

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0106

李海岭,周雨泽,曹亚新,等.基于地下水压采目标的地下水源热泵系统井群调控方案[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(5):165-173. LI H L, ZHOU Y Z, CAO Y X, et al. Controlling plan of well group operation of groundwater source heat pump system with the target of groundwater pressure recovery[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(5): 165-173. (in Chinese)

基于地下水压采目标的 地下水源热泵系统井群调控方案

李海岭¹,周雨泽²,曹亚新³,韩宇平⁴,窦明²

(1. 安阳市计划节约用水办公室,河南 安阳 455000;2. 郑州大学,郑州 450001;
3. 天津市水利工程有限公司,天津 300000;4. 华北水利水电大学,郑州 450045)

摘要:以安阳市某地下水源热泵系统为研究对象,采用水均衡法预测压采量上升后安阳市地下水水位变化趋势,并构建研究区地下水水位变化条件下的井群抽回灌地下水水-热耦合模型,将不同井群布局方案对地下水流场与温度场的影响进行量化,同时采用优化理论建立井群调控模型对井群布局方案进行优选。研究结果表明:压采量为3 000万 m³时,地下水位将上升5.7 m,此时抽水井相间的直线布局方案的综合效益最大;当压采量上升至5 000万 m³时,地下水位将上升8.4 m,此时抽水井异侧的矩形布局方案的综合效益最大。

关键词:地下水源热泵系统;抽回灌井群;地下水数值模型;井群调控模型;方案优选

中图分类号:P641 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Controlling plan of well group operation of groundwater source heat pump system with the target of groundwater pressure recovery

LI Hailing¹, ZHOU Yuze², CAO Yaxin³, HAN Yuping⁴, DOU Ming²

(1. Anyang Office Water Saving Plan, Anyang 455000, China; 2. Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
3. Tianjin Water Engineering Co., Ltd, Tianjin 300000, China;
4. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: A ground source heat pump system in Anyang was used as the research object. The water balance method was used to predict the change of groundwater level in Anyang, and the groundwater water-heat coupling model of groundwater level change was constructed to quantify the impact of different well group operations. The optimization theory was used to establish a well group control model to optimize the layout of the well group. The results showed that: when the production pressure increased to 3×10^7 m³ and the groundwater level raised by 5.7 m, the best scheme for well group layout was linear on interphase pumping wells, whereas, when the production pressure increased to 5×10^7 m³ and the groundwater level increased by 8.4 m, the best plan for well group layout was rectangular on different sides of the pumping well.

Key words: ground source heat pump system; layout optimization; groundwater numerical simulation; well group regulation model; program optimization

收稿日期:2020-05-06 修回日期:2020-06-23 网络出版时间:2020-07-06

网络出版地址:https://kns.cnki.net/KCMS/detail/13.1430.TV.20200706.1015.002.html

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51679218;51879239)

作者简介:李海岭(1968—),男,河南安阳人,高级工程师,主要从事水资源管理与节约保护工作。E-mail:123352752@qq.com

通信作者:窦明(1975—),男,山东桓台人,教授,博士,主要从事水文与水资源研究。E-mail:dou_ming@163.com

中国的地热能资源储量丰富,开发潜力巨大^[1],且已被广泛应用于发电与取暖等方面^[2-3]。但是由于对地热资源的认识不够全面以及不合理的使用方式,在开发利用过程中出现了地温异常、地面沉降以及地下水热污染等问题^[4]。这些问题引起了人们的广泛关注,同时针对这些问题的产生机理以及对地下水的影响程度的研究成为了热点,一些学者^[5-8]通过对地热资源开发前后地下水水温及水化学特征的对比研究,发现地热资源的开发会导致地下水水质发生变化。也有学者^[9-12]通过构建地下水数学模型,模拟了地热资源开发中抽回灌井位变化对地下水水流场与温度场的不同影响。一部分学者^[13-15]还利用数学模型对地热资源开发中抽回灌过程对地下水系统的影响进行了定量分析。还有学者^[16-20]基于数值模型能够准确直观体现地下水水流场、温度场与化学场变化的特点,对抽回灌过程中的水热分布情况进行了数值模拟。当前的研究主要集中于对现状情况下地下水热源热泵抽回灌的模拟,基于地下水压采导致水位变化条件下的抽回灌模拟的研究较少。本文通过水均衡法预测了不同压采强度下的地下水位变化,并利用地下水模拟系统(groundwater model system, GMS)软件构建地下水水-热耦合数值模型,对水位变化条件下不同地下水热源热泵系统井群布局方式对地下水水流场与温度场的影响进行量化分析,建立井群调控模型,优选不同水位变幅下综合效益最大的井群布局方案,为地下水热源热泵系统井群的设计与管理提供参考。

1 研究区与数据

1.1 研究区介绍

研究区位于安阳市市区内的一处地下水热源热泵系统项目所在地,属于洹河冲积扇极强富水区。该区域地形相对平坦,西部、南部和北部 3 个方向都有丘陵岗地包围,只有东部是开阔的,封闭条件相对较好。研究区含水层介质主要为中、上更新统砂砾和卵石层,由灰岩和石英砂岩组成,磨圆度较好,分选一般。其中潜水含水层水位埋深在 15~38 m,承压水含水层顶板埋深 30~50 m,含水层厚为 9~40 m,由中间向两侧逐渐变薄,含水介质颗粒也由粗变细,渗透系数一般在 100~500 m/d,给水度 0.23~0.29。地下水补给主要为大气降水,排泄主要为人工开采,为入渗和径流-开采的地下水开采类型。

研究区地下水热源热泵系统项目总占地面积 4 万 m²,项目拥有 2 眼抽水井与 4 眼回灌井,井群呈近线状分布,每眼井井深 100 m,各井之间间距 30 m(图 1),

