

Visual MODFLOW 在地下水模拟中的应用 ——以河北省栾城县为例

贾金生¹, 田冰², 刘昌明³

(1. 河北省发展计划委员会, 河北 石家庄 050000; 2. 河北师范大学 资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050021;
3. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 数值模拟方法是评价地下水资源量、模拟自然界一些水文地质过程发生和发展的主要方法和手段之一。Visual MODFLOW 是目前国际上最盛行、且被各国同行一致认可的三维地下水流和溶质运移模拟评价的标准可视化专业软件包, 它具有强大的可视化与模拟功能。水质点的向前、向后示踪流线模拟研究, 任意水均衡域的水均衡研究, 以及与其他常用软件(如 GIS、Excel、Surfer)的兼容, 是它的主要特色。应用 Visual MODFLOW 软件, 模拟了河北省栾城县的地下水流情况。通过对模型的校正与识别, 得出了比较满意的结果, 所建数学模型能够较好地反映当地的实际水文地质条件, 可以用来进行预测和对地下水资源的管理。

关键词: Visual MODFLOW; 地下水模拟; 栾城县

中图分类号: S 273.4

文献标识码: A

Visual MODFLOW and its application on groundwater simulation ——A case study on Luancheng county of Hebei province

JIA Jin-sheng¹, TIAN Bing², LIU Chang-ming³

(1. Development of Planning Commission of Hebei Province, Shijiazhuang 050000, China;
2. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050021, China;
3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Numeric simulation method is one of the ways and means on evaluating the groundwater resources and simulating the occurrence and development of the natural hydrogeology process. Visual MODFLOW is the most popular standard visualization software package approved by the hydraulic scientists and technicians on simulating the groundwater flow and contaminant transport in the world. It has great visualization and simulation function. Forward and inverse particle-tracking, Zone Budget and compatible with other common software, such as GIS, Excel and Surfer, are its chief characters. The authors simulated the groundwater flow in Luancheng County using Visual MODFLOW and drew a satisfied result through the calibration and validation. The mathematic model can reflect the practical hydrogeological condition of the research field. It can be used to predict and manage the groundwater resources of Luancheng County.

Key words: Visual MODFLOW; groundwater simulation; Luancheng county

近半个世纪以来, 水文地质学大致经历了两个发展阶段: 从 20 世纪 50 年代到 70 年代中期, 是奠基阶

收稿日期: 2002-06-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49871020, 49801003, 49890330-4-2); 河北省科委资助项目(01220703D)

作者简介: 贾金生(1972-), 男, 河北省新河县人, 博士, 主要从事水文水资源的研究和宏观经济的管理工作。

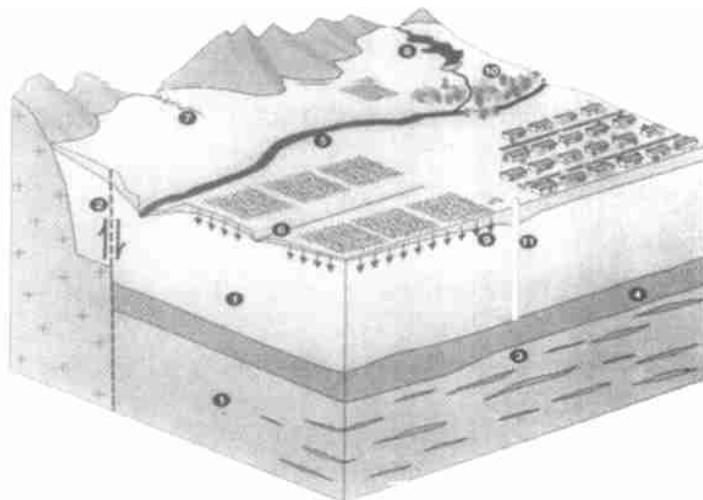
段,主要接受苏联思想的影响;从 20 世纪 70 年代中期到 90 年代,是发展阶段,随系统科学、环境科学、现代应用数学与计算机技术等新思想、新理论与新技术的输入,使水文地质学的基本概念与研究范畴发生了巨大变革,从定性研究步入了定量研究阶段,纳入了系统工程的轨道^[1]。随着工农业生产的发展和人民生活水平的提高,地下水资源的供需矛盾日益突出,这就对地下水资源的评价与管理提出了更高的要求,即要从定量角度对地下水资源进行预测和评价,建立合理开发利用方案。但水文地质条件本身固有的复杂性,限制了用地下水动力学中建立的解析法解决问题的广泛性^[2]。20 世纪 70 年代中期以后,数值模拟技术的应用使解决这一问题成为可能。地下水系统数学模型的建立,是定量研究地下水运动规律的关键^[3]。经过近 30 年的发展,地下水模拟在我国经历了从无到有、从简单的水流模型到比较复杂的物质和热量运移模型,从仿制到独立研制,最后走向世界的艰难发展历程。现在,我国已经建立了几乎囊括国际地下水模拟中心(IGWMC) P. van der Heijde 分类中所有的模型。研究范围涉及饱和带、非饱和带及饱和-非饱和带^[4]。但是,到目前为止,我国还没有一个通用的、具有知识产权的权威计算软件,这不能不说是一大遗憾^[5]。近年来,对于饱和带地下水流模拟的研究,主要集中在三维流模型开发、流速场与流线的计算方法、非均质参数的区域概化和繁杂数据的优化处理。目前,进行区域三维地下水流分析的主要软件有 HST3D(Kipp, 1987)、SWIFT(Gran well 和 Reeves, 1981)以及世界上最流行的 Visual MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1994)^[6]。

