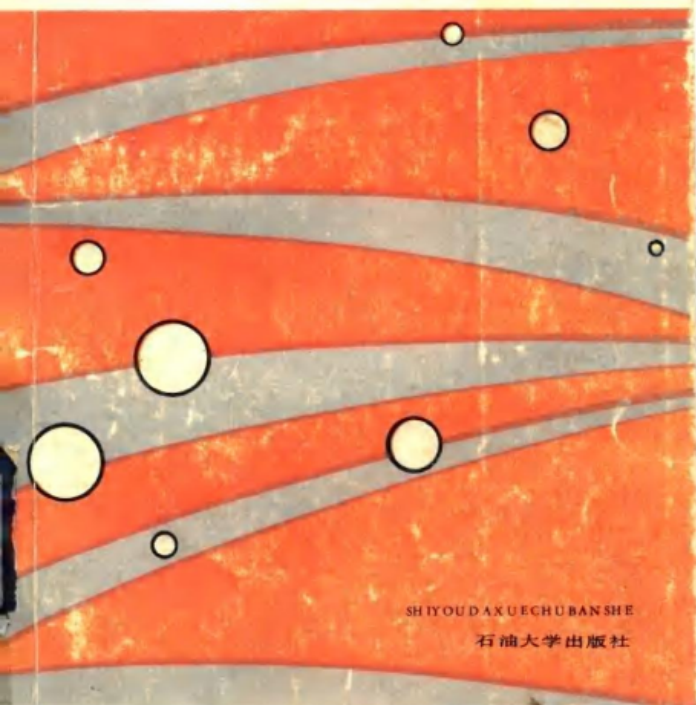


SHIYOU DIZHI GUOCHENG
DINGLIANGYANJIUGAILUN

石油地质过程 定量研究概论

李泰明 编著



SHIYOU DAXUE CHUBANSHE

石油大学出版社

43284



石油地质过程定量研究概论

Sy14/20

李泰明 编著



200290700



石油大学出版社

内 容 提 要

定量化是现代石油地质研究工作的重要发展方向之一。本书首次明确提出了石油地质过程研究的定量化问题。作者根据教学和科研工作的体会,论述了定量研究中的模型化方法、强调建立原理模型的重要性,并论述了沉积物埋藏史等石油地质过程的定量研究中建立原理模型的原则和方法。本书分四个部分,即:埋藏史的恢复、受热史的恢复、含油区地下流体动力学研究和生烃量的计算。各部分皆以论述基本原理和方法为主,分析各石油地质过程的地质基础、由地质模型向原理模型的转换以及进而建立数学模型的方法。书中提出了一些新的认识,如把沉积物的埋藏压实过程分解为两种物质的两类运动;也介绍了一些新的研究方法,如地下流体相对势能分析法等。

本书可作为高等院校石油地质专业本科学生的选修教材及研究生的教学用书,亦可供石油地质科技工作者参考。

石油地质过程定量研究概论

李泰明 编著

石油大学出版社出版
山东省 东营市
莱州市印刷厂印刷
山东省新华书店发行

开本 $850 \times 1168 \times 1/32$ 4.5 印张 117 千字
1989 年 9 月第一版 1989 年 9 月第一次印刷

印数 1—3000 册

ISBN 7-5636-0040-X/TE·12

定价, 2.00 元

序

石油和天然气的生成、运移、聚集是石油地质过程的主要组成部分。如果能够定量地描述它们，就可以计算出准确的储量、选定能钻出油、气的地区和井位，则石油工业的发展将进入新的高度。毫无疑问，定量化的石油地质过程研究是需要的，是一项有意义的设想。但，实现这一设想是可能的吗？回答是：可能，但需要建立新的认识，采用新的研究方法。

石油地质学来源于传统的地质学，承袭了客观描述和逻辑推理的研究方法。它的基本原理和随着油气勘探实践而不断出现的新认识、新观点、新方法为油气资源工业的更快发展做出了重大贡献。然而，当前工业化的迅猛发展对油气能源的需求极其迫切，要求石油地质学对勘探工程提供更确切的、定量的依据，以保证高水平的勘探成功率。同时，有关的地学学科和基础学科，如沉积岩石学、构造力学、渗流力学、计算机科学等的新成就也为石油地质学上升到定量化的高度提供了可能。

