

基于 FEFLOW 的海水入侵数值模拟

卢 薇²,朱照宇¹,刘卫平²

(1. 中科院广州地球化学研究所, 广东 广州 510000; 2. 广东省科学院广州地理研究所, 广东 广州 510070)

[摘要] 在系统分析珠江口东岸地区地质及水文地质条件的基础上,建立了研究区海水入侵三维溶质模型,利用基于有限元原理的 FEFLOW 软件对建立的模型进行求解,用地下水水位和浓度的动态观测资料对模型进行了识别和校验。运用识别后的模型预测了在不同开采条件下,研究区海水入侵的趋势。研究结果表明减少地下水开采量,海水入侵面积可逐步减少,入侵可得到有效控制;在减少开采量的情况下,相较于基岩裂隙含水层,第四系含水层海水入侵面积收缩较慢。

[关键词] 海水入侵;数值模拟;三维模型;模型预测

[中图分类号] P641.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1004-1184(2010)03-0019-03

Salt Water Intrusion Numerical Simulation on Application Based on FEFLOW

LU Wei^{1,2}, ZHU Zhao-yu¹, LIU Wei-ping²

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510000, Guangdong; 2. Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Provincial Academy of Sciences, Guangzhou 510070, Guangdong)

Abstract: The seawater intrusion in the region of the eastern Pearl River Estuary has severely deteriorated fresh water quality with the increase of groundwater pumping. Based on analysis of the geological and hydro-geological condition in the study area, a three-dimensional flow and mass transport model has been developed to study the saltwater intrusion in the area. Using FEFLOW software based on the finite element theory, this article solves the mathematic model, and calibrates the model by long-term observation data of hydraulic head and chloride concentration. Using the calibrated model, it forecasts the evolution tendency of water saline quality under different conditions of exploitation. The modeling results indicate that: on the condition of reduction exploitation, the extent and area of saltwater intrusion in quaternary and bedrock aquifer are gradually decreased and area of saltwater intrusion in quaternary aquifer reduced fast than in bedrock aquifer, which provides scientific basis for preventing saltwater intrusion in this area.

Keywords: Salt water intrusion; three-dimensional model; numerical simulation and model prediction

海水入侵是沿海地区社会经济发展,引起自然环境条件改变而导致的海水向沿海地区储水层的侵入。这种灾害具有隐蔽性强、动态变化多、潜在危害大、难以治理等特点^[1]。FEFLOW (Finite Element subsurface FLOW system)是德国 WASY水资源规划和系统研究所开发的基于有限单元法的地下水模拟软件包,它具有图形人机对话、地理信息系统数据接口、自动产生空间多种有限单元网、空间参数区域化以及快速精确的数值算法等特点,广泛应用于地下水水流、污染物和热传输过程的模拟。本文从水文、地质和地下渗流力学的基本原理出发,运用 FEFLOW 软件,利用数值法对珠江口东岸地区的海水入侵进行了数值模拟研究,预测了不同开采条件下的海水入侵趋势,为当地防止和减轻海水入侵提供科学依据。

1 研究区概况及水文地质概念模型

研究区位于珠江口东岸,深圳市西部。该区由于城市发展,于 20 世纪 80~90 年代在自来水不能到达的地方大规模开采地下水,引发了较大规模的海水入侵,引起水质恶化和土地盐渍化等一系列环境问题。近年来,由于研究区自来水

供水网络不断完善,开采地下水量大大减少,海水入侵问题得到了缓解,但一定程度上仍对当地的经济建设与社会发展产生不良影响。

研究区北部以山前为边界,南部以珠江口为界,西至沙浦围,东至布吉河、深圳河,面积 331 km²。区内普遍分布孔隙含水层和基岩裂隙含水层两个含水层组,地下水主要接受大气降雨补给和侧向径流补给。通过分析所收集的钻孔资料,同时根据研究区地下水含水介质的物质组成及水文地质特性,对本区的含水系统结构进行了适当的归并和概化,将其内部结构概化为 4 层,由上至下分别为:弱透水层:为弱透水层,主要由人工填土、淤泥质粘土和淤泥组成,该层厚度大部分在 1~10m 之间;第 1 含水层(第四系孔隙含水层):主要岩性为中粗砂和砾砂,含水层厚度约为 1.5~15m;隔(弱透)水层:由残积砾质粘性土组成,渗透性差,属于隔水层、弱透水层,厚度约为 5~20mm;第 2 含水层(基岩裂隙含水层):基岩统一概化为 1 层,岩性以块状花岗岩为主,部分为变质岩、混合岩及石英砂岩,该层由风化裂隙发育的强风化层和中风化层的上部组成,厚度为 40~120m。

