

地下水 数值模拟

薛禹群 谢春红 著

Numerical
Simulation for
Groundwater



科学出版社

www.sciencep.com

地下水数值模拟

薛禹群 谢春红 著

国家自然科学基金 资助出版

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书详细论述了各类水文地质问题,包括水流问题、溶质运移(地下水污染)问题、热量运移问题的数学模型及其数值解法。全书共分3篇。第一篇为数学模型,内容包括各类基本方程、地下水流模型、溶质运移模型和热量运移模型;第二篇为数值方法,除了对二维、三维各类问题的有限差分法、有限元法、边界元法、有限分析法等数值方法系统论述外,还对近年来新出现的混合有限元法、多尺度有限元法等进行了系统论述,并以各类典型问题,如水资源评价、露天矿疏干、土坝渗漏、输水渠渗漏、地下水污染、海水入侵及海水入侵条件下交换性阳离子运移行为、咸/卤水入侵问题、含水层储能和地面沉降等为例,论述了上述各类模型的建立、求解过程,展示了模拟在有关地下水的各项工作中的广阔应用前景;第三篇为反求参数的数值方法,包括解逆问题的数值方法和敏感度分析与模型的不确定性。本书除了系统介绍国内外的最新进展外,着重介绍作者近年来的研究成果。

本书可供水文地质、水文与水资源、环境工程等专业科研人员、工程技术人员和高等学校师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下水数值模拟/薛禹群,谢春红著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019651-4

I. 地… II. ①薛…②谢… III. 地下水-数值模拟 IV. P641.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第126381号

责任编辑:谢洪源 赵 峰/责任校对:鲁 素

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007年9月第一次印刷 印张:29

印数:1—2 000 字数:688 000

定价:89.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

1980年我与谢春红教授合作出版了《水文地质学的数值法》一书,这是我国出版的第一部有关这方面的著作,很快就售完了。读者买不到,找到出版社,因而出版社希望我们做些勘误后重印。但因出国访学耽误了。回来后出版社再次转达了他们的希望,当时年纪还轻,缺乏经验,就说好几年过去了,这方面发展很快,重印不如重写吧。出版社当然乐意,我们也制定了一个颇为“宏伟”的计划,要把各类主要的水文地质问题亲自建立模型,算上一遍,有了自己的东西后再写,这大概是1984~1985年的事。以后的实践证明,这句话说来容易,做起来却很难,会碰到很多意想不到的困难。最大的困难就是如何取得满足模拟需要的各类观测资料。有些问题我国根本就没有这方面的任何系统观测资料,只好自己动手收集。海水入侵就是一个例子,虽然列入了国家“七五”重点科技攻关计划,但还得从动员地方政府入手,让他们认识到问题的重要性,愿意出钱出人和我们一起建立完整的三维监测网,派人定期监测海水入侵情况(5天测一次水位,15天取样一次进行水质全分析)。这个监测网也是当时世界上最完整的三维监测网。数年下来取得了系统的三维动态观测资料,为海水入侵模拟及以后的海水入侵过程中阳离子交换模拟奠定了基础。有些问题国内虽有比较完整的观测资料,但由于当时地质资料非常保密,外单位是很难取得这些观测资料的。没有资料也就无法进行模拟,直至进入21世纪,随着改革开放的深入,这些问题才逐步解决。这样完成上述愿望差不多用了整整二十多年,现在可以毫不夸张地说,各类主要的地下水模拟问题我们都进行了研究和实践,在这个过程中我们不仅建立了许多模型,还提出了很多新的算法。这些内容有的已经写成论文发表过,有的最新成果还没有来得及发表,都一起作为作者三十多年研究的总结放进这本书里了,也了却了一个多年来的心愿。

除了孙讷正在1981年和1989年后出版的《地下水流的数学模型和数值方法》和《地下水污染——数学模型和数值方法》两本著作外,这二十多年来就没有出版过反映当代地下水模型和数值法进展的专门著作。但这些年来,数值方法发展很快,新的方法不断出现,缺少这方面的综合性著作,显然不利于我国地下水科学的发展。虽然这期间也有少量教材出版,但内容简单,缺少近期进展和新出现的方法,也没有涉及一些专门问题的模拟,无法满足要求。我

