

基于井电双控平台的地下水流场动态监测与提取

黄霞^{1,2}, 周龙^{1,2}, 杨鹏年^{1,2}, 严晓军³, 辛博⁴, 王环波^{1,2}

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2.新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052; 3.新疆乌苏市水利局, 新疆乌苏 833000; 4.北京联创思源测控技术有限公司, 北京 100193)

摘要: [目的] 基于灌区已建成“井电双控”平台的优势, 提出利用抽水井水位来获取开采期地下水流场的动态变化, 为地下水资源的科学管理及合理利用提供技术支撑。[方法] 利用 Processing MODFLOW 软件模拟得出研究区的仿真流场, 以此作为抽水井水位确定流场的判别标准, 并对该方法下流场的拟合效果进行评价与改进。[结果] 直接使用抽水井水位得出的流场较仿真流场整体偏小; 使用抽水井降深修正后的水位得出的流场与仿真流场拟合效果较好, 但实际中需要结合模型计算; 在部分抽水井内安装水位监测设备基础上增加专用监测井, 其得到的动态流场与仿真流场接近且易于实现, 说明该方法可用于研究区流场的动态监测。[结论] 基于“井电双控”系统下, 将抽水井作为监测井的方法有效解决了因地下水监测站网密度低、信息传输时效性差等造成对地下水管理存在偏差的问题, 对加强地下水位—水量的双控管理及区域地下水资源的保护具有一定的应用价值。

关键词: 井电双控; 地下水流场; 动态变化; 监测站网

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)02-0128-07

中图分类号: P641.8

文献参数: 黄霞, 周龙, 杨鹏年, 等. 基于井电双控平台的地下水流场动态监测与提取[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 128-134. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.017; Huang Xia, Zhou Long, Yang Pengnian, et al. Dynamic monitoring and extraction of groundwater flow field based on well and electric dual control platform [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 128-134.

Dynamic Monitoring and Extraction of Groundwater Flow Field Based on Well and Electric Dual Control Platform

Huang Xia^{1,2}, Zhou Long^{1,2}, Yang Pengnian^{1,2}, Yan Xiaojun³, Xin Bo⁴, Wang Huanbo^{1,2}

(1.College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi,

Xinjiang 830052, China; 2.Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water

Disasters Prevention, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 3.Xinjiang Usu Water Conservancy Bureau, Usu, Xinjiang

833000, China; 4.Beijing Lianchuang Siyuan Measurement and Control Technology Co. Ltd., Beijing 100193, China)

Abstract: [Objective] Based on the advantages of the “well and electricity dual control” platform that has been built in the irrigation area, the dynamic changes of the groundwater flow field during the mining period were obtained by using the water level of the pumping well, in order to provide technical support for the scientific management and rational utilization of groundwater resources. [Methods] Using Processing MODFLOW software to simulate the simulated flow field in the study area, and taking it as the criterion for determining the flow field of the pumping well water level, the fitting effect of the flow field was evaluated and improved. [Results] The flow field obtained by directly using the water level of the pumping well was smaller than the simulation flow field. The flow field obtained by using the water level after the corrected drawdown of the pumping well had a good fitting effect with the simulated flow field, but it should be

收稿日期: 2020-09-27

修回日期: 2021-01-13

资助项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目“基于多源数据的规模化节水灌区定量分析水盐时空分异特征”(2020D01A54); 国家自然科学基金 NSFC-新疆联合基金项目“变化环境下干旱区湖泊流域水—生态—经济复合”(U1703341)

第一作者: 黄霞(1995—), 女(汉族), 重庆市忠县人, 硕士研究生, 研究方向为内陆干旱区农业水土资源高效利用。Email: 1105096567@qq.com。

通讯作者: 杨鹏年(1966—), 男(汉族), 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市人, 教授, 博士生导师, 主要从事于干旱区节水与地下水资源利用等研究。Email: ypn10@163.com。

calculated in combination with the model in practice. The dynamic flow field obtained was close to the simulated flow field and was easy to implement by installing water level monitoring equipment in some pumping wells and adding special monitoring wells, indicating that the method could be used for dynamic monitoring of the flow field in the study area. [Conclusion] The proposed method of using pumping wells as monitoring wells based on the “well and electricity dual control” system effectively can solve the problem of deviations in groundwater management caused by the low density of groundwater monitoring stations and poor information transmission timeliness. It has certain application value for strengthening the dual control management of groundwater level and water volume and the protection of regional groundwater resources.

Keywords: well and electricity dual control; groundwater flow field; dynamic changes; monitoring station net

地下水位是反映地下水资源量变化最直观的因素,也是地下水管理最重要的控制性指标^[1-2]。从地下水资源可持续利用角度看,对地下水位进行管理也是评价地下水可开采资源与取水总量控制的重要依据^[3]。针对目前北方灌区普遍超采现状,2020年2月水利部印发《关于开展地下水管控指标确定工作的通知》,其中就将地下水位的监测作为评价区域水资源保护和管理的一项重要指标。科学合理制定地下水控制指标和管理指标是实施双控管理的关键^[4]。谢新民等^[5]采用数值模拟方法,以地下水控制性红线水位对沈阳市水资源优化配置方案进行调控。王晓玮等^[6]利用数值模拟方法构建水位—水量指标的联系,提出了西北地区地下水水量—水位双控管理指标的综合技术方案。赵梦哲等^[7]利用控制性开采总量和地下水位变幅的关系确定出控制性关键地下水位,对灌区地下水进行管理分区。叶水根等^[8]提出在华北平原超采地区采用机井取水量定额管理的方法,通过模型预测得出该方法可有效促进地下水位的回升。以上研究主要利用数值法来获取区域一段时间内水位与水量的关系,进而确定区域地下水的控制水位或控制开采量,但此类方法未考虑区域环境因素的动态变化,在开采条件下地下水位与水量的实时监测与调控上仍有改进的空间。“井电双控”平台以准确可靠的水量计量和无线传输优势广泛应用于北方多地灌区^[9],新疆维吾尔自治区的乌苏市、沙湾县等地于2015年4月就提出采用“井电双控”方式对水资源进行管理,是国内在农业用水计量上最早实施“井电双控”的县市。“井电双控”平台能有效应对因地下水管理措施不到位等造成的私采、滥采等用水行为,有效缓解由超采引发的地面沉降等一系列生态环境问题^[10-12]。该平台是有效实现最严格水资源管理制度的重要手段^[13],也是智慧水务的基本配置,代表了今后水资源管理的方向。目前,新疆灌区的监测平台按照当前的管理需求,正着手进一步拓展平台功能,其中之一就是在机井内安装水位传感器,依托平台的无