由于含水层分布广、厚度较大,在常温常压地下水运

[收稿日期] 2009-09-29

[作者简介] 卢薇(1978-),女,陕西咸阳人,助理研究员,博士研究生,主要从事地下水环境方面的研究。

动符合达西定律,考虑浅、深层之间的流量交换以及软件的特点,地下水运动可概化成空间三维流,地下水系统的垂向运动主要是层间的越流,三维立体结构模型可以很好的解决越流问题;地下水系统的输入、输出随时间、空间变化,故地下水为非稳定流;水文地质参数随空间变化,体现了系统的非均质性,在水平与垂向上具有明显的方向性,所以参数概化成各向异性。

研究区东部以布吉河和深圳河为界,为河流补给边界,可作为定水头边界和定浓度边界;北部边界为山前侧向补给边界,可以作为定水流和定溶质的通量边界;南部和西部为临海边界,作为定水头边界和溶质运移的定浓度边界,考虑潮汐作用的影响,以每天平均海平面作为水流的第一类边界值,该边界为一时间序列函数;河流作为水流和溶质的转换边界。垂向上,潜水含水层自由水面为系统的上边界,通过该边界,潜水与系统外发生垂向水量交换,如大气降水入渗补给;由于底部未风化的花岗岩几乎不透水,所以下部以花岗岩中风化层底板为底部边界,处理为零通量边界。

2 数学模型

对于上述非均质、各向异性、空间三维结构、非稳定地下水流系统模型,可用地下水流连续性方程及其定解条件式(1)来描述,溶质运移方程及其定解条件用式(2)来描述。

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K_{ij} \left(\frac{\partial H}{\partial x_j} + C e_j \right) \right] = S_s \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{q}{\phi} \\ & H(x, 0) = H_0(x_1) \\ & H(x_i, t) \Big|_1 = H_B(x, t) \\ & -v_i n_i \Big|_2 = 0 \\ & -v_i n_i \Big|_{2-2} = -\frac{B_2}{\mu_d} v_{B2} \\ & -v_i n_i \Big|_{2-1} = \left(-\frac{e}{W} W^* - \mu_d \frac{\partial H^*}{\partial t} \right) n_3 \\ & H^*(x, t) \Big|_{2-1} = x_3 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: K_{ij} 为渗透系数张量; H 为淡水的参考水头; x_i, x_j ($i, j = 1, 2, 3$)为笛卡尔坐标; ρ 为密度耦合系数; C 为溶质浓度; e_j 为第 j 个重力单元向量分量; S_s 为储水系数; t 为时间; ϕ 为孔隙度; q 为单位体积多孔介质源汇项的流量; v_i 为实际渗流速度。 ρ_0 为混合流体(咸淡水)和淡水的密度。 H_0 为初始水头; H_B 为边界上给定的水头; n_i 为定通量边界上的单位面积上流入流出的水量; v_{B2} 为定通量边界上流入流出水的密度; H^* 为潜水面上的参考水头, W^* 为潜水面变动带水的密度, μ_d 为重力给水度; n_i 为边界 $2_2, 2_1, 2_1$ 上在 x_i 轴方向的法向单位矢量; x_3 为潜水面某点的高度; v_i 为地下水渗透速度在 x_i 轴上的分量。

