

地质过程的 计算机模拟

[美] J. W. 哈博 著
G. 博纳姆—卡特

地质出版社



地质过程的计算机模拟

〔美〕 J. W. 哈博 著
G. 博哈姆-卡特

罗人彦 何宝侃 陆成 译

何宝侃 孙惠文 校

地质出版社

内 容 提 要

在用电子计算机模拟地质过程这一课题的研究中,美国学者取得了巨大的成就。本书总结了他们所积累的经验,是模拟各种地质过程的指南。书中解释了模拟的基本概念和原则,研究了数学基础和模拟制作方法,并用电子计算机来实现这些方法,还提供了在各个领域——如构造地质学、地球物理学、岩石学、地球化学、经济学、地貌学等等——解决模拟问题的范例。书中引用了许多计算机常用的FORTRAN语言程序,它们表明书中描述的一些方法已经用于实践。

本书对各种专业的地质工作者及在地质学中运用数学和电子计算机的有关人员是很有参考价值。

COMPUTER SIMULATION IN GEOLOGY

by

JOHN W. HARBAUGH

and

GRAEME BONHAM-CARTER

WILEY-INTERSCIENCE, a Division of John Wiley & Sons, Inc.

New York/London/Sydney/Toronto

1980

地质过程的计算机模拟

〔美〕J.W.哈博

G.博哈姆-卡特 著

罗人彦 何宝侃 陆成 译

何宝侃 孙惠文 校

•
责任编辑:吴关

地质出版社出版

(北京西四)

河北省蔚县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

•
开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 20⁵/₈ 字数: 482,000
1986年 9月北京第一版·1986年 9月北京第一次印刷
印数: 1—2,185 册 定价: 4.90元
统一书号: 13038·新1045
3

前 言

这本书是从1964年开始在Stanford大学工作的成果，那时浅海相沉积过程的动态计算机模拟模型刚开始发展。1966年8月Graeme Bonham-Carter来到Stanford大学作为博士学位研究生参加了这项工作。当时这项工作受到了海军研究局地理分局的财政支持及其领导人Evelyn Pruitt先生的鼓励。工作进展使我们日益懂得在沉积模拟工作中应用的许多概念也可以用于地质学的其它领域。另外，我们也看到在地质学以外的一些领域（例如企业管理、生理学和森林生态学）内的模拟工作可能与地质学中的模拟有很强的关联。

在我们看来，地质工作者如果对他的课题有概括的了解，一般都能够有效地运用模拟方法。我们认为，因为地质工作者与之打交道的是地球的复杂动态系统，所以需要学习建立动态系统数学模型的方法。这本书是我们为了满足这个要求所做的尝试，希望这有助于在地质学中发展“系统观点”。应当指出，地质工作者对“系统观点”并不陌生，他们经常使用动态系统概念模型。我们的目的是向他们提供一些数学和计算工具，以用于延伸这些思维过程。

早在1968年计划写这本书时，我们已认识到所面临的主要问题是让读者看懂。这本书是面向地质工作者的，但必须论述一些既不是地质方面的，也不是地质人员所熟悉的问题。我们的任务首先是说明地质工作者确实需要模拟方法，然后用他们能够理解的语言说明模拟的方法。

在这本书里，我们的计划很简单。首先，我们从哲学方面对模拟进行了探讨，因为模拟给思想方法带来了重大改变，特别是因为它改变了传统的“因果”型科学思想方法，而这种思想方法渗透到了整个地质学中。其次，我们力图通过一些十分简单的而又使人信服的例子来说明模拟的目的和基本思想。第三，我们在一定深度上来解释主要的模拟方法。并指出怎样将这些方法作为模型的组成部分编入各种各样的模拟模型中。最后，我们来说明这些方法在各种地质问题中的用途。

这本书作为一本教科书和参考书的混合读物，是为有一些计算机知识的人编写的。在这本书的许多部分里都使用FORTRAN IV计算程序作为例子。但是使用系统观点解决问题与使用的计算机无关。另一方面我们还要指出，大多数方法只适用于大型高速计算机。另外，本书包括一些数学内容。模拟模型的建筑结构本来就是数学的。如果不参考统计学、线性代数学、微积分学和数值分析的内容，就不可能充分地讲清楚。数学虽然模型的方面完善的程度不同，但读者如果不钻研数学细节将不能最大限度地运用这本书。另外，要充分运用这本书还要有计算机程序设计的工作经验。我们力图将数学细节讲清楚，以便具有现代数学基础的读者能够读懂，并且让没有计算机使用经验的读者能够掌握大多数应用技术。

本书里的大多数计算机程序是John W. Harbaugh和Graeme Bonham-Carter用FORTRAN IV语言为地质模拟计算机编写的，（海军研究局技术报告，1970，6，30，海军研究局地理分局，合同N00014-67-A-0112-0004，任务书No. NR388-081）。另外在第三、

