

大沽河流域海水入侵数值模拟及其全局敏感性分析

张迪^{1,2}, 王煜¹, 郑小康¹, 曹智伟¹

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 基于 SEAWAT 建立三维海水入侵数值模型对胶州湾附近大沽河流域滨海含水层的非稳定海水入侵过程进行了模拟, 并利用 2010 年 1 月 1 日至 2018 年 6 月 1 日的地下水位和 Cl^- 质量浓度观测数据对海水入侵数值模型中的水文地质参数进行校准和验证, 同时利用全局敏感性分析评估含水层渗透系数和给水度等水文地质参数以及由降水入渗补给和地下水开采组成的源汇项对海水入侵数值模型的影响。结果表明: 海水入侵的发展对降水入渗补给和地下水开采最为敏感, 而渗透系数的影响则相对次要; 增加降水补给量和减少地下水开采量可以有效地降低未来海水入侵的范围。

关键词: 海水入侵数值模型; 滨海含水层; 全局敏感性分析; SEAWAT; 大沽河流域

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)01-0100-08

Numerical simulation of seawater intrusion in the Dagū River Basin and its global sensitivity analysis// ZHANG Di^{1,2}, WANG Yu¹, ZHENG Xiaokang¹, CAO Zhiwei¹ (1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Based on SEAWAT, a 3D seawater intrusion numerical model was established to simulate the unstable seawater intrusion process in the coastal aquifer of the Dagū River Basin near Jiaozhou Bay. The observation data of groundwater level and Cl^- mass concentration from January 1, 2010 to June 1, 2018 was used to calibrate and validate the hydrogeological parameters of the seawater intrusion numerical model. At the same time, the global sensitivity analysis was used to evaluate the impact of hydrogeological parameters such as aquifer permeability coefficient and water yield, as well as the source sink term composed of precipitation infiltration recharge and groundwater extraction, on the numerical model of seawater intrusion. The results show that the development of seawater intrusion is the most sensitive to precipitation infiltration recharge and groundwater exploitation, while the influence of permeability coefficient is relatively minor. Increasing precipitation recharge and reducing groundwater mining output can effectively reduce the scope of seawater intrusion in the future.

Key words: seawater intrusion numerical model; coastal aquifer; global sensitivity analysis; SEAWAT; Dagū River Basin

沿海地区人口密集, 经济发展迅速, 我国约 45% 的人口居住在沿海地区, 国家重要的经济中心, 如长三角、珠三角及环渤海湾均分布在沿海地区^[1-2]。地下水的过度开采引发了区域性地下水位的下降以及气候变暖引起的海平面上升, 进而驱使咸淡水界面向内陆推移即为海水入侵, 造成了滨海含水层中可利用淡水资源的污染与地下水开采并报废, 引发地下水水质恶化、土壤退化等一系列生态环境问题, 严重制约经济社会的可持续发展。科学管理沿海地区地下水、防止海水入侵加剧是维持当地经济与社会可持续发展的关键性问题^[3-8]。

海水入侵过程涉及复杂的物理化学过程, 如咸淡水混合物带的产生、由于密度差异而产生的不稳

定溶质迁移、地层不均匀性的综合影响等, 给沿海地下水管理带来了许多挑战^[9-11]。识别海水入侵主要控制因素, 评价海水入侵未来变化趋势能够为有效防治滨海含水层海水入侵提供科学决策依据, 是科学管理沿海地区地下水、避免沿海系统环境退化的重要问题。以往的研究主要在模型模拟海水入侵过程中或在优化模型输入之前通过局部敏感性分析或全局敏感性分析确定模型输入参数对模型精度的影响, 并加以参数调整^[12-15]。很少有研究评估控制海水入侵的关键因素与海水入侵预测之间的逻辑关系, 特别是这些敏感指标的不确定性对预测未来变化的误差范围。

本文针对大沽河流域海水入侵防治和滨海地下

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3204305)

作者简介: 张迪 (1991—), 男, 工程师, 博士, 主要从事水资源管理研究。E-mail: dzhang@smail.nju.edu.cn

水管理问题,在全面了解研究区水文地质条件和地下水开发利用与管理状况的基础上,基于 SEAWAT 开源程序,构建全区地下水流数值模型和典型区海水入侵嵌套数值模型,利用全局敏感性分析方法识别海水入侵过程的主控影响因素,结合敏感性分析结果,对海水入侵程度进行不确定性分析,评价未来海水入侵演变趋势,以期科学管理沿海地区海水入侵防治和滨海地下水可持续利用提供参考。

1 研究区概况

大沽河流域滨海含水层是青岛市的重要水源,位于青岛市的西北方,东经 $120^{\circ}4'20'' \sim 120^{\circ}24'52''$,北纬 $36^{\circ}15'39'' \sim 36^{\circ}48'15''$,在青岛市的总面积达 613 km^2 ,包括即墨区、莱西市、平度市、胶州市 4 个县级行政区(图 1)。研究区年降水量为 $550 \sim 700 \text{ mm}$,多年平均蒸发量为 1044.4 mm 。东侧紧临桃源河,由于含水层在此处尖灭,桃源河与研究区内地下水没有联系。