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial (u_i C)}{\partial x_i} = \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{q}{\phi} C^* \\ & C(x_i, 0) = C_0(x_i, t) \\ & C(x_i, t) \Big|_1 = C_B(x_i, t) \\ & \left[D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} + \mu_i C \right] n_i \Big|_2 = 0 \\ & -D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} n_i \Big|_{2-1} = (1 - \frac{*}{W}) \frac{C}{\mu_d} \frac{\partial H^*}{\partial t} n_3 + \frac{W}{\mu_d} \left(-\frac{e}{W} C - C^* \right) n_3 \\ & -D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} n_i \Big|_{2-2} = \frac{v_{B2}}{\mu_d} \left(-\frac{B}{W} C - C^* \right) n_3 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: u_i 为地下水渗流速度在 x_i 上的分量; C_0 为初始浓度; C_B 为边界上的浓度; $1_1, 2_2, 2_1, 2_1$ 为浓度给定边界、隔水边界、潜水边界和弥散通量边界; n_i 为边界上外法向单位矢量; D_{ij} 为弥散系数张量 ($i, j = 1, 2, 3$); ϕ 为孔隙度; q 为单位多孔介质流量; ρ_0 为淡水密度; ρ 为混合液体密度; C 为溶质浓度; C^* 为源(汇)项浓度。其中渗透流速可表示为:

$$u_j = K_{ij} \left(\frac{\partial H}{\partial x_j} + C e_j \right)$$

3 数值模型

数值模型的建立,实质是借助于计算机利用先进的数值方法和处理工具对建立的数学模型进行求解,并利用研究区某一特定点位已知特征值对模型求解的数值解进行识别的过程。采用 FEFLOW 软件对上述模型进行求解。

3.1 模型的离散

对研究区采用不规则三角剖分,剖分后的研究区共 94 775个结点,148 256个单元格。在本模型中,剖分单元加密地段主要为海水入侵界线和河流,并将观测孔尽量放在节点上。根据各层岩性差异和水文地质试验成果将第 1至 4层的含水介质共分为 20个给水度和释水系数子区,将第四系和基岩裂隙两个含水层划分为 18个渗透系数子区和 15个弥散系数子区,同时划分了 4个降雨入渗补给系数子区。

3.2 数值模型中的源汇项及初始水位和浓度

源汇项为开采井和降雨补给。源项主要是降水,降雨入渗按入渗系数的分区,经多次拟合调参后确定 4个子区的降雨入渗系数。汇项本次模拟采用人为给定开采井的位置和开采量,然后换算成相应分区的开采强度分配到对应的单元格。

利用研究区 47个水位、水质观测孔(井)在 2008年 6月统测水位、水质数据,按照内插法和外推法获得含水层的初始水位和浓度,考虑整体流场赋虚拟水位值,然后通过模拟运算,反复推敲,直到得到满意的初始流场及浓度场。研究区基岩初始流场见图 1。



图 1 研究区基岩初始流场图

3.3 模型的识别和校验

模型的识别是利用研究区内特征点、线、面、体上已知的地下水动态观测资料与模型在该点上的计算值进行对比,以此判断数值模型对地质体的仿真程度,通常要进行反复的修改参数和调整某些源汇项才能达到较为理想的拟合结果。本模型的识别与检验过程采用试估-校正法。模型的识别和校验主要遵循以下原则:模拟的地下水流场、浓度场要与实际地下水流场、浓度场基本一致,即要求地下水模拟等值线与实测地下水位、浓度等值线形状相似;模拟地下水的动态过程要与实测的动态过程基本相似,即要求模拟的地下水位、浓度过程线与实际过程线形状相似;从均衡的角度出发,模拟的地下水均衡变化与实际要基本相符;识别的水文地质参数要符合实际水文地质条件。

模拟时期为 2008 年 6 月到 2008 年 12 月,根据上述原则,模型经过多次运行、调参、优化,最终确定了模型结构、参数和均衡要素,使模型计算水位、浓度动态变化与观测水位、浓度动态变化达到最佳拟合状态。表 1 给出了部分观测孔水位观测值与计算值的比较,表 2 给出了部分长观孔 Cl^- 浓度观测值与计算值的比较。经分析发现:模型计算水位与观测水位的绝对误差在 0.1 m 以内的点占 64%,在 0.1 m ~ 0.2 m 的点占 18%,在 0.2 m 以上的点占 18%,从总体结果来看,绝对误差在 0.2 m 以内的拟合点位达到 82% 以上,浓度误差也控制在较小的范围内。各观测孔的水位、浓度拟合结果较好,可见所建立的模型基本达到模型精度要求,符合工作区水文地质条件,基本能够反映地下水的动态变化,达到了对地下水系统仿真的目的,可以作为研究区海水入侵动态预测的模型。

