

区域地下水流模拟

周仰效¹, 李文鹏²

(1. 联合国教科文组织 荷兰水资源学院, 荷兰德尔福特; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 人类活动对地下水流系统及其周围环境已经产生区域性影响, 对区域性影响的预测需求促进了区域地下水流模型的重大发展。功能强大的计算机的普及、用户界面友好的模拟系统及 GIS 软件的广泛应用使得区域地下水流模拟呈指数增长。大尺度的地下水非稳定流模型已经用于分析区域水流系统、模拟水均衡各要素随时间的变化及优化地下水管理方案。本文简述了区域地下水流模拟的发展历史, 介绍了美国死谷和澳大利亚大自流盆地两个大区域地下水流模型实例。此外, 文中亦介绍了区域地下水流模拟的方法, 讨论了区域地下水流模拟中遇到的特殊议题。

关键词: 区域水流系统; 模拟方法与问题

中图分类号: P641.74

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)01-0001-10

1 前言

过去几十年里, 水资源的大规模开发利用对流域水文系统产生了重大影响。经常看到一些地下水开发引起的负面影响的报道, 如: 含水层疏干、河流基流干涸、湿地萎缩、生态系统退化、水质恶化、地面沉降和地裂缝等。目前, 水资源的管理必须将流域看作一个整体来考虑, 其中包括地表水、地下水、水资源利用及对生态系统的影响及各因素之间的相互影响。决策者必须掌握足够的各因素之间相互作用的信息才能实现水资源可持续发展战略。模型通常用于提供这些信息并且预测不同管理措施的效果。地下水模型在地下水资源的开发与管理中起到至关重要的作用。随着计算机的普及、计算能力的快速增长与模型软件的广泛应用, 地下水模型已成为许多水文地质专家成功地完成各项任务的标准工具。地下水流模型主要应用于以下几个方面:

- (1) 调查地下水流系统的动态变化和水流系统类型;
- (2) 模拟地下水流系统对外部影响因素的响应;
- (3) 评价含水层的补给量、排泄量和储存量的变化过程, 以确定可持续开采量;
- (4) 预测未来气候变化或人类活动对地下水流系

统的影响;

- (5) 规划野外数据采集工作计划;
- (6) 评价地下水开发方案并将其可视化;
- (7) 评价水资源管理政策;
- (8) 向公众和决策者传递重要的可视化信息。

然而, 地下水流模拟在中国仍然不尽人意: 模拟工作仍由高校或科研机构来完成, 水文地质专家的角色依然是提供数据, 模型报告一旦完成, 做模型的人就离开了, 同时带走了模型知识, 模型并没有留在生产与管理机构, 因此不能得到周期性的更新与改进。中荷合作项目“中国地下水信息中心能力建设”尝试改变这一现状。在项目实施过程中, 来自新疆、北京和山东三个示范区的水文地质人员都参加了如何使用模型系统和如何建立地下水模型的短期强化培训班。在过去 3 年里, 这些受过培训的水文地质人员在模型专家的指导下建立了各示范区的地下水模型。通过这种方式, 所建立的模型保留在当地地下水监测总站并可以在将来得到进一步的完善。

本文概述了区域地下水流模拟, 回顾了区域地下水流模拟的发展历史。介绍了两个大区域模拟的实例, 从而展示了如何建立一个区域地下水流模型。随后, 总结了建立区域地下水流模型的具体方法, 讨论了区域地下水流模拟中所遇到的特殊议题。

2 区域地下水流模拟历史简述

Toth 在 1963 年首次运用解析解来分析一个简单小流域中的地下水流系统^[1]。在理论上, 他发现了多级嵌套的地下水流系统的存在: 局部地下水流系统、过渡地下水流系统和区域地下水流系统(图 1)。在均质

收稿日期: 2008-11-06; 修订日期: 2008-11-09

基金项目: 中荷合作项目“中国地下水信息中心能力建设”

作者简介: 周仰效(1958-), 男, 博士, 主要从事水资源与水文地质教学与研究工作。

各向同性的地下水盆地中,地貌、地质和气候是形成三级地下水系统的主导因素。野外调查确定分级地下水流系统的方法包括:调查地下水补给与排泄区、分析

地下水位随深度的变化、确定水化学类型、应用环境同位素、调查植被情况和分析地表河流分布等^[2-5]。

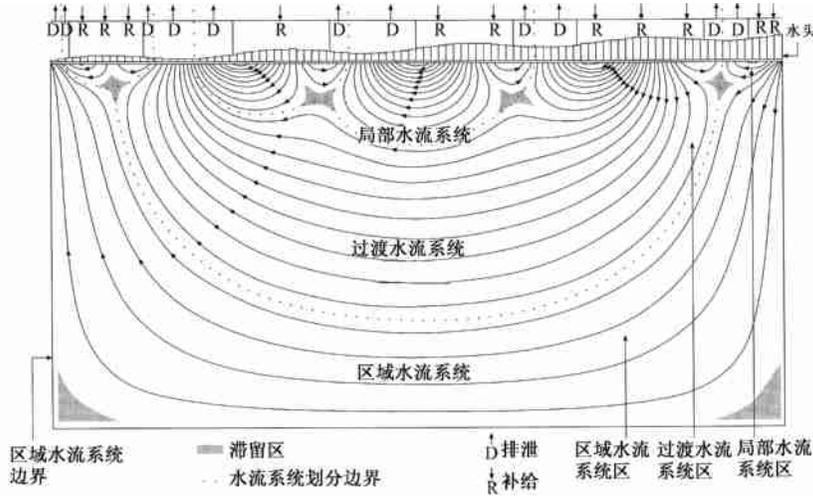


图1 Toth 提出的多级嵌套的地下水流系统的例子^[5]

