

Visual MODFLOW 在地下水数值模拟中的应用

——以公主岭市黄龙工业园水源地为例

李平, 卢文喜, 马洪云, 杨忠平

(吉林大学环境与资源学院, 长春 130026)

摘要: 本文采用定性分析与定量计算相结合、随机模型与确定性模型相耦合的方法, 确定了公主岭市黄龙工业园水源地的合理开采量。分析了研究区地下水的补排关系和补给能力; 应用 Visual MODFLOW 3.1 对研究区的地下水流进行了数值模拟, 并预报了新水源地投产后地下水水位及流场的时空响应变化; 模型预报过程中采用 Monte - Carlo 随机方法模拟预报了研究区的降水量。模型预报结果表明, 在区内和邻区不再增建承压水水源地的情况下, 承压水可开采资源量为 $15800\text{m}^3/\text{d}$ 。为研究区地下水资源的合理开发提供了科学依据。

关键词: Visual MODFLOW; 地下水流; 数值模拟; 公主岭市; 黄龙工业园水源地

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

Abstract: The rational pumping yield of the well field for Huanglong Industrial Garden in Gongzhuling is determined by combining qualitative analysis with quantitative calculation and by coupling stochastic model with deterministic model. The relationship between recharge and discharge and the replenishment capacity of the groundwater in the research area are analyzed. The numerical simulation for the groundwater is carried out with Visual MODFLOW 3.1, and the temporal and spatial variation of the groundwater level and the flow fields are forecasted after the new well field is put into use. The precipitation of the area is simulated and predicted by using Monte-Carlo stochastic method. The results show that the minable yield of the confined water in the well field is about $15800\text{m}^3/\text{d}$ under the condition of no new well field for exploring the confined water in the research area and the adjacent area, which offers a scientific basis for the reasonable exploitation of groundwater resource in the area.

Key words: Visual MODFLOW; groundwater flow; numerical simulation; Gongzhuling city; well field in Huanglong Industrial Garden

1 研究区概况

研究区位于公主岭市西部(见图1), 属北温带大陆性季风气候, 冬天寒冷干燥, 夏天炎热多雨, 春秋两季多风沙。多年平均降水量为 596.3mm, 降水多集中在 6~8 月份, 占全年降水量的 67%; 多年平均蒸发量为 1895mm。地形东南高, 西北低, 总体上地形向东辽河河床倾斜, 地面坡度较小。地貌上属松辽平原的东部高平原, 地质构造上位于松辽平原拗陷带的东南隆起区。地层包括前第四纪地层和第四纪地层。前第四纪地层由南向北分布有白垩系下统泉头组(三段和四段)、青山口组和姚家组; 泉头组为一套总厚度 1400m 的暗红色泥质岩和粗粒砂质岩, 组成正旋回韵律层, 由上而下沉积物粒度由粗变细, 色调由鲜变暗, 进一步可划分为四个段, 其中三段和四段是研究区水量水质均较好的孔隙裂隙含水层。第四纪地层广泛分布于河谷冲积

平原区, 厚度较薄, 多为 5~13m, 包括中更新统冲洪积层、上更新统冲积层及全新统冲积层和湖沼沉积层。区内地下水类型主要有松散岩类孔隙水(孔隙潜水)和碎屑岩类孔隙裂隙水(孔隙裂隙承压水)两大类型。孔隙潜水赋存于上更新统和全新统砂、砂砾石层中, 含水层厚度沿二级阶地后缘向河床方向一般由薄变厚。一级阶地水位埋深小, 含水层厚度较大, 富水性较好; 二级阶地水位埋深大, 含水层厚度较小, 富水性变差。孔隙裂隙承压水广布在平原区第四系松散岩层下部, 富水性不均。孔隙潜水循环条件好, 补给来源充沛, 主要接受大气降水入渗补给、农田灌溉水入渗补给和地下

收稿日期: 2005-06-15; 修订日期: 2005-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30370825)。

作者简介: 李平(1982-), 女(汉族), 河南南阳人, 在读博士。

水侧向迳流补给,近河地带在洪水期还接受短期的河水顶托补给,主要排泄途径有潜水蒸发、地下迳流(排向河流)和人工开采等。孔隙承压水的补给来源有侧向迳流补给和上部孔隙潜水的越流补给,迳流方向与潜水基本一致,由南东向北西迳流,排泄途径为侧向迳流及人工开采。

2 三维地下水流模拟

2.1 水文地质概念模型

研究区西部以东辽河为界,南部以铁路线为界,北部和东部边界是根据研究需要而确定的,如图1所示。研究区的渗流系统由潜水和承压含水层组成。潜水含水层由上更新统和全新统砂、砂砾石组成;承压含水层广布在平原区第四系松散岩层下部,由泉头组三、四段和青山口组细砂岩、砂砾岩组成,通过弱透水层与潜水有水力联系。对于潜水