四、六、七、九各章中大部分内容反映了海军研究局支持的工作。

本书分三个部分。第一、二章论述“系统哲学”，并且介绍了模拟模型的分类、用途和构造。第三到第八章论述模拟的数学和计算“方法”的基础知识。第九、十两章论述这些方法在地质问题中的应用。第九章内详细叙述了五种沉积模型。第十章里纵览了其它方面的应用，包括生态学和古生态学、进化论和形态学、构造地质学、河流作用的地貌学、水文学和地球化学以及岩石学方面的例子。

“工具章节”（第三到第八章）讲述我们认为在模拟模型中有重要应用的各种数学方法。这些工具包括：随机数的产生和应用（第三章）；马尔科夫链（第四章）；解微分方程的一些数值方法（第五章）；描述流体流动和扩散的方法（第六章）；基本的控制系统思想的应用（第七章）与方法的优化（第八章）。我们不强求所有这些数学方面的工具都与地质模拟方法切题，但是我们提醒读者，许多地质模型用这些工具会建立得更加牢固。最后，我们坦白地承认，直到现在这些工具还并没有在地质模拟中全部得到应用，但我们相信它们将来是会得到应用的。

J.W.哈博

G.博哈姆-卡特

目 录

前言

第一章 引论	(1)
模拟模型的典型应用	(2)
模拟与科学方法	(7)
动态系统模型的主要特征	(8)
作为动态系统的岩石旋回过程	(12)
第二章 模型与模拟	(14)
模拟模型的分类	(14)
模拟的目的	(16)
研制计算机模型	(17)
地质大学生模型的程序	(19)
时间表示法	(25)
空间表示法	(26)
物质登记法	(30)
问题	(32)
第三章 随机数的产生	(34)
产生随机数的方法	(35)
伪随机数的数字化产生方法	(35)
随机数的统计检验	(39)
对已知分布进行蒙特卡洛抽样	(41)
地层顺序的生成	(49)
问题	(53)
第四章 马尔科夫链	(55)
马尔科夫转移矩阵	(57)
马尔科夫地层顺序	(58)
马尔科夫转移矩阵的乘幂	(65)
马尔科夫特性的检验	(69)
马尔科夫链的平稳性	(70)
根据相关性、阶和步长对马尔科夫链进行分类	(72)
离散状态-连续时间模型	(81)
模拟二维地层剖面	(87)
马尔科夫链的特征	(89)
状态与链的分类	(92)

问题	(96)
第五章 解方程的一些数值方法	(98)
迭代解法	(99)
微分方程的数值解法	(100)
偏微分方程的数值解法	(111)
问题	(118)
第六章 流动与搬运	(119)
模拟流动与搬运的方法	(119)
稳态位势流	(121)
时变位势流 (确定性扩散)	(138)
问题	(152)
第七章 系统控制	(154)
一个简单沉积模型中控制组件	(155)
控制器应用的类型	(159)
开口回路系统	(160)
闭合回路系统	(165)
使技术控制概念适应于地质动态系统	(169)
第八章 最优化问题	(170)
基本概念	(171)
最优化理论基础	(173)
最优化方法的分类	(175)
直接寻优法	(176)
间接寻优法	(182)
线性规划	(188)
单纯形法	(189)
问题	(204)
第九章 模拟在沉积中的应用	(205)
沉积岩质量模型	(205)
沉积盆地模型	(214)
蒸发岩盆地模型	(224)
三角洲模型	(238)
碳酸盐-生态学模型	(254)
结束语	(267)
第十章 其它方面的应用	(268)
生态学和古生态学	(268)
进化论和形态学	(282)
地球化学和岩石学	(285)
构造地质学和地球物理学	(294)
河流地貌学	(297)

水文学.....	(301)
附录 线性方程组的解法.....	(308)
参考文献.....	(313)

第一章 引 论

很久以来，“模拟”都被理解为“假装”或“模仿”，或者是不实际地描述某物的状态。然而到了四十年代，“模拟”有了新的含义。这首先和John Von Neumann的工作有关，他曾应用“蒙特卡罗方法”讨论了有关原子反应堆的防护问题。这些问题用物理实验方法不能解决，不仅费用大而且危险，即使用常规的数学模型来解决这些问题也很麻烦。可供选择的方法是应用“蒙特卡罗方法”，它是对已知统计概率分布的随机过程作数字模拟。

五十年代初，由于快速数字电子计算机的出现，“模拟”的意义发生了变化，从那时起，“模拟”意味着应用能够用计算机操作的数学模型做各种实验。社会学家和经济理论学家几乎第一次发现他们可以借助计算机具体执行模型中的算术运算和逻辑运算来完成控制实验。控制计算机操作的程序相当于模拟模型的数学描述。