Fig.1 Example of Toth's hierarchically nested groundwater flow systems

Freeze 和 Witherspoon 在 1966 年首次应用稳定流数值模型模拟层状含水层中的区域地下水流系统^[6]。数值模型的优势在于能够模拟非均质各向异性含水层中三维地下水流系统。他们用模型分析潜水面形状和渗透系数对区域水流系统的影响及地下水盆地的产水量^[7-8]。Freeze 于 1971 年开发了非稳定饱和-非饱和流的数值模型,用于分析入渗补给量、潜水位上升和河流基流量之间的关系^[9]。他用该模型预测了地下水盆地的最大产水量,并指出盆地产水量是开采形式、地下水补给和排泄特征的函数。

运用地下水流模型模拟大区域含水层地下水流始于 1978 年的美国地质调查局的区域含水层系统分析 (RASA) 项目^[10]。在 1978~1995 年历时 18 年的项目中,集中研究了 25 个区域含水层系统,包括著名的高原含水层系统、加利福尼亚中央裂谷含水层系统、佛罗里达州含水层系统和大盆地含水层系统等。区域含水层系统分析项目的主要贡献为:(1) 创建了区域水文地质数据库;(2) 建立了水文地质框架(水文地质概念模型);(3) 认识了区域含水层系统对自然应力(早期影响)和人类干扰(开采和土地利用变化)的响应;(4) 编辑出版国家地下水图集。该项目应用地下水流数值模型分析地下水流特征,模拟地下水开采和土地利用变化对地下水的影响。使用的计算机模型主要是美国地质调查局的三维有限差分模型和 MODFLOW^[11]。典型的区域含水层模型一般覆盖数万平方公里。模拟的

含水层一般划分为 2~10 个模拟层,网格间距一般为 6~25km。稳定流模型通常用开采前的数据来校正,而非稳定流模型的建立一般用校正后的稳定流模型计算的水头作为初始水头。RASA 项目在美国地质调查局专刊出版了 900 多份报告(专刊号 1400-1428)。RASA 项目的参考书目列出了 1105 份不同出版物^[12]。

荷兰的贡献在于拓宽水文系统分析的概念和方法。Engelen 在 1986 年总结了荷兰水流系统分析的概念及实例研究^[13]。荷兰国家水文系统分析的实例研究已于 1996 年出版^[5]。

三维地下水流模型的应用促使区域水流系统分析取得重大进展。自 1988 年 MODFLOW 发布以来,以其灵活的模块结构,包含完整的水文地质过程和免费提供等特点,迅速成为世界范围内地下水模拟的标准软件。MODFLOW-88 进一步升级为 MODFLOW-2000^[14]和 MODFLOW-2005^[15]。2005 版 MODFLOW 包括饱和-非饱和水流过程、地下水模拟-优化过程、灌溉过程、密度水流过程、参数优化过程和溶质运移过程。MODFLOW 的未来发展方向是要开发地表水与地下水相结合的耦合模型^[16]。

随着软件工程和计算机能力的快速发展及地理信息系统的广泛应用,模拟大区域地下水流系统已经相当容易。从 20 世纪 90 年代以来,已经开发了几个基于 Windows 图形用户界面的 MODFLOW 软件系统,其中使用最广泛的是 Processing Modflow^[17]、Visual

Modflow^[18]、GMS^[19]和 Groundwater Vista^[20]。这些图形用户界面使得模拟过程简单化,从而可以节省出大量时间用于分析模型结果。与此同时,个人电脑的能力(储存和处理速度)也得到巨大的提高。在台式机上,运行一个大流域的地下水流稳定流模型只需几分钟的时间。地理信息系统在数据存储、处理、插值和可视化方面的功能进一步加强了模型的建立和模型结果的可视化输出。

近20年来数值模型在区域地下水流研究方面的应用呈指数增长。在这其中,完成了两个大区域地下水流模拟的实例研究:美国死谷的区域地下水流模拟和澳大利亚大自流盆地的区域地下水流模拟。

3 大区域地下水流模拟的两个实例简介

3.1 美国死谷

死谷由几个大峡谷和山脉组成,面积约 $1 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。孤立的山脉耸立在宽阔的冲积沙漠盆地上,构成了主要的干旱景观。海拔的变化范围从死谷的低于海平面86m上升到泉山的3600m。气候受海拔和纬度的控制。死谷的北部构成了大盆地沙漠的一部分,这里夏季温暖干旱,冬季寒冷干旱。南部构成了死谷和莫哈韦沙漠的一部分,夏季炎热干旱,冬季则温暖干旱。中心地区为过渡沙漠,代表了两种气候类型的

混合。冬雪的特点是强度小、持续时间长且覆盖面积大,夏雨大多为局部雷暴雨、强度大、持续时间短。

死谷的地下水流系统是由多个互相联系的复杂的地下水系统构成(图2)。地下水分别在三个子区域中,相对浅层的局部水流系统叠加在深层的区域性的水流系统之上。区域性地下水径流主要流经古生代碳酸盐岩,通常沿着区域地形梯度流向死谷。大部分的地下水补给来源于山区的降雨和地表径流。地下水的天然排泄方式主要是泉、盐湖和潜水蒸发。

从1982年至今,死谷地区的地下核试验及核废物处理促进了大量的地下水模型的研究^[22]。20世纪80年代建立的模型为二维稳定流模型,其模拟的地下水过程过于简单且水文地质参数过于简化。90年代早期,建立了2个三维的区域地下水流数值模型。其中一个用于Yucca山地区核处理场地特征分析,另一个则用于Nevada地下核试验研究。1998年,能源部要求美国地质调查局建立一个完善的死谷区域地下水模型。模拟的目的如下:(1)弄清地下水的径流路径和由核试验产生的放射性物质的运移时间;(2)确定Yucca山核废物处理场地周围地下水系统的特征;(3)弄清这两个核废物处理地点对下游地区居民的各种影响。在这个5年的项目中,美国地质调查局完成了死谷地区三维地下水非稳定流模型的建立^[21,23~24]。