石油地质研究中目前已有了一些定量技术或方法，如生烃量的计算和储量预测、构造应力场计算、地下压力预报等，这类单项的定量方法日益增加。

自然界的任何物质、任何过程都可以度量，这一点肯定无疑。但度量的精度取决于对物质或过程的认识深度。地质过程是复杂的，它不同于单一的物理作用或化学变化，任何一种地质过程都包含着多种属于基础学科，但又不尽相同的作用或变化。如沉积物的成岩演化过程至少包含着机械压实、生物化学、岩石化学、流体的渗流等作用。虽然如此，只要对该过程有了清晰准确地认识，它就可以被定量地描述，进而做定量计算。所以，从原

理上看任何复杂的地质过程都是能够被定量描述和研究的，关键在于对它认识的深度。例如，生烃过程一直是油气勘探工作最关注的问题，也是石油地质学研究的重点内容之一，五十年代只认识到影响烃类生成的因素有温度、压力、有机质丰度、催化剂矿物的作用等等，没有揭示出生烃过程的根本原理和机理。在这种认识水平上当然不可能对生烃过程做定量计算。到了七十年代，大量的研究工作确定了烃类的生成过程服从化学动力学原理，可以用阿伦纽斯方程描述，而各项地质因素可以归入该方程的有关参数中去。于是烃类生成过程就有了原理模型和数学模型，能对之做较精确地定量计算。目前，对石油地质过程中的一些认识较深的作用，如沉积物的埋藏、成岩，沉积区内的地热史等都建立了可供定量计算的数学模型。可以预料，对于更复杂的烃类运移和聚集过程，也能够建立起定量模式来。

石油地质过程定量研究的提出是油气勘探的需要、也是石油地质学发展的必然结果。在八十年代兴起的所谓“盆地模拟”、“盆地分析”等新技术皆属于石油地质定量研究的范畴，它目前在生烃量的计算方面趋于成熟、可供实际应用。但总的看来，作为一项实用技术或方法，石油地质过程定量研究仍处于萌芽阶段，它的原理和方法还需要充实和完善，要在反复的实际应用中修正和提高。

石油地质过程定量研究中采用的基本方法是模型化。对于任何独立的石油地质过程都可以建立三种模型：地质模型、原理模型、数学模型。建立地质模型就是查清某地质过程的控制因素，对于各项影响因素则需查明其发生的条件和后果。地质模型是建立原理模型的基础，它应具有高度的代表性和典型性。把地质模型转变为原理模型是一项新的、高难度的研究工作，其重点在于抽提出基本原理性的（物理的或化学的）规律和数量关系式，在这些关系式中应该包含各有关地质因素的参数变量。而每个关系式都应该有它明确的应用范围和条件。建立原理模型是整个数值模

拟技术的核心环节，它本身就体现了从定性描述到定量计算的转变，完成这项工作不仅需要广博坚实的石油地质学和有关地质学科的知识，还需要有扎实的基本学科，包括数学、化学、物理学等方面的知识。把原理模型进而转变为数学模型并编制成计算机软件，是定量研究技术的最后一步，为此当然需要使用计算方法和计算机科学方面的知识，这类学科当前所达到的水平已完全能够处理各种地质定量问题。

建立了地质模型、原理模型和数学模型并编制出计算机软件后，只是完成了石油地质过程定量研究的基础工作。由于地质过程和石油、天然气藏的形成是复杂的，其中包含着许多尚未被认识的内容。所以，任何模型都需要在实际应用中修正和完善，不断提高它的实用性，最后达到定量地解决具体石油地质问题的目的。到目前为止，沉积埋藏史、受热史、烃类生成过程的定量模型已趋成熟，达到了实际应用的水平。关于烃类运移、聚集的数值模拟，正在积极研制中。

总之，石油地质过程的定量描述和研究是完全可以实现的。

石油地质过程的定量研究，以“盆地模拟”或“盆地分析”的名称出现已有近十年的历史，但至今没有关于这项新技术的基本原理的系统论述。有关文章多限于罗列应用结果，既缺乏对原理的讨论，更讳于对建立地质模型和原理模型的分析。鉴于此，作者编写了有关石油地质过程定量研究的基本原理，以期引起对这项新技术的关注和讨论。立意如此，但谬误之处难免，敬待指正。