取水层和回灌层为第四系砂砾层构成的承压水含水层,取水及回灌深度约 42.5 m。取用的地下水进入系统循环后只进行热交换,其退水通过回灌井全部回灌地下。

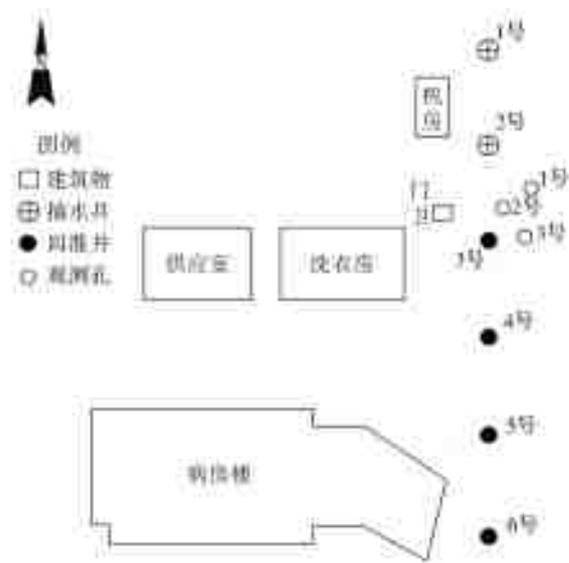


图 1 研究区井位布局

Fig. 1 Layout of wells in the study area

1.2 数据采集

通过对研究区地下水热源热泵系统的调查分析,结合抽回灌井和监测井的实际运行情况,利用现有的 3 个观测孔与 6 眼抽灌水井对水位、水量以及水温进行监测。其中,1、2 号井和 1、2、3 号观测孔为水位监测点,1、2、3 号井为水量监测点,2、3 号井和 1、2、3 号观测孔为水温监测点。在系统运行一段时间,地下水水流场处于稳定状态之后,以 1 次/h 的频率对水量、水温和水位埋深进行监测。

2 研究方法

本次研究首先利用水均衡法对不同压采强度下研究区地下水位变幅进行预测。将预测结果作为初始条件输入地下水水-热耦合模型,对不同井群布局方案下地下水水流场与温度场的变化进行模拟,为各方案的环境效益分析提供依据。最后构建井群调控模型,在水位、水温与成本的约束下对各方案的环境效益与经济效益进行综合评价。

2.1 水位变幅预测

安阳市是我国较为严重缺水的城市之一,以往的城市供水主要来源于地下水,多年平均开采量达到了全年总供水量的 80% 以上。城区现状地下水开采量为 12 507 万 m³,超采地下水 1 328 万 m³,这种大规模的地下水开发利用破坏了地下水的循环过程,局部区域地下水超采严重,引起了地下水位的

断下降,目前地下水的最大埋深已达到 83 m,水位降落漏斗范围较大,形成了区域性水位降落漏斗。针对这一问题,安阳市在南水北调中线工程投入使用后对城区地下水大规模压采,因此有必要对研究区的地下水位变化进行预测。

研究区主要含水层为平原区第四系松散岩类含水层,水文地质构造相对单一,属于一个完整的水文地质单元,因此,使用水均衡法对不同压采条件下的地下水水位变化进行计算,计算公式^[21]为

$$\begin{cases} X=Q_{\text{总补}}-Q_{\text{总排}} \pm \Delta W \\ \Delta W=\Delta h \times \mu \times F \\ \Delta h=Q_{\text{总补}}-Q_{\text{总排}}/10^2 \times \mu \times F \\ \delta=X/Q_{\text{总补}} \times 100\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{总补}}$ 为均衡区的地下水总补给量,万 m^3 ; $Q_{\text{总排}}$ 为均衡区的地下水总排泄量,万 m^3 ; X 为蓄变量误差,万 m^3 ; μ 为均衡区地下水含水层的给水度; F 指均衡区的计算面积, km^2 ; Δh 为均衡区的地下水位变幅, m ; ΔW 为地下水蓄变量,万 m^3 ; δ 为模型计算精度。

2.2 地下水数值模拟

2.2.1 水位变化条件下的地下水水-热耦合模型数学模型

根据研究区的水文地质条件,研究区地下水的水位变幅较小,处于相对稳定的状态。因此将地下水流动系统概化成含水层为水平结构、非均质、各向异性、无越流补给的三维稳定流系统。

地下水运动的基本微分方程^[22]为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - \omega = S_s \frac{\partial h}{\partial t} & (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t) |_{t=t_0} = H_0(x, y, z, t) & (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t) = H_1(x, y, z, t) & (x, y, z) \in S_1 \\ K \frac{\partial h}{\partial n} |_{s_2} = q(x, y, z, t) & (x, y, z) \in S_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 为 x 、 y 、 z 方向的渗透系数, m/s ; h 为水头, m ; 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; 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)1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 为地下水水头; H_0 为含水层初始水头; H_1 为渗透区域边界水位; Ω 为渗流区域; 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, t 为时间; t_0 为初始时间。

