

龙门港镇海水入侵三维数值模拟研究

李伟¹ 杨源祯¹ 李朋²

1 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心 2 广东省地质物探工程勘察院

DOI:10.12238/eep.v4i4.1418

[摘要] 龙门港镇是广西壮族自治区钦州市的一个港口镇,地下水是岛上居民生活和工农业生产用水的重要水源。由于长期不合理开采,已经出现海水入侵问题,对龙门港镇居民生活和生产造成了影响。为此,本文在实地调查和收集整理分析相关资料的基础上,基于溶质运移相关理论,采用有限元数值模拟方法,利用COMSOL Multiphysics软件建立了龙门港镇海水入侵数值模型,对龙门港镇1000天以内海水入侵发展趋势进行了预测。结果表明,龙门港镇局部出现了海水入侵现象。为防止龙门港镇地区海水入侵进一步恶化,建议进一步完善地下水动态监测网,采取有效措施防止海水入侵进一步发展。

[关键词] 钦州湾; 海水入侵; 数值模拟; COMSOL Multiphysics

中图分类号: Q938.1 文献标识码: A

Research on Three-dimensional Numerical Simulation of Seawater Intrusion in Longmen Port Town

Wei Li¹, Yuanzhen Yang¹, Peng Li²

1 Yantai Geological Survey center of Coastal Zone, China Geological Survey

2 Guangdong Institute of Ecological and Geophysical Exploration

[Abstract] Longmen is a port town in Qinzhou, Guangxi Zhuang Autonomous Region, where groundwater is the important source for residents' living, industrial and agricultural production on the island. Seawater intrusion has appeared in Longmen Port town due to long term unreasonable exploration, which has caused serious effects on residents' life and production. Therefore, on the basis of field investigation, collection and analysis of relevant data, based on solute transport theory, using finite element numerical simulation method, using COMSOL Multiphysics software to establish a numerical model of seawater intrusion in Longmen Port Town, and forecast the development trend of seawater intrusion in Longmen Port town within 1000 days. The results show that seawater intrusion occurs in longmen Port town. In order to prevent seawater intrusion from further worsening, it is suggested to further improve the groundwater dynamic monitoring network and take effective measures to prevent seawater intrusion from further developing.

[Key words] Qinzhou Bay; Seawater intrusion; numerical simulation; COMSOL multiphysics

引言

广西壮族自治区北部湾经济区城镇化进程的加快带来用水量的快速增长,加强应对海水入侵、水源污染等突发事件造成的饮水紧张具有重要的战略意义^[1-2]。

海水入侵模型的研究已有百余年,预测方法主要有解析法和数值模拟法^[3-5]。由于海岸带地区水文地质条件复杂,影响因素众多,咸淡水界面复杂,解析法难以满足要求^[6-7]。与解析法相比,采用数值模型可以刻画复杂水文地质条件和人为开采地下水引起的咸淡水界面运移

规律^[8-9]。海水入侵的过渡带非稳定流模型由PINDER等^[10]首次提出,并求出了Henry模型的有限元数值解;LEE等^[11]考虑浓度的变化,首次建立剖面二维有限元模型,用于模拟某一地区的海水入侵问题,此类过渡带模型假定海水入侵过程中水体是均值流体,忽略了水体中溶质浓度的变化对水流速度的影响。此后HUYAKORN等^[12]提出了变密度海水入侵过渡带的三维有限元模型,考虑了沿海多层含水层中水头、密度和浓度的相互作用,薛禹群等^[13]首次建立了国内三维

有限元海水入侵模型,考虑了过渡带变密度、降水入渗及过度抽水等因素影响,并利用该模型研究了山东龙口-莱州地区的海水入侵过程;成建梅等^[14]建立改进的三维有限元海水入侵模型,研究了烟台夹河中、下游地区咸淡水界面的运移规律;KALERIS等^[15]建立了沿海承压含水层的二维和三维有限元变密度过渡带模型,此类模型考虑了密度变化,从用变密度咸淡水混合液的渗流和溶质运移两个偏微分方程来分别描述,是过渡带模型的进一步发展和完善。

