国家水污染模拟与控制重点开放实验室
中 国 地 质 大 学 “ 2 1 1 ” 工 程 联合资助项目

沿海地区地下水环境系统动力学方法研究

陈鸿汉　张永祥　王新民
任仲宇　王红旗

地质出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 提 要

本书分三篇。第一篇为沿海地区地下水水环境系统动力学，作者在总结大量国内外研究成果的基础上，系统介绍了沿海地区地下水环境系统特征。第二篇为沿海地区地下水环境系统研究方法，系统介绍了沿海地区地下水研究和调查的方法，高浓度地下水流和溶质运移数学模型及数值方法。第三篇为应用部分——以山东省莱州湾南岸潍河下游海咸水入侵为例详细介绍了系统动力学研究方法在沿海地区地下水环境中的应用。

本书可供从事水资源环境勘察、评价和环境工程及有关专业的技术人员参阅，也可供专业院校水资源、环境工程专业师生或有关研究人员参阅。

图书在版编目（CIP）数据

沿海地区地下水环境系统动力学方法研究/陈鸿汉等著 .-北京：地质出版社，2002.2
ISBN 7-116-02871-4

Ⅰ.沿… Ⅱ.陈… Ⅲ.沿海-地下水动力学 Ⅳ.P641.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 095607 号

责任编辑：祁向雷 吴霞芬 陈 磊
责任校对：李 玫
出版发行：地质出版社
社址邮编：北京海淀区学院路 31 号，100083
电 话：（010）82324508（邮购部）
网 址：http：//www.gph.com.cn
电子邮箱：zbs@ gph.com.cn
传 真：（010）82310759
印 刷：北京印刷学院实习工厂
开 本：787×1092 1/16
印 张：9.5
字 数：220 000
印 数：1—800 册
版 次：2002 年 2 月北京第一版·第一次印刷
定 价：24.00 元
ISBN 7-116-02871-4/P·2038

（凡购买地质出版社的图书，如有缺页、倒页、脱页者，本社发行处负责调换）

前　言

资源、环境、人口是世纪之交人类所面临的重大课题，对于沿海地区而言，这个问题更为突出。因为该区的生态环境十分脆弱，极易受到人为因素的影响和破坏。我国是沿海地区面积分布较广的国家之一，涉及13个省、区。从东到西绵延4350 km，宽约800 km。此外该区又是我国经济高度发达的地区。

沿海地区的主要水环境问题是上游地区拦截地表水，下游地区过量开采地下水，导致海咸水入侵，使本已紧张的淡水咸化，同时引起一系列新的环境地质问题，如水质恶化、土地盐碱化以及生物地球化学病害等。随着生态环境质量的不断恶化，有些地区已步入人口剧增—资源破坏—生态环境恶化的恶性循环的轨道。上述问题严重制约着该区社会、经济的发展和人民生活水平的提高。沿海地区流域开发过程中引起的生态环境系统问题往往是一种由多级子系统问题组成的多层次、多目标非线性开放性巨系统问题。这些区域性的环境问题主要是由人类的众多开发活动对环境产生的累积效应或影响造成的。这样的累积影响跨越较大的空间与时间尺度，往往未能被单个项目或常规的规划与决策过程所包括。要有效地解决这些大环境问题，就必须全面深入地了解和研究环境影响的发生与发展规律，并采取科学的方法正确地对其进行评价与管理。

目前总的趋势是，将沿海地区地下水环境系统看成为一个多层次、多目标、多功能的非线性开放动力系统，它在四维时空上受控于多个子系统，如地质环境动力子系统（包括岩石动力子系统、地质构造动力子系统、水动力子系统、水化学动力子系统等），人工动力子系统（包括社会经济政治动力子系统、人为水动力子系统、人为水盐动力子系统、人为地热动力子系统等）。这些动力子系统在同一四维时空相互作用，它们形成的水环境动力系统已不是各个子系统之间简单的叠加，而是远离平衡态的非线性动力系统，该系统发展过程具有渐变阶段和突变阶段。

因此，对沿海地区地下水环境动力系统的研究必须抛弃单一子系统和单一因素的零散孤立研究方式，必须应用“系统动力学”的概念和思路，更新观念，在理论和方法上实行多学科交叉联合，以求在沿海地区水环境系统的评价、开发与保护防治上有所前进。

此外沿海地区流域水环境系统问题的解决，仅从自然科学角度出发是难以实现的。国际上将人-地系统、自然科学与社会科学研究相结合，这已成为应用科学的重要发展方向。因此，吸收国际先进经验将沿海地区流域水环境系统评价、开发、保护防治与社会经济发展结合起来，这对研究沿海地区流域水环境系统优化与社会经济发展的耦合模型是十分重要的。

系统动力学（System dynamics）由Forrester创立于20世纪60年代初期，80年代以来，系统动力学被应用于地球科学研究，从而大大地推动了地球科学向定量化、模型化发展的步伐。同样，它将成为研究沿海地区流域水环境系统的有力工具。

总之，目前国内外的研究尚缺乏系统性的方法。本专著是国家水污染模拟与控制重点开放实验室和中国地质大学 211 工程联合资助项目的研究结果。作者在大量总结国内外研究成果的基础上，针对沿海地区流域地下水环境系统中的渗流动力场、水化学动力场特征进行了较深入的探讨，最后以山东省莱州湾南岸潍河下游海咸水入侵为例详细介绍了系统动力学研究方法在沿海地区地下水环境中的应用。其成果可广泛应用于其他相类似地区的地下水环境系统研究。