地下水热量输运模型^[22]为

$$\begin{cases} n\rho_0\beta_p c_f \theta \frac{\partial P}{\partial t} + n\rho_0\beta_r \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho a_b c_f \theta \frac{\partial P}{\partial t} + n\rho c_f \frac{\partial \theta}{\partial t} - \\ \rho_s c_s T a_b \frac{\partial P}{\partial t} + (1-n)\rho_s c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = \Delta(nK_f + \\ (1-n)K_s) \times \mathbf{I} \cdot \nabla \theta + \nabla n \cdot D_H \cdot \nabla \theta - \nabla n \cdot \rho \rho_f \nu \theta + \\ qp^* c_f \theta^* & (x, y, z) \in \Omega, t \geq 0 \\ \theta(x, y, z, t) |_{t=0} = \theta_0(x, y, z) & (x, y, z) \in \Omega \\ \theta(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = \theta_1(x, y, z, t) & (x, y, z) \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ q_{h,n} |_{\Gamma_2} = (q_{h,x}, q_{h,y}, q_{h,z}) & (x, y, z) \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: \mathbf{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 为研究区孔隙介质密度; ρ_0 为渗流区初始孔隙介质密度; ρ_f 为渗透区地下水密度; T 为孔隙介质温度; t 为时间变量; P 为流体压力; β_p 为热膨胀系数; β_r 为渗流边界热膨胀系数; ρ_s 为孔隙介质密度; n 为孔隙度; a_b 为孔隙介质压缩系数; θ^* 为源汇项温度; p^* 为源汇项液体密度; q 为源汇项强度; ν 为地下水渗流速度; K_f 为流体热导率; K_s 为孔隙介质热导率; θ 为研究区温度; 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。

当地下水水位上升时,含水层厚度增大,会间接地改变含水层的水热交互条件。因此,在地下水抽回灌试验的基础上对式(2)中的渗透系数进行修正^[23]

$$\begin{cases} T \approx \frac{sr^2}{2.246at} (\Delta h)^{\frac{4\pi T_0}{\beta Q}} \\ K = \frac{T}{M} \end{cases} \quad (4)$$

式中: T 为导水系数; T_0 为初始导水系数; t 为抽水延续时间; K 为渗透系数; α 、 β 为修正系数; Δh 为水位变化值; r 为影响半径; Q 为单井涌水量; s 为储水系数; M 为含水层厚度。

2.2.2 数值模型

由于模拟区域边界条件简单,因此直接建立地下水数值模型对研究区地下水流场与温度场进行模拟。根据水位水温监测结果和不同压采强度下水位变幅的预测结果,将研究区数值模型的承压含水层初始水温设定为 $15.5^\circ C$,初始水位设定为现状水位 $42.5 m$ 与不同压采强度下水位变幅的预测结果之和。由于模拟区域抽回灌含水层为承压水含水层,对降水与蒸发的响应较差,因此模型源汇项仅考虑热泵系统井群的抽回灌水量。抽回灌井

各井间距设定为 25 m,井深 100 m,抽回灌水井单井流量分别为 635.0、317.5 m³/d,回灌井的回水温度为 12.6 ℃。

根据观测孔地下水水位与水温的监测值对数值模型的参数进行率定,对承压水含水层的各参数率定的结果见表 1。

表 1 水动力学和水热耦合模型参数率定结果

Tab.1 Parameter calibration results of hydrodynamic and hydrothermal coupling models

类别	参数项	取值
水动力学参数	水平渗透系数/(m · d ⁻¹)	112
	垂直渗透系数/(m · d ⁻¹)	20
	孔隙率	0.23
	含水层厚度/m	30
热量运输模型参数	纵向热弥散度	0.2
	横向热弥散度	0.8
	多孔介质固体密度/(kg · m ⁻³)	2 600
	含水层比热容/(J · kg ⁻¹ · ℃ ⁻¹)	696
	含水层导热系数/(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	1.82
	地下水导热系数/(W · m ⁻¹ · ℃ ⁻¹)	0.56

地下水源热泵系统井群对地下水影响程度的变化主要与井群的布局形式有关,研究区地下水源热泵系统的井群布局形式随用户热量需求的变化而改变,合理的布局形式会减小对地下水的影响。本次研究模拟了 120 d 的供暖周期内井群在不同排列形式与布局方式下(表 2)对地下水流场与温度场的影响,其中方案一与方案二为研究区实际运行的井群布局形式,方案三与方案四为改变排列形式后所设计的井群布局方案。

表 2 井群布局方案设定

Tab.2 The setting of well group layout plans

方案设计	方案一	方案二	方案三	方案四
排列形式	线状排列	线状排列	矩形排列	矩形排列
布局方式	抽水井同侧	抽水井相间	抽水井同侧	抽水井异侧

2.3 井群调控模型

2.3.1 指标选取

为使井群布局方案能够达到环境影响最小且修建成本最低的综合效益目标,在地下水热耦合模型计算结果的基础上,构建井群调控模型对井群布局方案进行优选。

根据研究区地下水影响因素和数据资料,有选择地确定客观、系统、易量化的调控指标作为调控模型的约束条件。当地下水水位的变化幅度过大时,可能对区域地下水含水层岩性、建筑物稳定性等造

成破坏,而水温的大幅度变化也会影响到自身及邻近项目的抽回灌井的运行效果,因此,选取能够表征地下水水位与水温变化幅度及影响范围的指标来评价各方案的环境效益,使优选出的方案能够尽量减小对地下水流场的影响,并能够避免各井之间回灌水水温的相互影响。同时考虑到各方案在建设期间的成本投入,应选取能够控制各方案建设成本的经济指标,以提高优选方案的实用程度以及经济效益。本文选取的环境指标包括水位降深、流场影响半径和面积、抽回灌形成的区域水头差、温度场影响半径和影响面积,经济指标包括抽回灌井的安装成本和井群占地面积土地费等。

