

文章编号: 1009-6248(2007)04-0101-04

国外地下水热运移软件开发现状与趋势

尹立河, 李清

(西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054)

摘 要: 分析了目前国外流行的地下水热运移模拟, 对每个软件的主要功能作了简要的介绍, 概述了地下水热运移软件的发展现状, 指出与 GIS 结合, 强化软件的前后处理功能是未来地下水热运移模拟软件发展的主要趋势。

关键词: 地下水; 热运移; 模拟; 现状与趋势; 地热资源

中图分类号: P64 **文献标识码:** A

1 引言

热运移是水文循环的重要组成部分, 特别是在水文地质研究领域, 温度场是地下水流动系统的重要特征之一, 在地下水系统中, 补给区的下降水流受入渗水的影响, 温度偏低。排泄区因上升水流带来深部热影响, 温度偏高, 因此根据地下水温度场的特征可以研究地下水的循环特征 (王大纯等, 1995)。在国内外, 已有大量利用温度场研究地下水的循环条件 (张远东等, 2005; Manga, 2001)、确定地下水流速 (Taniguchi 等人, 2005; Holzbecher 等人, 2005; Reiter, 2001; Zshocke 等人, 2005; Bravo 等人, 2002) 和补给量 (James, 1999; Ge, 1998; Lapham, 1989) 的文章发表。作者曾利用 HST3D 模拟了鄂尔多斯盆地二号剖面的温度场的分布, 研究结果表明, 在四十里梁等地区 (补给区), 地下水温度等值线向下凹, 表明这里是地下水的补给区, 由于补给的水温度较低, 冷却了含水层。在都思兔河和乌审旗等地区, 地下水的温度等值线向上凸, 表明这里是地下水的排泄区。从温度等值线可以看出, 地下水从四十里梁等补给区获得补给后, 分别向都思兔河和乌审旗的闭流区流动。

利用数值模型对地下水热运移进行模拟以其有效性、灵活性和相对廉价性逐渐成为地下水热运移研究领域的一种不可缺少的重要方法, 并逐渐受到重视和广泛的应用。一个完整的地下水模拟过程包含 3 个部分: 前处理、模型计算和后处理。前处理是指在进行模拟计算之前对计算过程中所需数据的整理、组织、输入及计算网格的编号与生成。模型计算是进行地下水能量运移正反演计算, 常用的方法主要有: 有限差分法、有限元法。后处理是将计算所产生的结果数据, 用图形或表格显示或存放起来, 以供研究人员方便地进行分析和使用。近年来, 在人机交互、计算机图形学和科学可视化等技术的推动下, 国外地下水温度场模拟软件不论是在数量还是质量上都有了巨大的发展和提高, 前后处理的可视化功能日益强大。通过近 30 年的研究与发展, 国际上已经形成了一批非常有影响的地下水温度场的模拟软件, 如 Feflow, Sw ift, 和 HST 等。

2 主要的地下水热运移软件

2.1 VS2DH

VS2DH 是由美国地质调查局 (USGS) Richard

收稿日期: 2007-03-25; 修回日期: 2007-10-08

基金项目: 鄂尔多斯盆地地下水勘查 (1212010331302)

作者简介: 尹立河 (1977-), 男, 河北阜城人, 工程师, 主要从事水工环地质工作。

博士开发的用来模拟单相(液相)、常密度、饱和/非饱和带热运移软件。V S2DH 的最初模型是U SGS 20 世纪 80 年代开发 V S2D、随后将其改进为模拟溶质运移的 V S2DT (Healy, 1996)。由于溶质运移方程和热运移方程的相似性, 1996 年 Richard 博士在 V S2DT 的基础上编写了 V S2DH。V S2DH 考虑了温度变化对模拟的影响, 但没有考虑温度变化对密度的影响, 因此不能用来模拟海岸地区热运移。V S2DH 利用有限差分的方法模拟二维坐标系下热运移, 利用叠代方法求解方程。Hsieh 等 (1999) 为 V S2DH 开发了可视化的界面, 形成了 V S2DI, 简化了模拟过程。V S2DH 的源程序和可视化界面可以从 <http://water.usgs.gov/software/groundwater.html> 上免费下载到。