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial H}{\partial t} & (x, y, z), t > 0 \\ \mu \frac{\partial H}{\partial t} = K \left[\left(\frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{\partial H}{\partial z} (K + P) + P & (x, y, z), S_0, t > 0 \\ H(x, y, z, t) |_{s_1} = H_1(x, y, z, t) & (x, y, z), S_1, t > 0 \\ K \frac{\partial H}{\partial n} |_{s_2} = q(x, y, z, t) & (x, y, z), S_2, t > 0 \\ H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z) & (x, y, z), S_0, S_1, S_2 \end{cases}$$

其中,表示模拟渗流区域, (x, y, z) 表示空间位置坐标, t 表示时间 (T); S_0 表示潜水面, S_1 表示第一类边界, S_2 表示二类边界; $H(x, y, z, t)$ 为模拟渗流区内的水头分布 (L), $H_0(x, y, z)$ 表示初始时刻 (当 $t=0$ 时) 渗流区内及边界上的水头分布 (L), $H_1(x, y, z, t)$ 是渗流区第一类边界上的水头函数 (L); $q(x, y, z, t)$ 是渗流区二类边界上的单位面积流量 ($L^3 T^{-1} L^{-2}$), 隔水边界流量为零; \vec{n} 为边界的外法线方向; K 为含水层的渗透系数 (LT^{-1}), S_s 为自由面以下含水层的贮水率 (L^{-1}), μ 为潜水含水层在潜水面上的重力给水度; P 为潜水面单位时间单位面积补入或排泄的水体积, 包括降水入渗和蒸发等; $W = W(x, y, z, t)$ 为含水层的源汇项。

采用 Visual MODFLOW3.1 对上述模型进行求解。对比例尺为 1:50000 的公主岭市西部水源地第四纪水文地质图进行扫描, 然后用 ArcGIS 进行矢量化处理, 便于统一地图和观测井的坐标系^[3], 导入模型作为计算模拟区的剖分底图。计算模拟区水平面积为 72km^2 , 采用矩形网格进行剖分, 计 36 行、30 列, 共剖分出 745 个矩形单元体。潜水含水层渗

含水层, 由于北部边界上的水位动态观测孔较多, 故概化为一类水头边界; 西部边界为东辽河, 可概化为一类水头边界或三类河流边界, 由于河流资料较少, 故概化为一类水头边界; 东部和南部边界均概化为二类流量边界, 可根据达西定律计算边界流量。对于承压含水层, 侧向边界全部处理为二类流量边界。模拟区的上部边界为潜水面, 是位置不断变化的水量交换边界, 有降水入渗、潜水的蒸发和灌溉水回渗等; 下部边界以白垩系下统泉头组下部的泥岩为界, 概化为隔水边界。综上所述, 将研究区概化为非均质各向同性三维非稳定地下水流系统。

2.2 数学模拟模型

根据上述水文地质概念模型, 可建立研究区的地下水流数学模拟模型^[1], 如下式所示:

透系数和给水度有 3 个分区 (图 1); 承压含水层渗透系数和贮水率有 4 个分区 (图 2)。各分区参数的初值, 主要是根据已有各个勘察和研究阶段所进行的抽水试验成果及研究区以往的有关报告而确定的。

图 1 研究区位置及潜水含水层参数分区

2.3 模型的识别与检验

根据水文地质模型所建立的数学模型, 必须反映实际流场的特点, 因此, 在进行模拟预报前, 必

图2 承压含水层参数分区

须对数学模型进行校正(识别),即校正其方程、参数以及边界条件等是否能确切地反映计算区的实际水文地质条件^[2]。本次数值模拟侧重承压水,主要原因是潜水水质较差,而且大量开采潜水势必会对周围的农业水井造成不利影响。由于资料所限,选取1985年5月30日枯水期为模型识别时段的初始时刻,8月30日丰水期为模型识别时段末刻。识别阶段的源汇项包括降水入渗、灌溉回渗等。降水入渗系数分区与渗透系数分区相同。源汇项全部处理成补给强度。对模型采用PCG2(预调共轭梯度法)进行求解,得到在给定水文地质参数和各均衡项条件下地下水位的时空分布。根据研究区的水文地质条件,先给出各个参数的范围值,采用自动与手动相结合的方法,通过计算水位和实际水位的拟合分析^[4],反复地修改参数,当两者之间误差达到标准后,即认为此时的参数值代表含水层的参数。

由于参数分区和参数初值的选取客观地反映了实际的水文地质条件,加之细致的调参拟合,模型识别取得了较好的结果。在模拟区选取4个有代表性的观测孔,其地下水位计算值与观测值拟合见图3,误差绝对值的平均值为0.01m,其中拟合误差的绝对值小于0.03m的观测井数占总观测井数的100%。可见计算水位与实测水位达到了很好的拟合,说明所建立的水文地质概念模型和数学模型是正确的。参数识别结果见表1~2。