按这种看法，模拟乃是这样一种技术方法：建立模拟现实的模型，并以此模型做实验。就此意义来讲，模拟的内容是非常广泛的，它几乎包括一些毫不相干的应用，如像用数字计算机规划企业管理，用电子模拟装置描述地下水的抽出与重灌。模拟的另一些例子是：用空气动力学的物理量模型做风洞实验；模拟的联合教练装置；流体流动的数字模型以及社会现象和森林生态等的数字模拟。本书主要讨论与电子计算机有关的模拟方法。虽然在某种程度上会涉及到一些静态的模拟模型，但是我们主要关心的是动态模拟模型。

鉴于非地质学领域内模拟的应用已有突飞猛进的发展，应当把它们移植到地质学中来。问题在于那些领域里发展的方法，如像许多模拟文献中讨论的排队论，物资储量控制，车辆运输流通等这样一些课题的方法在地质学中能否应用？这些方法的基本原理能否类似地应用于例如海相沉积的计算机模拟模型？我们认为贯穿于这些不同的应用当中的共同思想是系统的观点，即使表现不十分明显，但对任何一个过程或几个过程的总和用计算机模拟时都要有下面三个基本步骤：定义系统；建立模型；用模型模拟系统的性能（见图1-1）。让我们进一步细致的研究这些步骤。

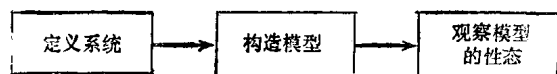


图 1-1 模拟的三个基本步骤

我们可以定义系统为一个动态的，由互相联系的若干成分组成的集合。如果系统的任何一部分发生变化，则要影响到整个系统。因此，在系统的定义中，一般应包括各个成分之间的内在联系。另外，在定义中还应确定系统的界限。例如，可以说整个宇宙是一个系统；但是在这个宇宙系统内还可以适当地定义一些比较小的系统，例如太阳系；地球的大气圈、水圈和岩石圈；河流的排水系统；土壤生物组份等。同样，整个世界经济是一个系统，而一个工厂和一个超级市场也是一个系统。每个系统必须通过指出它的界限和组成它的成

分来定义。依此观点,显然我们可以把系统分级,在大的系统中圈定小的系统。系统分级的定义,我们可以用沿海地带为例加以说明(见图1-2)。设考虑的整个系统包括有海洋、海滨、潮流、沉积三角洲和海崖。在这个大系统内可以把三角洲单独隔离出来作为一个系统。而在三角洲内部又可将比例尺比较小的一块分布看作是一个系统,如此类推以至无穷。

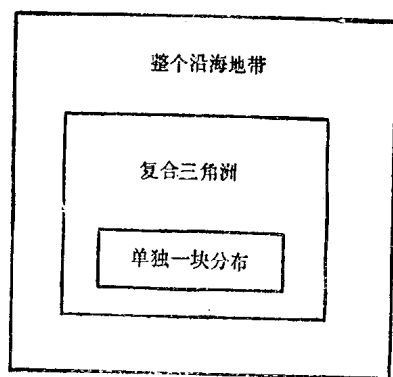


图 1-2 系统的分级

连续不断地受外界因素的影响并且处于动态平衡状态;它有输入(原始材料)和输出(完成的产品)的因素;它的性能是调整市场需要的产品和物质流通的速度。与此类似,一个海岸系统有输入(河流,海岸流)和输出(紊流)的因素;它的性能——具体体现为海滩、三角洲、海湾等等——是连续地调整它的“外形”的变化,例如输入沉积物的速度,海面升降的起伏和扰动。

因为一个系统是由具有复杂内在联系的部件所组成,要预测改变部分变量的状态或改变系统的结构所造成的影响是非常困难的。人们首先必须把系统进行概念化简化,然后用模型描述它。模型是一个试图描述现实系统特性的人造仿真系统。模型有许多种类型,如物理模型,概念模型和图表模型,但是在很多情况下描述系统最有力最灵活的模型是数学模型。数学模型即可以找出系统的一定形式的完整又精确的解又可以做计算机模拟用,在后面这种情况下“解”是通过在计算机上观察模型的性能的方法获得的。动态模拟是对一个系统的模型的操作,在这一点上现实系统的性能被仿制成某种程度随时间变化的模型。

有关动态系统一般概念的文献很多。如像Beer (1959), Von Bertalanffy (1956) 和Chorafas (1965) 等人著的论文和书提供了这个课题的一般基础知识。在商业上的应用已有很大发展,见Forrester(1961)叙述的方法。在生态学中的应用参见Watt (1964, 1966) 及OdumE.P.和OdumH.T. (1959) 的著作。

