

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201909012

未来气候变化对大连周水子地区海水入侵程度的影响预测

赵 洁^{1,2}, 林 锦³, 吴剑锋², 吴吉春²

(1. 华北水利水电大学水资源学院, 河南 郑州 450046; 2. 表生地球化学教育部重点实验室/南京大学地球科学与工程学院水科学系, 江苏 南京 210023; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 滨海含水层的海水入侵程度受地下水开采量、海平面变化和降水补给量等多个因素影响。随着气候持续变化, 预测未来气候情境下降水量变化对海水入侵程度的影响, 可为区域水资源合理配置提供依据。本研究基于校正好的三维变密度地下水数值模拟模型(采用 SEAWAT 建立), 预测了大连周水子地区海水入侵程度对不同降水频率及 CMIP5 气候模式下的预测降水量的响应。结果表明: 未来海水入侵程度与未来降水量呈近似负相关关系, 即降水量越少, 海水入侵程度越严重; 如海水入侵程度在枯水年较丰水年、平水年更加严重; 7 种气候模式下, MPI 气候模式(S7-2-Y)下的未来年平均降水量最小, 未来海水入侵程度也最严重, CNRM 气候模式(S5-2-Y)下未来年平均降水量最大, 未来海水入侵程度最不严重; 此外, 还发现每种气候模式不同温室气体浓度排放情景下的降水量对未来海水入侵程度几乎无影响。总而言之, 未来海水入侵程度会愈加严重。该预测模型的建立可为国内类似滨海地区的实际水资源配置工作提供参考依据。

关键词: SEAWAT; 海水入侵; 未来气候变化; 降水频率; CMIP5 气候模式

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)03-0017-08

Prediction of the impact of future climate change on the extent of seawater intrusion in Zhoushuizi district of Dalian City in northern China

ZHAO Jie^{1,2}, LIN Jin³, WU Jianfeng², WU Jichun²

(1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China; 2. Key Laboratory of Surficial Geochemistry, Ministry of Education; Department of Hydrosociences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China)

Abstract: The pumping groundwater, the changing sea level and the rainfall recharge affect the extent of seawater intrusion in the coastal aquifers. With continue change of the future climate, predicting the impact of future climate change on the extent of seawater intrusion can provide a basis for the rational allocation of regional water resources. The calibrated three-dimensional heterogeneous density-dependent numerical model which was constructed by using SEAWAT was applied to predict the impact of future rainfall scenarios including different rainfall frequency analysis and climate modes derived from CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) on the extent of seawater intrusion in Zhoushuizi district of Dalian City in northern China. The results show that the extent of seawater intrusion in the future is negatively correlated with

收稿日期: 2019-09-10; 修订日期: 2019-11-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402807); 国家自然科学基金资助项目(51709106; 40902069); 河南省高等学校重点科研项目计划支持(18A170011)

第一作者: 赵洁(1984-), 讲师, 主要从事地下水模拟与优化研究。E-mail: zhaojiecug@126.com

通讯作者: 吴剑锋(1971-), 教授, 主要从事地下水模拟优化管理方面的研究。E-mail: jfwu@nju.edu.cn

the future rainfall, namely the less rainfall, the more severe extent of seawater intrusion. For example, the extent of seawater intrusion in dry years is more severe than that in normal years and wet years. Among the seven climate modes, the future average annual rainfall of MPI climate mode (S7-2-Y) is the minimum, so the extent of seawater intrusion in the future is also the most severe. In the CNRM climate mode (S5-2-Y), the future average annual rainfall is the maximum, so the extent of seawater intrusion in the future is the least severe. And, the extent of seawater intrusion is almost identical to each other for different greenhouse gas emission scenarios of every climate mode. Overall, the extent of seawater intrusion in the future would be even more severe. The establishment of the prediction model can guide the actual water resources allocation of similar coastal areas in China.

Keywords: SEAWAT; seawater intrusion; future climate change; rainfall frequency; climate modes derived from CMIP5

海水入侵是滨海地区含水层的常见现象,严重影响了该地区地下水水质^[1-2]。了解滨海地区海水入侵的范围、程度及未来发展趋势^[3-5],可为区域地下水资源合理配置提供科学依据^[6-8]。多项研究表明海平面升降、降水量变化等气候因素对海水入侵程度均产生较大影响^[9-14]。Xiao等^[15]利用SEAWAT在Florida州沿海平原建立了一个三维变密度海水入侵模拟及预测模型,发现降水量变化和海平面升降对区域地下水位和水质有重要影响。HUGMAN等^[16]和Green等^[17]分别在葡萄牙滨海地区和加拿大Atlantic滨海地区进行了类似研究,后者研究表明降低降水补给量对咸淡水过渡带附近的浅层至中层含水层影响较大。Carneiro等^[18]和Unsal等^[19]分别基于研究区水文地质资料及政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供的降水量数据等资料,建立了不同地区的变密度地下水数值模拟及预测模型,研究结果均表明滨海含水层的海水入侵程度及地下水资源量受气候变化因素影响较大,若减少补给且基于IPCC数据升高海平面,滨海含水层中海水入侵程度将会更加严重。此外,政府间气候变化专门委员会IPCC第四次评价报告重申了未来气候变化将会持续。目前,这些研究多集中在国外,国内关于建立三维的实际海水入侵区地下水数值模拟模型及预测模型方面的研究较少。