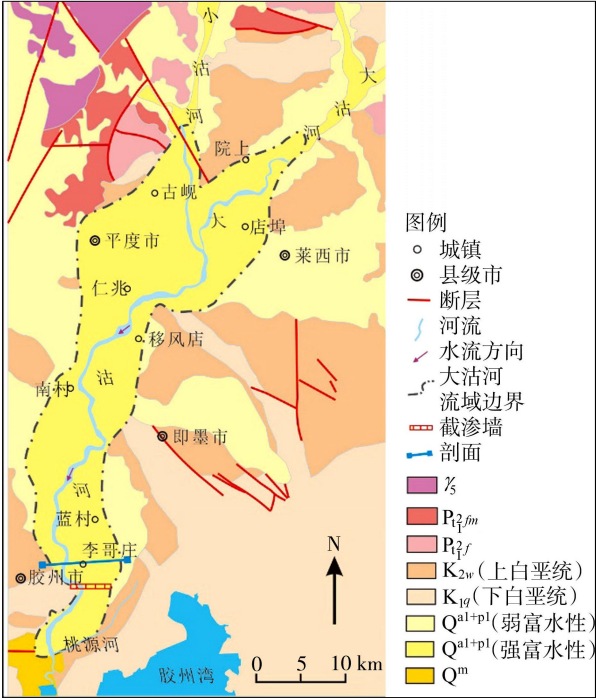


图 1 大沽河流域水文地质概况

Fig.1 Hydrogeological overview of the Dagou River Basin

研究区出露的地层除第四系松散地层外,主要为下伏的中生代白垩系王氏组(K_{2w})(下标斜体字母代表群名,数字代表新老顺序,下同),第三系为隐伏地层。第四系地层广泛出露于研究区内的现代河谷两侧、入海口平原及山前等地区,成因类型较为齐全。发育在大、小沽河中下游地段的冲积(Q^{al})(上标代表新生代地层的堆积成因,下同)和冲洪积(Q^{al+pl})层最具供水意义,其分布受古河谷形态制

约,厚度一般为 $3 \sim 20 \text{ m}$,双层单元结构,结构较复杂,上部由渗透性较小的黏质砂土及砂质黏土构成,下部由渗透性较大的砂及沙砾石层构成,局部夹有泥质,边缘楔入坡积层。在近海河口的低洼地区,冲积层上常覆盖有岩性为淤泥或淤泥质砂的海积层(Q^m),或夹在冲积层之中,厚度一般小于 5 m 。

大沽河滨海含水层储水介质由渗透性不同的两个地层组成,上部为渗透性较低的砂质黏土组成,地下水主要赋存于下部渗透性较大的沙砾石中,沿大沽河东西侧呈带状分布,其运动规律遵循达西定律。对于研究区地下水流模型,含水层在东西两侧厚度逐渐变薄趋于尖灭然后过渡为弱透水性的黏土或直接与不透水的基岩相接触,因此将东西边界定义为零通量边界。北边界的大、小沽河出山口段(图 2)由于侧向流入量较大,且研究资料丰富,可提供较为可靠的侧向流量数据,概化为第二类边界,即给定流量边界。对于南部边界,结合地质资料,由于大沽河与桃源河交叉口以南区域受古河谷形态制约,含水层基本紧邻河道分布,且含水层厚度较薄,缺少相应的钻孔资料,视为通用水头边界来模拟地下水在入海口平原处的相互作用。垂向边界上由于含水层的下伏地层为白垩系基岩,无越流补给,构成含水层的

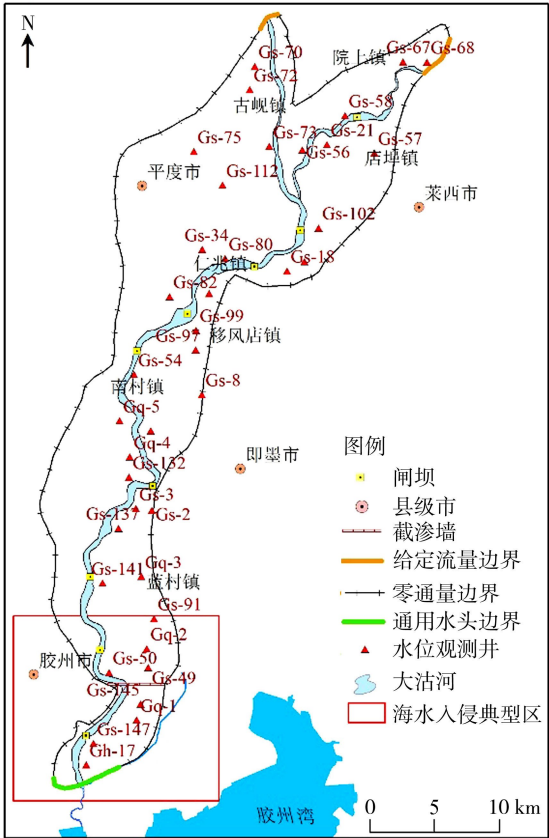


图 2 大沽河流域水流模型边界条件

Fig.2 Boundary conditions of groundwater flow model in the Dagou River Basin

底部隔水层。含水层的大部分地区上覆弱透水性的粉质黏土或砂质黏土,部分地区地表直接出露砂层,有利于接受降水和地表河流的补给。区内地下水基本呈现无压状态,为潜水,仅在少数年份局部地段呈微承压状态。对于溶质运移模型,海水入侵区属于基岩海岸带,海水沿大沽河河道上溯,将南部边界视为给定浓度边界,依据2010年典型区水质采样数据赋值,东西边界视为零通量边界,北界视为给定水头边界,具体边界条件如图3所示。

