

莱州市 滨海区域 海水入侵研究

尹泽生 主编



海洋出版社

莱州市滨海区域海水入侵研究

尹泽生 耿树德 邹宝山
林文盘 蔡祖煌 杨明华 等著
程汝楠 李宝庆 宁丕海

海洋出版社

1992年·北京

00544

内 容 简 介

本书从资源、环境的角度,系统提出了海水入侵研究的基本内容和方法。在分析莱州市滨海区域各种环境条件和水资源评价的基础上,应用多种测试手段,探讨了海水入侵成因、机理、类型等基本规律,提出了海水入侵通道类型的划分意义和原则,同时对海水入侵的发展趋势进行预测。为了探索海水入侵的有效综合防治措施,本书应用若干研究实例提出了水资源开发系统工程模型和生态控制模型等方案,同时对示范治理方法进行了深入的分析与评价。本书以作者测试采集的数据为主,资料翔实,内容丰富,是国内系统研究海水入侵的重要文献。

本书可供地理、地质、环境、水文地质、生态工作者、大专院校师生和从事国土整治、区域开发、环境治理的干部、技术人员参考使用,亦可作为滨海地区政府决策、生产部门制定规划的参考。

(京)新登字087号

莱州市滨海区域海水入侵研究

尹泽生 耿树德 邹宝山
林文盘 蔡祖煌 杨明华 等著
程汝楠 李宝庆 宁丕海

海洋出版社出版(北京市复兴门外大街1号)
新华书店北京发行所发行 北京京辉印刷厂印刷
开本: 787×1092 1/16 印张: 19.625 字数: 350千字
1992年2月第一版 1992年2月第一次印刷
印数: 1—1000

*

ISBN 7-5027-2103-7/P·174 定价: 15.00元

序

资源短缺、环境恶化、人口膨胀是当今困扰人类生存、社会经济发展的三大难题，受到世界的普遍关注。海水入侵就是发生在滨海地区的上述三者矛盾的重要表现。为了克服海水入侵给人类生产、生活造成的危害，世界沿海国家、地区人民都先后不同程度地对此开展研究并制定了相应的防治措施。

我国海域辽阔，海区总面积470余万平方公里，陆地岸线长达18000多公里，海洋岛屿岸线11000多公里。丰富的海洋资源为我国的经济振兴、发展做出了巨大贡献。但是由于滨海地区经济建设的高速发展，人口密集，由此而产生的淡水资源紧缺、过度开发利用，导致了部分地区海水入侵的发生和发展。到目前为止，我国已出现的海水入侵地区有位于渤海的辽东湾、渤海湾、莱州湾，黄海的胶州湾、海州湾。其中尤以莱州湾最为严重。据不完全统计，目前莱州湾地区海水入侵面积已达435平方公里，报废机井6000多眼，50万亩耕地丧失了灌溉能力，50000亩耕地发生次生盐碱化，年均减产粮食1.5~2亿公斤，1989年减产粮食达5亿公斤；海水入侵区内的工业设备锈蚀严重，工业产品质量下降，部分工业已面临转产、停产、搬迁的困境，并危及人类的生存。为减缓这一严重自然灾害，近年来山东省及中国科学院的许多单位和科技部门先后开展了对这一问题的调查、研究，寻求防治办法。1989年3月中国科学院周光召院长、李振声副院长还专门考察了莱州市海水入侵区，会同山东省赵志浩省长商定了研究治理的有关问题，并向国务院写了报告，引起了中央有关领导的重视。随后应莱州市政府邀请，于1989年7月中旬，中国科学院派遣了专家组对灾区进行实地考察，提出了“八五”国家重点科技攻关主项报告。并成立了由王乐泉和李振声为首的“山东省莱州市王河流域海水入侵综合防治研究领导小组”，负责组织研究工作。1990年3月在莱州市召开了领导小组扩大会议，审查批准了研究项目组关于在莱州市滨海区域开展海水入侵1990年度的预研究计划。

项目组由中国科学院、山东省和莱州市等若干科技单位组成。1990年4月集中到莱州市海水入侵最为典型的西由镇开展研究工作，于1991年初完成预研究任务并通过成果鉴定。

项目组在研究过程中，把海水入侵这一重大自然灾害纳入资源、环境、社会经济这一大系统中，制订了正确可行的总体研究方案，采用了各种有效的调查方法和测试手段，取得了大量资料数据。通过分析评价，初步揭示了海水入侵的若干规律。创造性地提出了海水入侵通道类型的划分原则，海水入侵地层电性特征数值，海水入侵与降水量关系等许多有科学价值的重要参数。并进行了水资源优化开发、管理、良性高效生态等设计模型，为海水入侵区域治理提供了指导性的依据，也丰富了学科的研究内容。项目组同时还依照“边研究、边治理、边见效”的方针，在引洪回补地下水、农业灌溉节约用水、耐旱作物种植、建立生态村等方面进行了探索，取得了良好效果，为海水入侵防治对策与工程实施，积累了经验。