自二十世纪八九十年代起,大连滨海地区海水入侵程度日趋严重(图1),本文基于校正好的三维变密度地下水数值模拟模型^[20-21],针对未来不同降水量情景设计了多种预测方案,包括降水频率预测方案和CMIP5气候模式下的未来降水量预测方案,对研究区海水入侵未来趋势进行了预测。

1 研究区概况

大连市地处辽东半岛南端,属于三面环海的丘陵

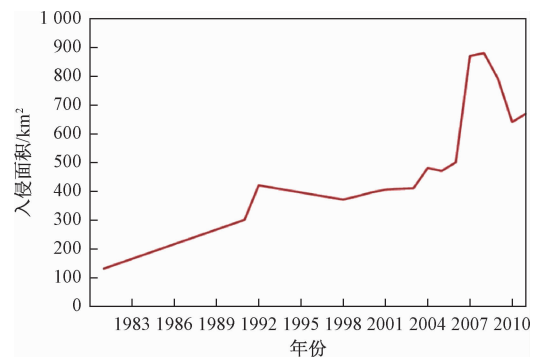


图1 大连市历年海水入侵变化趋势图

Fig.1 Trend of seawater intrusion of Dalian City over years

地带。周水子研究区是大连市海水入侵程度最严重地段之一,总面积约30 km²,研究区具体位置如图2所示。研究区位于具有海洋性特点的大陆性季风气候区,雨季为6—9月。研究区第四系发育较差且局部缺失,之下为上元古界震旦系,岩性为泥粉晶灰岩与白云岩,局部发育有辉绿岩条带。在复杂的褶皱断裂与负地形部位岩溶较发育,研究区主要的含水层由碳酸盐岩裂隙岩溶含水层和基岩裂隙岩溶含水层组成。补给项包括降水入渗和充水断层的侧向补给,排泄项包括人工开采、垂向蒸发和侧向径流排泄量。

将研究区裂隙岩溶含水层概化为等效多孔介质,建立了一个三维、不等厚、非均质、各向异性的承压—非承压地下水流及溶质运移模拟模型^[20-21]。根据含水层、隔水层的岩性及分布、地质构造、海水与含水层的水力联系等信息确定了模型的边界条件(图3),该海水入侵数值模拟模型由一个水流模型和一个溶质运移模型组成^[22]。对于水流模型来说,北部透水性差的辉绿岩条带、东北部透水性差的平移断层及南部水文地质界线,可处理为隔水边界;研究区西部边界及中北部的充水断层,定义为给定流量边界;东部处理为海边给定水头边界。对于溶质运移模型来说,东部海湾设