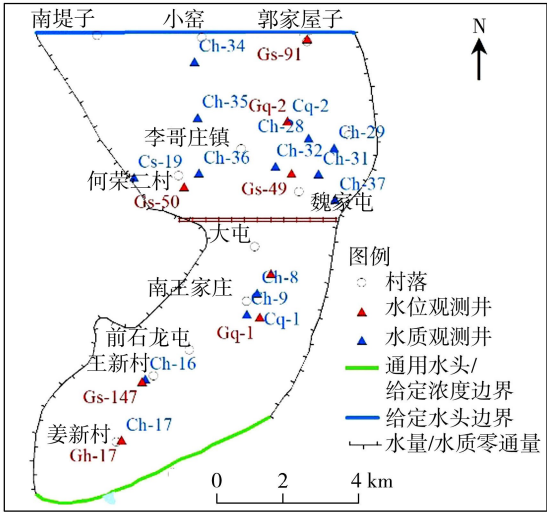


图3 典型区溶质运移模型边界条件

Fig.3 Boundary conditions of solute transport model in typical regions

2 海水入侵数值模型及其主控因素识别

2.1 数值模型

2.1.1 大沽河流域地下水流数值模型

大沽河地区地下水补径排条件相对复杂,地下水流场处于长期动态变化中,地下水位和流向随季节性降雨和人工开采而产生年度动态变化,因此本文地下水数值模型的建立采用非均质各向同性非稳定流模型。在水文地质概念模型的基础上,构建研究区地下水流数值模型,具体数学方程见文献[17]。全区水流模型在空间上离散为2层、264行、

140列,水平网格间距均匀为250 m×250 m,共计14114个有效单元格。垂向上模型层厚为1.7~18.8 m,具体取决于潜水含水层厚度。基于观测数据前期收集序列,模拟期定义为2010年1月1日至2018年6月1日,其中识别期为2010年1月1日至2016年12月31日,校验期为2017年1月1日至2018年6月1日,每个应力期长度为1月,共101个应力期。模型相关水文地质参数采用历史野外监测资料为初始参数,以基本的水文地质条件定性判断为基础,通过试错法校验^[16]。根据模型反演,得到地下水流模型的渗透系数和给水度分区,结果见文献[17]。

采用3个性能指标对模型的精度进行评价,即相关系数(R)、均方根误差(root mean square error, RMSE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)。研究区内共有40口水位观测井,整个模拟期内观测水位与模拟水位的 R 为0.98, RMSE为1.09 m, MAE为0.86 m。可见代表性水位观测井的模拟水位与真实水位接近,地下水流模型可以再现天然地下水流场,地下水流模型的准确度高。2018年6月1日模拟结束时刻流场及整个模拟期内拟合结果如图4、图5所示。

2.1.2 典型区海水入侵数值模型

在全区地下水流数值模型对研究区地下水源汇项进行良好拟合的基础上,构建海水入侵数值模型。为了精细刻画典型区的海水入侵物理过程,同时减少后续敏感性分析和不确定性分析的计算负荷,在全区地下水流数值模型的基础上,针对典型区构建网格剖分更加精细的海水入侵嵌套模型。典型区海水入侵数值模型的北边界基于全区地下水流模型的大网格计算结果输出作为精细小网格的输入,定义为给定水头边界。典型区海水入侵数值模型在垂向上离散为2层,平面空间上离散为291行、213列,水平网格间距均匀为50 m×50 m,共计31019个有效单元格。

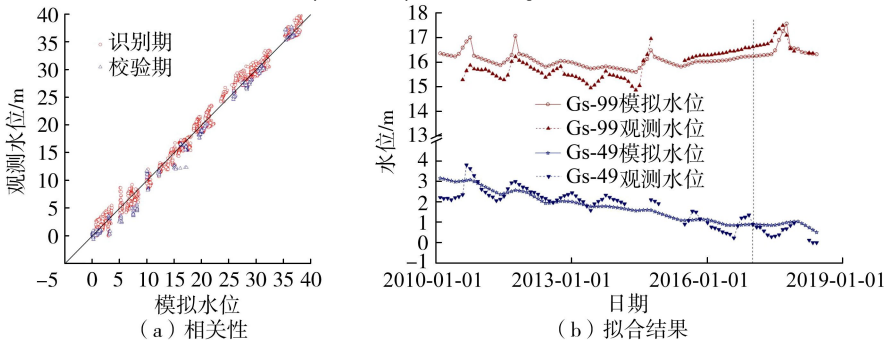


图4 水流模型拟合结果

Fig.4 Water flow model fitting results

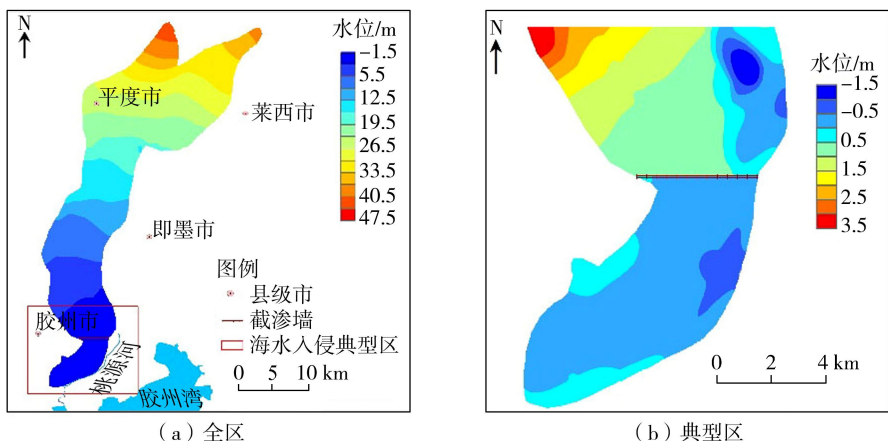


图5 2018年6月1日主含水层地下水流场空间分布

Fig.5 Spatial distribution of groundwater flow field in main aquifer on June 1, 2018