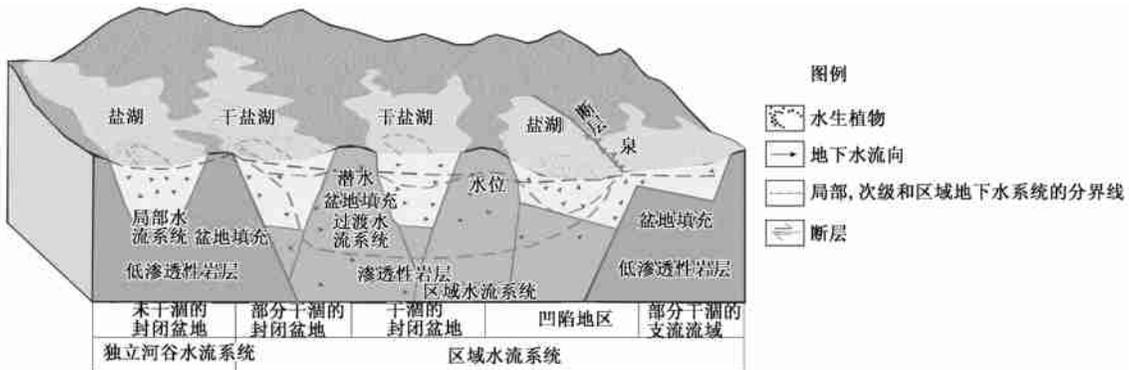


图2 死谷立体框架示意图^[21]

Fig. 2 Schematic block diagram of Death Valley

死谷地区三维地下水非稳定流模型是运用MODFLOW-2000建立的。有限差分模型剖分为194行、106列,共16层。正方形网格边长为1500m。共剖分了496640个单元,覆盖的面积为69840km²。与整个模拟的区域相比,模型单元的面积(2.25km²)足够小。在确定剖分网格大小时考虑了三个方面的因素:(1)计算效率;(2)反映现有数据的精度;(3)有效地模拟区域地下水流系统。模拟层厚度从顶部到底部由

50m增加到300m,总厚度达1700m。由于浅部水文地质和地质条件的观测资料比较多,因此顶部模型层的划分比较细。

建立了三维数字水文地质结构模型(HFM)以确定水文地质单元的几何形状、岩性及水文地质结构^[23]。总共划分了25个水文地质单元。利用MODFLOW-2000的水文地质单元水流模块,可以将水文地质结构模型自动离散到地下水数值模型的输入数组中^[4],通

过这种方式,可自动输入每个模型层的顶底板高程和岩性分布。水文地质构造主要起水平阻水或导水作用。阻水断层用 MODFLOW-2000 中的水平阻水模块来模拟。

侧向边界是把天然隔水或地下水分水岭用零流量边界来模拟。若边界存在断裂带或者高渗透带时,水力梯度使得水流可以通过这些边界,采用流量边界来模拟。

主要的补给来源是山区的降水。经验水均衡法和分布参数模型法用于确定死谷地区地下水的补给位置和补给量,并开发了一个基于补给过程的数值模型来估算净入渗补给量^[25]。地下水的补给用 MODFLOW-2000 的补给模块来模拟。

地下水排泄方式主要是蒸发和泉^[25]。利用光谱卫星数据结合微气象测量值估算了区域蒸发量,从而确定出蒸发区及计算出每个蒸发区每年的蒸发率。大泉群的泉流量都有记录。蒸发排泄和泉排泄在模型中用 MODFLOW-2000 的排水沟模块来模拟。用于灌溉和生活的地下水开采始于 1912 年,从 50 年代开始迅速增加,模型中用 MODFLOW-2000 中的多节点井流模块来模拟,该程序包可根据各模型层的导水系数自动将开采量按一定比例分配给各模型层。

模拟分为稳定流模拟和非稳定模拟。稳定流模拟用 1913 年以前的数据,这期间没有地下水开采。非稳定流模拟是从 1913~1998 年。根据开采量的确定,将这 86 年的非稳定流模拟期按年划分应力期,即一个应力期为一年。

用非线性回归分析法对数值模型进行校正。计算加权残差时,稳定流模拟用到了地下水位的 700 个观测数据,非稳定流模拟用到 15 000 个水位数据及 49 个蒸发排泄和泉排泄数据。通过优化水力参数以使加权残差值最小。首先校正的是稳定流模型,得到的计算水位作为非稳定流模型的初始水位。非稳定流模型校正的是 1913~1998 年的非稳定流状态。在模型校正过程中,试验了许多概念模型以检验对地下水流系统做出的各种解释。包括:(1)地下水流系统边界的位置和类型;(2)补给区域的确定;(3)水文地质结构的各种解释。

模型校正结果的评价是比较地下水位及排泄量的观测值和计算值。在水力梯度比较平缓的地区,观测水位与计算水位拟合得比较好;在水力梯度比较陡的地区,拟合的效果较差。地下水排泄残差值呈随机分布;计算的水流值小于观测水流的地区和计算的水流

高于观测水流的地区一样多。

所建立的这个模型还没有按照它的初衷用于分析地下水流系统和评价潜在的影响。

3.2 澳大利亚大自流盆地

大自流盆地是一个封闭的地下水盆地,占地 $1.7 \times 10^6 \text{ km}^2$,占澳大利亚大陆的五分之一,延伸到昆士兰、新南威尔士、南澳大利亚和北领地最干旱和半干旱地区。盆地大部分由地势低的内陆盆地组成,东面与大分水岭的高原和高地搭界。地表总体上向西南主要的地形低洼地艾瑞湖和弗罗姆湖倾斜。北部地下水主要排泄到卡奔塔利亚湾。

