

钱家忠 汪家权 著

中国北方

型

ZHONGGUO
BEIFANG XING

裂隙岩溶水模拟 及水环境 质量评价

LIEXIYANRONG
SHUIMONI JI
SHUIHUANJING
ZHILIANGPINGJIA

中国北方型裂隙岩溶水模拟 及水环境质量评价

钱家忠 汪家权 著

合肥工业大学出版社

内 容 提 要

本书共四篇十三章,包括中国北方型裂隙岩溶水概论,裂隙岩溶介质地下水流模型及数值方法,中国北方型裂隙岩溶水三维数值模拟实例及相关问题研究以及地下水环境质量评价。较全面地评述了中国北方型裂隙岩溶水模拟及水环境质量评价的国内外现状、研究进展和发展方向;阐述了中国北方型裂隙岩溶划分及其水环境动力学特征,对裂隙岩溶水模拟模型进行了分类和评述,介绍了 MODFLOW 软件以及有限单元法的基本原理及数值法,重点阐述和讨论了三维等参有限元法方法在徐州市张集水源地裂隙岩溶水资源评价中的应用实例。

本书可用作高等院校水文学及水文资源、地质工程及环境科学与工程等专业高年级或研究生教材或参考书,也可供从事地质工程、水资源、水环境保护与科学管理研究的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国北方型裂隙岩溶水模拟及水环境质量评价/钱家忠著. —合肥:合肥工业大学出版社, 2003. 1

ISBN 7-81093-028-1

I. 中… II. 钱… III. ①裂隙水—水环境—环境质量—评价②岩溶水—水环境—环境质量—评价 IV. P641.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 007108 号

中国北方型裂隙岩溶水模拟及水环境质量评价

钱家忠 汪家权 著

出 版	合肥工业大学出版社	印 刷	合肥市星光印务有限责任公司
地 址	合肥市屯溪路 193 号 邮编 230009	开 本	787×1092 1/16
电 话	总编室 0551-2903038	印 张	16.5
	发行部 0551-2603198	字 数	410 千字
网 址	www.hfut.edu.cn/出版社	版 次	2003 年 1 月第 1 版
发 行	全国新华书店	印 次	2003 年 1 月第 1 次印刷

ISBN7-81093-028-1/P·1

定价:35.00 元

如有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行科联系调换

前言

近年来,随着人类对地下水需求量的急剧增加和对水环境保护的日益重视,裂隙岩溶介质中地下水流和污染物运移数值模拟已经成为水文地质学的一个极受重视的领域。中国水资源问题也相当严重,北方尤为突出。据统计:全国可以恢复更新的多年淡水资源量仅 28124 亿 m^3 ,按 1990 年统计人均水资源量为 2427m^3 ,约为世界人均水资源量的 $1/4$,按世界 148 个国家的人均水资源量排序,我国名列第 109 位。在国内,水资源的时空分布很不平衡,在北方的黄、淮、海流域,人均水资源量大大低于全国的平均水平,不足 1000m^3 ,而且水资源的时间分布很不平衡,在春、夏的需水季节,河流经常断流、干枯。

在中国北方裂隙岩溶分布区,地下水成为重要的供水水源。北方的许多城市和乡村利用裂隙岩溶水作为工、农业生产和人民生活的供水水源。如济南、太原、焦作、徐州、淄博、枣庄等大中城市都主要利用裂隙岩溶水供水。然而,由于不合理的过量开采地下水,致使水资源日益紧缺,加剧了城市水资源供需矛盾,同时产生了一系列的水资源、水环境地质问题,严重制约了区域经济发展和城市建设,阻碍人民生活水平的提高,甚至威胁人民的身体健康,乃至生命。许多国家的近代发展历史经验证明,水资源环境问题往往是直接控制影响一个地区水资源环境和经济社会发展系统的核心问题。因此开展中国北方型裂隙岩溶水模拟及地下水环境质量评价研究对这一类地下水资源的可持续开发、利用和保护,确保区域经济社会可持续发展具有重要的理论和实践意义。

本书以中国北方裂隙岩溶分布区地下水为研究对象,全书分为四篇,共 13 章。第一篇中国北方型裂隙岩溶水概论,包括绪论在内,共 3 章。综合论述了中国北方型裂隙岩溶水模拟及水环境质量评价现状、研究进展以及发展方向,概括了裂隙岩溶水特点、中国北方型裂隙岩溶的划分及其水环境动力系统特征,讨论了中国北方型裂隙岩溶介质优势结构面控水特征及机理。第二篇裂隙岩溶介质地下水流模型及数值方法,共 3 章。概括介绍了地下水运动的数学模型及数值模拟过程,着重讨论了裂隙岩溶介质地下水流模拟以及常用的主要的数值计算方法,其中对 MODFLOW 应用软件以及等参有限元方法进行了重点介绍。第三篇中国北方型裂隙岩溶水三维数值模拟实例及相关问题研究,共 4 章。概括介绍了徐州市张集水源地概况、地质及水文地质条件,设计并完成了为数值计算而进行的大型群孔干扰抽水试验,进行了水源地裂隙岩溶水流三维数值模拟及地下水资源评价,并讨论了与地下水流数值模拟相关的诸如大气降水量的预报、地下水蒸发量的计算标准等问题。第四篇地下水环境质量评价,共 3 章。概括介绍了地下水环境质量评价,阐述了地下水环境质量评价尤其是地下水水质评价模型的基本理论和方法,并将 Fuzzy-Grey 模型应用于张集水源地地下水水质评价。全书注重应用理论研究,紧紧围绕水源短缺、水污染加剧、水环境恶化这一当今世界所面临的普遍问题,注意反映国内外研究进展和成果,使得确定性模型与随机模型结合,并具有强烈的多学科特点。

本书以裂隙岩溶水运动研究为主线,综合了作者近十年来在该领域的主要研究成果。本书主体来自于作者参与完成的国家自然科学基金《淄博市裂隙岩溶水中污染物运移机制和污染控制》以及作者负责完成的该国家自然科学基金现场部分课题《徐州市张集水源地裂隙岩溶

水资源评价》，一部分来自于作者负责完成的河南省自然科学基金《分散利用条件下地下水最佳调节机制》以及作者参与完成的原煤炭部煤炭年度攻关项目《基岩矿坑突水条件及突水量》、煤炭科学基金项目《基岩水壁间运动理论研究》、煤炭科学基金项目《网络系统基岩水运动》和中国科学院地质与地球物理研究所《北京地区区域岩溶地下水资源研究与开发利用工程预研究》项目等。除此之外，本书还吸收了裂隙岩溶水环境质量评价方面的研究成果。

本书第一篇、第二篇第4、5章以及第三篇由钱家忠编著，第二篇第6章、第四篇第11章、第12章由汪家权编著，第四篇第13章由汪家权、钱家忠编著。

在本书的成果研究过程中，曾得到朱学愚教授、孙峰根教授的悉心指导，作者不胜感激！

在课题完成阶段，得到过张寿全研究员和吴剑锋、周志芳、徐绍辉、周念清、刘建立等博士的热情帮助；在实验过程中，曾得到潘国营、王心义、罗绍河以及赵卫东等老师的大力相助；在水环境质量模拟过程中，曾得到胡照安同学的帮助；另外，胡昌林先生、董洪信先生为本书提供了大量的现场资料；刘咏女士为本书绘制了部分图件，并做了大量的文字处理工作，在此一并表示感谢！

本书内容涉及领域广泛，所研究的问题是世界的具有挑战性的课题，一些论点尚不够成熟或尚未定论，限于作者水平，书中难免有不当之处，敬请广大读者批评和指正！

作 者

2002年12月于合肥

目 录

第一篇 中国北方型裂隙岩溶水概论

第1章 绪 论	(3)
1.1 研究意义	(3)
1.2 裂隙岩溶水流模拟及其水环境质量评价进展	(3)
1.3 裂隙岩溶水流模拟及其水环境质量评价研究动向	(10)
参考文献	(12)
第2章 裂隙岩溶水及其特征	(16)
2.1 裂隙水及其特点	(16)
2.2 岩溶水及其特点	(19)
2.3 中国北方型裂隙岩溶的划分	(24)
2.4 中国北方型裂隙岩溶水环境动力系统特征	(25)
第3章 中国北方裂隙岩溶介质优势面控水特征	(28)
3.1 优势面的控水机理	(28)
3.2 优势断裂控水分析	(29)
3.3 优势参数确定及应用	(31)
3.4 本章主要结论	(34)
参考文献	(35)

第二篇 裂隙岩溶介质地下水流模型及数值方法

第4章 地下水运动的数学模型及数值模拟过程	(39)
4.1 数学模型的概念	(39)
4.2 地下水流动系统的数值模拟过程	(41)
第5章 裂隙岩溶介质地下水流模拟模型	(44)
5.1 裂隙岩溶水流模拟模型概述	(44)
5.2 裂隙岩溶水流小尺度模拟模型	(44)
5.3 裂隙岩溶水流大尺度数值模拟模型	(64)
第6章 裂隙岩溶水流模型求解的数值法	(81)
6.1 概 述	(81)
6.2 有限差分法及 MODFLOW 模型	(82)
6.3 有限单元法	(96)
参考文献	(118)

第三篇 中国北方型裂隙岩溶水三维数值模拟实例及相关问题研究

第7章 张集水源地概况、地质及水文地质条件	(123)
7.1 绪 言	(123)
7.2 自然地理概况	(128)
7.3 水文地质条件分析	(136)
第8章 群孔抽水试验	(150)
8.1 群孔抽水试验的场地布置和试验概况	(150)
8.2 抽水试验资料的整理与综合分析	(151)
8.3 群孔抽水试验评述	(156)
第9章 张集水源地地下水流数值模拟及地下水资源评价	(156)
9.1 水文地质概念模型	(156)
9.2 计算区剖分及坐标系的选取	(158)
9.3 数学模型及数值方法	(159)
9.4 数值模拟及模型校正	(161)
9.5 模型预报及地下水资源评价	(173)
9.6 地下水资源的开发利用和保护	(192)
第10章 与地下水流数值模拟相关的问题研究	(201)
10.1 地下水资源评价中降水量的时间序列—马尔可夫预报模型	(201)
10.2 与潜水蒸发相关的问题研究	(207)
参考文献	(213)