2010年1月1日至2018年6月1日整个模拟期内15口水质井的 Cl^- 质量浓度观测值与模拟值的相关系数 R 为0.93, RMSE为89.95 mg/L, MAE为73.03 mg/L。3口代表性井的 Cl^- 质量浓度观测值与模拟值在整个模拟期内随时间变化的拟合结果如图6所示。模拟得到典型区不同时间 Cl^- 质量浓度空间分布如图7所示。

2.2 全局敏感性分析

通常敏感性分析方法分为两类:局部敏感性分

析和全局敏感性分析。局部敏感性分析侧重于单个因素对模型的局部影响,因此适合围绕特定对象的识别;全局敏感性分析将模型输出中的不确定性赋值给每个输入因子中的不确定性,从而对每个因子的整个范围建模。因此,全局敏感性分析是识别影响因素与模型输出之间复杂关系的首选方法^[18-19]。本文基于海水入侵数值模型,利用全局敏感性分析来评估水文地质参数以及由降水入渗补给和地下水开采组成的源汇项对模型的影响。

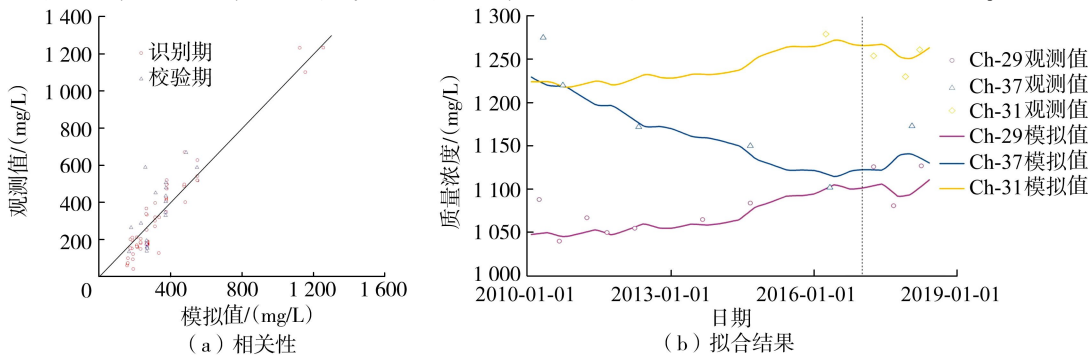


图6 Cl^- 质量浓度模型拟合结果

Fig.6 Model fitting results of Cl^- mass concentration

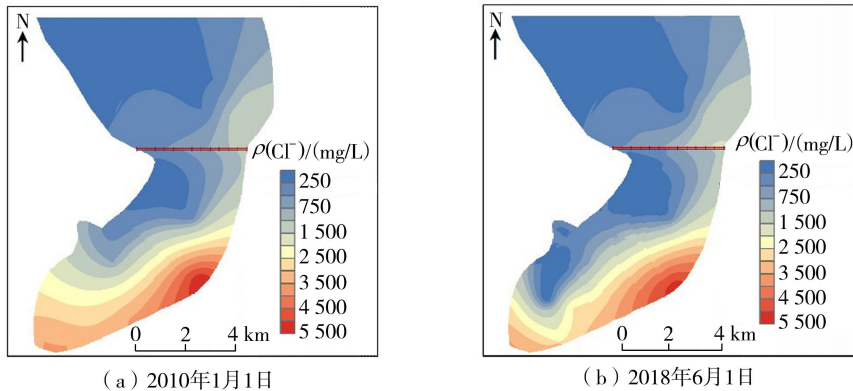


图7 典型区不同时间 Cl^- 质量浓度空间分布

Fig.7 Cl^- mass concentration spatial distribution at different time in typical area

采用逐步回归全局敏感性分析方法,选择9个潜在重要的模型输入因素,以确定其对海水入侵模型输出的影响。图8为全局敏感性分析的参数分区,9个输入因素包括图8(a)中4个分区的渗透系数($K_1 \sim K_4$)、图8(b)中3个分区的给水度($\mu_1 \sim \mu_3$)、典型区年均降水量和典型区年均地下水开采量。其中, $K_1 \sim K_4$ 和 $\mu_1 \sim \mu_3$ 是与含水层性质相关的水文地质参数,对地下水流场的分布有很大影响;典型区年均降水量和典型区年均地下水开采量分别是含水层系统的主要补给和排泄项。同时,由于含水层长期抽取地下水导致上部单元出现干涸,因此选择的含水层7个水文地质参数只针对模型第二层,也就是主含水层。此外,海水入侵过程是一个对流占优的溶质运移问题,弥散系数在此不敏感,因此没有被选为潜在的控制因素。模型的输出项是截渗墙两侧北部(O1)和南部(O2)地下水 Cl^- 质量浓度。在逐步回归分析过程中,从参数参考值上下浮动10%的范围内随机抽取一组参数,输入到海水入侵数值模型中,得到相对应的输出,这样的过程重复500次,然后基于模型输入和输出的500个样本的蒙特卡罗随机模拟结果,进行敏感性分析。9个输入因素的取值范围和参考值见表1。

