

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.06.029

抽灌模式对含水层采能区热渗场的影响

闫 峭^{1,2}, 马 聪^{2,3}, 周维博^{2,3}, 于林弘^{2,3}

(1. 长安大学 理学院, 西安 710064; 2. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 3. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 以西安市御品轩食品工业园试验场为研究区, 建立三维水热耦合数值模型, 模拟预测不同抽灌井布局方案下地下水渗流场和温度场的演化规律。结果表明, 含水层地温场的变化不仅与地下水的天然流场有关, 而且受抽灌井布局的影响, 直线型异侧回灌模式对地温场的影响大于直线型同侧回灌模式。井距越大, 抽水井发生热贯通的时间越长。从利于回灌角度看, 直线型异侧回灌优于直线型同侧回灌; 从控制热贯通效果看, 直线型同侧回灌优于直线型异侧回灌。针对试验场地的具体条件, 两种井群布置方案均突破了热贯通现象, 仅考虑渗流场的影响, 最优布井模式为直线型异侧回灌。

关键词: 地下水; 数值模拟; 渗流场; 温度场; 抽灌井布局

中图分类号: TU111; TK52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1156-06

Impact of pumping and injection mode on thermal and seepage field in the energy extraction area

YAN Qiao^{1,2}, MA Cong^{2,3}, ZHOU Wei bo^{2,3}, YU Lin hong^{2,3}

(1. College of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: A three dimensional water heat coupled numerical model was developed to simulate and analyze the evolution of seepage and temperature fields under different layout schemes of pumping and injection wells in the Yupinxuan food industrial park of Xi'an. The results showed that (1) the variation of groundwater temperature field is not only associated with the natural groundwater flow field, but also affected by the layout of pumping and injection wells, and the layout with injection wells on the opposite side has greater effects on the geothermal field than that with the injection wells on the same side; (2) the greater the distance between wells is, the longer the thermal transfixion of pumping wells encounters; (3) from the point of view of recharge, the layout with injection wells on the opposite side is better than the layout with injection wells on the same side; and (4) from the point of view of controlling transfixion, the layout with injection wells on the same side is better than the layout with injection wells on the opposite side. According to the specific conditions of test site, both layout schemes broke through the phenomenon of thermal transfixion, and the layout with injection wells on the opposite side was selected if only the effects of seepage field were considered.

Key words: groundwater; numerical simulation; seepage field; temperature field; layout of pump and injection wells

地下水源热泵系统(GWHP)^[1]作为一种新兴的浅层地热能利用技术,因具有节能、环保、高效等诸多优点,自20世纪90年代以来,在欧美等国得到了广泛应用^[2,3],近年来在我国也出现了良好的发展势头^[4]。然而,快速发展中的热泵系统逐渐暴露出一些不容忽视的问题。例如,由于建设场地

的水文地质条件不适宜,许多热泵系统存在回灌困难的问题;又如,在地下水源热泵系统运行过程中,由于回灌水温和含水层初始温度存在差异,如果抽灌井布设不合理,热泵系统长时间运行后,在导热和对流等作用下,会导致抽水井出

收稿日期: 2015-01-23 修回日期: 2015-10-10 网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2100.042.html>

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120113004800); 陕西省水利科技计划项目(2014slkj19); 陕西省自然科学基金(2014JM1030)

作者简介: 闫峭(1977),女,陕西西安人,讲师,博士研究生,主要从事环境地质及水文地质等方面的研究。E-mail: yanqiao77@outlook.com

通讯作者: 周维博(1956),男,陕西乾县人,教授,博士生导师,从事水资源与水环境及节水灌溉方面的教学及研究工作。E-mail: zwlzyz823@163.com

水温度较初始温度有不同程度的升高或降低,出现抽水并热贯通现象,使热泵系统运行效率低下^[5]。

国内外学者在地下水抽回灌与水热运移规律等方面做了大量的理论和实际研究工作。Cringarten等^[6]建立了对井系统热传递模型,对不同条件下的热贯通事件进行了定量评价,为对井采能系统的合理布局提供了参考;胡继华等^[7]提出了流贯通的概念,建立水热耦合模型分析了抽灌量对流贯通与热贯通的影响;Nam等^[8]基于原型实验,对地下水源热泵的地下换热和水运移情况进行了数值模拟研究;周学志^[9]通过砂槽模拟实验对不同影响因素条件下抽灌井群含水层热渗流的发展、演变和作用机理进行了分析。目前的研究成果主要体现在含水层储能与热贯通方面^[10-11],且主要针对单井或对井形式进行研究^[12-15],关于一抽多灌条件下抽灌井区热渗场的研究披露较少。