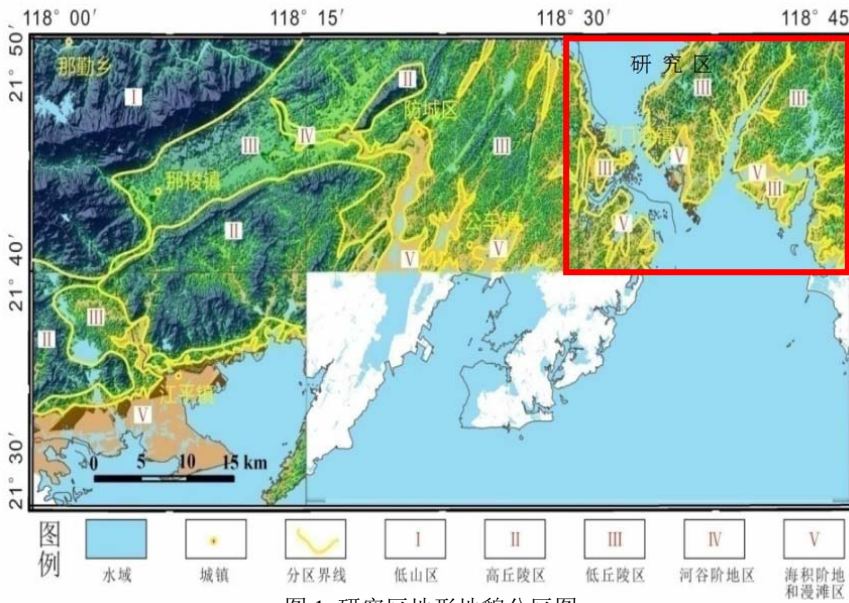


图1 研究区地形地貌分区图

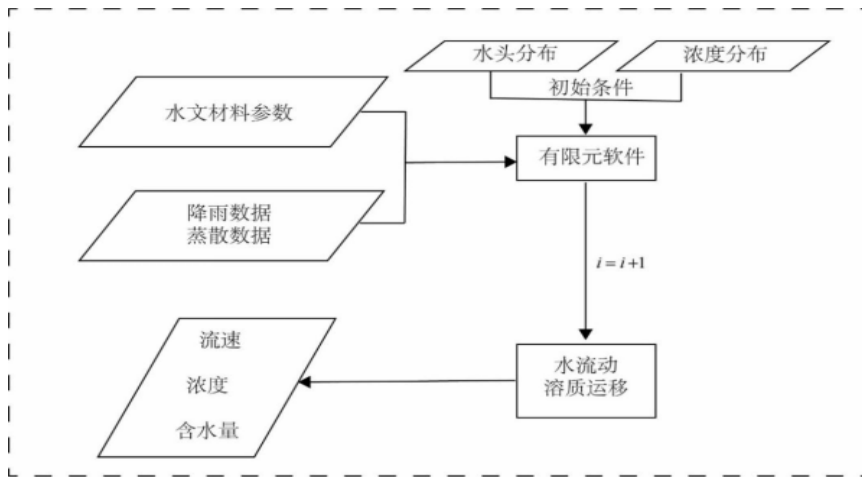


图2 研究区海水入侵数值模拟流程图

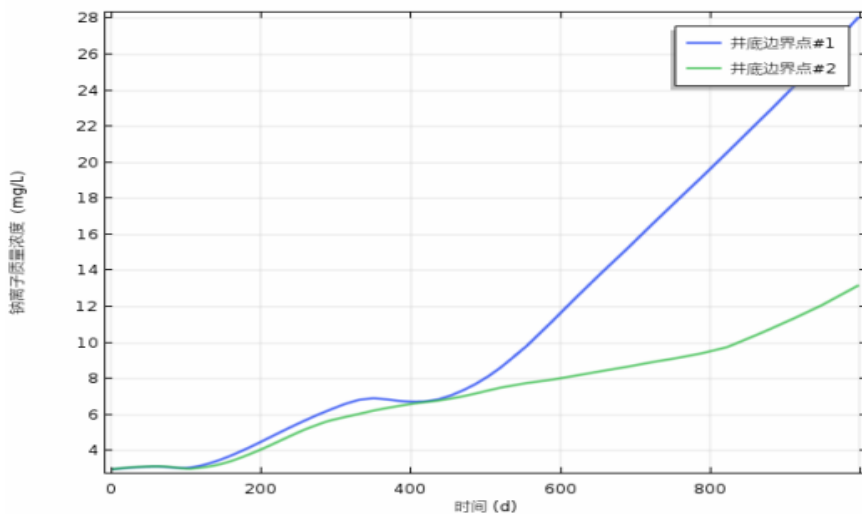


图3 离子浓度时间变化曲线图

介质的溶质运移模块建立了海水入侵的三维数值模型。结合当地的发展规划,为钦州湾沿岸地下水资源合理开发及管理提供可靠的技术支持。

1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区南部,北部湾经济区的西南角,包括防城港市港口区和钦州市钦南区,地理坐标为东经108° 26' -108° 42', 北纬21° 42' -21° 50'。地势大致为北西高,南东低,由西北向东南倾斜,见图1。研究区属热带-亚热带湿润季风气候区,年平均气温21.1℃-22.4℃,降雨量较充足,多年平均降雨量为2200mm-2400mm。

地层岩性以泥质钙质粉砂岩、细粉砂岩、细砂岩、粗砂岩为主,岩层厚度一般小于10m,最小30cm,最大21m。岩石较破碎,岩层孔隙裂隙较发育,透水系数较高。

2 海水入侵数值模拟

2.1 数值模型构建

本文采用具有多物理场耦合功能的COMSOL multiphysics软件进行数值模拟,以有限元为基础,通过求解偏微分方程或偏微分方程组来实现真实物理现象的仿真^[6]。本文以广西壮族自治区钦州市龙门港镇某水井实地调查数据为依托,建立三维数值模型,进行海水入侵模拟及预测。海水入侵建模框架可分为两部分:水流动模拟和溶质运移模拟。

