

区域地质结构模型构建与地下水水流场规律分析

卜宪龙¹, 王春晖², 秦升强³, 兰凌宇³, 刘毅⁴, 李嘉龙^{4,5}, 王绍娟⁶, 王龙¹, 董田霖³, 狄胜同^{1*}

(1. 临沂大学土木工程与建筑学院, 山东 临沂 276000; 2. 青岛市环境工程评估中心, 山东 青岛 253072; 3. 青岛地质工程勘察院(青岛地质勘查开发局), 山东 青岛 266101; 4. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东 德州 253072; 5. 济南大学水利与环境学院, 山东 济南 250022; 6. 临沂市市政工程建设管理服务中心, 山东 临沂 276037)

摘要:随着经济社会的快速发展,我国地下水开发利用量持续快速增长,超采地下水造成的水位下降、地面沉降等问题逐渐突显,揭示地下水水流场变化规律对地下水开采方案的制定具有重要理论指导意义。因此,本文以青岛平度市为研究背景,统筹考虑区域性地形地貌、地质结构、地质单元特征等要素,建立研究区地下水水流场数值模型,并开展不同地下水开采方案下的地下水水流场动态演化趋势预测分析。结果表明:以 2022 年为现状条件开采地下水,10 年后水位将下降 5 m 左右。随着开采强度的降低,水位下降的速度逐渐减小,当开采量减少 30% 的条件下,10 年后水位下降 2.8 m 左右。

关键词:趋势预测;数值模型;地下水;流-固耦合

中图分类号:P642

文献标识码:A

doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2024.08.005

引文格式:卜宪龙,王春晖,秦升强,等.区域地质结构模型构建与地下水水流场规律分析[J].山东国土资源,2024,40(8):29-36.BU Xianlong, WANG Chunhui, QIN Shengqiang, et al. Construction of Regional Geological Structure Model and Analysis on Groundwater Flow Field[J]. Shandong Land and Resources, 2024, 40(8): 29-36.

0 引言

地下水是人类生存和发展的重要资源之一^[1],蕴藏量巨大,分布广泛,稳定可靠,在农业、工业、生活、环境等诸多领域广泛应用。然而,近年来,地下水过量开采导致的次生危害问题日益严重^[2-3]。因此,合理开发利用地下水资源成为当前最紧迫的任务之一。国内外专家学者围绕该问题进行了一系列深入研究,提出了与之相适应的模拟计算方法。国外学者 MiaCeccatelli 等^[4]采用综合建模方法,建立了 Pistoia 含水层水文地质模型。朱居妍等^[5]利用 ProcessingModflow 建立的瞬态地下水数值模型,对研究区进行了校正,并对其进行了科学论证。设计了 4 种地下水开采方案,模拟预测未来 50 年地下

水流场的不同方案。伊朗学者 Masoud Mahmoud-pour 等^[6]利用 PMWIN 模拟地下水位,验证、分析、预测未来趋势,通过数值模拟,得出 2004 年底的地下水位,利用野外实测和观测井 Insar 数据验证其结果。田月峰^[7]建立了区域相关的数值模型,预测本研究区在不同关井或限采措施下,在现况开采条件下,未来 15 年内该区域地下水位的变化。惠翔等^[8]基于地下水渗流理论和太沙基一维固结理论,建立了三维地下水水流的水土耦合数值模拟模型,进行区域地下水水流场演化趋势预测。李贵仁等^[9]构建了研究区地下水三维空间流场模型,提出了“海绵体”型和“蘑菇”型地下水系统理论,明确了地下水系统的运动规律。亓协全等^[10]以 Visual Modflow 三维有限差分地下水流动模型为基础,数值模拟深部地下水降落漏斗发育,得出地下水水流场时空动态分

收稿日期:2024-04-18; 修订日期:2024-05-08; 编辑:曹丽丽

基金项目:本文为临沂大学大学生创新创业训练计划项目(编号:202310452182)资助成果

作者简介:卜宪龙(2002—),男,山东日照人,本科生,主要从事土木工程、工程地质等方面的学习和科研工作;E-mail:2735381326@qq.com

* 通讯作者:狄胜同(1990—),男,山东临沂人,硕士生导师,主要从事土木工程、水工环地质等教学与科研工作;E-mail:dishengtong@163.com