线传输功能以获得地下水位与水量数据,实现对地下水流场的动态监测。有鉴于此,本文即以新疆乌苏市“井电双控”系统为研究对象,提出利用抽水井水位拟合区域动态流场的方法,以数值模拟的仿真流场作为检验的标准。构建水位—水量动态监测信息平台,有效解决由于地下水监测站网密度低、信息传输时效性差等^[14-15]造成对地下水管理存在偏差的问题,为地下水资源的科学管理及合理利用提供技术支撑。

1 抽水井作为监测井的研究思路与方法

1.1 研究思路

依据地下水动力学原理,监测井中的降深反映了周边机井抽水时在此井位产生降深的叠加。若将抽水井当作监测井,则相当于在周边抽水的降深基础上又叠加了其自身抽水的降深,通过分解不同的降深组成,则采用这种方式进行监测是可行的。现状的监测井出于简化问题的需要,故要求不能抽水。考虑到抽水期间不同尺度漏斗互相叠加的影响,只有布设较多的井位才能反映出流场动态。此外,注意开采期间水位的监测重点是流场总体趋势的变化,而非点状或局部的水位。因为开采期间的每个井都会形成一个漏斗,特别是当机井密度较大时,这种情况更为显著。从区域流场的监测角度来看,管理者更需要的是掌控面状漏斗的动态或流场的演变过程,局部井位的漏斗可以忽略。本文即是以此进行流场动态的监测。以新疆乌苏市的哈图布呼镇和百泉镇部分超采区为研究区。按照《地下水监测工程技术规范》^[16],超采区监测井的布设密度可达到 $1.50 \times 10^{-2} \sim 3.00 \times 10^{-2}$ 眼/ km^2 ,即使按照最大的取值来设计,本区域也只能布设5眼井,这一监测井数量可基本获取非开采期的水位,而对于开采期的动态流场,其数量上还远不足够。因此如何利用区域已有的大量抽水井来获取开采期地下水动态流场是本次研究的关键问题。

1.2 研究原理与方法

1.2.1 水头降深的叠加原理 对于 n 个井组成的群

井在工作时,任意点 P 的水头降深表达式为^[17]:

$$s(t) = s_1 + s_2 + \dots + s_n = \frac{1}{4\pi T} \left\{ Q_1 W \left[\frac{r_1^2}{4a(t-t_1)} \right] + Q_2 W \left[\frac{r_2^2}{4a(t-t_2)} \right] + \dots + Q_n W \left[\frac{r_n^2}{4a(t-t_n)} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: Q_1, Q_2, \dots, Q_n 分别是 1, 2, \dots, n 号井孔的流速(抽水时, $Q > 0$; 注水时, $Q < 0$); r_1, r_2, \dots, r_n 是 1, 2, \dots, n 号井孔至 P 点的距离; t 是计算 P 点降深的时刻; t_1, t_2, \dots, t_n 是 1, 2, \dots, n 号井孔开始工作的时刻, $(t-t_1), (t-t_2), \dots, (t-t_n)$ 均大于 0。

1.2.2 地下水数值模拟方法 利用 Processing MODFLOW 软件构建区域地下水空间三维非稳定流的数值模型,旨在真实有效的还原研究区地下水流动动态变化过程及特点^[18],从而获得模型模拟的仿真流场,其模型的数学表达式为^[19]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \frac{\epsilon}{M} = \\ \frac{S}{M} \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) \quad [(x, y, z) \in \Omega, t > 0] \\ H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z) \\ -K_x M \frac{\partial H}{\partial n} |_{(x, y, z) \in \Gamma} = -q(x, y, z, t) \\ -K_y M \frac{\partial H}{\partial n} |_{(x, y, z) \in \Gamma} = -q(x, y, z, t) \\ -K_z M \frac{\partial H}{\partial n} |_{(x, y, z) \in B} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: H 为水头值(m); K_x, K_y, K_z 为含水层 x, y, z 方向上的渗透系数(m/d); M 为含水层厚度(m); ϵ 为单位时间从单位体积含水层流入或流出的水量(m^3); S 为给水度或弹性释水系数,潜水区取重力给水度,承压区取弹性释水系数; n 为边界面的外法线方向; q 为定流量补给、排泄边界; H_0 为渗流场任意一点的水头(m); Γ 为侧边界; B 为底边界; Ω 为模拟范围。