2.2 数值模型建立

海水入侵建模框架可分为两部分:水流动模拟和溶质运移模拟。如图2所示,首先设置模型初始的水头(水势)分布和浓度分布,再设置材料参数,包括水流动方程计算所需的饱和时的渗透系数、孔隙度、残余含水量和VG模型中的 α_{VG} 和参数 n_{VG} ,以及计算溶质运移方程所需的溶质扩散系数、土壤材料的弥散度等。然后设置模型边界条件,其中上表面的边界条件的设置依赖于降雨量和蒸散量数据。通常蒸散量是土壤蒸发与植物蒸腾作用导致的浅地表向大气输出的水汽通量和,是系统水量平衡计算中流失的水分。蒸发量和降雨量的差值决定了上边界条件,即随时间变化的地表水通量的边界条件,其正

本文以广西壮族自治区钦州湾地区龙门港镇海水入侵调查为例,基于COMSOL Multiphysics软件的孔隙介质中地下水变饱和流动模块以及部分饱和

负决定了上边界的水分是入渗还是蒸发。而蒸腾量数据则是用于植物根系吸水导致的水分流失的模拟。确认每层孔隙介质模型的土壤水文参数(饱和渗透系数、孔隙度、残余含水率、van Genuchten模型参数),并对其剖分,本文选用有限元方法对其建模,将模型材料参数、边界条件和初始条件都输入到有限元软件的水流动和溶质运移模块,即可计算出水头和溶质浓度的时空分布而完成建模。

3 数值模拟结果与分析

3.1 离子浓度的时间变化

该模型模拟了第0天至第1000天的浓度的时空分布。首先在井底提取两点输出其浓度的时间变化曲线,分析抽水对海水入侵的影响。如图3所示,宏观上来看,在未抽水前井底浓度较稳定,大约第120天以后浓度开始上升,第400天以后井底浓度开始更大速率的上升。