布规律。刘苏哲等^[11]对滨州地下水系统水位地质概念模型进行了概化,建立了区域立体地质结构模型,通过模型系统预测了地下水水流场时空动态分布规律。宋昀等^[12]以构建研究区水文地质概念模型为基础,以修正后的地下水水流数值模型为依据,对地下水水流场演化进行预测。熊小锋等^[13]利用 TOUGH2-Flac3D 建立的三维模型,模拟计算大区域含水层位移变化和抽水条件下参数动态变化特征。盛登宝等^[14]以多孔弹性物理场接口(多物理场耦合分析软件 Comsol Multiphysics 中)建立流固耦合模型。精确反映含水层水头、土体孔隙水压力分布。李锋等^[15]分析研究区水文地质条件,概化为 3 个含水层组、3 个弱透水层组,建立相应的地下水水流数学模型,应用 MODFlow 软件模拟地下水水流。马建花等^[16]利用 Visual Mod Flow 软件,深度分析研究了地下水水流,认为具有较强的水文地质条件。根据不同灌溉量条件下地下水水位分布情况进行黑台地下水数值模拟,得出未来 5A 地下水流场演化过程。张路等^[17]根据研究区域地下水特征建立 2D 地下水数值模型,对地下水流量进行综合研究,分析区域水文地质资料、模型参数敏感性。预测在逐步扩大地下水开采条件下未来研究区的地下水水流场。韩雪等^[18]利用 Processing Mod flow 软件设置两种不同的布井方式,利用相关数学模型模拟地下水的数值,获得地下水水流场拟合结果。姚铮等^[19]建立了胶西北地区三维地质模型,直观、清楚地反映出了该地区地层厚度及变化趋势。

上述研究成果表明,建立地下水水流场数值模型并开展模拟计算是一种预测地下水水流场发展演化趋势的重要方法,可为合理开采地下水提供有利的参考依据,模型构建的准确性直接决定趋势预测的精度。

为此,本文以青岛平度市地层结构为研究背景,建立区域地质结构模型,开展不同地下水开采条件下地下水水流场动态演化规律预测分析,以期为地下水开采方案提供理论参考。

1 研究区地质背景

平度市位于山东省东部,青岛市西侧,东临莱西市,南接胶州市,西靠潍坊市,北毗莱州市。地势自北向南逐渐倾斜,属于胶东丘陵的一部分。北部多为海拔 200~500 m 的低山丘陵,南部为平原地带,

地势相对平坦。主要河流有胶莱河、大沽河、小沽河等,全市总面积约 3 176.7 km²。

1.1 地质条件

平度市地层条件较为复杂,包括沉积岩、火成岩和变质岩。沉积岩包括侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系等。沉积岩层蕴藏着煤、油、气等丰富的矿产资源。火成岩在平度市也有分布,主要为侵入岩,如花岗岩和闪长岩。主要分布在北部山区,地势险要,岩体坚硬。变质岩在平度市的分布较少,主要分布在部分地区的地下深处,在高温高压条件下岩石的结构、矿物成分、性质等发生了变化。总的来说,平度市地层条件较为复杂,多种岩类交错分布,为该地区的矿产资源开发、水资源利用和工程建设等提供了不同的条件。

受环太平洋地质构造域和青藏高原地质构造域的影响,该区地质构造复杂,主要表现为以褶皱断层结构为主的地质结构。由于地壳运动,平度市发生了多次强烈的褶皱和断层活动,形成了一系列走向各异的褶皱和断裂带。这些构造活动导致了地层的重复和缺失,以及岩石变形和破坏,对平度市的矿产分布、水资源和工程建设等产生了重要影响。

火山岩分布也是平度市地质构造的另一个重要特征。位于环太平洋火山带上的平度市历史上曾多次发生火山活动。这些火山活动形成了以玄武岩、安山岩、流纹岩等为主的大量火山岩。火山岩的分布对于平度市的矿产资源、地形地貌和土壤类型等方面具有重要意义。

1.2 水文地质条件

研究区域的地下水特征主要受地质条件、水文地质条件和地下水补给量的影响,也受径流和下泄条件的影响。

平度市属于胶东丘陵的一部分,地势自北向南逐渐倾斜。北部多为低山、丘陵,地势较为平坦,南部为平原地带。全市主要含水层为松岩类孔隙含水层和第四系基岩裂隙含水层,地表水资源丰富,有大小河流、水库湖泊等水源。这些地表水通过渗漏、渗透等方式补给地下水,使得地下水水位得以保持并形成丰富的地下水资源。