表 1 观测孔水位计算值与实测值的对比 m

序号	时间	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
1	实测值	3.27	3.52	3.47	3.41	3.47	3.47	3.43
	计算值	3.36	3.42	3.49	3.45	3.44	3.42	3.39
2	实测值	5.12	5.50	5.12	4.73	5.01	4.75	4.69
	计算值	5.05	5.45	5.21	4.99	5.07	4.81	4.74
3	实测值	3.14	3.89	3.86	3.82	3.78	3.55	3.50
	计算值	3.21	3.76	3.91	3.73	3.70	3.41	3.45
4	实测值	5.54	5.83	5.71	5.60	5.65	5.42	5.40
	计算值	5.44	5.79	5.86	5.71	5.68	5.52	5.32
5	实测值	2.33	2.77	2.70	2.63	2.67	2.60	2.57
	计算值	2.62	2.82	2.75	2.63	2.54	2.64	2.77
6	实测值	5.20	5.63	5.57	5.48	5.52	5.40	5.35
	计算值	5.06	5.46	5.23	5.38	5.27	5.21	5.19
7	实测值	4.80	5.15	5.05	4.93	4.98	4.74	4.70
	计算值	4.92	5.21	5.05	5.01	4.98	4.83	4.78
8	实测值	2.36	2.38	2.43	2.49	2.50	2.40	2.38
	计算值	2.35	2.37	2.41	2.46	2.42	2.48	2.41

4 模型预测

经过模型的识别和检验,证明所建立的数学模型能够较真实地反映研究区地下水系统的实际情况,可以用其对未来海水入侵的运动状态进行预报。研究区 2008 年第四系和基岩裂隙含水层海水入侵实测面积分别为 117.74 km² 和 90.52 km²;地下水开采量为 2 000 × 10⁴ m³/a,多年平均降雨入渗量 2 312 × 10⁴ m³/a,研究区地下水资源处于正均衡状态。考虑到研究区正严格控制地下水开采,并逐步减少开采量,故模拟在年开采量分别为 2 000 × 10⁴ m³/a, 1 500 × 10⁴ m³/a, 1 000 × 10⁴ m³/a 和 500 × 10⁴ m³/a 的条件下,研究区 2010 年末的海水入侵面积。海水入侵面积以 Cl^- 浓度大于 250 mg/L 计。

模拟结果如表 3 所示,在开采量为 2 000 × 10⁴ m³/a 条件下,2010 年第四系含水层海水入侵面积为 115.98 km²,基岩裂隙含水层海水入侵面积为 90.52 km²;而在开采量为 500 × 10⁴ m³/a 条件下,第四系与基岩裂隙含水层海水入侵面积分别为 96.77 km² 和 71.34 km²,分别减少了 19.21 km² 和 19.18 km²。表明减少地下水开采量,海水入侵面积可逐步减少,入侵可得到有效控制。

此外,在研究中发现某些地下水开采量不是很大的区域,第四系孔隙水也会出现海水入侵区,而同地区的基岩裂隙水受海水入侵作用不明显,并且在减少开采量的情况下,相较于基岩裂隙含水层,第四系含水层海水入侵面积收缩较慢,这可能是由于除了受地下水开采量的影响,海滨地区的第四系松散岩孔隙水比基岩裂隙水更容易受海水潮汐作用影响的结果。