本册以阐述基本原理为宗旨，包括四部分，即沉积物理藏史的恢复、沉积层受热史的恢复、烃类的运移和聚集——含油区地下流体动力学的研究，最后是生烃量的计算。至于有关这些方面已经编制出的计算机软件，因涉及计算机科学、计算方法等过多，将另文讨论之。

目 录

序

第一部分 沉积物埋藏史的恢复

- 一、前言..... 1
- 二、对沉积埋藏过程的分析..... 2
- 三、埋藏过程中沉积物孔隙度的变化..... 4
- 四、埋藏压实过程中的压力因素.....10
- 五、沉积物埋藏压实过程中的两种作用.....18
- 六、基底的沉降和上升.....22
- 七、沉积物埋藏史的原理模型和数学模型.....30

第二部分 沉积层受热史的恢复

- 一、关于地温场的基本知识.....40
- 二、恢复受热史的方法.....50
- 三、地温场数值模拟的基本原理.....62

第三部分 烃类的运移和聚集——含油区地下流体动力学的研究

- 一、烃类运、聚过程控制因素的探讨.....69
- 二、地下流体运动的基本知识.....77
- 三、流体压力同深度的关系及其应用.....83
- 四、相对势能分析法及其应用.....94
- 五、古水文地质研究方法简述..... 111

第四部分 生烃量的计算

- 一、生烃量计算方法概述..... 115
- 二、干酪根成烃过程及其模式..... 119

后记

第一部分 沉积物埋藏史的恢复

一、前言

油气藏的形成是发生在地史过程中的事件。油气藏或含油气区现今的地质条件同它在形成时期所具有的地质条件肯定有差别。因而为揭示油气藏形成机理必须查明今天的油气藏或含油气区的地质特征在地史过程中的演变，即恢复其沉积物埋藏史、受热史、构造发育史等等。其中，沉积物埋藏史的恢复是需要首先进行的基础工作。

在沉积物的埋藏、成岩过程中，其密度、孔隙度、厚度均有变化。泥质沉积的这种变化最明显，且很有地质意义。例如今埋深为1000米、厚度为100米的泥岩，其沉积初期的厚度约为250米，它是逐渐压实变薄才达到今天的厚度。在压实作用下，它所含的流体（水）被排出，进入相邻的孔隙性岩层、成为地下水的来源之一。如果这类泥质岩是生油岩，则它的排液过程就更值得重视，因为这同烃类的初次运移有关。显然，恢复沉积层的厚度、孔隙度的变化历程是很必要的。又例如，大多数油气藏的盖层是致密的泥质岩，我国陆相含油气盆地的情况尤为明显。这类作为盖层的泥质岩，总孔隙度低于10%，空气渗透率小于 $0.987 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ 。这是现今的状况。然而，在地史时期中，这些“不渗透”层曾是流体（水、油、气）传输的通道。显然，只有从它们变为“不渗透”层那一时刻起，才有可能起遮挡作用，而油气的聚集只有在那一时刻以后才会发生。不仅如此，有不少今天的盖层又是生油层，即它原是供给烃类的源岩，那么查明从油源岩变成封隔层的转变时期和条件无疑是认识油气藏形成过程的重要

一环。总之，恢复沉积层从沉积物到岩石这一地史过程中的物性、厚度和其它特征的变化，即恢复埋藏史，乃是查明油气藏形成机理的基础。

二、对沉积物埋藏过程的分析

在地质学中对沉积物的埋藏、成岩作用过程做过大量的研究。为建立这一过程的地质模型，特别是原理模型，需要从新的角度对其做一番分析。沉积物压实、埋藏过程中发生着多种作用，主要有：压实、排水、物性变化、矿物转化、原有矿物的溶蚀、新生矿物的沉淀等等。石油地质工作者所重视的生烃和排烃过程可以单独作为一种地质作用来研究，虽然它在整个沉积物埋藏、成岩过程中并不是普遍发生的。

上述各种作用可大致归为两类，一类是物理的，一类是化学的。前者包括机械压实、颗粒重排和排液（水、烃、气体）；后者包括岩石化学的和矿物的各种变化。然而，所有这些变化的最终结果都可以用物理量来表达，即归结为单位体积中固体颗粒含量和流体含量的相对变化。