模拟模型的典型应用

对于本节,用一个实际地质问题来检验一个模拟模型是否适用,是恰当的,讨论的是在晚志留纪Cayugan统的盐沉积形成时期流入密执安盆地的海水流动问题。古地理的重建说明密执安盆地在晚志留纪时期曾经被一系列浅滩和礁石所环绕(见图1-3)。浅滩和礁石作为局部的阻挡层,接纳海水并限制由于蒸发所产生的比较浓的盐水到比较深的盆

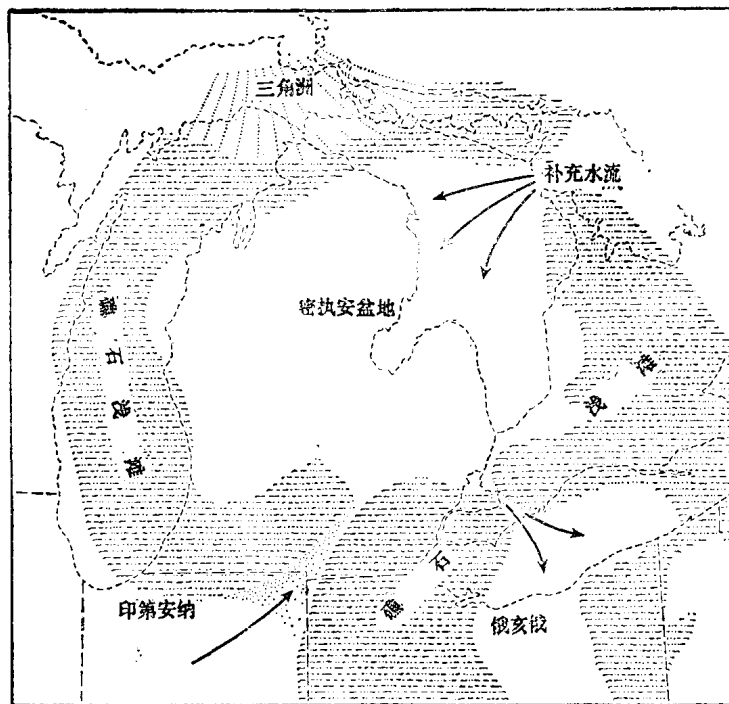


图 1-3 根据古地理推断的晚志留纪时期密执安盆地及其附近地区的示意图

地的中心部分。问题是要确定海水注入盆地的位置和规模,使得盐水的流动模式和伴随产生的盐的沉淀与观测的盐的分布相符合。

Briggs和Pollack(1967)曾研制了一个动态的、蒸发沉积的定量模型,为了解释密执安盆地盐的分布,他们用这个模型作了一系列的实验。他们的模型综合了一个半约束的海相盆地,海水不断地从盆地蒸发出去。具有通常盐度的海水由入口流进,并逐渐富集直到沉淀出盐。具备下列因素之后才能做模型实验:(1) 沉积盆地的形状;(2) 入口和出口的数量和位置;(3) 流入和流出的海水体积;(4) 蒸发的速率。对这个模型详细的数学描述将在第九章里讨论。

Briggs和Pollack假设由于海水流入一个充满盐水的盆地,在较浓的盐水上面它形成相当薄的一层,饱和的盐水在下面。由于水的不断蒸发,表层内盐的浓度逐渐增大。当它超过溶解度时,溶在海水里的盐开始沉淀,盐的颗粒落在盆地的底部形成硬的石膏层,盐层和其它物质层。物质沉淀的次序与盐的溶解度递增的方向相反,溶解度最小的最先沉淀。沉淀的一般次序是碳酸盐、硫酸盐、简单的氯化物,最后是复杂的双盐。

流入具有一个入口的理想蒸发盆地的水流如图1-4所示。流线地理上从入口开始散射,垂直地穿过盐的等浓度线(等盐度线),从而使配置在各种蒸发面的沉积相——碳酸盐、硫酸盐(硬石膏)和氯化物(石盐)等,平行于等盐度线。这样的蒸发盆地的循环过程可以通过求解流体运动的微分方程来模拟。在设计模型和解微分方程时必须明确循环系统的边界条件。

注入海水的速度,盆地内的流速,以及盐的沉淀速度在很大程度上取决于蒸发速度。可以用现代蒸发盆地内估计的蒸发速度来计算古代蒸发盆地内的速度。在Briggs和Pollack的