本文首先对 Visual MODFLOW 软件和 MODFLOW 基础理论作了简单介绍,在此基础上,应用 Visual MODFLOW 软件,模拟了河北省栾城县的地下水流情况。通过对模型的校正与识别,得出了比较满意的结果,所建数学模型能够较好地反映当地的实际水文地质条件,可以用来进行预测和对地下水资源的管理。

1 Visual MODFLOW 软件介绍

MODFLOW(The modular finite-difference groundwater flow model)是由美国地质调查局(USGS)开发的用来模拟地下水流动和污染物迁移等特性的计算机程序(McDonald and Harbaugh, 1988; Harbaugh and McDonald, 1996)。目前,MODFLOW 是全世界范围内模拟地下水流的应用程序。MODFLOW 如此受欢迎,归功于它具有以下特点: MODFLOW 所用的有限差分方法容易理解,并且适用于许多现实条件。MODFLOW 可以用于一维、二维、准三维和三维模型。数据输入格式、基本理论和每一个模块都经过了广泛验证。模块化结构便于用户根据实际需要添加程序、完善功能和其他应用软件如 Surfer、Excel 等的结合。MODFLOW 模拟的结果,可以用许多软件如 Surfer、AutoCAD 等显示和处理,而且其自己的三维可视化结果处理,也很便于用户理解和应用^[7,8]。

MODFLOW 用来模拟的含水层系统,应具有以下特点:饱和流状态、适合 Darcy 定律、地下水密度保持恒定,以及水平水力传导率和导水系数的主流方向,在整个含水层系统中保持不变。许多需要研究地下水流和污染物迁移的地下水含水层系统中,都满足这些条件。MODFLOW 可以模拟的水力过程及影响地下水系统的水力要素如图 1 所示。MODFLOW 可以模拟潜水、承压水和隔水层中的稳定流与瞬变流的情况。许多影响因素和水



- ①非承压与承压含水量 ②断层与其他水平流障碍 ③细颗粒隔水单元与夹层
④隔水层 ⑤河流 ⑥排水沟或者喷泉
⑦间歇流小溪 ⑧水库 ⑨降雨与灌溉补给
⑩离散量

图 1 MODFLOW 可以模拟的地下水含水层系统

Fig. 1 Features of an aquifer system that can be simulated by MODFLOW

文过程,如河流、溪流、排水沟、泉水、水库、作物蒸散量、降雨和灌溉入渗补给等,都可以用 MODFLOW 来模拟。MODFLOW 提供了求解地下水有限差分公式的很多种方法,如强隐式迭代法 SIP、逐次超松弛迭代法 SOR、预调共轭梯度迭代法 PCG2、SSOR 等。用户可以根据自己研究的实际情况,选择适合的有效求解方法。由于实际地质及水文地质条件的差异,选择不同的求解程序包所得的结果是不一样的。几种求解方法可能都收敛,也可能只收敛于一种或几种求解方法。MODFLOW 的求解过程中,引入了应力期(Stress Period)概念,它将整个模拟时间分为若干个应力期,每个应力期又可再分为若干个时段(Time Step)。在同一个应力期,各时间段既可以按等步长,也可以按一个规定的几何序列逐渐增长。而在每个应力期内,MODFLOW 规定所有的外部源汇项的强度应保持不变。这样做不但简化规范了数据文件的输入,而且使得物理概

念更为明确。

MODFLOW 应用有限差分方法模拟含水层中的地下水流情况。求解过程中,MODFLOW 从空间上对含水层采用等距或不等距正交长方体划分网格(图2)。这种网格的优点在于,用户易于准备数据文件,便于输入文件的规范化。其最大缺点在于,增加了许多额外计算单元。但是,随着计算机科学的迅猛发展,计算机受网格数量的限制越来越小,MODFLOW 解决地下水流运动问题时,可以将含水层剖分多达 $360 \times 360 \times 18$ 个网格单元。

