

文章编号: 1672 3031(2009) 01-0057-05

## 地下水数值模型在中国的应用现状及发展趋势

沈媛媛, 蒋云钟, 雷晓辉, 王明娜

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

**摘要:** 地下水数值模型在地下水资源定量评价及相关领域研究中得到了广泛的应用。本文介绍了几种流行的数值模拟模型, 阐述了模型特点及其在我国的应用现状。指出模型对客观实体概化存在误差, 模拟精度有待于提高; 裂隙介质、岩溶介质中的地下水运移模拟技术未解决, 限制了模型应用范围; 强调了模型数据前后处理能力的不足; 指出了模拟技术在地下水源汇项概化、地下水运动机理方面的发展前景, 提出多种模型耦合以及与GIS紧密结合的重要性, 并指出由于使用对象的转变给地下水模型发展带来的新机遇。

**关键词:** 地下水; 数值模型; 应用现状; 发展趋势

中图分类号: S273.4

文献标识码: A

自20世纪60年代以来, 地下水数值模拟技术随着计算机技术的飞速发展应运而生, 自此在地下水资源的定量研究中发挥了不可替代的作用。我国地下水数值模拟的研究开始于20世纪70年代, 经过30多年来的努力, 取得了快速进步和发展, 但至今国内仍然没有具有知识产权的通用地下水模拟软件。最早国际上较为通用的数值模型为MODFLOW模型, 在人机交互、计算机图形学和科学可视化技术的推动下, 具有可视化功能的地下水模拟软件迅速发展起来<sup>[1]</sup>, 较有影响的包括基于MODFLOW开发的Visual MODFLOW、GMS, 以及基于有限元法的FEFLOW软件等。这些通用的地下水模拟软件在我国水资源定量评价及相关领域研究中发挥了重要作用。以下简要介绍这几种通用软件的特点以及在我国的应用现状。

### 1 地下水数值模拟软件及应用现状

**1.1 MODFLOW模型** MODFLOW是由美国地质调查局的McDonald和Harbaugh于20世纪80年代开发的用于孔隙介质的三维有限差分地下水数值模拟模型<sup>[2]</sup>。模块化的结构是MODFLOW最显著的特点, 它包括一个主程序和一系列相对独立的子程序包, 例如水井子程序包、河流子程序包、蒸发子程序包, 求解子程序包等。这种模块化结构使程序易于理解、修改和添加新的子程序包。目前已经有许多新的子程序包被开发出来, 完善了MODFLOW的功能。MODFLOW采用有限差分法求解, 空间离散采用矩形网格剖分。时间上引入了应力期的概念, 把整个模拟时段分成若干个应力期, 每个应力期又分为若干个时段(Time Step)。在迭代求解方法上提供了多种选择, 包括强隐式法(SIP)、逐次超松弛迭代法(SSOR)、预调共轭梯度法(PCG2)等。MODFLOW因其合理的模型设计, 自问世以来在全美以及全世界范围内的科研、生产、环境保护、城乡发展规划、水资源利用等行业和部门得到了广泛的应用, 成为最为普及的地下水运动数值模拟计算模型。

1998年美国国际联合发射公司郭卫星博士和美国阿拉巴马大学卢国平博士将MODFLOW使用说明书编译成中文<sup>[3]</sup>, 为MODFLOW在我国推广提供了有利条件。周念清等较早的将MODFLOW应用于宿迁市地下水资源评价中<sup>[4]</sup>。吴剑锋、朱学愚对MODFLOW的特点和求解方法等做了详细论述, 指出MODFLOW的实用性代表了未来地下水流数值模拟软件的发展趋势<sup>[5]</sup>。陈劲松等就MODFLOW中不同

收稿日期: 2008-06-16

作者简介: 沈媛媛(1981-), 女, 河北滦县人, 博士生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: shery8110@163.com

方程组求解方法进行了差异分析<sup>[6]</sup>,指出PCG2或SIP法求解可得到满足精度的结果,而SSOR法精度不佳,并指出水均衡分析对保证模型精度的重要性。另外,在污染物运移、地面沉降等方面MODFLOW也有相关应用<sup>[7-9]</sup>。