地下水补给、径流和下泄条件等也是影响平度市水文地质特征的因素。平度市的地下水补给包括大气降水补给、地表渗水补给、地下水越流补给。地

下水径流方向受地形地貌、地层结构、地下水水位等因素的影响,总体呈南北流向。主要是通过地下水的蒸发、人为活动和径流等方式将地下水排出。

平度市地下水特点受地质条件、水文地质条件和地下水补给、径流和下泄条件等多种因素影响,具有水资源丰富、水质优良、水位稳定等特点,为全市生产、生活和生态可持续发展提供了良好的水资源保障。

2 地下水流场模型

2.1 模型建立

充分收集并分析研究区域内工程地质、水文地质、气象水文、钻孔、水资源等基础资料,建立研究区地下水三维非稳定流数值模型。

2.1.1 模型基本理论

采用 GMS 地下水模拟软件,对研究区地下水渗流进行模拟,以水文地质模型的基础建立相应的数学模型,用方程表示如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z}) + W = \mu, \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z, t), (x, y, z) \in D \\ K \frac{\partial H}{\partial n} |_{S_2} = q_1(x, y, z, t), (x, y, z) \in S_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $H_0(x, y, z, t)$ 为渗流模型的初始条件, $q_1(x, y, z, t)$ 为渗流模型的边界条件, W 为源汇项, 如雨水、蒸发等, 以渗流模型的边界条件为界, 其余各符号含义与基础概念介绍部分相同。

2.1.2 水文地质概念模型

按水文地质工程地质性质相近合并的原则对数值模型的地层结构进行整合, 数值模型概化为 4 层。第一层为表土层, 主要岩性为粉质黏土, 底板埋深 $-14.52 \text{ m} \sim 51.59 \text{ m}$; 第二层为第一含水层, 主要岩性为中细砂、中粗砂, 夹杂粗砂和砂砾, 底板埋深 $-18.3 \text{ m} \sim 45.69 \text{ m}$; 第三层为第一弱透水层, 主要岩性为粉质黏土夹杂黏土, 底板埋深 $-16.8 \text{ m} \sim 45.69 \text{ m}$; 第四层为第二含水层, 主要岩性为中粗砂, 底板埋深 $-14.8 \text{ m} \sim 49.19 \text{ m}$ 。

2.1.3 边界条件确定

将侧向边界与研究区边界的水文地质条件、各观测井的地下水观测资料结合起来, 通过水流分析,

将其概化为河流分界线和固定流量。

垂向边界上部主要补给来源为大气降水和河流侧渗, 大气蒸发和不断变化的水量交换边界为排泄方式, 上部为流量边界; 粉质黏土与黏土作为底部隔水边界, 主要构成下部边界。

2.1.4 模型网格剖分

基于研究区水文地质概念模型, 以 GMS 的 MAP 模块、MODFLOW 概念建模法, 建立研究区含水层地下水非稳定流数值模型。模型共剖分为 16 万个单元, 通过对研究区各种地形地质特征和水文条件、模型边界条件的研究, 网格满足计算精度。

2.2 模型识别与验证

水文地质参数包括降水入渗系数、给水度、渗透系数等。以地层岩性为依据, 对降雨入渗系数进行分区赋值。渗透系数、给水度的选取参考研究区水文地质资料中的抽水试验数据和地层岩性特征以及《山东省地下水水资源评价》。

源汇项既包括自然因素, 也包括人类活动对地下水产生的补给与排泄作用。共包括大气降水、地下水补给与排泄、大气蒸发、河道排泄、农田灌溉、地下水开采等几个方面。

从地下水稳态流场及地下水水位动态两个方面, 采用试估-校正法对模型进行识别与验证。通过计算流场与初始流场进行对比分析可知, 计算水流的流向与实测无明显水流方向差异, 可以判定研究区边界条件是合理的。

同时选取位于研究区内 4 口地下水位监测资料与数值模型计算结果进行对比, 结果表明拟合计算期间内水位变化值约为 14 m, 因此最大允许误差应小于 1.4 m, 本次计算最大差值为 0.917 m, 小于 1.4 m, 符合规范要求, 且计算结果可以反映监测水位的变化趋势, 拟合效果较好。

2.3 地下水流场动态分布规律

基于上述识别与验证后的地下水流场模型, 选取 2017 年 4 月—2022 年 7 月为研究区域模拟期, 研究研究区含水层地下水流场的动态变化规律。根据研究区地质环境监测年报, 将 2017 年 4 月份水位分布作为初始条件, 确定数值模型初始条件如图 1 所示。