大自流盆地位于干旱半干旱地区,盆地中西部为温暖-炎热、干旱的气候,东部边缘地区盛行亚热带气候,东北部地区属于热带地区,西南部地区非常干旱,年均降水量少于 200mm。年均降水量向东部和东北地区增加到超过 600mm,在卡奔塔利亚湾附近,年降水量可达 900mm。

大自流盆地是一个由弱透水层和含水层组成的多层含水层系统构成的地下水沉积盆地。在整个盆地以及盆地中央地表以下 3 000m 范围内,这些含水层大部分是连续的。20 世纪 80 年代自流地下水资源的发现已成为该地区畜牧业发展的关键因素。天然的自流泉水供养了干旱地区的多种野生生物。地下水资源正在不断地被开采,用于饮用水、农业灌溉以及石油天然气的开采。

过去的 100 年间,该盆地建立了约 3 000 个自流井和 35 000 个次级自流井。没有控制的自流地下水排泄到沟渠中,通过渗漏和蒸发消耗掉。目前,这些井每年的开采量为 $5.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中的 90% 用于畜牧业。和该区地下水资源的可持续利用有关的主要问题是:

(1) 一些地区的地下水压力已经在降低,1500 个自流井已经停止自流,泉流量明显减小,一些泉眼已经干涸;

(2) 由于大量自流井和地表水渠的使用,90% 的自流水被浪费掉;

(3) 补给区过度的土地使用对地下水存在潜在的污染。

大自流盆地水井修复项目发起于 1989 年,目的在于控制自流的自流井,并用管道分布系统取代开放式排水沟渠。该项目对自流地下水压力恢复的效果通过一个地下水模型来预测。这个模型就是大自流盆地二维地下水稳定流模型,是由农林渔业部农村科学局完成的^[26]。

大自流盆地概念模型在垂向上可划分为5个主要的含水层和4个弱透水层(图3)。盆地覆盖了新生代的陆源沉积物,水文地质基底是由时代更老的沉积岩、变质岩和火成岩组成。第一个含水层由砂岩、粉砂岩和泥岩构成,其中赋存高盐度的地下水。主要的开采层位是第二层,由Cadna-owie-Hooray组的砂岩构成。第一和第二含水层中间是新生代的Allaru泥岩,这层

泥岩是自流含水层最厚的弱透水层。第三含水层由侏罗系陆源石英砂岩构成,赋存着水质较好的地下水。第二和第三含水层由弱透水层分隔开,其中弱透水层由晚侏罗系的Westbourne组构成。由于大多数开采井位于第二含水层,因此模型仅模拟了该层的地下水流。第一和第三含水层通过弱透水层越流补给第二含水层,模型中将这两个含水层作为外部源汇项来模拟。

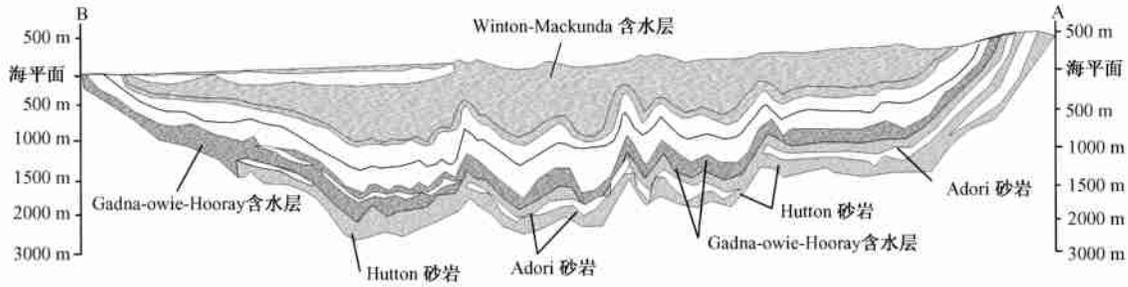


图3 大自流盆地剖面图^[27]

Fig. 3 Cross-section of the Great Artesian Basin

大自流盆地地下水模型是用MODFLOW-88建立的。模型将盆地离散成359行、369列,正方形网格边长为5000m,有效单元格共有60000多个,覆盖面积达 $1.54 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。模型北部边界为卡奔塔利亚湾和吉尔伯特河的海岸线,模型中用定水头边界来模拟,其余边界为零流量边界。稳定流模拟的时间为1960年,这是因为考虑到在1950~1970年,地下水的补给与排泄之间可能已经达到了新的平衡。

大部分补给发生在盆地东部砂岩出露区,盆地西部边缘的含水层也接受到短暂的补给。补给量用占年均降水量的百分比(降水入渗系数)计算,入渗系数范围为0~35%。所有补给单元的平均入渗系数为1.3%,平均补给量为5.4mm/a。模型中接受补给区域的面积约为134000 km^2 ,所以模型中总的降水入渗补给量为1937394 m^3/d ,用MODFLOW补给模块模拟。

地下水的天然排泄主要是泉水溢出排泄。盆地边缘的12个主要泉群中约有超过600个复合泉。泉的形成通常与断层或构造有关。303个天然泉或泉群在模型中用MODFLOW的开采井模块模拟。估计泉的总排泄量为93531 m^3/d 。人工排泄是指开采井和自流井。模拟的2300个井的总开采量为1372471 m^3/d 。泉和井的总排泄量为1466002 m^3/d 。

越流大多数发生为深部高压含水层向浅部低压含水层排泄,模型层与上下含水层间的越流量在模型里用MODFLOW的通用水头模块模拟。上下含水层中的地下水位值是从手绘的等值线图上估计得到的。两个