**1.2 Visual MODFLOW 软件** 在MODFLOW程序广为应用的同时,许多基于MODFLOW的可视化地下水流数值模拟软件也相继问世。其中,加拿大Waterloo Hydrogeologic Inc.在MODFLOW基础上应用现代可视化技术开发了Visual MODFLOW软件,并于1994年8月首次在国际上公开发售<sup>[10]</sup>。它集成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模块。相较于MODFLOW,该软件具备了数据前后处理能力,以及计算结果可视化、与其他软件数据信息交互等多方面优势。至今,Visual MODFLOW已经成为被一致认可并广泛应用于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。

贾金生等用Visual Modflow建立了栾城县地下水流模型,定量评价了地下水位对不同开采量的响应<sup>[11]</sup>。尹大凯等应用该软件,对宁夏银北灌区井渠结合灌溉进行了三维模拟分析<sup>[12]</sup>。束龙仓等将其成功地用于模拟地下水开采对河流流量衰减影响分析和地下水系统各要素随时间变化过程分析<sup>[13-14]</sup>。金咪等将Visual MODFLOW用于地下水流场及水质模拟<sup>[15]</sup>。该软件在地下咸水恢复方案研究、地下水资源管理预警系统研究、基坑降水研究等方面也得到普遍应用<sup>[16-21]</sup>。

**1.3 GMS 软件** GMS(Ground Water Modeling System)是由美国Brigham Young University环境模型研究实验室和美国陆军排水工程试验工作站开发的一个综合性的用于地下水模拟的可视化软件。它综合了MODFLOW、FEMWATER、MT3DMS、RT3D、SEAM3D、MODPATH、SEEP2D、NUFT、UTCHEMD等已有的地下水模型<sup>[22]</sup>,几乎可以模拟与地下水相关的所有水流和溶质运移问题。由于其良好的交互界面和强大的前后处理功能以及优良的三维可视效果,GMS也成为国际上应用较多的地下水模拟软件。与其他同类软件相比,GMS较为突出的特点是能便捷地选用多种地下水建模方式,包括网格方式、概念模型方式,以及空间实体模型方式<sup>[23]</sup>。

近几年,GMS在我国也开始得到了较广泛的应用。祝晓彬较早地对GMS软件作了详细介绍并应用到长江三角洲地区<sup>[22,24]</sup>。除了用于地下水数值模拟<sup>[25-26]</sup>,GMS还可用于建立三维立体水文地质结构模型<sup>[23,27]</sup>,分析防渗墙、大坝等工程对地下水流场影响,模拟污染物在地下水中运移等<sup>[28]</sup>。

**1.4 FEFLOW 软件** FEFLOW(Finite Element Subsurface FLOW System)是20世纪70年代末由德国WASY公司开发的基于迦辽金有限元法的三维地下水流模拟软件,也是迄今为止功能最为齐全的地下水模拟软件包之一<sup>[29]</sup>。FEFLOW可用于地下水水量、水质和温度的模拟,具有图形人机对话、地理信息系统(GIS)数据接口、自动产生空间有限单元网格、空间参数区域化及快速精确的数值算法和先进的图形可视化技术等特点。近几年来,邵景力、崔亚莉、曹剑峰、贺国平、赵云章等成功的将FEFLOW应用于黄河流域的地下水系统模拟<sup>[30-32]</sup>。

除上述几个主要通用模拟工具以外,其他模拟软件还包括PMWIN(Processing Modflow for Windows),ModIME等。它们多是综合几种广泛应用于地下水运动、粒子追踪和溶质运移模拟程序的可视化软件。

地下水数值模型在地下水资源评价、地下水污染物运移、地面沉降、基坑降水、地下咸水恢复、地下水资源管理系统,以及防渗墙、大坝等工程对地下水流场影响;地下水与地表水模型联合利用等诸多方面得到了广泛的应用,成为解决与地下水有关问题不可或缺的工具<sup>[33-36]</sup>。