项目的研究成果表明：

（1）沿海地区地下水环境系统是一个多层次、多目标、多功能的非线性开放动力系统，它在四维时空上受控于多个子系统。总体来讲，地下水环境动力学系统具有整体性、关联性、结构性、组织性和层次性的特点。地下水环境系统动力学的方法，可归纳为：整体分析、关联分析、反馈分析、动态分析、模型量化、模拟预报。

（2）海咸水入侵是沿海地区最为普遍的水环境问题，它严重阻碍了当地的生产发展和人民生活水平的提高，同时它还带来一系列生态环境问题，必须采取行之有效的措施进行治理。海咸水入侵的根本原因是过量开采地下淡水资源，致使海咸水系统的水头高于淡水系统的水头，形成有利于海咸水入侵的流场。因此，要防止海咸水入侵，必须按照“以补定采”的原则开采地下淡水资源，即多年平均开采量必须小于含水系统得到的多年平均补给量，同时还需充分考虑地下水开采井的合理布局。

（3）为了真实刻画含水层中海咸水的运移，描述高浓度地下水水流和溶质的运动。在运动方程中考虑了地下水运动的三种驱动力，一是水头差引起的外部驱动力，它使地下水呈现强迫对流的流动状态；二是密度差引起的重力，它导致地下水出现自由对流的流动状态；三是粘度引起的切应力，它导致对地下水运动的阻滞。在此基础上，推导了密度和粘度变化时水流方程和溶质运移对流-弥散方程表现形式。

（4）海咸水入侵过渡带动态系统是复杂的多相系统，其中岩土、水与盐分相互作用，特别是岩土对 Cl^-、Na^+的吸附作用直接影响海咸水入侵动态系统的时空分布和演化特征。在项目研究中通过建立海咸水入侵动态系统砂槽模拟实验，为研究海咸水入侵过渡带的形成、发展和演化机制提出了一条新的研究方法，并取得较理想的实验结果。通过 Cl^-、Na^+吸附实验，进一步证实了吸附（解吸）作用在海咸水入侵过程中的作用，并得出了可靠的吸附等温方程，为建立海咸水入侵动态系统模型提供了良好的参数。

（5）为了准确描述海咸水入侵过程中地下水中溶质运移行为，必须考虑地下水中阳离子交换和溶解沉淀的影响，建立阳离子交换和溶解沉淀反应数学模型。研究区咸淡水过渡带主要存在 Na^+和 Ca^{2+}之间的离子交换，以及 $CaCO_3$ 的溶解沉淀。尽管研究中溶解沉淀没有考虑固相界面溶蚀过程和界面附近对流，离子交换没有考虑 Na^+和 Mg^{2+}、Ca^{2+}和 Mg^{2+}等离子交换，模拟结果还是较好地体现了研究区阳离子交换和溶解沉淀对物质运动的影响。

（6）建立了描述海咸水入侵并考虑阳离子交换和溶解沉淀的三维数学模型。模型考虑了阳离子交换、溶解沉淀、潜水面变化、含水层底板起伏、抽水井开采、面状补给排泄等多种因素。实践证明模型是合理的、可靠的。它不仅再现了地下水位动态、含水层内地下水流速的分布和 Cl^-、Na^+、Ca^{2+}和HCO_3^-浓度的变化规律，而且还反映了含水层内阳离子交换和溶解沉淀对 Na^+、Ca^{2+}和HCO_3^- 浓度变化的影响。因此，它为含水层内物质输运、海咸水入

侵的预测和防治提供了科学依据。

（7）用改进的非线性混合动点特征有限元法求解高度非线性的溶质运移对流-弥散模型，并设计了一套迭代方法求解高度非线性问题，有效地消除了数值弥散，特别是过渡带海咸水入侵峰面处的数值振荡。

（8）模型的研究为防止海咸水入侵指明了方向。产生海咸水入侵的根本原因是过量开采地下淡水资源，破坏了咸水体和淡水体之间的平衡，形成有利于海咸水入侵的流场。因此，在沿海地区，为了防止海咸水入侵，一方面必须合理开采地下淡水，积极采取节流与开源并重的方针，向节水型经济转化；另一方面修建地表或地下水库，提高流向海洋的丰期洪流；同时还必须开展地表水、地下水和外调水的统一调配、管理的研究。

本专著是集体智慧的结晶，各章的编写分工如下：前言，陈鸿汉；第一章，陈鸿汉、王红旗；第二章、第三章，陈鸿汉、张永祥；第四章，陈鸿汉、任仲宇、王红旗；第五章，陈鸿汉、张永祥；第六章、第七章，张永祥、陈鸿汉、王新民；第八章、第九章，陈鸿汉、任仲宇；第十章，张永祥、陈鸿汉、王新民；全书由陈鸿汉统稿。

在本专著编写出版过程中，毕二平、李旭东、刘明柱同志作了大量的工作，特别是朱远峰研究员和吴霞芬对本专著的编辑提出了大量宝贵意见，在此一并表示感谢。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

前　言

第一篇　沿海地区地下水环境系统动力学 …… (1)

1　地下水环境系统动力学理论及分析方法 …… (2)

1.1　系统科学论的基本概念和研究方法 …… (2)

1.2　地下水环境系统动力学理论及分析方法 …… (5)

2　沿海地区地下水流动力系统特征 …… (8)

2.1　基本原理 …… (8)

2.2　滨海地区的咸-淡水体特征的影响因素及其类型 …… (18)

2.3　滨海地区类型 …… (26)

2.4　滨海地区地表水对地下水的影响 …… (34)

3　沿海地区地下水化学动力系统特征 …… (37)

3.1　盐度和水质 …… (37)

3.2　淡水、海咸水和混合水 …… (38)

3.3　离子交换现象、碱金属离子与氯化物比率 …… (40)

3.4　其他化学变化 …… (43)

3.5　在滨海含水层的其他咸地下水 …… (45)

3.6　微量和痕量组分 …… (47)

3.7　稳定同位素在咸-淡水关系研究中的应用 …… (48)

3.8　环境放射性同位素在咸-淡水关系研究中的应用 …… (49)

3.9　地下水温度 …… (51)

4　人类活动对滨海含水层中咸-淡水关系的影响 …… (53)

4.1　直接影响 …… (53)

4.2　间接影响 …… (57)

4.3　与地下水开采有关的其他影响 …… (59)

4.4　混合的地表水-地下水情形 …… (60)

第二篇　沿海地区地下水环境系统研究方法 …… (61)

5　研究和调查的方法 …… (62)

5.1　一般水文地质研究 …… (62)

5.2　编录 …… (63)

5.3　观测井 …… (64)

5.4　盐分浓度测井 …… (65)

5.5　温度测井 …… (68)

5.6　钻孔测量的代表性 …… (68)

5.7 地下水采样 …… (68)
5.8 水文地球化学制图 …… (71)
5.9 结果解释 …… (76)
5.10 地球物理测井 …… (76)
5.11 地球物理调查方法的限制条件和用途 …… (78)
5.12 人工示踪剂的应用 …… (79)
5.13 弥散带的识别和监测 …… (82)
5.14 遥感 …… (84)
6 地下水水流及溶质运移问题的数学模型和数值方法 …… (85)
6.1 海咸水入侵数学模型研究概况 …… (85)
6.2 海水入侵的突变界面数学模型和数值方法 …… (86)
6.3 海水入侵的对流-弥散模型及其数值解法 …… (95)
7 高浓度地下水运动水流和溶质运移数学模型及数值方法 …… (101)
7.1 高浓度地下水运动水流和溶质运移问题研究概况 …… (101)
7.2 高浓度地下水运动方程、水流方程和溶质运移方程 …… (101)
7.3 考虑吸附解吸和溶解沉淀的溶质运移数学方程 …… (104)
7.4 数学模型及数值方法 …… (107)
第三篇 应用部分——以莱州湾地区为例 …… (109)
8 研究区地质、水文地质特征 …… (110)
8.1 自然地理及地质特征 …… (110)
8.2 地下水系统特征 …… (112)
8.3 海咸水入侵动态系统趋势面分析 …… (112)
8.4 海咸水入侵动态系统规律及其原因分析 …… (117)
9 海咸水入侵动态模拟实验和水岩作用参数 …… (120)
9.1 海咸水入侵过程的砂槽动态模拟实验 …… (120)
9.2 岩土吸附模拟实验 …… (125)
9.3 海咸水入侵动态系统中水岩作用参数分析 …… (128)
10 海咸水入侵动态系统的三维数值模拟 …… (132)
10.1 基本原则 …… (132)
10.2 数值模拟与验证 …… (133)
10.3 结果分析 …… (138)
主要参考文献 …… (140)

第 一 篇

沿海地区地下水环境系统动力学

1 地下水环境系统动力学理论及分析方法

1.1 系统科学论的基本概念和研究方法

1.1.1 系统论的基本概念

自然界和人类社会中的一切事物都不是孤立存在的，而是相互制约和相互联系的，它们形成各式各样的系统。

“系统”这一概念，来源于人类的长期社会实践，最早出现于古希腊语中，是部分组成整体的意思。由于受到科学技术历史发展的局限，“系统”这一概念一直未受到应有的重视。在20世纪40年代，美国在工程设计中应用了系统分析方法并获得了巨大成功，直到50年代才把“系统”的概念逐步明确化、具体化，并在工程技术系统的研究中得到广泛的应用，60年代以后又进一步推广到人类社会经济活动的各个领域。

特别是近30年来，在复杂系统的理论研究和实际应用方面，各个领域的科学家们已经取得了重大进展和突破。70年代末至80年代初，钱学森教授在分析、总结和概括复杂系统理论和应用成果的基础上，提出并建立了一门崭新的学科——系统科学和它的理论基础——系统学。由于系统科学广泛应用于各个学科领域，因此又被称之为横断科学。前苏联学者茹可夫称它为“彻底改变了世界科学前景和当代科学家的思维方式”。

目前，有关系统基本概念的解释较多，钱学森教授把系统定义为：极其复杂的研究对象，即由相互作用和相互依赖的若干组分组合成的具有特定功能的有机整体，而且这个“系统”本身又是它所从属的一个更大的组成部分。

根据人类研究问题对象的属性，可分为不同类型的系统。例如，根据系统的组成成分，输入、输出等数量与作用的复杂程度，可分为复杂系统或简单系统；按照状态的时间特征，可分为静态系统或动态系统；依据系统与环境的关系，可分为开放系统和封闭（半封闭）系统；根据系统的形成特点和对系统的控制特点，还可分为天然系统和人工系统。

综合有关系统的概念，一般系统具有五个基本特征，即：整体性、相关性、目的性、层次性和环境适应性。

1.1.2 系统动力学概述

系统动力学是在信息反馈控制理论、决策理论、仿真技术和电子计算机应用的基础上发展形成的一门边缘学科。系统动力学是用定量和实验的方式研究社会、经济和管理等活动中的信息反馈特性，研究系统的组织结构、政策的加强作用及在决策和行动中的时间延迟作用

对系统的增长和稳定性的影响，即对系统动态行为的影响。在系统动力学中使用的“系统动态行为”是指系统中变量受系统的组织结构和运行规律支配而外现的变化状况，在这里主要强调了随时间变化（或动态）的行为。

从系统动力学的观点出发，认为所有社会、经济和生态等系统都是反馈系统，其系统的动态行为特性是由该系统固有的、规则的、并且是可以识别的结构决定的。系统结构是指系统各组成部分之间和反馈回路之间的联系方式。在系统中，这种相互联系的方式往往比各部分本身的特性更重要，原因如下：

（1）系统动力学的研究对象主要是动态反馈系统；

（2）从系统动力学研究所涉及的领域看，研究对象主要是社会、经济、管理、科技和生态等反馈系统；

（3）从系统动力学研究所涉及的范围看，其研究对象主要是世界、国家、地区和城市等反馈系统。

实际中，系统动力学的研究对象是十分广泛和复杂的，人类很难从不同的角度完整地列出所有的研究对象。在这种情况下，为了更好地分析和把握系统动力学的研究对象，需要对其研究对象的特性有深入的了解。通常，系统动力学的研究对象具有下述四个特性：

（1）复杂性。复杂性主要表现在两个方面，一方面，在系统中包括有许多因素，例如，在一个企业系统中包括有产、供、销等子系统，其子系统中又必然包括有技术、设备，人员、原材料供应、动力、能源、采购人员能力和推销员能力等因素，除系统内的因素外，还存在有系统的环境因素，这些因素都将影响系统的行为；另一方面，系统的各因素之间存在着错综复杂的联系，通过上述联系，系统中因素组成了多个反馈回路，这些回路在系统运行的各个阶段所起的作用不完全相同，因而使系统行为产生不同形式的变化。

（2）动态性。动态性反映了事物总在不断发展和变化的自然规律。根据辩证唯物主义的观点，世界是永恒运动着的物质世界。运动是物质的存在形式，是物质的根本属性，也是物质多样性的表现。物质的运动是客观、绝对、永恒和普遍的，整个宇宙从微观世界到宏观世界，从无机物到有机物，从生物界到人类社会以及人的思维，无一不在运动着，无时不在发展变化着。同时，物质的运动必定采取一定的形式，而物质运动的形式是多种多样的，运动形式的多样性是由不同运动过程中矛盾特殊性决定的。系统动力学的研究对象是物质世界的一部分，它始终处于不断发展变化的过程之中。这种发展变化的具体表现是，应用系统动力学方法研究的系统是动态的反馈系统，系统的要素、结构和行为都是随时间而变化的，这同用其他某些方法研究的静态系统是有本质上的差别的。

（3）非线性。非线性描述了用系统动力学方法研究的系统中许多因素之间存在着的一类重要关系。这种非线性关系对系统的行为有着重要的影响，在实际中，社会、经济和管理等系统都是非线性的系统，这类系统中存在许多非线性关系。例如，在一个企业系统中，某种产品的产量与利润之间的关系就是一种非线性关系。在系统中存在非线性关系时，要分析和设计系统通常是十分困难的，这是因为现代的数学方法和现有的系统研究方法还不能普遍地解决非线性问题。因此，人类在研究这类问题时常常忽略其系统中的非线性关系，或将非线性关系线性化。这种研究问题的方法在某些特殊情况下也是可以得到一些有益的结论的。但在多数情况下，却难以得到有关系统研究的正确结论。

（4）时滞性。时滞性又称延迟性，它描述了系统或系统的某一部分需要一段时间才能反映激励信号的作用的特性。例如，在一个企业系统中，企业为了适应市场的需要，投入一定资金扩大生产能力，从资金投入到形成生产能力共用了 2 年时间，这 2 年时间则是在投资到投产（提高生产能力）之间存在的滞后时间。在社会系统中，公布实施某项政策后，要使其政策真正落实也是需要时间的，这段时间也是滞后时间。这种特性说明，事物从一种状态变为另一种状态时，常常不能瞬间完成，而需要一段时间。这种特性对系统的行为将产生重要影响，也会给正确的系统控制带来困难。

1.1.3 *系统动力学研究方法*

系统动力学分析的研究对象是复杂的大系统。这种大系统的特征是在系统中存在着许多矛盾因素和不确定因素。人类从长期的工程实践中认识到，要对系统的有关重大问题进行正确决策，就必须进行系统动力学分析。

系统动力学分析是对研究对象进行有目的、有步骤的探索研究过程。系统动力学分析除了研究系统中各要素的性质，解决系统要素的具体问题之外，还着重研究和揭示各要素之间的有机联系，使系统中各个要素的关系协调，达到系统总目标最优的目的。