本文以西安市北郊御品轩食品工业园试验场为研究区,建立三维水热耦合数学模型,拟对一抽两灌模式下直线型同侧回灌和异侧回灌两种抽灌井布局地下水渗流场和温度场的演化规律进行模拟分析,提出合理的布井方案。

1 研究区概况

研究区位于西安市北郊经济技术开发区草滩生态产业园,场地内地形基本平坦,地面高程介于 372 41~ 373 68 m 之间,地貌单元属于渭河南岸高河漫滩,地下水类型为松散岩类孔隙水。根据研究区地下水埋藏深度及水力性质,该区地下水含水岩组分为潜水和浅层承压水两个含水岩组。潜水埋深在 10 m 左右,潜水含水层主要为冲积粗砂砾石,含水层底板在 40 m 左右。浅层承压含水岩组主要由中更新统冲洪积相细、中、粗砂或砂砾石组成,单井涌水量大于 5 000 m³/d,属于极强富水区。图 1 为 5 号抽灌井地质柱状图。

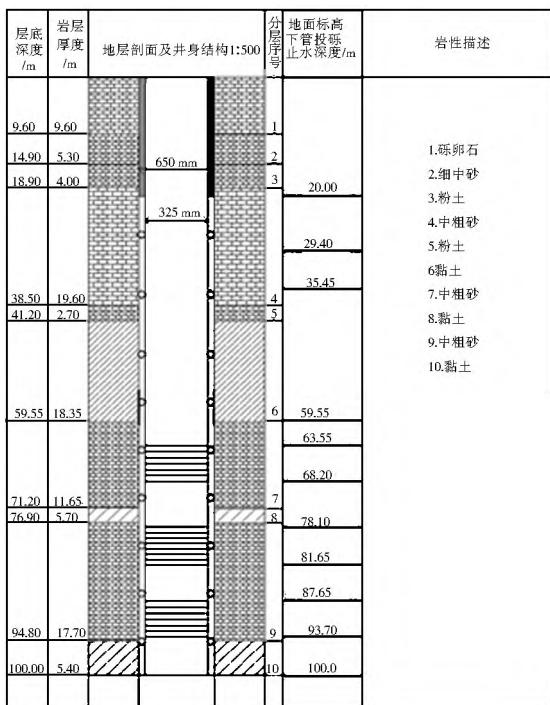


图 1 抽灌井柱状图

Fig. 1 Histogram of pumping and injection wells

研究区处于西安市地下水源热泵系统的适宜区范围^[16],现有生产井三眼,孔径 650 mm,管径 325 mm,井深 100 m,滤水管孔眼直径为 1.5 cm,采用梅花型排列。抽灌井运行模式为一抽两灌,其中 5 号井为抽水井,3 号、6 号井为回灌井,直线型异侧回灌布置,并在场地布设 4 号、7 号两眼监测井,各井间距为 27 m,图 2 为抽灌井与监测井位置分布图。

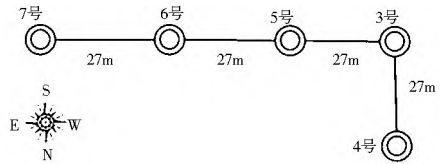


图 2 抽灌井与监测井位置分布

Fig. 2 Location of the production and observation wells

2 水热耦合模型的建立

根据研究区水文地质与钻孔资料,地下水流系统可概化为:含水层水平结构、非均质、各向同性、三维非稳定流系统。

地下水源热泵系统运行过程中,抽取的地下水通常全部近距离回灌,供暖、制冷过程分别向地下含水层抽取、注入热量,系统运行过程中地下水渗流场和温度场的影响区域集中在抽、灌井为中心的一定范围内^[17],因此,地下水渗流和热运移控制方程^[18]可分别用式(1)与式(2)描述:

$$\frac{\partial(nQ)}{\partial t} = \Delta \cdot \rho \frac{k_p}{\mu} (\Delta p + \rho g) + q \quad (1)$$