## 2 存在问题及发展趋势

**2.1 存在问题** 地下水数值模拟模型借助先进的计算机技术为定量研究地下水系统提供了强有力的支持。同时在应用数值模型过程中也发现一些问题。

(1) 地下水数值模型是地下水系统的数学概化,在应用模型模拟时,模拟的精度是一个最关键的问题。对客观实体的概化不可避免存在一定失真,使模型准确性和可靠性受到影响。例如降雨入渗,灌溉渗漏等垂向补给量在补给地下水时存在时间上的滞后,河流与含水层之间的关系受两者相对位置和水

位变动的影晌等,准确概化这些现象具有一定困难。现有通用模型将地下水的垂向补给概化为一个补给强度,而忽略了各种垂向补给形成过程的描述。在多层含水系统中,贯穿多个含水层的混合抽水井的概化是另一个难点问题。MODFLOW 模型用人为划分各层流量的方法来描述混合井的开采缺乏理论支持。

表 1 常用地下水数值模型概况

MODFLOW	模型名称	MODFLOW (Modular Three Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model)
	开发者	美国地质调查局 McDonald 和 Harbaugh
	功能	孔隙介质中的三维地下水数值模拟
	特点	有限差分法离散, 模块化结构
Visual MODFLOW	软件名称	Visual MODFLOW
	开发者	加拿大 Waterloo Hydrogeologic Inc.
	包含模块	MODFLOW, MODPATH, MT3D, PEST, ZONEBUDGET
	功能	地下水数值模拟、粒子运动轨迹和传播时间模拟、污染物在地下水中输移过程模拟、水文地质参数估计与优化、区域水均衡分析
GMS	特点	有限差分法离散, 计算结果可视化
	软件名称	GMS (Groundwater Modeling System)
	开发者	Brigham Young University
	包含模块	MODFLOW, FEMWATER, MT3DMS, RT3D, SEAM3D, MODPATH, SEEP2D, NUFT, UTCHEMD
FEFLOW	功能	地下水数值模拟、粒子运动轨迹和传播时间模拟、污染物在地下水中输移过程模拟等水流和溶质运移问题
	特点	有限差分法离散, 计算结果可视化, 多种建模方法
	软件名称	FEFLOW (Finite Element subsurface Flow system)
	开发者	德国 WASY 公司
FEFLOW	功能	地下水水量、水质和温度的模拟
	特点	有限元法离散, 地理信息系统数据接口, 三维可视化

(2) 目前地下水数值模型大多应用于平原区的孔隙介质地下水系统, 在裂隙介质、岩溶介质中的地下水数值模拟关键技术尚未完全解决, 而地下水水质模拟的可靠性还有待于深入分析和研究, 因此模型的应用范围仍受限制。

(3) 地下水软件提供了良好的可视化界面, 与地理信息系统 (GIS) 数据交互的接口、丰富的结果展示形式。但是数据的前后处理在数值模拟中仍需占据很多时间和精力, 软件的数据前后处理功能、简便性和灵活性还有待于提高。

**2.2 发展趋势** 鉴于现有模型存在的不足以及水资源研究的需求, 地下水数值模型在以下几个方面将可望有广阔的发展空间。

(1) 对地下水系统的各个源、汇项的概化方法深入研究, 将使模拟结果更准确, 模型的仿真性得到提高。裂隙介质、岩溶介质中的地下水位运动机理研究, 将扩大模型的应用范围, 使之能模拟多种复杂的地下水系统。

(2) 与其他水文模型的耦合是水资源研究发展的必然需求。地下水是水循环系统的一部分, 与地表水、土壤水、大气水之间存在密切的联系。随着水资源联合利用、统一管理的广泛开展, 水循环系统将作为一个整体进行研究。地下水模型与地表水模型、土壤水模型、气象模型等耦合集成, 将能更全面、准确地模拟各部分水体间的关系, 使研究水平达到一个新高度。

(3) 目前的主流地下水软件都实现了与 GIS 的数据交互, 随着计算机技术的发展以及 GIS 在水资源领域的广泛应用, 地下水软件与 GIS 的无缝集成将是未来发展的必然趋势。与 GIS 紧密结合, 能够增强数据处理能力, 节省数据处理时间, 提高输出结果的可视化程度, 使地下水软件功能实现质的飞跃。发挥 GIS 强大的空间数据处理功能, 将为地下水模型开拓更广阔的发展空间。