2 实例研究

2.1 研究区概况和数据来源

研究区位于乌苏市四棵树河河谷平原区,属于冲洪积平原地带,总面积约为 170 km^2 。其地下水类型属于多层结构潜水—承压(自流)水,潜水埋深一般为 20—30 m, 50—80 m 深度以下分布着承压含水层,含水层上部为粉土、砂砾石,下部为中粗砂、砂砾石,中间夹有粉质黏土、粉土层。区内分布着 57 眼间距不等的机电井(图 1),井深度大多为 160 m,主要用于农业灌溉,多年平均开采量为 $7.85 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中 7 月为地下水用水高峰期,单井每天最大开采量可达 $4 \text{ 735 m}^3/\text{d}$,为年内水位的最低点。由 2018 年新疆乌苏市《地下水超采区治理方案》可知,该区域被划定

为严重超采区,地下水位的持续下降已经严重威胁当地生态安全,并成为地下水管理的重点区域,特选定该区域作为研究区。

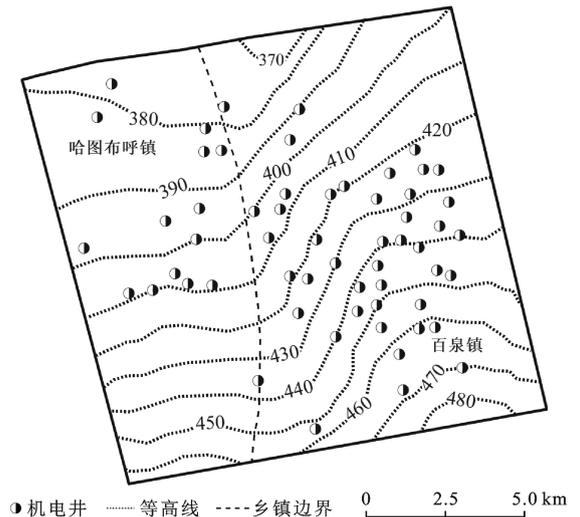


图 1 研究区井位分布示意图

本文模型涉及的水文地质参数(渗透系数、给水度等)主要通过查阅前人研究成果及野外实地调查得到;2016 年 12 月的初始流场为野外实测水位数据插值获得;2016—2018 年的机电井实际开采量则由乌苏市智慧水务中心提供;2016—2018 年降水量和蒸发量等数据来源于乌苏市气象站。

2.2 数值模拟建立

2.2.1 模型的概化 根据研究区流场特征和地层结构分析,区内为多层结构含水层,在潜水含水层下存在较为稳定的弱透水层,其下覆盖含水层承压特征明显,是当地用水主要开采层。根据区域钻孔资料,将模型在垂向上概化为 3 层,即潜水含水层、弱透水层和承压含水层,厚度分别为 50, 30 和 120 m。研究区南部接受区外地下水径流侧向补给,东西部可视为零通量边界,北部为地下水侧向流出边界。模拟区顶部边界为潜水面,该边界可与外部进行水量交换,即接受渠系及灌溉水补给、降水补给、蒸发排泄等;模拟区的下部边界为承压含水层隔水底板,由透水性较弱的泥岩组成,处理为隔水边界。

2.2.2 渗透系数及源汇项处理 研究区初始渗透系数依据前述结果进行分区赋值。潜水含水层渗透系数为 $7 \sim 12 \text{ m/d}$,承压水含水层渗透系数为 $1 \sim 4 \text{ m/d}$ 。地下水补给来源包括区外地下水侧向径流、降雨入渗、渠系渗漏、田间入渗。其中,区外侧向径流量为

$4.62 \times 10^6 \text{ m}^3$, 采用 WELL 模块导入模型; 降雨入渗、渠系渗漏、田间入渗及地下水回归入渗采用 RCH 模块以面状补给的形式赋值, 垂向总补给量为 $1.04 \times 10^7 \text{ m}^3$; 地下水排泄项包括人工开采量、侧向排泄量、潜水蒸发量和泉水及自流井流出量。其中, 区域侧向排泄量为 $3.85 \times 10^6 \text{ m}^3$, 开采量为 $8.32 \times 10^6 \text{ m}^3$, 泉水及自流井流出量为 $1.75 \times 10^6 \text{ m}^3$, 分别使用 WELL 模块导入模型。潜水蒸发量为 $1.71 \times 10^6 \text{ m}^3$, 在模型 ET 模块里输入。

2.2.3 模型识别与验证 综合考虑区域范围及水文地质条件等因素, 确定模型在平面上剖分为 156 行、168 列, 网格单元大小为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, 垂向上剖分为 3 层。利用克里金插值法对 2016 年 12 月末的实测水位进行等值线绘制, 以作为模型初始流场, 模拟期为 2017 年 1 月至 2018 年 10 月, 应力期 Δt 取 1 个月, 共计 22 个应力期, 2018 年 10 月的流场作为拟合流场。经调试计算, 2018 年 10 月的模拟流场与真实流场比较(图 2), 趋势基本一致, 且模拟流场表现出受地形地势影响特征, 其水力坡度和地形走势相近。模拟结果可反映研究区地下水水流场特征, 可用于数值分析计算。