式中: n 为含水介质有效孔隙度(无量纲); ρ 为流体密度(kg/m^3); t 为时间(s); k_p 为含水层介质的渗透率张量(m^2); μ 为流体的动力黏度系数($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$); p 为流体压强(Pa); g 为重力加速度(m/s^2); q 为源点流体进入介质的体积通量强度($\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,流入为正,流出为负); Q 为流体源密度(kg/m^3)。

$$\frac{\partial(n\rho c_f + (1-n)\rho_s c_s)T}{\partial t} = \Delta \cdot (nK_f + (1-n)K_s) \cdot I \Delta T + \Delta \cdot nD_H \Delta T - \Delta \cdot n\rho c_f v T + q \rho^* c_f T^* \quad (2)$$

式中: c_f 为流体比热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$); ρ_s 为孔隙介质密度(kg/m^3); c_s 为孔隙介质比热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$); T 为温度(C); K_f 为流体热导率($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{C})$); K_s 为孔隙介质热导率($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{C})$); I 为 3 阶单位矩阵; D_H 为热动力弥散系数张量($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{C})$); v 为渗流速度(m/s); T^* 为流体源的温度(C);其余符号同前。

3 数值模拟模型

3.1 定解条件及模型假设

为了取得稳定的压力和温度边界,根据泰斯井流公式对影响半径的试算,平面上选取 $500 \times 500 \text{ m}^2$ 的正方形区域为模拟区。垂向上计算范围为 $-40 \sim -100 \text{ m}$,由钻孔资料从上到下依次为黏土层、中粗砂层、黏土层、中粗砂层和黏土层,厚度分别为 20 m、11 m、6 m、17 m 和 6 m。将模拟区 4 个侧面边界概化为定水头、定温度边界,模拟区顶、底部边界设为隔水、定温度边界。初始渗流场由试验场井水头埋深利用 Kriging 插值法得到,初始温度 16 C 。

选用有限差分模拟软件 FlowHeat1.0 进行模拟研究^[9]。为了保证模型计算精度,同时又提高运算速度,平面上采用非等距网格剖分。生产井区网格加密,间距为 5 m,

向外逐渐稀疏;垂直方向,分为 5 个网络层,网格间距采用 2 m 等距网格。时间离散步长取 1 d。通过求解大型方程组,可计算出热泵系统运行过程中三维网格各结点的水压力变化和温度变化。

为了排除井群干扰影响,并简化模型复杂度,作如下假设:(1)生产井数量设为 3 眼,即一抽两灌模式,抽水量为 1 680 m³/d,回灌量为 840 m³/d;(2)空调机组在供暖期和制冷期间每天 24 h 连续运行;(3)采用定温度回灌模式,冬季供暖期回灌水的温度为 7 °C,夏季制冷期回灌井的温度为 26 °C;(4)11 月中旬冬季供暖为起始时间,运行次序为 121 d 供暖期,76 d 停运期,92 d 制冷期,76 d 停运期。

3.2 参数识别及模型验证

模拟区含水层水文地质参数根据抽水试验数据反演确定,黏土层水文地质参数及各介质的热物理性参数参考前人成果确定初值,利用 2012 年 11 月 27 日至 2013 年 1 月 31 日 66 组地温监测数据拟合修正。图 3 为 5 号抽水井水位拟合曲线,图 4 为 4 号监测井水温拟合曲线。

