占主导地位.

3 结论

(1)当井径、孔隙率一定时,对于地下水流场,在同一抽回灌井布局方式下,随着模拟时间的加长,抽水井水位降深有增大的趋势,回灌井中水位降深有反向增大的趋势;在相同的模拟时间下,增加回灌井的数量,可以缩小抽水井作业对地下水含水层的影响范围,也可减小地下水位降深.

(2)当井径、孔隙率一定时,对于地下水温度场,在同一抽回灌井布局方式下,随着模拟时间的加长,回灌井的持续运行对地下水温度的影响范围越大,温度变化越明显;在相同的模拟时间下,增加回灌井的数量,更容易形成热贯通.

(3)总体上,在井径和孔隙率设定不变的情况下,1 抽 2 回的布局方式下抽水对地下水流场影响效果最小.虽然增加回灌井个数,可以提高回灌效率,但容易形成热贯通,不利于能量的利用,故 1 抽 2 回的布局方式对于地下水温度场变化也

是最为合适的。

参考文献:

- [1] 王慧玲. 地源热泵系统抽回灌模式对地下水流动场和温度场的影响[J]. 水文地质工程地质, 2009(5): 133 - 137.
- [2] 付志敏, 向衍, 高西望. 井点布置对采能区地下水温度场的影响[J]. 华北水利水电学院学报, 2010, 31(6): 34 - 38.
- [3] 杨武成, 陈赫, 李国正. 地下水源热泵采能区水热耦合模拟研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 139 - 142.
- [4] 田良河. 地下水源热泵系统布井方案分析[J]. 地质与勘探, 2013, 49(2): 367 - 372.
- [5] 刘立才, 王理许, 丁跃元, 等. 水源热泵抽灌井布局及其运行过程中地下温度变化[J]. 水文地质工程地质, 2007(6): 1 - 5.
- [6] 胡继华, 张延军, 于子望, 等. 水源热泵系统中地下水流贯通及其对温度场的影响[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(6): 992 - 998.
- [7] 于林弘. 地下水源热泵系统抽灌井井群优化布置及试验研究[D]. 西安: 长安大学环境科学与工程学院, 2012.
- [8] 赵立杰, 陈彦群. 地温中央空调系统提水及回灌井设计方案探讨[J]. 河北地质, 2009(1): 18 - 20.
- [9] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007, 30 - 75.
- [10] DIERSCH H J. Computational aspects in developing an interactive 3D groundwater transport simulator using FEM and GIS[S]. Estonia: IAHS Publication, 1994: 313 - 326.
- [11] DIERSCH H J, VOIGT R. Visio metric techniques in a 3D groundwater transport code[S]. Heidelberg: Kluwer Academic Publishers, 1994: 1449 - 1456.

Impact of Ground Temperature Air-conditioning in Different Layouts on Groundwater Flow Field and Temperature Field

DOU Ming¹, ZHANG Yan¹, MI Qing-bin¹, REN Hui², DENG Yuan - ling², ZHANG Hua-yun²

(1. College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Water Conservancy Bureau of Anyang, Anyang 455000, China)

Abstract: As a new energy technology, the ground temperature air-conditioning has been the rapid development and application in recent years. However, the dynamic equilibrium of groundwater system is very easy to be broken because large-scale development and utilization, which can cause a series of negative effects. In order to assess the impact of different layouts for the groundwater, Anyang as the research object in the paper, a numerical model of groundwater is established. There are three layouts, which are 1 to 1, 1 to 2, 2 to 3 for ground temperature air-conditioning system. The simulation analysis is done for groundwater flow field and temperature field with ground temperature air-conditioning system. The simulation results show that there is a great influence for groundwater flow field and temperature field in reasonable proportion and layout of the pumping and injection wells, the most suitable layout of the region is 1 to 2.

Key words: ground temperature air-conditioning; layout; groundwater flow field; temperature field