2.2 SWIFT

Swift 最早是由美国地质调查局 (U SGS) 在 1975 年开发的用于模拟核废料运移的软件 (Dillon 等人, 1978), 后经不断改进, 模拟功能不断得到扩充。Swift 可以求解耦合的水流、热运移、卤水运移和核废料的运移方程, 也可单独求解其中的一个方程。可以模拟稳定和非稳定状况下的孔隙和裂隙介质的三维地下水流、热、卤水和核废料链式反应的运移。其水流、热和核运移方程泛方程中密度、黏滞系数和孔隙度均为变量。方程采用有限差分的方法离散泛方程, 可以利用中心差分或是向后差分方法。采用叠代方法 (line successive-over-relaxation) 或是直接方法求解 (special matrix banding and Gaussian elimination) 求解。在模拟裂隙的时候, 可以采用双孔隙模型, 或是采用离散裂隙模型。在模型裂隙时, 整体采用三维模型, 岩体采用一维模型。GeoTran 为其开发可视化的界面 Swift for Window (www.geotran.com)。

2.3 AQUA3d

Aqua3d 是由冰岛的 Vatnaskil 咨询公司 (www.vatnaskil.is) 开发的基于有限元方法的饱和/非饱和带水流、溶质和热运移软件。最初的版本在 1983 年开发成功, 当时只能模拟二维空间。1994 年, 经过全面升级后可以模拟三维空间的水流、溶质和热运移。求解方法使用块对称超松弛法 (block SSOR)。Aqua3d 具有良好的图形界面, 并且有汉语界面版本。

2.4 SVHEAT

SV heat 是 SoilVision 公司 soilvision 系统软件的组成部分, 现在有 SV heat2D 和 SV heat3D 两个版本, 可以分别模拟二维和三维空间的饱和/非饱和带的热运移。SV heat 是基于有限元方法的软件, 求解方法是预处理的牛顿迭代法。

2.5 SUTRA

SUTRA 是由美国地质调查局 (U SGS) 的 Voss 博士开发的基于有限元方法的饱和/非饱和带的热运移软件。可以模拟饱和带/非饱和带密度变化地下水流动和溶质或能量运移。最早版本只能模拟二维空间, 到目前最新版本为 SUTRA 2D3D.1 (Voss, 1984, 2002), 并且已经整合到 SutraSuite 软件包中。SutraSuite 软件包包括了 3 部分内容, 即模拟程序及实例 (SUTRA 及实例)、预处理程序 (SutraPrep 和 SutraGUI)、和后处理程序 (SutraPlot, SutraGUI, Modelviewer, G W-Chart 和 CheckMatchBC), 其源程序可以从美国地质调查局的网上下载, 但是图形化界面需要购买商业软件 ArgusONE。

2.6 HST3d

HST3d 是由美国地质调查局的 Kipp 博士编写的基于有限差分方法的饱和带水流、溶质和热运移软件。1987 年发布了 HST3d 第一个版本, 1997 年推出了改进版本 (Kenneth, 1997)。HST3D 采用含水层中水流、热流、溶质运移的耦合数值算法, 并且对井孔局部渗流建立了比常规模型更加精细和准确的计算方法。其源代码用 Fortran 语言写成, 实行共享。但是该软件只能模拟饱和带内地下水的运移, 不能对包气带内热运移进行模拟。中国地质大学北京的王旭升博士为其开发可视化的前后处理界面, 可以从 <http://dept.cugb.edu.cn/Cugb-Wree/kxyj/download.asp> 上免费下载到。

2.7 FEFLOW

FEFLOW (Finite Element subsurface Flow system) 是由德国 WASY 公司开发的, 可用于复杂三维非稳定水流、污染物和热运移的模拟。FEFLOW 软件基于有限单元方法, 全面包容了模拟地下水流每一个阶段所需的工具, 如边界概化、建模、后处理、调参、可视化。

2.8 TOUGH2

TOUGH2V 2.0 是由美国伯克利实验室的 Karsten 博士开发的多相(气、液、固)多组分水流、

热和溶质运移软件。采用积分有限差分法, 求解方法有直接解法或是预共轭梯度法等。可以解决饱和带和非饱和带的问题。目前已形成一套软件, 其附属模拟包括: Itough (用于参数反演), Tm voc (用于模拟具有挥发性质的溶质) 和 toughreact (用于模拟反应式溶质运移) (Pruess 等人, 1999)。

2.9 HTDRAU

HTDRAU 1d 和 HTDRAU 2d 是由 Jirka 等人开发的基于有限元方法的饱和/非饱和水流、热和溶质运移软件。包括一维、二维和三维软件。其中, 一维软件可以模拟 CO_2 和一些离子的反应运移, 包括衰变、降解、溶解和沉淀等。不足之处是在水流模拟中没有考虑温度对密度和粘滞系数的影响。利用高斯消元法求解一维。二维使用高斯消元法或是共轭法。目前推出的 HTDRAU 是在二维的基础上, 改进为可以模拟三维空间。一维目前是免费的软件, 可以从 <http://www.pc-progress.cz/> 下载。