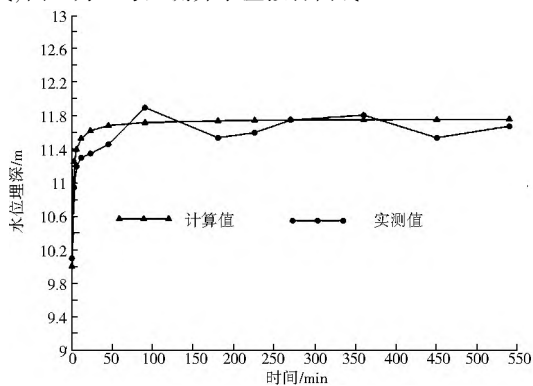


图 3 地下水位拟合曲线

Fig. 3 Fitting of groundwater level

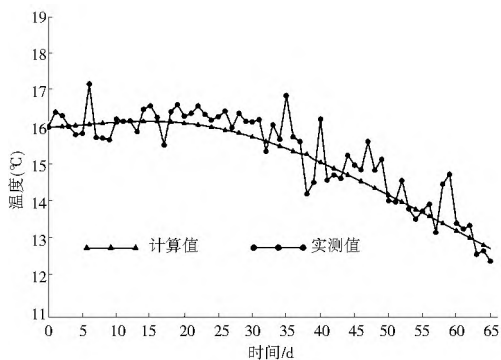


图 4 地下水温拟合曲线

Fig. 4 Fitting of groundwater temperature

从图 3 与图 4 可以看出实测值与模拟值拟合良好。水位计算值与实测值之间误差的统计结果表明:误差 ≤ 0.1 m 的拟合点占 31%,误差在 0.1~0.3 m 的拟合点占 62%,误差 > 0.3 m 的拟合点占 7%。水温计算值与实测值之间误差的统计结果表明:误差 ≤ 0.5 °C 的拟合点占 61%,误差在 0.5 °C~1 °C 的占 30%,误差 > 1 °C 的占 9%。

表 1 表示识别后的各参数分区的水文地质参数及岩土层介质热物理参数。地下水相关参数:比热容 4 182.0 J/(kg·°C),热导率 0.599 W/(m·°C),热膨胀系数 2.0 × 10⁻⁵ °C⁻¹,黏滞系数 0.001 14 Pa·s。

4 模型应用

采用上述模型假定不同情景,模拟分析不同井距条件下直线型异侧回灌与直线型同侧回灌两种模式抽回灌井周围地下水流场和地下水温度场的特征,为地下水热泵系统的抽灌井优化布局提供参考。

表 1 各参数分区参数选取

Tab. 1 Selection of parameters in different areas

岩性	渗透率/m ²	孔隙度	比热容/(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	纵向弥散度/m	横向弥散度/m
黏土	1.20 × 10 ⁻¹⁴	0.10	1.4 × 10 ⁶	1.0	0.0	0.0
中粗砂	2.95 × 10 ⁻¹¹	0.25	1.5 × 10 ⁶	0.8	2.4	0.6
黏土	1.20 × 10 ⁻¹⁴	0.10	1.4 × 10 ⁶	1.0	0.0	0.0
中粗砂	2.75 × 10 ⁻¹¹	0.20	3.2 × 10 ⁶	0.8	2.0	0.4
黏土	1.20 × 10 ⁻¹⁴	0.10	1.4 × 10 ⁶	1.0	0.0	0.0

4.1 地下水渗流场分析

图 5 和图 6 分别为井距 40 m、60 m、80 m 条件下两种抽灌模式的地下水渗流场图。从图中可以看出,水位埋深等值线沿着抽灌井的布置水平对称,分析其原因是由于研究区范围较小,含水介质各向同性。地下水的天然流向自西向东流动,抽水井与回灌井之间区域水动力循环活跃,水力坡度最大。

表 2 为不同井距两种抽灌模式下,地下水流场基本稳定后抽水井与回灌井的水位降深值。由表可见,随着井距的增加,回灌井水位降深的绝对值增加,地下水流速对水位埋深的影响逐渐变小,回灌能力逐渐减弱。相比较而言,直线型同侧模式的抽水井水位降深值、回灌井水位抬升值大于直线型异侧回灌模式,直线型同侧回灌对地下水流场的影响较大,从水量角度看,直线型异侧回灌优于直线型同侧回灌。

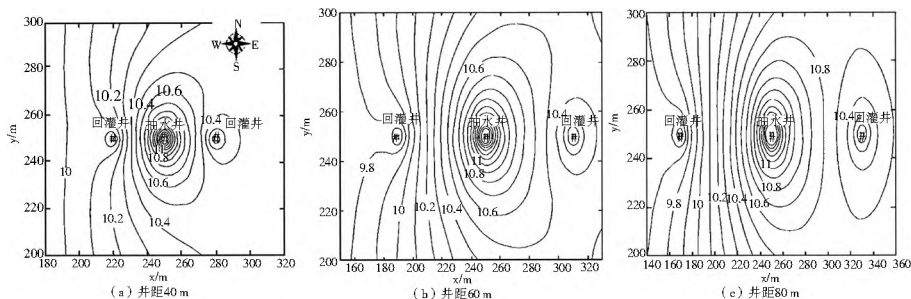


图 5 直线型异侧回灌不同井距水位埋深等值线

Fig. 5 Water depth contour map of layout with injection wells on the opposite side with different spacing