本书是项目组一年多时间研究所取得的科研成果。由于海水入侵综合防治研究在国内起步较晚，目前虽有一些成果，但系统、多学科地综合研究尚属首次，又因研究时间与条件所限，此项研究有待今后继续进行和深化。

本书正确地将海水入侵综合防治纳入资源、环境这一大系统，为今后深入研究开拓了视野。基于海水入侵问题的复杂性，因此要全面、彻底地揭示它的成因、机理、规律及防治对策与效益尚需长期的多学科联合研究，特别应当加强海水入侵区自然地理、古环境、地质、地貌条件、水资源条件等方面的研究；在防治措施中着力综合性，在加强管理措施的同时，注重生物、生态、旱作建设，辅以水利工程。并应对不同防治方案进行优选，设立监测网络与有关实验站，追踪海水入侵治理动态变化，从而不断提高研究水平，取得综合防治的最佳效益。

- 赵德三

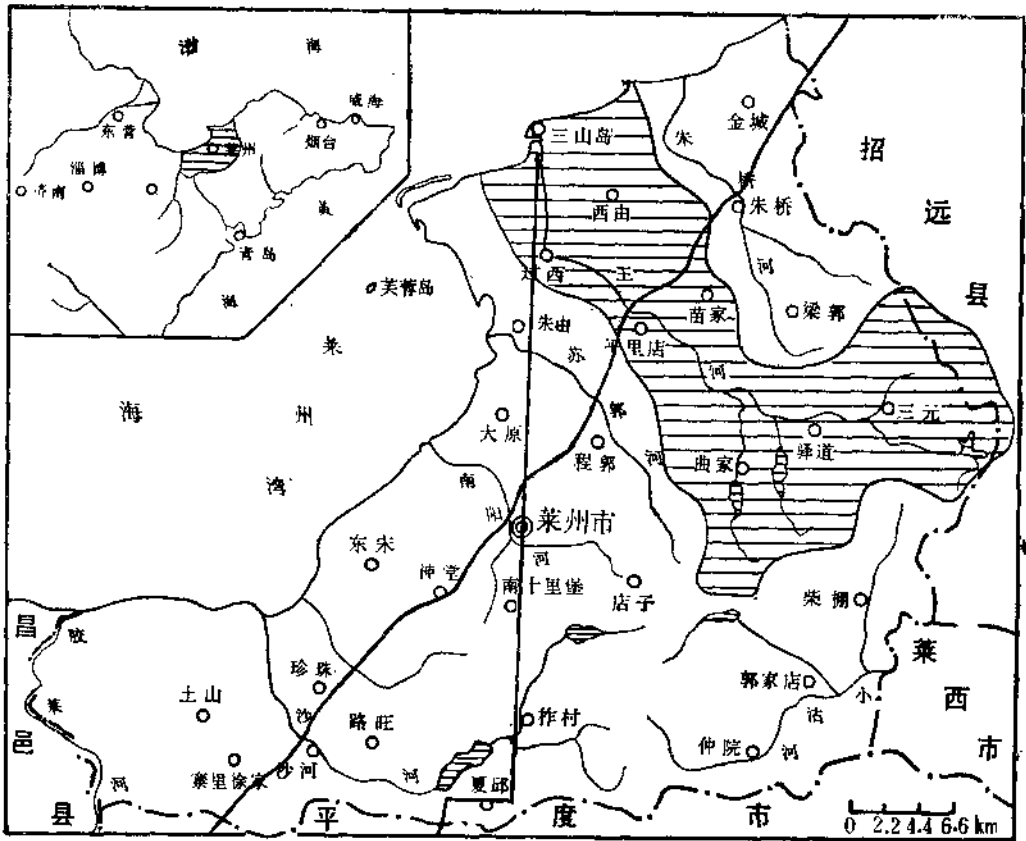
1991.9.1

11200

前言

海水入侵，是现代社会中具有特色的资源与环境问题，它使我国沿海地区环境遭受严重破坏，给社会经济带来很大损失。对这一问题的研究，具有重大学术意义和实际价值。选择比较典型的山东省莱州市滨海区域进行的海水入侵综合防治研究，在我国是此类研究的首次尝试。

研究区域位于莱州市沿莱州湾东南岸的平原地带。这一区域是莱州市经济文化最发达的地区，近十多年来由于出现海水入侵，引起了各方面的重视。先是由山东省和莱州市的一些研究技术部门着手探讨这一问题，继而在1989年，由中国科学院周光召院长、李振声副院长倡议列项，并正式成立项目组开展研究工作。



山东省莱州市滨海区域及王河流域位置图

项目组于1990年4月初到达海水入侵最严重和最有代表性的莱州市王河下游地区，在附近的西由镇设点考察。考虑到海水入侵综合防治研究是一个长期的任务，这次安排的工作实际上属于预研究性质，其目的主要在于基本掌握海水入侵的现状及其所造成的危害，分析评价影响和造成海水入侵的环境条件，探索海水入侵的某些成因规律。在技术路线上，寻求一

些追踪和显示咸淡水运动变化的简便有效的分析、测试方法。同时,计划开展少量防治海水入侵的示范性工程试验。

为此目的,项目组分为4个课题组组织研究工作,即:①区域地质条件研究组;②水资源评价与开发利用研究组;③农业节水研究组;④生态研究组。

项目组于1990年8月初完成野外工作,随后进入室内分析测试阶段,1991年2月底完成总结报告,1991年6月通过了由中国科学院和山东省联合组织的科研成果鉴定。本书是在这一成果的基础上编写而成的。

本书正文分为七章,共同完成下列任务:

1. 讨论海水入侵研究的科学内涵和海水入侵基本现象及基本规律

海水入侵现象目前还不为人熟知,研究这一现象的科学范畴尚未明确。通过对莱州市滨海区域海水入侵现象的调查研究,从已接触到的问题看,现代海水入侵并不应单纯归结为水文地质、地下水动力学等学科所独立研究的问题,它完全是一个涉及到许多学科(含基础学科和应用学科)共同关心的综合研究课题。为进行这一课题研究,需要对与此有关联的学科理论、研究方法加以补充、完善、吸收,以形成新的理论体系和完整的研究方法。为此,一方面应对有关学科的原有理论方法的某些环节,如各种环境数据的采集分析方法、人地关系的调整途径等加强研究;另一方面,还需要依照新的体系,建立具有学科性质的海水入侵研究理论和研究方法。根据对海水入侵本质属性的初步认识,这个新的体系基本属于现代资源与环境科学的范畴。未来的海水入侵研究,应以这样的认识为出发点。本书的讨论也多以这方面的问题为主要内容。

莱州市滨海区域的海水入侵现象,主要属于滨海平原沉积海岸型。这一海水入侵类型十分普遍,环境效应也很明显。因此对它的研究便具有了典型意义。本书所论述的海水入侵的历史发展、海水入侵的现状、海水入侵的危害、海水入侵原因、海水入侵方式、海水入侵类型及分区、海水入侵趋势预测等,都属于海水入侵现象与海水入侵规律方面的内容。这些研究成果对认识其它类似地域环境下的海水入侵现象,将有一定帮助。

2. 探索滨海平原型海岸海水入侵的有效研究方法

本书所探讨的海水入侵现象有如下一些特点:其一,主要活动发生在第四系松散地层中;其二,是一种隐蔽的现象;其三,影响海水入侵的因素很多。这些特点为海水入侵研究带来困难,考虑到采用单一的方法研究海水入侵一般难以奏效,因此必须探索由若干有效的单一性方法组合而成的综合性方法。这一综合性方法,以环境分析和资源评价为核心,发挥各单一研究方法的优势,彼此支撑,相互印证,共同解决海水入侵这一复杂、隐蔽的自然现象。

在莱州市滨海区域海水入侵研究中所采用的综合性方法,主要包括两部分内容:一是常规地质学、生物学、实验科学、技术科学所采取的必要研究方法和技术手段。以此获得有关环境数据和工程技术参数;二是进行与海水入侵特征相适应的环境生态监测,获取海水入侵的动态资料。本书中论及的海水入侵区域地域条件分析、水环境分析与水资源评价、生态系统演化分析、地层包气带特征测量、地下水同位素分析、遥感影象判读、数值模型的建立等方法,属于前者;利用分布在海水入侵区域大量水井中的地下水水位与水质变化以及地表生态与环境变化数据,分析并预测海水入侵等方法,属于后者。

3. 在海水入侵区域,寻求若干减缓海水入侵危害的技术途径

由于海水入侵而使莱州市滨海区域的环境趋向恶化,危害日益严重。寻求防治海水入侵

的途径，以使这种恶化现象发生逆转，已成为海水入侵研究的中心任务。防治海水入侵必须立足于综合整治方案，按其所处区域的资源、环境特征，采用有关工程、生态、管理等类措施，针对海水入侵所带来的具体问题，有的放矢地开展工作的。本书中介绍的在王河下游河床中进行的拦蓄补源工程，在海水入侵区域开展的小麦节水灌溉试验、耐旱作物甘薯品种种植试验、农业生态工程系统设计等项内容，都属于上述各类措施的具体实施。这些虽然都只是初步的探索，但已取得了一定的效果，有继续推广应用的价值。另外，研究过程中，还对西由、过西一带的饮用水源进行了调查，提出了开发设想；开展了对海水入侵区域环境分析和监测方法的研究和设计。这两个属于管理方面的措施未以章节的形式论述，但其有关内容已穿插写入全书中。

海水入侵是现代社会中一种难以避免的环境灾害，认识并掌握它的成因、机制、运行规律，目前是一个难题，在此基础上，提出对其有明显效果的防治措施，就更不容易。莱州市滨海区域海水入侵研究在短时间内涉及到如此众多的问题实难做得十分理想。对于本书这一基本上尚属探索性的科研成果，希望读者提出指导意见，以便在今后的深入研究中继续得到改进。

本研究是在以王乐泉、李振声为首，赵德三、刘安国、葛能全等参加的“山东省莱州湾地区海水入侵综合治理研究领导小组”领导下开展工作的。项目组由下列成员组成：组长尹泽生，副组长曹恒顺、蔡祖煌、李宝庆，成员王玉亭、耿树德*、倪本梓、林文盘、程汝楠*、邹宝山*、杨明华*（带*号者兼课题组长）。项目组另一组长邢嘉明于1990年3月18日因病去世。生前他领导和主持了项目组的筹备工作。

参加研究工作的人员还有：中国科学院地理研究所何凡能、矫志本、李丽娟，山东省水利科学研究所韩廷树、李炳光，中国科学院地质研究所马凤山、石慧馨、许志藩，莱州市水利局宁丕海、尚昌玉、刘学忠、任培琪、盛天喜，中国科学院环境生态中心文剑平、赵国栋，莱州市农业局张忠华、王志刚，中国科学院遥感应用研究所李剑、王长跃、刘静航、杨平，中国科学院遗传研究所杜述荣。

本书各章由下列人员编写而成：

前言：尹泽生；

第一章：尹泽生；

第二章：邹宝山一、二、三、何凡能四、五、六

第三章：林文盘、宁丕海、马凤山；

第四章：林文盘一，耿树德，蔡祖煌，马凤山二，耿树德三，标文盘四；

第五章：韩廷树、邹宝山一，李健、王长跃二，杨明华、文剑平三，蔡祖煌四，林文盘五；

第六章：邹宝山、何凡能、一、二、四、五，韩廷树三，

第七章：宁丕海一，程汝楠、李宝庆二，杜述荣三，杨明华、文剑平四。

本书由尹泽生主编。统编人员有尹泽生、林文盘、邹宝山，参加编辑人员有何凡能、杨小军。

研究工作期间，莱州湾地区海水入侵综合防治研究领导小组办公室、莱州市海水入侵综合治理办公室给予项目研究全力支持，中国科学院农业项目管理办公室、学部办公室，山东省农委和莱州市及西由镇政府等领导单位，项目主持单位中国科学院地理所及山东省水利科学研究所等各参加单位，分别给予了很多帮助。



彩图 I $TM4 \cdot TM4 / TM3 \cdot TM7$ 比值图像



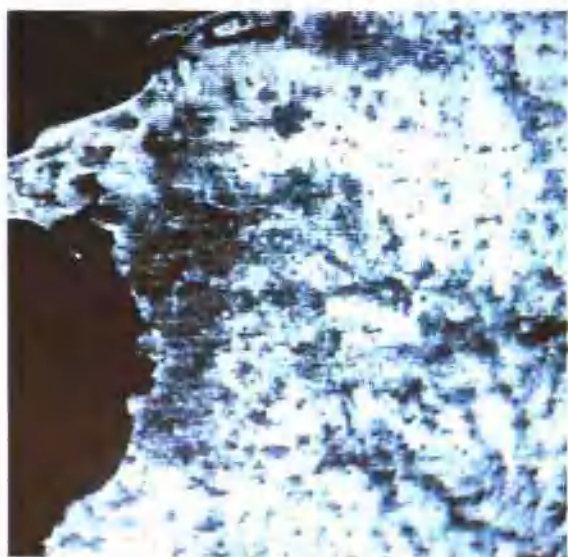
彩图 II $TM2 \cdot 4 \cdot 6$ 假彩色合成影像



彩图 III
WALLIS 变换后的 $TM2 \cdot 3 \cdot 4$ 合成影像



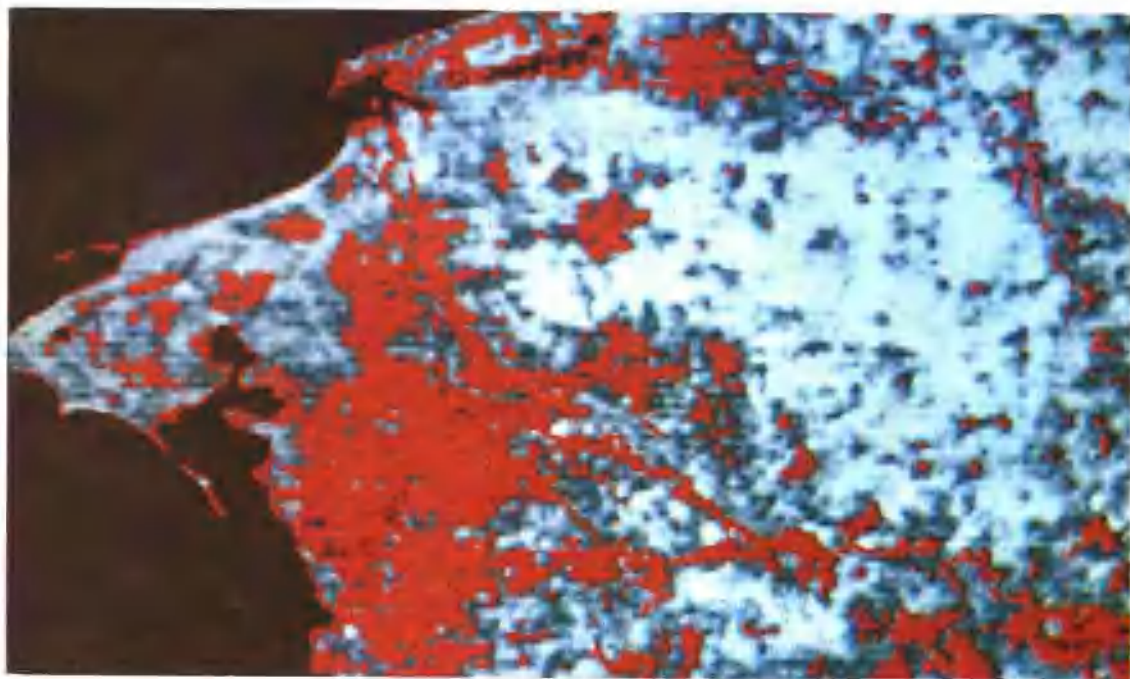
彩图 IV
IHS 变换后的 $TM2 \cdot 3 \cdot 4$ 合成影像



彩图 V TM6 线性拉伸图像



彩图 VI TM6 非线性密度分割图像



彩图 VII TM6 分层处理图像

目 录

第一章 海水入侵研究方略	(1)
一、海水入侵原理	(1)
二、海水入侵的发展	(3)
(一) 海水入侵的发现与历史演化	(3)
(二) 海水入侵的危害	(6)
三、海水入侵研究概览	(9)
(一) 海水入侵研究的科学范畴	(9)
(二) 研究基础	(11)
四、海水入侵研究内容	(14)
(一) 环境分析	(14)
(二) 人类活动与海水入侵相互关系	(15)
(三) 海水入侵规律	(16)
五、海水入侵研究方法	(16)
第二章 海水入侵地域条件分析	(19)
一、地质构造条件	(19)
(一) 构造	(19)
(二) 地层	(20)
二、地貌条件	(21)
(一) 地貌类型	(21)
(二) 海岸地貌	(23)
三、海湾与近岸沉积	(24)
(一) 海湾	(24)
(二) 近岸沉积	(24)
四、地理环境演变	(25)
(一) 气候变迁	(26)
(二) 海陆变迁	(26)
(三) 环境地域分异与海水入侵	(29)
五、第四系松散沉积物	(32)
(一) 地层岩性特征	(33)
(二) 成因类型	(35)
(三) 沉积结构与分布规律	(36)
(四) 第四纪沉积层与海水入侵的关系	(38)
六、地下卤水	(39)
(一) 卤水分布特征	(39)
(二) 卤水成因类型	(41)
(三) 卤水入侵	(42)

第三章 海水入侵区域水环境分析	(43)
一、海水与海水运动	(43)
(一) 海水	(43)
(二) 海水运动	(46)
二、河流水系	(48)
(一) 水系特征	(48)
(二) 主要河流开发状况与新水系格局	(50)
三、陆地水化学特征	(52)
(一) 地表水化学特征	(52)
(二) 地下水化学特征	(52)
四、陆地水质污染	(56)
(一) 地表水质污染	(56)
(二) 地下水水质污染	(57)
第四章 淡水资源	(60)
一、区域水汽资源与降水	(60)
(一) 区域水汽资源	(60)
(二) 降水	(62)
二、水资源总量	(67)
(一) 地表水资源	(67)
(二) 地下水资源	(69)
(三) 水资源总量	(82)
三、综合评价	(85)
(一) 供需水量平衡分析	(85)
(二) 水资源综合评价	(87)
四、流域水资源开发对策	(88)
(一) 立足当地开源节流	(88)
(二) 改善水利工程的运营方式	(90)
(三) 防止水源污染	(91)
(四) 开辟新水源	(91)
(五) 加强管理, 全面节流	(91)
第五章 海水入侵研究的若干技术方法	(93)
一、海水入侵地层电性特征分析	(93)
(一) 测试网线布置与数据解释处理	(93)
(二) 电测深曲线类型及其特征	(95)
(三) 电测深曲线定量解释方法	(98)
(四) 海水入侵地层电性特征	(100)
(五) 应用实例	(106)
二、遥感影象分析	(112)
(一) 信息源的获取和处理	(112)
(二) 地域主要资源环境要素制图	(116)
(三) 专题图像处理及影像分析	(119)

(四) 讨论·····	(126)
三、海水入侵区生态学研究·····	(127)
(一) 自然生态系统的一般特征·····	(128)
(二) 自然生态系统的演替·····	(129)
(三) 海水入侵区制约生态因子分析·····	(130)
(四) 生态脆弱带的类型·····	(134)
(五) 生态控制模型·····	(136)
四、地下水变成成因的同位素研究·····	(137)
(一) 技术方法原理·····	(137)
(二) 采样和样品测试·····	(140)
(三) 数据分析·····	(141)
(四) 讨论·····	(142)
五、模型研究·····	(145)
(一) 水资源开发系统工程·····	(145)
第六章 海水入侵规律初步认识·····	(151)
一、海水入侵范围·····	(151)
(一) 范围确定依据·····	(151)
(二) 范围位置·····	(151)
二、海水入侵原因·····	(152)
(一) 人为原因·····	(152)
(二) 地质原因·····	(153)
(三) 气候原因·····	(154)
(四) 地理环境因素·····	(154)
三、海水入侵方式·····	(155)
(一) 面状入侵体·····	(155)
(二) 带状入侵体·····	(155)
(三) 管状入侵体·····	(155)
(四) 舌状入侵体·····	(150)
(五) 锥状入侵体·····	(156)
四、海水入侵类型及分区·····	(157)
(一) 海水入侵通道·····	(157)
(二) 海水入侵类型·····	(158)
(三) 海水入侵程度分区·····	(160)
五、海水入侵发展趋势预测·····	(161)
(一) 地下咸淡水正常接触带与海水入侵的区别·····	(161)
(二) 不同水位条件下咸淡水接触带位置·····	(162)
(三) 海水入侵极限范围·····	(165)
(四) 海水入侵发展趋势·····	(164)
第七章 海水入侵区域治理示范研究·····	(166)
一、地下水拦蓄补源·····	(166)
(一) 已有拦蓄工程效益分析·····	(167)
(二) 汪河下游补源工程试验·····	(171)

二、小麦节水灌溉试验.....	(176)
(一) 目的任务与试区布设.....	(176)
(二) 试验方法.....	(180)
(三) 成果与讨论.....	(196)
三、甘薯品种栽种试验	(208)
(一) 引进原理与试验方法.....	(209)
(二) 试验要点.....	(210)
(三) 试验结果.....	(212)
四、农业生态系统评价.....	(213)
(一) 设计要求.....	(213)
(二) 可行性分析.....	(215)
(三) 设计原则.....	(219)
(四) 王河流域的生态工程设计内容.....	(224)
(五) 生态工程园的改建模式研究试点.....	(228)
参考文献.....	(237)

第一章 海水入侵研究方略

海水入侵是指由于陆地地下淡水水位下降而引起海水直接侵染淡水层的自然现象。有时风暴潮或大涌潮覆盖陆域,也称之为海水入侵。在海滨地带的沉积地层中,间或赋存有一层或多层浓度很大的历史时期形成的古海水(卤水),也可能由于淡水区的水位下降,而使古海水越过原咸淡水界面侵染淡水含水层,构成另一种形式的海水入侵。

莱州市滨海区域,特别是王河下游及其毗邻地区海水入侵的主要形式,是海水直接入侵地层中的地下淡水,因此这成为本项研究和本书讨论的重点内容。其它方式的海水入侵,本书只略有涉及。