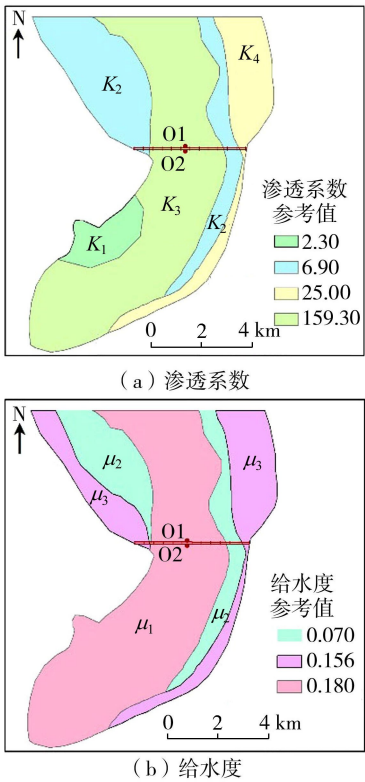


图8 全局敏感性分析参数分区

Fig.8 Global sensitivity analysis parameter partitioning

对于截渗墙两侧的O1、O2点,O1点 K_3 、典型区年均降水量、典型区年均地下水开采量的标准化

表1 输入因素取值范围及参考值

Table 1 Input factor value range and reference value				
输入因素	单位	最小值	最大值	参考值
K_1	m/d	2.07	2.53	2.30
K_2	m/d	6.21	7.59	6.90
K_3	m/d	143.37	175.23	159.30
K_4	m/d	22.50	27.50	25.00
μ_1		0.162	0.198	0.180
μ_2		0.063	0.077	0.070
μ_3		0.140	0.172	0.156
典型区年均降水量	mm	513.2	627.2	570.2
典型区年均地下水开采量	万 m^3	661.7	808.8	735.2

回归系数分别为0.06、-0.837、0.698,O2点 K_3 、典型区年均降水量、典型区年均地下水开采量的标准化回归系数分别为-0.109、-0.696、0.748,其余参数均为0。这意味着只有降雨入渗、地下水开采和特定分区渗透系数对海水入侵的过程具有重要影响。对于O1点的 Cl^- 质量浓度,典型区年均降水量的标准化回归系数绝对值最大,负相关代表随着降雨入渗增加, Cl^- 质量浓度降低,并且对于O1点的 Cl^- 质量浓度影响程度由大到小为:典型区年均降水量、典型区年均地下水开采量、 K_3 。对于O2点的 Cl^- 质量浓度,典型区年均地下水开采量的标准化回归系数绝对值最大,其次是典型区年均降水量及 K_3 ,表明对于截渗墙南侧的O2点 Cl^- 质量浓度,典型区年均地下水开采量是影响程度最大的因素。

敏感性分析结果表明,典型区年均降水量、典型区年均地下水开采量和含水层分区渗透系数是控制海水入侵程度的主要影响因素。对于海水入侵模型而言,无论在截渗墙的南侧还是北侧,降水量和地下水开采量都是影响研究区地下水 Cl^- 质量浓度的关键因素。此外,从典型区年均降水量和典型区年均地下水开采量的标准化回归系数正负值可以看出,降水量的增加和地下水抽取量的减少将有助于缓解研究区海水入侵程度的发展。因此,制定应对未来气候变化和限制地下水开采的措施,对于当地地下水资源管理者来说至关重要。特别是在现阶段,为了防止海水入侵在含水层中持续扩张,当地地下水管理者应通过改变农业生产结构和提高农业用水效率等措施来限制地下水的超采。另外, K_3 与截渗墙北侧和南侧的 Cl^- 质量浓度分别呈正、负相关关系,随着 K_3 升高,有利于缓解截渗墙以南地区的海水入侵,而截渗墙以北地区则相反,这说明由于截渗墙的防渗能力,使得截渗墙两侧的O1和O2处于两个相对独立的地下水流子系统中。

2.3 不确定性分析

蒙特卡洛随机模拟是一种条件随机模拟的专业

方法,在通过全局敏感性分析得到典型区年均降水量、典型区年均地下水开采量和含水层渗透系数(K_3)为影响海水入侵程度的主控因素的基础上,运行蒙特卡罗随机海水入侵模拟,评估全局敏感性分析结果与未来海水入侵预测之间的逻辑关系,以及预测模型参数变化的不确定性。根据全局敏感性分析结果,降水量、地下水开采量和 K_3 的取值范围分别为 490.1 ~ 829.4 mm、588.2 ~ 735.2 万 m^3 、143.37 ~ 175.23 m/d ,其中降水量范围分别对应于研究区丰水年气候和枯水年气候条件的降水量,地下水开采量的上下限分别设定为当前开采量及在当前开采量的基础上压采 20%, K_3 上限和下限设定为在参考值的基础上分别增加和减少 10%。从参数取值范围中随机抽样,并与其他不敏感输入因子按照参考值组合输入海水入侵模型,得到海水入侵面积的模拟结果,500 次、1 000 次、2 000 次运行的结果范围分别为 50.37 ~ 55.23、50.37 ~ 55.23、50.09 ~ 55.23 km^2 。参照 GB 3097—1997《海水水质标准》,本文海水侵入总面积定义为地下水中 Cl^- 质量浓度超过 250 mg/L 限值的有限差分单元面积之和。