(4) 随着水资源管理工作不断深化, 地下水软件面向的应用对象将不仅是专业技术人员, 还将面向各级管理者。应用对象的转变将使地下水软件向着便于管理人员操作、使用和分析的方向发展。而随着用户对地下水软件要求的提高以及计算机技术发展, 地下水软件将不仅是单机上操作的软件, 也将成为能够实现网络便捷访问的技术支持平台。

### 3 结语

地下水数值模拟在地下水资源评价及相关领域研究已得到普遍应用。地下水模拟软件受计算机技术的推动有了巨大的发展,并在我国得到了广泛的应用,提高了地下水资源的相关研究水平。随着水资源研究的不断深入和计算机技术、3S 技术、地下水运动理论、数学理论不断发展,地下水模型的进一步发展面临着新的机遇,在提高模型精度、模型耦合、与 GIS 的无缝集成等方面都具有广阔的发展空间。模型本身的不断完善以及计算机软件技术的进步,将使地下水模拟软件在未来发挥更加重要的作用。

### 参 考 文 献:

- [ 1 ] 丁继红,周德亮,马生忠. 国外地下水模拟软件的发展现状与趋势[J]. 勘察科学技术,2002,(1): 37- 42.
- [ 2 ] McDonald G, Michael, Arlen W Harbaugh. A modular three dimensional finite difference ground water flow model[R]. WashinSton: United States Government Printing Office, 1988.
- [ 3 ] 蒋亚萍,陈余道.MODFLOW——一套水文地质学实用计算软件[J]. 广西地质,1999,12(3): 75- 78.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 吴剑锋,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 ] 陈劲松,万力. MODFLOW 中不同方程组求解方法差异分析[J],工程勘察,2002,(2): 25- 27,32.
- [ 7 ] 王洪涛,周抚生,宫辉力. 数值模拟在评价含有污水对地下水污染中的应用[J]. 北京大学学报(自然科学版),2000,36(6): 865- 872.
- [ 8 ] 王宏,姜华君,邹立芝. Modflow 在华北平原区地下水模拟中的应用[J]. 世界地质,2003,22(1): 69- 72.
- [ 9 ] 崔亚莉,邵景力,谢振华,等. 基于 MODFLOW 的地面沉降模型研究——以北京市区为例[J]. 工程勘察,2003,(5): 19- 22.
- [ 10 ] 贾金生,田冰,刘昌明. Visual MODFLOW 在地下水模拟中的应用——以河北省栾城县为例[J]. 河北农业大学学报,2003,2(2): 71- 78.
- [ 11 ] 贾金生,刘昌明. 华北平原地下水动态及其对不同开采量响应的计算——以河北省栾城县为例[J]. 地理学报,2002,57(2): 201- 209.
- [ 12 ] 尹大凯,胡和平,惠士博. 宁夏银北灌区井渠结合灌溉三维数值模拟与分析[J]. 灌溉排水学报,2003,22(1): 53- 57.
- [ 13 ] 束龙仓,Chen Xunhong. 地下水开采对河流令两衰减的影响分析——以美国内布拉斯加州普拉特河谷为例[J]. 水利学报,2003,(2): 112- 116.
- [ 14 ] 束龙仓,Xunhong CHEN. 河流- 含水层系统中水文要素的变化过程分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2003,31(3): 251- 254.
- [ 15 ] 金咪,耿庆文. Visual MODFLOW 在淄博高新区地下水流场及水质模拟中的应用[J]. 华北水利水电学院学报,2003,24(3): 56- 59.
- [ 16 ] 韩志勇,郑西来,林国庆. 大沽河下游地区地下咸水恢复方案的数值分析[J]. 工程勘察,2004,(6): 25- 29.
- [ 17 ] 王凯军,曹剑峰,徐蕾,等. 地下水资源管理预警系统的建立及应用研究——以长春城区为例[J]. 水科学进展,2005,316(2): 238- 243.
- [ 18 ] 彭涛,詹松. 三维地下水数值模拟方法在基坑涌水量预测中的应用——以广州地铁某基坑为例[J]. 工程勘察,2005,(3): 20- 23.
- [ 19 ] 余维,王博,陈真林. MOFLOW 在井灌区地下水数值模拟中的应用[J]. 中国农村水利水电,2006,(1): 17- 21.
- [ 20 ] 易树平,迟宝明,吴法伟,等. 傍河地下水源地数值模拟与评价研究——以沈阳市浑河李官堡水源地为例[J]. 自然资源学报,2006,21(1): 154- 160.
- [ 21 ] 吴夏懿,束龙仓. 开采条件下的地下水溶质运移规律的研究——以山东济宁漏斗区为例[J]. 工程勘察,2006,(2): 27- 30.
- [ 22 ] 祝晓彬. 地下水模拟系统(GMS)软件[J]. 水文地质工程地质,2003,(5): 53- 55.