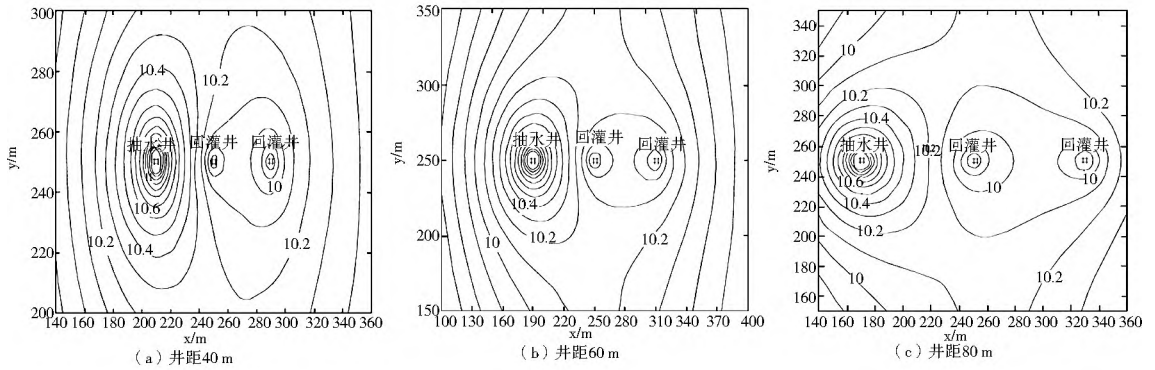


图 6 直线型同侧回灌不同井距水位埋深等值线

Fig. 6 Water depth contour map of layout with injection wells on the same side with different spacing

表 2 不同井距条件下抽回灌井水位降深

Tab. 2 Drawdown in the pumping and injection wells with different spacing

抽灌模式	井距 / m	抽水井降深/m	左侧回灌井降深/m	右侧回灌井降深/m
直线型异侧回灌	40	3.493 5	- 0.624 1	- 0.623 1
	60	3.615 9	- 0.739 3	- 0.739 3
	80	3.662 8	- 0.783 2	- 0.782 1
	100	3.776	- 0.879	- 0.88
直线型同侧回灌	40	3.573 1	- 0.728 1	- 1.018 7
	60	3.669	- 0.850 5	- 1.126 8
	80	3.719 9	- 0.939 2	- 1.195 1
	100	3.742 4	- 1.010 6	- 1.241

4.2 地下水温度场分析

图 7 和图 8 分别为井距 40 m、60 m、80 m 条件下两种抽灌模式的地下水温度场图。从图中可以看出,随着井距的增加,抽水井受回灌井冷锋面的影响越来越弱,热贯通现象越来越不明显。

表 3 为不同井距两种抽灌模式供暖末期抽水井温度与温度差的大小。由表可见,随着井距的增加,初始温度与供暖末期抽水井温度之差逐渐减小,抽水井发生热突破的时间不断增长。相同井距条件下,与直线型异侧回灌模式相比,直线型同侧回灌抽水井温度变化小,不容易发生热贯通现象,这是因为直线型同侧回灌模式右侧回灌井与抽水井间距大,对抽水井温度的影响较小。从控制热贯通效果看,直线型同侧回灌优于直线型异侧回灌。

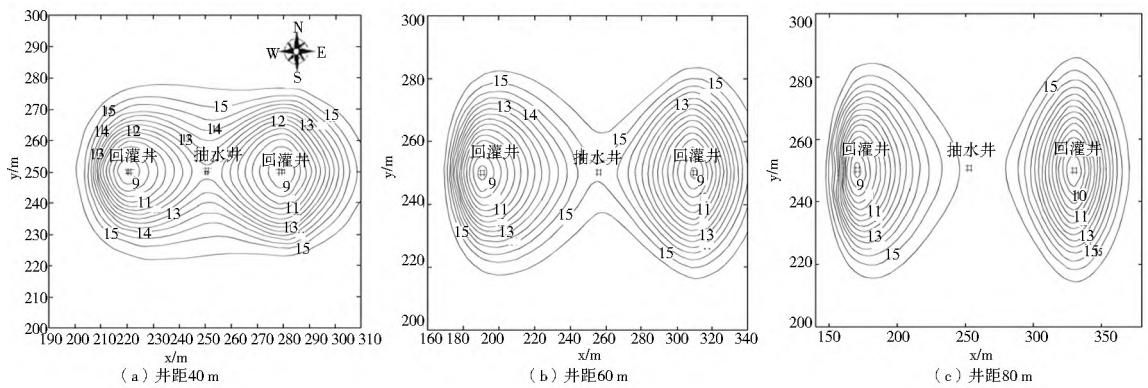


图 7 直线型异侧回灌不同井距温度等值线

Fig. 7 Temperature distribution of layout with injection wells on the opposite side with different spacing