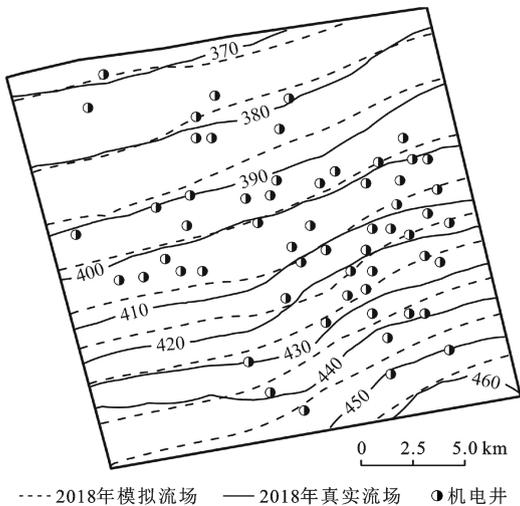


图 2 模拟流场与真实流场对比图

2.3 开采期地下水动态流场的提取

2.3.1 利用全部抽水井水位提取区域流场 利用模型分别模拟 4—7 月群井抽水以得到对应开采月份抽水井水位并进行插值, 得到各月份流场与模型模拟的仿真流场对比结果如图 3 所示。从模型模拟的水位分布来看, 开采条件下的单井周边会形成以井为中心的降落漏斗区; 而对于连片密集的群井来看, 则会形成以面状井为中心的降落漏斗区。同时其水位线也由非开采时期的平滑曲线过渡到了开采高峰期的凹

凸形状(即漏斗)。从流场的拟合情况来看, 在地下水非开采期, 抽水井附近的流场与仿真流场拟合效果较好, 其原因为此时的抽水井水位等同于专用监测井的水位; 在地下水开采期, 随着井群抽水量、时间等要素变化, 区域内流场呈现动态变化, 使用抽水井水位得出的流场与仿真流场的拟合效果逐渐变差。从抽水井水位插值流场与仿真流场的误差计算结果来看(表 1), 区域地下水平均水位的拟合绝对误差由 3 月的 0.58 m 增加至 7 月的 6.57 m, 拟合流场出现较大差异是由于抽水井水位实际上处于漏斗的最低值, 采用这一水位进行插值, 在同一流线位置处得出的水位低于实际水位, 特别是随着开采时间的推移, 这一系统偏差也更加明显。

表 1 抽水井水位插值流场与仿真流场误差计算 m

项目	3月	4月	5月	6月	7月
仿真值	407.84	407.81	407.70	407.49	407.20
拟合值	407.26	406.50	404.80	402.70	400.63
绝对误差	0.58	1.31	2.90	4.79	6.57

注: 地下水平均水位为所有网格点地下水水位的算术平均值。

2.3.2 利用抽水井修正降深后的水位提取区域流场

由于前述方法提取的水位较仿真水位偏低, 因此考虑在开采期对抽水井降深进行修正。根据地下水动力学中降深叠加原理, 修正后的抽水井降深等于群井抽水产生的降深减去此井单独抽水产生的降深, 其表达式为:

$$S_{\text{修正}} = S_{\text{群井抽水}} - S_{\text{单井抽水}} \quad (3)$$

式中: $S_{\text{群井抽水}}$ 为开采期群井抽水时在任意单井内产生的降深; $S_{\text{单井抽水}}$ 为开采期单井独立抽水产生的降深; $S_{\text{修正}}$ 为单井剔除自身抽水降深后的剩余降深, 其反映了周边机井抽水在井位处降深的叠加。上述降深均是通过数值模拟模型计算得到的, 模拟中的边界条件和初始条件均保持一致。利用模型模拟群井抽水可获得任一机井的降深, 同时模拟出任一机井单独抽水产生的降深, 两者差值即是对抽水井降深的修正, 相当于监测井上得到的降深。

利用上式分别对研究区 4—7 月的所有抽水井水位进行修正并插值, 插值后的流场与模型模拟的仿真流场对比结果如下(图 4), 图中可见利用降深修正后的水位得出的流场与仿真流场在抽水井附近拟合效果较好, 且 4—7 月各流场与仿真流场的地下水平均水位拟合绝对误差在 1 m 以内(表 2), 相比方法 1 中拟合绝对误差有很大程度的减小, 说明通过对抽水井降深修正可达到减小水位误差的目的。对于研究区抽水井分布少或没有抽水井的区域, 其拟合值与仿真值偏差仍然较大, 且在实际地下水开采条件下, 无法