第四篇 地下水环境质量评价

第11章 地下水环境质量评价	(217)
11.1 概 述	(217)
11.2 地下水环境影响评价	(222)
11.3 地下水污染防治	(227)
第12章 地下水质量评价	(229)
12.1 地下水质量评价的原则和要求	(229)
12.2 地下水质量评价因子和评价标准	(230)
12.3 地下水水质评价方法	(231)
第13章 地下水水环境质量评价应用举例	(235)
13.1 张集水源地地下水水化学特征及其影响因素	(235)
13.2 裂隙岩溶水质量评价	(240)
13.3 Fuzzy-Grey 模型在张集水源地地下水水质评价中的应用	(242)
参考文献	(257)

第一篇

中国北方型裂隙岩溶水概论

中国水资源问题相当严重,北方尤为突出。在中国北方地区,人均水资源的占有量不足全国平均水平的 $1/4$,在需水季节往往河流干枯,因此地下水成为生活用水和工业用水以及农业用水的重要水源。然而由于对地下水资源缺乏正确评价及科学规划,盲目开采,产生了一系列诸如区域地下水位下降、水质恶化、地面沉降、海水入侵等环境问题。这些问题不仅使国家财产遭受巨大损失,而且严重影响、制约国民经济及城市进一步发展(卜昌森等, 2001; 王先甲等, 2001; Zhou Nianqing et al., 2000)。因此,研究中国北方型裂隙岩溶水运动规律并对其进行正确评价和科学管理,从而实现水资源可持续开发利用等,意义重大。

在本篇中,将重点阐述裂隙岩溶水的一般特点、中国北方型裂隙岩溶水的划分及其特征、中国北方型裂隙岩溶水环境动力系统特征等,并探讨裂隙岩溶介质优势结构面控水特征以及优势参数的确定及应用。

第1章 绪 论

1.1 研究意义

水资源紧缺、水污染加剧、水环境恶化是一个全球性的问题,国际水文计划(IHP—5)把“脆弱环境的水文学与水资源开发”列为1996~2001年的主要研究课题,其中重要的一个专题即为“地下水资源的未来危机”^[1]。近年来,随着人类对地下水需求量的急剧增加、规模与深度不断扩大的各种地下工程(如采矿)的剧增以及世界各国对放射性核废料进行地质处置的倍加关注,裂隙岩溶介质中地下水流和污染物运移数值模拟已经成为水文地质学的一个极受重视的领域^[2~8]。我国水资源问题也相当严重,北方尤为突出。据统计:全国可以恢复更新的多年淡水资源量仅28124亿 m^3 ,按1990年统计人均水资源量为 2427m^3 ,约为世界人均水资源量的1/4,按世界148个国家的人均水资源量排序,我国名列第109位。在国内,水资源的时空分布很不平衡,在北方的黄、淮、海流域,人均水资源量大大低于全国的平均水平,不足 1000m^3 ,而且水资源的时间分布很不平衡,在春、夏的需水季节,河流经常断流、干枯。

在中国北方岩溶水资源分布区,地下水成为重要的供水水源。北方的许多城市和乡村利用裂隙岩溶水作为工、农业生产和人们生活的供水水源。如济南、太原、焦作、徐州、淄博、枣庄等大中城市主要利用裂隙岩溶水作为供水水源。然而由于不合理地开采地下水资源,致使水资源日益紧缺,加剧了城市水资源需求和不足的矛盾,同时产生了一系列的水资源、水环境地质问题,严重制约了该区的经济发展和城市建设,阻碍人们生活水平的提高,甚至威胁人们的身体健康,乃至生命。许多国家的近代发展历史经验证明,水资源环境问题往往是直接控制影响一个地区水资源环境和经济社会发展系统的核心问题。因此开展中国北方型裂隙岩溶水模拟及地下水环境质量评价研究对这一类地下水资源的可持续开发、利用和保护,确保区域经济社会可持续发展具有重要的理论和实践意义。

1.2 裂隙岩溶水流模拟及其水环境质量评价进展

1.2.1 裂隙岩溶水流模拟进展

由于裂隙岩溶介质的复杂性和时空变异性,其地下水流模拟模型种类多,差异大。时空尺度不同,其裂隙岩溶水流模型的逼真程度是不同的。根据Bear等^[9]以及Diodato^[10]对裂隙岩体地下水中溶质运移问题时空尺度的划分,可将裂隙岩溶介质中水流模拟的模型,按其对于现实世界逼近的程度(亦即待研究问题的空间和时间的规模大小)分为:(1)The very near field:即非常小的空间研究尺度,水流可以发生在单个的裂隙中,裂隙与多孔介质的水量交换也可以发

生,这时常常采用显式的不连续裂隙模型来进行研究;(2)The near field:比较小的空间尺度,水流在裂隙发育的多孔介质中运动,每个裂隙均详细描述,通常使用不连续裂隙网络模型进行研究;(3)The far-field:水流在两个相互重叠的且具有水量以及溶质交换的连续体中运动(如双重连续体模型即双重孔隙度或双重渗透性模型)。近年来还出现了采用三重孔隙度模型进行运移研究的报道^[11];(4)The very far field:水流和溶质运移过程发生在平均意义上的单一的连续体中,可以使用单一的等价多孔介质(Equivalent Porous Media, EPM)模型来研究。这四种模型已经在裂隙岩溶含水层地下水流模拟、溶质运移研究、水污染过程研究以及示踪剂试验等方面得到了较多的应用。

上述四种分区是非严格的、经验意义上的。为了将实验室规模和现场宏观规模区分开来,我们将前两种模型合称为小尺度模拟模型,而把后两种模型称为大尺度模拟模型。下面分别综述:

一、小尺度模拟模型研究进展

小尺度模型主要是从裂隙的几何特征以及水力学特征等方面研究实验室规模以及比较小的现场规模条件下裂隙岩溶介质地下水流问题。这类模型涉及理论研究、实验室研究以及少量小尺度现场研究。

从物理模型来看,基岩裂隙水流及溶质运移实验模型的建立难度较大,关键在于物理模型如何与介质实体相匹配。这是基岩裂隙水流及溶质运移实验室模型在文献中很少见到的一个重要原因。从理论研究来看,多数裂隙岩溶水流模型的理论基础是 Darcy 定律。早在 1951 年,前苏联学者罗米捷就开始了由光滑平行板组成的单个裂隙水流运动的试验研究,根据大量的试验成果分析,得出单个裂隙水流运动的立方定律(与 Darcy 定律一致)。然而 Tsang(1987)认为由于裂隙张开度的变化及岩桥的存在,裂隙流出现沟槽流(Channeling)现象,立方定律不成立。随后许多研究表明以光滑平行板为代表的传统实验模型不足以反映裂隙介质的实际特征^[12],这些研究的结果导致了对概念模型的重视^[13]。德国斯图加特大学从 1995 年开始建立了开放型国家水环境模拟控制实验室,其中有一个 VEGAS 大型实验室模型^[14-15],模拟地下水流运动。

国内对裂隙介质地下水运动有过一些实验室研究。田开铭等^[16]、速保玉等^[17]都曾从水力学角度对裂隙水流进行过有益探讨。孙峰根等^[18-19]、罗绍河等^[20]、钱家忠等^[21-25]通过实验研究,提出了基岩裂隙水壁间运动模型,证实了试验条件下基岩裂隙水 non-Darcy 流性质。

综上所述,目前国内外对于基岩裂隙介质中地下水流问题的前沿研究,无论是理论方面还是应用方面都存在不少问题,需要进一步研究。

二、大尺度模拟模型研究进展

大尺度模拟模型包括裂隙岩溶水流双重介质或三重介质模型以及对整个现场研究区进行平均意义上的等效孔隙介质渗流模型。这类模型均以 Darcy 定律为基础,采用渗流理论来模拟裂隙岩溶水流问题。这类模型主要涉及现场应用研究以及应用基础理论研究。这类模型研究的主要目的就是进行地下水资源准确评价。

地下水资源准确评价是其科学管理的前提。地下水资源评价(groundwater resource evaluation)就是“对某系统地下水资源的数量、质量、时空分布特征和开发利用条件作出科学、全面的分析和估计”^[26]。通常地下水资源评价都是指地下水资源允许开采量的评价。

地下水资源评价方法最初主要集中于解析法、水均衡法等。随着计算机技术的迅猛发展,

地下水资源评价多采用数值方法(numerical method)。数值法于20世纪70年代被引入水文地质计算,80年代以来已被广泛应用于计算模拟各类与地下水运动有关的问题,是地下水资源评价、荷载分析以及水质预测中行之有效的计算方法之一。数值法在模拟地下水离散模型、连续性模型、混合模型和耦合模型方面具有无法替代的优越性。同时数值方法在应用过程中也得到了不断发展:从最初的有限差分法(FDM)和有限单元法(FEM),发展到后来的有限差分法(FDM)、有限单元法(FEM)、边界单元法(BEM)和有限分析法(FAM)等多种方法并存。每一种数值方法本身在解决具体问题的过程中也不断地被发展和完善,例如从有限单元法中派生出的混合有限元法(HFEM)、特征有限元法(CFEM)以及随机有限元法(SFEM)等等。然而,尽管数值计算方法本身在不断地发展和完善,但在用于解决具体问题时,往往会出现“预测不准”的问题,致使许多工程人员一度对模型“拟合”产生怀疑,进而牵涉到数值法本身。对此类问题,《水文地质工程地质》期刊曾连续进行了十期讨论,引起了国内同行们很大兴趣和反响^[27]。另外,Anderson和Wessenser[1992]以及我国学者薛禹群等[1999]均认为:“预测不准”并不在于模型本身,而在于模型者对水文地质概念模型概化与实际的水文地质条件不符^[28]。由于自然界中地质体通常为非均质的,其特征随空间而随机变化,其复杂程度至少现今为止无法用数学语言全面描述。因此,如何建立正确的水文地质概念模型,仍是地下水流模拟中重要的研究课题之一。

若要对某系统的地下水进行资源评价,在对其水文地质条件进行必要概化的基础上,还必须建立能够准确(或近似准确)描述该系统水流运动特征的数学模型,然后求解。描述地下水运动特征的数学模型包括确定性模型(deterministic model)和随机模型(stochastic model)。确定性模型的发展日臻成熟,其应用最为广泛。由于岩体介质的非均质性及复杂性,使得建立在所谓典型单元体(representative element volume,简称:REV)之上的经典确定性模型难以描述一些变量的随机变化过程,如降水量的预测、污染物在复杂介质中运移过程等。利用确定性模型,特别是在溶质运移方面,其计算结果往往出现较大的数值弥散或数值振荡^[29]。因此,近二、三十年来,随机演化理论被迅速应用于地下水资源评价与管理研究领域。特别是在地下水污染物质运移方面,已取得了一批具有突破性的成果。随机理论在地下水污染物运移中的研究成果改变了人们对化学物质在地下水中运移、弥散的传统认识。由于其切合实际需要,因而发展迅速,成为近年来地下水运移模型研究中的热点问题。而在我国,无论是非均质性研究,还是随机理论的应用与相应方程的建立,基本上都还是空白。从总体上看,国外在随机方面的研究尽管进展很快,但目前仍然处于理论研究阶段,用于解决实际问题的、特别是成功解决的还很少。一个主要问题是模拟结果与实际结果相差比较大。

需要强调的是:随机模型的研究成为热点并不意味着可以不重视确定性模型的研究。两者应该是统一的,相辅相成,相得益彰[薛禹群等,1999]。一个有经验的水文地质工作者并不会把前者得到的结果视为“惟一不变”的确定答案,而是同后者一样,以概率论的观点来对待这一结果^[30]。随着应用数学的发展,Neuman[1990]^[31]利用分形几何(fractal geometry)对地质介质中渗透系数的分维D进行了研究。吴剑锋等[2000]^[32]在岩溶裂隙水评价与管理模型中植入时间序列方法(time series method)模型用来预测降水量,从而实现了随机模型与确定性模型的有机结合。

利用数值方法进行地下水资源评价通常分两个阶段进行。第一个阶段为解逆问题(inverse problem),即根据抽水试验或实际开采的流量和水位资料,进行数值计算,求出水文地质

参数,验证数学模型。第二个阶段为解正问题(forward problem),利用逆问题求得的参数,进行不同开采方案的对比和预报。

模型参数识别(parameter identification)也即解逆问题。该问题一直是地下水资源评价数值模拟中一个尚未很好解决的问题,历史上曾经历过突破性的发展阶段(20世纪60年代末到80年代初),随后长期进展不大,但它却是模拟中的一个重要问题。

逆问题通常是不适定的(ill-posed)。不适定特征在于待估参数的非惟一性(nonuniqueness)和不稳定性(instability)。其中不稳定性表现为:水头的微小差别将引起所求参数的巨大误差^[33]。这一特征决定了逆问题求解的复杂性。Neuman[1973]最先把逆问题的求解技术分为直接法和间接法两种。由于直接法的不稳定性和对实测数据要求过高,而间接法比较稳定,尽管其占用机时较多,比较而言,后者较实用。20世纪70年代以来,随着电子计算机技术以及应用数学的发展,许多学者把运筹学中最优化技术植入逆问题求解模型之中,诸如梯度法、线性规划、二次规划、Gauss—Newton法、Newton—Raphson方法以及共轭梯度法等等。总之,从20世纪60年代末到80年代初,应用数学方法被广泛植入参数识别模型之中,使得反求参数模型迅速发展,取得了一系列研究成果。此后,参数识别和估计长期进展不大,其主要原因在于:所建的数学模型难以反映实际条件,往往所求得的参数与现场实际相差甚远,这是由现场水文地质条件的非均质性决定的。另外,由于超前于实际应用,理论研究往往得不到普遍的现场反馈信息,反过来也影响了理论研究的进一步发展。许多学者因参数识别问题研究难度大而转移研究方向;再者,应用数学的研究也需要一个过程。因此,80年代中、后期以来,部分学者对原有运筹学算法进行了改进并应用于地下水模拟模型中。如为了处理特大型矩阵的计算问题,人们采用共轭梯度法并发展了多种预处理技术。但是,有关预处理技术的作用机理目前尚在研究中^[34]。

在模型的实际应用中,Yeh[1986]将参数识别概括为两种方法:分区法(zonation method)和插值法(interpolation method)。分区法较为简单实用,在我国广为应用^[35-36]。插值法要求资料丰富,而且计算量较大。Clifton等[1982]首先将Kriging方法运用于南亚利桑那州的Avra Valley含水层的模拟^[37];陈余道[1998]也运用Kriging插值方法成功地模拟了齐鲁石化地区裂隙岩溶含水层中地下水流的运动。需要说明一点:尽管分区法和插值法在实际应用中在某些地区均取得过满意的结果,但这两种方法都仍存在需要进一步解决的问题:即分区法中如何确定最优区间的形状问题以及插值法在插值过程中如何确定最优节点位置的问题。这些问题在强烈非均质介质中尤为突出。近年来,国外一些学者对水力传导率K的尺度效应(scale effect)问题的研究,有了突破性的进展。

尺度效应最初是在研究溶质运移参数弥散度过程中发现的现象,其实验室测定值常常比野外实测值小几个数量级。Wheatcraft和Tyler[1988]首次利用分形几何学理论对非均质介质中弥散度进行了解释^[38]。Carrera[1993]和Schulze—Makuch和Cherkauer[1997]都认为径向弥散度与水力传导率具有内在联系。水力传导率K,也称渗透系数,其具有尺度效应是近十年来继弥散度之后部分学者通过实际测定提出的^[39-40]。Carrea[1993]认为其尺度效应直接或间接由介质的非均质性引起的,这是目前的一种普遍观点。

关于水力传导率存在尺度效应问题,已被不少学者在不同介质中先后得到证实。Herzon和Morse[1984]及Bradbury和Muldoon[1990]各自独立地测出了未固结沉积物中水力传导率随测量尺度大小而变化;Clause[1992]发现不同花岗岩中的水力传导率随尺度变化可相差几

个数量级,但被试验的岩体体积达到上限后,水力传导率保持为一个常数;在同一年,Sauter 在德国西南石灰岩含水层中得出:从实验室到区域含水层范围没有发现水力传导率变化的体积上限结论;1993年,Hanor 在 Louisiana 的一个废物场的泥层中通过均衡计算得出其水力传导率在4个数量级范围^[41]。1994年 Neuman 进一步研究了水平水力传导率与测量尺度间的关系,认为对于各种不同的地质介质,二者的关系为一简单的指数关系^[42]。然而 Rovey[1994]和 Schulze - Makuch[1996]各自研究了不同地质单元的尺度行为,发现水力传导率 K 与被测范围的尺度关系依赖于介质性质,不能一概而论为一简单的指数关系^[43];Schulze - Makuch 还发现在 Wisconsin 西南的碳酸盐含水层中,对孔隙介质含水层,水力传导率 K 值随测量尺度增加的双对数指数约为0.5,而当所测介质中含有裂隙时,指数增加,对大部分碳酸盐岩相,存在一个体积上限,超过这一限度, K 值为常数。

水力传导率尺度效应的存在性已被上述研究结果所证实,那么对其发生尺度效应的机理认识仍存在很大分歧。Butler 和 Healey[1998]不同意上述提及的水力传导率的尺度变化依赖于各向异性介质的观点,并提出上述现象是由于不同的测量方法引起的^[44]。然而在同一年,Schulze - Makuch 和 Cherkauer[1998]在一个被给定的地质单元内进行实测,无论是用一种方法,还是用多种测量方法,所得到的尺度变化指数值是相同的,从而证实了水力传导率 K 尺度变化对介质的依赖性^[45]。1999年 Dirk Schulze - Makuch 等人对上述问题的研究又进了一步。他们分析了各种类型的沉积物和岩体,从实验室范围到区域性现场,系统地研究了水力传导率与测量范围尺度的关系,得出以下结论:对于均质介质,如石英砂,其水力传导率 K 值为常数;而对于非均值介质,水力传导率 K 与被测介质的体积 V 满足以下关系: $K = C(V)^m$,其中 C 为特征参数,表征介质特征;孔隙介质中与平均孔隙大小及孔隙连通度有关,裂隙介质中与裂隙的开启度有关, m 为指数,其取值范围为0.5~1^[46]。

以上为近十年来关于水力传导率 K 的尺度效应研究状况。目前国内尚未见到有这方面的研究报道。关于水力传导率 K 尺度效应的机理目前尚不清楚,多数学者认为它是由介质的非均质性引起的。上述成果都是在一些特定地区研究得出的,它们是否具有普遍应用价值?有待于进一步研究。

由于地下水流运动方程的推导是以水流服从 Darcy 定律为前提的,而 Darcy 定律又是在多孔介质(porous media)中的实验定律,因此,早期用数值法进行地下水资源评价仅限于孔隙介质中。随着水文地质学科的发展以及生产实践的需要,薛禹群等[1984]提出了用岩体双重介质渗流模型和有限元方法预测了矿坑涌水量^[47];谢春红等[1988]亦采用有限元方法对徐州市某水源地进行了裂隙岩溶水资源评价^[48];吴剑锋等[2000]则采用有限元方法对整个徐州市裂隙岩溶水资源进行了评价^[49]。同时张凤歧等[1990]、赵永贵[1990]、朱远峰[1993]、王国利等[1999]、朱学愚等[1994,1997]、陈鸿汉等[2001]等认为:我国北方裂隙岩溶水地区,虽然溶蚀裂隙发育(特别)不均,但地下水流具有统一的地下水面,水流运动基本服从 Darcy 定律,可以近似地运用裂隙流多孔介质理论模型(porous media model for fracture flow)或双重裂隙介质模型(double porosity media model for fracture flow)对其进行资源评价^[50-56]。

实际上,人们遇到的实际问题多数是三维流问题,例如海水入侵、开采井附近地下水运动、矿坑涌水、含水层之间的水力联系、强烈非均质介质中裂隙岩溶水运动等。若把它们简化为二维流就不能反映出问题的本质[薛禹群,1980;孙訥正,1981]^[57-58]。但是由于三维流问题的解决需要输入数据非常多,计算工作量又非常大,因此三维流问题的解决较之一、二维问题来

说要更为复杂。由于将研究对象近似处理为二维流问题可大大节省勘探费用[陈崇希, 1990]^[59], 所以实际工作中应用较多。这些也正是三维流数学模型不能被普及的主要原因之一。

早在 20 世纪七、八十年代, 三维有限元数值模拟在美国曾有过一些成功的计算实例[Pinder, 1972; Gupta, et al, 1984]^[60-61], 但自 80 年代后期以来, 在文献中一般很少见到有关三维有限元数值模拟水量模型。主要原因除三维流模型花费大, 其占用机时多以外, 还与多数生产部门重效益, 而轻基础资料的监测、收集的现实有关。另外, 建立三维有限元数学模型需要的数学知识较深。这一技能在工程技术人员中推广应用也会受到限制。值得一提的是美国地质调查所的麦克唐纳(M. G. McDonald)和哈鲍夫(A. W. Harbaugh)在 1998 年推出的 MODFLOW 软件(三维有限差分方法), 由于通用性强、简单、实用, 成为世界上应用最多的地下水软件。随着 MODFLOW 模型的进一步推广, 目前在我国也有了成功应用的实例[周念清等, 2000; 刘建立, 2000]^[62-63]。但是 MODFLOW 作为一种通用软件, 其数据准备工作量十分烦琐。由于上述种种原因, 国内有关三维有限元模型的应用也不多, 而且多局限于孔隙含水层系统或小范围裂隙含水层系统。本书作者在徐州市张集水源地裂隙岩溶水分布区较大范围内建立了三维有限元数学模型。

模型参数识别采用试估——校正法。为了使参数分区更加科学, 使之逼近于客观实际, 本书将优势流(preferential flow)概念推广到裂隙岩溶介质, 将优势结构面控水分析与地质分析结合起来, 对渗透系数参数分区进行优化。

近些年来, 优势流已成为欧、美等国相关水、环境和土壤物理等领域的研究热点之一[Eric K. Webb, 1996; 徐绍辉等, 1999]^[64-65]。优势流一般是对土壤水运动而言, 它是指土壤在整个入流边界上接受补给, 但水分和溶质绕过土壤基质, 只通过少部分土壤体快速运移。尽管优势流产生的机理尚未完全明晰[Coen J. Ritsema et al, 1993]^[66], 但已取得不少具有突破性的成果。人们已认明土壤优势流的产生与土壤中存在的裂隙、大空隙、土壤非均质性等因素有关。在我国北方广大裂隙岩溶分布区, 无论是水源地开采, 还是矿井生产实践, 大量的事实表明裂隙岩溶介质具有强烈的非均质性和各向异性, 岩溶地下水沿着强径流带运动[Zhu et al, 2000]^[67], 表现出类似土壤优势流的特性。广义上, 这种集中迳流也可称为优势流。这种优势流与地质结构面密切相关。沿优势结构面一般形成优势参数(如导水系数)。长期以来, 参数的最优分区是非均质介质中地下水流数值模拟一个重要而又尚未得到很好解决的问题[Yeh et al, 1986]。因此, 研究优势结构面控水机制, 对优势参数分区具有指导意义。

优势面分析原理及方法是由罗国煜教授提出, 并成功地应用于工程勘察实践^[68-71]。优势面的控水问题实际上就是赋存地下水介质中的优势流问题。田开铭等[1989]提出的裂隙水偏流; 孙峰根、罗绍河等[1996, 1998]提出的基岩水做选择流动, 其实质也是指基岩裂隙介质中的优势流问题, 但它们缺乏现场实践检验。Gennady Margloin 等[1998]^[72]通过室内和野外实验证明了裂隙网络中地下水运动存在强的优势流。本书将根据中国北方岩溶区地质、水文地质资料, 分析优势结构面控水机制, 进行优势参数分区, 从而进一步确定优势参数。

地下水资源评价模型的一个重要输入项是大气降水。我们知道, 地下水归根结底还是来源于大气降水, 因此, 利用经过反演的模型来进行正演时, 补给区的大气降水将是影响地下水资源允许开采量的最主要因素。大气降水是自然界水循环的一个重要环节。当前, 土壤学家及农田水利工作者所研究的“四水转化”以及水文地质工作者所研究的“三水转化”, 其中重要

内容均涉及到大气降水。在地下水资源评价中,对一个地下水系统而言,其所获得的补给量大小归根结底来自于大气降水的多寡及其分配状况。因此未来大气降水量的组合直接影响到地下水资源的评价结果。以前人们多采用不同经验频率组合的降水量对地下水量进行预报,这样往往太过保守,结果无益于水资源的科学管理。

如果能够准确地预报未来开采条件下补给区的大气降水量,那么就可以使模型预报结果更为合理可信。近二、三十年来,时间序列分析(time series analysis)在理论与应用方面都得到了蓬勃发展,已成为概率统计学中一个内容十分丰富的重要分支。它在工程、气象、水文、地震、生物医学、经济管理以及军事科学等许多领域均得到了广泛的应用。例如:戴爱德等[1988]利用一种分段线性的非线性时间序列模型——门限自回归模型(threshold autoregressive model)在桂林岩溶试验场很好地预测了岩溶泉水的流量^[73];司进峰[1996]用时间序列模型对黑旺铁矿进行了涌水量预测。吴剑锋[1999]在徐州市地下水资源评价管理课题研究中曾采用一维非平稳时间序列分析方法建立降水量的时间序列模型,模型的总体精度虽然较好,但在降水量峰值处,预测误差较大。“马尔可夫性”是由俄国数学家 A. A. Markov 在 1906 年最早提出,经过几十年的发展,Markov 过程已成为随机过程的一个重要分支。该方法利用变量的概率状态转移矩阵可预报变幅较大的随机波动,它在生物学、物理学、天文学与天体物理学、水文学、运筹学等许多领域中已有广泛的应用^[74]。另外,Markov 模型还可以与其他预测模型有机结合,以提高对随机变量的预报精度。董胜等[1999]将 Markov 模型与灰色预测模型结合起来用于水文预报,提出了年极值水位的灰色马尔可夫预报模型^[75];钱家忠等[2000]提出了矿坑降水量的灰色——马尔可夫预报模型,并取得了较为理想的预测结果^[76]。为了提高时间序列模型在降雨峰值处的预报精度、增强模型对随机波动性较大数列的预测能力,本书提出了基于时间序列分析的大气降水量的马尔可夫预报模型^[77]。