研究区地下水枯水期与丰水期分别在 2018 年和 2019 年的分布如图 2、图 3 所示。

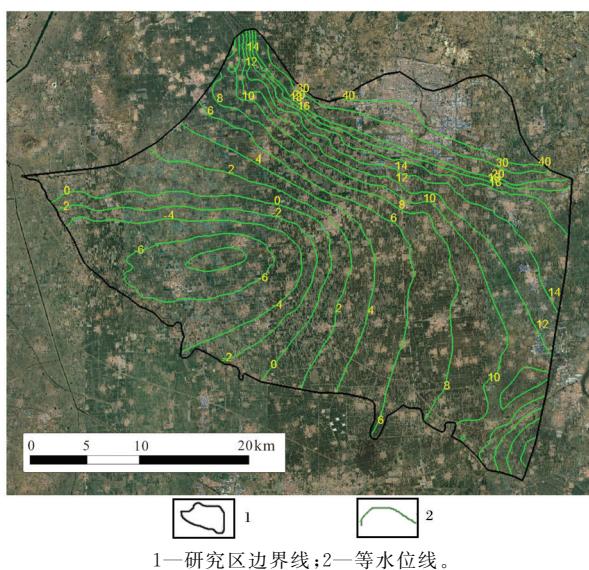


图 1 研究区含水层初始流场图

研究表明,地下水在两年丰水期受降雨降水、蒸发排泄和人为灌溉等因素影响,水位较枯水期偏高,但总体平稳。

受地质特征及人为活动等因素的控制,研究区的总趋势基本与地形保持一致,是由北部流向南部。地下水同样会流向由于地下水开采较集中而导致水位较低的崔家集镇附近(图 4)。地下水水流速较大的区域为山前,其次是因地下水汇聚而形成的漏斗处,

其余地区流速较低,水位变化也较小。

3 地下水流场演化趋势预测分析

为了综合研究地下水开采对研究区地下水流场时空分布规律的影响,设置了不同的地下水开采工况开采量,然后对地下水流场分布规律在不同工况下的差异进行比较。基于修正后的地下水三维数值模型,开展地下水开采条件下过去两年以及未来 8 年(2022—2032 年)地下水流场演化趋势预测分析。以研究区地下水资源现状开采现状为基础,预测了地下水流场在不同减采情况下的特征。

3.1 现状开采条件下地下水流场动态演化规律

由于北赵家村、崔家集镇、大纪家村等地地下水持续开采,导致地下水位不断下降,在现有开采条件下,地下水流场在 2022 年、2032 年的变化如图 5 所示,地下水位下降速度每年 0.5 m 左右。如果保持现状地下水开采条件,到 2032 年时,北赵家村附近的漏斗就会与周边村落的地下水连成一片,演化形为一个大型地下水降落漏斗。此时,地下水降落漏斗超过-8 m 水位的面积从 2022 年的 7.60 km² 扩大到 2032 年 45.47 km²,面积将增大近 40 km²。

