

海水入侵防治研究 (一)

● 林振耀 尤联元等编著

高等教育出版社

前 言

海水入侵是人类在沿海地区的社会经济活动中,导致的一种自然灾害现象。不仅是一个自然科学问题,还是一个与社会经济发展密切相关的社会问题。当前,已成为区域科学研究中的一个新的热点,备受人们的重视。

自60年代以来,国际上许多沿海先进国家从区域水文、地质、气候等方面对海水入侵规律、类型和影响,进行了较为系统的研究。特别是进入80年代以来,引入了相邻学科的理论知识和技术手段,海水入侵的数值分析经由定量研究迈入动态模拟和预测研究的新阶段。近年来,鉴于水资源问题日益突出,一些国家还把这一问题的研究与水资源的合理调度、科学利用,逐步形成节水型经济体系结合起来,从而进一步拓展了海水入侵的研究层次。

我国海水入侵的研究,起步较晚。目前,正在经历一个从一般研究到专题研究;从局部研究到区域研究;从地方研究到国家重点研究的过程。

1989—1990年,在中国国际减灾十年委员会、山东省人民政府和中国科学院的组织和指导下,由中国科学院地理研究所牵头,对山东省莱州湾地区海水入侵问题进行了调查研究,积累了丰富的资料,并开展了一部分防治海水入侵的工程试验,取得了一定的成效。参加此项工作的单位还有中国科学院地质研究所、遥感应用研究所、生态环境研究中心、遗传研究所,山东省农业委员会,水利科学研究所,莱州市农业委员会、水利局、农业局等。

“海水入侵防治试验研究”,已正式列为“八五”国家重点科技攻关项目,由山东省和中国科学院共同组织实施。该项研究要求查明海水入侵成因、类型、规律和发展趋势,摸清入侵区生态环境特征、水资源的数量与时间变化规律,研究防治入侵的综合治理方案及抵御海水入侵的工程治理技术,在山东莱州湾地区王河流域,建成水利、农业、工程措施相结合的综合治理示范区。目前,在世界上还很少有这样做的先例。

由此可见,海水入侵问题的研究需要多学科的结合,如水文地质学、自然地理学、人文地理学、生态科学、水文学、气候学等,特别是与环境地理学的密切结合。

为配合上述“八五”国家重点科技攻关项目的进行,由中国科学院地理研究所承担了这一集的编著任务。本集有选择地著述和编译了一些国内有关海水入侵的文章和资料,包括研究现状、理论、数值模拟,水资源开发利用和各种防治海水入侵的工程和生物措施等,供在该领域从事工作和感兴趣的同志参考。

由于时间仓促,在选题方面会有一定局限性,在编著过程中也会有不足之处,敬请批评指正。

《海水入侵防治研究》作为系列书出版,将陆续同广大读者见面。

刘安国

一九九一年四月

90-2477

目 录

页 码

前言

(i)

海水入侵问题和研究方法综述

一门新颖的区域科学领域—海水入侵	(3)
海水入侵	(17)
海平面上升的原因及影响	(25)
波兰格但斯克沿海地区地下含水层的海水入侵	(32)
利用地球物理方法研究水文地质	(38)
干旱流域水文研究的环境同位素方法	(44)
利用遥感和环境同位素资料建立干旱区水文地质概念模型	(48)
探明地下含盐水的VLF阻抗测量法	(53)

数 值 模 拟

海水入侵模式研究的若干基本问题	(59)
海水入侵数值模拟进展的评述	(77)
恒定状态下滨海区含水层中盐分动力弥散的摄动分析及数值模拟	(86)
含盐蓄水层中淡水贮存模型的涡旋分布应用	(104)
瑙鲁岛海水入侵的数学模拟	(110)
滨海含水层海水入侵模拟——理论及应用	(118)

临界水的开发与应用

微咸水	(129)
临界水在干旱地区的应用	(132)
干旱地区地下水中的热咸水	(138)
以色列微咸水的来源、消耗及使用	(143)
微咸水灌溉对棉花生长与产量的影响	(148)
饮用咸水对健康的影响	(152)
地下热咸水在土壤增温及蔬菜灌溉中的应用	(154)
在南部阿拉伯地区利用微咸水资源发展区域供水	(158)

防治措施和效益

盐碱地改良—生化措施	(165)
废水中浮萍生长所带来的氮的迁移和转化	(168)
在高效藻池中二形藻的环境形态变化及其与废水处理和生物量生产的关系	(171)
以色列污水处理和应用	(174)

以色列污水灌溉概况	(181)
薄膜方法在咸水脱盐过程中的应用	(184)
滨海平原区防潮闸水力自控闸门设计和应用	(188)

海水入侵的环境影响

海水入侵区地理环境演变预测与地理工程设计	(195)
咸海危机的起因与解决途径的研究	(210)
海水入侵人地关系的区域透视	(217)
微型流域节水的经济评价	(222)
西奈—内格夫地区的气候、水文状况以及高盐度地下水的特征及影响	(227)
参考文献	(233)