Visual MODFLOW 是目前国际上最盛行、且被各国同行一致认可的三维地下水流和溶质运移模拟评价的标

准可视化专业软件系统。该系统是由加拿大 Waterloo Hydrogeologic Inc. 在 MODFLOW 软件基础上,应用现代可视化技术开发研制的,1994 年 8 月首次在国际上公开发售。高度集成的软件包,包括了用于地下水流模拟的 MODFLOW、粒子运动轨迹和传播时间模拟的 MODPATH、污染物在地下水中输移过程模拟的 MT3D,以及用于水文地质参数估计与优化的 PEST,并且具有直观的、强有力的图形交互界面。新颖的菜单结构,便于用户对研究区离散及选择有效计算单元、确定边界条件与参数赋值、运行及校正模型,以及用等值线或颜色阴影实现结果的可视化,真正实现了人机对话。在模型的开发及结果显示过程中,模型网格、输入参数和模拟结果,都可以用剖面图或平面图显示。这个软件系统的最大特点,是将数值模拟过程中的各个步骤天衣无缝地连接起来,从开始建模、输入和修改各类水文地质参数与几何参数、运行模型、反演校正参数,一直到显示输出结果,使整个过程从头到尾系统化、规范化。这些特点是目前我国乃至世界上同类软件所不具备的。

2 模型的理论基础

MODFLOW 是一个三维有限差分地下水流动模型,它基于以下基本方程^[9]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 为沿 x 、 y 、 z 坐标轴方向的水力传导率 ($L T^{-1}$), h 是水头 (L), W 是在非平衡状态下通过均质、各向同性土壤介质单位体积的流量,表示地下水的源和汇 (T^{-1}), S_s 表示多孔介质的比贮水系数 (L^{-1}), t 是时间 (T)。

对三维稳定流动,MODPATH 的质量平衡方程可用有效孔隙率和渗流流速表示,如式(2):

$$\frac{\partial (nV_x)}{\partial x} + \frac{\partial (nV_y)}{\partial y} + \frac{\partial (nV_z)}{\partial z} = W \quad (2)$$

式(2)中: V_x 、 V_y 、 V_z 表示线性流动流速矢量在各坐标轴方向的分量 ($L T^{-1}$), n 是含水层有效孔隙率 (%), W 表示由含水层内部单位体积源和汇产生的水量 (T^{-1})。

污染物运移模型 MT3D 的基本方程为:

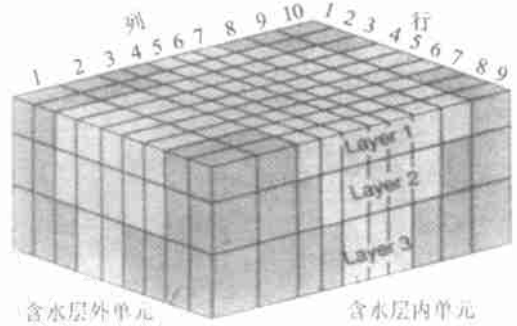


图2 三维地下水流网格剖分图

Fig. 2 Model grid for simulating three - dimensional groundwater flow

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (V_i C) + \frac{q_i}{P} C_s + R_k \quad (3)$$

式(3)中: C 表示溶于水中的地下水污染物浓度 (CL^{-1}), t 是时间 (T), x_i 表示沿坐标轴各方向的距离 (L), D_{ij} 表示水力扩散系数, V_i 表示地下水渗流速度 (L T^{-1}), q_i 表示源和汇的单位流量 (T^{-1}), C_s 表示源和汇的浓度 (CL^{-1}), P 表示含水层孔隙率 (%), R_k 表示化学反应项。

3 栾城县地下水数值模拟模型

3.1 自然及社会经济概况

栾城县位于河北省西南部,北纬 $37^{\circ}37' \sim 38^{\circ}$,东经 $114^{\circ}30' \sim 114^{\circ}50'$ 之间,是太行山东麓与华北平原相交接的山前倾斜平原地区。地面标高在 $45 \sim 66 \text{ m}$ 之间,地形从西北缓缓向东南倾斜,地面坡度介于 $1/500 \sim 1/1000$ 之间。

现状(1990年)栾城县境内只有洺河和总退水渠——石家庄市废污水及雨水排放河道穿过县境。洺河发源于鹿泉市南部的五峰山,栾城县境内 20.5 km 。洺河上游多支流,为季节性河流,现在主要承接石家庄市的废污水及雨水。

栾城县属暖温带半湿润地区,大陆性气候明显,温差较大,多年平均气温 12.2°C ,最冷月1月份平均气温 -3.7°C ,最热月7月份平均气温 26.0°C 。10℃积温 4251°C ,无霜期 191 d ,年日照时数 2544 h ,相对湿度 65% ,多年平均年蒸发量 1644.5 mm ,年平均风速 2.6 m/s ,多年平均降雨量 483.5 mm (1949—2000年),且分布不均,80%的降雨集中在7~9月份。