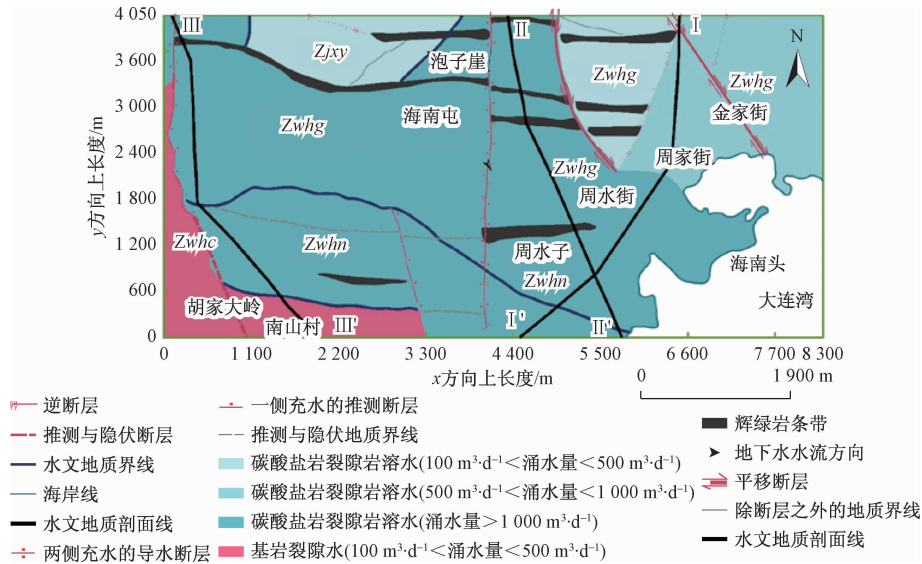


图2 研究区水文地质图

Fig.2 The hydrogeological map of the study area

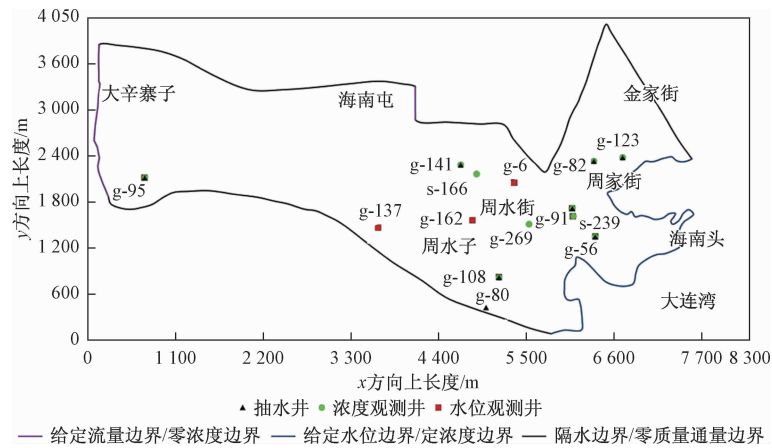


图3 概念模型图

Fig.3 The map of hydrogeological conceptual model

为定浓度边界;中部和西部的导水断层设为零浓度边界;其余边界均设置为零质量通量边界。基于以上概念模型,可建立相应水流及溶质运移数学模型。Langevin 等^[23]基于质量守恒定律及达西定律,推导得到的变密度地下水流运动控制方程式:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho K_{fx} \left(\frac{\partial h_f}{\partial x} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial x} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho K_{fy} \left(\frac{\partial h_f}{\partial y} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial y} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho K_{fz} \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial z}{\partial z} \right) \right] = \\ & \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial t} - \rho_s q_s \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (1) \end{aligned}$$

初始条件:

$$H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z) \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (2)$$

第一类边界条件:

$$H(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_1 \quad (3)$$

第二类边界条件:

$$K(H - z) \frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in \Gamma_2 \quad (4)$$

式中: x, y, z ——与主渗透方向一致的坐标轴;

K_f ——等效淡水渗透系数;

θ ——有效孔隙度;

S_f ——等效淡水单位贮水系数;

c ——溶质浓度。

变密度地下水溶质运移模型的数学模型:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) -$$

$$u_x \frac{\partial(u_x c)}{\partial x} - u_y \frac{\partial(u_y c)}{\partial y} - u_z \frac{\partial(u_z c)}{\partial z} = \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{q}{n}(c - c^*) \quad (x, y, z) \in R \quad (5)$$

初始条件和边界条件:

$$c(x, y, z, 0) = c_0 \quad (x, y, z) \in R \quad (6)$$

$$c(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = c_1(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in R \quad (7)$$

$$D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} n_x + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} n_y + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} n_z |_{\Gamma_2} = 0 \quad (x, y, z) \in R \quad (8)$$

式中: R ——计算域;

D ——弥散系数张量;

c ——溶质浓度;

c^* ——井中盐分的浓度;

c_0 ——初始浓度;

c_1 ——一类边界浓度;

u_x, u_y, u_z —— x, y, z 方向上的地下水实际平均流速。

由式(1)~(8)构成了一个描述密度逐渐变化的海水入侵区地下水运动的完整数学模型。

采用变密度地下水数值模拟工具 SEAWAT—2000 进行求解。平面上将研究区离散为 81 行、166 列边长为 50 m 的正方形网格,垂向上将模型划分为 5 层。模型中水文地质参数的分区及初值来源于大连市地下水勘查相关资料^[20-21],模型校正后参数值可查阅文献^[20-21]。开采井采用 Well 程序包处理,中部、东部充水断层的侧向补给采用 Well 程序包处理(设置为注水井),降水入渗在模型中用 Recharge 程序包处理。模型初始条件由 2007 年的水位观测值及浓度观测值获得。时间模拟时长为 2007 年 10 月 1 日—2010 年 9 月 30 日,共 36 个应力期,前两年为校正期,后一年为验证期。采用试错法手动调整对模型进行校正,拟合结果良好。

2 气候变化预测方案

2.1 预测方案构建

基于校正模型,针对未来不同降水量情景设计了多种预测方案^[20](表 1),包括降水频率和 CMIP5 气候模式下的未来降水量预测方案。预测时间为 2010 年 9 月 30 日—2040 年 9 月 30 日,除降水条件发生变化外,其余所有条件与 2010 年保持一致。