一一获取每眼井单独抽水而控制其他井不抽水时的单井降深,因此不能直接对抽水井降深进行修正,故

方法 2 提出了一种减小流场拟合误差的方法,在实际应用中需结合模型计算来实现。

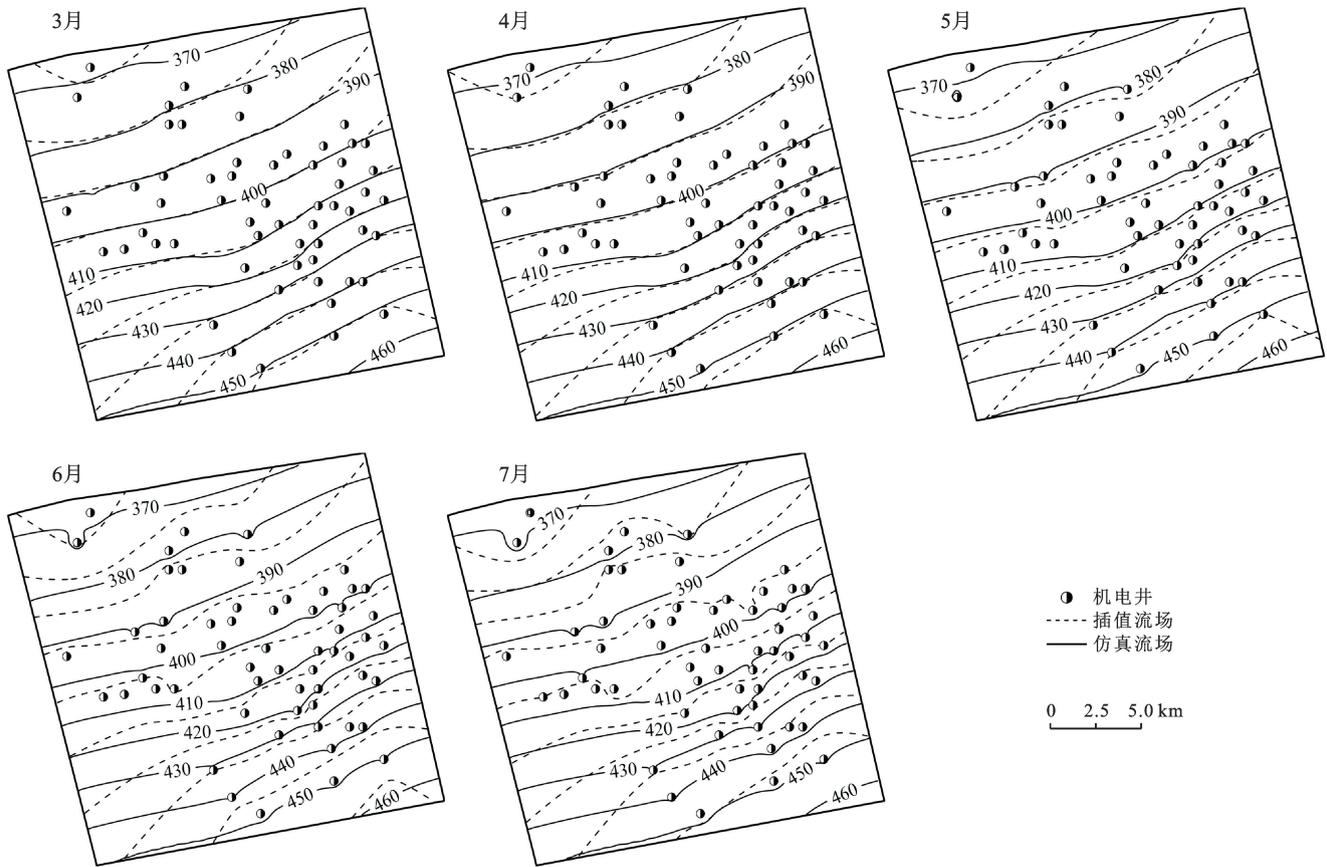


图 3 抽水井水位插值流场与仿真流场对比

表 2 修正后的抽水井水位插值流场与仿真流场误差计算

项目	4月	5月	6月	7月
仿真值	407.81	407.70	407.49	407.20
拟合值	406.95	406.80	406.70	406.53
绝对误差	0.86	0.90	0.79	0.67

2.3.3 辅助水位法提取区域流场 考虑方法 1 通过水位传感器可得到井中水位,流场数据的获取较为容易,但得出的区域流场系统性误差较大,其主要原因是在进行空间插值时没有加入井间的水位值,而这些值受抽水影响最小。理论上,潜水井抽水形成的漏斗形状为对数曲线,在井附近曲率较大,而在离开井中心一定距离后,接近于直线,因此从简化问题的角度考虑,通过井中水位和井间水位形成的直线可视为对漏斗曲线的一种概化。于是提出在方法 1 的基础上,增加井间辅助水位以便进行插值计算。井间水位值可利用部分已有专用监测井来获取,若没有合适的监测井位,则可参考非开期末时流场中的数值。

由于方法 1 是给所有的抽水井安装水位监测设

备,成本较高,不利于大面积推广使用。故方法 3 要求区域布设的水位监测设备和专用监测井的数量应尽量少且分布广^[20],并能真实反映地下水流动的动态变化。经过不断反复调试,确定在研究区共计布设 13 台水位监测设备和 5 眼监测井(图 5)。新建监测井主要分布在抽水井密度小以及无抽水井的区域,安装水位监测设备的抽水井之间存在一定的距离,且从两者布设的整体结果来看,总体分布与等高线趋势一致。

从流场的拟合结果来看,尽管开采条件下水位分布小幅偏离了初始状态,但仍保持了初期的流动趋势。除排泄边界处的流场有较大误差外,其余大部分流场拟合效果良好。对于排泄边界处产生较大水位误差是因为该处补给量小而开采量大,出现了降落漏斗多导致的。由于动态流场的监测重点是在总体趋势的变化上,因此可忽略局部的降落漏斗。从方法 3 获得的流场与仿真流场的误差计算结果来看(表 3),区域 3—7 月地下水平均水位的拟合绝对误差在 0~2 m 左右,整体误差较小,说明可通过该方法来获取区域的动态流场。

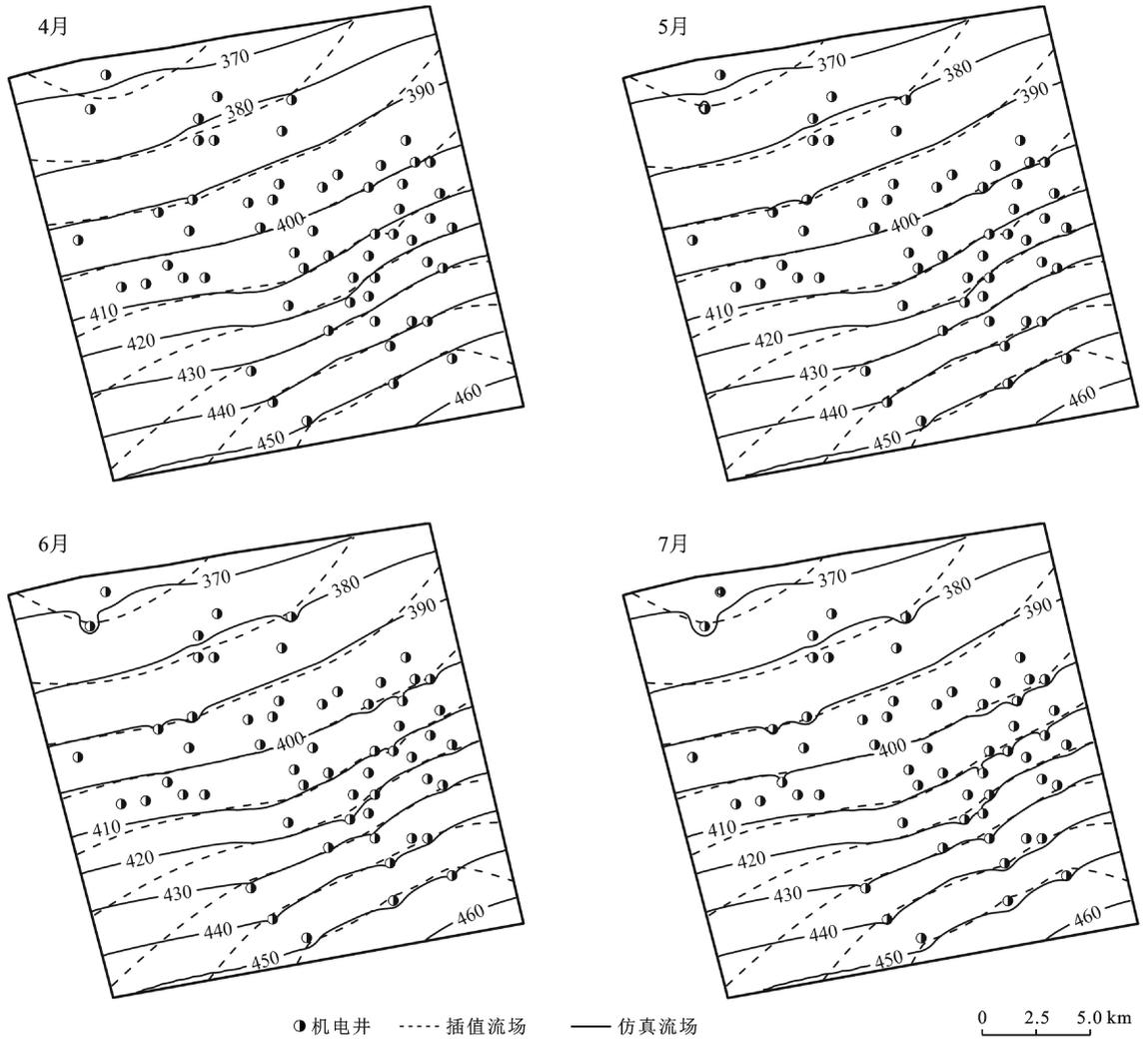


图 4 修正后的抽水井水位插值流场与仿真流场对比

表 3 辅助水位法插值流场与仿真流场误差计算 m

项目	3月	4月	5月	6月	7月
仿真值	407.84	407.81	407.70	407.49	407.20
拟合值	409.97	409.51	408.52	407.28	405.57
绝对误差	-2.13	-1.70	-0.82	0.21	1.63

3 讨论

学者屈泽伟^[21]、董殿伟^[22]、余楚^[23]、Wang 等^[24]人通过对地下水监测网的优化设计方式来提升区域地下水动态监测能力,其结果都需要新增设一定数量的监测井。与上述研究方法相比,本文重点研究了利用机电井中水位来获取开采条件下地下水水流场的动态变化,所提出的监测方法要求新建监测井的数量少,因此具有建设成本低、耗时短等优点,且通过构建开采期水位—水量动态监测平台,可对地下水进行实时管理。

由于从实际抽水井中监测到的降深还包含了井损值,因此其真实降深要大于模型中的降深值。考虑到区域内水文地质条件及过滤器的结构基本一致,因此

各井的井损值相差不大。在实际应用时,可通过抽水试验得出实际井损值后,对抽水井中降深进行修正,即可应用本方法。井损的修正会对流场进行系统性的纠偏,但对本文中所提出方法的应用并没有影响。

本文在开采期地下水监测井的布设上采用逐步试算逼近的方法,得出了监测井初步优化的布设方法,虽然这一布置的结果是在特定的地域上进行的,但由此得到的方法与思路可供同类地区借鉴。考虑到试算逼近法的工作量较大,尤其是在大型灌区的监测上难以开展。因此,如何采用数学优化的理论与方法得出优化解是后续进一步研究的一个问题。

目前灌区内建成的井电双控监测平台在数据统计、水情动态的视觉演示上发挥了重要作用,但在涉及到区域地下水动态流场、地下水降落漏斗等数据产品的推出上还有待进一步挖掘。这些数据产品的推出,不仅可为地下水的管理提供重要依据,同时也可水管部门提供决策依据,为区域地下水资源利用及调控方案的优化提供技术支撑。