栾城县属石家庄市管辖,全县土地面积 397 km^2 。据1990年统计资料,全县耕地面积 31333.3 hm^2 ,总人口 328609 人。1990年全县社会总产值 69963 万元(1980年不变价),工农业总产值 60884 万元(1980年不变价),其中工业总产值 45622 万元、农业总产值 15262 万元。改革开放后,栾城县工业发展迅速,主要行业分为建材、化工、食品、纺织、机械制造、电子设备、印刷业等。乡镇企业发展迅速,主要集中在建材、造纸、化工、机械制造、纺织、食品及畜牧业等行业,1990年乡镇企业完成产值 33422 万元(1980年不变价)。栾城县农业发达,是我国著名的粮食产区。全县耕地土质良好,且全部为水浇地,主要靠机井灌溉,沿洺河两岸还利用一部分废污水,实行井渠双灌。农业生产主要以种植业为主,实行冬小麦—夏玉米一年两熟的轮作制度,耕地复种指数高达 $1.68^{[10]}$ 。

3.2 水文地质概况

3.2.1 含水层主要特征 栾城县属太行山山前倾斜平原水文地质单元的一部分。由滹沱河、槐沙河冲洪积扇组成^[10]。地下水主要赋存于第四系松散岩层孔隙中。第四系按岩性和沉积年代、含水层与隔水层的分布情况以及水动力条件等特征,可划分为4个含水岩组。第1含水岩组,地层上相当于全新统(Q_4),第2含水岩组,地层上相当于上更新统(Q_3),第3含水岩组,地层上相当于中更新统(Q_2),第4含水岩组,地层上相当于下更新统(Q_1)。在水平方向上,含水层由西部向东部单层厚度逐渐变厚,粒度由细变粗,层次由少增多,富水性由弱变强。在垂直方向上,上部及下部砂层粒度较细、厚度较小,中部砂层粒度较粗,含水层厚度较大。

第1、2含水组发育较好,两组之间没有连续的隔水层和弱透水层,水力联系十分密切,具有统一的地下水位,因此可以视为一个含水层,是目前的主要开采层段。该含水层以上更新统和全更新统的下段为主,岩性为粗砂、中粗砂夹卵砾石。含水层底板埋深 $60 \sim 120 \text{ m}$,单井涌水量北部为 $50 \sim 70 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$,中部为 $30 \sim 50 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$,南部及西部边缘小于 $30 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$,栾城县钻孔统计资料如表1。

3.2.2 地下水形成特征 栾城县地下水补给源主要有大气降水入渗、河流渗漏、灌溉回归以及侧向补给。大气降水入渗补给是栾城县地下水最主要的补给方式,由于包气带岩性以砂和亚粘土为主,入渗系数较大,多在 0.25 左右,地形坡度小,为降水入渗提供了良好的条件。河渠渗漏补给主要来源于洺河及总退水渠,河道没有防渗设施,漏水严重,每年大约有 $0.2 \times 10^8 \sim 0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水量入渗补给地下水。栾城县农田灌溉以地下水为主,灌溉方式多为大水漫灌,入渗量约占农田灌溉用水量的 15% 。侧向补给主要来源于西部元氏县及鹿泉市的山前侧向入渗,多年平均值为 $0.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右。

栾城县地下水排泄以人工开采为主。农业灌溉用水占总用水量的 88% 左右,且主要集中在冬小麦大量

耗水的 3~6 月份。由于连年超采,地下水埋深已达 20 m 左右,地下水蒸散量几乎为零。

表 1 栾城县钻孔统计资料

Table 1 Statistic data of drills in Luancheng County

钻孔 编号 Well number	孔深/m Well depth	第、含水组 含水层厚度/m Thickness of aquifer	单位出水量 (t·h ⁻¹ ·m ⁻¹) Discharge per capital	含水层岩性 Characteristic of aquifer	钻孔 编号 Well number	孔深/m Well depth	第、含水组 含水层厚度/m Thickness of aquifer	单位出水量 (t·h ⁻¹ ·m ⁻¹) Discharge per capital	含水层岩性 Characteristic of aquifer
CKB21	203.60	23.99	31.19	中粗砂夹卵砾	栾 14	422.20	30.59	30.59	中粗砂夹卵砾
栾 15	96.30	54.40	43.52	粗砂含卵砾	CKB24	200.50	29.00	29.00	中砂夹细砾
栾 18	97.57	49.03	44.13	粗砂含卵砾	栾 1	500.40	40.80	36.72	中粗砂含粗砾
栾 17	253.70	33.00	29.70	细粗砂夹卵砾	栾 6	420.40	16.00	9.60	细中砂含粗砾
栾 13	100.70	5.20	6.24	粗砂夹卵砾	栾 7	452.10	15.20	9.12	粗砂略含砾
栾 16	90.80	26.80	26.80	粗砂夹卵石	栾 10	110.00	45.40	45.40	中粗砂含粗砾
栾 4	284.40	12.80	8.96	中粗砂略含砾	CK15	117.20	27.30	30.03	粗砂含卵砾
栾 3	331.60	12.90	9.03	中粗砂略含砾	栾 11	112.20	41.70	41.70	中砂含卵砾
栾 12	428.30	37.60	37.60	中粗砂夹卵砾	CK19	101.50	23.05	25.36	细中砂含砾
栾 5	106.10	38.40	42.24	粗砂夹卵砾	栾 8	251.10	29.06	34.87	细中砂含卵砾
栾 9	450.00	33.60	33.60	细中砂含砾					