地下水资源评价模型还需考虑的一个重要输出项是蒸发量。在以往地下水资源评价模型中,对蒸发项的一般处理办法是:当研究区为基岩含水层时,由于地下水埋藏较深,可以不考虑蒸发量;当研究区为松散孔隙含水层时,一般根据潜水平埋深来决定蒸发量大小,至于埋深的标准问题,不同作者有不同的做法,目前尚无统一的要求。

近年来,随着工农业生产对水资源需求量的增加,加之全球性气候的变暖、干旱的加剧,我国北方平原区水资源问题相当严重:一方面水资源总量不足,因过量抽取深层地下水,不少地区已出现多年降落漏斗,产生了一系列环境地质问题;另一方面水资源调配不当,不合理的灌溉格局致使一些地区潜水水位被抬高,甚至出现地表沼泽化。由于地下水位埋藏较浅,潜水因蒸发而白白流失,数量十分巨大,同时产生土壤表面盐渍化现象[吴剑锋,1998]^[78]。然而在目前水资源研究的指导思想以及所采取的主要措施中往往忽略了减少地面蒸发[曹全意,1998]^[79]。如果能够截获这部分蒸发损失量,不仅可以增加有效水资源量、缓解业已存在的水资源危机,而且可以防治一系列环境问题。要截获这部分水量,需要研究减少潜水蒸发量的最佳潜水埋深问题。关于这一问题的研究,目前还存在分歧,不同作者有不同的看法,甚至有人认为根本不存在潜水蒸发极限深度[朱学愚等,1987]。而在实际应用中差别也很大,如关于潜水蒸发极限深度的标准问题,我国黄淮海平原经验证明:“把地下水位控制在一个合理深度(4米左右),有利于减少蒸发和土壤返盐。”^[80]而康绍忠等[1990]认为:“在西北干旱缺水条件下,地下水埋深在 3m 以下,其补给土壤的量可忽略不计。”^[81]

基于前人研究成果及存在问题,本书根据裸地潜水蒸发通量与潜水埋深及负压水头关系

实验研究了潜水减蒸增源最佳水位埋藏深度。

从上述有关地下水资源评价诸多内容的研究进展可见:地下水资源评价是一个巨大的系统工程。该项工程中还有许多方面存在问题,尚需进一步改进。只有在实践中不断地完善预报模型,才能做到对地下水资源进行准确评价,从而使地下水资源得以科学地开发和利用,以确保人民生活水平提高和工农业生产持续发展的需要。这一点对于主要依赖地下水资源的中国北方广大地区,尤其是对于位于该地区的大中城市的发展尤为重要。因此,加强中国北方地区地下水资源评价的数值模拟和研究,不仅具有理论意义,而且还具有重要的实践价值。

1.2.2 地下水水环境质量评价进展

地下水环境质量评价是区域环境质量评价的一项重要内容,也是对地下水资源进行合理开采及科学管理工作的有机组成部分。在掌握地下水的分布、形成及运动规律的基础上,对地下水环境质量作深入的调查研究,进行综合评价,掌握地下水的水质状况,指出其主要污染物、污染程度及变化趋势,可以为水资源的开发利用及保护提供决策依据。

地下水质量评价是地下水环境评价的重要组成部分。目前的地下水水质评价方法很多,概括起来主要有两大类。一类为给定临界数据的判定法,另一类为函数法。对此,本书将重点阐述。给定临界数据的判定法^[82]是根据指定的水质标准,将监测值直接与之进行比较分析或以指数或分值形式来表示污染程度及水质等级。这类方法比较多,目前广泛采用的有以下几种:数理统计法、综合评分法^[83]、内梅罗污染指数法^[84]等。函数法通过函数关系把环境指标的监测值转化为反映环境质量优劣的质量值。由于地下水水质分级标准具有模糊性与灰色性,模糊数学与灰色系统理论方法在地下水水质评价中得到了较为广泛的应用。这类方法主要有:模糊综合评判法^[85-89]、灰关联度评价法^[90-91]、灰色聚类法^[92-93]、人工神经网络识别技术^[94]、物元分析理论^[95]、灰色权距分析法^[96]、Fuzzy-Grey 决策方法^[97-99]等等。

裂隙岩溶水资源是我国广大北方地区主要的供水水源,而且常常是惟一的水源,因此其地下水环境质量评价是一项十分重要的工作。裂隙岩溶水环境质量评价刚刚起步,随着裂隙岩溶水资源的进一步开采,水环境问题不断突出,其水环境质量评价会逐渐被重视,评价模型和评价方法也会得到进一步发展。

1.3 裂隙岩溶水流模拟及其水环境质量评价研究动向

根据国内外有关裂隙岩溶水的研究动向,可以预计今后中国北方型裂隙岩溶水流及水环境质量评价的发展趋向可能有以下几个方面:

在裂隙岩溶地下水流动方面:

1. 介质的非均质性及由此而产生的参数的尺度效应研究。参数识别和估计长期进展不大,却是模拟中一个重要问题。介质的非均质性和复杂性是 21 世纪水文地质领域需要解决的科学难题之一[刘式达, 1998],而这些性质是通过水文地质参数反应的,因此与介质非均质性相关的参数尺度效应研究将会被重视。

2. 优势结构面控水机理及裂隙岩溶地下水优势流研究将会成为研究热点。

3. 基岩裂隙水运动理论研究以及裂隙岩溶介质中 Darcy 定律是否适用或者适用范围问题有待进一步研究。