2.3.2 模型构建

将井群抽回灌对地下水流场与温度场的影响大小作为标准构建目标函数,同时将选区的环境指标与经济指标作为目标函数的约束条件。各约束条件的取值越小,说明该方案的综合效益越大

$$\begin{cases} Z = \min I \\ I = \{ (I_1, I_2, \dots, I_6) \mid I_i \leq L_i, i = 1, 2, \dots, 6 \} \\ I_6 = C_1 + C_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中:Z 为综合影响评价指标;I 为约束条件,从 I₁ 至 I₆ 分别为水位降深、水位影响半径、水位影响面积、水温影响半径、水温影响面积和成本;L₁ 至 L₆ 分别为水位降深、影响半径、影响面积、水温影响半径、影响面积和成本的阈值。C₁ 和 C₂ 分别为井泵安装费和土地使用费。

通过构建判断矩阵计算各指标的权重,定量分析各项指标在抽回灌井群布局形式中的的重要性,同时利用极差法对各指标进行归一化处理,以避免不同量纲带来的影响。

具有积极意义的指标归一化

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij}} \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (6)$$

具有消极意义的指标归一化

$$y_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij}} \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (7)$$

式中:x_{ij} 表示判断矩阵各指标的取值;y_{ij} 表示归一化后的取值;min x_{ij}、max x_{ij} 分别表示各指标的最小和最大值。

在计算出各项指标权重的基础上,通过综合指数法对不同布局方式下井群的经济效益与环境效益进行评价,从而选出在水位、水温以及成本约

束下综合效益最大的地下水源热泵系统井群布局方案。

3 结果与讨论

3.1 基于水均衡法的地下水水位预测

通过水均衡法预测不同开采强度条件下地下水水位,主要针对不同开采强度下的地下水补、排水量进行预测。安阳市城区面积 177 km^2 ,地下水资源属于潜水-微承压水地下水系统,主要接受大气降水、灌溉回渗以及地表径流补给,同时通过蒸发、人工开采等方式进行排泄。同时由于安阳市区潜水水位较低,侧向流出带水力坡度较小,因此忽略地下水的蒸发排泄与侧向流出量,仅考虑人工开采所产生的排泄量。

选用降水入渗系数、井灌回归系数、给水度以及径流深等作为预测模型的主要水文地质参数,并通过降水量、地下水水位动态变化、包气带及含水层岩性等的实际情况来确定。按照 10% 的计算精度进行调参^[24],调参后将降水量设定为 584.1 mm ,降水入渗系数设定为 0.22,井灌回归系数设定为 0.15,给水度为 0.042,径流深 10 mm 。

研究区作为一个完整的水文地质单元,按照当地水行政管理部门针对城区地下水开采井所设定的压采目标,以 2015 年为基准年,对 2020 与 2030 年

在压采量分别为 $3\,000 \text{ 万 m}^3$ 和 $5\,000 \text{ 万 m}^3$ 的条件下对地下水补给量、排泄量以及水位的变化幅度进行预测(表 3),可以看出:当压采量为 $3\,000 \text{ 万 m}^3$ 时,地下水水位将上升 5.7 m ;当压采量增加到 $5\,000 \text{ 万 m}^3$ 时,地下水水位将上升 8.4 m 。

表 3 安阳市城区浅层地下水补给排泄量和水位变幅预测结果

Tab.3 Prediction results of groundwater recharge, discharge and water level in Anyang

均衡期	压采量/ 万 m^3	总补给量/ 万 m^3	总排泄量/ 万 m^3	预测水位变幅/ m
2020 年	3 000	10 296	6 032	5.7
2030 年	5 000	10 203	4 032	8.4

3.2 不同布局下的地下水流场与温度场变化比较

3.2.1 模型验证

利用 1、2 号现状监测孔的水位与温度监测数据对现状水位条件下的模型进行验证(图 2)。采用最大相对误差(λ_{\max})和平均相对误差(λ_{ave})对模型验证结果进行分析,水位的 λ_{\max} 为 2.6% 时 λ_{ave} 为 1.1%,水温的 λ_{\max} 为 4.1% 时 λ_{ave} 为 2.1%,说明本次模拟存在一定误差,但在允许范围之内,所以模型能够用于预测研究区域地下水流场和温度场的变化过程。