降水频率分析法将 1964—2012 年的年降水量由大到小进行排序,并计算对应年份的降水频率,20 %

为丰水年,50 % 为平水年,80 % 为枯水年。未来 30 年的降水量由 CMIP5(联合模型对比项目第五阶段)的 7 种气候模式下的预测降水量获得。2008 年 9 月,来自世界各地的 20 个气候模型小组召开会议,将地球系统项目的分析、集合与模拟的输入相结合,设置了一套新的标准化气候模型试验即联合模型对比项目第五阶段 CMIP5,它提供气候模型判断、验证、比较、说明和数据存取的共享结构^[24-27]。本研究中采用了 CMIP5 中的 7 个气候模式下的未来降水数据,这 7 种气候模式的简称分别为 BCC(Beijing Climate Center)、BNU(Beijing Normal University Earth-System Models)、CNRM(Centre National de Recherches Météorologiques)、GISS(Goddard Institute for Space Studies)、MIROC(Model for Interdisciplinary Research on Climate)、MPI(Max Planck Institute)和 MRI(Meteorological Research Institute)。如 BNU 是以陆面模式 CoLM 为核心包含全碳循环过程的地球系统模式,将多种分量模式通过耦合器技术相耦合,并通过不同站点发布模式数据,实现数据共享^[28]。

表 1 海水入侵程度预测方案

Table 1 Scenarios for predicting the extent of seawater intrusion

方案	降水方案, 降水量/mm	国家
S1-Y	枯水年, 444.6	历史降水
S2-Y	平水年, 614.9	历史降水
S3-Y	丰水年, 774.3	历史降水
S4-1-Y	BNU, RCP_2.6, 726.7	中国
S4-2-Y	BNU, RCP_4.5, 820.3	中国
S4-3-Y	BNU, RCP_8.5, 773.8	中国
S5-2-Y	CNRM, RCP_4.5, 804.4	法国
S6-2-Y	MIROC, RCP_4.5, 687.0	日本
S7-2-Y	MPI, RCP_4.5, 645.7	德国

注: S1-Y 中 S1 代表未来降水方案 1, Y 表示考虑了潮汐作用; S4-1-Y 中 S4 代表特定气候模式下的降水方案 4, 1 代表排放情景, Y 表示该预测模型考虑了潮汐作用; 除历史降水外, 其余方案均为为不同气候模式下的未来降水数据。

CMIP5 包含不同气候模式试验^[29-30], 在试验中模型提供了不同的气候“强迫”反应改变大气组成和地面覆盖。如在 CMIP5 试验中 BNU 气候模式有 3 种温室气体浓度排放情景(低排放情景 RCP_2.6, 中等排放情景 RCP_4.5, 高排放情景 RCP_8.5), 预测结果截止到 2100 年, 试验结果显示 BNU 气候模式 3 种排放情景下的未来年降水量范围分别为 550.2 ~ 1 228.8 mm, 607.1 ~ 1 069.1 mm, 和 511.6 ~ 1 007.6 mm, 年平均降水量为 762.7, 820.3, 773.8 mm。

2.2 预测结果与分析

为方便对比, 将所有模型层在水平方向上 Cl^- 浓

度大于 250mg/L 的单元格面积总和定义为总的海水入侵复合区面积(即表 2 中 S^*)。图 4 中显示的海水入侵区投影面积线为所有垂向上的含水层 250 mg/L Cl^- 等值线在平面上进行投影,叠加而形成的海水入侵范围最大区域的边界线。

图 4(a)、图 5 及表 2 为降水频率分析得到的预测降水量对未来海水入侵程度影响的结果。从图 4(a)可看出枯水年(S1-Y)较平水年及丰水年(S2-Y 和 S3-Y)海水入侵程度稍微严重。从图 5(垂向 1-5 层海水入侵程度图)还可看出,越接近含水层底部上述结果越明显。从表 2 可看出,与现状年(2010 年 10 月 1 日)的海水入侵程度相比,考虑潮汐作用下 30 年后总的海水入侵复合区面积在枯水年(S1-Y)、平水年(S2-Y)及丰水年(S3-Y)预测方案下分别增加了 20.66 %、18.83 %、16.91 %,又三种预测方案下的年平均降水量分别为 444.6、614.9、774.3 mm(表 1),枯水年年平均降水量最少,故推测出现该模拟结果的可能原因是,枯水年较少的降水补给导致了相对较低的地下水位,淡水与海水之间的不平衡加剧,海水入侵更容易发生,丰水年则完全相反,故未来海水入侵程度与未来降水量呈负相关关系。二十世纪八九十年代大连海水入侵程度最严重,政府高度重视并采取了“引碧入连”工程等多种措施来控制地下水开采,故海水入侵程度虽已相对减弱,但未来海水入侵趋势不可避免。