们不仅自己参与了这方面的研究,也尽量更新内容,反映近二十多年来国内外的地下水模拟的研究成果。在突出基础理论的同时尽量保持老一版《水文地质学的数值法》的优点,即既保持数学上的严密,又为了适应广大水文地质工作者的实际情况,尽可能采用他们比较容易理解的写法来写,有利于全国从事地下水研究、学习的广大水文地质、水文与水资源、环境科学的教学科研人员、研究生、高年级本科生能够自学本书,以推进我国地下水科学的发展。

全书共分3篇,即数学模型、数值方法和反求参数的数值方法。第一篇除了扼要地讲述进行数值模拟时可能要用到的各类基本方程、地下水流模型、溶质运移模型和热量运移模型外,还重点讲述了一些由作者建立的一些专门针对复杂、典型水文地质问题,如海水入侵、海水入侵过程中阳离子交换、咸/卤水入侵、地面沉降、热量运移、含水层贮能、地下水污染、双重介质和交叉裂隙系统中水流运动等建立的模型。随着国民经济的快速发展,很多过去见得不多的问题,如地面沉降、海水入侵、地下水污染等等逐渐成为普遍性问题,需要给予专门的讨论,以适应国民经济发展的需要。第二篇数值方法是本书的主体,讲述求解上述模型的各种主要数值方法,包括有限差分法、有限元法、随机游动法、特征线法和与之有关的方法、混合有限元法、多尺度有限元法、边界元法、有限分析法和自适应法,供读者选用。其中不少新的或较新的方法在国内还是首次被系统介绍,也包括作者提出还没有来得及发表的一些方法(如混合有限元法求解溶质运移问题的方法、多尺度有限元法、自适应有限元法等)。在讲述这些方法的同时,还以各类典型问题,如水资源评价、露天矿疏干、土坝渗漏、输水渠渗漏、地下水污染、海水入侵及海水入侵条件下交换阳离子运移行为、咸/卤水入侵问题、含水层贮能和地面沉降等为例,论述了各类模型的建立、求解过程,展示了模拟在有关地下水的各项工作中的广阔应用前景。第三篇为反求参数的数值方法,包括解逆问题的数值方法和敏感度分析与模型的不确定性。敏感度分析与模型的不确定性在国内水文地质界过去重视不够,考虑到它的重要性,也参考国外文献做了必要的介绍,以便国内开展这方面工作时参考。

全书所有研究成果都是在国家自然科学基金的资助下完成的,没有自然科学基金的资助[共包括两项重点基金(40335045,49232042)和5项面上基金(40172082,49772161,49472159,49070144,4860154)]就不可能取得这些成果,也就不会有这本著作,在此特向国家自然科学基金委员会有关领导致以衷心的感谢。

全书大纲由薛禹群、谢春红共同商定,然后由薛禹群执笔并负责修改、校对,谢春红则对全书审阅并提出修改意见。为了减少打印错误,全书打印均由

薛禹群在计算机上完成。插图则由研究生徐红霞、彭伟帮忙在计算机上绘制，并由徐红霞负责修改，在此向他们二位表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免出现疏漏甚至错误，恳请读者批评指正。

作 者

2007年元旦于南京大学

目 录

前言	
绪论	1

第一篇 数学模型

第 1 章 基本方程	9
1.1 连续介质	9
1.1.1 连续介质的假设	9
1.1.2 连续介质场	10
1.2 水流方程	11
1.2.1 连续性方程	11
1.2.2 运动方程	12
1.2.3 承压含水层和越流含水层中的水流方程	15
1.2.4 潜水流方程	16
1.2.5 两相不混溶渗流	17
1.2.6 非饱和带水分运动	17
1.3 溶质和热量的运移方程	20
1.3.1 溶质运移方程	20
1.3.2 热量运移方程	25
1.4 定解条件	25
1.4.1 边界条件	25
1.4.2 初始条件	27
1.5 数值模拟的基本过程	28
第 2 章 地下水流模型	30
2.1 饱和水流模型(单相)	30
2.1.1 多孔介质中的水流	30
2.1.2 裂隙介质中的水流	33
2.2 两相不混溶渗流模型	36
2.3 非饱和水流模型	37
2.3.1 入渗问题	37
2.3.2 作物生长条件下的土壤水分运动	39
2.3.3 饱和-非饱和流动	39

2.4	地面沉降模型	43
第3章	溶质运移和热量运移模型	50
3.1	饱和带溶质运移模型	50
3.1.1	地下水水质和污染问题	50
3.1.2	海水入侵问题	53
3.2	阳离子交换问题	61
3.3	咸水/卤水入侵问题	65
3.4	深井地下灌注	66
3.5	饱和带热量运移、含水层贮能问题	70
3.6	非饱和带溶质运移模型	75

第二篇 数值方法

第4章	有限差分法(水流问题)	79
4.1	基本知识	79
4.1.1	差分的概念	79
4.1.2	几种主要的差分格式	81
4.2	二维渗流问题	86
4.2.1	差分方程	86
4.2.2	具体问题的处理	89
4.2.3	潜水流问题	94
4.2.4	不等距差分	96
4.2.5	积分有限差分法(IFDM)	99
4.2.6	一般差分方程组的解法	101
4.3	三维渗流问题	107
4.4	非饱和带水分运动问题	109
4.4.1	非饱和和流动问题	109
4.4.2	饱和-非饱和和流动问题	111
第5章	有限元法(水流问题)	112
5.1	基本原理	112
5.1.1	Rayleigh-Ritz法	112
5.1.2	Galerkin法	114
5.2	单元系列、插值函数和相应的有限元方程	126
5.2.1	一维单元	127
5.2.2	二维单元	130
5.2.3	三维单元	138
5.2.4	对数插值	146
5.2.5	数值积分法	156

5.3 解二维渗流问题的有限元法	157
5.3.1 饱和带水流问题	157
5.3.2 非饱和带水分运动问题	160
5.4 解三维渗流问题的有限元法	168
5.4.1 三维模型	168
5.4.2 准三维模型	169
5.5 一些具体问题的处理	170
5.5.1 参数连续性问题	170
5.5.2 隔水断层(很薄隔水层)、钢板桩等的处理	171
5.5.3 对称性的处理	172
5.5.4 露天矿疏干问题	173
5.5.5 二维模型如何反映下部岩层渗透性的问题	174
5.5.6 边界移动问题的处理	174
5.5.7 速度和流量的计算	175
5.6 系数矩阵的存贮和线性代数方程组的解法	178
5.6.1 系数矩阵存贮方式的讨论	178
5.6.2 改进平方根法	180
第6章 地下水水质和热量运移问题的数值解法	185
6.1 有限差分法	185
6.1.1 差分格式	185
6.1.2 数值弥散和解的振荡	189
6.1.3 上游加权有限差分法	193
6.1.4 总变差缩减法(TVD法)	196
6.2 有限元法	200
6.2.1 一般解法	200
6.2.2 边界条件和源汇项的处理	202
6.2.3 上游加权有限元法(上风加权有限元法,非对称权函数法)	205
6.3 随机游动法	208
6.4 特征线法(MOC)	212
6.4.1 特征线法的基本思想	212
6.4.2 对流部分的计算	214
6.4.3 弥散部分和格点浓度的计算	215
6.4.4 边界条件和源汇项的处理	217
6.4.5 一些具体问题的处理	219
6.5 改进特征线法(MMOC)和混合特征线法(HMOC)	220
6.6 特征-有限元法	222
6.7 ALGR-EPCOF 算法	223
6.8 自适应局部网格加密有限元法	225

第7章 有限差分法和有限元法的应用	229
7.1 解题过程	229
7.2 概念模型和网格设计	230
7.2.1 概念模型的建立	230
7.2.2 模型类型选择	233
7.2.3 网格设计与剖分	234
7.2.4 参数赋值	240
7.3 边界	241
7.3.1 边界配置	241
7.3.2 边界模拟	243
7.4 源和汇	246
7.4.1 抽水井和注水井	246
7.4.2 潜水面	247
7.4.3 越流	248
7.5 非稳定流问题	248
7.5.1 贮水系数	248
7.5.2 初始条件	249
7.5.3 边界条件	250
7.5.4 时间的离散	250
7.6 剖面模型	252
7.6.1 剖面方位与对称剖面	252
7.6.2 剖面模型参数的调整	252
7.6.3 潜水面问题	253
7.7 模型运行与识别	253
7.7.1 软件选择与程序编写	253
7.7.2 模型初步运行与容许误差	257
7.7.3 识别(校正)过程	258
7.7.4 识别评估	259
7.7.5 预报	262
7.8 水流问题实例	263
7.8.1 有限元模型	263
7.8.2 有限差分模型	271
7.9 水质问题和热量问题实例	274
7.9.1 海水入侵有限元模型及海水入侵条件下交换阳离子运移行为研究有限元模型	274
7.9.2 咸水/卤水入侵有限元模型	283
7.9.3 地下水污染问题有限元模型	287
7.9.4 含水层贮能有限差分模型	290

第 8 章 混合有限元法和多尺度有限元法	298
8.1 混合有限元法	298
8.1.1 基本思路	298
8.1.2 稳定流问题	299
8.1.3 非稳定流问题	308
8.1.4 溶质运移问题	313
8.1.5 适用于任意域的混合有限元法	327
8.2 多尺度有限元法	339
8.2.1 基本原理	339
8.2.2 应用多尺度有限元法求解渗流问题	342
8.2.3 地面沉降问题应用实例	348
第 9 章 其他数值方法	356
9.1 边界元法	356
9.1.1 基本原理	356
9.1.2 稳定流问题	362
9.1.3 非稳定流问题	370
9.2 有限分析法	377

第三篇 反求参数的数值方法

第 10 章 解逆问题的数值方法	383
10.1 基本概念	383
10.1.1 逆问题解的适定性	383
10.1.2 逆问题解的不唯一性	384
10.1.3 逆问题解对原始实测数据的不连续依赖性	384
10.1.4 约束条件	385
10.1.5 解逆问题的方法	386
10.2 试估-校正法和优选法	387
10.2.1 试估-校正法	387
10.2.2 逐个修正法	387
10.2.3 单纯形探索法	391
10.2.4 最速下降法	395
10.3 修正的 Gauss-Newton 法	396
10.3.1 方法	396
10.3.2 计算矩阵 A 的方法	399
10.3.3 计算步骤	400
第 11 章 敏感度分析与模型的不确定性	402
11.1 敏感度分析	402

11.1.1 敏感度(灵敏度)	402
11.1.2 敏感度分析	404
11.2 模型的不确定性	407
11.2.1 不确定性的由来	407
11.2.2 评估不确定性的方法	408
11.2.3 不确定性的处理	412
参考文献	414
符号和量纲	423
名词索引	439

绪 论

地下水是一种重要的天然资源,它是许多地方工农业、居民生活的重要或者主要水源,有时甚至是唯一的供水水源。但最近几十年来日益加剧的人类活动对地下水资源的质和量造成了许多负面影响,如过量开采引起的水资源枯竭、海水入侵、地面沉降;三废任意排放造成地下水不同程度地受到污染等。评估人类活动对地下水水质和量的影响、评价地下水资源的合理开发,以便可持续地利用地下水资源、预测地下水污染发展趋势、选择最佳防治措施等等当代迫切需要解决的问题都需要借助于求解地下水流模型和溶质运移模型才能找到比较满意的解答。

模型是什么?在回答这个问题以前,先要搞清楚什么叫“原型”。研究对象即为原型,也就是说原型是客观存在的。它是客观存在的对象客体。模型则是研究对象的替代物。它是具有原型特征的替代物,是实际系统(如实际自然现象)或过程的简化、抽象和类比表示,因而可以通过它再现该实际系统或过程的状态。所以 Anderson 等(1992)认为:模型是近似表示野外情况的任意装置、手段。模型的种类很多,在地下水研究中常用的有物理模型和数学模型两大类。物理模型以模型和原型之间的物理相似或几何相似为基础,如用渗流槽直接模拟地下水流。根据电流在导电介质中的运移和水在含水介质中的运移相似为基础制作的电网络模拟装置也属于物理模型。数学模型则以模型和原型之间在数学形式上的相似为基础。它实际上就是一组能够刻画实际系统内所发生物理过程的数量关系和空间形式的数学关系式,因而也就有再现实际系统的能力,而且更加灵活、通用,使用也方便,对模型的校正也比较容易。如它通过表述系统内发生的物理过程的控制方程以及描述模型边界上水头或水流的方程(边界条件),对非稳定流问题还有描述系统内水头分布的方程(初始条件)来间接模拟地下水流。由于以电网络为代表的物理模拟缺少通用性,每个模型只能适用一种实际情况,换了一个实际问题,模型必须另行重做,费时费工,而且难以处理潜水流问题,只能用于地下水流模拟,不能用来模拟水质、热量运移等问题,所以自 20 世纪 70 年代以来就逐渐被更加强有力的以数值模拟为代表的数学模型所取代了。

数学模型分为确定性模型和随机模型两类。前者出现在模型中的量都取确定的值;后者模型中含有随机变量,即不能肯定它取的值是什么,只知道它取值的概率。数学模型又可分为相对比较简单、不包含空间坐标作为变量的集中参数模型和相对较为复杂、包含空间坐标作为变量的分布参数模型。一般说来,集中参数模型由常微分方程来表达,而分布参数模型则需要用偏微分方程来表达。如需要知道不同开采条件下各地的水头分布,就得用分布参数模型;如只需要了解如泉流量和降水量之间的关系这类不需要知道不同时刻各地的水头分布时,就可用集中参数模型。显然对研究地下水流问题和包括地下水污染问题在内的溶质运移问题来说,分布参数模型更为适用。所以本书重点讨论物

理意义明确、能刻画系统状态随时间、空间变化的确定性分布参数模型。集中参数模型一般比较容易,有兴趣的读者可以参考有关著作,如 Domenico(1972)的书。

一般可以用两种方法去获得一个描述实际问题数学模型的解:解析法和数值法。用解析法求解数学模型可以得到解的函数表达式。应用此函数表达式可以得到所求未知量(如水头、浓度等)在含水层内任意时刻、任意点上的值。解的精度高,因而称为精确解或解析解。但它有很大的局限性,只适用于含水层几何形状规则、性质均匀、厚度固定、边界条件单一的理想情况,地下水动力学中讨论的就属于这种情况。实际问题要复杂得多,如边界形状不规则、含水层是非均质或者甚至是非均质各向异性的、含水层厚度变化,甚至有缺失的情况。对于一个描述实际地下水系统的数学模型来说,一般都难以找到它的解析解,只能求得用数值表示的在有限个离散点(称为结点或节点)和离散时段上的近似解,称为数值解。求数值解的方法称为数值法。在计算机上用数值法来求数学模型的近似解,以达到模拟实际系统的目的就称为数值模拟。

和其他方法比较,数值模拟有很多优点,主要有:①模拟在通用计算机上进行,不需要像物理模拟那样建立专门的一套设备。②有广泛的适用性,可以用于水量计算、水位预报以及水质、水温、地面沉降、水资源管理等计算。各种复杂的含水层、边界条件、水流情况都能模拟出来。数值模拟除了广泛用于上述预报未来,预测某种作用的后果外,还能用来对区域含水层系统进行分析以改善对区域水流系统的了解,帮助确定含水层边界的位置与特征,并对系统内水的数量、含水层的补给量进行正确评估。此外,模型还能用来研究一般地质背景中的各种过程,如研究湖泊与地下水的相互作用,作为识别某些建议行为是不是适合某些领域、范围的工具。③修改算法,修改模型比较方便。④可以程序化,只要编好通用软件,对不同的具体问题只要按要求整理数据就能上机计算,并立即得到相应的结果。它的不足之处是不如物理模拟来得逼真、直观,且计算工作量大。但这些问题随着当前水文地质工作者已具有比老一代工作者更高的数学水平和抽象能力以及计算机速度的快速提高与数值法的改进等早已得以解决。

解地下水问题的数值方法有多种,但最通用的还是有限差分法(FDM)和有限元法(FEM,也称有限单元法,有限元素法)。这两种方法的根本差别在于有限元法是建立在直接求函数的近似解基础上的,而有限差分法则是建立在用差商近似表示导数的基础上的。除了这两种方法以外还有特征线法(MOC)、积分有限差分法(IFDM)、边界元法(BEM)等。但只有有限差分法和有限元法能处理计算地下水文学中的各类一般问题(Yeh, 1999)。所以本书将重点介绍这两种方法,当然也会适当介绍特征法及其几种修正形式、积分有限差分法以及一些别的方法,如边界元法、有限分析法、混合有限元法和多尺度有限元法等。

有限差分法于20世纪50年代用于石油流动领域的计算。60年代中期拓宽应用领域,用于解地下水流问题。这种方法有许多优点:①对于简单问题(如均质各向同性含水层中的一维、二维稳定流问题)的数学表达式和计算的执行过程比较直观,易懂。②有相应高效的算法。对岩性、厚度相对比较均匀的地区,有占用内存少、运算速度快的优点。③精度对解地下水流问题来说一般相当好。④有广泛使用的商用软件如 MODFLOW, PLASM 等可以方便地购买到。需要注意的是差分方法要求解满足方程,所以它必须具

有二阶导数。由于含水层透水性及厚度变化等原因,地下水流在这些透水性、厚度变化大的部位容易发生突变,上述解必须具有二阶导数的要求往往就无法满足,因而影响计算结果。因此,在透水性变化大的含水层中以及含水层厚度变化大的地区,差分方法不宜采用渗透系数与导水系数的算术平均值,只能采用其调和项或几何平均值以改善计算结果。对自然边界条件差分法必须进行特殊处理,灵活性一般说来相对要差一些。因此标准的有限差分法在近似不规则边界上不如有限元法方便(但积分有限差分法能和有限元法一样处理不规则边界),对内部边界如断层带的处理以及模拟点源(汇)、渗出面和移动着的地下水表面等,有限差分法也不如有限元法好。Istok(1989)为此认为有限差分法有下列不足:①除非进行数学上或计算机程序上的处理,从而增加复杂性,否则难以处理不规则或曲线状含水层边界,各向异性和非均质含水层或倾斜的岩层。②对溶质运移等问题,解的精度不如用有限元法求得解的精度高。

有限元法于 20 世纪 60 年代后期引入地下水计算中。其优点是:①程序的统一性。有限元法对各种地下水流和溶质,热量运移问题,无论简单的还是复杂的,计算过程基本相同,因而有相同的程序结构,程序编写比较方便,很多例子表明从解某一类问题的程序转换为解另一类问题的程序比较方便、简单。②对不规则边界或曲线边界、各向异性和非均质含水层,倾斜岩层以及复杂边界的处理比较方便、简单。③单元大小比较随意,同一计算区内可以视需要采用多种单元形状和多种插值函数以适应水头,浓度等变量的激烈变化或精度要求。④水流问题、物质运输问题解的精度一般比有限差分法求得的解高。有限元法的不足是占用计算机内存比较大,运算工作量也大一些。由于这种方法对简单问题与复杂问题的程序结构相同,和有限差分法比起来,这一不足更为明显,它相对需要较多数学上的处理。但实际问题一般都比较复杂,对复杂问题来说,如前述需要较多数学和程序上处理这种不足就不存在了;相反,对复杂水文地质条件有较大适应性反而成为它的优越性了。占用内存大的问题随着计算机内存的快速提高、大容量计算机的不断出现和数值方法的改进,早已不再是什么问题了。

有限元法虽有这些优点,但也有缺陷,主要是局部区域(某个单元)质量不守恒,有时会影响计算结果;另一个是和有限差分法等共有的缺陷,即渗流速度、流量只能在先求出水头后,再由 Darcy 定律算出渗流速度,渗流速度乘以过水断面面积再得到流量。这样做误差大,算不准,至今尚未彻底解决。一种设想是直接把反映质量守恒和水均衡的连续性方程和 Darcy 定律配以必要的定解条件联立求解。当然还要用有限元法的思想求解,但这是不同于传统有限元法的一种全新方法——混合有限元法。它能同时解决上述两大缺陷,精度高。但它还有很多困难需要克服。2004 年我们(薛禹群等,2004;Ye *et al.*, 2004)又把数学上新出现的多尺度有限元法引入到地下水领域,并得到初步应用,它不仅大量减少单元数,还能提高计算精度。因此,它是一种很有应用前景的方法,特别对于大面积的区域水流问题、地面沉降问题的模拟实践证明会大有裨益。

自 1973 年以来,数值模拟逐渐引入到我国水文地质领域中来,并取得了一大批可喜的成果。1991 年 4 月在南京大学召开的“地下水水流和污染模拟国际会议”,2005 年在上海召开的“第七届国际地面沉降学术讨论会”也是对这方面成果的一次检阅,同时还先后出版了一些有关数值模拟的重要著作。但和迅速发展的科学技术及客观需要来说,还是