一、海水入侵原理

海水入侵的标准主要依据是地下淡水水质中的矿化度变化。概念上,凡是由于海水入侵而造成地下淡水矿化度加大的地区都属于入侵区,但实际上还应该有一个统一的矿化度指标,以便作为测定、判断、研究、治理海水入侵时的依据。

从总体上讲,海水的化学成分是均匀、稳定的。但由于地理环境和人类活动的影响,海水的化学成分在近陆的浅海海域发生局部变化。特别是在有入海河流的海区及陆地地下淡水与海水接触部位,海水的化学成分变化很大。这是由于咸淡水阴、阳离子混合作用的结果。

莱州市浅海水深小于10米的水域面积为965平方公里,其海水化学成分和水质特点为:pH值在8—8.5之间;氯度11.71—13.53‰;盐度21.1—24.45;总铵10毫克/立方米—12毫克/立方米,磷酸盐含量7毫克/立方米—35毫克/立方米。由于入海河流、污水排放、潮汐、波浪等作用差异影响,浅海水域内的海水化学成分分布差异明显(见表1-1)。

内表6-2可知,胶莱河口、虎头崖一带的海水氯度、盐度均比海北嘴、刁龙嘴、海庙后低。这是河水淡化(胶莱河口)和波浪、潮汐(虎头崖)作用差异影响的结果。

表 1-1 莱州市浅海水质分析表(1979年10—12月)

调查区域	比 重	水 温 ℃	透明度	pH值	氯 度 Cl‰	盐 度 S ‰	总碱度 mg/L	总 铵 毫克/ 立方米	硝酸盐 毫克/ 立方米	亚硝酸盐 毫克/ 立方米	磷酸盐 毫克/ 立方米
海北咀	1.017	19	1.1	8.2	13.53	24.45	2.56	12	1	1	7
刁龙咀	1.017	19	0.75	8.3	12.67	22.91	2.61	10	1	3	14
海庙后	1.016	18	0.80	8.4	12.07	21.82	2.56	11	2	3	16
虎头崖	1.015	18.2	0.85	8.5	11.71	21.17	2.56	10	1	2	35
胶莱河口	1.014	17.8	0.80	8.4	11.77	21.27	2.61	11	2	4	26

为了保护人类的生产和生活和生态环境,目前国际和世界许多国家都建立了各自生活饮用水、工业用水、农业灌溉用水的水质标准。海水入侵的水质标准国际、国内虽没有明文规定的指标,但都以氯离子含量变化的咸淡水临界数值做为衡量确定海水入侵的水质标准。这是由于海水中氯离子是保守元素,其测定方法相对简单,根据其含量比值也可容易计算其

它主要化学元素的含量。表1-2为世界部分沿海国家海水入侵氯离子含量标准。

表 1-2 世界部分沿海国家海水入侵氯离子含量标准

国家(地区)	Cl ⁻ (毫克/升)	国家(地区)	Cl ⁻ (毫克/升)
日本	200	南斯拉夫	250
美国	250	瑞典	300
欧洲卫生组织	350	墨西哥	250
法国	250	印尼	250
荷兰	250	苏联	350

(供水水文地质手册, 地质出版社, 1977年)

根据盐度——氯度关系式

$$s\text{‰} = 0.030 + 1.805\text{Cl}\text{‰} \tag{1-1}$$

及总盐量(Σ)与氯度关系式

$$\Sigma\text{‰} = 0.073 + 1.8110 \times \text{Cl}\text{‰} \tag{1-2}$$

可得氯离子含量为200毫克/升时,其盐度为3.64,总盐分为3.7‰;氯离子含量为250毫克/升时,盐度为4.543,总盐分为4.6‰;氯离子含量为300毫克/升时,盐度为5.445,总盐分为5.06‰;氯离子含量为350毫克/升时,盐度为6.35,总盐分为6.4‰。由此可知,当氯离子含量为200毫克/升时,其水质已属咸水范围。目前莱州市滨海区域淡水中的氯离子含量,据多年测试为80—100毫克/升。参照一般情况,如果发现原来淡水中的氯离子含量增加到300毫克/升时,规定为已经遭受了海水入侵。这个标准是多年来本区认识和治理海水入侵的基本依据。

滨海陆地的地下淡水与海水间存在着密切的水力联系。理想情况下,海淡水之间存在着一个稳定的界面,称为零界面。用数学公式解释零界面的存在形式和界面变动条件,是许多学者致力追寻的目标。其中应用吉本(1889)和赫兹伯格(1901)原理所列的方程式(GH),是其中较著名的一个,这个公式的表达式为:

$$(Z + h_f)\gamma_f = Z \cdot \gamma_s \tag{1-3}$$

(1-3)式中:Z为海淡水界面与海面之间的高差;h_f为淡水潜水面与海面之间的高差;γ_f与γ_s为淡水和海水的比重,数值分别为1.000和1.025。代入以上公式则为:

$$(Z + h_f)1.000 = Z \cdot 1.025 \tag{1-4}$$

移项得

$$Z = \frac{1.000}{1.025 - 1.000} h_f \cong 40h_f \tag{1-5}$$

从这一结果看出,淡水面与海面之间的高差h_f的变化,也就是潜水位的升降,以大约1:40的比率关系,影响海淡水界面与海面之间的高差Z的变化,也就是界面向海或陆的进退。

这一公式应用较广,但也有不足之处。如它忽略了实际存在的海岸附近地下水流速的垂直分量,没有考虑在海平面以上常有的潜水渗出面因素等。为此,又出现了考虑裘布衣假设与上述关系式相结合的吉本—赫兹伯格—裘布衣界面模型。经推导,得出潜水(淡水)和承压水(海水)界面方程式为:

潜水:

$$q_0 = \frac{KM^2}{2L} \cdot \frac{1 + \delta}{\delta^2} - \frac{NL}{2} \tag{1-6}$$

$$\begin{aligned}\text{承压水: } q_0 L &= -\frac{KH_0}{2}(\delta H_0 - 2d) \\ &= \frac{K}{2\delta}(M^2 - d^2)\end{aligned}\quad (1-7)$$

(1-6)、(1-7) 式中: q_0 为潜水单宽流量; L 为海水入侵宽度; N 为垂直入渗强度; M 为承压水层厚度或潜水含水层底板在海面下深度; H_0 为承压含水层静水位在海平面上的高度零界面水头; K 为渗透系数; d 为承压含水层顶板在海平面下的深度; $\delta = 40$ 。

用上式所得界面的断面是一抛物线, 且海水入侵宽度 L 与淡水入海的单宽流量成反比。这说明调节 q_0 , 可以控制海水入侵宽度或入侵范围, 从而为海滨区域管理决策提供了依据。

由于沿海地区地层多变, 各含水层渗透系数不同, 每层的测压水头又不相同, 为此, 1971 年柯林斯和赫尔哈提出了双层含水层四种不同组合的解分解。1979 年比埃尔根据流量与水流在流动中损失和遇到的阻力关系推导出如下关系式:

$$\text{在上层内的流量: } q_1 = \frac{T_1}{L_1} \left(h_c - \frac{b_1}{2a} \right) \quad (1-8)$$

$$\text{在下层内的流量: } q_2 = \frac{T_2}{L_2} \left(h_c - \frac{b_2}{2a} - \frac{b_1}{2a} \right) \quad (1-9)$$

入口较海平面之上的水位高程为:

$$h_c = \frac{\frac{T_2 b_2}{2L_2 a} + b_1 \frac{T_1/2L_1 - T_2/2a}{a}}{T_1/L_1 + T_2/L_2} + q_0 \quad (1-10)$$

(1-8) — (1-10) 式中: T 为导水性; b 为厚度; L 为直到不透水层末端的含水层的长度; $a = \rho_f / (\rho_s - \rho_f)$ (ρ 为密度, s 为盐水, f 为淡水); 1 为上含水层, 2 为下含水层。

利用这一关系式, 可以比较完善地解决稳定流状态下双层含水层中, 海水入侵界面运移轨迹的时空分布问题。

以上举出的几个关系式都是表述界面物理状态的理想公式。实际的种类还远不只这些, 其它常用的还有裘布衣—福照汉姆、柯林斯和赫尔哈、雅贝尔等公式。这些公式均可用数值法求解表征不同条件下的海水入侵状况。

当然, 将两种完全不相混淆的海淡水流体截然分割开的理想剖面, 在自然界实际并不存在。由于海淡水接触而使咸水介质向淡水体扩散以及水动力弥散, 使界面演化成一个过渡带或混合带。混合带的厚度取决于含水层的水动力特征。根据诸如水流运动方程、物质传输方程、达西定律以及某些经验关系式, 可构成运动弥散模型的基本方程式。这些研究, 都为阐明海水入侵提供了理论根据。

二、海水入侵的发展

(一) 海水入侵的发现与历史演化

1976 年, 在对滨海区域地下水水位统测时, 在西由镇东北村的水井中, 出现了负值。这一反常现象, 引起了有关人员注意。到 1979 年在进行农业区划工作中, 收集到的资料表明, 出现负值的水井数目又有了增加。有关部门便由此开始, 有计划地在全市滨海地区几百个水井中安排了测试项目, 主要测试地下水埋深 (1979—1990)、水位 (1985—1990)、水质等。