表 2 观测孔 Cl^- 浓度计算值与实测值的对比 mg/L

序号	时间	6月	8月	10月	12月
1	实测值	20.1	30.9	54.5	35.0
	计算值	18.5	36.0	46.8	41.1
2	实测值	32.6	41.8	37.4	38.4
	计算值	35.7	38.2	39.3	40.1
3	实测值	27.4	17.5	13.6	21.3
	计算值	24.8	19.9	16.8	20.0
4	实测值	259.2	308.4	452.3	452.4
	计算值	271.1	326.7	437.2	443.2
5	实测值	8490.9	9200.0	9695.3	10000.0
	计算值	8850.7	9220.7	9651.8	9750.6
6	实测值	48.48	38.37	45.71	83.37
	计算值	30.26	35.08	36.9	58.41
7	实测值	259.07	310.45	457.16	368.25
	计算值	364.7	335.3	471.6	429.55
8	实测值	11710.1	6383.55	2672.65	2188.68
	计算值	5372.8	3896.7	3012.9	3483.2

表 3 不同开采条件下 2010 年第四系及基岩裂隙含水层海水入侵影响范围表 km²

开采条件 (m ³ /a)	2 000 × 10 ⁴	1 500 × 10 ⁴	1 000 × 10 ⁴	500 × 10 ⁴
第四系	115.98	109.39	104.85	96.77
基岩	90.52	84.87	80.27	71.34

5 结论

海水入侵引发的环境问题对珠江口东岸地区的经济建设与社会发展产生不利影响。准确划分海水入侵的范围,分析不同开采情况下海水入侵动态发展,可为防止和减轻海水入侵提供科学依据。在系统分析研究区地质及水文地质条件的基础上,通过正确的水文地质条件概化,建立了珠江口东岸地区海水入侵三维溶质模型,利用 FEFLOW 对建立的数学模型进行求解,用地下水位和浓度的动态观测资料,对模型进行了识别和校验。运用识别后的模型模拟不同开采条件下,研究区海水入侵的趋势。表明减少地下水开采量,海水入侵面积可逐步减少,入侵可得到有效控制;此外,在减少开采量的情况下,相较于基岩裂隙含水层,第四系含水层海水入侵面积收缩较慢,这是由于除了受地下水开采量的影响,海滨地区的第四系松散岩孔隙水比基岩裂隙水更容易受海水潮汐作用影响的结果。

参考文献

- [1] 袁益让,梁栋,芮洪兴. 海水入侵及防治工程的后效预测. 应用数学和力学, 2001, 22(11): 1163 ~ 1171.
- [2] Anderson MP, Woessne WW. Applied groundwater modeling simulation of flow and advective transport (下转第 129 页)

19.2%。这使汾阳市河川基流减少十分严重,严重制约经济发展和人民生活。

2.3 地下水水质状况不容乐观

近年来,汾阳市工农业及城市人口发展迅猛,污染源与日俱增,未经处理的污染物直接和间接入渗地下。不同程度地污染了地下水源。

水污染加剧了水资源危机。随着经济的发展,工业也迅速发展且向环境排放大量废水、废气、废渣的污染型工业结构。其工业废水大部分未经处理就直接排入水体或用于农业灌溉渗入地下,造成河流水和地下水污染,水质状况不断恶化,并有向农村蔓延的趋势,由局部向纵深发展,加剧了当前水资源的供需矛盾,极大地影响了该地水资源的可持续利用。

3 对策研究

3.1 加强供水水源工程建设

由于区域内农业、工业需水量大,水资源十分紧缺,因此必须有计划地兴建蓄水、引水、调水工程,做好原有工程的配套和更新改造同时增加新的供水水源工程,确保水源工程建设与工农业发展的同步。

3.2 建立节水型社会,实现水资源的高效利用

以人均 500m³/天的实现现代化最低用水量标准计算,2015 年汾阳需水量将达到 2.17 亿 m³,远远超过了水资源可利用量和可供给量,因此必须采取以下措施:发展节水灌溉,减少农业用水量。根据作物生长期按需要用水;防止大水漫灌,推广渠道防渗、使用喷灌和滴灌等节水灌溉技术;充分利用雨水资源发展雨养农业或旱作技术推广需水少的旱作农作物品种。发展工业节水,提高工业用水的重复利用率。改变耗水型工艺,少用水或不用水;回收废水再利用;在城市生活用水中,广泛采用各种节水设施。