系统动力学分析的过程是对系统的分解和综合。所谓分解，就是研究和描述组成系统的各个要素的特征，掌握各要素的变化规律；所谓综合，就是研究各个要素之间的联系和有机组合，达到系统的总目标最优。系统分解和综合的过程都要建立和运用数学模型。各种数学方法是系统分析必备的手段。

通常，系统动力学分析的研究方法包括：确定系统的功能和目标，调查系统的结构和资源条件，调查系统的环境约束，研究系统的要素并对其模型化，实现系统的综合（最优化）并为系统设计和系统实施提供最优方案。

系统分析的方法和步骤对于不同的问题并不是一成不变的，要根据具体研究对象确定适用的分析程序。作为一般的系统分析问题，大体可按如下步骤进行。

（1）明确问题的范围和性质。根据问题的范围和性质确定问题的要素及要素之间的相互关系，以及它们与环境间的关系。根据具体条件，实事求是地反映系统内部结构及其与外界的联系。

（2）设立目标。目标就是系统的决策者希望达到的理想状况。目标的确定要经过大量的调查和分析。只有明确目标，才能作出决策分析。系统目标往往不止一个，常是多个目标的集合。

（3）收集资料。根据系统分析的目标和要求，调查与系统要素及目标有关的各种资料和数据。这些数据可以从以前的或当前的调查、实验、观察、统计和记录中获取，也可以根据要求进行补充试验和研究。

（4）建立模型。这里的模型包括系统的结构模型和优化模型。通过模型拟和来识别系统的主要因素和关键参数。模型力求简明扼要。

（5）检验模型。通过数据（与建模时所用的数据相独立）对模型进行验证。

（6）综合分析。运用数学模型和电子计算机技术，综合协调各子系统之间的关系，分析研究系统的各种可能的方案，并提出系统动力学分析的最终结果或方案。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

1.2　地下水环境系统动力学理论及分析方法

1.2.1　地下水环境系统

现代科学创立发展的三大综合性基础理论——系统论、信息论、控制论，推动了技术科学的飞速发展，正是由于科学技术的迅猛发展，人类从自然界（包括地下水环境系统）中所获取的信息量日渐增多，因而地下水环境系统的研究理应充分利用其信息，研究地下水环境系统中各元素的特征。但因地下水环境系统属于开放系统，它与外界环境有物质、能量和信息的交换，因此系统中各元素的研究成果还具有多解性和外延性。为了使研究成果具有更大的置信度和更好的精确性，就必须将系统元素（子系统）的研究成果与外部环境（地质环境子系统、气象环境子系统、渗流动力子系统、水化学动力子系统、人工社会环境子系统等）的研究成果综合叠加，即以各子系统研究成果的交集来确定所研究系统的结构性，如图 1.1 确立地下水环境系统的综合研究内容文氏图。

地下水环境系统是由自然环境系统和社会经济系统复合组成的开放型复杂系统。它是具有四维时空性质的能量系统。用数学符号表达为：

$$SBE=\left\{ s_{\mathrm{g}},\ s_{\mathrm{W}_1},\ s_{\mathrm{W}_2},\ s_{\mathrm{W}_3},\ s_{\mathrm{W}_4},\ s_{\mathrm{z}} \,\middle|\, x, y, z, t \right\}$$

其中：s_{g} 为地质环境子系统；s_{W_1} 为大气降水子系统；s_{W_2} 为地表水子系统；s_{W_3} 为渗流动力子系统；s_{W_4} 为水化学动力子系统；s_{z} 为人工社会子系统；x，y，z 为空间坐标；t 为时间。

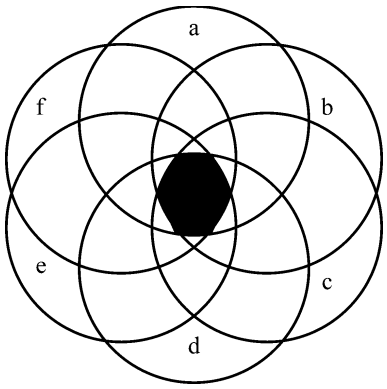


图 1.1　地下水环境系统研究内容文氏图

a—地质环境子系统；b—大气降水子系统；c—地表水子系统；d—渗流动力子系统；e—水化学动力子系统；f—人工社会子系统；阴影部分为地下水环境系统

地下水环境系统属于空间 x，y，z 和时间 t 的完全集合，说明地下水环境系统有一定展布形态和边界状态，随着时间变化，则可以再生或消亡。地下水环境系统与其他岩石圈、水圈、大气圈和生物圈的交集为系统的边界。地下水环境系统的基本构成元素——地质环境子系统、气象环境子系统、渗流动力子系统、水化学动力子系统、人工社会子系统和空间结构要素系统是系统的物质组成，地下水环境系统的形成受自然地质环境系统和社会经济系统的双重控制。

首先，地下水环境系统的形成受自然环境系统的制约。自然环境是由自然界组成的物质、地质结构和地质内外动力作用共同形成的一个复杂系统。地下水环境系统与自然地质环境系统通过各种地质作用，即物质和能量的交换作用而互相影响。它随着时间的推移，持续不断地发生演化与发展，并在长期演化过程中，逐渐建立相对的平衡与稳定。例如由于气候环境不同，对岩石造成不同程度的风化作用，直接影响岩石物理力学性质的变化；气候环境同样直接影响不同地区的水文地球化学特征，气候的纬度分带性既控制了生态

系统，特别是森林植被分带性，同时也控制了水文分带特征，以及地下水的分带性。在地貌条件控制下，高山或高原地区又反映出明显的垂直分带规律，形成不同地带的自然生态环境特征。气候的季节性或多年周期性变化，也直接或间接影响水文地质、工程地质条件的周期性变化。地壳上升运动能使侵蚀作用加强，导致山坡发生崩塌、滑坡或泥石流等地质现象。

另一方面，地下水环境系统通过人类各种活动，与社会经济系统发生紧密联系，并互相制约，互相影响。人类通过科学技术，可以利用地下水自然环境，也可以破坏地下水自然环境。例如，人类由于工农业生产发展和人民生活水平提高，需要开采大量地下水资源。开采过程中，由于不注意环境的合理保护，经常产生一系列环境地质问题，如地面塌陷、土壤沙化、水资源酸化和沿海地区海咸水入侵等。

现代科学的进步，大大地推动了生产力发展，提高了人民生活水平。合理运用现代科学技术，按科学规律办事，不仅能促进生产，保护环境，还可以起到改善环境的作用。相反，若违背自然界的客观规律，就会破坏自然环境，使国民经济建设和人民生活遭受严重损失。

随着人口的剧增、国民经济的高速发展及科学技术的进步，人类对各类资源以前所未有的规模进行开发，同时，造成各种环境地质问题。地下水环境系统动力学主要是从地球系统科学观点出发，运用系统分析方法研究地下水自然环境系统和社会经济环境系统特征及其他们之间相互作用和关系的一门科学。它亦可称为人-地系统科学，既属于自然科学的范畴，又包括社会科学的内容，同时又是环境科学和力学的重要组成部分。

如果把地下水环境作为行为系统，其他的子系统作为原因系统，则这些动力子系统在同一四维时空中相互作用，相互叠加，共同作用于地下水环境系统，所形成的综合动力系统已不是各子系统之间简单的叠加，其效应往往是远离平衡态和非线性的，使地下水环境系统演化过程具有渐变阶段和突变阶段，总之，地下水环境系统是远离平衡态的四维时空非线性动态开放系统。

1.2.2 地下水环境系统动力学方法

地下水环境系统动力学方法，实质是系统动力学方法在地下水环境系统研究中的应用。地下水环境系统动力学分析方法，意味着用综合科学和数学的方法对地下水环境系统问题进行研究和处理。综合科学性反映在要从系统的观点出发，全面地综合地研究地下水环境系统内部各因素（子系统）之间的关系；整体性则是研究地下水环境系统与外部环境之间的关系。数学方法体现在要注意地下水环境系统数量信息的精确性，要开展系统的定量研究，应用模拟技术和最优化技术寻求系统的最优解。

在地下水环境的动力学系统中，各级子系统内部的各因素之间都相互联系、相互影响、相互依赖、相互制约。地下水环境系统动力学研究的现今进展要求抛弃单一子系统和单一因素的零散孤立研究方式，以便对一个地区或一个流域地下水环境系统中的各种动力学过程得出全面、系统和一致的认识；要查明整个地下水环境系统中各种动力学作用之间的联系和制约，以及各动力学子系统之间的控制与反馈机制，以便实现对一个地区或一个流域地下水环境系统中的形成演化动力过程的定量描述。为此在借鉴“系统动力学”的概念和思路基础上，更新观念，在理论和方法上实行多学科交叉联合，以求在地下水环境系统演化预报与防治的理论方法方面有所进展。

地下水环境系统动力学将地下水环境演化中各动力学子系统之间的物质交换、能量交换

及信息交换放在一个大的系统中进行考察和研究。从系统的内容看，地下水环境系统是一个物质系统；从系统的组成要素看，地下水环境系统是一个自然与人工叠加的复合系统；从系统内部各部分相互联系的复杂程度看，地下水环境系统是一个巨型系统；从系统的输入输出关系看，地下水环境系统是一个信息反馈系统；从系统的状态与时间关系看，地下水环境系统是一个动态系统；从系统与外部环境的关系看，地下水环境系统是一个开放系统；从系统的因果关系看，地下水环境系统是一个非线性系统。总的来讲，地下水环境动力学系统具有如下特征：

（1）整体性。地下水环境动力学系统可按研究内容和性质划分出各种子系统，但它的整体并不是各组成部分属性的简单总和，而是相互关联、相互作用的综合结果，因而具有“突变规律”；

（2）关联性。地下水环境动力学系统中的各子系统或各元素之间存在着普遍的相互作用，任何一个子系统或因素性状的改变可引起其他各子系统或元素的变化；

（3）结构性。结构是系统元素相互关系的总和，也是系统存在的组织形式，地下水环境动力学系统具有“结构功能统一律”。在特定的环境条件下，地下水环境系统的功能主要取决它的结构；而功能也会反作用于结构，并在一定条件下导致结构的改变；

（4）组织性。地下水环境系统是一种有序与无序的混合动态演化系统，其演化过程都是非线性自组织过程，都能自动地从有序程度低的简单系统演化为有序程度高的复杂系统；

（5）层次性。地下水环境系统的层次与系统发展演化状态相适应，系统发展演化状态的改变将引起系统层次的突变，各层次之间具有上向因果律和下向因果律，即支承与控制律。

综上所述，地下水环境系统的发展演化是其各子系统或各组成元素相互作用的非线性动态综合结果，各子系统和各组成元素的地位和作用，总是随时间和空间的变化而动态地变化着，应当进行客观的多因素动态分析而不必拘泥于固定的认识。地下水环境系统动力学要求综合地采用历史动态系统分析方法，逐层次综合研究地下水环境系统中的物质流、能量流和信息流，将它们在地下水环境系统历史演化过程中的速率、时间作用、转换及效应有机地组合成统一的因果反馈模型——地下水环境系统动力学概念模型，并逐一分析研究，然后在此基础上，建立系统的数学模型——完整地表达系统整体及其各子系统动力学的方程体系。该方程体系可用于对地下水环境系统及其各子系统的非线性宏观过程进行计算机模拟、预测。地下水环境系统动力学的方法，总的来讲可归纳为：整体分析、关联分析、反馈分析、动态分析、模型量化、模拟预报。

2 沿海地区地下水流动力系统特征

2.1 基本原理

2.1.1 地下海咸水楔形体、界面和过渡带

在一个存在海咸水入侵的含水层中，大陆淡水和海咸水之间有着直接的联系。它们除了在粘滞性上的差异之外，还存在着密度上的差异，这主要是由盐分质量浓度差异引起的。在一个稳定的地下水系统中，淡水通常漂浮在海咸水之上，而且在它们之间存在着一个倾向陆地的咸-淡水界面。淡水体的厚度从咸水楔形体的前缘向海的方向呈现变薄趋势（图 2.1）。

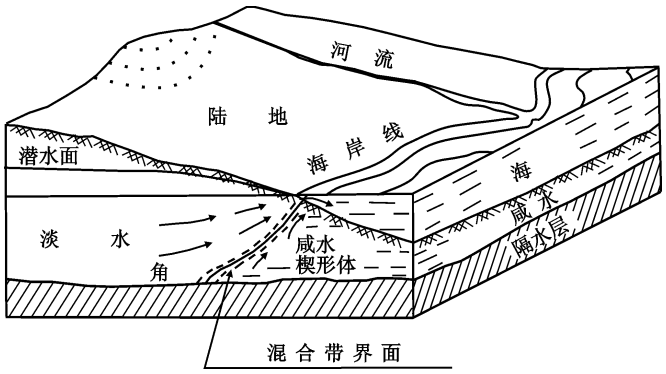


图 2.1 滨海潜水含水层中的海咸水楔形体

因为地下含水层中存在水动力弥散作用，所以咸、淡水之间存在盐分浓度过渡带，即咸-淡水过渡带，咸-淡水过渡带厚度取决于含水层的水动力特征。天然条件下，由于淡水向海洋流动，咸-淡水过渡带厚度向海洋的方向递减，界面测压水头或潜水位（面）的梯度向滨海方向是递增的，因此界面是凹向上的。

依据矿化度或氯化物的含量，咸-淡水过渡带可被定义其盐分质量浓度为海水盐分质量浓度为 1%～95%的咸-淡水分布区。除此之外，其低值可选择等于饮用水标准中的矿化度或氯化物含量上限值，或选取区域淡水天然背景值开始升高时的值；高值则取决于分析精度。在一些高弥散情况下，咸-淡水过渡带占据了饱和含水层厚度的相当一部分，它的上限接近上含水层上边界。而在其他一些情况下，咸-淡水过渡带相对于含水层厚度来说往往较小，通常从实用或便于计算考虑，咸-淡水过渡带可被认为是一个突变界面。

2.1.2　Badon Ghyben-Herzberg 原理的应用及限制条件

滨海孔隙含水层中海咸水深度的最早的定量观测，是由 Badon Ghyben（1889）在荷兰，Herzberg（1901）在德国北部完成。他们开展了各种不同密度、不易混合流体的 U 形管平衡静力学研究（图 2.2）。证明在咸-淡水界面上的任何一点，其两边的水的压强必须相等，且压强等于水深乘以水的容重。即：

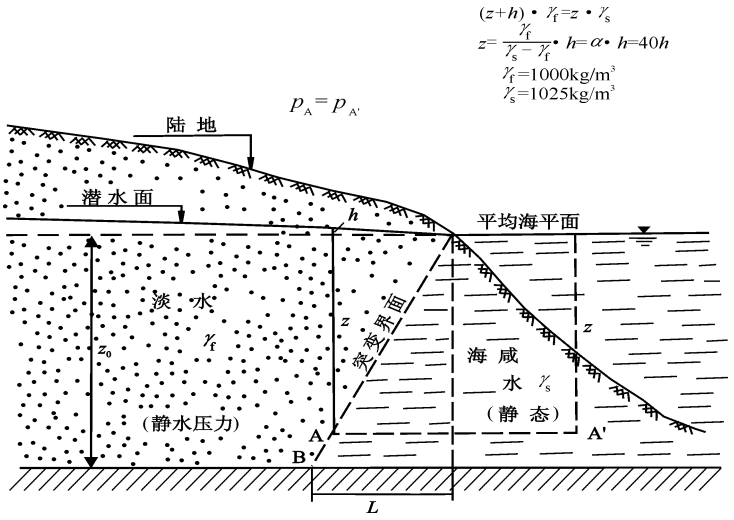


图 2.2　在一个理想化的咸-淡地下水系统中
的 Badon Ghyben-Herzberg 原理示意图

A 点的淡水水压强 $p_A=(h_f+z)\ \gamma_f$[1]