图 9 为预测海水入侵面积的不确定性分析结果(图中 PDF(probability density function)为概率密度函数,CDF(cumulative distribution function)为累积分布函数)。由图 9 可见,随机海水入侵模型的 500 次、1 000 次和 2 000 次的蒙特卡洛模拟预测的海水入侵面积的收敛范围为 50.09 ~ 55.23 km^2 。CDF 的最陡部分表明,海水入侵面积 90% 置信区间为 53.0 ~ 55.0 km^2 。

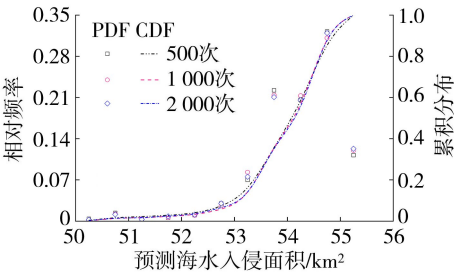


图 9 预测海水入侵面积的不确定性分析结果
Fig.9 Uncertainty analysis results for predicting seawater intrusion area

3 海水入侵发展趋势及管理启示

基于典型区海水入侵数值模型,结合敏感性分析和不确定性分析结果,考虑气候变化条件(极端气候和未来气候)以及不同含水层管理方案进行预测情景设置,对 2029 年海水入侵趋势进行预测。极端气候条件通过对典型区 1989—2018 年的历史降水量进行统计,分析其降水频率获得对应的典型年

降水量。按照累积频率曲线得到丰水年为 1993 年,降水量为 829.4 mm,平水年为 1999 年,降水量为 614.4 mm,枯水年为 2006 年,降水量为 490.1 mm。通过模型反演,典型区平均地下水开采量为 735.2 万 m^3/a 。设置 S0 情景为现状情景,降水量和地下水开采量为典型区海水入侵模型输入的逐年数据,以每年的 1—5 月、6—9 月、10—12 月为应力期,作为研究基准;S1、S2、S3 情景分别对应枯、平、丰水年的降水量,地下水开采量为多年平均开采量;S4 情景采用 2010—2018 年平均降水量,地下水开采量为多年平均开采量;S5 情景利用 BCC_CSM1.1^[20]提供的 RCP4.5 气候情景数据作为统计降尺度模型^[21]的输入,计算气候变化条件下研究区的降水量,地下水开采量为多年平均开采量;S6、S7 情景采用与 S0 情景相同的现状降水量,地下水开采量在多年平均开采量的基础上分别减少 10% 和 20%。预测模型的源汇项主要为降水入渗补给量、地下水开采量、地下水蒸发量,具体预测情景模型输入参数如图 10 所示。

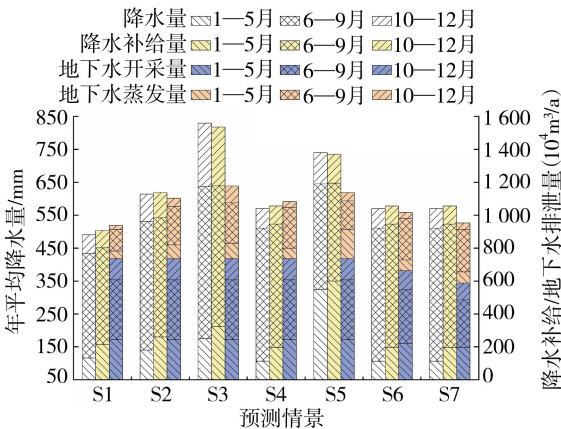


图 10 预测情景模型输入参数
Fig.10 Predictive scenario model input parameters

图 11 为不同预测情景下 2029 年海水入侵程度。预测结果表明,与 S0 情景相比,在 S1 情景下 2029 年海水入侵面积为 54.94 km^2 ,海水入侵增加 2.04%;S2 情景下 2029 年海水入侵面积为 52.47 km^2 ,海水入侵减少 2.54%;S3 情景下 2029 年海水入侵面积为 50.6 km^2 ,海水入侵减少 6.02%;S4 情景下 2029 年海水入侵面积为 54.03 km^2 ,海水入侵增加 1.86%;S5 情景下 2029 年海水入侵面积为 51.63 km^2 ,海水入侵减少 4.1%;S6 情景下 2029 年海水入侵面积为 53.15 km^2 ,海水入侵减少 1.28%;S7 情景下 2029 年海水入侵面积为 51.52 km^2 ,海水入侵减少 4.31%。可见,在降水量和地下水开采量不变的情况下海水入侵的面积将逐渐扩大。事实上,基准模型表明现有灌溉土地和城市用水量约