弱透水层的垂向越流系数是根据弱透水层的厚度和垂向渗透系数计算得到的。

开发了两个数据库用于模型数据输入。用Oracle数据库创建了名为GABMOD的钻孔资料数据库。模型区域内的55530个钻孔信息都储存在这个数据库中。创建了GIS空间数据库用于从GABMOD数据表中提取相关信息来准备如下数据输入文件:含水层厚度、水文地质参数、初始水头、泉流量和开采量。GMS用于处理从GIS空间数据库输入到MODFLOW所需的特定数据文件中的数据。模型输出结果用GMS进行可视化。

模型校正采用试算法,旨在减少计算水位与观测水位之间的差值。在校正模型的过程中,调整了模型层的渗透系数和大气降水入渗补给量。误差的均方差用于评估模型校正的准确度。模型最后的误差均方差为4.5m,单个误差值的变化范围为-13.1~+12.8m。

模型用于评价大自流盆地地下水可持续开发方案的效果,其目的是在不同管理方案下恢复压力水头,共模拟了3个管理方案:

- (1) 在地下水开发利用程度高的地区,控制开采量不应超过4L/s;
 - (2) 流量较大的自流井地区应对自流井进行加盖处理,使其自流量低于4L/s;
 - (3) 大多数自流量较大的井应进行加盖处理,但在一些管理区域,每个井的最大排泄量允许超过4L/s。
- 模拟结果表明,控制自流井的流量是节约宝贵的

地下水资源和恢复自流压力的一种有效方法。方案三实行起来更现实一些,每年节约的总水量达 $2.12 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水位最大可恢复 26m。模拟方案的结果用于划分地下水管理区的优先次序。地方水务局也把模型输出的地下水位恢复等值线图作为地下水管理的目标。

大自流盆地稳定流模型已更新成为一个二维自流入含水层(Cadna-owie-Hooray)非稳定流模型^[27-28]。非稳定流模型是用 MODFLOW-2000 建立的,其模拟的时间是从 1965~1999 年,一年为一个应力期。来自顶底含水层中的越流量在模型中是用补给模块模拟的,为净补给量。模型中模拟了大约 8750 口水井和 207 处石油水源地。254 个观测井的数据用于模型校正。由于数据的局限性,非稳定流模型水头拟合得不是太好。

大自流盆地地下水模型用于预测模拟管理方案时存在以下不足:

(1) 泉流量是固定值,模型中用开采井模块模拟。然而,在管理方案中,由于控制自流井的自流量,地下水位得到恢复,所以泉流量是会增加的。泉流量应当通过 MODFLOW 中的排水沟模块模拟,这样泉流量是随着地下水位的变化而发生变化的。

(2) 来自上下含水层的越流量是通过通用水头边界模块模拟的,稳定流模型中上下含水层中地下水位是固定的。但是,在管理方案中,模拟层的地下水位是发生变化的,因此上下含水层中的地下水位也会发生变化。主要开采层的二维模型应当扩展成模拟三个含水层和两个弱透水层的准三维模型。

4 区域地下水模拟方法

4.1 区域地下水模型特征

地下水的补给排泄特征和区域含水层广泛分布要求地下水资源评价管理中的任何一个有用的地下水模型都应当能够模拟整个地下水流域。因此,地下水模型应当是一个区域模型,需要建立大区域地下水模型。

区域地下水流与地下水流模型的主要特征为:

(1) 地形高程差异是区域水流的重要驱动力。地下水补给发生在山区与山前,地下水以泉流排泄、渗入河流和在盆地低洼处蒸发等形式排泄。因此模型区域应当覆盖从补给到排泄的整个流域。

(2) 通过弱透水层的越流是区域水流系统的一个重要要素,因此模型层应当包括区域主要的含水层和弱透水层。

(3) 地表水和地下水实际上是统一的水资源。河

流与地下水之间的强烈相互转换应当用线源模拟;排泄及入湖量应当采用与水头有关的排泄方式或定水头来模拟(对稳定流模型尤其有用)。

对一个区域模型而言,模型剖分的网格大小的变化范围是从 1km(几千平方公里的区域)到几公里(几平方公里的区域)。当模型的剖分单元大小为几平方公里时,应当额外考虑以下几点:

(1) 运用合适的尺度上移方法,用小尺度的测量值计算模型单元的有效渗透系数。

(2) 计算的模型单元的水位值代表的是几平方公里面积上的平均值,不能将其看作是一个点上的值,因而不能与观测井的观测值简单比较。

(3) 校正模型时,模型计算的水位等值线图应当与观测的区域水头等值线图进行比较。尤其是观测到的排泄项的数据(泉流量和蒸发)对模型校正更有用。

(4) 网格加密法难以提高局部地区(水源地与污染物运移)的精度;将区域模型需要加密的地区转化成一个加密的局部模型是更行之有效的方法。

4.2 水文地质概念模型方法

传统的基于网格模拟的方法是首先根据概念模型的复杂性和拥有的数据设计三维模型网格。随后,大量的数据要一个一个地输入到模型网格中。数据输入的过程非常枯燥并且极易出错。在最近几年里,开发了概念模型方法用于建立复杂的区域地下水模型。这种建模方法(图 4)就是通过地理信息系统的特征元素(点、线、面)来建立研究区的数字水文地质概念模型,并将其保存到模型系统中。一旦生成模型网格,数据就会通过概念模型自动传输到数值模型单元格中。这种方法特别适用于流域规模的地下水模拟。

与传统的基于网格模拟方法相比,使用概念模型方法会带来巨大的好处:首先,数值模型的数据输入可以独立于网格分辨率。例如,在河流流经的单元格里,模型建立者不需要浪费宝贵的时间根据河流的长度来计算合适的传导系数并赋值到该单元格中,这类的计算模型会自动完成。此外,非稳定流变量如开采量的赋值也可以独立于模型的时间剖分。这些变量值是按应力随时间变化曲线的形式输入的。当概念模型转化成数值模型时,这些应力的变化值会通过差值自动地赋值到合适的应力期内。由于概念模型的建立独立于数值模型的时空离散,所以概念模型可以快速容易地进行修改,随后短时间内就可以产生一个新的数值模型。这就使得模型建立者能够在通常只能评价一个概念模型的时间内,评价大量的可选概念模型,从而使模