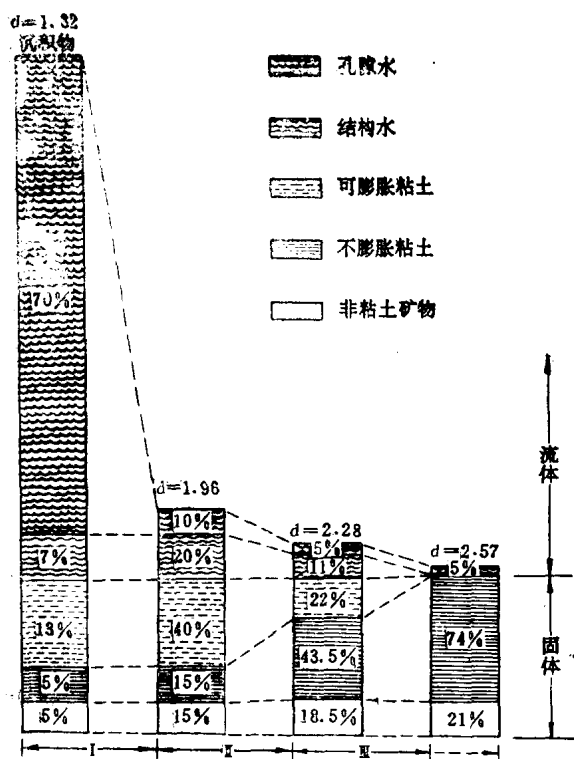
表 I - 1 埋藏压实过程中沉积物所遭受的主要作用及其表现结果

作 用	单位体积沉积物中的 % 含量	
	固 体	流 体
颗粒紧密排列	不 变	
孔隙水的排出		含量减少
新矿物的沉淀	增 加	可能减少
矿物的次生加大	增 加	
蒙脱石向伊利石转化	减 少	增 加
原矿物的溶蚀	减 少	可能增加

表I-1中把无论是机械压实的结果或岩石、矿物化学变化的结果都归结为单位体积内固体物质和流体含量的变化。这样就可以避免了过多的探究岩石化学和矿物学变化的内容，而把沉积物的埋藏成岩过程作为一种物理变化来处理。但是，在埋藏成岩过程中各种作用所造成的固体含量和流体含量变化的准确数值或数值范围，却需要从有关研究成果中取得。

布尔斯特 (Burst, 1969) 在研究不同埋深的海相页岩及与之相应的沉积物时发现，海相页岩的成岩过程伴随着明显的脱水作用，结果是岩石的密度增大 (图I-1)。他所提出的阶段划分未必恰当，但总的原则是正确的。其实，对于所有的碎屑沉积，脱水作用都是存在的。

布尔斯特把压实脱水分为三个阶段。第一阶段：深度在数千米内，脱水后页岩内含水约为30%，其中20—25%为结构水，5—10%为孔隙水；第二阶段：粘土矿物处于吸收热量、保持准平衡的状态。这时地静压力对于粘土矿物的脱水不起明显的作用，因为结构水的密度已大到足以平衡掉所受的压力。当温度升高到能够使结构水运动时两层结构水中就会有一层（平均状况）释放出来加入孔隙水。单位体积沉积物中保持流动状态的水量约占被压缩体积的10—15%；第三阶段：所有剩余的水，包括矿物层内的结构水将被排出。这种关于页岩脱水阶段的划分并不等于泥质沉积物在埋藏成岩过程中的演化模式，因为在这一过程中除了脱水作用外，还发生着粘土矿物转化和其它岩石化学的作用。而图I-1中所描述的脱水作用是完全的，即岩静压力引起的脱水作用已完成。实际情况并非如此简单，因为脱水作用能否彻底进行不仅取决于所受压力的大小，还同时取决于岩石的排水条件，即渗透率。所以，为了建立沉积物埋藏成岩过程的地质模型，应该从沉积物的物质组成、物理性质（孔隙度、渗透率、密度等）在埋藏成岩过程中，由于各种外界因素（压力、温度等）的作用而发生的变化出发，寻找这一过程的主要控制因素，进而导出它们的数



图I-1 海相页岩的物质组成在脱水过程中的变化 (据Burst, 1969, AAPG)

图中d为密度

量关系。孔隙度是描述沉积岩物性时应用最广、研究得最多的参数。它的数值和变化同岩石内流体的含量又有着直接的关系。此外，渗透率与孔隙度呈函数关系，所以，在建立沉积物埋藏史的地质模型时以孔隙度这一参数为主线，考察各种作用的结果是很恰当的。