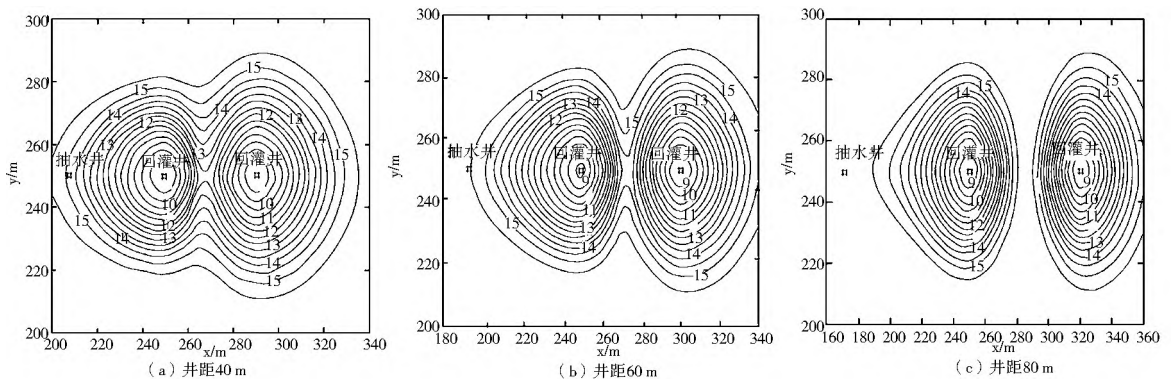


图 8 直线型同侧回灌不同井距温度等值线

Fig. 8 Temperature distribution of layout with injection wells on the same side with different spacing

表 3 不同井距条件下抽水井温度变化

Tab. 3 Variations of temperature in the pumping wells with different spacing

抽灌模式	井距/m	抽水井温度(℃)	抽水井温差(℃)
直线型异侧回灌	40	12.005	3.995
	60	13.335	2.665
	80	13.944	2.056
	100	15.240	0.760
直线型同侧回灌	40	13.804	2.196
	60	14.799	1.201
	80	15.521	0.479
	100	15.902	0.098

4.3 两种抽灌模式的合理井距

以上对比分析了两种抽灌模式不同井距对地下水流场和温度场的影响。结果表明,抽回灌井间距越大,发生热贯通的时间越长,越不容易发生抽水井热突破。然而,在实际工程应用中,由于场地条件的限制,人们通常希望在满足水源热泵系统高效运行的前提下,尽可能的缩小井间距,这就涉及到合理井距问题。由表 2 可知,两种布井模式供暖运行末期,抽回灌井水位降深均在允许规定的范围内,忽略渗流

场的影响,以温度差为因变量,井距为自变量,用指数函数拟合数据,得到温差和井间距的指数函数拟合模型见表 4。假设抽水井温度差不超过 1℃时,回灌井的冷锋面不会产生热贯通现象,据此得到两种抽灌模式的合理井距(表 4),直线型异侧回灌合理井距大于直线型同侧回灌。