3.2.3 地下水动态特征 栾城县地下水动态属降水、灌溉入渗补给——农业开采型,地下水位变化主要受农业开采量及降雨量大小的控制。年初 1~2 月份地下水停采,地下水位开始逐渐回升达最高水位。春灌开始后,地下水位逐渐下降直至雨季开始,农业停止开采,地下水位开始逐渐回升,如果秋冬季灌溉用水量较大,地下水位也会暂时下降,但总的趋势是回升,直至第 2 年 3 月份达到最高值。

目前,栾城县地下水总体流向为自西北流向东南,地下水水力坡度与地面坡度基本一致。

3.2.4 水资源及开发利用现状 栾城县地表水资源缺乏,目前只有石家庄市总退水渠和洺河河段常年有明流通过。但是,由于石家庄市废污水处理力度不够,生物耗氧量、化学需氧量、悬浮物、硫化物、氨氮、氰化物、挥发性酚等污染物严重超标,不具备利用价值,只是在沿河两岸,部分耕地利用废污水灌溉。栾城县地处太行山中段山前倾斜平原地带,地下水资源十分丰富,水质良好,均适于工农业及生活利用。多年平均地下水资源量为 $0.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,总补给量为 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右。

近年来,由于持续干旱和农业水利化程度的提高,农业用水量逐年增加,工业、乡镇企业的迅速发展以及人民生活水平的提高,都对地下水资源造成了沉重负担。由于地下水连年超采,引起地下水位的持续下降,全县平均地下水埋深已由 1949 年的 3~4 m 下降到 1990 年的 15 m 左右。到 1990 年,全县共有机井 6 754 眼,其中农村用井 6 703 眼,县级以上工业用井 45 眼,城镇生活用井 6 眼。1990 年全县平均降水量为 583.8 mm,属于偏丰水年。全县开采地下水 $1.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,其中农村供水系统 $1.44 \times 10^8 \text{ m}^3$,城镇自来水供水 $0.015 \times 10^8 \text{ m}^3$,县以上工业用水 $0.095 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1990 年全县地下水总补给量为 $1.05 \times 10^8 \text{ m}^3$,全县缺水量为 $0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,超采后使地下水位下降 0.55 m 左右^[10]。

3.3 水文地质概念模型

3.3.1 地下水系统的基本分析 从以上的水文地质条件和当地地下水资源的利用情况分析,现阶段栾城县地下水系统属于降水、灌溉入渗补给——农业开采型,研究区基本上构成了地下水补、径、排的完整系统。其主要补给源有二:一是侧向补给,即西北部山前侧向补给;二是垂向补给,包括降雨入渗、灌溉回归及河渠入渗补给。地下水的排泄以农业开采为主,其东南方向的侧向流出量很小。由于地下水埋深较大,蒸发量接近于零。地下水流向为由西北流向东南,水力坡度与地形坡度大体一致。而在地下水大规模开采前的天然状态时,补给项主要为河流入渗、降雨入渗、侧渗及灌溉回归(地表水灌溉),排泄项主要为侧向流出及潜水蒸发。

3.3.2 水文地质条件概化 计算区的南北边界与地下水位等值线近似直交,虽有水量流进流出,但流量很小,视其为零流量边界;西北部边界侧向流入量较大,且研究程度很高,可以给出较为可靠的侧向流量数据,因此作为第二类边界(流量边界)处理。东南边界近似与地下水位等值线平行,水力坡度变化不大,视其为变

流量(依靠水位确定流量)边界^[11]。计算区的底边界为一相对隔水的粘土层,将其视为隔水边界,计算区的包气带岩性为亚砂土及中细砂,局部有亚粘土,含水层接受降雨、灌溉及河渠的入渗补给。计算区地下水赋存于第四系上更新—全新统松散地层中,含水层为非均质各向异性的潜水含水层,主要开采层段第1、2含水层具有统一的地下水位,属于混合开采,按二维流考虑。