拟过程更加有效。

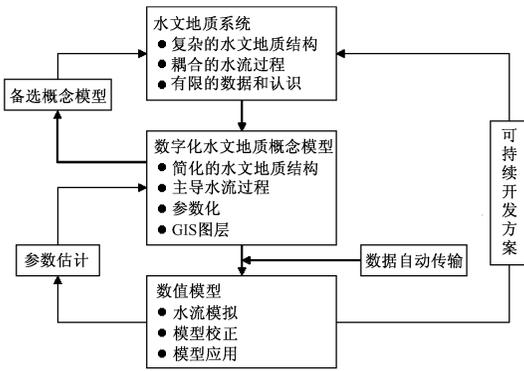


图 4 概念模型方法的模拟过程图

Fig. 4 Modelling procedure of a conceptual model approach

存储特征元素属性的另一个优点在于平滑边界条件高程与水位的赋值, 这样能够减少 MODFLOW 有限差分模型内在的不稳定性。当用户给水头和高程赋值时, 一次只输入一个单元格的数据是相当枯燥的, 而且在有河流流经的单元格里, 获得准确的高程值是相当困难的。通常是选取一小部分单元格为一组, 对这一组中所有单元格赋相同的值, 但是这样就会产生阶梯式的水位与高程值, 它会减缓数值解的收敛速度。然而在概念模型方法里, 是能够沿着线性边界, 如河流, 进行差值的, 这样用户就能够保证单元格与单元格之间数值不会发生突变, 能够更准确地反映真实的边界条件。

4.3 GIS 的应用

地下水模拟需要大量的数据, 如水文地质结构、水力参数、水文变量和观测的水位等。所有这些数据都是以不同的形式和尺度保存的, 如地图、图表、表格、数据库或者电子数据表。GIS 带有一套强大的工具, 能够明显地改善空间数据的处理。

GIS 与地下水模型的耦合可以通过三项技术来实现: 松散耦合、紧密耦合和嵌套耦合^[29]。松散耦合就是 GIS 和模型代表不同的软件程序包, 数据是通过输入/输出模型预定的文件来传递的。GIS 软件用于空间数据的前处理和后处理, 这种耦合的优点就是耦合的软件程序包是独立的系统, 利于将来改变任意一个独立的软件。GIS 在地下水模拟方面的应用大多数采用的都是松散耦合技术。紧密耦合是将数据从 GIS 中直接输出到模型中, 但是 GIS 工具可以交互式访问模型输入子程序, 在这种情况下, 数据交换完全是自动的。这种耦合的一个例子就是 ERMA 空间数据库设计与 MODFLOW, MODPATH 和 MT3D 有限差分软件程序包

之间的地下水模型接口。用 GIS 编程语言建好一个模型时或者一个复杂的模拟系统结合一个简单的 GIS 时, 通常使用嵌套耦合。Argus ONE^[30] 数值模拟环境和 GMS 就是这种耦合的两个例子。

5 区域地下水流模型特殊议题

5.1 简单模型与复杂模型

所有的地下水模型都是对真实的水文地质条件的一种概化。首先, 复杂的地层被概化成有限的含水层与弱透水层。地下水流域的天然边界的类型及其赋值通常都是假定的, 有时甚至采用人为边界。其次还有对水流过程的概化; 模型仅模拟主要的水流过程。再次, 参数分区是为了简化模型参数的输入和方便模型校正。

以往的地下水模型都非常简单。但随着计算机的快速发展, 地下水模型变得越来越复杂。在一些情况下, 模型的复杂性已经超过了现有的数据的支持和模型目标的要求。无论是十分简单的模型, 还是非常复杂的模型, 都不能够提供准确的预测。简化的原则就是在能够体现系统的主要特征和用于预测的主要水流过程的前提下, 尽可能地使模型简单。模型开发的策略就是从简单模型开始, 通过提供的数据和模型的预测慢慢将模型复杂化^[31]。从简单模型入手的好处有: 容易理解模拟的水流过程和模型的不匹配之处; 简单模型运行的时间短(一般少于 30 min^[31]), 因此可以分配更多的时间用于分析模型结果和调查可选的概念模型。通过以下方式可以缩短模型的运行时间: (1) 更好地描述非均质差异; (2) 更好地将非线性的潜水位线性化^[31]。

5.2 模型校正

模型校正就是通过调整模型参数, 使得模型计算的地下水位与观测水位能够更好地拟合, 模型校正过程可以建立一个有用的地下水模型。有效的模型校正包括整个模拟过程。使用自动调参法(非线性回归)对模型进行有效校正的指导方针见表 1^[32]。

5.3 地下水模型数据

建立区域地下水流模型的瓶颈通常在于缺乏足够的数据库。建立有用的区域地下水非稳定流模型需要三类主要的数据库: 用于建立三维水文地质结构模型(HFM)的静态数据; 用于确定地下水的补给与排泄的动态数据; 主要含水层中地下水位的时间序列。

三维水文地质结构模型就是将控制区域地下水流的水文地质单元和地层结构用数字化表达。水文地质

表1 有效模型校正的指导方针^[22]

Table 1 Guidelines for effective model calibration

序号	有效模型校正的指导方针
1	运用简化原则(从简单入手,慢慢将其复杂化)
2	使用大量的信息(软数据)来约束问题
3	维持一个可解的完整的线性回归问题
4	在线性回归问题中采用各种观测数据(硬数据)
5	谨慎地使用预先知道的信息
6	根据观测误差分配权重
7	通过完善模型和评价观测数据改善模型的收敛
8	考虑可选概念模型
9	评价模型的拟合
10	评价优化得到的参数值
11	寻找新的数据以完善控制系统动态的过程和特性
12	寻找新的数据以改善预测结果
13	运用确定性方法评价预测的不确定性和精度
14	运用统计方法量化预测的不确定性