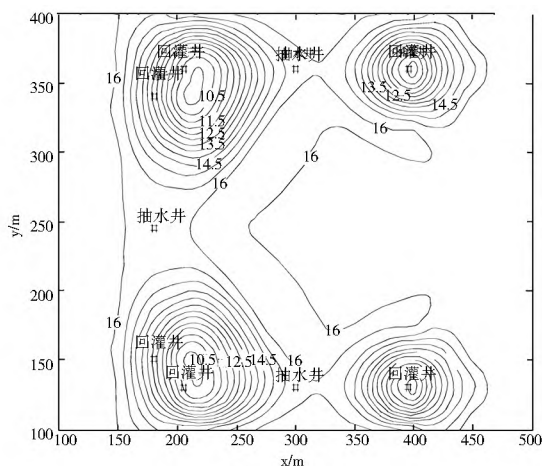
表 4 不同抽灌模式的合理井距

Tab. 4 Reasonable spacing of different pumping and injection modes

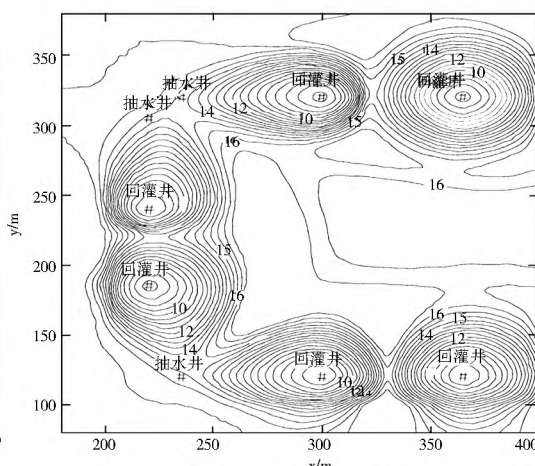
抽灌模式	拟合模型	合理井距/m	R ²
直线型异侧回灌	$L = 117.69e^{-((\Delta T + 1.394)/5.147)^2}$	94.48	0.9889
直线型同侧回灌	$L = 14.67e^{-7.63\Delta T} + 96.82e^{-0.4025\Delta T}$	64.75	0.9869

5 抽灌井群优化布置

针对试验场地的实际情况,应用偏最小二乘法,3 眼抽水井可满足负荷要求^[20],布置两种井群优化方案。选用软件 FlowHeat1.0 建立模型,预测 3 年运行周期后,抽灌井温度场和渗流场的变化(图 9),进行对比优化,从而选取合理的抽灌井群布置方案。



(a) 直线型异侧回灌



(b) 直线型同侧回灌

图 9 两种布井方案 3 年后地下水温度场

Fig. 9 Temperature distribution after 3 years for different layout schemes of pumping and injection wells

在抽灌井的优化布置中,主要考虑突破热贯通现象和回灌井顺利运行这两个主要影响因素。由图 9 可以看出,两种布置方案均突破了热贯通现象。模拟预测三年回灌井水位变化比较平稳,水位降深的绝对值均在地下水热泵空调系统规范允许的范围之内。直线型异侧回灌回灌井最大抬升为 0.68 m,直线型同侧回灌回灌井最大抬升为 0.99 mm,第一种方案回灌井水位降深的绝对值比较小,分析原因主要是因为抽水井在中间,抽水井在抽水过程中产生降落漏斗,回灌井处于降落漏斗的两侧,比较易于回灌。综合以上分析,直线型异侧回灌方案为该试验场地地下水热泵空调系统抽灌井群最优布置方案。

6 结论

通过对不同井距条件下两种抽灌模式含水层采能区地下水渗流场和温度场的演化进行对比和分析,结果表明:

(1) 含水层地温场的变化不仅与地下水的天然流场有关,而且受抽灌井布局的影响,直线型异侧回灌模式对地温场的影响较直线型同侧回灌模式明显。

(2) 抽回灌井间距越大,抽水井发生热贯通的时间越长,抽水井温度变化越小。假设抽水井温度差不超过 1℃时,回灌井的冷锋面不会产生热贯通现象,直线型同侧回灌模式与直线型异侧回灌模式的合理井距分别为 64.75 m 与 94.48 m。

(3) 井距相同的条件下,与直线型同侧回灌模式相比,直线型异侧回灌回灌井水位降深的绝对值较小,利于地下水回灌;但是,由于抽回灌引起的外加流场的不同,直线型异侧抽灌模式抽水井温度的变化大于直线型同侧回灌,控制热贯通方面较为不足。针对试验场地的具体条件,直线型异侧回灌为最优布井模式。

参考文献(References):