3 热运移软件的发展趋势

目前计算机技术日新月异, 这在很大程度上影响热运移软件的发展趋势。这种影响正在成为软件发展的主要动力, 呈现以下的特点:

(1) 地下水热运移软件与 GIS 的连接。由于 GIS 具有强大的数据管理功能, 已成为地下水数据管理的有效工具, 因此开发与 GIS 兼容的地下水热运移软件是软件开发的主流方向。

(2) 软件前后处理的增强。在地下水热运移模拟中, 前后处理仍据了绝大部分时间, 因此开发更加智能的前后处理模块是主攻方向之一。

(3) 由于热运移模拟通常要对水位和温度同时进行计算, 因此开发更加高效的计算方法, 提高计算效率, 缩短计算时间, 也是热运移软件的主要开发方向。

参考文献 (References):

- 王在纯, 张人权, 等. 水文地质学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- 张远东, 等. 利用测温资料判别热储流体的运动方向 [J]. 太阳能学报, 2005, 26 (2), 145-149.
- Bravo, Hector R, Jiang Feng, Hunt, Randall J. Using

- groundwater temperature data to constrain parameter estimation in a groundwater flow model of a wetland system [J]. Water Resources Research, 2002, 38 (8).
- Constantz, Jim, Thomas, C.L., and Zellweger, Gary. Influence of diurnal variations in stream temperature on streamflow loss and groundwater recharge [J]. Water Resources Research, 1994, 30 (12): 3253-3264.
- Duke, H.R. Water temperature fluctuations and effect on irrigation infiltration [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1992, 35 (1): 193-199.
- Ge. Estimation of groundwater velocity in localized fracture zones from well temperature profiles [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1998, 84 (1): 93-101.
- Holzbecher, Ekkehard. Inversion of temperature time series from near-surface porous sediments [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2005, 2 (4): 343-348.
- Healy, R.W., and Ronan, A.D. Documentation of computer program VS2DH for simulation of energy transport in variably saturated porous media. Modification of the U.S. Geological Survey's computer program VS2DT [R]. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4230, 1996, 36.
- Hsieh, P.-A., Wingle, William, and Healy, R.W. VS2DFA: A graphical software package for simulating fluid flow and solute or energy transport in variably saturated porous media [R]. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4130, 2000, 16.
- James R. Bartolino and Richard G. Niswonger. Numerical simulation of vertical ground-water flux of the Rio Grande from ground-water temperature profiles, central new Mexico [R]. Water-Resources Investigations Report 99-4212, 1999.
- Kenneth L. Kipp, Jr. HST3D: A computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional, groundwater flow systems [R]. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 97-4157, 1997, 149.
- K. Pruess, C. Oldenburg and G. Moridis: TOUGH2 User's guide, Version 2.0 [R]. Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134, 1999.
- Lapham, W.W. Use of temperature profiles beneath streams to determine rates of vertical ground water flow and vertical hydraulic conductivity [R]. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2337, 1989, 35.

- Manga, Using Springs to Study Groundwater Flow and Active Geologic Processes [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2001, 29, 201-228
- Reiter, Marshall Using precision temperature logs to estimate horizontal and vertical groundwater flow components [J]. Water Resources Research, 2001, 37 (3): 663-674.
- R.T. Dillon, R.B. Lantz, and S.B. Pahwa Risk Methodology for Geologic Disposal of Radioactive Waste [R]. The Sandia Waste Isolation Flow and Transport (SWIFT) Model, SAND78-1267, 1978.
- Taniguchi, Makoto, Uemura, Takeshi, Sakura, Yasuo. Effects of urbanization and groundwater flow on subsurface temperature in three megacities in Japan [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2005, 2 (4): 320-325.
- Voss, C. I., and Provost, A.M. SUTRA, A model for saturated-unsaturated variable-density groundwater flow with solute or energy transport [R]. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 02-4231, 2002, 250.
- Voss, C. I. A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density-dependent groundwater flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport [R]. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4369, 1984, 409.
- Zschocke, Andrei; Rath, Volker; Grisse mann, Christoph; Clauser, Christoph, Estimating Darcy flow velocities from correlated anomalies in temperature logs [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2005, 2 (4): 332-342.

Present Situation and Trends of Modeling Software for Groundwater Thermal Migration in the World

YN Li-he, LI Qing

(Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: In the paper, the current situation of modeling software for groundwater migration abroad is introduced and main function of each software and development trend for the software are also presented. It is pointed out that integrating with GIS, enhancing pre-processing and post-processing functions plus some new calculation algorithm will be the main development trend of groundwater thermal migration modeling software.

Key words: groundwater; thermal migration; numerical modeling; trend; geothermal resources