- [23] 梁熙枫, 王哲, 曾永刚. 基于 GMS 的水文地质结构可视化研究——以天山北麓为例[J]. 地下水, 2006, 28(6): 79–82.
- [24] 祝晓彬, 吴吉春, 叶淑君, 等. 长江三角洲(长江以南)地区深层地下水三维数值模拟[J]. 地理科学, 2005, 25(1): 68–73.
- [25] 梁秀娟, 林学钰, 苏小四. GMS 与苏锡常地区地下水流模拟[J]. 人民长江, 2005, 36(11): 26–28.
- [26] 王宏, 娄华君, 田廷山, 等. 石家庄市地下水系统的数值模拟与预测[J]. 工程勘察, 2006, (5): 34–38.
- [27] 王福刚, 梁秀娟, 于军. 可视化底层模型信息系统在地面沉降研究中的应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 219–224.
- [28] 王宏, 娄华军, 田廷山, 等. SWAT/GMS 联合模型在华北平原地下水库研究中的应用[J]. 世界地质, 2005, 24(4): 368–372.
- [29] 贺国平, 邵景力, 崔亚莉, 等. FEFLOW 在地下水流模拟方面的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(4): 356–361.
- [30] 邵景力, 赵云章, 崔亚莉, 等. 黄河下游影响带地下水资源评价及合理开发利用[J]. 自然资源学报, 2003, 18(1): 1–7.
- [31] 贺国平, 邵景力, 崔亚莉. 黄河下游截渗强对地下水影响的数学模型与评价[J]. 人民黄河, 2003, 25(1): 22–23.
- [32] 曹剑峰, 冶雪艳, 姜纪沂, 等. 黄河下游悬河段地下水资源计算及开发潜力分析[J]. 资源科学, 2004, 26(2): 9–16.
- [33] Samani N, Kompani Zare M, Barry D A. MODFLOW equipped with a new method for the accurate simulation of axisymmetric flow[J]. Advances in Water Resources, 2004, (27): 31–45.
- [34] Vermeulen P T M, Heemink A W, Te Stroet C B M. Reduced models for linear groundwater flow models using empirical orthogonal function[J]. Advances in Water Resources, 2004, (27): 57–69.
- [35] Steffen Mehl, Mary C Hill. Development and evaluation of a local grid refinement method for block centered finite difference groundwater models using shared nodes[J]. Advances in Water Resources, 2002, (25): 497–511.
- [36] Jacek Scibek, Diana M Allen, Alex J Cannon, Paul H Whitfield. Groundwater surface water interaction under scenarios of climate change using a high resolution transient groundwater model[J]. Journal of Hydrology, 2006, (8): 1–17.

## Current practice and development trend in numerical modeling of groundwater in China

SHEN Yuan-yuan, JIANG Yun-zhong, LEI Xiao-hui, WANG Ming-na  
(Department of Water Resources, IWHR, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Numerical models of groundwater were applied widely for quantitative evaluation of groundwater resources and in relevant research fields. Features and current situation of application of several popular numerical models in China were introduced in this paper. The shortcomings in terms of modeling precision, application extension and ability of pre and post data processing were analyzed. The importance of studying groundwater flow mechanism in crevice medium and karst medium, coupling of different models and combining of models with GIS was emphasized. Finally, it is pointed out that groundwater models will face new challenges with changes of users.

**Key words:** groundwater; numerical models; current practice; development trend

(责任编辑: 吕斌秀)