3.4 数值模拟模型

根据上述水文地质条件,可以得到研究区的地下水数学模型如下^[7,11]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_x (h - B) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y (h - B) \frac{\partial h}{\partial y} \right] - W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

$$h(x, y, 0) = h_0(x, y) \quad (5)$$

$$K(h - B) \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_1 = -q(x, y, t) \quad (6)$$

式中: h 为潜水面高程(m), B 为含水层底部高程(m), $q(x, y, t)$ 为边界单宽流量(m^2/T), W 为源汇项的代数和(m^3), $h_0(x, y)$ 为初始水位(m), K_x , K_y 为分别为沿 X 轴、 Y 轴的含水层渗透系数(m/d), S_y 为给水度(无量纲), 1 为流量计算边界, n 为内法线, t 为时间。

3.4.1 模型求解 求解过程采用 Waterloo Hydrogeologic Inc. 公司推出的 Visual MODFLOW 2.8.1 (1999年)软件,它以美国地质调查局(U. S. Geological Survey)开发的 MODFLOW (“Modular Three - dimensional Finite - difference Ground - water Flow Model”)为内核,将 MODFLOW、MODPATH、MT3D 和 PEST 几个计算模块高度集成,是当前地下水模拟软件中具有很高权威的专业软件。本次计算将第 Ⅰ、Ⅱ 含水组合并为一层,计算区域划分为 30 行、30 列,共 900 个单元(图 3)。其中:无效计算单元 390 个,有效计算单元 510 个,流量计算单元 26 个。本次计算调用的外应力子程序包为水井子程序,所有补给项和排泄项都用注水井和抽水井的方式来表示。在分析降雨资料的前提下,通过实地调查,利用已有的观测资料,确定河流来水量、农田灌溉的时间及灌水量,最终确定注水井及抽水井的工作制度。模型计算过程则用 Waterloo Hydrogeologic Inc. 公司最新推荐的 WHI 子程序包。整个模拟过程分为 12 个应力期,每个应力期为 1 个月,时间步长为 10 d。模型运行时,选择了 MODFLOW 和 Zone Budget 2 个选项,对研究区域的地下水流和区域水平衡进行了模拟。

3.4.2 模型校正 利用建立的数学模型,计算观测孔所在单元的水头,并和实测的水头进行对比,从而反求有关的水文地质参数。本次计算选用了 5 个观测孔,都分布在第 Ⅰ、Ⅱ 含水层中。校正时间从 1990 年 1 月 1 日到 1990 年 12 月 31 日,时间步长为 30 d,共 12 个时段,通过反演求参,得出了含水层渗透系数和给水度的大小及分区结果(表 2、图 4)。5 个观测孔的拟合情况与统计参数见图 5、表 3。

表 2 含水层水文地质参数分区表

Table 2 Partition table of hydrogeologic parameters of the aquifer

分区号 Unit	渗透系数 $K/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$ Hydraulic conductivity	给水度 S_y Specific yield
	125	0.17
	140	0.19
	100	0.16
	115	0.14