模型内，假设无论何时只要达到预先规定的饱和浓度，即可产生沉淀。计算时，溶解物质的适当质量转变成沉淀物沉积的厚度。

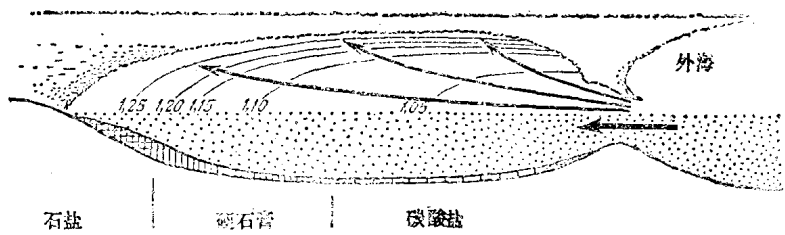


图 1-4 设想具有一个入口与外海相通的蒸发盆地中的流线示意图

在密执安盆地内观测的盐的厚度如图1-5所示。为了模拟观测到的盐的分布，Briggs和Pollack最初安排他们的模型便于使模拟出来的流动模式（见图1-6）和图1-3的古地理解释产生的模式相符。假设有两个主要入口接纳海水进入蒸发盆地，且有一个出口朝向东南，使海水被输送到现代俄亥俄河和伊利湖所在位置的盆地内。他们的模型是用二维网格的方形网眼做的。水流的方向和相对速度在每个网眼中心用一个向量标示，它的长度与速度成比例。

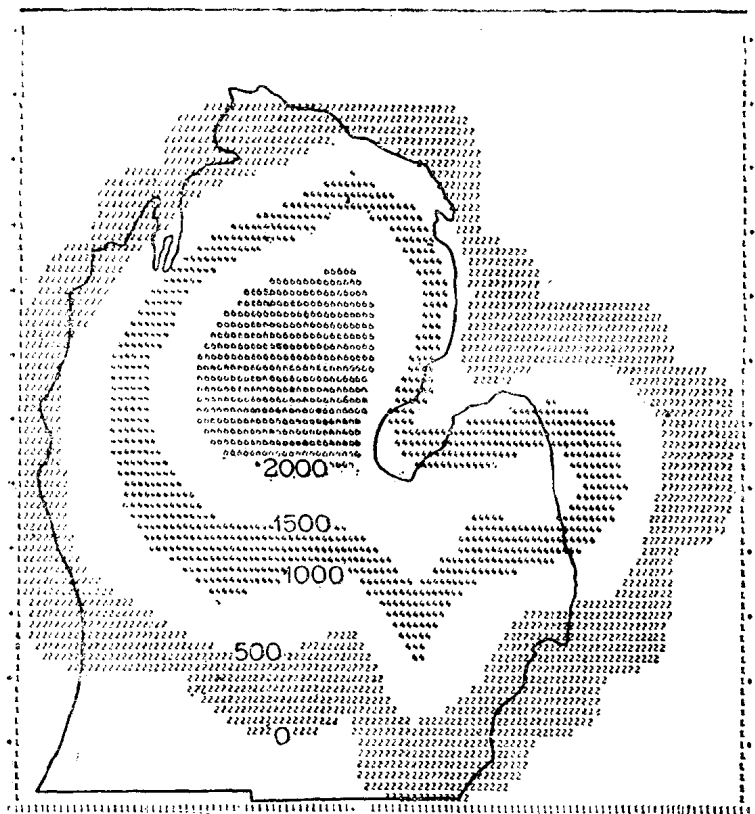


图 1-5 根据钻探资料用电子计算机绘制的厚度等值线图（英尺）表示密执安盆地Cayuga统（晚志留纪）的石盐分布，符号带表示计算机印出的等值线

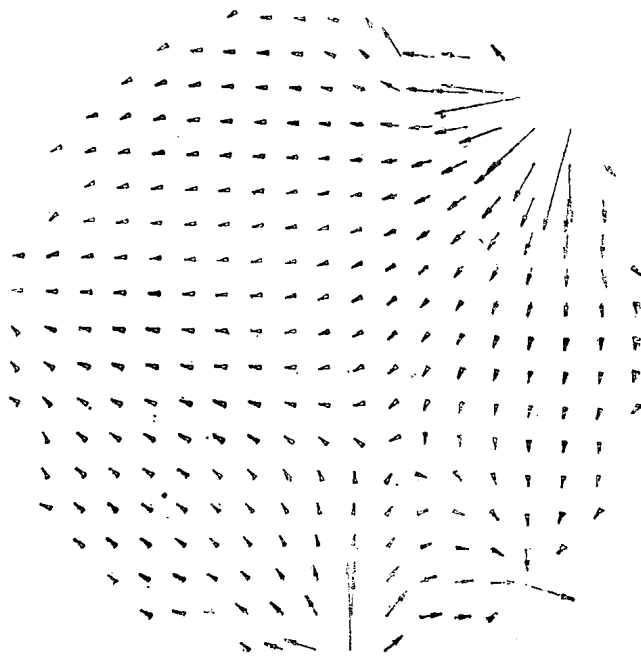


图 1-6 假设在密执安盆地有两个入水口和一个出水口，模拟所得的流向图

Briggs和Pollack模型与实际的蒸发盆地相比较免不了做了若干简化。第一，假设蒸发速度不受含盐度变化的影响，实际上蒸发速度随含盐度的增加而减少。第二，在模型内没有考虑海水密度变化对于水流式样的影响。在实际的蒸发盆地内高盐度的水的密度比较高，当然要影响水的流线。然而，在这个模型内水流本质上是做为二维系统来处理的，在系统中假设蒸发出去的水是最上面微薄的一层。由于这些假设影响到模型的性能，所以模型结果的解释必须和在系统内做的假设相一致。

伴随这个最初模型的水流系统的盐度变化的状态，氯化钠（每升311克）只能在盆地的西部达到饱和（见图1-7）。在这种情况下，卤化物的沉淀物将局限在盆地的最西部而不会出现在密执安盆地的中心部位。显然这个模型与观测的盐的分布不相符，因而对海水流入和流出的体积和位置所做的假设是不可接受的。此外，Briggs和Pollack发现如果不修改通过模型的两个入口和一个出口的水流流量难以使盐沉积的位置移到盆地的中心部位。因此必须修改模型的基本假设。

经过一系列的模拟实验，Briggs和Pollack假设除了两个主要入口和一个出口之外，在围绕的礁石当中还有一串“漏洞”，经向地流入海水。用这个模型得到的等盐度线图（图1-8）在产生饱和的位置提供的盐的累积比例（图1-9）与观测的盐的厚度吻合得相当好。

回顾Briggs和Pollack的蒸发模型，它提供了一个模拟应用的出色例子，它编入模型的假设具有一定程度的真实性。流体流动方程与盐的运送和沉淀的关系方程是根据完善的物理和化学定律建立的。不可避免，地质假设不那么严密。尽管如此，通过修改地质假设并附以物理和化学的定律，模型还是达到了这种程度，对观测的密执安盆地内盐的分布能提出有根据的解释。因此，它的重要意义在于推断由各种假设方案引起的关系。它表明，对密执安盆地假设有两个入口和一个出口并且蒸发系数为常数与观测资料是不相容的。当修改



图 1-7 假设密执安盆地有两个入水口和一个出水口，模拟的在平稳状态下的等含盐度 (NaCl克/升) 分布图

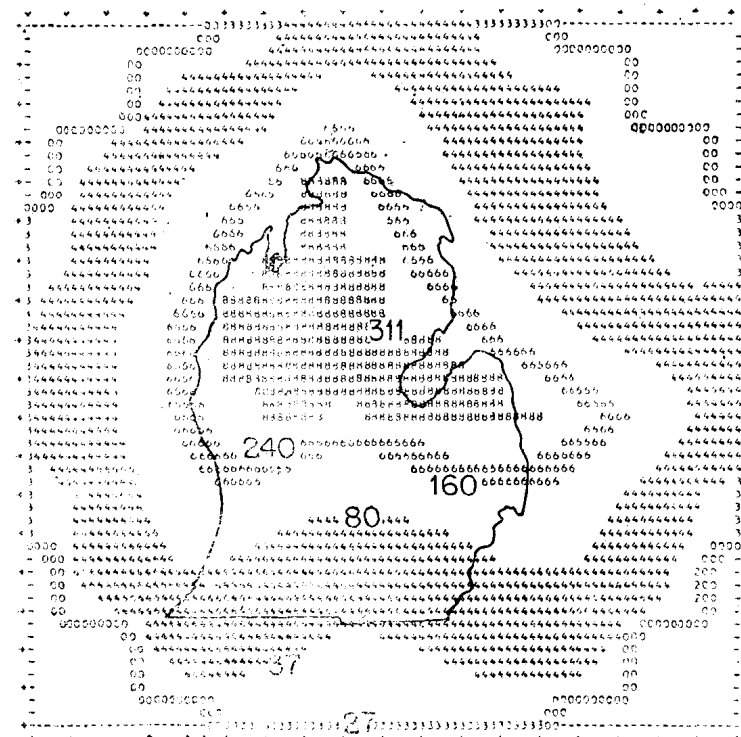


图 1-8 用修改的模型模拟的等含盐度 (NaCl克/升) 分布图
假设密执安盆地除了两个主要的海水入口和一个出口外，还有一些在盆地周围礁石中的一串小漏洞，根据这个模型对4000年情况做的模拟