735 万 m^3 ,将会导致未来海水侵入面积在现状基础上增加 1.86%,因此控制海水入侵持续扩张最现实的方法是严格限制地下水的开采。但是,随着人口的增长和经济的发展,对水资源的需求越来越大,地下水开采的需求会越来越迫切。尤其是当地灌溉用水价格较低,导致农业灌溉用水毫无节制,完全不考虑地下水资源保护。目前,青岛政府已经意识到这个严重问题并有计划地减少地下水开采量,同时适当提高水价,逐步实行阶梯灌溉水价,希望能够逐渐减少农业灌溉地下水开采量。

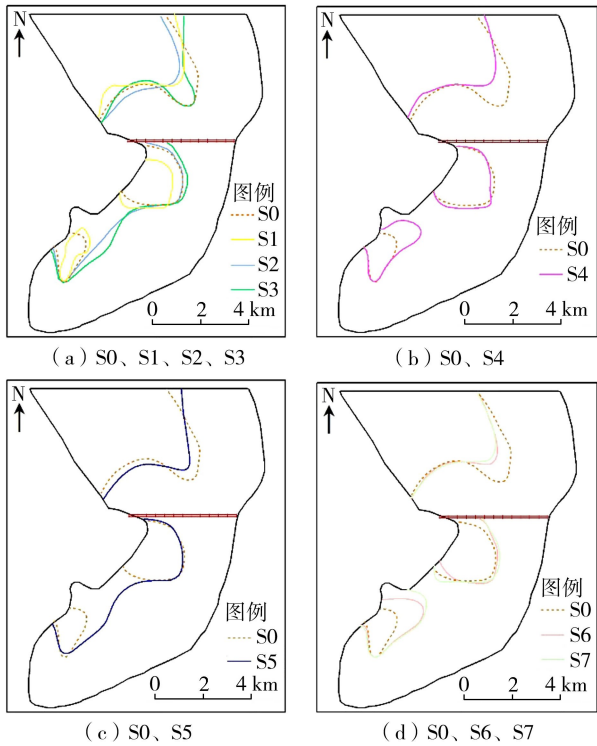


图 11 不同预测情景下 2029 年海水入侵程度
Fig. 11 Degree of seawater intrusion in 2029 under different prediction scenarios

对于全国类似滨海地区,干旱少雨、地表水资源不足是海水入侵的背景因素;地质条件是海水入侵的基础条件,控制着海水入侵的分布和途径;不合理的人类活动是海水入侵的诱发因素,控制着海水入侵的趋势和程度,而过量开采地下水是最主要原因^[22-24]。因此,在管理上应首先强化水资源刚性约束,减少地下水资源的过度开采,对可能引发或加剧海水入侵的地下水超采区暂停审批新增取用地下水许可。①以“节水优先”方针为指导,充分挖掘区域节水潜力,如大力发展节水农业、调整种植结构以及加强节水教育等,全面提高经济社会的用水效率;②结合国家引调水工程规划,适时增加引调水计划,提高供水保证率,为海水入侵防治提供必要的水力屏障基础;③在准确刻画区域地下水流场及海水入侵溶质运移演变规律模型基础上,划分更精细的嵌

套子区,识别海水入侵对不同嵌套子区开采活动的敏感性,严格双控敏感子区的开采总量和地下水位;④对于在滨海河口、海岸等地带修建的梯级拦河闸坝可采用模拟优化技术,将率定的海水入侵数值模型与优化管理模型相耦合,构建气候变化条件下沿海地区控制海水入侵的地下水优化管理模型,优化区内地下水开采量、拦河闸坝处蓄水位,实现地表水-地下水联合调控防止海水入侵。

4 结 论

a. 构建的地下水流数值模型模拟水位与观测水位的 R 为 0.98, RMSE 为 1.09 m, MAE 为 0.86 m, 观测孔处的模拟水位与实测水位拟合变化趋势一致,表明该模型能够较好地模拟研究区地下水流场。构建的典型区海水入侵数值模型模拟 Cl^- 质量浓度与观测浓度的 R 为 0.93, RMSE 为 89.95 mg/L, MAE 为 73.03 mg/L, 观测孔处 Cl^- 质量浓度的拟合变化趋势基本一致,表明该模型能够准确模拟咸淡水过渡带海水入侵的物理过程。

b. 利用全局敏感性分析方法识别了海水入侵过程的主控影响因素。结果表明,海水入侵过程对典型区年均降水量和典型区年均地下水开采量最为敏感,特定分区渗透系数次之,其他参数的影响不明显。

c. 对典型区年均降水量、典型区年均地下水开采量、特定分区渗透系数 3 个因素进行选取范围内的蒙特卡罗随机模拟,预测不同情境下 2029 年的海水入侵情况。结果表明,2029 年海水入侵面积最小为 50.09 km^2 ,最大为 55.23 km^2 ,海水入侵面积 90% 置信区间为 53.0 ~ 55.0 km^2 。

参考文献:

[1] 郭占荣,黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文, 2003, 23(3): 10-15. (GUO Zhanrong, HUANG Yipu. Comprehensive study on seawater intrusion [J]. Hydrology, 2003, 23(3): 10-15. (in Chinese))
[2] 吴吉春,吴永祥,林锦,等. 黄渤海沿海地区地下水管理与海水入侵防治研究[J]. 中国环境管理, 2018, 10(2): 91-92. (WU Jichun, WU Yongxiang, LIN Jin, et al. Study on the groundwater management and seawater intrusion prevention in the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. Chinese Journal of Environment Management, 2018, 10(2): 91-92. (in Chinese))
[3] 李若华,马继侠,张舒羽,等. 强潮作用下钱塘江河口盐water 入侵机制[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(5): 37-44. (LI Ruohua, MA Jixia, ZHANG Shuyu, et al. Saltwater intrusion mechanism in the Qiantang River estuary under strong tide [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(5): 37-44. (in Chinese))