图 4(b)为 BNU 气候模式 3 种温室气体浓度排放情景下的未来海水入侵程度对比图,可看出不同温室气体排放情景下的预测降水量对滨海地区含水层系统海水入侵程度的影响。从图 4(b)可看出,模拟预测方案(S4-1-Y、S4-2-Y 及 S4-3-Y)中海水入侵程度几乎相同,从图上放大区域可以看出,红色线条即方案 S4-1-Y 下海水入侵程度有微小减弱(程度太小,几乎可忽略),又由表 1 可得,BNU 气候模式 3 种温室气体浓度排放情景下的未来年平均降水量分别为 726.7、820.3、773.8 mm,相差不太大,方案 S4-1-Y 下未来年平均降水量相对最小。推测出现该预测结果可能原因是,相差不太大的未来降水量导致未来地下水位也差别不大,故未来海水入侵程度也几乎无差别,方案 S4-1-Y 下未来年平均降水量相对最小,故该方案下未来海水入侵程度较其它方案呈现微小的严重趋势,但三种方案下预测结果基本差别不大。因此,可近似认为未来海水入侵程度与未来降水量呈负相关关系。值得注意的是,其它 6 种气候模式下的海水入侵程度预测结果与此预测结果基本相似,即不同的温室气体浓度

表 2 不同降水方案下海水入侵程度对比

Table 2 The comparison of the extent of seawater intrusion under different rainfall scenarios by the simulation model

方案	模型层	海水入侵程度		
		现状年入侵 面积/ km^2	考虑潮汐作用	
			入侵面积/ km^2	与现状年对比增长率/%
S1-Y	1	1.75	2.18	25.07
	2	1.80	2.25	25.25
	3	1.87	2.26	20.38
	4	1.85	2.23	21.01
	5	1.77	2.22	25.83
	S^*	2.01	2.42	20.66
S2-Y	1	1.75	2.15	23.05
	2	1.80	2.22	23.60
	3	1.87	2.24	19.35
	4	1.85	2.20	19.28
	5	1.77	2.17	22.99
	S^*	2.01	2.39	18.83
S3-Y	1	1.75	2.11	21.16
	2	1.80	2.19	21.91
	3	1.87	2.21	17.66
	4	1.85	2.17	17.54
	5	1.77	2.10	19.08
	S^*	2.01	2.35	16.91
S4-1-Y	1	1.75	2.16	23.87
	2	1.80	2.23	23.88
	3	1.87	2.24	19.70
	4	1.85	2.22	20.07
	5	1.77	2.18	23.18
	S^*	2.01	2.40	19.46
S4-2-Y	1	1.75	2.16	23.87
	2	1.80	2.23	23.88
	3	1.87	2.24	19.70
	4	1.85	2.22	20.07
	5	1.77	2.18	23.18
	S^*	2.01	2.40	19.46
S4-3-Y	1	1.75	2.16	23.87
	2	1.80	2.23	23.88
	3	1.87	2.24	19.70
	4	1.85	2.22	20.07
	5	1.77	2.18	23.18
	S^*	2.01	2.40	19.46
S5-2-Y	1	1.75	2.14	22.56
	2	1.80	2.22	23.17
	3	1.87	2.23	18.90
	4	1.85	2.20	19.04
	5	1.77	2.14	21.06
	S^*	2.01	2.38	18.30
S6-2-Y	1	1.75	2.15	22.96
	2	1.80	2.23	23.95
	3	1.87	2.25	20.05
	4	1.85	2.22	20.31
	5	1.77	2.18	23.08
	S^*	2.01	2.39	19.07
S7-2-Y	1	1.75	2.18	24.72
	2	1.80	2.23	24.09
	3	1.87	2.25	19.87
	4	1.85	2.22	20.25
	5	1.77	2.19	24.13
	S^*	2.01	2.41	19.77