[1] Zheng D. Modeling of standing column well in ground source

- heat pump system [D]. Stillwater: Oklahoma State University, 2004.
- [2] Sanner B, Karytsas C, Mendrinis D, et al. Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe [J]. *Geothermics*, 2003, 32: 579-588.
- [3] Abdeen M O. Ground source heat pumps systems and applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12 (2): 344-371.
- [4] 倪龙, 封家平, 马最良. 地下水源热泵的研究现状与进展 [J]. *建筑热能通风空调*, 2004, 23 (2): 26-31. (NI Long, FENG Jia ping, MA Zui liang. The research status and progress of the groundwater source heat pumps [J]. *Building Energy and Air Conditioning*, 2004, 23 (2): 26-31. (in Chinese))
- [5] 杨伟涛, 孟宪军, 林豹. 抽灌井布局及天然水力坡度对热贯通的影响 [J]. *制冷与空调*, 2012, 12 (4): 121-124. (YANG Wei tao, MENG Xian jun, LIN Bao. Impact of pumping - injection wells distribution and natural hydraulic gradient on heat transfixion [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2012, 12 (4): 121-124. (in Chinese))
- [6] Gringarten A C, Sauty J P. A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80 (35): 4956-4962.
- [7] 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. (HU Ji hua, ZHANG Yan jun, YU Zi wang, et al. Groundwater flow transfixion of groundwater source heat pump system and its influence on temperature field [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2008, 38 (6): 992-998. (in Chinese))
- [8] Nam Y, Ooka R. Numerical simulation of ground heat and water transfer for groundwater heat pump system based on real scale experiment [J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42 (1): 69-75.
- [9] 周学志. 抽灌井群地下水运移能量传输及其传热研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013. (ZHOU Xue zhi. Energy transport and heat transfer on groundwater motion of pumping and injecting well group [D]. Chang chun: Jilin University, 2013. (in Chinese))
- [10] Nagano K, Mochida T, Ochifuji K. Influence of natural convection on forced horizontal flow in saturated porous media for aquifer thermal energy storage [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22 (12): 1299-1311.
- [11] 高青, 周学志, 江彦, 等. 地能利用过程抽灌井区热贯通及其定量分析 [J]. *应用基础与工程科学*, 2012, 20 (3): 447-454. (GAO Qing, ZHOU Xue zhi, JIANG Yan, et al. Quantitative analysis of thermal breakthrough in pumping and injecting well group area during earth energy utilization [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20 (3): 447-454. (in Chinese))
- [12] 宋伟, 倪龙, 姚杨. 不同抽回间距的单井循环地下水源热泵系统试验 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30 (2): 205-211. (SONG Wei, NI Long, YAO Yang. Experiment on single well groundwater heat pump systems in different distances between pumping and injection screens [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30 (2): 205-211. (in Chinese))
- [13] 倪龙, 马最良. 同井回灌地下水热泵地下水渗流理论研究 [J]. *太阳能学报*, 2006, 27 (12): 1219-1224. (NI Long, MA Zui liang. Study on the seepage theory for groundwater heat pump with pumping & recharge in the same well [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2006, 27 (12): 1219-1224. (in Chinese))
- [14] 张远东, 魏加华, 汪集. 井对间距与含水层采能区温度场的演化关系 [J]. *太阳能学报*, 2006, 27 (11): 1163-1167. (ZHANG Yuan dong, WEI Jia hua, WANG Ji. Influence of well pair distance on the changes of geotemperature field due to aquifer energy extraction [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2006, 27 (11): 1163-1167. (in Chinese))
- [15] 骆祖江, 李伟, 王琰, 等. 地下水源热泵系统热平衡模拟三维数值模型 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30 (2): 198-204. (LUO Zu jiang, LI Wei, WANG Yan, et al. Three dimensional numerical model for heat balance simulation of groundwater heat pump [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30 (2): 198-204. (in Chinese))
- [16] 马聪, 周维博, 李娜. 西安市主城区地下水热泵适宜性分区 [J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12 (3): 156-159. (MA Cong, ZHOU Wei bo, LI Na. Suitability zonation for groundwater source heat pumps in Xi'an [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12 (3): 156-159. (in Chinese))
- [17] 张远东, 魏加华, 王光谦. 区域流场对含水层采能区地温场的影响 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46 (9): 1518-1521. (ZHANG Yuan dong, WEI Jia hua, WANG Guang qian. Impact of regional groundwater flow on geological temperature field with energy abstraction from the aquifer [J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2006, 46 (9): 1518-1521. (in Chinese))
- [18] 张远东, 魏加华, 李宇, 等. 地下水源热泵采能的水热耦合数值模拟 [J]. *天津大学学报*, 2006, 39 (8): 907-912. (ZHANG Yuan dong, WEI Jia hua, LI Yu, et al. Simulation of changes in geotemperature field due to energy abstraction from underground aquifers [J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39 (8): 907-912. (in Chinese))
- [19] 李月, 袁建伟, 王瑞祥, 等. 水文地质参数对单井回灌地下水热泵抽水井温度场影响 [J]. *北京建筑工程学院学报*, 2011, 27 (4): 32-36. (LI Yue, YUAN Jian wei, WANG Rui xiang, et al. Hydrogeologic status on the temperature of water in aquifer surrounded by the well of standing column well heat pumps [J]. *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, 2011, 27 (4): 32-36. (in Chinese))
- [20] 于林弘. 地下水源热泵系统抽灌井群优化布置及试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011. (YU Lin hong. Study on the groundwater heat pump system experimental and well group arrangement optimization [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese))