

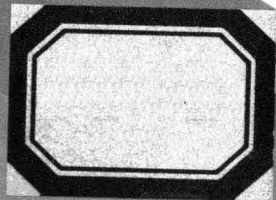
林锦 杨树锋 郑春苗 吴吉春 著

变密度条件下地下水模拟 优化研究与应用

BIANMIDU TIAOJIANXIA
DIXIASHUI MONI
YOUHUA YANJIU YU YINGYONG

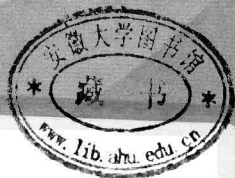


中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



林锦 杨树锋 郑春苗 吴吉春 著

变密度条件下地下水模拟 优化研究与应用



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了新开发的变密度条件下地下水模拟优化模型 SWT-GA 及其并行计算程序的设计原理、开发技术和实现方法,描述了美国阿拉巴马州 Baldwin 县南部墨西哥湾附近滨海含水层海水入侵建模方法、过程和结果,并且通过将新程序应用于美国阿拉巴马州 Baldwin 县南部墨西哥湾附近滨海含水层海水入侵防控研究,展示了其应用价值。全书分 5 章,内容包括:绪论,海水入侵模型的建立,变密度地下水模拟优化模型,并行技术的引进和实现,地下水开采优化管理。

本书可供水文水资源、水文地质学、环境地质学等科研和教学部门的有关人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

变密度条件下地下水模拟优化研究与应用 / 林锦等著. — 北京:中国水利水电出版社, 2011.9
ISBN 978-7-5084-9044-1

I. ①变… II. ①林… III. ①地下水资源—数值模拟—研究 IV. ①P641.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第200804号

书 作 出 版 发 行	名 者 行	变密度条件下地下水模拟优化研究与应用 林锦 杨树锋 郑春苗 吴吉春 著 中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 印 规 版 次 印 数 定 价	版 刷 格 次 数 价	中国水利水电出版社微机排版中心 北京瑞斯通印务发展有限公司 145mm×210mm 32开本 3.875印张 115千字 2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷 0001—2000册 16.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

地下水是我国重要的供水水源，在保障我国城乡居民生活用水和国家粮食安全、支持经济社会发展、维持生态平衡等方面发挥着极其重要的作用。2009 年全国地下水源供水量为 1094.5 亿 m^3 ，占总供水量的 18.4%。与 2008 年相比，地下水源供水量增加了 9.7 亿 m^3 。全国 660 多个城市中有 400 多个以地下水为主要供水水源，全国井灌区面积占农田灌溉面积的 40% 左右。

在支撑经济社会快速发展的同时，地下水持续大规模开发也带来了海水入侵、地面沉降、土地沙化等问题。其中，海水入侵是人类活动下滨海含水层中咸淡水之间的动态平衡被打破而出现海水向淡水方向侵入的现象，导致海水入侵的最主要原因是地下水的过量开采。我国首先于 1964 年在大连市发现海水入侵；到了 20 世纪 70 年代后期，又在山东半岛的莱州湾发现海水入侵。时至今日，全国海水入侵面积超过 3000 km^2 ，绝大多数滨海城市 and 海岛均发现了不同程度的海水入侵现象，其中以山东半岛的莱州湾地区最为严重。海水入侵会导致诸如地下水水质恶化、土壤盐渍化等一系列生态、环境问题，严重阻碍沿海地区经济社会的可持续发展。这一问题已引起高度重视，国家发展和改革委员会、水利部、住房和城乡建设部明确将“防止海水入侵”作为东部沿海地区水利发展总体布局的一项重要内容列入水利发展“十

一五”规划。“十一五”期间，水利部积极践行可持续发展治水思路，以地下水开发利用总量控制为主要抓手，大力推进沿海地区地下水开发利用管理工作，有效遏制了海水入侵现象的蔓延。2011年中央一号文件明确指出，要“严格地下水管理和保护”。水利部正认真贯彻落实中央一号文件的要求，进一步加强地下水管理，尤其是对地下水超采区的管理和保护。

海水入侵是一种典型的变密度条件下的地下水运动。在海水入侵过程中，地下水流运动及水中溶质运移会不同程度地受到流体密度时空变化的影响。防止海水入侵的有效途径之一是对地下水资源开采进行优化管理。为获得科学正确的管理方案，优化管理时需要借助合理可靠的决策支持工具，而且必须考虑流体密度变化对地下水运动的影响。目前，国际上甚为流行的地下水优化管理决策支持工具是地下水模拟—优化程序。它不仅可以为地下水管理部门制定科学合理的地下水开采方案和管理措施提供技术支持，而且可以作为辅助工具帮助指导地下水资源可持续开发利用规划的编制。然而迄今为止，考虑流体密度变化影响、基于变密度地下水模拟模型的地下水模拟—优化程序仍鲜见报道。

本书是林锦同志的博士论文，主要针对变密度条件下地下水模拟优化模型及其并行计算程序的研发，以及美国阿拉巴马州 Baldwin 县南部墨西哥湾附近滨海含水层海水入侵建模和地下水开采优化管理等问题开展了大量的研究工作并取得了丰硕的成果。林锦同志有着丰富的求学经历：2003年6月本科毕业于浙江大学之后被保送直接攻读本校地球科学系地质学专业（水文地质学方向）的博士学位；攻博期间，曾赴美国阿拉巴马大学地质学系访学16个月，接受国际著名

水文地质学家郑春苗教授的指导；回国之后又申请到南京大学 2007 年教育部研究生教育创新计划“博士生访学”项目，在南京大学水科学系进行了为期 1 年的正式访学；2008 年毕业于浙江大学地球科学系，并获得地质学（水文地质学方向）博士学位。林锦同志在顺利完成博士论文的同时，在水科学研究领域 SCI 期刊上发表了 3 篇学术论文，并在国内著名水利类期刊《水利学报》上发表了 1 篇学术论文。

林锦同志一度被组织安排到水利部水资源司交流锻炼，让我得以认识这位勤奋好学、踏实肯干、谦逊朴实、乐观向上的年轻朋友。结合水资源司的管理工作，他的论文又得到进一步充实和完善。我相信，本书的出版，对于我国海水入侵的防治和地下水资源管理将发挥积极的作用。盛情之邀，是为之序。

孙雪涛

2011 年 6 月 27 日

目 录

序

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	2
1.2 研究现状	5
1.3 研究目标、内容、方法及创新点	9
第 2 章 海水入侵模型的建立	13
2.1 研究区概况	13
2.2 SEAWAT 软件	22
2.3 海水入侵模型的建立	25
2.4 模型校正和海水入侵的预测	32
第 3 章 变密度地下水模拟优化模型	40
3.1 通用变密度地下水优化管理数学模型	40
3.2 遗传算法的原理	44
3.3 耦合方法和模型开发	49
3.4 模型的输入输出	55
3.5 算例研究	62
第 4 章 并行技术的引进和实现	70
4.1 MPI 的原理	70
4.2 并行遗传算法	74
4.3 并行 SWTGA 程序的设计和实现	76
第 5 章 地下水开采优化管理	82
5.1 井流量减半预测	82
5.2 优化问题、目标函数及优化设置	84

5.3 优化结果和最佳开采方案	95
结论	99
致谢	101
参考文献	103

第 1 章 绪 论

1856 年, 法国水力工程师达西 (Darcy) 在发表的关于法国第戎市的供水报告中描述了他在实验室所做的砂柱渗水实验, 并根据实验结果总结出水在孔隙介质中流动的基本定律, 后人为纪念他, 将其命名为达西定律 (Bear, 1979)。该定律标志着地下水水文学作为一种定量性的科学的诞生, 而且一直以来它都是地下水水文学最基本、最重要的定律之一。自达西定律提出后一百多年来, 地下水水文学的发展已经取得了大量的成果, 人们对地下水运动规律也有了很深刻的认识。

为研究地下水在岩土体中运动的规律及其应用, 地下水水文学家们基于达西定律提出了一些行之有效的模拟方法, 为地下水运动建立了许多适用于理论研究和解决实际问题的模拟模型。这些地下水模拟方法大体上可分为物理模拟法和数值模拟法两大类。物理模拟法是用相似模型再现地下水渗流动态和过程的实验方法, 所用模型主要有砂槽模型、窄缝槽模型、电模拟模型和离子模型等 (薛禹群, 1997)。20 世纪 50 年代在高速计算机出现之前, 电模拟模型在地下水建模方面得到了广泛应用 (Wang et al., 1982)。数值模拟法产生于 19 世纪末, 是用一系列微分方程组成的数值模型来描述地下水运动的过程和规律。根据是否用偏微分方程来描述系统, 可将地下水数值模型分为两类: 一类是集中参数模型, 它是用线性或非线性常微分方程来描述地下水系统的动态特性; 另一类是分布参数模型, 它则用各类偏微分方程描述地下水系统的动态特性。

由于物理模拟法本身所固有的一些局限性, 如无法模拟溶质运移、建立模型不易、灵活性差等缺点, 自 20 世纪 60 年代高速计算机得到广泛应用之后, 在地下水建模方面, 它逐渐被数值模拟法取代。数值模型具有所需设备简单, 模型修改容易, 而且还能对地下水中溶质运移进行模拟等优点。它不仅能较为方便准确地刻画地下

水流运动及溶质运移过程,并将其动态特性直观形象地展露在世人面前,同时还能为不同外界条件下地下水流运动及溶质运移趋势的预测提供原型和工具。因此,在计算机科学飞速发展的今天,数值模拟法受到了越来越多研究者的青睐而成为地下水建模的主要方法和手段。

20世纪80年代,随着社会经济发展引起水资源短缺以及地下水资源不合理开发利用导致的各种生态、环境问题日益突出,人们日渐关心地下水的水量水质和地下水资源的可持续利用,逐渐发现单一的地下水模拟模型已经不能满足许多生产生活实际的需求,于是地下水水文学家们就开始把模拟模型和优化模型耦合起来,尝试构建适用于解决不同地下水优化管理问题的模拟优化模型。地下水模拟优化模型是地下水科学管理的有效工具,它基于模拟模型,运用优化方法,求解出达到预期系统目标的最佳决策方案。根据优化管理的目的,可将地下水模拟优化模型分为地下水水量管理模型、地下水水质管理模型和地下水污染物监测网优化设计模型。针对实际的地下水优化管理问题,可以选择开发合适的模拟优化模型,从而为地下水管理决策者制定合理可行的地下水管理策略提供科学有效的决策工具。目前探讨和开发不同情况下的地下水模拟优化模型正成为地下水水文学研究中的热点和难点。

1.1 研究背景

海水入侵是人类活动下滨海含水层中咸淡水之间的动态平衡被打破而出现海水向淡水方向入侵的现象。海水入侵将导致如水质恶化、土壤盐渍化等一系列生态、环境恶化问题,给沿海地区带来严重危害。目前,全世界有几十个国家和地区都发现了海水入侵问题,如荷兰、德国、比利时、英国、法国、意大利、希腊、葡萄牙、西班牙、日本、澳大利亚、墨西哥、美国、印度、菲律宾、印度尼西亚、以色列、中国等(郭占荣等,2003)。海水入侵的普遍性和危害性已经引起国际社会的共同关注,有关国家和地区十分重视并积极开展海水入侵问题的研究。

美国 Alabama 州 Baldwin 县南部濒临墨西哥湾 (Gulf of Mexico), 20 世纪 80 年代以来该地区滨海含水层海水入侵问题一直存在并困扰着当地政府和居民。1985 年, Alabama 州地质调查局出版了 Chandler et al. (1985) 针对该地区滨海含水层海水入侵问题所开展的连续五年调查研究的成果报告。基于海水入侵问题调查研究结果, Chandler et al. (1985) 认为地下水超采是导致该地区滨海含水层中海水入侵的直接原因, 并建议对海水入侵问题进行建模。海水入侵模型不仅可用于海水入侵的动态和未来趋势的模拟和预测, 而且还可为进一步的地下水开采管理提供一个基础模型, 因此具有重要的研究价值。随着人口的大幅增长和经济的快速发展, 该地区地下淡水的需求不断增加, 海水入侵和地下水开采管理研究的要求日益迫切。然而迄今为止, 该地区海水入侵模型还未见报道, 而该地区地下水开采的优化管理研究更是一片空白。

海水入侵过程中, 地下水流运动及溶质运移受流体密度时空变化的影响十分明显, 因此它的建模是一个典型的变密度地下水模拟问题。20 世纪 80 年代末以来, 地下水水文学家们开发了不少变密度地下水模拟模型。Sorek et al. (1999) 对 15 个可进行变密度地下水模拟的模型作了综述, 其中包括著名的有限元模拟模型 SUTRA (Voss, 1984)、有限差分模拟模型 HST3D (Kipp, 1986, 1997) 等。到目前为止, 基于通用的地下水流三维有限差分模拟模型 MODFLOW (McDonald et al., 1988; Harbaugh et al., 2000), 可以对变密度地下水流运动及溶质运移进行模拟的模型有 SEAWAT (Guo et al., 1998a, 1998b, 2002; Langevin et al., 2003), MOC-DENS3D (Oude Essink, 1998), MODHMS (HydroGeoLogic Inc., 2002) 以及 MODFLOW 的 SWI 程序包 (Bakker et al., 2003) 等。Langevin et al. (2004) 对这 4 个基于 MODFLOW 的变密度地下水模拟模型作了系统的总结。其中, SEAWAT 已通过了许多常用基准问题的测试 (Guo et al., 2002; Langevin et al., 2003, 2006), 并在实际变密度条件下地下水研究中得到了不少的应用。对于 Baldwin 县南部滨海含水层中海水入侵的模拟和预测, SEAWAT 便可作为一个很好的工具。

地下水模拟优化模型是将地下水模拟模型和选定的优化工具进行耦合产生的用于解决地下水优化管理问题的工具。它既能模拟地下水系统的复杂运动,又能为地下水管理决策者提供满足给定约束条件的最佳管理策略,因而备受地下水水文学家和地下水管理决策者的青睐(Wagner, 1995)。Gorelick (1983, 1990), Willis et al. (1987), Yeh (1992) 以及 Gorelick et al. (2001) 曾分别对模拟优化方法作了综述。20 世纪 90 年代以来,地下水水文学学者们做了大量关于定密度地下水模拟优化方法和模型开发的研究,并取得了许多突出的成果。Wagner (1995), Ahlfeld et al. (2000), Mayer et al. (2002) 以及 Zheng et al. (2002) 分别概述了定密度地下水模拟优化模型研究的最新进展。

尽管定密度地下水模拟优化模型和变密度地下水流运动及溶质运移模拟模型的研发已日趋成熟,且其不少成果在解决实际问题中也得到了一定的应用,但是迄今为止,通用的变密度地下水模拟优化模型还很少见。实际变密度地下水优化管理问题,如制定滨海含水层地下水合理开采方案、海水入侵的防御、卤水发育地区地下水开采管理等,又迫切需要相应的模拟优化模型来作为工具帮助解决。于是,设计和开发通用变密度地下水模拟优化模型成为目前地下水研究的前沿和新热点。很明显,通用变密度地下水模拟优化模型的研发将把地下水模拟优化研究从流体密度不变条件扩展到变密度条件,从而为解决变密度地下水优化管理问题提供一个十分有用的工具。

与定密度地下水模拟优化模型一样,变密度地下水模拟优化模型在寻优计算过程中也需要不断求解每一种新方案下的数值模型,因此它的寻优速度除了受所采用的优化算法的效率影响之外,还大大受数值模型的求解速度的制约(Zheng et al., 2002)。当变密度地下水系统比较复杂时,如三维多层、非均质、各向异性的非线性多参数复杂系统,求解用于模拟和预测的数值模型往往需要较长的时间。对于这样的系统,若还要求解相应的地下水优化管理模型,那么其耗时势必比较长,可能需要好几天甚至好几个月(He et al., 2007)。这是变密度地下水模拟优化研究的一大瓶颈问题。如何提高变密度地下水模拟优化模型的运算速度,解决上述瓶颈问题,也是变密度地下水模

拟优化研究的一个非常重要的方面。

本研究将为美国 Alabama 州 Baldwin 县南部墨西哥湾附近滨海含水层建立海水入侵三维有限差分模型,并运用变密度地下水模拟工具 SEAWAT 进行求解;利用海水入侵模型模拟和预测研究区滨海含水层中海水入侵的动态和未来趋势;确立适用于变密度地下水优化管理常见问题的一般目标函数形式,并建立通用变密度地下水优化管理数学模型;设计并开发基于遗传算法和过渡带理论的通用变密度地下水模拟优化模型及其并行计算程序;探讨研究区地下水开采管理最佳方案。这项工作不仅对认识美国 Alabama 州 Baldwin 县南部墨西哥湾附近滨海含水层海水入侵的规律和制定当地地下水开采管理策略具有积极的现实意义,同时它又创新性地开展了通用变密度地下水模拟优化模型及其并行计算程序的相关研究,并且突破了变密度地下水模拟优化研究的一大瓶颈,因而具有重要的理论价值。

1.2 研究现状

1.2.1 SEAWAT 的研究和应用现状

SEAWAT 是美国地调局 (USGS) 推出的基于 MODFLOW 的多孔介质三维非稳定变密度地下水流及溶质运移模拟模型。它最初由 Guo et al. (1998a, 1998b) 设计和开发,是基于 MODFLOW - 88 (McDonald et al., 1988) 和著名溶质运移模拟模型 MT3D⁹⁶ (Zheng, 1996) 的。后来,作为美国地调局项目 (Simulation of ground - water discharge to Biscayne Bay, southeastern Florida) (Langevin, 2001) 的一部分, Langevin et al. (1999) 以及 Guo et al. (2001) 对 SEAWAT 进行了改进和升级,并用一些基准测试问题对它进行了测试。2002 年,美国地调局正式推出了基于 MODFLOW - 88 和 MT3DMS (MT3D⁹⁶ 的升级版) (Zheng et al., 1999) 的升级版 SEAWAT,即 SEAWAT2.1 版 (Guo et al., 2002)。紧接着, Langevin et al. (2003) 对 SEAWAT 做了大幅的改动,即用新版 MODFLOW - 2000 (Harbaugh et al., 2000) 替换原来的 MODFLOW - 88,并于同年发布了他们的新成果 SEAWAT2000。新版

SEAWAT——SEAWAT2000 集成了 MODFLOW-2000 的所有新特性。尽管每一个新版本都对 SEAWAT 作了不同的提高和改进,但是它们所采用的变密度地下水流运动与溶质运移的耦合方法和原理都是一样的。

自发布以来,SEAWAT 模型已被许多学者用于各种变密度地下水模拟问题的研究。Langevin (2003) 为美国佛罗里达 (Florida) 州南部滨海含水层建立了一个区域尺度的三维变密度地下水流和溶质运移模型,并用 SEAWAT 进行求解,计算出 1989~1998 年间含水层中地下水向佛罗里达州 Biscayne 海湾的排泄量。他认为区域尺度变密度地下水模型是估算地下水向大海排泄量的非常有用的工具。Qahman et al. (2006) 建立了一个三维变密度地下水模型,并用 SEAWAT 求解地下水水头和溶质浓度的时空分布与演化,用于评价和预测巴勒斯坦加沙地区的海水入侵状况。Mao et al. (2006) 运用 SEAWAT 去研究苏格兰 Ayrshire 北部 Irvine 湾附近 Ardeer 地区潮汐和海滩坡度对地下水动态、海水入侵以及滨海含水层中地下水向大海排泄量的影响。Nassar et al. (2007) 将 SEAWAT 应用于海水淡化厂卤水灌注井对滨海含水层的影响的研究。Maliva et al. (2007) 用 SEAWAT 去模拟和研究深井灌注系统中城市废水的垂向运移。除此之外, Bakker (2003), Schneider et al. (2003, 2005), Shoemaker et al. (2003), Bakker et al. (2004), Masterson (2004), Dausman et al. (2005), Bauer et al. (2006), Yager (2007), Rejani et al. (2008) 等都曾把 SEAWAT 模型应用于各自的变密度地下水模拟问题研究中。

另外,也有学者将 SEAWAT 同其他模型进行耦合,开发适用于交叉领域问题的新模型。Langevin et al. (2005) 将地表水流和溶质运移模拟模型 SWIFT2D (Leendertse, 1971, 1987) 与 SEAWAT 耦合得到一个地表/地下水联合模拟模型,然后将它应用于美国佛罗里达 (Florida) 州 Everglades 南部滨海湿地和邻近港湾地表/地下水流网和盐度分布的定量研究,并讨论不同水文过程对它们的影响。Mao et al. (2006) 将 SEAWAT 与地球化学反应模拟模型 PHREEQC-2 (Parkhurst et al., 1990, 1999) 耦合,开发了一个

适合于模拟变密度地下水流中多组分反应物运移过程的综合模型。Romanov et al. (2006) 将 SEAWAT 和 PHREEQC-2 联合用于滨海碳酸盐含水层咸淡水混合区的孔隙度变化研究。但到目前为止, 这样的耦合模型研究还不多见。

1.2.2 定密度地下水模拟优化研究现状

最优化是在复杂环境中遇到的许多可能的决策中挑选“最好”决策的一门科学。最优化方法即求最优决策的方法 (薛毅, 2001)。根据是否需要对目标函数求导, 可将最优化方法分为梯度优化法和无梯度优化法两大类。常用的梯度优化法有: 线性优化, 非线性优化, 混合整数线性优化, 混合整数非线性优化以及微分动态优化等方法。梯度优化法的最大优点是计算效率高, 求解速度快。然而它们有明显的两大缺点: 一是当目标函数高度复杂和非线性而导致解空间内存在多个局部最优解时, 梯度优化法很可能会陷入某一局部最优解而找不到全局最优解; 二是某些情况下对目标函数求导数值方法上会比较困难, 可能会导致不稳定和收敛问题 (Zheng et al., 2002)。目前为止将梯度优化法用于定密度地下水模拟优化研究而开发的模型主要有: AQMAN (Lefkoff, 1987), MODMAN (Greenwald, 1994), MODOCF (Ahlfeld et al., 2003) 和 GWM (Ahlfeld et al., 2005; Lin et al., 2007) 等。

无梯度优化法又称为全局优化法, 是基于自启发式搜索技术的一类优化法, 常见且有代表性的主要有三种: 遗传算法 (GA)、模拟退火和 Tabu 搜索。全局优化法共同的优点有: 能够确定全局最优解, 高效处理离散决策变量, 寻优过程不需要对目标函数求导, 与水流运动和溶质运移模拟模型相互连接容易。一般说来, 这类优化法计算量都会比较大, 然而随着计算机行业的飞速发展, 这一问题正逐渐被克服。

近十多年来, 运用全局优化法进行定密度地下水模拟优化研究一直是地下水科学领域的研究热点。作为全局优化法之一的遗传算法因其算法简明易懂而在地下水模拟优化研究中备受青睐。在定密度地下水模拟优化研究领域, 地下水污染控制和修复方案优化设计一直吸引着大量的地下水水文学家。Wang et al. (1997) 将遗传算法 (GA)

和 MODFLOW 及 MT3D 耦合起来, 开发了一个适用于各种野外条件下地下水修复系统最优化设计的模拟优化模型, 并将它成功地应用于野外大尺度三维实际问题, 帮助决策清除一团已存在的污染晕所需的最小抽水量。Zheng et al. (2002) 又将该模拟优化模型与响应函数方法相结合, 辅助优化设计用于控制和清除美国 Massachusetts 州 Cape Cod 地区 Massachusetts 军事基地中三氯乙烯污染晕的抽水处理 (Pump and Treat) 系统, 进而阐述了运用优化技术进行地下水修复系统设计的潜在好处。McKinney et al. (1994), Aly et al. (1999), Guan et al. (1999), Aksoy et al. (2000), Hilton et al. (2000), Smalley et al. (2000), Chang et al. (2002), Erickson et al. (2002), Hsiao et al. (2005), Chang et al. (2007) 等也都曾将遗传算法用于地下水污染修复方案优化问题的研究。

随着地下水污染控制和修复研究的发展, 地下水污染监测网的设计也逐渐热门起来。Reed et al. (2000), Wu et al. (2005), Zhang et al. (2005), Wu et al. (2006) 等深入探索和研究了结合遗传算法对地下水污染监测网进行优化设计的方法。在一些严重依赖地下水资源的地区, 地下水开采方案优化管理在区域水资源开发利用规划中显得尤为重要。Wu et al. (2007) 基于遗传算法开发了一个定密度地下水模拟优化模型, 并用它去寻求华北高青平原地下水开采的最佳策略。

除了遗传算法, 模拟退火和 Tabu 搜索在定密度地下水模拟优化研究领域也有不少的应用, 其中包括 Dougherty et al. (1991), Maryott et al. (1993), Zheng et al. (1996), Tung et al. (2004), Rao et al. (2007) 等。总而言之, 遗传算法、模拟退火和 Tabu 搜索等全局优化法正被越来越多地用于解决地下水优化管理问题。

1.2.3 变密度地下水模拟优化研究现状

针对变密度地下水模拟问题的研究方法通常有两类: 一类假设两种液体是互不相溶的, 两者之间存在一个突变界面; 另一类则认为两者是可混溶液体, 它们之间存在一个密度逐渐变化的过渡带 (Bear, 1972, 1979; Bear et al., 1999; 薛禹群等, 1991)。对于典型的变密度地下水模拟问题——海水入侵, 事实上, 海水和淡水是可混溶液

体,从海水到淡水水流密度因水中溶质浓度变化而逐渐变化,所以严格意义上讲应该采用过渡带理论来描述海水入侵的动态。然而当过渡带很窄的时候,可以假设海水和淡水之间存在一个突变界面,而基于此假设去开展海水入侵的研究。

目前为止,变密度地下水模拟优化研究主要针对海水入侵情况下的地下水管理问题,且大多是基于突变界面假设。Emch et al. (1998), Cheng et al. (2000), Rao et al. (2003), Mantoglou (2003), Park et al. (2004), Mantoglou et al. (2004), Karterakis et al. (2007) 等基于突变界面假设,开展了滨海含水层地下水优化管理问题的研究,提出了适合不同优化目标的模拟优化模型。其中,Cheng et al. (2000), Rao et al. (2003), Mantoglou (2003), Mantoglou et al. (2004), Karterakis et al. (2007) 都以最大化总抽水量为优化目标;Emch et al. (1998), Park et al. (2004) 则考虑了多目标优化问题。

但也有少数学者,如 Das et al. (1999a, 1999b), Gordon et al. (2000), Abarca et al. (2006) 等,在他们所进行的变密度地下水优化管理研究中运用了过渡带理论,将基于过渡带理论的变密度地下水模型用于变密度地下水的模拟。他们所提出的模拟优化模型都采用梯度优化法, Das et al. (1999a, 1999b), Gordon et al. (2000) 仅设计了理想算例进行应用和验证,而 Abarca et al. (2006) 还进行了实际的应用。由于梯度优化法本身的局限性,如需要对目标函数求导和局部最优解问题,因而这些模拟优化模型的通用性较差,面对实际复杂的变密度地下水优化管理问题往往需要较大的改动,甚至可能束手无策。

然而基于过渡带理论的适合于绝大多数变密度地下水优化管理问题的模拟优化模型的开发和实际应用,至今仍鲜见报道。本文将对此开展重点研究,提出并开发基于过渡带理论的通用变密度地下水模拟优化模型。

1.3 研究目标、内容、方法及创新点

1.3.1 研究目标

本项研究的目标是:通过三维非稳定流变密度地下水有限差分模