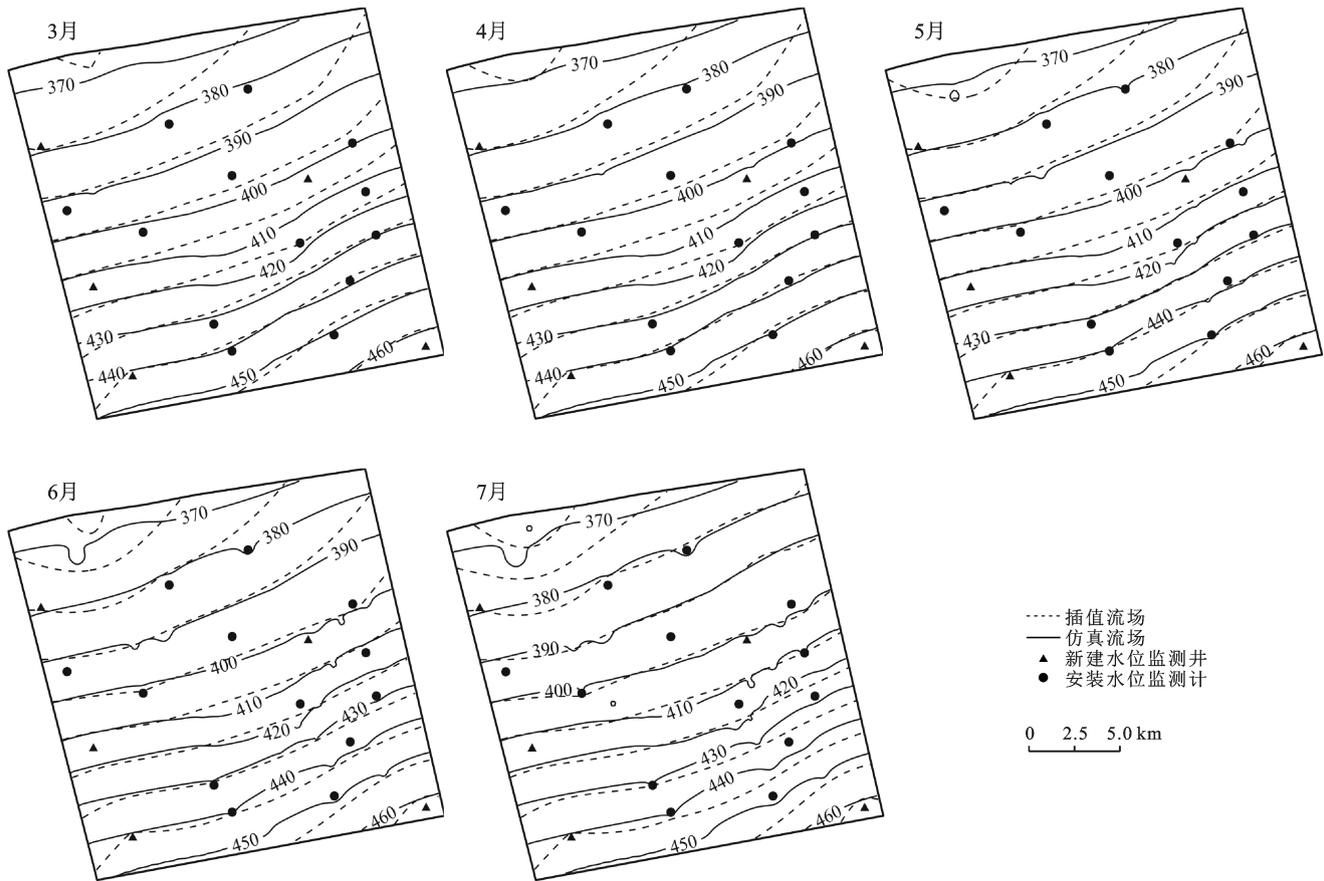


图 5 辅助水位法插值流场与仿真流场对比

4 结论

(1) 直接利用抽水井水位得出的流场与模拟的仿真流场的拟合效果在地下水非开采期和开采前期表现较好,随着开采后期抽水量持续增加,整体水位误差逐渐变大。

(2) 利用修正后的抽水井水位得出的动态流场与仿真流场在抽水井附近区域拟合效果良好,但对于抽水井分布少或没有抽水井的区域,水位误差仍然较大,且在实际开采条件下无法直接对抽水井降深进行修正。

(3) 通过采取对现有抽水井的监测和增加专用监测井相结合的方式,得到的逐月流场与仿真流场的拟合效果良好,趋势一致,可用于开采期地下水动态流场监测。

(4) 研究中得出了动态水位监测井的布设原则:①水位监测点可按照机井的分布密度确定。在机井分布密度的高、中、低处均应设置水位传感器,以监测水位的峰谷值;②专用监测井应尽量布设在井间中心位置,其代表了水位的峰值;③考虑区域等水位线分布及地下水流系统特征,应适当加大监测的水位梯度以减少布井的数量。

[参 考 文 献]

- [1] 方樟,谢新民,马喆,等.河南省安阳市平原区地下水控制性管理水位研究[J].水利学报,2014,45(10):1205-1213.
- [2] 陈文芳.中国典型地区地下水控制管理研究[D].北京:中国地质大学,2010.
- [3] 邢俊生.井灌区控制性特征地下水水位评价[D].黑龙江哈尔滨:黑龙江大学,2014.
- [4] 王晓玮.我国西北超采区地下水水量—水位双控指标确定研究[D].北京:中国地质大学,2017.
- [5] 谢新民,李丽琴,周翔南,等.基于地下水“双控”的水资源配置模型与实例应用[J].水资源保护,2019,35(5):6-12.
- [6] 王晓玮,邵景力,王卓然,等.西北地区地下水水量—水位双控指标确定研究:以民勤盆地为例[J].水文地质工程地质,2020,47(2):17-24.
- [7] 赵孟哲,魏晓妹,降亚楠,等.渠井结合灌区控制性关键地下水水位及其管理策略研究[J].节水灌溉,2015(7):95-98.
- [8] 叶水根,叶皓研,张成龙,等.井灌区机井取水量定额管理下的地下水动态模拟[J].中国农业大学学报,2018,23(11):152-160.
- [9] 郑寓,吴剑,李青.水量计量技术标准体系框架结构初探[C]//中国水利学会 2013 学术年会论文集(S1):水资源与水生态.中国水利学会,2013.