海水入侵问题和研究方法综述

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

一门新颖的区域科学领域—海水入侵

张 丕 远

(中国科学院 地理研究所)
(国家计划委员会)

海水入侵是一个现代社会中富有特色的资源与环境问题,同时也是由于干旱,人类不合理超采地下淡水而导致环境恶化的现象。对社会经济、环境和人民生活都能产生重大影响,已引起人们广泛地关注。

对海水入侵及其所引起的一系列派生问题的研究,虽然从上世纪就已开始,由于问题的复杂性,许多重要方面,如入侵的机理,入侵过程和范围的定量化,所引起的生态环境退化和如何防治等,或者是远未解决,或者是未引起足够的注意。近一、二十年来,随着一些相邻科学的发展和解决资源、环境问题的需要,有关本领域的科研工作取得了长足的进展,正在发展成为一门介于水文地质学和环境地学之间的一门新的边缘学科。本文拟就当前对这一问题的看法,包括基本原理、研究和计算方法、我国的情况等作介绍和讨论。鉴于本领域的研究在我国尚属初期阶段,国内的资料和成果尚不多,本文所述主要依据国外研究成果,较多地引述了B. Custodio教授在1985年第18届国际水文学协会大会上所作的关于海水入侵综述报告中的内容。

一、导 言

海岸带储水层以及海岸地区和岛屿上水资源的合理利用和管理十分重要,因为:

——全世界沿海和岛屿地区人口密度不断增加,特别是在三角洲地区以及主要的港口和旅游点;

——许多地区由于表层和地下水盐度较高,以及人为的污染使得能达到标准的可用的水资源十分有限;

——许多海岸带的储水层范围都较小,特别是在山脉距海洋较近的地区和小岛上。我国山东地区省莱州湾沿岸就属于这种情况。

许多小岛都面临和将要面临严峻的淡水供应问题。他们必须全部依赖他们自己有限的水资源和应用复杂的管理技术,或者用十分昂贵的方法对海水进行脱盐或者用船从外面运水。

大家知道,现行的技术水平并不能完全适应含盐环境中淡水储水层开发和管理的需要,并且,如果管理不善,这些资源将彻底和不可逆转地枯竭,淡水资源将缺乏和逐渐咸化,同时也可能有大量的淡水由于渗漏或通过泉眼那样的集中出水口流向海洋。

许多有关地下水的会议都讨论海水入侵问题。如由国际水文科学协会(水文科学)和国际水文学家协会组织的会议,但很少有这一课题的专题讨论会。不过,由欧洲科学家、工

程师和水文地质学家组织的定期会议,虽然没有正式的组织机构,但他们以“海水入侵”为名,自1968年在汉诺威召开首次会议之后,在不同的地方每二年一次,到1983年在意大利的巴里已开到了第八届,共收集了约110篇论文。De Breuck (1983)对1968—1981年间的论文做过系统的综述。

联合国教科文组织积极地促进沿海地区水资源的研究项。关于“因水力工程和地下水开发所引起的沿岸地区盐水和淡水平衡的数值变化”的计划5,6,已被列入1975—1980年段国际水文规划(第一阶段)。在1977年已成立了一个专门的工作小组,一部关于地下水方面的研究报告也已经完成。

海岸带地下水管理被认为是这一课题的重点所在,包括以下几个方面:

- 评价地下水盐侵的严重程度以及控制措施的实施情况;
- 确定现有的控制盐侵的管理方法的性质和效果,包括数据收集、分析方法、管理目标和行政计划。
- 确定新计划和研究的特性,这些新计划和研究旨在提高防止海侵的技术水平。

二、基本原理

海岸带储水层淡水和海水相互关系的基本原理在水文地质和地下水文学书本中已有较广泛的介绍和讨论。在假设在淡水和盐水之间有一明显作用面的理想状态下,我们必须考虑:

——建立在不同密度、不同混合的液体间流体动力平衡的吉本—赫兹伯格(GH)公式。它是平均海面以上淡水水势 h_t 和作用面深度 Z 之间的关系式。其表达式为 $Z = \alpha h_t$,其中 $\alpha = r_t / (r_s - r_t)$,是淡水比重 r_t 和盐水比重 r_s 间的比重差比。一般情况下 $\alpha \approx 40$,假定海水是稳定的,其水位为零。

——作用面上水平流体静力流的杜毕霍赫海岸(DF)假设。

当有垂直流参与时, h_t 则指作用面上的实际水势,由水势分布测量或推断。当有海水(无论停滞的或运动的)水势 h_s 存在时, (h_s 在其垂直流存在的作用面上测量),流体静力平衡式可改写为:

$$Z = \alpha h_t - (1 + \alpha) h_s$$

正确应用GH和DF原理时,就会产生与野外观测相吻合的结果。如果与野外观测不相符合。则可能表明除上述修正之外,平均海面高度不为零,储水层没有稳定的盐水或者垂直流速的参与。实际情况下,只有在水流系统已知和比较清楚时,才能进行必要的修正,而一般来说这种情况很少存在。甚至有大潮波动的较大的平坦海岸,以及较复杂的海岸和海流较强的岛屿周围,要确定“有效的”平均海平面都比较困难。0.5米的海面误差可以使作用面产生20米的深度误差,盐水锋的渗透误差就更大了。

大多数情况下,明显作用面的假设是不存在的,淡水和盐水之间有一较宽的转换和混合带,它甚至占据储水层较大的厚度。在这种情况下, GH原理不能定量使用,尽管修正之后它对混合带内部应用可以得出较合理的结果。在预测之前,需要大量的野外经验。

一些作者将混合带的上部含盐量达到溶解固体和氯含量最大的地方定义为界面,并试图规定一个 α 值来计算以淡水水头到这一界面的深度,就象在GH公式中计算作用面深度一样。尽管在特定的储水层和特定条件下, α 值符合实际观测,但对不同的储水层,甚至同一当

条件改变(如季节变化、干湿阶段变化、抽水的影响等)时, α 值就不再适用。一个简单的 α 值不能描述混合带行为中不同的现象。所以, 一般来说, 那些报告中的 α (10到20) 可能毫无意义。

很容易证明, 并已被野外观测所证实, 混合带的水流如图1, 存在一个指向海洋的咸水净输运量。扩散和流体静力扩散是引起淡水和盐水的混合的因素。另一方面, 沿混合带的水流维持了该带的宽度, 并将进入的盐分不断带走, 使之保持一个平衡。这种现象与在成层海湾

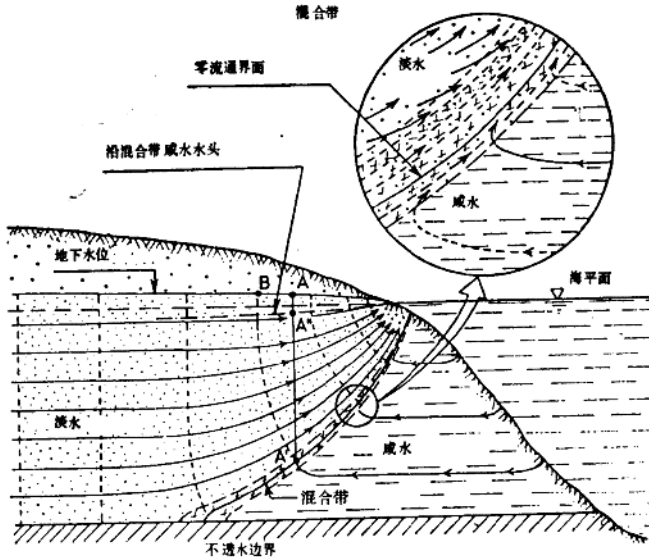


图1. 沿岸带潜水两储水层水流简图

地区的观察现象十分一致, 只是梯度更大些。

混合带的厚度取决于有内部的盐水流、储水层的渗透性和扩散性以及淡水流入。因潮汐、储水层回灌事件和抽水速度变化等外界因素的影响, 也有增加其厚度的趋势。

在上述外界因素影响下扩张或缩小(由于冲刷的加剧)。关于野外观测的出版报告不多, 而且只有一些定性描述的报告是可以得到的。因为抽水、潮汐以及径流对其性质有重要影响, 所以一些文章和另一些文章的观点相矛盾。显然, 这一领域还需要加强研究。

在夏威夷半封闭的玄武岩储水层(Todd和Meyer, 1971), 由于不停的抽水, 淡水流入不断减弱, 混合带不断扩大, 但其底部不变, 只是顶部升高, 在意大利南部沙丁半岛石灰岩储水层中, 混合带在自然条件下扩大和缩小, 但其中间部分约保持为一常量厚度(Cotecchia, 1977)。在一次径流事件之后, 混合带扩大, 有时又跟着一次缩小, 所有这些和其它观察到的现象并不十分符合基本原理。

现在还没有一个简单的方法来定量描述混合带的特征。当组成成分较均一时, 可以假设盐度的垂直分布按“ Σ ”形状分布。

潜流可以用压强 P 来描述, 以代替水势。压强可以用一种内部充有已知深度水的点状压强计来测量, 如果水的动能可以忽略的话, 按伯努利能量守恒定律, 在基面以下一定深

度 Z 处的能量 $E=(g/P/\gamma-Z)$ ，其中 g 是重力加速度， γ 是水的比重。

在同一深度设有两点1和2，其间距离为 ΔX ，从点1到点2的水平平均速度为

$$q_h = k_h \frac{p_1/\gamma_1 - p_2/\gamma_2}{\Delta X}$$

在同一垂直方向上给定两点 a 和 b ，间距为 ΔZ (b 在 a 之下)，则从 a 到 b 的垂直方向的平均速度为

$$q_v = k_v \frac{p_a/\gamma_a - p_b/\gamma_b + \Delta Z}{\Delta Z}$$

其中 k_h 和 k_v 分别是平均水体条件下水平和垂直方向的水力传导率(渗透率)。当垂直方向的比重分布已知时，就可以求解水体运动方程。

假设流体和岩石都是刚体(不能压缩)，则质量守恒方程可以表述为：

$$-\nabla \cdot (\gamma \vec{q}) + \Gamma Q = 0 \quad \vec{q} = \frac{k_0}{\mu} (\nabla P - \gamma \nabla Z)$$

其中 $\vec{q}$ 是Darcy速度矢量， Q 是比重的初始值(下沉时为负值)， k_0 是介质内部的渗透率， μ 是流体粘滞系数，其它符号的意义如前述。

质量转换方程也可以描述为

$$\nabla \cdot (D \cdot \nabla C) - \frac{1}{m} \nabla \cdot (\vec{q} C) = \partial C / \partial t - CQ$$

其中 m 是介质运动的孔隙率(假定为一常数)， D 为扩散张量， C 是初始盐度， t 为时间。假设固体介质不参与。

比重与盐度的关系可以用方程 $\gamma = \gamma_0 + 0.7C$ 来表达。 γ_0 是淡水比重， C 的单位为 g/e ， γ 的单位为 kg/m^3 。粘滞系数必须用 C 的函数来表示。

三、水文地质

在潜水层中，盐水锋向陆地方向运动并达到作用面与储水层底部相切的地方(图2)，当混合带较厚时，关系图比较混乱，但其主要特征相似。

实际的情况可能要比观察或描述的情况复杂的多，上述分类图能较好地适用条件较稳定的情况，但在条件易变的情况下，储水层的不均一性将起重要作用，它为盐水的渗透和退出提供了便利的条件(图3)，甚至使得盐度发生逆转。当潮汐较大和较宽的海岸被海水周期性地淹没时，由于盐水喷溅也能促使这一情况发生。

潜水层和封闭的储水层之间没有本质的差异，都适用于同样的原理。在实际中必须注意在海岸潜水层中，淡水可以自由地流向海洋，但在封闭的储水层中，则需要有一个最小淡水水位差来补偿海下出口处比重较大的海水柱(图4)，否则，就没有淡水水流，海水起了阻堵作用，在这种情况下，盐水继续存在储水层中，或者因为缺乏水流。混合带在海潮或季节性变化的影响下，由于扩散或分散作用而无限扩大，从而形成较厚的混合带(图4)。在许多三角洲的储水层中，这种现象比较普遍。

在封闭的海岸淡水储水层中，在没有干扰的自然条件下，其测压水头比海水出口处深度与 α 的比值要大，因为向外流出的淡水必须克服出口处比重较大的海水水柱，在较平坦的地区，这意味着有自流井的存在，这种情况在区域性储水层的海岸径流地区比较常见。

的形成。相反，沉积海岸中的断层和节理则可以促进水流的形成。水文动力模型、化学和同位素研究，以及对沉积学和构造的较好的了解，都可以为研究这一问题提供线索。这需要大量的推断。

当半渗透层存在时，垂直渗透对水位的分布、以及对盐度的分布起决定性作用。需要对水流系统有较深刻的了解来解释盐水的发生和它从海洋到储水层以及从一个储水层到另一个储水层的运动。在没有明显盐水锋时也会产生垂直方向的盐化现象。尽管已有一些较好的研究，但对这一情况的研究经验仍很少。

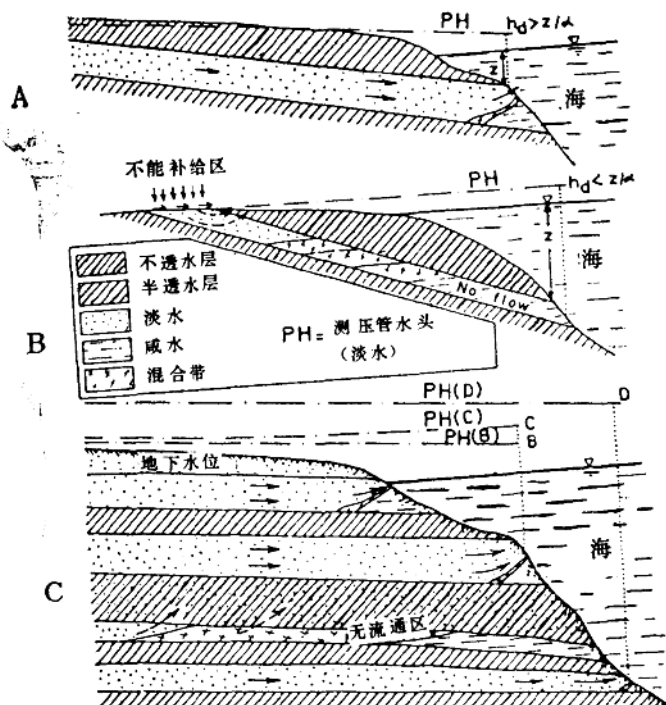


图4.海岸带储水层的行为模式

A. 此封闭储水层向海洋的排泄

B. 水势不足的封闭储水层向海洋的排泄

C. 从大的储水盆地中排泄的沿岸和地下储水层系统

在基岩较硬的情况下，情形变为复杂，因为渗透率更不均一，水流系统的厚度也发生变化。所以，水流一片一片的富积，一些淡水出口明显出露，相反，盐、碱水的水锋又浅，嵌入又深。这不利于淡水资源的开发。这种情况下，必须深入地研究其水文地质情况。由于地下水位和盐度分布比较复杂，常规的观察结果很难解释。开发的结果更增加了其困难。

所有这些都适合于石灰岩、灰屑盐、火山岩、玄武岩和其它较硬的基岩海岸。在卡那里岛较硬的火山岩区，曾有一些研究盐侵的尝试，但结果都不理想，因为都不能对介质条件做充分的描述。在较深的矿井中，曾发现过淡水和咸水的进口，说明除了现代海水之外，古海水，海水灌溉以及气候干旱都能增加水的盐量，从而使得问题更复杂化了。但是，从区

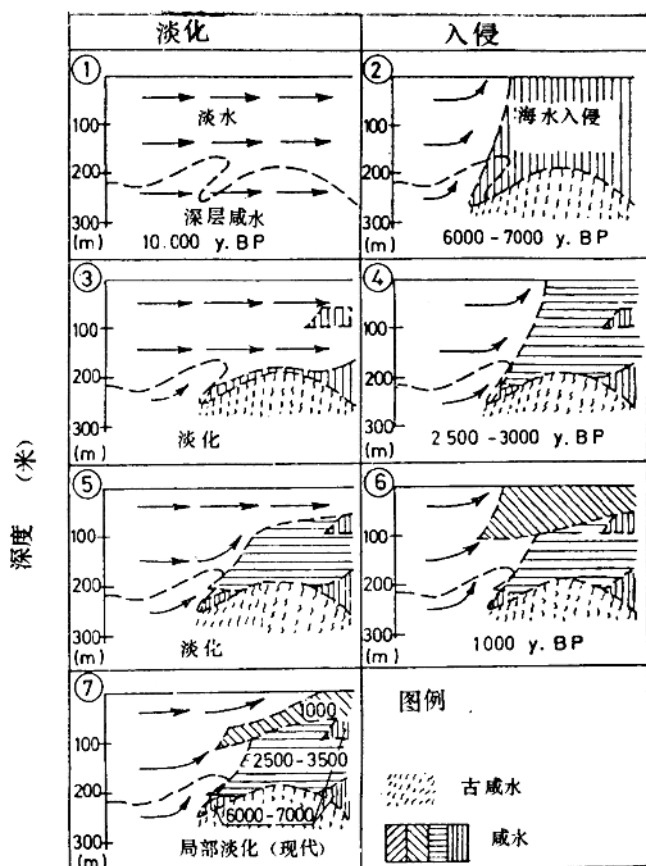


图5. Wittmund (西德) 交换地区, 表示全新世冲蚀和海水入侵的不同的淡化阶段(Hahn, 1975)海洋在右边, 图中标出了各自距今的年代; 可以看出盐水和咸水的分布是复杂的。

域角度来讲, 盐度的分布及变化都遵循一种可以预测的规律。

从第四纪以来, 甚至是上新世以来, 许多海岸地区经受了较大的海平面变化和重要的沉积变化, 盐水的入侵、截留和泛滥也经历了一个变化的过程。并且由于沿海地貌的变化, 如三角洲的形成和发展、沿海的堆积和侵蚀以及在最后一次冰期冰进所引起的沙丘和沉积物积累过程所形成的堆积物, 使得盐度的分布更复杂和易变, 所以, 如果不充分考虑这种不稳定的条件时, 上述这些基本原理似乎都不适用了。需要增强古水文地质、以及水的化学(图5)和放射性同位素的研究来确定条件状况。目前这一方面的研究虽少, 但已发表了一些较好的文章。

四、开发的影响

地下水的抽取影响淡水向海洋的径流。一般来说, 抽取地下水使得盐水锋向陆地运动, 混合带的洗冲下降从而厚度增加。如果淡水流在出口受阻, 则盐水锋和混合带新的平衡逐渐形成, 随着状态的改变, 由侵入的盐水置换出来分为两个水流, 一个流向盐水基部, 另一个

流入海洋。

这种在物理水力模型中很常见的示意图形，与单一储水层的情况十分相符。但在非均质和多层的储水层中，由于明显的指状路径的存在，其情形要复杂的多，一些水文地质构造可能起决定作用，但对它们的研究也一样不够充分。盐锋可能与典型图（图3）不一致，扩散可能大大受阻。一些井水可能早于预期时间而产生咸水，而另一些地区则恰恰相反而受到保护。表面看来十分准确的预测与实际观察不相符的现象，是非常普遍的。

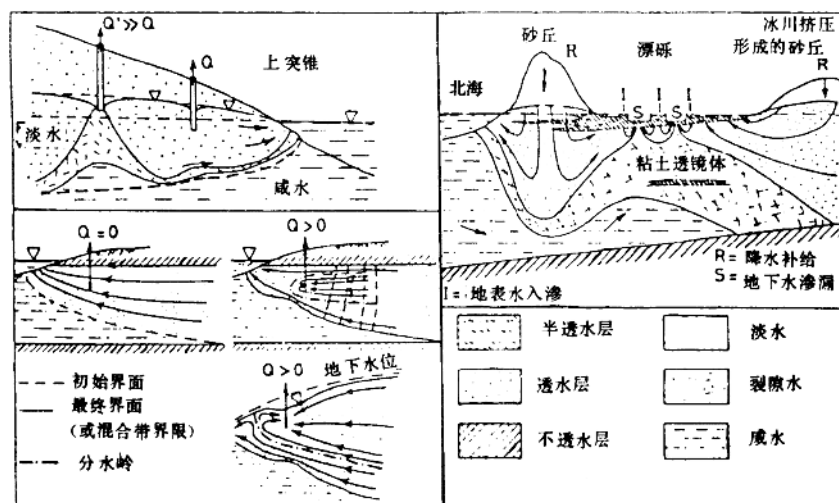


图6. 抽水井下盐锥的形状，当淡水水流充足时，井水较浅，径流也小分，离界与水体与作用面不相切，从而阻止了盐水向水井的径流。如果没有停滞点的话，混合带将不停的冲刷，从而阻止了混合带厚度的过度增加，图的右边部分表明了荷兰围田区相类似的现象

作用面以下地下水的开采，使得盐水在排水道和地沟之下堆积(图6)，根据储水层的特性、井或排水沟渗透、以及水的径流的原理，作用面沿垂直方向上升，其下部条件比较稳定，盐水不会到达抽水井或排水沟，而当极端情况出现时，盐水最终会与抽取的水混合。在状态转变过程中，垂直渗透起重要的作用，渗透水平较低的岩层，能有效地阻止水锥的形成，这可以解释为什么在外观上相似的水井会出现不同的形为。因传统的钻井技术对这些地层进行探测和观察十分困难，所以，在这些岩层分较广阔的地区，钻井时，如果没有选择合适的胶合和分离技术，则可能彻底破坏储水层中的淡水水体。

因为作用面上的水流一般都从各个方向向抽水井或排水沟流动，所以，由冲洗作用面所形成的咸水只能由井或排水沟流出。这样，由于咸水比重比海水轻，即使是井或排水沟的底部高出海平面，所抽取的水在一定程度上也会受到盐水的污染。

五、计算方法

许多计算海水入侵海岸带储水层的后果及程度的方法都用GH-DF假说，在条件状态稳

定和储水层几何形状简单的情况下,其结果能近似地描述作用面的深度和盐锋的渗透性,这些在参考书中都有。随后的研究进一步地扩展到渗漏储水层和其它形状水层的情形(Bear, 1979; Van Dam和Sikhema, 1982; Sikhema和Van Dam, 1982)还有人引进了淡水出口宽度和海底形状的修正方法(Cooper等, 1964)。这些研究都可以扩展到瞬变状态(Van der Veer, 1977),一般对于应用实践来说,其精确度是可以接受的,尽管在近岸的地区或海水出口处误差增大,但同它们所允许的数学简化相比,这些假设都是可以“允许的”。

在稳定状态下,储水层盐锋渗透符合 $N=kb^2/q$,其中 k 是水平渗透率, q 是海口淡水流量, b 是储水层厚度。混合带厚度随 N 、储水层分散率和水力扩散率的增加而增加。

虽然可以用数字来描述作用面的运动(Bruggerman, 1975; 1985),但当变量 q 改变时,没有合适的简单公式适合计算盐水锋的运动,尽管也有一些近似的计算方法发表(Bear, 1979; Bear和Kapuler, 1981; Bear等, 1985),但它们都假定有一明显的作用而存在,由于淡水和盐水中都有垂直流速的参与,使GH—DF原理的直接应用受到了限制。即使应用了它,一些问题也不能解决。

要获得能将各种变量、特别是那些对管理有意义的变量联系起来的简单化的计算方法,还需要做许多努力。对混合带较厚、非均质岩的或基性的储水层来说,没有简单的计算方法。

另一类需要加强研究的问题是在淡水抽水工程下盐水锥的形成。六十年代形成了许多简单的解决办法,但都假设没有一明显的作用面(Custodio, 1976; Bear, 1972; 1979; Streltavos和Kashef, 1974)。Strack (1976)提出过一个解决盐水锋向海岸水井运动的简单方法。

几年前,曾用两种互不混合液体来进行Hele-Shaw模型的模拟,以便更充分地了解盐水锋的形状。对该模型的不同公式进行过比较,但工程价值都不高。虽然Christensen和Even曾对这一模型的原理进行过描述,但也仅停留在原理的研究阶段。

建立一个数学模型困难并不大,特别是当混合带较薄和能应用GH—DF假设的时候,但要解决问题则是困难的,不仅因为两种水流方程为非直线方程(事先并不知道作用面的深度,而它和地下水位一样影响淡水和盐水流厚度),而且因为,在瞬变状态下,垂直流的参与不可忽略,从而影响水平方向的两维模型。地下水位和测压的改变都可以引起作用面深度较大的变化,这意味着有大量的淡水和海水被排出。垂直流的发展和实际作用面的位置都落后于预期的深度,显然GH定律并不能得以很好的应用。

有人曾建议在计算中,作用面深度应当用前一时间段的数值(Anderson, 1976)。虽然在计算中必须考虑这种时间滞后现象,但是这不是一个固定的变量,不能在整个计算过程中都用它,也不能外推到其它问题中去。

当处理有边界的情况时,最简单的办法是不考虑盐水锋的存在,就象在海岛的盐水淡水数学模型,或者象淡水在盐水上边形成一个浮泡的模型中一样。已发表的结果似乎都可以接受,特别是在近似稳定状态下。

盐水锋基部的参与——以及锋的尖端在一个封闭或半封闭的储水层中——引出了更多的问题,它们代表了由两种流体向一种流体变化的情况。他们是液体的内部边界,在接近稳定状态下,它们改变自己的位置从而增加了问题的复杂性。

对这一问题已有不同的解决办法(Sa da Costa和Wilson, 1979; Ferrer Polo和Ramso Ramis, 1983),其效果可以和一些分析结果相比,但还没有经野外研究证实。当用时间间隔

较大的离散方学来研究这种两种液体时,往往产生不稳定性 (Aziz和Setari 1979; Andrews, 1981)。

对混合带的研究较少。不仅因为分析方法困难和费时间,而且大量用来校正的野外观测数据都不总是可用的。同时,数值的不稳定因素并不容易克服。对流的数值解必须很精确,才不桥使数值扩散掩盖物理扩散的效果,或者掩盖只在较小的间隔中准确而在较大的间隔中摆动的结果。并且扩散系数很不容易确定,至少在较小的尺度范围内,它可能与时间相关在研究中甚至很少考虑实际存在的大水流系统,即使考虑,也仅限于垂直流的测定。而假设没有横向流,几年前在这领域已有突破性进展 (象 Sa da costa 和 Viniso, 1979; Custodio等1985), 但提出来的模型并没有得到充分的利用,也没有完全建立其应用价值。

Pinnder和Cray (1977) 曾应用扩散有限元模型对Cuttler地区进行过研究并得到了稳定解,他们还降水渗入波动进行了模拟并与观测结果进行了比较。水平和垂直方向的渗透率 (390和0.8米/天) 并不相似,在交叉流的中心有一个渗透较强的地区,对结果产生影响。只能用实际上有误差的方法来测定纵向和横向扩散系数值(6.7和0.67米,见图7)。

六、海水入侵的物理化学性质

混合带的水体并不一定是当地淡水和盐水的简单混合。由于氯离子浓度是稳定的,所以每种水体的百分含量都可以用离子的浓度计算。在通气状况较好的环境中,也可以用溴化物或硫酸根离子表示。其它主要成分都能通过阳离子交换来代替。如果能正确地阐明阳离子交换过程,就可以指明这些过程的动力学过程。混合带朝向陆地方向稳定发展的水体,

Ca^{2+} 减少而富积 Ca^{2+} , 这种现象甚至在粘粒含量较低的石灰岩和沉积物中都可以发现。而向海进去的混合带水体、或被淡水冲洗的海洋则会产生相反的效果,混合带水体中 Na^{+} 富积而 Ca^{2+} 减小。

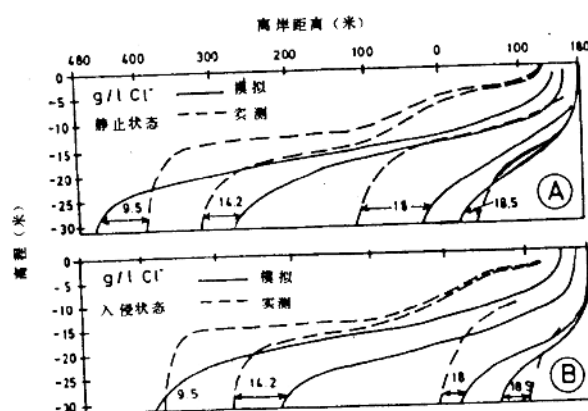


图7. 佛罗里达里比斯坎湾混合带有限元素的数学模拟与观察数据的比较(Kohout和Klein, 1916), A表示半稳定态的情况, B表示经强烈降雨冲击后180个小时的变化, 480米内陆的潜水数高度从0.4米上升到1.4米, 50小时后恢复到原始值(引自Pinder和Cray, 1977)

在厚的静止的混合带或者沿岸和海平面下封闭储水层里移动较慢的地下水中,由于有而质的存在离子交换现象伴随有氧化还原过程,如硫酸根的还原等(Lawrence等1976, Custodio等1971,1975)。

当环境矿物是方解石时,轻度过饱和的海水和接近饱和淡水相混合,产生一种溶解能力较强的水,能使碳酸盐溶解,当沿混合带的水流不断时,这一过程可以维持下去。经过一段地质过程之后,逐渐引起化学风化和“喀斯特化”,从而导致石灰岩沿岸地区渗透率增加,优势水道和空洞,以及一个陆向发展的盐水锋的形成。这种现象在Florida和Yucatan都有较深入的研究(Hanshaw和Back,1979; Back等1984),在其它许多海岸地区,如西班牙的Catalonia和Baleavic岛的海滨,也都被充分地认识到了(Custodio, 1981),这增加了在石灰岩沿岸地区开发淡水资源的难度。混合带水体中 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 含量增加,阳离子交换和氧化还原过程影响着方解石的沉淀和溶解。

混合带的其它过程表明其内部发生着缓慢的大理石化过程(Mangarits等, 1980)。所以,大理石层可能就是古混合带的位置。混合带这一不断的大理石沉积过程能够解释有关毛孔水中Mg/Ca比值减少的报导。它也可能导致岩脉渗透率的下降。

碱性地区淡水和盐水的富积使得储水层的粘粒以聚积状态存在,水可以通过被粘粒部分充持的微孔流动。当咸水形成时,Z型分布变化,粘粒结合膨胀,可能运动并阻塞细窄的微管空隙,所以,当敏感的粘土矿物,如蒙脱石形成时,将显著地降低地层渗透率(Goldenberg等1984,)。已有几次报导表明当淡水注入盐水储水层时,发生这种现象,导致排水井废弃(Custodio, 1985)。在自然条件下,当海洋形成物被陆地淡水冲洗时,也可能发生这种情况。三角洲粘粒和硅酸盐地层较低的渗透率在一定程度上也可能与这种现象有关,这可能是一个研究的重点,因为对其详细的研究还很少。

在许多储水层系统中,淡水和盐水单元交替,渗透压强度增强(Greenberg和Mitchell in Witherspoon和Mitchell, 1971; Marine和Fritz 1981)。淡水和海水间的渗透压约有24个大气压,足以使水力势的分布彻底改变。但低渗透的弱含水层具有很低的渗透效果,上述现象并不明显,渗透压梯度全部通过渗透压力较低的粘土层,但水和离子的运动都很缓慢,使得只有较薄的岩层才有实际意义。

环境同位素在储水层研究中起着越来越重要的作用。不仅分析设备和方法已趋完善,而且基础理论已经建立。虽然多数环境同位素的著作中都没有对海岸带储水层作特殊的讨论,但在某些论文(如由国际原子能协会组织的水文学中的同位素专题讨论会)和著作中包含了这方面的内容和资料(Fritz和Fontes, 1980)。一般来说,陆地水和海岸水以及在它们的混合物中同位素的组成都有根本的不同。

水中的 O^{18} 和氦对研究混合问题和咸水的来源非常有用。 C^{13} 不仅对上述问题,而且对磷酸盐环境地水体行为的研究也有价值。由于海洋与现代有机质之间已形成十分密切的平衡。所以当对系统的地球化学特征和对水体混合性质了解以后, C^{14} 有助于时代的研究。硫的同位素($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$)对硫酸盐来源的研究也十分有益。在海水及其蒸发物中,硫酸盐中富含 ^{34}S ,而在降水中,其富积程度降低,由硫化物转化的硫酸盐接近于标准含量或逐渐降低硫酸盐中氯的同位素组成,对解决问题也可能有益。

海岸带储水层中氦的研究的价值并不怎么清楚,但它能来说明近期陆地水的参与。现代海水中氦的含量虽然低,但随着深度、海岸带形成过程和气候变化而变化。