为进一步验证所建立的数学模型和模型参数的可靠性,利用已有的另外时段的地下水位动态观测资料对数学模型进行了检验。根据实测资料,选择2004年10月10日~11月30日作为模型的检验阶段。模型检验时段的主要补给来源为降水入渗,主要排泄为人工开采。

图3 识别时段地下水位计算值与观测值拟合

潜水含水层参数识别结果 表1

参数分区号	1	2	3
渗透系数 K (m/d)	85	75	60
给水度 (无量纲)	0.21	0.21	0.21

承压含水层参数识别结果 表2

参数分区号	1	2	3	4
K (m/d)	0.50	0.70	0.81	0.79
贮水率 (1/m)	2.0E-4	3.09E-4	8.32E-4	8.65E-4

潜水和承压含水层的拟合检验结果分别见图4和图5,潜水含水层误差绝对值的平均值为0.007m,其中拟合误差的绝对值小于0.02m的观测井数占总观测井数的90%,承压含水层误差绝对值的平均值为0.066m,其中拟合误差的绝对值小于0.2m的观测井数占总观测井数的100%。模型识别和检验结果证明所建立的数学模型、边界条件及调定的水文地质参数和源汇项都是正确可靠的,可以运用该模型进行地下水流系统的预报。

图4 检验时段潜水层水位拟合

未来预报系列发生的频率与该样品在过去发生的频率相同，并使预报系列多年的均值与过去资料多年的均值相等。

根据已掌握的地下水动态观测资料，选择了距本次模拟计算时间最近的2004年11月10日的地下水位作为预报时段的初始水位。本次预报设计两个方案：在现有开采状况基础上，仅新增开采承压水，开采量为 $15800\text{m}^3/\text{d}$ ；潜水、承压水联合开采，潜水开采量为 $5000\text{m}^3/\text{d}$ ，承压水开采量为 $15800\text{m}^3/\text{d}$ 。分别预报了地下水开采1年、5年、10年和20年后的地下水位。从预报结果可以看出，方案一中承压水水位下降了5~16m，从2014年到2024年承压层水位持续稳定；方案二中潜水层开采中心降深在2005年以后一直稳定在3m左右，承压层的水位下降幅度稍有增加，比方案一中的漏斗中心水位下降增加了1m。随着地下水开采时间的增加，虽然降落漏斗的面积在扩大，降深在增加，地下水的水力梯度在增大，但从多年变化趋势来看，并未产生地下水位的持续下降。说明按照两个方案对地下水进行开采，开采量与补给量近于相等，采补近于平衡，按设定的方案对地下水进行开采，是有补给保障的。

图5 检验时段承压层水位拟合

3 模型的预报应用

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刻画地下水系统的实际情况，可以用其对未来地下水的运动状态进行预报。所谓预报，就是将规划的地下水开采量和经预测得到的边界条件和各种源汇项代入到已经过识别和检验的数学模型之中，通过模型的运转计算，计算出不同开采方案下的地下水位及流场的时空响应状况。所以模型预报前要先设计开采方案以及预报边界条件和源汇项。一类边界的预报主要是运用泰斯公式近似计算出水源地上马后在边界上引起的水位降深，自然水位与降深的代数和即为预报水位；二类边界的预报是先用泰斯公式计算出边界上的降深变化，进而确定出边界处的水力坡度，再用达西定律计算边界流量^[5]。源汇项的预报主要是降水量的预报，其它源汇项，如灌溉回渗量、井灌开采量和农村人畜用水量等，由于资料有限，用现状资源量作为预报时段的资源量。

本次研究应用了蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 方法对研究区内的降水量进行随机模拟和预报^[6]，实现了随机模型和确定性模型相耦合。蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 方法是一种应用随机数来进行模拟试验的方法。该方法把降水量作为一个随机变量来处理，对研究系统进行随机观察抽样，通过对样本值的观察统计，提取研究区降水量所具有的统计规律性，实现对研究系统的模拟。该方法的特点并不是要精确地预报某一年的降水量，而是使降水量模拟预报系列在整体上反映模拟区的气候特征，使降水预报系列从个体上看具有随机性，从总体上看具有统计规律性。具体来说，确保每个降水量样品值在

4 结论

(1) Visual MODFLOW 是国际上通用的标准化的三维地下水流数值模拟软件，通过在公主岭黄龙工业园水源地地下水流数值模拟中的应用研究，表明其可视性好、操作方便、功能强大，具有广泛的使用价值和应用潜力。

(2) 从数值模拟结果可以看出，所建立的水文地质概念模型和数学模型是正确的，选取的水文地质参数和计算的源汇项基本合理，符合公主岭地区地下水的实际情况，可用于流场研究和水源地的开采规划。

(3) 在综合考虑承压水在开采条件下补给量的计算结果、数值模拟的预报结果以及区域白垩系下统以往的开采资料的基础上，认为研究区承压水开采量确定为 $15800\text{m}^3/\text{d}$ 是具有补给保证的。前提条件是在区内和邻区不再新打承压水抽水井，即不再增建承压水水源地。

参 考 文 献

- [1] 孙训正. 地下水流的数学模型和数值方法 [M]. 北京: 地质出版社, 1981, 25~51.
- [2] 林学钰, 侯印伟等. 地下水水量水质模拟及管理程序集 [M].

