

中国地质大学学术著作出版基金
“211工程”建设专项资金 资助
国家自然科学基金

滨海、海岛海水 入侵数值模拟研究

——以山东烟台市和广西涠洲岛为例

成建梅 李国敏 陈崇希 著

中国地质大学出版社

中国地质大学学术著作出版基金
“211工程”建设专项资金 资助
国家自然科学基金

滨海、海岛海水入侵数值模拟研究

——以山东烟台市和广西涠洲岛为例

成建梅 李国敏 陈崇希 著

中国地质大学出版社

内容简介

《滨海、海岛海水入侵数值模拟研究——以山东烟台市和广西涠洲岛为例》是海水入侵数值研究方面的一本专著。全书分两大部分，共七章。第一部分系统地介绍了滨海、海岛海水入侵数值模拟的理论与方法，包括数值模型与数值方法；第二部分分别以山东烟台夹河地区和广西涠洲岛海水入侵为例，介绍海水入侵模型的具体运用。本专著最大特点是在海水入侵数值模型上有多处创新，汇集了包括滨海海岸带及海岛的多个海水入侵应用实例；专著密切联系实际，为地下水合理开采与海水入侵防治提供了科学依据。

本专著是在总结和分析国内外最新科研成果的基础上，结合作者在海水入侵课题研究所涉及的理论、方法，并结合具体海水入侵实例开展的理论模型与实际应用研究而取得的众多成果编写而成的。全书结构体系合理，论证严谨，内容充实，叙述清楚，深入浅出。

本书可供水文地质专业、水文学水资源专业和环境工程等专业的科技人员、研究生、教师阅读，也可供相近专业的研究人员和高等院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

滨海、海岛海水入侵数值模拟研究——以山东烟台市和广西涠洲岛为例/成建梅，李国敏，陈崇希著. —武汉：中国地质大学出版社，2004.3

ISBN 7-5625-1823-8

I. 滨…

II. ①成…②李…③陈…

III. 数值模拟-研究-滨海、海岛海水-入侵

IV. P64

滨海、海岛海水入侵数值模拟研究
——以山东烟台市和广西涠洲岛为例

成建梅 李国敏 陈崇希 著

责任编辑：贾晓青

责任校对：张咏梅

出版发行：中国地质大学出版社（武汉市洪山区鲁磨路388号）

邮编：430074

电话：(027)87483101

传真：87481537

E-mail: cbo @ cug. edu. cn

经 销：全国新华书店

开本：787毫米×1092毫米 1/16

字数：210千字 印张：8.25

版次：2004年3月第1版

印次：2004年3月第1次印刷

印刷：中国地质大学出版社印刷厂

印数：1—600册

ISBN 7-5625-1823-8/P·607

定价：20.00元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

滨海地区海水入侵研究具有重要的实际和理论意义。在全世界范围内,滨海地带经常是一些人口密度较高的地区。由于滨海地区经济的高速发展,对淡水资源的需求也愈来愈大,因而水资源短缺成为这个地区的普遍问题。

在天然条件下,滨海地区的地下淡水是向海泄流的,且咸淡水之间存在一个过渡带;咸淡水之间的动态平衡致使咸淡水过渡带始终保持在一个稳定的位置。但是,当人类不合理地开采地下淡水时,造成淡水向海渗流减弱甚至消失,陆区地下水向海的微弱或零对流项难以抵消海水向陆地的弥散项,因而进入淡水的盐分不能被带回海中,最终造成含水层中淡水变咸,导致一系列生态、环境的恶化问题,如水质恶化、土壤盐渍化及荒漠化等。目前,在世界范围内许多沿海地区的含水层均已经遭受了不同程度的海水入侵(Newport, 1977)。在美国东西岸已有至少 20 个大的滨海含水层因海水入侵而水质恶化,如佛罗里达州、墨西哥湾、夏威夷地区等。在荷兰、德国、以色列、日本、印度、泰国、马来西亚、西班牙等国家均发生了不同程度的海水入侵。海水入侵造成滨海地区环境区域性的严重破坏,给这些地区的人民生活和经济发展带来了极大的危害。在我国也有不少地区已发生了不同程度的海水入侵,如辽宁省的大连,河北省的秦皇岛和北戴河,山东省莱州、招远、龙口和烟台等地区。在华南沿海地区,广西北海以及附近的一些海岛也出现了海水入侵的苗头。目前我国发生海水入侵较为严重的是辽宁大连、山东莱州湾一带的龙口和山东的烟台等地区,而且海水入侵的势头仍在进一步加剧。由于海水倒灌,地下淡水咸化,开采井中水质恶化,特别是在集中开采区,水质恶化给这些地区带来了一系列环境问题。在山东莱州湾沿海地区,短短几年,海水入侵达 500 多平方公里,被称为“黄金海岸”的莱州湾,已受到海水入侵灾害的严重影响(郭强等, 1996)。在 1976 年初次发现此现象,侵染面积达 15.8 km^2 , 1982 年为 29.2 km^2 , 1984 年发展到 71.1 km^2 , 乃至 1990 年达 221.4 km^2 , 到目前海水入侵面积已发展到 627.3 km^2 , 已成为山东省重要的自然灾害区。海水入侵直接影响了该地区经济的向前发展,农业产量大幅度下降,工业产值年损失 3~4 亿元,累计工农业产值损失 50 亿元。海水入侵灾害并不限于直接经济损失,由于地下水被污染,人畜吃水困难,使当地发病率增高。据统计,在侵入区内患有甲状腺肿、氟斑牙、氟骨症、布氏菌病等多种地方病,患病人口达 45.1 万人。

海水入侵的普遍性,引起了全世界范围科学家的普遍关注。但是直到近 30 年,人们才意识到海水入侵的重要性,第一本有关滨海含水层海水入侵定量研究的书是 Todd (1958) 完成的,仅包含一个章节。美国地质调查局的供水报告(USGS)对海水入侵进行了早期的研究。最早的将海水入侵这一专题列为会议内容的是 Haifa 召开的 IAH 大会,而欧洲学者自 1968 年以来每两年召开一次海水入侵 SWIM 会议。联合国教科文组织(UNESCO)也积极关注滨海地区地下水资源的环境问题,为海水入侵研究的普及做出了重要的贡献(Custodio, 1987)。我国的海水入侵研究起步较晚,在 20 世纪 80 年代末期,鉴于海水入侵带来的

特殊危害，我国已开始重视开展这方面的工作。

滨海地区海水入侵是我国重要的水环境问题，为国内外研究者所关注。对海水入侵的形成、发展演化以及滨海地区地下水资源评价的研究，不仅具有理论意义，还具有实际意义。而地下水开采-海水入侵是地下水资源-环境（灾害）系统的三大问题之一，一直是水文地质学的热点；所涉及的主要手段——数值模拟技术也是水文地质学科发展的前沿，同时该问题也是本学科与国民经济发展的极其重要的结合点。但是目前国内尚未出版有系统的专著，多为论文集，国外也很少见海水入侵数值模拟研究方面的专著。本专著最大特点，是在海水入侵数值模型上有多处创新，汇集了包括滨海海岸带及海岛的多个海水入侵应用实例，在防治对策上提出新思路，具有学术上的意义；专著密切联系实际，为地下水合理开采与海水入侵防治提供了科学依据。

本专著在总结和分析国内外大量文献的基础上，针对海水入侵课题研究所涉及的理论、方法，结合山东烟台夹河地区和广西涠洲岛海水入侵实例，开展了理论模型与实际应用研究，得到了一些非常有意义的结论和认识。

本专著的出版得到了中国地质大学学术著作出版基金和“211工程”建设专项资金的资助。同时，国家自然科学基金青年基金项目“开采井中水位与水质的三维计算方法研究”（No. 40202024）也资助了部分出版资金，在此一并感谢。

专著中山东省烟台夹河地区海水入侵方面的研究工作得到了国家计划委员会“山东省烟台市海水入侵勘查及防治对策”项目基金的资助。参加此部分研究工作的主要人员有：成建梅（博士）、陈崇希（教授）、吉孟瑞（高工）和孙桂明（工程师）等人。在烟台海水入侵专项研究的野外工作和资料收集中还得到了山东省第三地质队工程勘察院领导和有关同志的大力支持，在此表示衷心的感谢！

专著中广西涠洲岛海水入侵方面的研究工作得到了国家教委博士点基金“华南海岛与滨海含水层系统源地及水环境模型”及广西地矿局重点科研项目“北部湾涠洲岛三维水质模型研究”基金的资助。参加此部分研究工作的主要人员有：李国敏（博士）、陈崇希（教授）、黎宗青（高工）、叶善士（高工）、王举平（高工）、蒋同根（高工）、杨敏（高工）、宁雪生（高工）等同志。感谢广西地矿公司领导及有关同志的大力协助，使野外工作及资料收集得以顺利完成。

另外，本项研究是在以往工作的基础上进行的，文中引用了前人的大量报告、文献内容，特别是有一些文献没有在参考文献中一一列出，在此笔者要衷心地感谢所有在本书所引用的出版的与未公开出版的文献的作者，感谢他们辛勤劳动的成果，为本专著研究提供了重要的参考价值。

笔者是在导师水文地质学家陈崇希教授的精心指导下完成了海水入侵的数值模拟研究。笔者取得的每一点进步和成果都倾注了导师的心血，体现了他的学术思想和智慧。导师治学严谨的学术作风和严密开阔的思维方式深深地影响了学生的整个学习过程，将对学生一生的学习和工作起到深远的影响，在陈崇希教授七十华诞之际，谨以此书代表学生向他致以崇高的敬意和衷心的感谢，并祝愿他永葆青春，再创佳绩！笔者还要感谢多年来默默关心和支持我的家人，是他们无私的奉献和支持使我勇往直前，追求科学真谛。在此祝他们健康，平安！

II

在本专著编写出版过程中，出版社印刷厂照排室的同志，以及黄丹红同学和胡进武同学做了大量的打字、绘图以及校对工作，特别是贾晓青编辑对本专著提出了许多宝贵意见，在此一并感谢。

由于理论水平有限，书中错误难免，不足之处敬请读者批评指正。联系地址：中国地质大学（武汉）环境学院水资源与水文地质系，430074。E-mail: jmcheng@cug.edu.cn

笔者

2003 年 7 月

目 录

第一篇 海水入侵数值模拟理论

第一章 海水入侵模拟研究现状	(1)
§ 1.1 海水入侵的动态监测指标研究	(1)
§ 1.2 海水入侵模拟的数学模型与数值方法	(3)
§ 1.3 滨海含水层的临海边界问题	(6)
§ 1.4 海水入侵防治对策研究	(7)
§ 1.5 结论与建议	(8)
第二章 海水入侵数学模型	(9)
§ 2.1 考虑密度变化的水流方程	(9)
§ 2.2 海水入侵溶质运移方程	(10)
§ 2.3 数学模型	(12)
第三章 基于四面体单元的海水入侵模型数值方法	(15)
§ 3.1 剖分与插值函数	(15)
§ 3.2 变密度水流方程数值方法	(16)
§ 3.3 饱和水流溶质运移问题自适应 ELM 解法	(22)
§ 3.4 自适应 ELM 法求解三维变密度海水入侵运移方程	(29)
§ 3.5 预处理共轭梯度法求解方程组	(34)
§ 3.6 程序设计与数值实例检验	(38)
第四章 基于六面体单元的海水入侵模型数值方法	(41)
§ 4.1 剖分与插值函数	(41)
§ 4.2 水流数值模型	(44)
§ 4.3 盐分运移数值模型	(48)

第二篇 应用部分

第五章 山东烟台夹河中下游地区海水入侵研究	(55)
§ 5.1 水文地质	(55)

§ 5.2 地下水开采与海水入侵·····	(62)
§ 5.3 夹河中下游地区海水入侵模拟研究·····	(70)
§ 5.4 模型预测·····	(91)
§ 5.5 本章小结·····	(96)
第六章 广西涠洲岛海水入侵数值模拟研究 ·····	(97)
§ 6.1 涠洲岛水文地质条件及海水入侵现状·····	(97)
§ 6.2 含水层参数值的初步界定 ·····	(101)
§ 6.3 局部模型的参数校正与分析 ·····	(106)
§ 6.4 全岛模拟研究 ·····	(112)
第七章 结 语 ·····	(118)
主要参考文献 ·····	(120)

第一篇 海水入侵数值模拟理论

第一章 海水入侵模拟研究现状

我国有着漫长的海岸线,总长度约 18 000km,还有众多的海岛,共约 5 000 多个。在广大的沿海地区分布着我国经济发展的大批重要城市和经济开发区,成为全国经济发展的龙头,制约着整个国民经济的发展。滨海地区地下水资源的不合理开采必将导致严重的后果,严重制约沿海地区的进一步发展。因此,进行海水入侵研究,合理地开发和利用地下水资源,避免或减轻海水入侵危害,有着十分重要的实际意义。特别是对于发展中的中国来说,海水入侵危害仅在部分滨海地区比较严重,绝大多数滨海地区刚开始有海水入侵的苗头,因此进行超前的以防止海水入侵为目的的海水入侵研究,意义重大。以下就海水入侵模拟研究涉及的各个方面做全面的总结,指出未来的发展方向,供同行参考。

§ 1.1 海水入侵的动态监测指标研究

海水入侵动态监测中采用的指标和方法直接影响了海水入侵及入侵程度评价的结果。海水入侵过程中,由于海水与包气带土壤,含水层介质以及淡水之间发生了各种复杂的物理、化学及生物作用,因而这种侵染过程引起了海水入侵区地下水及土壤中化学组分发生变化。目前海水入侵监测的重点往往仅限于监测地下水的水化学组分变化,而忽略了对土壤成分的监测研究。实际上,海水入侵作用改变了表层土壤的性质,给入侵区表层生态环境带来严重的后果,如土地荒芜、盐渍化。因此,建议在海水入侵监测时重视对表层土壤性质的监测。

1.1.1 化学指标

1. 单指标法

迄今的研究中,最常用的是 Cl^- ,它是海水中最主要的稳定常量元素而且测定方便。由于我国的饮用水标准规定氯化物含量不应超过 250mg/L,因此,多数学者将 Cl^- 浓度 250mg/L 作为判断海水入侵最直接、最敏感的单一指标。另一常用指标是矿化度(TDS),不同的学者采用了不同的咸淡水界值,但是大体范围为 1.0~2.0g/L。矿化度反映了水中总盐量,海水与淡水中矿化度之间存在显著的差异,因此 TDS 的变化可以直接反映海水的侵染作用。然而,淡水中 Cl^- 浓度和 TDS 大小还经常受到生活污水、工业废水、矿区排水等一些非海水因素影响,因此,单指标分析是不全面的,不能简单地用单一的水化学指标来监测海水入侵。海水入侵这一复杂的侵染过程引起了包括 Cl^- 浓度和 TDS 在内的一系列水化学变化,如 pH 值、 Br^- 含量、水化学类型等指标的改变,因此,有必要选择多种指标进行综合评价。

2. 多指标综合评判法

单用地下水氯离子浓度指标有时不能准确地揭示水质变咸的原因和机制,通常的做法是选择几种有代表性的化学离子及其特征离子比值作为海水入侵监测指标,并以此对海水入侵程度作等级划分(赵建,1998;张保祥等,1997)。选择的代表性指标有:Cl⁻、矿化度(TDS)、Br⁻、钠吸附比(SAR)、咸化系数(A)。Br⁻是海水中稳定的常量元素之一,含量一般大于55mg/L。陆地地下淡水中Br⁻则属于微量元素,受到海水侵染后,此含量值将升高。因此它是反映海水入侵的一个较敏感指标。咸化系数(A)定义为地下水中特征离子比值, $r\text{Cl}^- / (r\text{HCO}_3^- + r\text{CO}_3^{2-})$ 。钠吸附比(SAR)是美国咸水实验机构用来表示农业灌溉适宜性的一个参数,其表达式为

$$\text{SAR} = r\text{Na}^+ / \sqrt{\frac{1}{2}(r\text{Ca}^{2+} + r\text{Mg}^{2+})} \quad (1.1)$$

赵建系统地研究了各项指标的分级界值,并提出了利用模糊数学综合评判方法确定海水入侵程度分级。不同化学性质的水中特征离子不同,其特征离子含量的比值可清楚地反映并放大不同类型水的差异性,因此是区分不同性质地下水十分有效的一种指标。SAR指标可以反映海水入侵过程中咸淡水混合作用下水-岩(土)之间的阳离子交换作用。吴吉春等人在这方面做了大量的实验研究,证实了海水入侵过程中阳离子交替作用的存在。SAR指标不仅对于评价海水入侵区地下水的受侵染程度有意义,同时对于研究海水入侵作用下表层土壤环境化学性质变化也具有重要的意义,而后者往往不被研究者重视。因此,海水入侵监测研究中应加强对海水入侵过程中水-岩反应(离子交换、吸附与解析作用等)研究,研究咸淡水混合作用下地下水、包气带土壤、含水层介质化学成分变化的规律,从而用来指导海水入侵的监测与预报。

1.1.2 物探监测指标

物探方法用于监测海水入侵,是依据咸淡水两种不同介质对自然或人工电场不同的电导反映(电阻率、充电率)来确定海水入侵形成的咸淡水界面。采用的主要指标有:①电阻率指标,主要方法有垂向电测深法和瞬变电磁法;②充电率指标,目前仅限于激发极化法。一般视电阻率值 $20\Omega \cdot \text{m}$ 可作为咸淡水界面的特征值。垂向电测深法是海水入侵监测中最常用的物探方法,缺点是易受高阻包气带和低阻地层的影响导致测量误差。瞬变电磁法能够有效地确定不同深度的导电层(包括高阻包气带和低阻地层),特别适宜于多层含水层海水入侵监测,但其曲线解译复杂,影响了实际使用。激发极化法可以根据人工电场在地下岩层产生极化二次场的衰减特性及多项物理参数异常来确定岩层性质。据张保祥等(1997),在监测海水入侵时,它可以作为垂向电测深的一种补充手段,且目前仅被少数学者使用。另外,电剖面法、电磁剖面法和地震反射法等物探方法也可用于海水入侵监测,而且常常多种方法联合使用,相互补充。

1.1.3 同位素指标研究

随着同位素地球化学的发展,同位素方法成为研究和确定地下水咸化成因最直接的手段,为海水入侵研究提供了新的途径。海水入侵研究中常用的同位素指标有:²H、¹⁸O、³⁴S、Sr、C同位素。封存古咸水与现代海水的化学成分相近但其同位素组分却相差很大,因此通过测定淡水、古咸水、卤水、海水的同位素组分可以确定咸水的来源,从而判断和区分古咸水入侵和现代海水入侵。潘曙兰等(1997)运用同位素方法研究了我国莱州湾海水入侵的成因及变化趋

势。她根据 21 个水样的 ^2H 、 ^{18}O 同位素测定结果,得到样品的 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ -电导率关系,在两种图上均发现了卤水入侵线和现代海水入侵线,为莱州湾地区地下水咸化成因分析提供了有力依据。但是研究表明,海水与地下淡水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差别不是很大, ^{34}S 受氧化还原反应影响,地下水的氧同位素组成受大气降水的同位素组成影响,这些因素不同程度地影响方法的准确度。20 世纪 80 年代以来,对硼同位素测定方法的改进及地化研究表明:硼同位素是一种区分海陆相来源的较好的指标剂,经过不同演化过程的硼同位素组成也存在着较大的差别。张崇耿、肖应凯和尹德忠等学者探索性地把这一特性直接用于研究海水入侵,通过硼同位素和氯浓度相结合的方法,研究了莱州湾地区现代海水入侵和地下卤水入侵。初步结果表明,硼同位素非常适合于研究轻微的人侵阶段的海水入侵,并使入侵的定量化研究成为可能。同时,由于硼同位素研究海水入侵灵敏度高,在研究宽过渡带的咸淡水界面时具有显著优势。另外,还可根据硼同位素组成特征研究入侵类型。

§ 1.2 海水入侵模拟的数学模型与数值方法

最早提出滨海地区咸淡水界面理论是荷兰人 Badon Ghyben 和德国人 Herzberg,他们分别于 1889 年和 1901 年独立地提出了著名的计算咸淡水交界面的 Ghyben - Herzberg 公式:

$$h_i = \frac{\gamma_f}{\gamma_i - \gamma_f} \cdot h_f \quad (1.2)$$

至今,海水入侵研究已有百余年的历史。这百余年中,海水入侵模型研究经历了从理论假设到合理概化,从理论模型、室内实验模型到数值模型这一漫长的阶段。其中,Custodio 的著名的“*Groundwater problems in coastal areas*”一书系统、全面地阐述了海水入侵问题,为海水入侵研究的开展和普及奠定了基础。通常,海水入侵模型研究可分为突变界面模型、过渡带模型两类。

1.2.1 突变界面模型

该模型忽略了咸淡水间的流体动力弥散作用,把海水和淡水看作是互不混溶的两种流体,认为它们之间存在一个突变的界面。而事实上,淡水和海水是可混溶的,因此,突变界面模型只适用于过渡带很窄的情况下,同时也可用于大范围内的滨海地带海水入侵研究。

与过渡带模型相比,突变界面的研究已是比较成熟了。最早的 Ghyben - Herzberg 公式根据突变界面假设,从静力学角度给出了咸淡水界面计算公式。Bear 在其《多孔介质流体力学》和《地下水水力学》中,比较详细地论述了咸淡水界面运动的理论,给出了咸淡水界面的严格数学描述,并用解析近似公式研究了咸淡水之间的稳定界面和移动界面以及抽水井在界面上部抽水引起的升锥问题。Pinder(1977)运用突变界面模型计算了纽约长岛附近含水层中的海水入侵问题。Mercer(1980)用突变界面的有限差分法对非线性方程组的迭代解法进行了研究,并利用该方法对夏威夷地区滨海含水层由于污灌引起的咸淡水界面移动进行了研究。Wilson(1982)用有限元方法模拟了突变界面的运移。Essaid(1987,1990)首次提出一种三维分块中心有限差分模型,进行了美国加利福尼亚 Soquel Aptos 盆地的海水入侵问题研究。Ledoux 和 Rivera 等(1990)用有限差分法研究了单相与双相耦合模型,并用于研究墨西哥城的海水入侵问题。Huyakorn(1996)以流体势为自变量,运用多相方法建立了滨海多层含水系统三维突变界面模型,采用上游加权迎辽金有限元法来解数值模型,用步长自动设置的

Newton-Raphson 方法高效地求解非线性方程组。

1.2.2 过渡带模型

当咸淡水之间的水动力弥散相对重要,形成较宽的咸淡水过渡带时,突变界面模型就不再适用了。过渡带模型分为均质流体过渡带模型与变密度过渡带模型。

1. 均质流体过渡带模型

淡水与海水是可混溶的,由于流体动力的弥散作用,咸淡水之间存在一个密度逐渐从淡水密度变到海水密度的过渡带,并且在多数情况下过渡带的宽度是不能忽略的,但该模型将咸淡水看作是均质流体,从而忽略了流体浓度变化对水流速度的影响。Henry(1964)立足于可混溶液体,首次发表了一个与海岸线正交的垂直断面上盐分浓度的解析解,是第一个承压稳定流体条件下剖面上盐水浓度的二维解析解,并首次指出了海水的环流现象。Henry 模型已成为过渡带模型数值试验的基准。Pinder(1970)将 Henry 模型转化为非稳定问题,用特征法求得盐水运移的第一个数值解,而后又相继建立了有限元模型,验证了 Henry 模型。Segol(1975)建立了以流体压力、速度分量和浓度为自变量的剖面二维有限元模型,计算了非稳定流条件下佛罗里达南部一个海岸垂直剖面上的海水入侵。Huyakorn and Taylor(1976)以参考水头和浓度为自变量,并且与 Lee(1974)和 Segol(1975)的模型对比,取得较好效果,并证明水头和浓度公式可推广于三维情况。Heinrich 和 Huyakorn(1977)提出用迎风有限方法求解对流的海水入侵问题。Frind(1988)导出向海底延伸的越流含水层中海水入侵的剖面二维有限元解,用直接积分和迭代技术构造了能够求解大时间步长的有效数值格式。Gupta 和 Yapa(1982)运用对流-弥散模型研究泰国曼谷附近的海水入侵。国内,范家爵(1988)忽略密度对流速的影响,建立了平面二维不规则网格差分格式,对大连大魏家一个水源地进行了模拟。

2. 变密度过渡带模型

即考虑密度对水头、流速和浓度的影响。Voss(1984)建立了与流体密度有关的饱和-非饱和变密度地下水有限元模型和具盐水界面的含水层有限元模型 AQUIFEM-SALT,而后 Voss 开发了 SUTRA 二维有限元软件,综合考虑了密度、水头、浓度相互中用的饱和-非饱和带中地下水流动与溶液运移或热量运移,常用于模拟海岛的剖面二维海水入侵问题。Huyakorn(1987)等提出了与密度相依赖的地下水流方程和运移方程,建立了水头、密度、浓度相互作用下的滨海多层含水层中海水入侵过渡带的三维有限元模型。同时,对弱透水层中水流和运移的解析法和数值法处理进行了详尽的说明,通过 4 个计算实例验证了该模型。Kekinuma 等(1988)用三维有限元方法分别模拟了日本 Nuka 和 Kiki 地区两个承压含水层稳层流条件下的海水入侵问题,但做出了弥散系数为常量的假设。薛禹群(1991)建立了考虑密度变化的三维特征有限元模型,研究了山东莱州地区龙口一滨海含水层中的海水入侵,是国内第一个研究海水入侵咸淡水界面运移规律的三维数值模型。模型不仅考虑了密度变化对流速、水头和浓度的影响,对潜水面采取了运动网格法的处理,并运用特征有限元法求解运移方程。Galeati and Gambolati(1992)建立了考虑变密度的无压含水层咸淡水过渡带模型,采用具无条件稳定的隐式欧拉-拉格朗日方法求解咸淡水耦合模型,运用预处理共轭梯度法(PCG)求解方程组,用该模型研究了意大利南部垂直剖面上的海水入侵。Panday and Huyakorn(1993)建立依赖密度的三维上游加权预处理共轭梯度有限元模型,模拟了美国佛罗里达州一个 Geneva 淡水透镜体,并研究了抽水引起的升锥问题。在国内,艾康洪(1993)采用上游加权有限元方法建立了考虑密度、水头、浓度相互作用的剖面二维海水入侵模型,研究了广西漫尾岛咸淡水过渡带。

李国敏(1994)利用 Leismann 和 Frind(1989)提出的人工弥散加权方法,建立了考虑密度、水头与浓度相互作用的三维有限元模型,研究了广西涠洲岛的海水入侵。吴吉春(1996)提出了用改进特征有限元法求解高度非线性的海水入侵问题,首次建立了反映水-岩阳离子交换作用的海水入侵数学模型,以 Na^+ 、 Ca^{2+} 作为模拟因子,阳离子交换作用作为模型的耦合,并应用该模型模拟研究了山东省龙口市黄河营海水入侵过程中交换 Na^+ 、 Ca^{2+} 的运移行为,取得了满意的结果。1995 年,陈鸿汉等通过不同含水介质对 Cl^- 、 Na^+ 的吸附实验和海(咸)水入侵动态系统砂槽模拟实验证实,含水介质表面吸附(解吸)作用对盐分运移的影响是不可忽略的。1999 年成建梅建立了三维变密度对流-弥散水质数学模型来研究山东省烟台夹河中下游地区咸淡水界面的运移规律。2000 年,陈鸿汉等针对海(咸)水运移过程中的水动力学特征和化学动力学特征,推导了水动力化学动力耦合的盐分运移对流弥散方程,水动力过程考虑了浓度变化对水流运动的影响,化学动力学过程考虑了含水介质表面吸附(解吸)作用对盐分运移的影响,采用改进的非线性特征有限元法,求解高浓度溶质运移三维模型。

1.2.3 海水入侵模型的数值方法

在 20 世纪 90 年代,海水入侵水质模型求解方法以有限元方法居多。为了解决求解对流-弥散方程所引起的数值弥散及过量现象,所采取的方法有上游加权有限差分法、迎风(上游加权)有限元法、交替方向隐式差分或有限元法、基于 Langrangian 原理的特征法和变形网格法、人工弥散加权法及欧拉-拉格朗日混合解法(即特征有限元法,简称 ELM 法)等。其中迎风有限元方法在海水入侵模型中得到了广泛的应用,并取得了较好的效果;人工弥散加权法特别适用于结点较多且大时间步长计算的条件下。近十年来,混合 ELM 方法愈来愈成为求解对流-弥散方程的主流方法。欧拉-拉格朗日混合解法的思想是将对流-弥散方程中的弥散项和对流项分裂求解,对流项用特征法(MOC)或单步后退特征法(MMOC)求解,弥散项仍用传统的迎辽金有限元方法。这种混合解法已成功地用于求解山东莱州的海水入侵三维水质模型(薛禹群,1991),但是,在这个实例中涉及的结点数较少,且在该文献中对涉及这部分的算法描述甚少,使该方法的推广应用受到一定的限制。另外,Zheng(1994)在其编制的 MT3D 软件中提出了用 HMOC 法(Hybrid method of characteristics)在三维差分网格中求解对流分量。该法借鉴了 Neuman(1984)提出的自适应的思想和动点技术,将 MOC 法和 MMOC 法结合使用,灵活地用于求解弥散为主或对流占优时的对流-弥散方程,并且尽可能地减少数值弥散和过量现象。1999 年,成建梅在建立山东省烟台夹河中下游地区海水入侵模型时,以四面体为基本离散单元,推导出三维海水入侵变密度水质模型求解的数值方法,溶质运移方程求解时运用了欧拉-拉格朗日混合方法,将对流项与弥散项分离:用传统迎辽金有限元方法求解弥散项;采用自适应 MOC-MMOC 法求解对流项,取得了令人满意的效果。2001 年,袁益让等提出海水入侵及防治工程后效的数学模型,给出三维问题的迎风分数步差分格式,并对山东省莱州湾地区的海水入侵进行数值模拟。总之笔者认为:混合 ELM 方法是求解对流-弥散方程的主流方法,特别是对流占优时。但是,这种方法的推广还存在一定困难,特别是在三维情况下,而且在程序中对边界的处理也是十分复杂、费时的。因此还需做更多的工作,形成通用化的程序,才能使该方法得以推广。

模型中以剖面二维模型居多,三维模型较少。二维剖分以矩形网格为主,并有等参四边形和三角形单元网格;三维模型离散单元类型以长方形、三棱柱为主,且多为水平层状,极个别实例如薛禹群(1991)和李国敏(1994)等运用了等参六面体单元。但是,能够灵活刻画含水层结

构和复杂边界条件(如透镜体存在等)的任意四面体剖分的实例却没有,甚至在二维条件下运用三角网格剖分计算运移方程也少见。成建梅(1999)考虑潜水面变化,以平面三角网格位为基础,提出了三维空间任意四面体网格自动生成方法,并应用于海水入侵实例研究。另外,三维模型的实现还取决于可获得的观测资料,为了得到三维空间上的各个变量的值如水头、浓度、含水层厚度等,常常还需要利用先进的插值技术。

§ 1.3 滨海含水层的临海边界问题

在滨海含水系统研究中,临海边界条件的正确处理直接影响到海水入侵模型的仿真程度。目前,绝大多数海水入侵模型将平面图的海岸线作为整个含水系统的边界。实际上,当海岸为陡直基岩海岸时,将海岸线作为含水系统边界尚可行,但对于砂质平缓海岸,这一处理可能导致不正确的结果(陈崇希等,1988,1990)。在平缓砂质海岸,滨海含水层实际上是向海底延伸一定范围的。Nawang 等(1990)在某滨海含水层地下水模型中,无论证地假定承压含水层顶板向海底延伸 5km 和 15km,并处理为水头已知边界。

研究表明,滨海地区地下水具潮汐效应性质,且离海岸不同距离地下水对潮汐的效应因含水层类型不同而不同,说明可通过对岸边水头的潮汐动态研究来推测出含水层的情况(如延伸范围、水文地质参数等)。一些学者着重于通过地下水潮汐效应来估计水文地质参数的研究而未提及临海边界的确定(Mehnert,1999;Schultz,2002)。Li 等(1991)运用复变函数给出了含水层顶板向海无限延伸时地下水水头随潮汐波动的一维解析解,粗略确定了广西一滨海含水层向海底的延伸位置。陈崇希等(1993)归纳了天然条件下地下水向海底排泄的两种基本方式,提出了等效排泄边界概念;随后基于天然状态地下水系统,又系统地提出了运用地下水潮汐观测信息确定滨海含水层的“等效排泄边界”的思路,并运用准三维水流模型进行反复验证。Li and Jiao(2001)推导了滨海多层含水系统中地下水潮汐效应的解析解,讨论了陆地含水层向海底延伸范围对地下水潮汐波动的影响。研究表明,当含水层向海底延伸距离较近时潮汐波动随延伸距离增大而减小;而当延伸距离大于某一阈值时,该性质不再明显。笔者认为,这意味着存在某一个特定的含水层延伸范围,该位置可视为等效的含水层海底边界,在这种等效条件下,对陆上含水层的刻画较原来的直接将海岸线作为陆地含水层边界的做法更接近实际。Kooi and Groen(2001)分别运用突变界面解析模型和变密度数值模型研究了滨海含水层系统向海底的延伸,认识到:在有利于形成比较宽的淡水楔的条件下,突变界面模型会低估淡水向海的延伸。Zhang 等(2001)研究了简化临海边界对无压含水层中污染物迁移的影响。他们发现,忽略咸淡水密度差异将会使计算的咸淡水界面处的溶质通量偏低。因此,在研究滨海含水层向海底延伸距离时,应考虑咸淡水密度的差异。然而,大多数模型忽略了地下水密度变化,而且迄今为止有关滨海含水层临海边界确定的实例研究也很少见。成建梅等(2003)充分考虑了烟台夹河中下游地区滨海地下水受海潮、夹河河潮及开采等综合因素影响,地下水已不同程度地受海水入侵而咸化,咸淡水之间密度差异对地下水运动及盐分运移已起着不容忽视的作用,鉴于此,建立了三维变密度地下水潮汐效应模型,通过反复对比潮汐效应观测中的水头波动和计算水头波动,确定了山东烟台夹河中下游地区滨海含水层的海底等效边界。

综上所述可知,在平缓海岸,含水层实际上是向海底延伸的,其延伸范围可通过含水层中地下水的潮汐效应信息来确定;同时在运用潮汐效应模型确定含水层临海边界位置时,还应该充分考虑到咸淡水之间的密度差异。

§ 1.4 海水入侵防治对策研究

实际上,不合理地开采地下水(包括过量开采与布井不合理)是导致海水入侵的直接原因,其问题的实质是水资源供需失调。因此防治海水入侵的重点在于“防”。在我国,海水入侵危害仅在部分地区比较严重,如环渤海地区,多数滨海地区刚开始有海水入侵的苗头,因此进行超前的以防治海水入侵为目的海水入侵研究,具有十分积极的意义。从地下水循环(补径排)角度来看,防治海水入侵的核心是:增加地下淡水补给量,减少地下淡水排泄量,限制地下水开采量。因此,海水入侵的防治措施可分为开源节流、阻挡咸水(海水)、抽排咸水、适应性生态改良等(马凤山等,1997;盛学斌,1996)。

开源节流,即增加地下淡水补给量,减少地下淡水排泄量,限制地下水开采。增加补给和减少排泄的方式有:①拦蓄补源性工程,包括各种人工渗沟、渗渠、渗井与拦蓄闸坝等。在海水入侵严重的地区,可充分利用汛期降水,在河槽不同地段修建人工渗沟、渗渠、渗井,以加快地表水入渗,迅速转化成地下水。另外,不同河段位置上修筑拦河闸坝,使河水尽量沿途入渗补给地下水,以减少地表径流入海。②以淡水帷幕工程为基础的地下水库。建立以沟渠入渗为主,回灌井、回灌渠或井、渠结合等的淡水入渗帷幕和补源方式,在下游平行于海岸修筑挡水屏障,从而形成地下水库。③跨流域调水工程。限制地下水开采,合理开发利用地下水,其主要手段是对滨海地区地下水资源进行全方位(时间、空间)的管理,以不发生海水入侵为前提,以地下水模型为依据,确定允许开采量,调整地下水开采布局。另外,将传统垂直抽水井改变为水平集水方式,如水平集水廊道或辐射井等井型,可以有效地减小抽水引起的浓度升锥,从而减缓海水入侵。也可在海岛淡水透镜体内开挖最小降深的截水廊道,如夏威夷、马里亚纳群岛等均有成功的经验。

阻挡海水入侵的水力设施有两类:地下帷幕和地表防潮设施。地下帷幕有三种类型,包括实体帷幕、水力屏障和地下充气墙。实体帷幕是在海水入侵通道较狭窄的地段修建地下连续墙,修建投资较大,但管理和维修费用较低,能够有效阻挡海水入侵。其缺点在于天然地下径流受阻引起水质恶化和污染。水力屏障是在位于海水入侵前缘的内陆一侧,向钻孔中注水抬高地下水位形成一道淡水帷幕,阻挡海水的入侵。其注水速度越高,效果越好,但修建和管理费用高,且需补充水源,同时可能引起地下水的污染。地下充气墙是指利用钻孔向含水层注入空气,在淡水含水层与海岸之间形成人工空气墙,防止海水的入侵及淡水向海洋渗流。其最大优点是造价低,无需注水或泥浆即可形成挡水帷幕,也不会引起二次污染。肖江等(2000)分析了理想条件下充气法在防治海水入侵问题中的应用。笔者认为,充气法防止海水入侵从理论上是可行的,但是运用到实际还需开展试验性研究。地表防潮设施主要包括拦潮坝、防潮堤与防潮闸工程。防潮堤可以有效阻挡现代海水的入侵;防潮闸坝既可以有效地阻止涨潮流顺河道上溯,又可以在缺水季节拦蓄淡水,增大河流的水头压力,减缓海水入侵的速度。

排泄咸水是指将已遭受海水侵染而水质咸化的地下水抽出含水层。可包括抽水槽和一并双泵两种方法。由于抽水必将导致井附近水位(水头)的降低,形成漏斗,从而可能加剧海水入侵。因此排泄咸水方法不宜作为防治海水入侵的主要方法。

适应性生态改良是指适应海水入侵现状,进行海水入侵区生态改良试验,利用地下微咸水或与淡水混合利用浇灌耐盐作物,分区治理,发展入侵区经济(齐鑫山等,1999)。在重灾区建立适合区域生态特点的农牧渔林良性循环的生态系统,建立盐业牧草带和浅海滩涂养殖带,积

极推广养殖新技术,在充分利用盐业资源的基础上,发展畜牧业,改良土壤;对灾害威胁区,在利用现有的海水入侵灾害监测系统的基础上,及时调整水资源利用方向,发展节水型农牧业和工副业;在补给山区以绿化和涵养水源为出发点发展生态农业。

§ 1.5 结论与建议

(1)考虑密度变化影响的过渡带模型,是未来海水入侵数值模型发展的趋势。近年来,考虑到咸淡水混合过程中的化学反应作用以及含水层介质表面吸附(解吸)作用对盐分运移的影响,已有一些学者在水动力化学动力耦合方面做了积极的尝试(如陈鸿汉等)。

(2)欧拉-拉格朗日混合法愈来愈成为海水入侵水质模型求解的主流方法。但是,方法的推广还需要做更进一步的工作,形成通用化的程序,以方便使用。最近,Oude Essink(2001)在研究荷兰某滨海含水层海水入侵时运用了程序 MOCDENS3D,该程序重点考虑地下水密度变化影响。

(3)宜采用多种指标、多种方法(水化学法、物探及同位素)综合评价,确定海水入侵的程度和范围。特别需要指出的是,海水入侵监测除了要监测地下水的水化学组分变化,还应重视对表层土壤性质的监测。另外,鉴于硼同位素在具宽过渡带的咸淡水界面、轻微海水入侵阶段以及区分海水入侵类型与阶段上具有其他指标无法比拟的优势,并使入侵的定量化研究成为可能。因此,建议将在条件复杂的地段进行海水入侵监测时应尽可能运用硼同位素方法。应加强对海水入侵过程中水-岩反应(离子交换、吸附与解析作用等)研究,研究咸淡水混合作用下地下水、土壤、含水层介质化学成分变化的规律,从而用来指导海水入侵的监测与预报。

(4)临海边界条件的处理。不应直接将海岸线作为含水层系统的外边界。对于砂质平缓海岸,这一处理可能导致不正确的结果。在平缓海岸,含水层向海底延伸范围可以通过含水层中地下水的潮汐效应信息来确定,即将“等效边界”视为临海边界。

(5)模型中水动力参数的选取直接影响了模型预测的准确性。弥散度反映了含水层介质的空间结构特征,其大小直接影响了咸淡水过渡带的宽度及规模。研究结果表明,含水介质复杂的空间变异性导致含水层参数具有明显的尺度效应性质。而大多数模型对选取的参数缺乏讨论或论据不足。笔者认为,基于典型单元体(REV)的传统水动力弥散理论不能适用于描述野外大尺度下复杂含水层中溶质运移问题。近年来,随机理论成为研究宏观范围含水介质的空间变异特征及溶质运移规律的重要工具。在我国,杨金忠等在专著《多孔介质中水分及溶质运移的随机理论》中根据非饱和水力传导率野外试验的统计数据,利用由随机理论推求的宏观水力传导率、宏观水分特征曲线、宏观弥散度的计算公式,计算介质的宏观参数,来分析区域非饱和水分运动和溶质运移问题。但是,目前的随机理论研究大多还基于一些假设(如渗透系数的 $\ln K$ 二阶平稳、稳定渗流场等),因而地下水溶质运移随机理论发展到实际应用,还需要做更多的工作。因此笔者建议加强对野外大尺度下复杂含水层中溶质运移理论的问题,力图从机理上描述含水层参数的尺度效应性质,为模型建立提供依据。

(6)实际模型研究时,海岛模型较多,而一般滨海海岸带模型并不多见。一般讲,海岛模型具有相对简单的水文地质条件,通常为一个较独立的水文地质单元,因而模型概化相对简单、明了;海岸带模型则相对复杂些,特别是存在河流汇入海时,模型概化就显得复杂一些。

(7)水资源供需失调是导致海水入侵的实质原因,防治海水入侵的重点在于“防”。对于已经发生海水入侵的地区,应该因地制宜地采取综合治理措施,减轻海水入侵危害,防止海水入侵加剧。

第二章 海水入侵数学模型

滨海含水层中的海水入侵问题是一个可混溶液体间的水动力弥散问题。由于海水与地下水淡水彼此完全可溶解,它们之间的界面张力为零,不存在液体—液体突变界面,因此过渡带海水入侵的数学模型中必须有两个偏微分方程来描述,第一个方程用来描述密度不断改变的混合液体(咸淡水混合物)的流动,第二个方程用于描述混合液体中盐分的运移。

§ 2.1 考虑密度变化的水流方程

2.1.1 相关概念

(1)环境水头 h : 即实际观测到的水头 h , 为咸淡水混合流体具有的水头, 定义为

$$h = \frac{p}{\rho g} + Z \quad (2.1)$$

式中: p 为液体压强; Z 为位置高程; ρ 为咸淡水混合液体的密度, 即实际密度; g 为重力加速度。

(2)参考水头 H : 液体压强与其密度紧密相关, 由于海水入侵时某一时刻渗流场中各空间点的密度不同, 为避免求解时出现过多的密度值, 特提出参考密度, 对应于参考密度的水头即为参考水头, 通常取淡水密度为参考密度, 参考水头即为淡水水头, 即

$$H = \frac{p}{\rho_0 g} + Z \quad (2.2)$$

式中: ρ_0 为淡水密度; H 为参考水头。

因此, 如果知道了液体密度与液体浓度之间的关系, 即可以利用渗流场中液体浓度的分布来进行参考水头与环境水头之间的转换。

(3)密度差率 ϵ

$$\epsilon = (\rho_s - \rho_0) / \rho_0 \quad (2.3)$$

式中: ρ_s 为液体最大密度, 即海水密度。

(4)密度耦合系数 η

$$\eta = \frac{\epsilon}{C_s} = \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} \cdot \frac{1}{C_s} \quad (2.4)$$

式中: C_s 为与液体最大密度 ρ_s 对应的液体最大浓度。

2.1.2 水流方程建立

在一般均质流体溶质运移模型中, 流体中溶质的浓度是很小的, 可以忽略流体浓度变化对流体水头及流速的影响。在海水入侵含水层中, 海水与淡水浓度相差很大, 海水中 Cl^- 很高, 达 17~18g/L, 海水与淡水之间密度也存在着明显的差异, 因此, 在刻画其溶质运移的模型中必须考虑由于浓度及密度差异驱动下的流动, 建立一个能够同时考虑过渡带的存在及流体浓度变化对流体速度影响的非均质流体对流-弥散模型, 以正确反映海水入侵的过程。据 Huya-