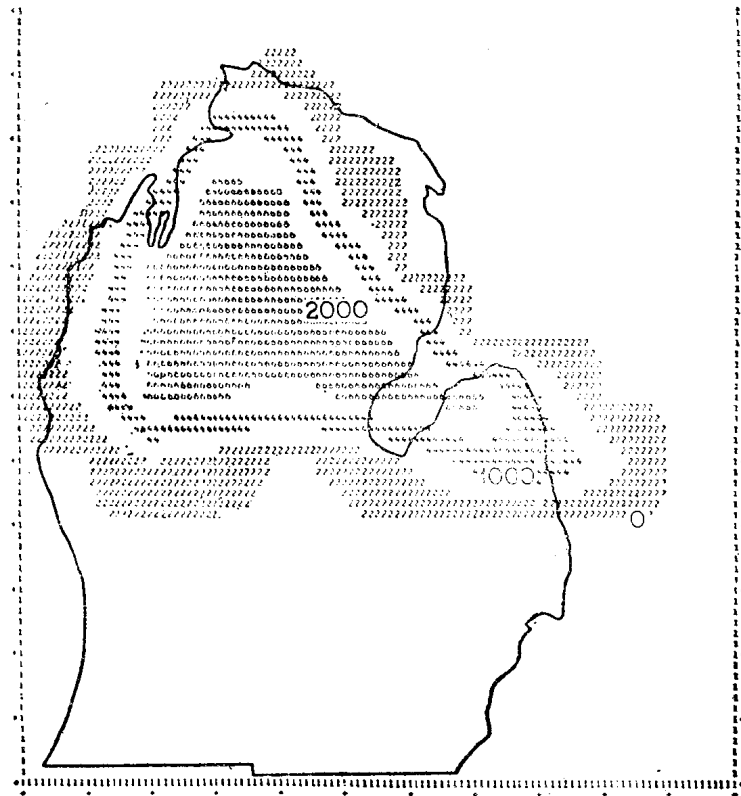


图 1-9 在礁石中有小漏洞的情况下模拟所得的含盐沉积等厚度(英尺)图
试将此图同根据实际观测结果所作的图(图1-5)对比

假设, 把“礁石漏洞”编入假设以后, 它们与观测资料是非常相容的。

模拟与科学方法

在没有进一步讨论之前, 我们需要确信模拟是一种完全符合科学的方法。让我们研究一个假设的地质问题, 把传统方法和模拟方法加以对比。假设讨论的是颗粒平均粒度随地点不同而变化的沉积砂岩。我们的问题是解释颗粒粒度变化的由来。地质学者研究这种砂岩将按下列步骤进行:

1. 首先他要观测这个砂岩, 选取样品, 分析确定颗粒的大小。然后他使用一种描述分类方法做颗粒大小变化的描述。

2. 其次, 他建立若干个可以解释颗粒大小变化原因的假说或概念化模型。这是一个归纳过程并且包含综合一些不确定的因素。地质学者可能受以前经验的强烈影响, 无疑也会受解决类似问题的别的地质学者的影响。或许在这个阶段产生的若干个模型或假说似乎都是同样可行的。这符合Chamberlin的“多方工作假说”。

3. 根据演绎推理, 地质学者“全面考虑”他的每一个概念模型的结果。如果模型很复杂并且包含互相联系的成分, 演绎过程将是很困难的。虽然如此, 从考虑每一个概念模

型内的假设出发演绎推理的目标只不过是达到逻辑的结果。

4. 然后, 地质学者把演绎过程获得的结果与观测的资料作对比, 或者他根据演绎过程中提出的临界问题可以获得新的资料。换句话说, 他在检验假说。

5. 他提出关于假说或模型是否可接受的结论。如果假说不完全令人满意 (这种情况经常出现), 地质学者 (或者他的提出问题的继任人) 将重新从事上述的过程。这个过程包括补充观测, 用归纳方法提出新的或修正的假说, 演绎假说的结果, 用观测资料或实验来检验这个结果。这种过程又能重复多次, 使之尽可能达到具有唯一解释的程度。

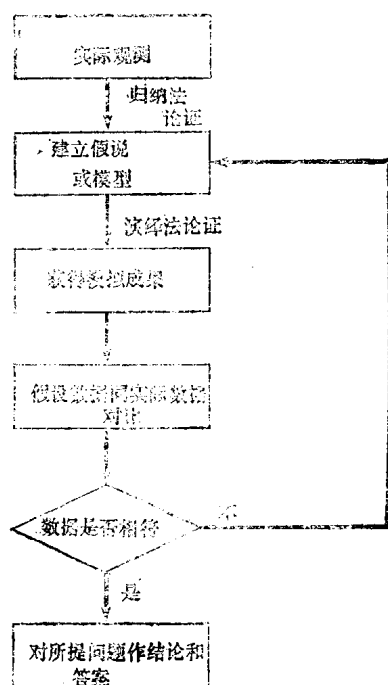


图 1-10 说明模拟模型的框图, 作为一个科学方法的缩影

模拟的基本原理类似于科学方法的这些步骤。构造一个模拟模型的人首先要对现实系统进行观测(图1-10), 然后通过归纳推理制造一个他认为能够模拟这个系统的模型。他作模拟实验给出具有给定一组初始条件的“解”。然后把人工产生的资料与现实世界的资料做对比, 从而修正模型。如果他认为模型是满意的, 他就可以解答一些专门的问题并推出结论。