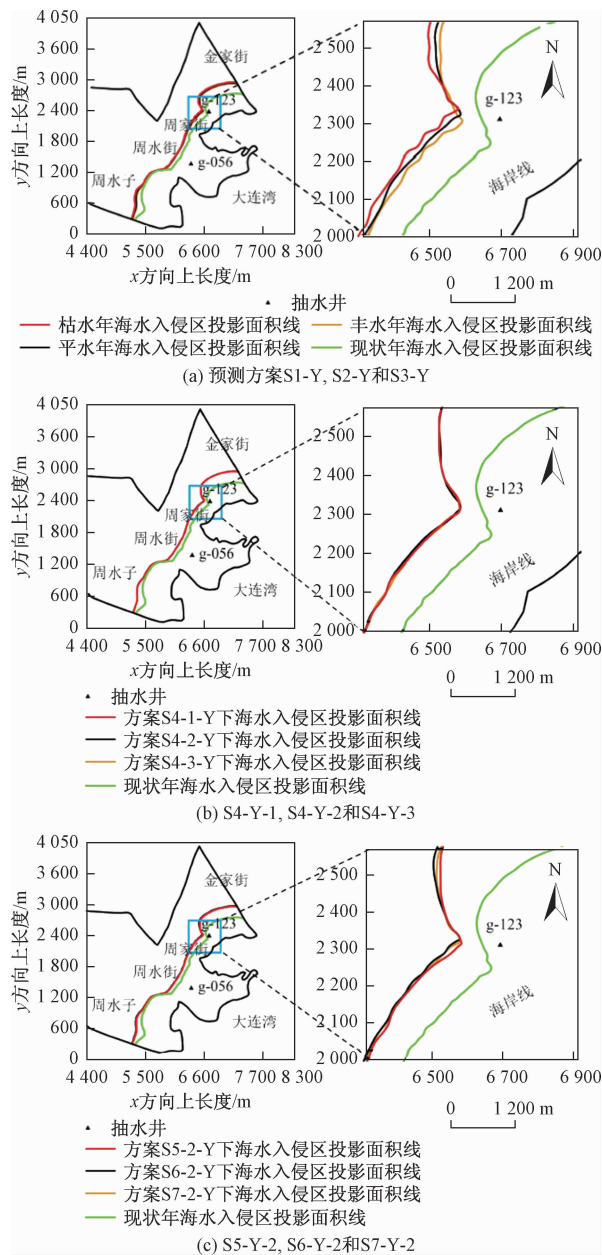
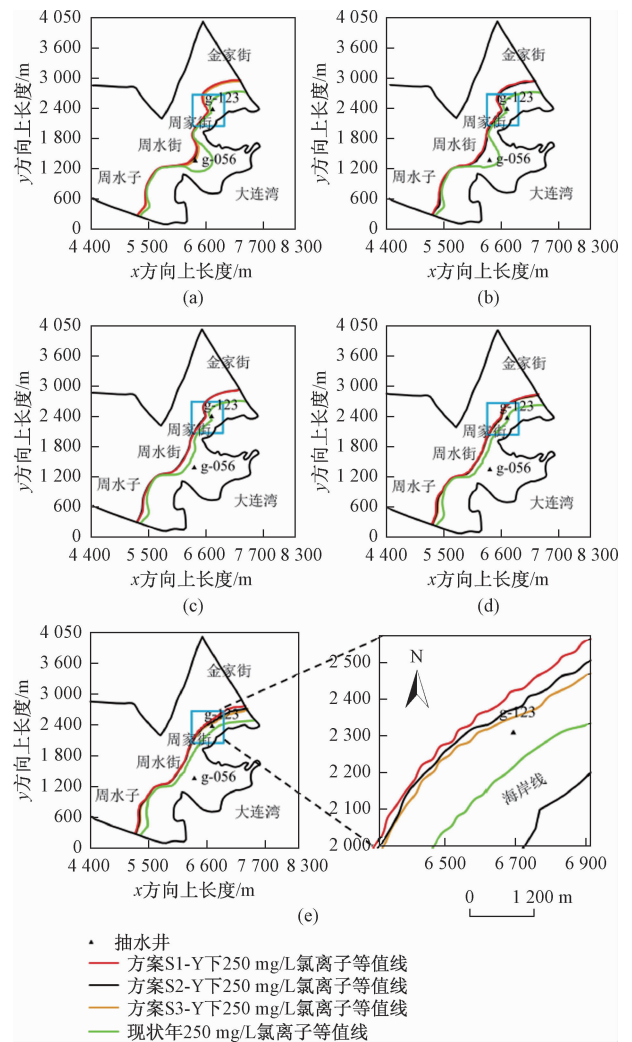
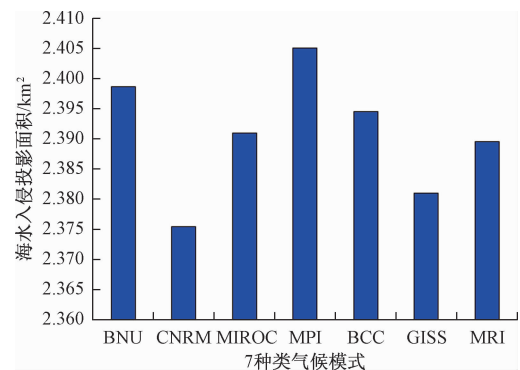


图4 不同预测方案下海水入侵复合区面积对比

Fig.4 Comparison of the composite area of seawater intrusion under prediction scenarios

排放情景对海水入侵的结果几乎没有影响,故随机选择 BNU 气候模式下的预测结果作为展示。

图6为7种气候模式下30年后的总的海水入侵复合区面积对比柱状图。图4(c)为CNRM、MIROC、MPI这3种气候模式在温室气体浓度排放情景RCP_4.5下,未来30年海水入侵程度的对比。从图7、图4(c)及表2可看出,MPI气候模式(S7-2-Y)下的海水入侵程度最严重,总的海水入侵复合区面积为2.41 km²,CNRM气候模式(S5-2-Y)下的海水入侵程度最不严重,总的海水入侵复合区面积为2.38 km²,MIROC气