(下转第36页)

1988年4月27日北林子村浇韭菜过后即开始出现塌陷坑一个,5月15日和22日在浇灌麦地时又相继出现两个岩溶塌陷^[8]。

(5) 在5至8月份,是该区旱季末期和雨季初期,经过近一年多的开采,地下水位已经急剧下降至很低的水平,10号、12号生产井3月5日动水位埋深为20m和16.5m,到5月26日10号、12号生产井动水位已分别降至30m和29m,平均日下降率0.12m和0.16m,最大时段可达0.3m。而雨季的来临,大量的雨水快速补给地下水,又使得地下水位快速上升(见图6),水位急剧下降和快速上升所形成的各种水动力作用、气动力作用等混合在一起对覆盖层土体形成很大的致塌力,加速了土体的破坏。因此该区岩溶塌陷为抽水水位下降-降雨表水入渗诱发型。

图6 柳江水源地地下水位波动曲线

3 结论与防治措施

(1) 河北省岩溶塌陷主要分布在唐山、秦皇岛一带,岩溶塌陷多发生在水源地的地下水降落漏斗范围内,且受地质构造控制明显。

(2) 强烈发育的岩溶洞穴、溶隙是岩溶塌陷产生的前提条件,适当厚度的多元混合结构松散覆盖层土体是岩溶塌陷的物质基础。

(3) 过量开采地下水造成地下水位下降而引起强烈的地下水动力条件是岩溶塌陷发生的根本原因,降雨、地表积水入渗、管道渗漏等也是岩溶塌陷的主要诱因。

(4) 地震活动直接或间接影响岩溶塌陷的产生。

(5) 河北省岩溶塌陷根本原因是不合理利用地下水引发的地下水环境恶化。因此,要从根本上防治岩溶塌陷,就要科学、合理地开采利用岩溶地下水,科学的制定地下水的开采计划和地下水环境恢复重建方案,可采取分时段定量取水的方法,使地下水在雨季能够得到较为充沛的补给,恢复地下水环境的生态稳定性,从而促进资源、环境的可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 张梁,张业成等. 地质灾害灾情评估理论与实践 [M]. 北京:地质出版社,1998.
- [2] 胡瑞林,王思敬,李焯芬等. 唐山市岩溶塌陷区域风险评价 [J]. 岩石力学与工程学报,2001,Vol20(2):180~189.
- [3] 石建省. 唐山市活动性断裂与岩溶塌陷关系的空间分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报,1996,Vol7(3):87~91.
- [4] 张树立. 唐山市水资源利用的研究 [J]. 海河水利,1996(2):18~19.
- [5] 赵宗壮,杜兴明,刘志刚. 唐山市区岩溶地面塌陷及其防治 [J]. 中国地质灾害与防治学报,1998,Vol9(增刊):222~227.
- [6] 贺可强,王滨,万继涛. 枣庄岩溶塌陷形成机理与致塌模型的研究 [J]. 岩土力学,2002,Vol23(5):564~769.
- [7] 田级生. 柳江水源地岩溶地面塌陷 [J]. 水文地质工程地质,1994(4):52~54.
- [8] 姜忠,贺鹏起,邱志成. 秦皇岛市柳江水源地岩溶塌陷形成条件及稳定性评价 [J]. 中国岩溶,1992,Vol11(3):198~208.
- [9] modeling of the Glacial Lake Agassiz Peatlands, Minnesota [J]. Journal of Hydrology,2001,243(1~2):94~100.
- [10] 卢文喜. 地下水运动数值模拟过程中边界条件问题探讨 [J]. 水利学报,2003,(3):33~36.
- [11] 卢文喜. 地下水模拟预报过程中降水量的预报 [J]. 勘察科学技术,1995,(4):8~10.

(上接第27页)

长春:吉林科学技术出版社,1988,1~7.

- [3] San Juan, Carma; Kolm, Kenneth E. Conceptualization, characterization and numerical modeling of the Jackson Hole alluvial aquifer using ARC/INFO and MODFLOW [J]. Engineering Geology, 1996, 42(2~3):119~137.
- [4] Reevea A. S, Warzochaa J. et al. Regional ground-water flow