我们要指出, 地质学者十分习惯的演绎推理过程所构成的“智力模型”是遵循归纳的理论或概念模型发展的结果。然而任何试图说明一个现实系统工作机理的理论都是复杂的, 而且依靠纯粹的独自思考做逻辑推断也是很困难的。由于机器有记忆和非常快速做逻辑和数学推理的能力, 用计算机模拟将克服某些这样的困难。尽管计算机模拟是一项新技术方法, 但是它仍然要用科学方法中相应的步骤来确立。

动态系统模型的主要特征

现在我们有根据地详细考虑模拟, 让我们讨论许多动态系统模型的基本特征。有五种主要特征:

1. 系统的元素;
2. 系统的界限;
3. 内在联系的结构, 包括反馈关系;
4. 物质和能量的迁移和记载;
5. 时间流程。

动态地质大学生模型

通过图解一个典型动态模型各部分所起的作用可以更好地描绘出动态系统的主要特征。这个模型是假想的, 它论述地质大学生通过大学进入地质工作市场的流程。这种模型容易建立, 容易理解, 而且它的某些方面也是现实的。事实上, 这个模型很可能扩大, 改进使之达到可以预报进入地质行业的大学生人数的程度。假设的模型编入一些代码, 它们概述在图

1-11内。进入大学的学生必须做出学习地质或者不学地质的选择。这象征着进入学校的学生作出决定过程的一个超级简化，但是它有益于构造模型。其次假设选择主修地质专业的学生通过学校的培养计划一般要五年。注意从系统里排除那些没有完成教育计划而被看作是从地质专业“落伍”的人。剩下的人获得学位并面临寻找工作的挑战。某些人为地质工作市场所吸收，而另一些人找不到地质工作。最后，较重要的假设是新的毕业生在寻找工作方面的相对“成功率”强烈的影响新入学的学生决定主修地质专业还是主修别的专业。例如新毕业的地质专业学生寻找工作上的“成功”（以找到工作的人数，最初的工资等来衡量）在某些大学里很可能强烈影响学生选择主修地质专业。而且模型的特性(尽管它简单)难于进一步预报。下面我们来详细叙述模型的组成部分：

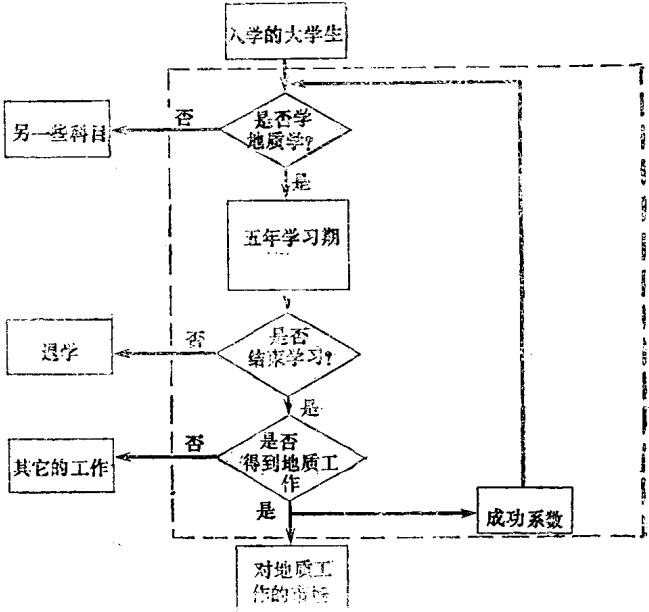


图 1-11 地质-大学生模型系统框图

系统的元素

地质-学生模型的元素是由两种成分组成的。一种是由分成下列各类集合的人构成的“物质”成分：

1. 每年进入大学的学生总数；
2. 每年开始主修地质专业的学生总数；
3. 每年完成学位（学士、硕士或博士）的学生人数，即可能获得就业的人数；
4. 每年找到地质工作的新的地质专业毕业生人数。

另一种由属性组成的成分是“非物质”的，例如每年新毕业的学生数与找到地质工作的人数之比。

系统的界限

任何一个系统不仅必须用组成它的成分和考虑的变量来确定，而且还要用它的界限或“边缘”来确定。某些变量可能属于系统的界限之外（如图1-11所示的虚线之外）。它们仍然是考虑系统的主要方面。这些变量叫作外生变量，例如，变量“入学的学生”，在这种条件下，它与继续在系统内的变量无关。虽然它影响系统，但它在系统内部不变。在系统内的变量叫作内生变量。它们不仅影响系统的其它部分，而且它们也受系统内部变化的影响。