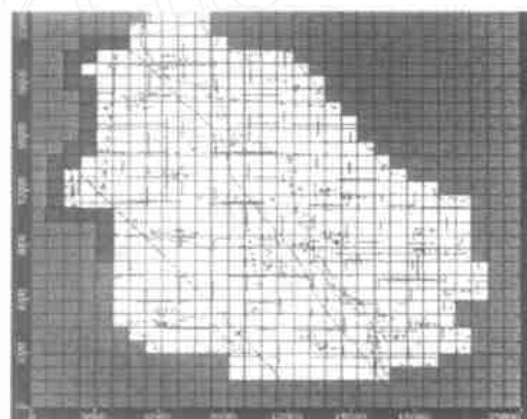


图 3 栾城县研究区网格剖分图

Fig. 3 Discretization mesh of research zone in Luancheng county

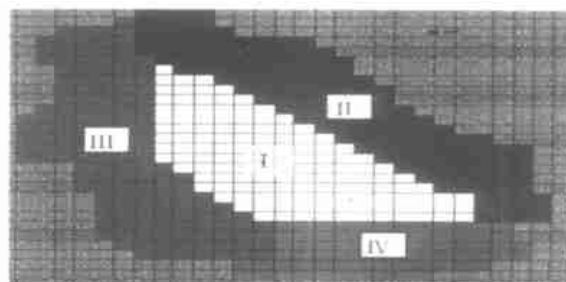


图 4 栾城县水文地质参数分区

Fig. 4 Zonation map of hydrogeological parameters in Luancheng county

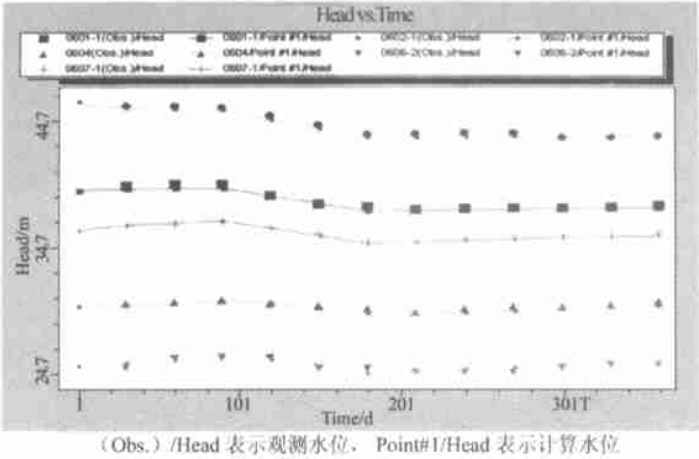


图 5 栾城县地下水位计算值与观测值的拟合情况

Fig. 5 Fitting curve of the calculating data and observation data in Luancheng county

表 3 地下水位计算值与观测值拟合的统计参数

Table 3 Statistical parameters of the calculating data and observation data

时段	平均误差/ m	平均绝对误差/ m	估计标准误差/ m	均方误/ m	标准均方误/ %
Phase	Mean error	Mean absolute	Standard error of the estimate	Root mean squared	Normal RMS
1	0.07	0.10	0.05	0.13	0.63
2	0.00	0.07	0.04	0.09	0.43
3	0.07	0.09	0.03	0.10	0.49
4	0.00	0.08	0.05	0.09	0.48
5	- 0.03	0.15	0.07	0.15	0.77
6	- 0.14	0.14	0.03	0.15	0.81
7	- 0.01	0.14	0.03	0.15	0.81
8	- 0.10	0.18	0.09	0.20	1.06
9	- 0.09	0.20	0.10	0.23	1.23
10	- 0.05	0.20	0.11	0.23	1.24
11	0.02	0.17	0.09	0.19	1.05
12	- 0.06	0.14	0.07	0.15	0.85

由图 5 和表 3 可以看出,5 个观测孔的平均水位误差最大值为 0.14 m,正负误差比较均衡,系统稳定性较好,表明所建的数学模型、对水文地质条件的概化、边界条件的确定都与研究区域实际情况吻合较好。

3.5 模型识别

利用 1990 年的实测资料进行了模型校正,求出了水力传导率与给水度的参数值与分区情况。但是,经校正后的数学模型是否适于研究区地下水位与水量的近期及远景预测,还必须通过进一步的实测资料来验证其可靠性。模型验证取 1991 年 1 月至 1996 年 12 月水位观测资料,共分 66 个时段进行计算,地下水开采量采用实际统计资料,各项补给量与排泄项的计算方法与模型校正时一样。模型验证的可靠程度通过水位过程曲线拟合图(图 6)来体现,它反映了 1991 年 1 月至 1996 年 12 月梯度场的拟合情况。

在选定的 4 个地下水位观测孔中,从 1991 年 1 月至 1996 年 12 月模拟期中,总共有 265 个模拟值,在这些模拟值中,计算误差大于 0.5 m 的值有 48 个,占总数的 18.1%,其中大于 1 m 的值有 3 个,占 1.1%。这些误差主要产生在降雨偏少的 1994 年和降雨偏多的 1996 年,表明在地下水位变化幅度较大时,模型敏感度不够。在 4 个地下水位观测孔中,误差最小的是 0604 # 观测井,它位于栾城县中部,受河流入渗及边界条件影响较少,模拟结果稳定。误差较大的是 0606 - 2 # 与 0607 - 1 # 观测井,两井都距离退水渠与汶河较近,受河流入渗影响剧烈,模拟结果较差。但总的看,4 个观测孔的总体拟合程度较高。在 1990 年至 1996 年期间,降雨类型包括了丰水年(1996 年),降雨量为 923.8 mm,平水年(1991 年),降雨量为 485.5 mm,枯水年(1994 年),降雨量为 260.5 mm。模型的模拟结果表明,模型是可靠的,可以用于研究区地下水位与水量的近期及远景预测。