3.2 时移的浓度剖面变化

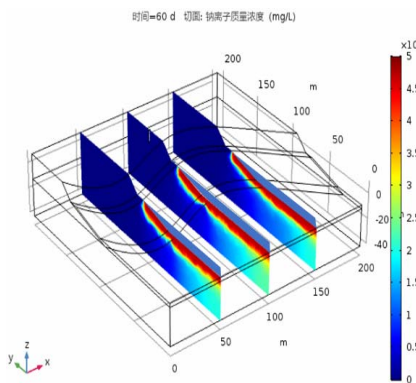


图4 抽水前模型纵切片的浓度等值线图

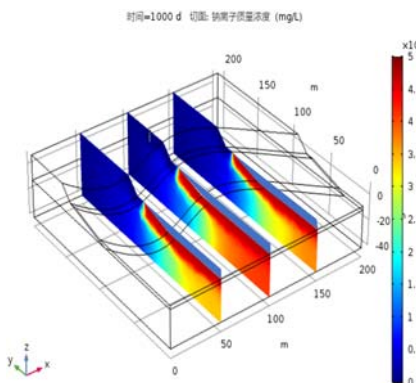


图5 第1000天模型-5米纵切片的浓度等值线图

为了更直观地反映模型内部的溶质运移过程,本文提取不同时刻的模型切片空间浓度分布。图4显示抽水前模型三维切片浓度分布,此时海水入侵仅存在海底附近,而经历了840天间歇式抽水后的第1000天海水溶质有明显向内陆入侵的趋势,见图5。

最后,通过对井周围的浓度剖面进行成图来模拟近海陆地地区地下水受到海水入侵的情况。选取图3中井底浓度时间曲线的几个特征拐点所对应的时刻显示,分别为第60天、第120天、第400天以及第1000天的剖面。根据2020年9月23日的实地井调查与水化学分析资料显示,该井位的井水中所含的钠离子浓度为145mg/L,故在图6-9中将该等值线用白线特别标出以变对比分析。所如图6所示,抽水开始前井周围的溶质浓度均匀且处于较低的值。

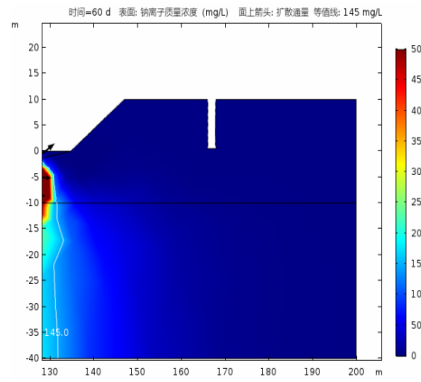


图6 第60天模型井周围的Na+浓度等值线图

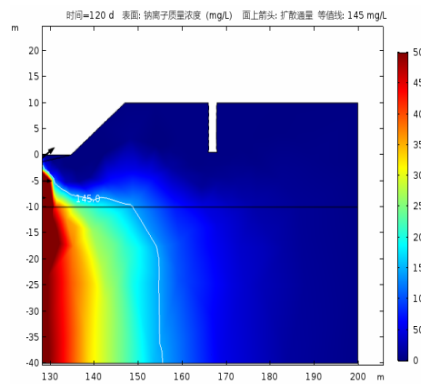


图7 第120天模型井周围的Na+浓度等值线图

120天后(图7)海水扩散前缘开始向

储水层侵入,浓度为145mg/L的边界向井方向扩散。第400天时(图8)145mg/L的边界已开始接近井底,该等值线距离井底约5m。第1000天的剖面(图9)可以明显地看到145mg/L的等值线已出现在井底周围约3m处,此时即使停止抽水也会导致井水盐化。据现场资料显示该井目前确已盐化。村民仍在进行少量抽水用于农业灌溉,这很有可能会加重海水入侵以及井水盐化的现象。