图5 方案S1-Y, S2-Y和S3-Y下1~5层海水入侵程度对比
Fig.5 Comparison of the extent of seawater intrusion for respectively layers 1~5 from top to bottom under prediction scenarios S1-Y, S2-Y and S3-Y图6 7种气候模式下未来总的海水入侵复合区面积对比
Fig.6 Comparison of the total composite area of seawater intrusion in the future under the 7 different climate modes

候模式(S6-2-Y)下的海水入侵程度适中,总的海水入

侵复合区面积为 2.39 km^2 。由表 1 可得, CNRM、MIROC、MPI 三种气候模式温室气体浓度为 RCP_4.5 的排放情景下, 未来年平均降水量分别为 804.4, 687.0, 645.7 mm。推测可能原因是, 3 种预测方案中 CNRM 气候模式下未来年平均降水量相对最大, 因此该模式下预测模型中地下水位相对最高, 最不容易发生海水入侵, 模型预测结果也印证了这个观点, 故可认为未来海水入侵程度与未来降水量呈负相关关系, 降水量越大, 海水入侵程度越不严重, MPI 气候模式下预测结果也与该观点吻合。

随着经济发展和人口增长, 对地下水资源量的需求会源源不断地增加, 未来海水入侵程度较现状会更加严重, 故本研究可为合理配置地下水可开采量来控制海水入侵提供了理论基础。

3 结论

(1) 设计了两种未来降水量预测方案对未来海水入侵趋势进行预测: 未来海水入侵程度与未来降水量呈近似负相关关系, 即降水量越少, 海水入侵程度越严重。不同降水补给量对模型最后运行结果影响不同, 枯水年下的未来海水入侵程度较丰水年、平水年更加严重。7 种气候模式中, MPI 气候模式 (S7-2-Y) 下的未来海水入侵程度最严重, CNRM 气候模式 (S5-2-Y) 下的未来海水入侵程度最不严重。每种气候模式不同温室气体浓度排放情景下的预测降水量对未来海水入侵程度几乎无影响。与 CMIP5 不同气候模式下的预测降水量相结合的海水入侵预测模型, 对未来海水入侵趋势的预测较降水频率预测方案精度更高。两种预测方案下, 未来海水入侵程度将会进一步加重。

(2) 人口增长和经济发展将导致用水量逐步增加, 滨海地区海水入侵程度也将会逐步严重, 模拟及预测模型可为未来的地下水资源管理工作提供理论基础, 防止海水入侵程度继续恶化。

参考文献 (References):

- [1] OUDE ESSINK G H P. Improving fresh groundwatersupply-problems and solutions[J]. Ocean & Coastal Management, 2001, 44 (5/6): 429-449.
- [2] PANICONI C, KHLAIFI I, LECCA G, et al. Modeling and analysis of seawater intrusion in the coastal aquifer of easter Cap-Bon [J]. Transport Porous Media, 2001, 43: 3-28.
- [3] 崔相飞, 周训, 徐中平, 等. 海岸带咸淡水界面的研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 29-

35. [CUI X F, ZHOU X, XU Z P, et al. Advances in research on the fresh water-salt water interface in coastal zones [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 29-35. (in Chinese)]
- [4] 钟乐乐, 曾献奎, 吴吉春. 基于高斯过程回归的地下水模型结构不确定性分析与控制[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(1): 1-10. [ZHONG L L, ZENG X K, WU J C. Quantification and reduction of groundwater model structural uncertainty based on Gaussian process regression [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(1): 1-10. (in Chinese)]
- [5] ZENG X K, WU J C, WANG D, et al. Assessing the pollution risk of a groundwater source field at western Laizhou Bay under seawater intrusion [J]. Environmental Research, 2016, 148: 586-594.
- [6] 赵洁, 林锦, 吴剑锋, 等. 大连周水子海水入侵区地下水多目标优化管理模型[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 25-32. [ZHAO J, LIN J, WU J F, et al. Numerical simulation-optimization for optimal control of seawater intrusion in Zhoushuizi district of Dalian [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 25-32. (in Chinese)]
- [7] SONG J, YANG Y, WU J F, et al. Adaptive surrogate model based multiobjective optimization for coastal aquifer management [J]. Journal of Hydrology, 2018, 561: 98-111.
- [8] YANG Y, WU J F, LIN J, et al. An efficient simulation-optimization approach for controlling seawater intrusion[J]. Journal of Coastal Research, 2018, 84: 10-18.
- [9] YECHIELI Y, SHALEV E, WOLLMAN S, et al. Response of the mediterranean and dead sea coastal aquifers to sea level variations[J]. Water Resources Research, 2010, 46 (12): W12550. DOI: 10.1029/2009WR008708.
- [10] ESSINK GHPO. Impact of sea level rise on groundwater flow regimes. A sensitivity analysis for the Netherlands [C]// 428. Ph. D. thesis, Delft University of Technology, Delft, Delft Studies in Integrated Water Management, 1996.
- [11] SHERIF MM, SINGH VP. Effect of climate change on seawater intrusion in coastal aquifers [J]. Hydrological Processes, 1999, 13(8): 1277-1287. DOI:10.1002/(SICI)1099-1085(19990615)13:8<1277.
- [12] WERNER AD, SIMMONS CT. Impact of sea-level