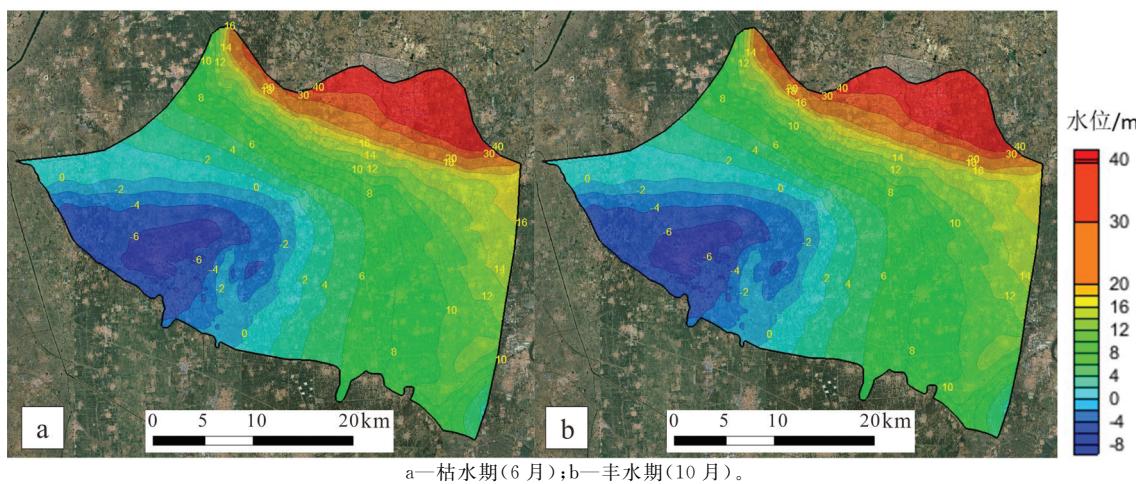
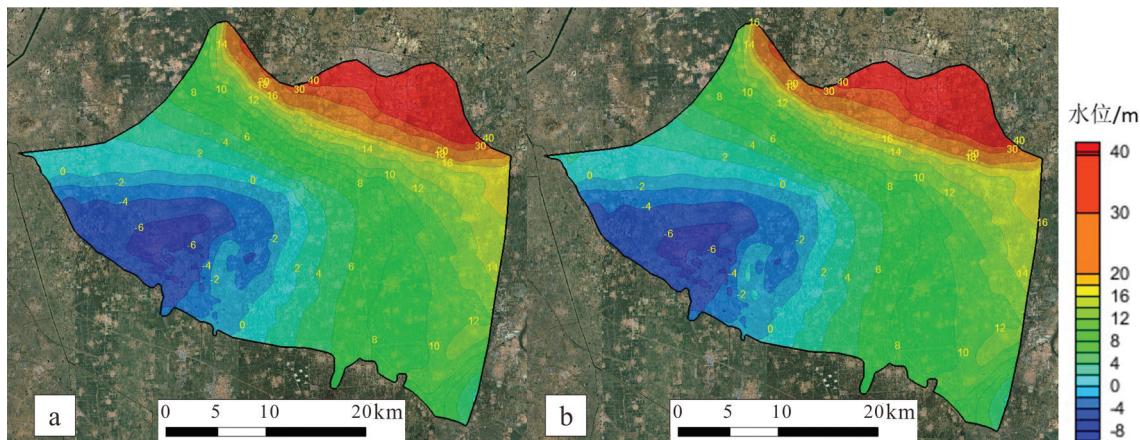


图 2 2018 年枯、丰水期地下水流场分布图

3.2 减少开采条件下地下水流场动态演化规律

在现有地下水开采条件的基础上,对地下水流场动态分布在地下水不同减采条件下的规律进行分析,减少开采 10% 和 30% (分别对应工况一和工况二)。地下水流场在工况一条件下的变化情况如图

6 所示,在工况一开采条件下,地下水位仍一直下降,地下水位的下降速率年均在 0.43 m 左右。到 2032 年,北赵家村附近的漏斗仍会与周边村落的地下水连成一片,变为大型地下水降落漏斗。-8 m 水位的降落漏斗面积从 2022 年的 7.60 km² 扩大到 2032 年 42.82 km²,与现状条件下保持开采的漏斗



a—枯水期(6月);b—丰水期(10月)。
图3 2019年枯、丰水期地下水水流场分布图

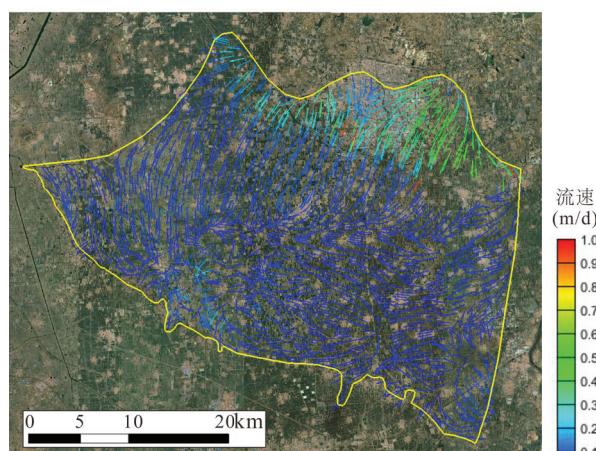
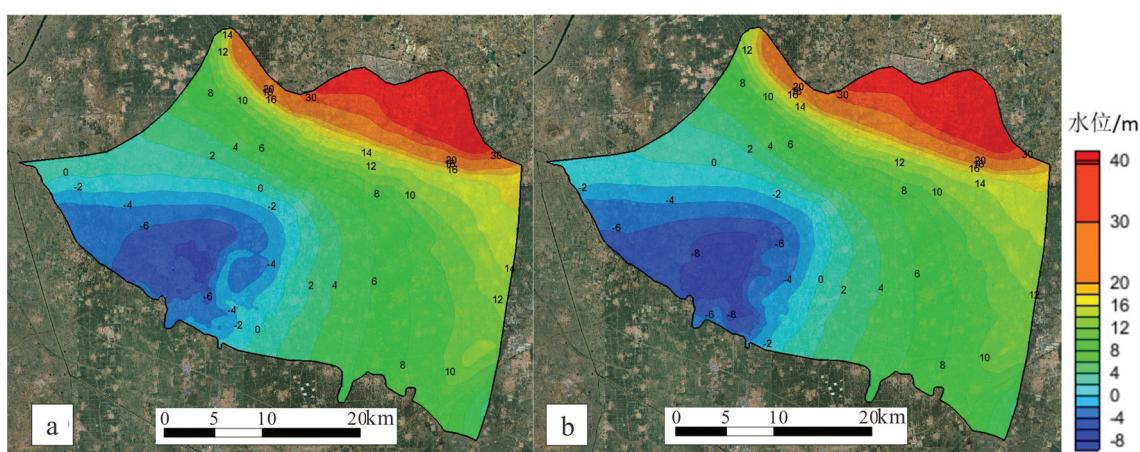