3.3 加强水环境保护,实现污水资源化

水环境恶化加剧了汾阳市水资源缺乏的矛盾,增强水环境的保护力度,实现污水资源化是解决汾阳水资源问题的一项重要措施,应采取:强化控制地下水开采。通过法律、经济等措施强化人们的节水意识,限制地下水的无计划开采与超采,并通过人工补给控制超采区地下水位的下降。防治

水资源污染,实现污水资源化。必须大力加强普法教育宣传,增强广大人民法治观念和保护环境意识,提高对水环境恶化危害的认识。对那些污染严重,又治理无效的企业坚决取缔,绝不让继续污染水资源。从供水、排水、水处理诸方面协调解决水污染问题,把处理后的污水作为工农业供水水源,缓解水资源供需矛盾。

3.4 合理调整产业结构和工业布局

把逐步降低超重型工业结构比例,提高轻型工业结构份额作为发展工业的一个重要原则,严格控制耗水大、污染重的企业的发展。在调整产业结构的同时,就水建厂,调整工业布局,合理调整和控制地下水局布超采区工业的发展,使工业布局向地下水相对富足的地区转移,以减轻供水压力。

3.5 水量水质同时抓,加强水资源保护

水量和水质是水资源的两个基本属性。量和质是保护水资源配置与可持续利用的前提,没有质量保证的水量与失去水量基础水质,对水资源都毫无意义,水作为特定的资源,其管理实质是实现水资源的优化配置,在资源资源配置中优化完成量的分配和质的保护。各级水行政主管部门应强化水资源保护工作,实行水量、水质统一管理,逐步充实水资源保护的业务人员,建立或完善专门机构从事该项工作。

3.6 依靠科技,强化水资源的管理

以区域水资源可持续利用为目标,充分依靠现代科技,找出适合当地节水的技术和方法,制定水资源规划、供水水源规划及水环境保护规划,进行跨区调水的经济、技术、社会、环境可行性研究和区域水资源优化配置研究,建立水资源、水环境决策支持系统,使水资源管理有科学的依据。在管理上,加强水资源的统一管理、规划和调度,由传统的以供水管理为主向现代的以需水管理为主转变,高度运用市场机制和政府调控手段,优化水资源配置,强化水环境保护。同时,增强公众参与意识,使节约用水与保护水质成为基本的社会规范。

参考文献

- [1] 吕梁市水资源管理委员会和吕梁市水利局. 中国水利水电出版社. 山西省吕梁市第二次水资源评价, 2005 - 12.
- [7] 赵胜利, 刘燕, 李书全, 等. 用 BP 神经网络预测地下水动态. 河北农业学报, 2002, 25(4): 205 ~ 207.
- [8] GALEATI G, GAMBOLATI G, NEUMAN S P. Coupled and partially coupled Eulerian - Lagrangian model of freshwater - saltwater mixing. Water Resources Research, 1992, 28(1): 149 ~ 165.
- [9] 邵景力, 崔亚莉, 赵云章, 等. 黄河下游影响带(河南段)三维地下水数值模拟模型及其应用. 吉林大学学报, 2003, 33(1): 51 ~ 55.
- [10] 李国敏, 陈崇希, 沈照理, 等. 涠洲岛海水入侵模拟. 水文地质工程地质, 1995(5): 1 ~ 5.

(上接第 21 页)

San Diego: Academic Press, 1992. 215 ~ 286.

- [3] 卢文喜. 地下水运动数值模拟过程中边界条件问题探讨. 水利学报, 2003(3): 33 - 36.
- [4] HERNY H R. Effects of dispersion on saltwater encroachment in coastal aquifers. U S Geol Survey, Water Supply Paper, 1964. 1613.
- [5] 王兵, 刘竹梅, 姜可荣. 莱州市沿海海水入侵的分析及治理对策. 地下水, 2008, 30(4): 74 ~ 75.
- [6] 吴吉春, 薛禹群, 谢春红, 等. 改进特征有限元求解高度非线性的海水入侵问题. 计算物理, 1996, 13(2): 201 ~ 206.