- [4] 俞孔坚.生物保护的景观生态安全格局[J].生态学报, 1999,19(1):3-5.
- [5] Forman R. Land Mosaics: The ecology of the landscapes and regions [J]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [6] 梁鑫源,金晓斌,朱凤武,等.长江中下游平原区生态保护红线的划定:以江苏省为例[J].生态学报,2020,40(17):5968-5979.
- [7] 冯琰玮,甄江红,马晨阳.干旱区城市生态安全格局优化研究:以内蒙古呼和浩特市为例[J].水土保持研究,2020,27(4):336-341.
- [8] 杨亮洁,王晶,魏伟,等.干旱内陆河流域生态安全格局的构建及优化:以石羊河流域为例[J].生态学报,2020,40(17):5915-5927.
- [9] 朱凤武,金志丰,沈春竹,等.县域土地生态空间管控红线划定的方法研究:以江苏省金坛区为例[J].中国土地科学,2017,31(11):25-31.
- [10] 孙洁,王强民,刘基.鄂尔多斯高原西部潜在蒸散发量变化规律研究:以鄂托克旗为例[J].灌溉排水学报,2018,37(11):84-90.
- [11] 韩世豪,梅艳国,叶持跃,等.基于最小累积阻力模型的福建省南平市延平区生态安全格局构建[J].水土保持通报,2019,39(2):192-198,205.
- [12] 苏溥雅,齐实,梁斌,等.西北五省生态敏感性分析[J].甘肃农业大学学报,2019,54(2):171-179.
- [13] 赵俊杰.国家环保总局发布《生态功能区划暂行规程》[J].中国经贸导刊,2002(19):41.
- [14] 牛强.城市规划 GIS 技术应用指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [15] 杨姗姗,邹长新,沈渭寿,等.基于生态红线划分的生态安全格局构建:以江西省为例[J].生态学杂志,2016,35(1):250-258.
- [16] 陈志芬.面向贵州省南部新城规划的生态敏感性评价[J].生态科学,2017,36(2):113-118.
- [17] 谢高地,张钰铨,鲁春霞,等.中国自然草地生态系统服务价值[J].自然资源学报,2001,16(1):47-53.
- [18] 李晓赛.县域尺度生态系统服务价值动态评估研究[D].河北保定:河北农业大学,2015.
- [19] 潘竟虎,刘晓.疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建[J].生态学杂志,2016,35(3):791-799.
- [20] 古璠,黄义雄,陈传明,等.福建省自然保护区生态网络的构建与优化[J].应用生态学报,2017,28(3):1013-1020.
- [21] 史娜娜,韩煜,王琦,等.青海省保护地生态网络构建与优化[J].生态学杂志,2018,37(6):1910-1916.
- [22] 甘琳,陈颖彪,吴志峰,等.近 20 年粤港澳大湾区生态敏感性变化[J].生态学杂志,2018,37(8):2453-2462.
- [23] 吴海珍,阿如早,郭田保,等.基于 RS 和 GIS 的内蒙古多伦县土地利用变化对生态服务价值的影响[J].地理科学,2011,31(1):110-116.
- [24] 杜世勋,荣月静.山西省生态安全格局空间识别研究[J].水土保持研究,2017,24(6):147-153,2.

(上接第 134 页)

- [10] Neville J C, Hancock P J, Murray B P, et al. Groundwater-dependent ecosystems and the dangers of groundwater overdraft: A review and an Australian perspective [J]. Pacific Conservation Biology, 2010,16(3):187-208.
- [11] 狄胜同,贾超,张少鹏,等.华北平原鲁北地区地下水超采导致地面沉降区域特征及演化趋势预测[J].地质学报,2020,94(5):1638-1654.
- [12] 黄金廷,崔旭东,王冬,等.格尔木河流域地下水生态功能及经济损益阈值解析[J].干旱区地理,2019,42(2):263-270.
- [13] 魏钦罗.浅析井电双控管理地下水资源[J].陕西水利,2020(4):122-123.
- [14] 李芸,李宝芬,杨秋萍.滇中地区地下水监测站网分析[J].水文,2017,37(5):79-83.
- [15] 徐东斌.浅析乌鲁木齐市国家地下水监测井网建设[J].新疆水利,2017(4):14-17.
- [16] 中华人民共和国水利部.GB/T 51040-2014 地下水监测工程技术规范[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [17] 陈崇希,林敏.地下水动力学[M].北京:地质出版社,2011.
- [18] Song Yanxun, Yuan Fang, Hui Qian, et al. Research and application of groundwater numerical simulation: A case study in Balasu water source [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011(8):146-152.
- [19] Katpatal Y B, Pophare A M, Lamsoge B R. A groundwater flow model for overexploited basaltic aquifer and Bazada formation in India [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(11):4413-4425.
- [20] 罗建男,李多强,范越,等.某垃圾填埋场地下水水质监测井网优化设计:基于模拟优化法[J].中国环境科学,2019,39(1):196-202.
- [21] 屈泽伟,张翼龙,王贵玲,等.内蒙古呼和浩特市承压地下水水位监测网优化[J].地球学报,2013,34(2):223-228.
- [22] 董殿伟,林沛,晏婴,等.北京平原地下水水位监测网优化[J].水文地质工程地质,2007,34(1):10-19.
- [23] 余楚,张翼龙,孟瑞芳,等.河套平原浅层地下水动态监测网优化设计[J].吉林大学学报(地球科学版),2015,45(4):1173-1179.
- [24] Wang X Y, Cui X D, Ma H Y, et al. The optimization of groundwater dynamic monitoring network: An example of the North Ordos basin [J]. Advanced Materials Research, 2012, 518/523:4057-4061.