结构模型中定义了每个水文地质单元和地质结构的空
间分布、厚度及水力特性。GIS和地层模拟工具用于
建立水文地质结构模型。建立模型所需的数据来源于
地形资料、地质与水文地质图、钻孔岩性数据、地球物
理调查、剖面、地质结构和含水层试验数据。图5表明
了死谷地下水模型中水文地质结构模型的建立过程。
处理数字化模型所需的不同来源的数据需要几种
工具。

确定地下水各补给项和各排泄项的分布与大小是
建立区域地下水模型遇到的另一个重要的难题。地下
水的补给来源包括降水入渗补给、地表水的渗漏补给、
灌溉回渗补给和侧向流入补给。估计降水入渗补给地
下水的净补给量时需要掌握气象数据、植被和土壤特
征。灌溉回渗补给量取决于灌溉的水量、植被蒸腾和
蒸发损失量。需要收集河流、湖泊的水位以确定地表
水体对地下水的补给量。绘制地下水位等值线图可以
用于确定地下水的侧向流入量和流出量。地下水的排
泄通常包括蒸发、出露地表成泉、排泄到地表水体、侧
向流出以及人工开采。除了直接测量的数据外,在确
定实际蒸散量时也会用到遥感数据。对基岩含水层而
言,测量泉流量尤为重要。在确定地下水对河流的排
泄量时,对河流水文线进行基流分割是一种重要的方
法。开采量数据不仅很难收集到,而且开采改变了天
然补给(增加的补给量)和排泄(减少的排泄量)。因
此,只要可能就应当首先建立早期的地下水均衡,这对
开采条件下的水均衡是个参考。建立区域地下水稳定
流模型时也需要天然水均衡各组分的数据。

地下水位的测量值不仅用于地下水模型的校正,
而且用于地下水流系统的分析。结合地下水位等值线

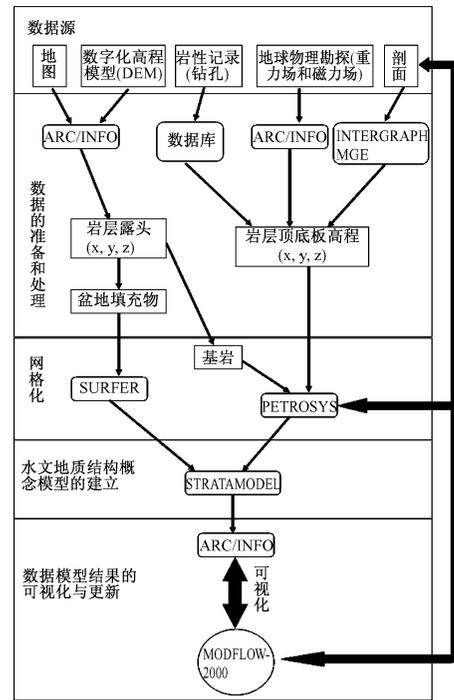


图5 死谷水文地质结构模型的建立^[23]

Fig. 5 Development of the Death Valley hydrogeological framework model

图、水均衡组成及水文地质结构模型,可以确定三维地
下水流系统及其形式。地下水的流线可以通过地下水
化学、同位素及温度数据来确定。一个有用的区域地
下水模型不仅能够拟合观测井的水位,而且更重要的是
能够重现三维地下水流形式和模拟不同开采条件下
水均衡各组分的变化趋势。区域地下水位监测网能够
为地下水系统的分析和地下水模型的校正提供所需的
地下水水位的时间序列,反过来,区域地下水模型可以
指导确定观测地下水水位的重要位置。

6 结论

地下水流模型已经成为水文地质人员完成各项任
务的有用工具。个人电脑计算能力的快速增长和用户
界面友好的模型系统的发展使得模拟大区域地下水
流系统成为可能。从死谷和大自流盆地地下水非稳
定流模型建立中获得的经验,对指导中国区域地下水
模型的建立非常有用。然而,建立区域地下水流模型
的瓶颈通常在于缺乏足够的资料。需要通过地质、水
文地质和地球物理勘查来获取数据,从而用于建立三
维水文地质结构模型。对水均衡各组分和地下水位的
连续测量,可以提供区域地下水系统分析和区域地下

水非稳定流模型建立所需的数据。总之,模型可以用于模拟人类活动对地下水流系统的影响、确定地下水资源可持续开发方案以及向公众和决策者提供可视化的模拟结果。

参考文献:

- [1] Toth J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins [J]. *Geophysical Research*, 1963, 68 (16): 4795– 4812.
- [2] Toth J. A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeological environment [J]. *Hydrology*, 1970, 10: 164– 176.
- [3] Toth J. Groundwater discharge: a common generation of diverse geological and morphological phenomena [M]. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, 1971, XVI (1/3): 7– 24.
- [4] Toth J. Properties and manifestations of regional groundwater movement [C]. Montreal: Proc. 24th International Geological Congress, 1972: 153– 163.
- [5] Engelen G B, Kloosterman F H. Hydrological system analysis: Methods and application [M]. Water Science and Technology Library, 1996.
- [6] Freeze R A, Witherspoon P A. Theoretical analysis of regional groundwater flow: Analytical and numerical solutions to the mathematical model [J]. *Water Resources research*, 1966, 2(4): 641– 656.
- [7] Freeze R A, Witherspoon P A. Theoretical analysis of regional groundwater flow: Effect of water table configuration and subsurface permeability variation [J]. *Water Resources research*, 1967, 3(2): 623– 634.
- [8] Freeze R A, Witherspoon P A. Theoretical analysis of regional groundwater flow: Quantitative interpretations [J]. *Water Resources research*, 1968, 4(3): 581 – 590.
- [9] Freeze R A. Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin [J]. *Water Resources Research*, 1971, 7(2): 347– 366.
- [10] Sun R J, Johnson R H. Regional aquifer system analysis program of the US Geological Survey 1978– 1992 [R]. US Geological Survey Circular 1099, 1994.
- [11] McDonald M G, Harbaugh A W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model [R]. US Geological Survey Open-File Report 83– 875, 1988.
- [12] Sun R J, Weeks J B, Grubb H F. Bibliograph of regional aquifer system analysis program of the US Geological Survey, 1978 – 96 [R]. *Water Resources Investigation Report 97– 4074*. Austin, Texas: US Geological Survey, 1997.
- [13] Engelen G B, Jones G P. Developments in the analysis of groundwater flow systems [M]. IAHS Publication, 1986: 365.
- [14] Harbaugh A W, Banta E R, Hill M C, *et al.* The US Geological Survey's modular ground water flow model— User guide to modularisation concepts and the ground water flow process [R]. US Geological Survey Open-File Report 00– 92. 2000.
- [15] Harbaugh A W. MODFLOW– 2005, the US Geological Survey's modular ground water flow model— The groundwater flow process [R]. US Geological Survey Techniques and Methods 6 – A16. Reston, Virginia, 2005.
- [16] Barlow P M, Harbaugh A W. USGS directions in MODFLOW development [M]. 2006: 771– 774.
- [17] Chiang W H, Kinzelbach W. 3D-groundwater modelling with PMWIN a simulation system for modelling groundwater flow and pollution [M]. Springer, 2001.
- [18] Waterloo Hydrogeological. Visual MODFLOW Pro, 3D groundwater flow and contaminant transport modeling [R]. 3.1ed. 2001.
- [19] Brigham Young University- Environmental Modelling Research Laboratory. Groundwater Modelling System (GMS), GMS 3.1 Tutorials [R]. 2000
- [20] Rumbaugh J, Rumbaugh D. Groundwater Vistas 5. 0, 1996– 2005 [R]. Environmental Simulation, Inc, 2005.
- [21] Faunt C C, F A D' Agnese, G M O' Brien. Hydrology, Chapter D of Death Valley regional Groundwater Flow System, Nevada and California— Hydrogeological Framework and Transient Groundwater Flow Model [R]. US Geological Survey, 2004a.
- [22] Belcher W R, F A D' Agnese, G M O' Brien. Introduction, Chapter A of Death Valley regional Groundwater Flow System, Nevada and California— Hydrogeological Framework and Transient Groundwater Flow Model [R]. US Geological Survey, 2004.
- [23] Faunt C C, Sweekind D S, Belcher W R. Three-dimensional hydrogeological framework model, Chapter E of Death Valley regional Groundwater Flow System, Nevada and California— Hydrogeological Framework and Transient Groundwater Flow Model [R]. US Geological Survey, 2004b.
- [24] Faunt C C, Blainey J B, Hill M C, *et al.* Transient numerical model, Chapter F of Death Valley regional Groundwater Flow System, Nevada and California—

- Hydrogeological Framework and Transient Groundwater Flow Model [R]. US Geological Survey, 2004c.
- [25] San Juan C A, Belcher W R, Laczniak R J, *et al.* Hydrological components for model development, Chapter C of Death Valley regional Groundwater Flow System, Nevada and California-Hydrogeological Framework and Transient Groundwater Flow Model [R]. US Geological Survey, 2004.
- [26] Welsh W D. GABFLOW, A steady state groundwater flow model of the Great Artesian Basin. Land and Water Sciences Division [R]. Canberra: Bureau of Rural Sciences, Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Australia, 2000.
- [27] Radke B M, Ferguson J, Cresswell R G, *et al.* Habermehl. Hydrochemistry and implied hydrodynamics of the Cadna-owie-Hooray Aquifer Great Artesian Basin [R]. Canberra: Bureau of Rural Sciences, Australian, 2000.
- [28] Welsh W D. Great Artesian Basin transient groundwater model [R]. Canberra: Bureau of Rural Sciences, Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, Australia, 2006.
- [29] Gogu R G, Carabin G, Hallet V, *et al.* GIS-based hydrogeological databases and groundwater modeling [J]. Hydrogeological Journal, 2001, 9: 555– 569.
- [30] Argus Interware Inc. Argus Open Numerical Environments: A GIS Modelling System [R]. 4 ed. 1997.
- [31] Hill M C. The practical use of simplicity in developing groundwater models [J]. Groundwater, 2006, 44(6): 775– 781.
- [32] Hill M C, Tiedeman C R. Effective groundwater model calibration, with analysis of sensitivity, predictions and uncertainty [M]. New York: Wiley and Sons, 2007.

Modelling of regional groundwater flow

ZHOU Yang-xiao¹, LI Wen-peng²

(1. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, The Netherlands;

2. China Institute for Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Significant advances in regional groundwater flow modelling have been driven by the demand to predict regional impacts of human interferences on groundwater systems and associated environment. The wide availability of powerful computers, user friendly modelling systems and GIS stimulates an exponential growth of regional groundwater modelling. Large scale transient groundwater models have been built to analyse regional flow systems, to simulate water budget components changes, and to optimise groundwater development scenarios. This paper reviews the historical development of regional groundwater modelling. Examples of Death Valley and Great Artesian Basin transient groundwater models are introduced to show the application of large scale regional groundwater flow models. Methodologies specific for regional groundwater modelling are described and special issues in regional groundwater modelling are discussed also.

Key words: regional flow system; modelling methodology and modelling issues

责任编辑:汪美华