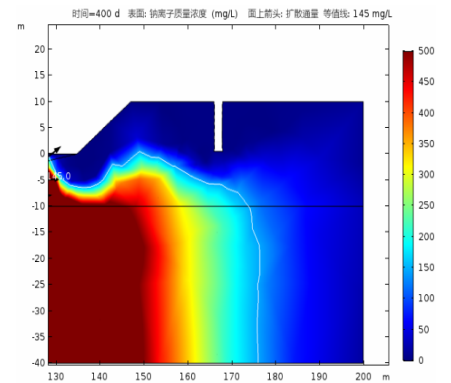


图8 第400天模型井周围的Na+浓度等值线图

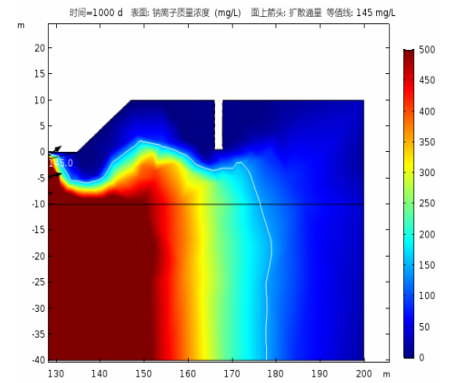


图9 第1000天模型井周围的Na+浓度等值线图

4 结论

(1) 本文采用相关资料,利用有限元三维数值建模方法针对龙门港地区海水入侵问题开展研究。模拟结果显示,研究区海水入侵是一个复杂的非线性过程,溶质浓度的时间变化是非均匀的,预测在一年以后海水扩散前缘将开始接近模拟井底,1000天后模拟井周围会出现明显盐化现象。

(2) 已有的综合水文地质调查资料

和本次数值模拟结果都已表明, 龙门港地区海水入侵的主要原因是滨海地下水的大量开采。数值模拟结果显示, 海水入侵的进程与当地的地下水抽水量, 包括抽水速率以及抽水频度密切相关, 且海水入侵的进程在停止抽水后仍会继续。

(3) 海水入侵可能导致表层水土环境和生态环境的系列变化, 带来的许多负面影响存在时间滞后过程。建议对研究区地下水化学组分和有关生态环境进行追踪监测。同时加强海水入侵对居民生活用水影响的宣传与科普工作, 进一步提升沿海居民海水入侵的危机感及保护地下水资源的责任感。

[参考文献]

[1] 李春晖, 钟玉秀, 张海涛, 等. 我国饮用水应急水源地建设存在问题与对策[J]. 水利发展研究, 2017, (4): 5-8, 55.

[2] 李爱花, 郇建强, 张海滨, 等. 城市应急备用水源工程概念及建设思路[J]. 中国水利, 2016, (16): 14-17.

[3] ABD-ELHAMIDHF, JAVADIAA. Adensit y-dependant finite element model for analysis of saltwater intrusion in coastal aquifers[J]. Journal of Hydrology. 2011, 401(3-4): 259-271.

[4] FRIND E O. Simulation of long-term transient density-dependent transport in groundwater[J]. Water Resources. 1982, 5(2): 73-88.

[5] SEFELNASR A, SHERIF M. Impacts of Seawater Rise on Seawater Intrusion in the Nile Delta Aquifer, Egypt[J]. Groundwater. 2014, 52(2): 264-276.

[6] 林锦. 变密度条件下地下水模拟优化研究[D]. 杭州: 浙江大学理学院, 2008.

[7] 杨蕴, 吴剑锋, 林锦, 等. 控制海水入侵的地下水多目标模拟化管理[J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 579-588.

[8] 张彬, 李玉涛, 石磊, 等. 海岛环境下地下水封油库海水入侵数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1366-1374.

[9] 郑王琼. 龙门港镇三维海水入侵数值模拟及预测研究[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(03): 371-378.

[10] PINDER G F, COOPER H H. A numerical technique for calculating transient position of saltwater front[J]. Water Resources Research. 1970, 6(3): 875.

[11] LEE C H, CHENG R T S. On seawater encroachment in coastal aquifers[J]. Water Resources Research, 1974, 10

(5): 1039-1043.

[12] HUYAKORN P S, ANDERSEN P F, MERCER J W, et al. Saltwater intrusion in aquifers: Development and testing of a three-dimensional finite element model[J]. Water Resources. 1987, 23(2): 293-312.

[13] 薛禹群, 谢春红, 吴吉春, 等. 龙口-莱州地区海水入侵含水层三维数值模拟[J]. 水利学报, 1993, (11): 20-33.

[14] 成建梅, 陈崇希, 吉孟瑞, 等. 山东烟台夹河中、下游地区海水入侵三维水质数值模拟研究[J]. 地学前缘. 2001, 8(1): 179-184.

[15] KALERISV K, ZIPGAS A I. The effect of cutoff walls on saltwater intrusion and groundwater extraction in coastal aquifers[J]. Journal of Hydrology. 2013, 476(1): 370-383.

[16] Cheng X L, Cui C Y, Sun S J. 2014. Application of COMSOL multiphysics in geotechnical engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press.

作者简介:

李伟(1985--), 男, 汉族, 山东潍坊人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 海岸带综合调查。