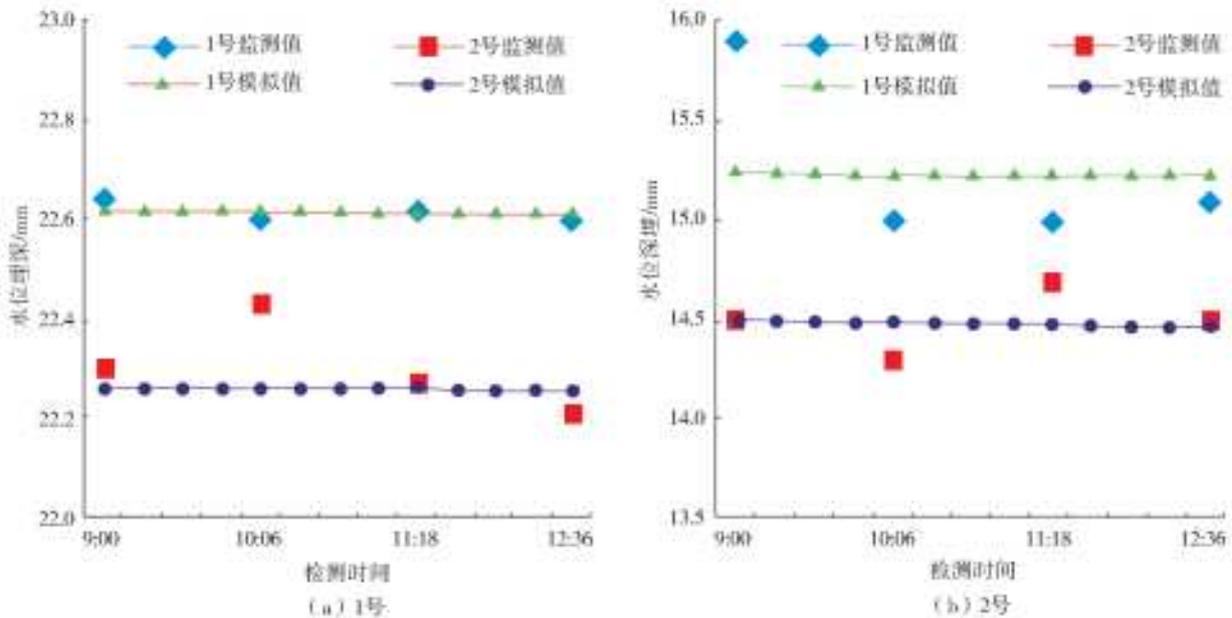


图 2 模型验证结果

Fig.2 Results of model verification

3.2.2 不同压采强度下各井群布局方案中地下水流场与温度场变化比较

现状水位条件下不同的井群布局对地下水流场和温度场造成影响模拟结果见图 3。

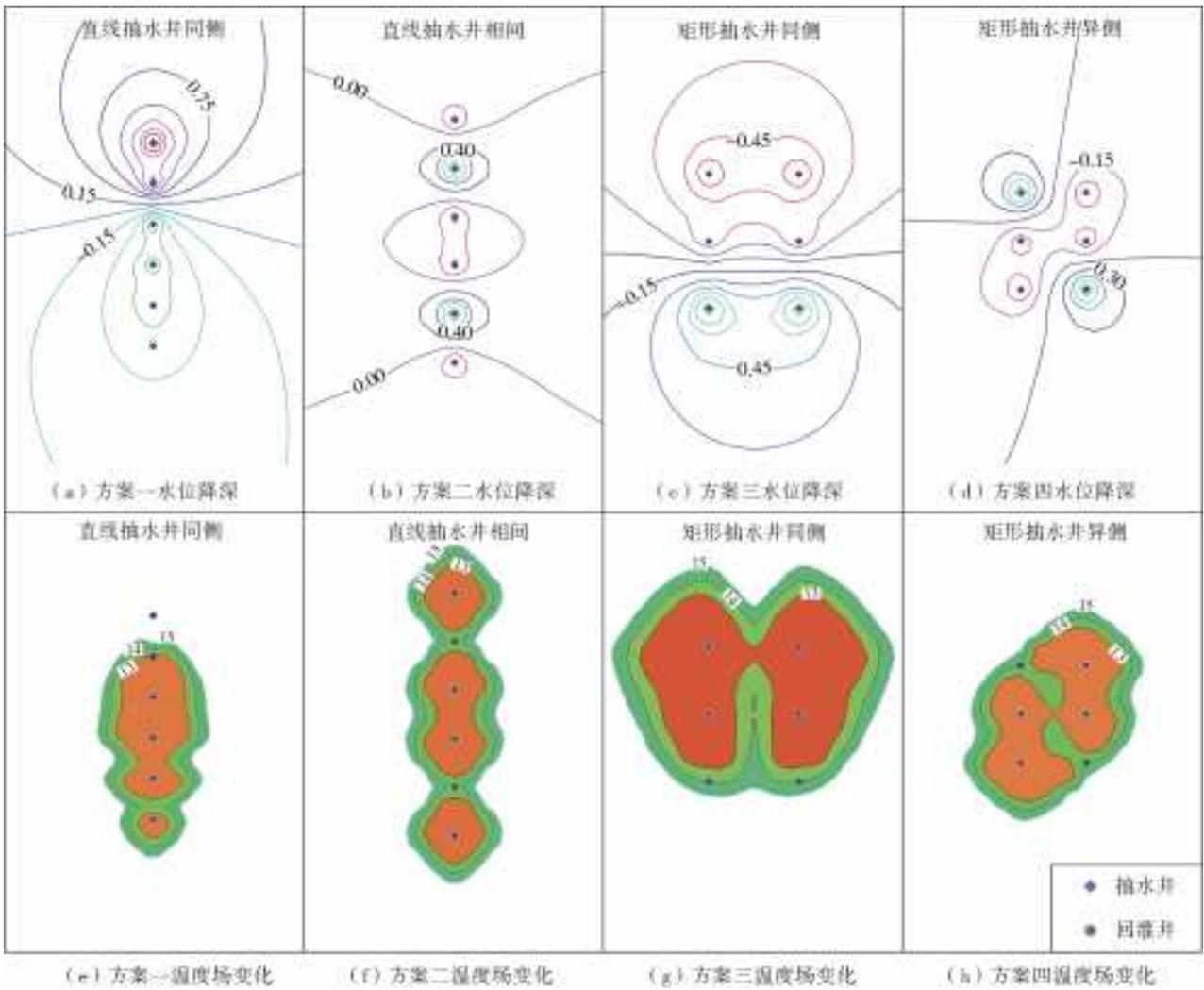


图 3 现状水位下不同井群布局方案下水位降深和温度场变化模拟结果

Fig. 3 Simulation results of water level and temperature field under current water level

由图 3 可以看出:不同布局方案对地下水流场与温度场的影响也存在明显的差别,4 种布局方案中抽水井周围水位下降最大值分别为 1.53、0.75、0.99 和 0.73 m,回灌井周围水位上升最大值分别为 1.04、0.32、0.72 和 0.46 m,抽水井和回灌井水位差分别为 2.57、1.07、1.71 和 1.19 m。考虑到水位在不同变化幅度下对地下水含水层的影响及风险水平,将抽水井周边水位降深超过 0.3 m 以及回灌井周边水位上升超过 0.3 m 的范围作为影响范围,则各方案中抽水井的影响半径分别为 70、10、50 和 10 m,回灌井的影响半径分别为 75、5、100 和 15 m。因此,抽水井相间的直线布局方案对地下水流场的影响最小。