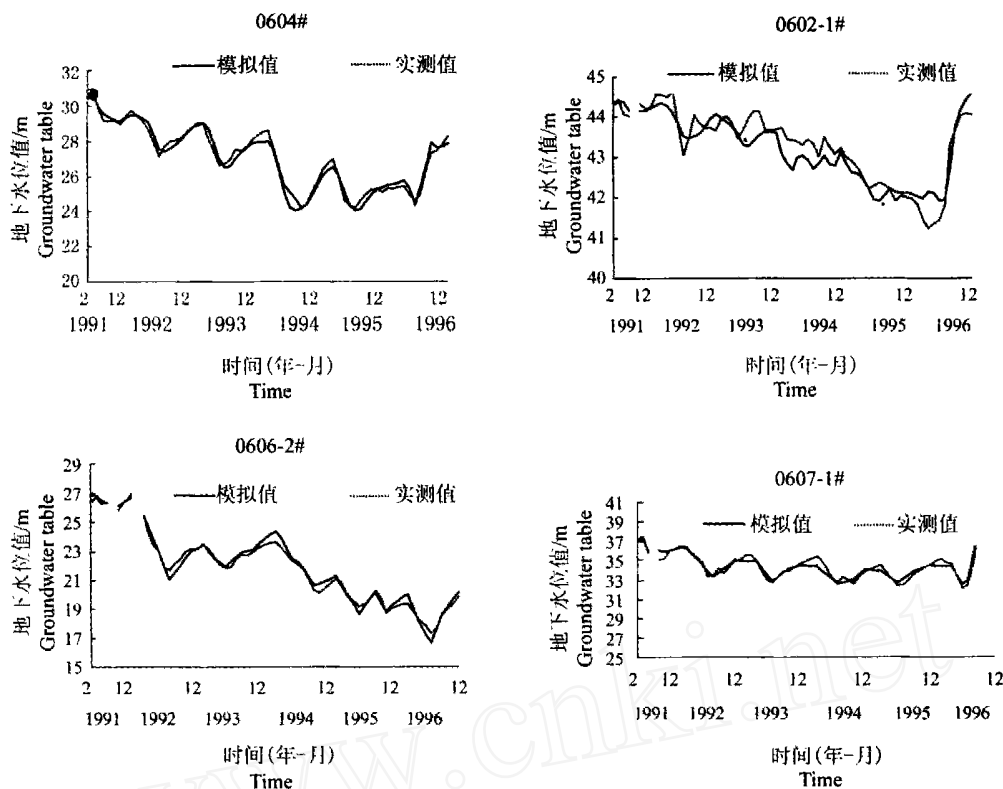


图 6 栾城县地下水观测井实测值与模拟值拟合过程线

Fig. 6 Fitting curve of observation and simulation data of groundwater table in Luancheng county

4 结论与讨论

通过本研究结果,可以获得了以下几点认识。目前,我国在地下水数值模拟领域与其他先进国家相比,还是有差距的。我国科技工作者应该加紧努力,争取早日推出具有知识产权的地下水数值模拟权威软件。对水文地质条件的充分认识,是地下水模拟工作的基础和关键所在。模型建立者应该对研究区有全面的了解,包括水文地质状况、水资源开发利用历史与现状、工农业生产状况、农业种植结构、水力工程的分布与利用等等。在山前平原地区,第 1、2 含水组具有密切水力联系、属于混合开采的区域,可以将二层合并为一层考虑。建立模型过程中,首先要力求地面高程与含水层底板高程输入的精度与准确度,这是计算机计算的基础。在准备输入模型的各项补给量与排泄量时,一定要紧扣当地实际情况,这是反演求参的前提。只有在这些工作取得满意精度的情况下,所求得参数才能切实反映研究区含水层的实际情况,校正与识别后的模型才可以用于研究区地下水资源的管理。

参考文献:

- [1] 陈梦熊. 中国水文地质环境地质问题研究[M]. 北京:地震出版社, 1998.
- [2] 王文科,李俊亭. 地下水流数值模拟的发展与展望[J]. 西北地质, 1995, 16 (4): 52 - 56.
- [3] 李颖. 水资源系统中地下水系统数学模型研究[J]. 世界地质, 1998, 17 (2): 41 - 46.
- [4] 薛禹群,吴吉春. 面临 21 世纪的中国地下水模拟问题[J]. 水文地质工程地质, 1999 (5): 1 - 3.
- [5] 吴剑峰,朱学愚. 由 MODFLOW 浅谈地下水流数值模拟软件的发展趋势[J]. 工程勘察, 2000 (2): 12 - 15.
- [6] 魏林宏,束龙仓,郝振纯. 地下水流数值模拟的研究现状与发展趋势[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000 (10): 50 - 52.
- [7] 武强,董东林. 水资源评价的可视化专业软件(Visual MODFLOW)与应用潜力[J]. 水文地质工程地质, 1999 (5): 21 - 23.
- [8] 周念清,朱蓉,朱学愚. MODFLOW 在宿迁市地下水资源评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2000 (6): 9 - 13.
- [9] 何杉. Processing MODFLOW 软件在地下水污染防治中的应用[J]. 1999, 57 (3): 16 - 18.
- [10] 栾城县水政水资源综合管理办公室. 石家庄市栾城县水资源开发利用现状调查报告[R]. 1993.
- [11] 唐益群,叶为民. 地下水资源概论[M]. 上海:同济大学出版社, 1998.

(编辑:祁振声)