- rise on seawater intrusion in coastal aquifers [J]. *Ground Water*, 2009, 47 (2): 197 – 204. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2008.00535.x.
- [13] SANFORD WE, POPE JP. Current challenges using models to forecast seawater intrusion: lessons from the Eastern Shore of Virginia, USA [J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18 (1): 73 – 93. DOI: 10.1007/s10040-009-0513-4.
- [14] SEFELNASR A, SHERIF M. Impacts of seawater rise on seawater intrusion in the Nile Delta aquifer, Egypt [J]. *Ground Water*, 2014, 52(2): 264 – 276.
- [15] XIAO H, WANG D B, HAGEN S C, et al. Assessing the impacts of sea-level rise and precipitation change on the surficial aquifer in the low-lying coastal alluvial plains and barrier islands, east-central Florida (USA) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2016, 24(7): 1791 – 1806.
- [16] HUGMAN R, STIGTER T, COSTA L, et al. Numerical modelling assessment of climate-change impacts and mitigation measures on the Queren? a-Silves coastal aquifer (Algarve, Portugal) [J]. *Hydrogeology Journal*, 2017, 25(7): 2105 – 2121.
- [17] GREEN N R, MACQUARRIE K T B. An evaluation of the relative importance of the effects of climate change and groundwater extraction on seawater intrusion in coastal aquifers in Atlantic Canada [J]. *Hydrogeology Journal*, 2014, 22(3): 609 – 623.
- [18] CARNEIRO J F, BOUGHRIBA M, CORREIA A, et al. Evaluation of climate change effects in a coastal aquifer in Morocco using a density-dependent numerical model [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 61(2): 241 – 252.
- [19] UNSAL B, YAGBASAN O, YAZICIGIL H. Assessing the impacts of climate change on sustainable management of coastal aquifers [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(6): 2183 – 2193.
- [20] ZHAO J, LIN J, WU J F, et al. Numerical modeling of seawater intrusion in Zhoushuizi district of Dalian City in Northern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 1 – 18.
- [21] 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 J, LIN J, WU J F, 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)]
- [22] 薛禹群,吴吉春,谢春红,等. 莱州湾沿岸海水入侵及咸水运移研究[J]. 科学通报, 1997, 42(22): 2360 – 2367. [XUE Y Q, WU J C, XIE C H, et al. The research of seawater intrusion and saltwater transport in the southern coast of Laizhou Bay [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(22): 2360 – 2367. (in Chinese)]
- [23] LANGEVIN C D, SHOEMAKER W B, GUO W. MODFLOW—2000, the U. S. Geological Survey Modular Ground Water Model—Documentation of the SEAWAT—2000 version with the variable-density flow process (VDF) and the integrated MT3DMS Transport Process (IMT) [R]. U S: Geological Survey Open File Report, 2003.
- [24] TAYLOR K E, DOUTRIAUX C, PETERSCHMITT J. Climate model output rewriter (CMOR) [R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2004. DOI:10.2172/15014202.
- [25] TAYLOR K E, DOUTRIAUX C, PETERSCHMITT J. Climate model output rewriter (CMOR) [R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2004. DOI:10.2172/15014202.
- [26] TAYLOR K E, STOUFFER R J, MEEHL G A. A summary of the CMIP5 experiment design [M]. PCDMI Report, 2009: 33.
- [27] TAYLOR K E, STOUFFER R J, MEEHL G A. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(4): 485 – 498.
- [28] 吴其重,冯锦明,董文杰,等. BNU-ESM 模式及其开展的 CMIP5 实验介绍 [J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(4): 291 – 294. [WU Q C, FENG J M, DONG W J, et al. Introduction of the CMIP5 experiments carried out by BNU-ESM [J]. *Advances in Climate Change*, 2013, 9(4): 291 – 294. (in Chinese)]
- [29] HIBBARD K A, MEEHL G A, COX P M, et al. A strategy for climate change stabilization experiments [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2007, 88(20): 217 – 221.
- [30] MEEHL G A, HIBBARD K A. A strategy for climate change stabilization experiments with AOGCMS and ESMS [C]// World Climate Research Programme. WCRP Informal Report No. 3, ICPO Publication No. 112, IGBP Report No. 57. Geneva, 2007.

编辑:张若琳