4 种布局方式地下水温度场的模拟结果中,地下水热源泵系统运行对地下水温度场的影响范围都逐渐增大,部分回灌的低温水以回灌井为中心向四周扩散,逐渐影响到了抽水井,也发生了热贯通现象。各方案中回灌水的最大影响距离分别为 31、

22、25 和 23 m,即只有抽水井同侧的布局方式产生了热贯通现象^[25],此种情景下回灌水形成的局部冷水团容易影响到抽水井,降低了地温空调的利用效率。总体上来看,抽水井相间的直线布局方案对地下水流场与温度场的影响最小。

当地下水压采量为 3 000 万 m³ 时,地下水水位将上升 5.7 m,此时不同的井群布局对地下水流场和温度场造成影响的模拟结果见图 4。

图 4 可以看出:随着抽水井与回灌井位置的变化,地下水热泵系统影响下地下水流场模拟结果存在明显的差异。4 种井群布局方案的模拟结果中,抽水井周围水位下降明显,水位下降最大值为 1.31、0.76、0.90 和 0.67 m,回灌井周围水位明显上升,水位上升最大值分别为 1.69、0.30、0.65 和 0.42 m,抽回灌井地下水水位差分别为 3.00、1.06、1.55 和 1.09 m。由此可见,4 种井群布局方案的模拟结果中,地下水水位变化幅度最小的为抽水井相间的直线布局方案。

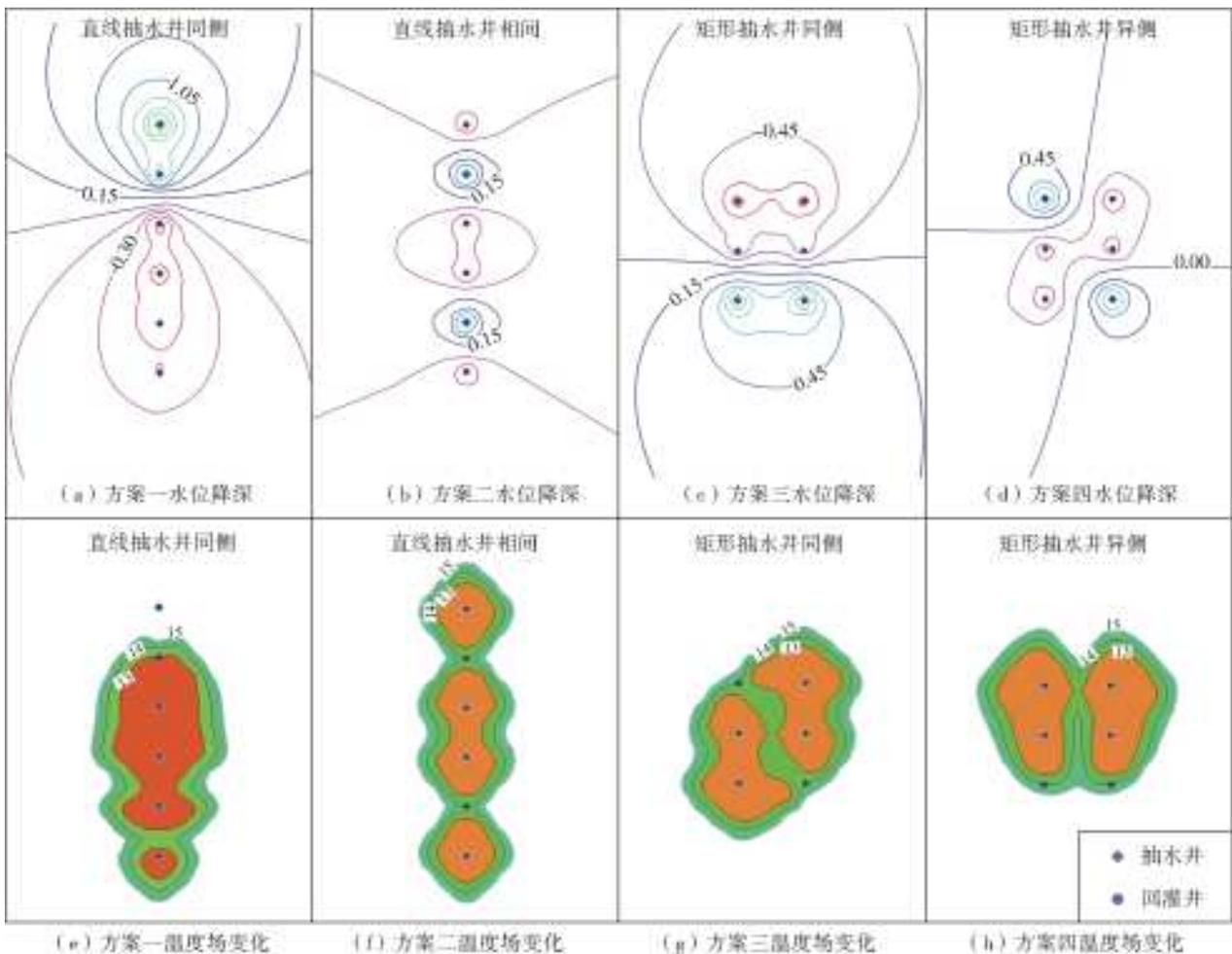


图4 水位上升5.7 m时不同井群布局方案下水位降深和温度场变化模拟结果

Fig. 4 Simulation results of water level and temperature field under water level rises by 5.7 m

从影响范围来看,各形式中抽水井周边影响半径分别为165、10、55、10 m,回灌井周边的影响半径分别为75、5、90、10 m。因此,4种井群布局形式的模拟结果中,对地下水流场影响范围最小的也是抽水井相间的直线布局形式。