图4 地下水流向及流速示意图

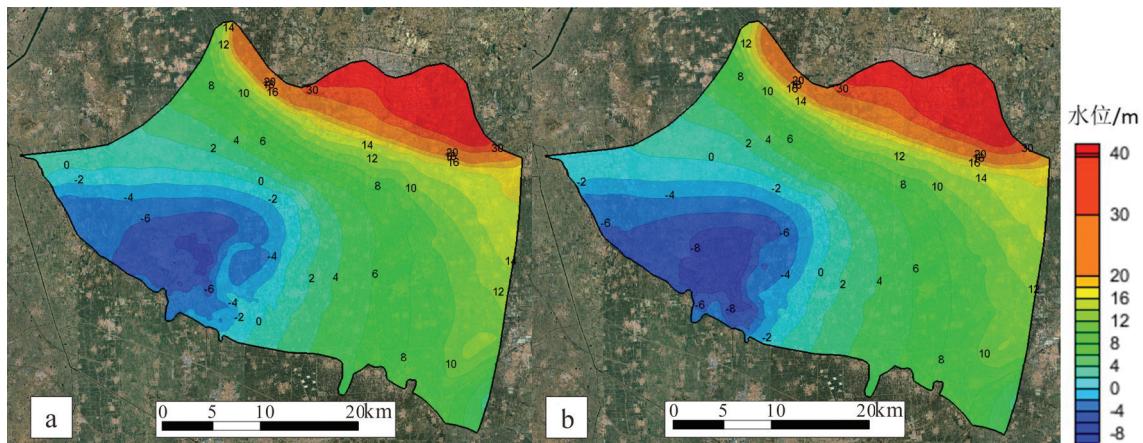
区面积对比减少了 2.65 km^2 。

地下水水流场在工况二条件下的变化情况如图7所示,在工况二开采条件下,地下水位的下降速率年均在0.29 m左右。-8 m的降落漏斗面积从2022年的 7.60 km^2 扩大到2032年 38.64 km^2 ,与现状条件下保持开采的漏斗区面积对比减少了 6.83 km^2 。

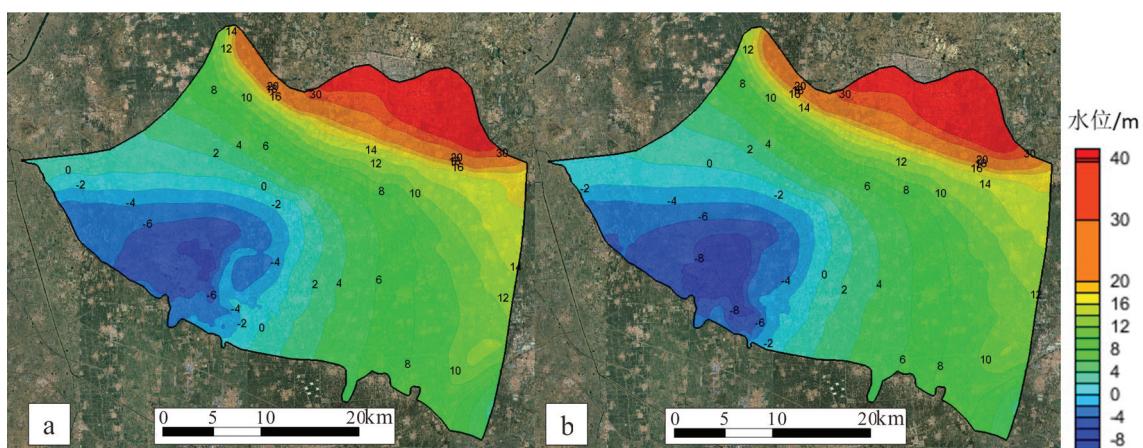
近年来,经济的高速发展使得人们对地下水的开采量越来越大,一些大城市最为严重,地下水排泄中人工开采的占比不断变大,结合相关调查,通过数值模拟,发现崔家集镇地下水的埋深呈现漏斗状,均相对较大,则地下水开采量在该区相对较大。而明显较低的是在大沟头村、大杜家村及袁家村附近,水位在-6 m~ -8 m之间。不同工况条件下地面沉降