A′点的海咸水水压强 $p_{A'}=z\gamma_s$

$$(h_f+z)\ \gamma_f=z\gamma_s;\qquad 或\ z=\frac{\gamma_f}{\gamma_s-\gamma_f}h_f=\alpha h_f \tag{2.1.1}$$

式中：h_f 是淡水水头（潜水面的海拔高度）[L]；z 是界面低于平均海平面的深度 [L]；γ_f 为淡水容重，当淡水密度 [ML^3] ≈1000 kg/m³ 时，容重 [$ML^{-2}T^{-2}$] 为 9800 N/m³；γ_s 海水容重，当海咸水密度 [ML^{-3}] ≈1025 kg/m³（一般介于 1020 kg/m³～1030 kg/m³ 之间，主要受盐分质量浓度及温度的影响，如图 2.1 所示），容重 [$ML^{-2}T^{-2}$] 为 10045 N/m³。

$$\alpha=\frac{\gamma_f}{(\gamma_s-\gamma_f)}\cong 40\quad(\alpha\text{ 在 }33\sim55\text{ 之间}) \tag{2.1.2}$$

公式（2.1.1）就是著名的 Badon Ghyben-Herzberg 公式，以下简称为 BGH 公式或 BGH 原理。这意味着，在早期研究中，人们认为低于海平面的咸-淡水界面深度大约是该处平均海平面以上淡水水头（潜水面的海拔高度）的 40 倍，而且海咸水楔形体前缘是低于水头等值线 $h_f=z_0/\alpha$，z_0 是含水层低于海平面的底板深度（图 2.2）。在较厚的且渗透性很好的含水层中，若降低淡水水头，由于淡水水力梯度很小，海咸水楔形体可以渗透到了内陆很远的地

[1] γ（容重）＝ρ（密度）·g（重力加速度）。

方。在渗透性很差的薄含水层中，当淡水补给充足时，由于地下淡水水力梯度较大，海咸水楔形体几乎是不存在的，并且咸-淡水界面很陡。

BGH 公式是一个近似公式，且隐含着如下限制条件：

(1) 如果地下水处在动态条件下，界面上的压强与水深不一致，特别是在滨海附近的淡水体。平衡条件下的界面常常要比计算值更深。特别是在滨海附近考虑到淡水出海口时，更是这样的。若按 BGH 公式计算，会导致在滨海附近淡水厚度为零，这显然是不符合地下水等值线实际情况的。

(2) 如果海咸水是平静的，那么就要考虑为稳定状态。

(3) 如果咸-淡水过渡带的厚度是不可忽略的，BGH 公式只能预测咸-淡水过渡带中一个界面。

尽管有这些局限性，如果正确地运用，在必要时作一定的校正，同时避免一些极端的情形，BGH 公式在简单的计算中还具有一定的实用价值。

2.1.3 在海咸水楔形体上流动的淡水流

如果在一个静止的海咸水体和一个流动的淡水体之间存在一个突变平衡界面，该界面就是一个类似潜水面的淡水体边界。在该界面上，海咸水水头是一个常数，等于平均海平面高程，且是一个淡水流面。这种情况下，就可以采用势函数定义垂直二维情况下的流网，如图 2.3 所示，并可计算界面上的实际淡水水头 h'_f（Hubbert，1940，1953）。从而，使校正过的 BGH 公式 $z=\alpha h'_f$ 避免了第一个限制条件。

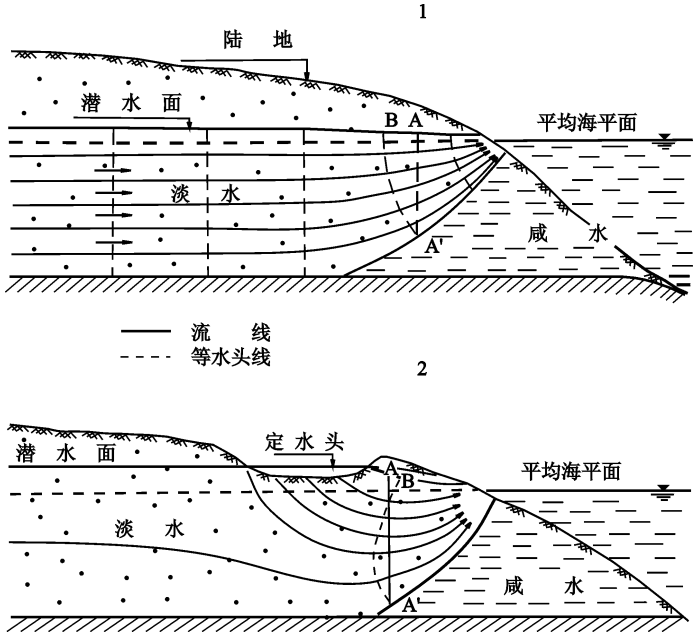


图 2.3 滨海潜水含水层的淡水水头垂直方向上变化的示意流网图

2.1.4 实际的水动力平衡

在咸-淡水过渡带中，存在着一定程度的混合作用，这主要是通过微观的和宏观的弥散

需要全本请访问 www.ertongbook.com