模型运行120 d后,地下水源热泵系统对地下水温度场均产生了一定程度的影响。各方案中回灌水对地下水温度场影响的最大距离分别为30、17、24和22 m。抽水井同侧的直线布局方案产生了热贯通现象。总体而言,抽水井相间的直线布局方案对地下水流场温度场影响最小。

当地下水压采量增加至5 000万 m^3 时,地下水水位将上升8.4 m,4种井群布局方案模拟结果中,抽水井周围水位下降最大值分别为1.24、0.75、0.85和0.63 m,回灌井周围水位上升最大值分别为1.66、0.33、0.62和0.40 m,抽回灌井地下水水位差分别为1.90、1.07、1.48和1.03 m;各方案抽水井周边影响半径分别为65、10、47和10 m,回灌井周边的影响半径分别为35、5、80和13 m;对地下水温度场影响的最大距离分别为30、22、24和

22 m。由此可见,4种井群布局方案的模拟结果中,抽水井异侧的矩形布井方案对地下水流场与温度场影响最小。

综上所述,随着地下水压采量的不断增加,地下水水位也将随之上升。与现状水位下的模拟结果相比,水位上升5.7 m后的模拟结果并无太大变化。但是随着水位进一步上升至8.4 m时,地下水流场与温度场的模拟结果均产生了明显的变化。产生此种现象的原因可能是地下水水位的升高使含水层向上扩展,岩性的变化使得影响地下水流场与温度场的参数也随之改变,最终使模拟结果产生了明显的变化。

3.3 井群布局形式优选

井群布局形式优选就是依据不同抽回灌井群布局下地下水流场和温度场的模拟情况,将各布局下的环境与经济指标对比分析,优选出综合效益最大的布局方案,为地下水源热泵系统井群布局与调控提供理论指导。

通过分析专家针对地下水源热泵系统对地下水系统产生影响的各指标的意见,建立判断矩阵本。

对矩阵的准确性进行检验,判断矩阵具有一致性,可以用于井群调控模型,各评价指标的权重计算结果见表 4。

表 4 评价指标权重

Tab. 4 Weight of evaluation index

评价指标	权重
抽回灌井成本	0.077
土地成本	0.058
水位降深	0.173
流场影响半径	0.135
流场影响面积	0.115
水头差	0.096
温度场影响半径	0.192
温度场影响面积	0.154

在对实际情况与数值模拟结果分析的基础上,以地下水源热泵系统的可持续开发利用和运行为目标,将该井群调控模型的水位影响半径阈值确定为 40 m,水温的影响半径阈值为 30 m,水位的影响面积阈值确定为 4 000 m²,水温的影响面积阈值确定为 5 500 m²。

在评价指标权重与数值模拟结果的基础上,对不同地下水水位条件下的井群布局形式进行评价。成本约束条件按照实际情况将每口井的成井成本设定为 30 万元,项目总成本上限设定为 150 万元,土地成本按照占地面积计算。对各指标归一化处理使用综合指数法对各布井方案进行评价,见表 5。

表 5 不同水位变幅条件下的评价结果

Tab. 5 Evaluation results under different water level fluctuations

水位变幅	布局方案	经济指标			环境指标				综合指数		
		抽回灌井成本	土地成本	水位降深	流场影响半径	流场影响面积	水头差	温度场影响半径		温度场影响面积	
5.7 m	直线	同侧	0	0	0	0.246	0	0	0.450	0	0.120
		相间	0	0	0.888	1.000	1.000	1.000	0.850	1.000	0.817
	矩形	同侧	0	0.400	0.575	0	0	0.432	0.600	0.500	0.393
		异侧	0	0.400	0.779	0.984	1.000	0.919	1.000	0.583	0.776
8.4 m	直线	同侧	0	0	0	0	0	0	0.450	0	0.120
		相间	0	0	0.736	0.902	1.000	1.000	0	1.000	0.614
	矩形	同侧	0	0.400	0.576	0	0.327	0.478	0.500	0.750	0.459
		异侧	0	0.400	0.779	1.000	1.000	0.925	1.000	0.875	0.823

可以看出:水位上升 5.7 m 后,抽水井位于同侧的 2 个方案综合指数较低,分别为 0.120 与 0.393,说明抽水井位于同侧的布局方式,尤其是抽水井同侧的直线布局方式对地下水流长与温度场影响较大,无法达到模型中水位与水温的阈值要求。同时矩形布局方式在经济指标方面的表现较好,具体体现在土地利用成本整体低于直线布局方式。综合指数最高的为抽水井相间的直线布局方式,说明这种布局方式抽回灌效果最好,虽然土地利用成本较高,但在环境指标方面表现优异,对地下水流场和温度场的综合影响较小,是地下水水位下降时综合效益最大的布局方式。

水位进一步上升至 8.4 m 后,地下水源热泵系统抽回灌井群布局的综合评价结果有所变化,此时抽水井异侧的矩形布局方案综合指数最高,为 0.823。而抽水井同侧的直线布局方案综合指数依然最低,水位降深和影响范围都无法满足阈值的要求,所以综合效益最小,不利于抽回灌长期运行。

4 结 论

(1)随着南水北调中线工程投入使用,安阳市区的地下水压采量会进一步提高,按照 3 000 万 m³ 的现状压采力度进行计算,截至 2020 年安阳市区地下水位将上升 5.7 m,当压采力度加大至 5 000 万 m³,到 2030 年安阳市区地下水位将上升 8.4 m。

(2)根据水位变化条件的地下水水-热耦合模型的模拟结果,当水位上升 5.7 m 后抽水井相间的线状布局方案对地下水流场与温度场的影响最小,当水位上升 8.4 m 后抽水井异侧的矩形布局方案对地下水流场与温度场的影响最小。

(3)通过构建井群调控模型,综合考虑成本与环境效益,抽水井同侧的直线布局方案为地下水水位上升 5.7 m 时综合效益最大的井群布局方案,抽水井异侧的矩形布局方案是地下水水位上升 8.4 m 后综合效益最大的井群布局方案。

本次研究仅考虑了不同布局方式下地下水源热泵系统对地下水环境的影响,今后应加强对综合考

虑抽回灌水量变化以及间歇性抽回灌水等复杂情景的地下水环境变化研究。

参考文献:

- [1] 蔺文静,刘志明,王婉丽,等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321. DOI: CNKI; SUN; DIZI. 0. 2013-01-023.
- [2] 彭第,孙友宏,潘殿琦. 地热发电技术及其应用前景[J]. 可再生能源, 2008, 26(6): 106-110. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-5292. 2008. 06. 028.
- [3] 张国建,刘玉忠,尹红美,等. 安阳市地温空调对地下水环境影响浅析[J]. 水文地质工程地质, 2005(3): 63-66. DOI: CNKI; SUN; SWDG. 0. 2005-03-016.
- [4] HAEHNLEIN S, BAYER P, BLUM P. International legal status of the use of shallow geothermal energy [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 2611-2625. DOI: 10. 1016/j. rser. 2010. 07. 069.
- [5] 于慧明,杨泽,都基众. 水源热泵系统对地下水水质及微生物的影响[J]. 地质与资源, 2018, 27(2): 199-203, 191. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-1947. 2018. 02. 013.
- [6] 李世君,刘文臣,辛宝东. 北京地区地下水热泵利用现状及存在问题[J]. 城市地质, 2006, 1(1): 16-20. DOI: CNKI; SUN; CSDZ. 0. 2006-01-005.
- [7] 徐红霞. 池州某地下水热泵诱发裂隙岩溶水水质变异的成因[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [8] SCHNEIDER E, GARCIA-GIL A, VAZQUEZ-SUNE E, et al. Geochemical impacts of groundwater heat pump systems in an urban alluvial aquifer with evaporitic bedrock[J]. Science of the Total Environment, 2016, 544: 354-368. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2015. 11. 096.
- [9] 窦明,张彦,米庆彬,等. 地温空调井布局方式对地下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. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-6833. 2014. 05. 029.
- [10] LI S H, YANG W H, ZHANG X S. Soil temperature distribution around a U-tube heat exchanger in a multi-function ground source heat pump system[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(17-18): 3679-3686. DOI: 10. 1016/j. applthermaleng. 2009. 06. 025.
- [11] ALLY M R, MUNK J D, BAXTER V D, et al. Current performance of ground source heat pumps for space conditioning and for water heating under simulated occupancy conditions[J]. Ashrae Transactions, 2012, 118(2): 19-26.
- [12] 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. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2009. 07. 012.
- [13] DONG F, NI L, YAO Y, et al. Research on the aquifer temperature field of groundwater heat pump with pumping & recharging in the same well[C]. Second International Conference on Communication Systems. IEEE, 2010.
- [14] GARCÍA-GIL, ALEJANDRO, EPTING J, et al. A reactive transport model for the quantification of risks induced by groundwater heat pump systems in urban aquifers[J]. Journal of Hydrology, 2016, 542(10): 1016. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2016. 09. 042.
- [15] CHEN D W, CARSEL R F, MOETI L. Assessment and prediction of contaminant transport and migration at a Florida superfund site[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1999, 57(3): 291-299. DOI: 10. 1023/A: 1006046009829.
- [16] ROEDIGER, TINO, SIEBERT, et al. Numerical analysis of the groundwater regime in the western Dead Sea, Israel plus West Bank[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(2): 571-85. DOI: 10. 1007/s12665-012-1795-8.
- [17] TSANG C F, BUSCHECK T, DOUGHTY C. Aquifer thermal energy storage; a numerical simulation of auburn university field experiments[J]. Water Resource Research, 1981, 17(3): 647-658. DOI: 10. 1029/WR017i003p00647.
- [18] PAKSOY H, O., ANDERSON, ABACI S, et al. Heating and cooling of a hospital using solar energy coupled with seasonal thermal energy storage in an aquifer[J]. Renewable Energy, 2000, 19(1/2) 117-122. DOI: 10. 1016/s0960-1481(99)00060-9.
- [19] TENMA N, YASUKAWA K, ZYVOLOSKI G, et al. Model study of the thermal storage by FEHM code [J]. Geothermic, 2003, 32(4): 603-607. DOI: 10. 1016/S0375-6505(03)00073-7.
- [20] CAPOZZA A, ZARRELLA A. Simulation of the impact of aquifers on the ground temperature in ground-source heat pump operation[A]. Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association. 1322-1329.
- [21] 洪景涛,刘翔,毛晓敏. 淄博市大武水源地下水水位总体预测[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(6). DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-3665. 2002. 06. 001.
- [22] 窦明,曹亚新,米庆彬,等. 地温空调井群运行对地下水影响的实验与模型研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2017(38): 80. DOI: 10. 13705/j. issn. 1671-6833. 2017. 05. 005.
- [23] 薛禹群. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [24] 李建承,魏晓妹,邓康婕. 基于地下水均衡的灌区合理渠井用水比例[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(3): 260-266. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-8530. 14. 0112.
- [25] 倪龙,马最良. 热弥散对同井回灌地下水热泵的影响[J]. 建筑热能通风空调, 2005, 24(4): 7-10. DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-0344. 2005. 04. 002.