a—2022年;b—2032年。
图5 现状条件下地下水演化趋势



a—2022 年; b—2032 年。
图 6 减采 10% 条件下地下水演化趋势



a—2022 年; b—2032 年。
图 7 减采 30% 条件下地下水演化趋势

漏斗中心处水位也有所不同,在各工况下该点水位的变化如图 8 所示。2022—2032 年的 10 年内,如依照现状条件下开采,地下水位将下降 5 m 左右。随着减采的程度越来越大,水位下降速率越来越少,这说明开采量变大,水位降深随之变大,下降速率随之变快。当现状开采量减少 30% 时,水位呈现出减缓趋势,水位 10 年下降了 2.8 m 左右。

4 结论

(1) 采用地下水模拟软件 GMS 对研究区地下水三维不稳定流数值进行模拟研究,建立了地下水流场数值模型,通过对研究区水文地质资料的了解,为掌握地下水流场演化规律提供可靠依据。

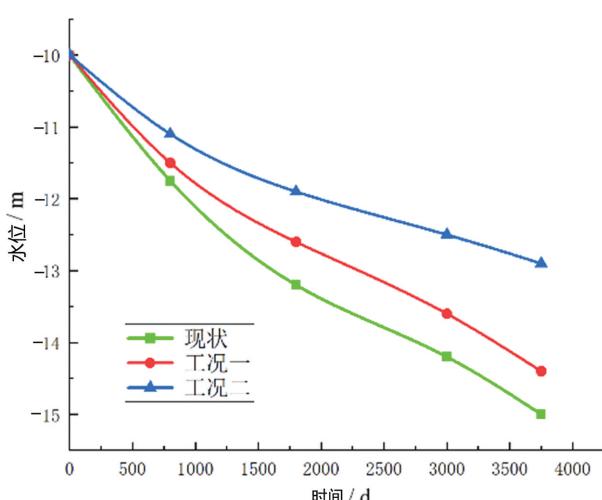


图 8 漏斗中心处水位在各工况下变化趋势

(2) 建立了区域地下水水流场动态分布规律的研究区域含水层地下水非稳定流数值模型。结果表明:选取的两个年份丰水期的地下水水位高于枯水期,但整体呈现较稳定的趋势。从北到南,研究区水位总体趋势与地形地貌基本吻合,从水位高的地区流到低的地区。

(3) 基于校准后的地下水三维数值模型,对地下水现状开采条件下和不同减少开采条件下的水位进行研究,并对此进行模拟预测分析。预测结果表明:从 2022 年按现状条件开采地下水,10 年后水位将下降 5 m 左右。随着减采的程度越来越大,水位下降速率越来越小,当开采量减少 30% 时,水位呈现出减缓趋势,10 年后下降 2.8 m 左右。

参考文献:

- [1] 代娜,郑宇轩,陈京鹏.胶东平度北部山区地下水蓄水构造与开采条件分区[J].山东国土资源,2023,39(7):7-13.
- [2] 张文强,滕跃,许庆宇,等.黄河流域长孝岩溶水系统水文地质特征及蓄水模式分析[J].山东国土资源,2024,40(3):116-127.
- [3] 张哲,盛琛,黄报辉,等.山东省烟台市观水镇白垩纪基岩裂隙水供水可行性分析[J].山东国土资源,2023,39(2):34-41.
- [4] Mattia Ceccatelli, Matteo Del Soldato, Lorenzo Solaro, et al. Numerical modelling of land subsidence related to groundwater withdrawal in the Firenze - Prato - Pistoia basin (central Italy) [J]. Hydrogeology Journal, 2021(29):629-649.
- [5] ZHU J Y, WANG Y L, GUO H P, et al. Application of Groundwater Model to Groundwater Regulation in Cangzhou Area[J]. E3S Web of Conferences, 2019(79):03014.
- [6] Masoud Mahmoudpour, Mashalah Khamehchiyan, Mohammad Reza Nikudel, et al. Numerical simulation and prediction of regional land subsidence caused by groundwater exploitation in the southwest plain of Tehran, Iran[J]. Engineering Geology, 2016 (201): 6-28.
- [7] 田月峰.鲁南高铁菏泽至兰考段地面沉降演化分析[J].铁道标准设计, <https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202210280005>.
- [8] 惠翔,刘丽红.基于 GMS - SUB 的地面沉降数值模拟研究:以太谷东站为例[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2022,42(2):30-37.
- [9] 李贵仁,刘大金,赵珍,等.矿山地下水三维空间流场模型构建及应用[J].矿业研究与开发,2024,44(3):152-158.
- [10] 亓协全,袁超,成世才,等.基于 MODFLOW 地下水数值模拟对济南北部地区地面沉降的预测[J].化工矿产地质,2019,41(4):277-284.
- [11] 刘苏哲,田晨,朱智勇,等.黄河三角洲典型地段地面沉降机理研究及预测预警[J].地质学报,2019,93(增刊1):251-260.
- [12] 宋昀,许洁,许书刚,等.苏锡常地下空间开发对地下水水流场的影响[J].地球科学,1-11.<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220214.1137.006.html>.
- [13] 熊小锋,罗跃,施小清,等.基于 TOUGH2 - FLAC~(3D)耦合的三维地面沉降数值模拟及控制策略研究[J].高校地质学报,2017,23(1):172-180.
- [14] 盛登宝,吕义清.基于数值模拟的地下水开采引起的地面沉降机理和对策研究:以定襄县贾家庄为例[J].中国农村水利水电,2017(10):62-64.
- [15] 李铎,刘洋,方晓峰.唐山沿海地区地面沉降渗流固结耦合模拟研究[J].工程地质学报,2015,23(1):105-110.
- [16] 马建花,曾润强,边世强,等.基于 Visual Modflow 的河流阶地灌溉区地下水模拟分析:以黑台为例[J].兰州大学学报(自然科学版),2020,56(5):580-586.
- [17] 张路,林锦,闵星,等.基于 GMS 的日喀则市区地下水数值模拟[J].水电能源科学,2020,38(4):76-79.
- [18] 韩雪,史秀文.地下水开采引起的平原灌区地面沉降的数值模拟[J].黑龙江科技大学学报,2018,28(2):168-173.
- [19] 姚铮,贺春艳,郭国强,等.胶西北地区三维地质模型构建及意义[J].山东国土资源,2022,38(3):39-44.

Construction of Regional Geological Structure Model and Analysis on Groundwater Flow Field

BU Xianlong¹, WANG Chunhui², QIN Shengqiang³, LAN Lingyu³, LIU Yi⁴, LI Jialong^{4,5}, WANG Shaojuan⁶, WANG Long¹, DONG Tianlin³, DI Shengtong¹

(1. Civil Engineering and Architecture College of Linyi University, Shandong Linyi 276000, China; 2. Qingdao Environmental Engineering Assessment Center, Shandong Qingdao 253072, China; 3. Qingdao Geological Engineering Survey Institute (Qingdao Geological Exploration and Development Bureau), Shandong Qingdao 266101, China; 4. No.2 Hydrogeological Engineering Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources (Lubei Geo - engineering Exploration Institute), Shandong Dezhou 253072, China; 5. Water Resources and Environment College of Jinan University, Shandong Jinan 250022, China; 6. Linyi Municipal Engineering Construction Management Service Center,

Shandong Linyi 276037, China)

Abstract: Accompanying with rapid development of economy and society, groundwater development and utilization has been continued to grow rapidly in our country, the water level decline caused by overexploitation of groundwater, the land settlement and other problems gradually became more and more obviously, and the change law of underground water flow field has an important theoretical significance for the formulation of groundwater mining plan. In this paper, taking Pingdu city in Qingdao city as the research background, considering regional topography, geological structures, geological unit characteristics and other factors, a numerical model of the groundwater flow field in the study area has been established, and the prediction and analysis of the dynamic evolution trend of the groundwater flow field under different groundwater exploitation schemes have been carried out. It is showed that if groundwater is mined in 2022, the water level will decrease by about 5m after 10 years. Accompanying with the reduction of mining intensity, the speed of water level decline gradually decreases. When the mining volume is reduced by 30%, the water level drops about 2.8m after 10 years.

Key words: Trend prediction; numerical model; ground water; fluid – solid coupling