很不够的。不仅因为目前数值模拟已成为地下水资源评价的一种最主要的手段,而且随着经济的高速增长,面临的问题已远远不是一般的水资源评价问题了。地下水资源是有限的,国民经济对水资源的需求却在不断增长,矛盾的解决只有依靠节约用水和在可持续发展、建设生态环境友好的和谐社会思想指导下从合理开发利用地下水资源和地下水资源的科学管理中得到妥善解决。我国是一个水资源不足的国家,全国人均水资源占有量不足世界人均占有量的 $1/4$,最紧缺的海河流域人均水资源量只有 500m^3 左右。水资源是21世纪我国干旱、半干旱区持续、和谐发展的关键,如何维持水资源的可持续利用是迫切需要解决的战略问题,其核心就是实现水资源的可持续管理。要做好这一点,关键在于认识干旱、半干旱区特别是内陆地区流域水循环规律,包括山区水循环机理、山前平原区地表水与地下水之间的相互转化规律以及人类活动对流域内这种转化关系的影响。而这些问题的解决离不开不同生态系统下地表水、地下水与大气水之间循环关系的研究,显然数值模拟在解决这些问题中起着重要的作用。另一方面,随着地下水污染的问题日益加剧,预测地下水污染发展趋势,选择最佳防治措施也提到日程上来了;随着过量开采地下水,全国已形成9万多平方千米的地面沉降区,造成的经济损失日益严重,地面沉降发展趋势预测和有效防控措施的研究以及在这种情况下,如何合理利用地下水资源的问题也日益迫切了。和上面列出的部分需要相比,我国地下水流数值模拟的一些主要著作(薛禹群和谢春红的《水文地质学的数值法》,1980;孙讷正的《地下水流的数学模型和数值方法》,1981)出版至今已有二十五六年了;另一方面这些年来数值方法已取得长足进步,显然上述两本书以及一些这段时间出版的一些教材已无法满足当前生产、科学研究和教学的需要了。本书就是为适应这一要求写的。考虑到已有前面这些著作,为了不致篇幅过长,有些基本概念的叙述本书就比较简略了。

有一个问题需要在此着重说清楚。目前国外一些软件如MODFLOW在国内流行,这很正常,说明我国有关生产实际问题的地下水模拟已开始向标准化、规范化发展,并和国际接轨。但同时在一些年轻人中也形成一种错觉,似乎只要学会用MODFLOW等软件后就什么都解决了,因而盲目地追求所用软件的版本,过分追求模拟结果的可视化程度,而不重视对研究区具体水文地质条件的认识、概化,轻视概念模型的建立和数值模型的识别、检验,这是不对的。情况更严重的是不重视对水流方程、对流-弥散方程和边界条件知识的学习、了解,以至出现国家重大项目用了国外软件,但方程和边界条件都写错了,这样评价出来的水资源量可信吗?MODFLOW等软件有它的优越性,使用方便,对解决生产实际中的一些问题非常有用,特别是它的前、后处理很好。但它本身对一些问题的处理上还存在不足,是必须注意的。另外,MODFLOW用的是有限差分法,如在前面有限差分法和有限元法比较中所说的那样,有限差分法自身也有不足的地方。上面这些问题还不是主要的,更关键的是作为商用软件,即使是最新版本的软件,用来研究一些新的科学问题,特别是重大关键科学问题必然就显得力不从心了,甚至一些常见的问题,如承压水-半承压水-潜水复杂系统以及露天矿反复疏干-充水-疏干过程这类问题即使目前最新的GMS6.0版地下水模拟软件也不能胜任,更不用说新出现的复杂科学问题了。如果这些软件都能解决这些复杂的关键科学问题那还谈得上什么叫创新,特别是原始创新。这些问题的解决必须在熟悉数值法的基础上自己动手来编写程序,当然也不排除在部分

次要问题的解决上部分采用这些商用软件。另外,新的、更加完善的数值方法不断涌现。显然,这些商用软件的更新一般难以跟上这些数值方法的发展。要创新就必须自己动手研究数值方法,编写相应软件。商用软件可以参考,但不能完全依赖。

最后应说明的是,地下水流问题的数值法和地下水污染问题的数值法的基础是相同的。为了减少不必要的重复,我们决定把这两个问题的数值法放在一本书里叙述,虽然这样做会给教学带来一些不方便,但从研究或生产实践的角度看或者叙述的深度看,可能会更好些。