三、埋藏过程中沉积物孔隙度的变化

岩石的孔隙体积随其埋深增大而减小，这是一个普遍的规

律。孔隙度随埋深的这种变化表明它是埋藏成岩、压实作用的结果。所以孔隙度可作为衡量埋藏压实作用的参数。又由于岩石的孔隙空间储存着流体，它的减小必然引起流体的排出，而这又同地下流体的交换，包括烃的运移有密切关系。所以查明沉积物孔隙度随埋深的变化是查明沉积物埋藏史的重要内容。

(一) 岩石中孔隙体积的度量

孔隙度：这是最常用的一个参数，其定义为：

$$\phi = \frac{V_v}{V_v + V_s} \cdot 100\% \quad (I-1)$$

式中： ϕ ——孔隙度；

V_v ——单位体积岩石中孔隙的体积；

V_s ——单位体积岩石中固体所占的体积。

由于 $V_v + V_s$ 即等于单位体积岩石的总体积 V_b ，所以上式亦可写成：

$$\phi = \frac{V_v}{V_b} \cdot 100\% \quad (I-2)$$

孔隙比或孔隙系数 (Void Ratio)：它是单位体积岩石中孔隙体积同固体所占体积之比。在研究埋藏过程时这个参数较之孔隙度更能直接地反映压实程度。

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (I-3)$$

式中： e ——孔隙比。 V_v 、 V_s 意义同上。

由于 $V_v = W_w / \gamma_w$ ， $V_s = W_s / \gamma_s$ ，故

$$e = (W_w / \gamma_w) / (W_s / \gamma_s) \quad (I-4)$$

式中： W_w ——孔隙中流体的重量；

W_s ——固体部分的重量；

γ_w 、 γ_s ——分别为流体和固体的比重。

由于 γ_s / γ_w 即固体物质处于含水状态中的比重，如固体物质

为粘土矿物, γ_s/γ_w 即湿水条件下粘土矿物的比重, 这种数值是很容易查得的, 故式 (I-4) 可写为:

$$e = (W_w/W_s) \cdot (\text{湿矿物的比重}) \quad (\text{I-5})$$

孔隙度同孔隙比: 在实际应用中常需对这两种参数做换算, 它们之间的关系如下:

$$\phi = \frac{V_v}{V_b} = \frac{V_v}{V_v + V_s} = \frac{e}{1+e}, \text{ 即:}$$

$$\phi = \frac{e}{1+e} \quad (\text{I-6})$$

$$e = \frac{\phi}{1-\phi} \quad (\text{I-7})$$

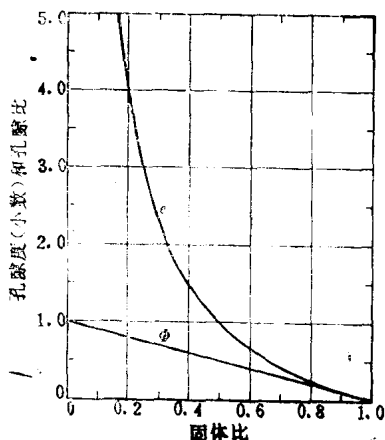
此外, 有时需要使用“固体比”, 即单位体积内固体部分的相对量 G , 显然:

$$G = \frac{V_s}{V_b} \text{ 或:}$$

$$G = \frac{1}{1+e} \quad (\text{I-8})$$

$$G = 1 - \phi \quad (\text{I-9})$$

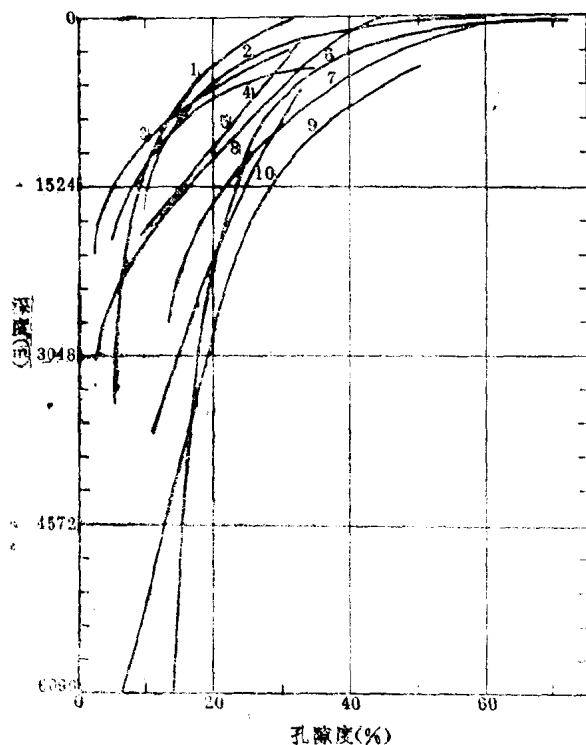
以上这些参数都可用以描述沉积物埋藏压实的结果, 小数形式的 ϕ 、孔隙比 e 同固体比 G 之间的关系如下图所示:



图I-2 孔隙比、
小数形式的孔隙度
和固体比三者间的
关系

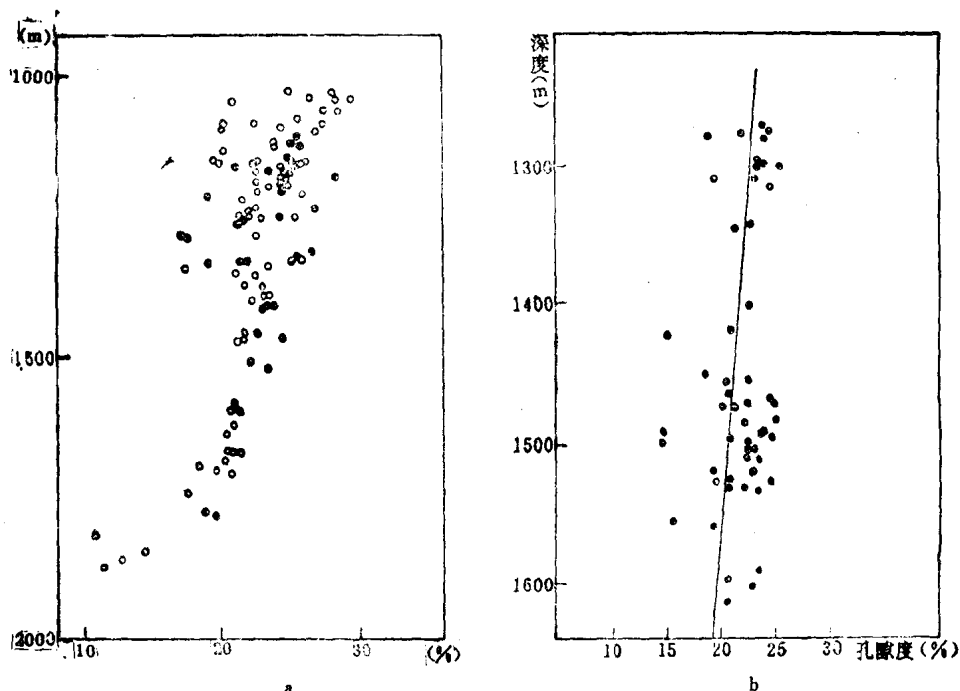
(二) 孔隙度随埋深的变化

沉积岩，特别是碎屑沉积岩的孔隙度随埋深增大而减小，这是总的规律，如图I-3、图I-4所示。



图I-3 泥质沉积、页岩的埋深同孔隙度的关系

- | | |
|--------------------|-----------------|
| 1. 普罗斯里可夫 (1960) ; | 2. 米迪 (1966) ; |
| 3. 阿瑟 (1936) ; | 4. 荷索 (1963) ; |
| 5. 海海堡 (1936) ; | 6. 迪克逊 (1953) ; |
| 7. 真柄 (1968) ; | 8. 威勒 (1959) |



图I-4 砂质岩的孔隙度随埋深的变化

- a. 松辽盆地泰康-古龙地区的莎、高砂层，图中实心点为高台子砂层，空心点为莎尔图砂层；
b. 松辽盆地三肇地区砂岩（据大庆油田研究院报告，1983）

由图 I - 3, I - 4可以看出，碎屑岩的孔隙度随埋深加大而降低。这显然是机械压实的结果，但泥质岩与砂质岩不同，前者的孔隙度变化曲线呈指数曲线形式，即在深度不大时急剧减小，而后则缓慢降低。砂质岩孔隙度随深度的变化呈直线关系。此外，由图 I - 3可以看出各地区泥质岩的孔隙度随埋深而变化的曲线并不相同，各有其斜率和拐点。这种差别是岩性、矿物组成、受热史、承压过程等地质条件各异所造成的。孔隙度 - 埋深关系曲线的斜率反映着孔隙度值随埋深增加而降低的程度，称压缩系数。