- [4] BARLOW P M, REICHARD E G. Saltwater intrusion in coastal regions of North America [J]. Hydrogeology Journal, 2010, 18(1) : 247-260.
- [5] SREEKANTH J, DATTA B. Coupled simulation-optimization model for coastal aquifer management using programming-based ensemble surrogate models and multiple-realization optimization [J]. Water Resources Research, 2011, 47: W04516.
- [6] WERNER A. D, BAKKER M, POST V E A, et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges [J]. Advances in Water Resources, 2013, 51: 3-26.
- [7] SINGH A. Optimization modelling for seawater intrusion management [J]. Journal of Hydrology, 2014, 508: 43-52.
- [8] SINGH A. Simulation-optimization modeling for conjunctive water use management [J]. Agriculture Water Management, 2014, 141: 23-29.
- [9] XIONG Guiyao, AN Qingxian, FU Tengfei, et al. Evolution analysis and environmental management of intruded aquifers of the Dagu River Basin of China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 719: 137260.
- [10] SUN Qiguo, ZHENG Tianyuan, ZHENG Xilai, et al. Influence of a subsurface dam on nitrate contamination in an unconfined aquifer [J]. Journal of Hydrology, 2019, 575: 234-243.
- [11] IMAN R L, HELTON J C. An investigation of uncertainty and sensitivity analysis techniques for computer-models [J]. Risk Analysis, 1988, 8(1) : 71-90.
- [12] FREY H C, PATIL S R. Identification and review of sensitivity analysis methods [J]. Risk Analysis, 2002, 22(3) : 553-578.
- [13] MAZZILLI N, GUINOT V, JOURDE H. Sensitivity analysis of two-dimensional steady state aquifer flow equations. implications for groundwater flow model calibration and validation [J]. Advances in Water Resources, 2010, 33(8) : 905-922.
- [14] RAJABI M M, ATAIE-ASHTIANI B, SIMMONS C T. Polynomial chaos expansions for uncertainty propagation and moment independent sensitivity analysis of seawater intrusion simulations [J]. Journal of Hydrology, 2015, 520: 101-122.
- [15] 赵洁, 林锦, 吴剑锋, 等. 大连周水子地区海水入侵数值模型 [J]. 南京大学学报(自然科学版), 2016, 52(3) : 479-489. (ZHAO Jie, LIN Jin, WU Jianfeng, et al. Numerical modeling of seawater intrusion in Zhoushuizi District of Dalian City, China [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2016, 52(3) : 479-489. (in Chinese))
- [16] 程林, 韩龙喜, 刘晓华, 等. 一维地下水溶质运移模型多参数反演 [J]. 水资源保护, 2014, 30(3) : 5-8. (CHENG Lin, HAN Longxi, LIU Xiaohua, et al. Multi-parameter inversion of one-dimensional groundwater solute transport model [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(3) : 5-8. (in Chinese))
- [17] ZHANG Di, YANG Yun, WU Jianfeng, et al. Global sensitivity analysis on a numerical model of seawater intrusion and its implications for coastal aquifer management: a case study in Dagu River Basin, Jiaozhou Bay, China [J]. Hydrogeology Journal, 2020, 28: 2543-2557.
- [18] ZENG Xiankui, DONG Jian, WANG Dong, et al. Identifying key factors of the seawater intrusion model of Dagu River basin, Jiaozhou Bay [J]. Environment Research, 2018, 165: 425-430.
- [19] PAPPENBERGER F, BEVEN K J, RATTO M, et al. Multi-method global sensitivity analysis of flood inundation models [J]. Advances in Water Resources, 2008, 31(1) : 1-14.
- [20] YANG Xiaoli, WOOD E F, SHEFFIELD J, et al. Bias correction of historical and future simulations of precipitation and temperature for China from CMIP5 models [J]. Journal of Hydrometeorology, 2018, 19(3) : 609-623.
- [21] CHEN J, BRISSETTE F P, LECONTE R. Assessing regression-based statistical approaches for downscaling precipitation over North America [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(9) : 3482-3504.
- [22] 宋子奕, 鲁程鹏, 吴成城, 等. 2009—2019 年河西走廊地下水位时空分布及演变趋势 [J]. 水资源保护, 2023, 39(2) : 160-167. (SONG Ziyi, LU Chengpeng, WU Chengcheng, et al. Spatiotemporal distribution and evolution trend of groundwater level in Hexi Corridor from 2009 to 2019 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2) : 160-167. (in Chinese))
- [23] 门宝辉, 李晨, 尹世洋. 基于减法集对势的大兴区地下水开采强度评价与诊断 [J]. 水资源保护, 2022, 38(5) : 17-25. (MEN Baohui, LI Chen, YIN Shiyang. Evaluation and diagnosis of groundwater exploitation intensity in Daxing District based on subtraction set pair potential [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5) : 17-25. (in Chinese))
- [24] 张婧, 马贵宏, 高雅, 等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1) : 21-28. (ZHANG Jing, MA Guihong, GAO Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1) : 21-28. (in Chinese))

(收稿日期: 2023 - 03 - 11 编辑: 王芳)