根据实测孔隙度数值和与之对应的深度而计算出的压缩系数，不仅包含着机械压实作用的程度，也反映着岩石化学和矿物演化的结果。显然，为了定量地表达孔隙度同埋深的关系，可以对实测孔隙度数据进行数学处理，找出它同埋深之间的关系。

前人在这方面已做了许多工作，总结出了沉积岩的孔隙度同埋深的经验关系式。

对于泥质岩，有：

$$\phi_D = \phi_0 \cdot e^{-C \cdot D} \quad (I-10)$$

$$e_D = e_0 - C \cdot \log D \quad (I-11)$$

式中： ϕ_D ——深度为 D 处的孔隙度；

e_D ——深度为 D 处的孔隙比；

ϕ_0 ——沉积物的原始孔隙度；

e_0 ——沉积物的原始孔隙比；

C ——压缩系数；

D ——埋深。

对于砂质岩类，有：

$$\phi_D = \phi_0 - C \cdot D \quad (I-12)$$

$$\phi_D = \phi_0 \cdot e^{-C \cdot D} \quad (I-13)$$

$$e_D = e_0 - C \cdot \log D \quad (I-14)$$

式中各符号的意义同上。

对于碳酸盐岩和膏岩、盐岩，一般认为其孔隙度不随埋深而变化。

式(I-10)到式(I-14)是孔隙度同埋深的经验关系式，其中的压缩系数 C 是个因具体岩性成分而异的参数。并且，随埋深不同也有所变化。所以，严格地说，压缩系数并不是常数。梯奥多维奇等(1968)对砂质岩和粉砂质岩总结出了下列经验式。

深度在0—4500米范围内时，粉砂岩有以下两个经验式：

$$\phi_D = 29.50 - 0.003D, \text{ 或}$$

$$\phi_D = 31.53 \cdot \exp(-0.000152D)。$$

在此深度范围内的砂质岩，则可用以下两式计算，即：

$$\phi_D = 28.74 - 0.003D$$

$$\phi_D = 28.21 \cdot \exp(-0.000122D)。$$

冯·英格哈德（德）总结出了一些地区具体岩系的孔隙度随埋深变化的经验式如下：

委内瑞拉第三系： $e_D = 1.848 - 0.527 \log D,$

意大利波盆地的第三系： $e_D = 1.700 - 0.481 \log D,$

德国西北部的里阿斯统： $e_D = 1.160 - 0.317 \log D。$

我国各油区对沉积岩，特别是储集岩的孔隙度随埋深的变化也作了大量的研究，总结出了定量的经验公式。

长期以来，在石油地质研究中已习惯于把沉积岩的孔隙度变化同埋深联系起来，编绘孔隙度 - 埋深关系曲线，导出二者间的数量关系式。从而形成了一种误解，认为孔隙度是埋深的函数，这种认识和以此为根据的研究方法是错误的。沉积物在埋藏过程中，其孔隙之所以随埋深而降低，直接的原因是承受了上覆沉积物的重量，是机械压实作用的结果。如果不考虑次生孔隙的形成，则应当说孔隙度是有效压力的函数。

在沉积物的埋藏、成岩过程中起主导作用的是机械压实。造成机械压实的力来源于上覆沉积物的重量。因此，为了正确地恢复沉积物的埋藏史、定量地计算某沉积层从沉积到现在的孔隙度变化、厚度变化，就必需对沉积埋藏过程中岩系内压力的种类、分布和变化作较细致的研究。

总之，沉积岩的孔隙度的变化主要是机械压实的结果。孔隙度随埋深而降低的现象是机械压实作用的反映而已。研究沉积岩系内各种压力的形成和分布是恢复沉积埋藏史的关键环节。

四、埋藏压实过程中的压力因素

前已述及，碎屑沉积的孔隙度随埋深而降低的现象虽然是实