

计算沉积层古厚度的逐层恢复法

袁炳存 钱奕中

(武汉地质学院) (大庆油田物探公司)

前 言

油气勘探实践证明,绝大多数油气聚集存在于含油气盆地之中,因此,油气田的调查和勘探必须着眼于含油气盆地的研究,研究盆地的沉积史,构造发展史,有机物质演化史以及流体(石油和天然气)的运移和聚集史。在盆地全部地质演化史的研究中,沉积层的厚度是一个极其重要的参数,然而,各个地史时期沉积层的厚度不应该是一个常数,随着它自身埋藏深度的增加而逐渐减薄,这是一个众所周知的客观事实。但是,目前利用厚度法进行地质分析时都运用沉积层的现厚度(或称今厚度)代替各地史时期沉积层的古厚度,这样分析的结果必然产生一定的误差。举例来说,某一地史时期沉积盆地中有一个水下古隆起,在古隆起上方主要接受砂质沉积,其外围沉积了较厚的泥质沉积,沉积得到补偿(图1A),经成岩压实,

由于砂岩的压实量小,泥岩的压实量大,在适当的条件下,砂、泥岩的厚度可能趋于一致(图1B),厚度差趋于零。如果我们不考虑沉积层厚度的变化,用今厚度进行古构造分析,就不可能认识它曾经是一个古隆起,只能得出当时底形平坦(图1C)的错误结论。这是由今厚度进行古构造或古地理研究时必然带来的问题。此外石油地质领域中的许多理论问题,如生油门限深度等也是用今厚度计算的,而当时的实际深度比用今厚度计算的要大。类似这样的问题很多,不一一列举。总之,用不变的今厚度代替逐渐减薄的古厚度进行地质历史分析是不确切的。

为了解决这个问题,前人曾作过不少努力。但由于方法本身的局限性,因此不能得到广泛应用。目前,由于各类沉积物的压实机理进行了较深入的研究,声速和密度等地

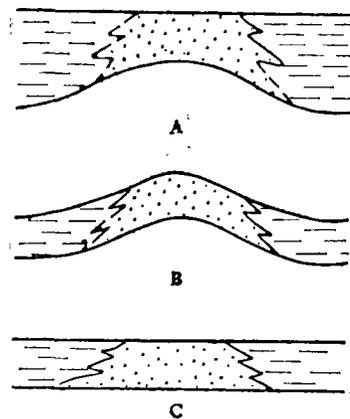


图 1

- A、沉积时的水下古隆起
- B、因差异压实,沉积层厚度趋于一致
- C、用厚度法恢复古构造剖面,它的底形是平坦的

球物理测井资料的质量不断提高,实验室测试手段的不断完善,特别是电子计算机技术广泛的应用,为定量恢复各地史时期沉积层的古厚度创造了条件。

一、基本出发点

恢复沉积层古厚度的逐层恢复法是建立在沉积层压实作用的基础上的。所谓“压实作用”是指在上覆负荷作用下,沉积物中的流体排出,孔隙体积缩小,密度增大的过程。沉积层由于压实而减薄,各个地史时期由于沉积层经受的压实程度不同,所以它们的厚度是不一致的。逐层恢复法就是根据沉积层在压实过程中的特点,对不同类型沉积层逐层恢复其古厚度。

我们知道,促使沉积层压实的负荷可以是上覆沉积物的重力应力,也可以是造山运动的构造应力。逐层恢复法只考虑由于沉积层埋深加大所承受的重力应力,而没有考虑构造应力的作用,因此该法只适用于造山运动比较轻微的沉积压实盆地。

沉积层厚度减薄的主重原因是沉积层孔隙体积的减小。因此,凡具有原始孔隙体积的沉积层都要经受压实。粘土和煤的原始孔隙度最大,可压实量也最大。砂岩和碳酸盐岩随埋深加大孔隙度有明显地降低,但它们的压实量比粘土小得多。没有原始孔隙的是蒸发岩,它们理应不被压实,但石膏转变为硬石膏时,体积会明显地减少,100米厚的石膏层排出结晶水后仅剩62米厚的硬石膏层。这说明不同类型的沉积层其压实量有很大差别。

沉积层是边沉积边压实的,在不同的压实阶段,沉积层的压实量是不同的。以粘土沉积层为例,粘土沉积层在埋藏的初期阶段,沉积层中的流体能顺利排出,沉积层孔隙度下降很快,沉积层迅速减薄。随着埋深加大,由于岩石的孔隙度和渗透率变小,流体排出的速度减缓,沉积层减薄的速率也大大降低。1959年鲁贝和哈伯特曾提出,在压实平衡条件下页岩孔隙度与深度之间呈指数函数的关系式,如下:

$$\phi = \phi_0 \cdot e^{-CZ} \dots \dots \dots (1)$$

- 式中; ϕ ——埋深为Z处的页岩孔隙度
- ϕ_0 ——地表(Z=0)泥质沉积物的孔隙度
- e——自然对数的底
- c——因次常数,反映压实趋势的斜率

其中常数C和 ϕ_0 值是随着地区、岩相带及沉积物类型的不同而不同,它需要根据不同的地质条件确定不同的数值。

在快速堆积的情况下,在砂岩和粉砂岩夹层很少的厚泥岩层中,由于压实过程中沉积层渗透率降低,流体不能及时排出,压实平衡遭到破坏,产生欠压实现象。在欠压实泥岩中,孔隙流体压力和岩石孔隙度将偏离正常压实趋势线,出现高异常,沉积层随埋深增加而减薄的速度就要减缓。

因此,在假定沉积层压实是不可逆(或者认为岩石回弹很小,可以忽略)的前提下,以压实作用为基础用以恢复沉积层古厚度的数学模型必须考虑正常压实情况下沉积层边沉积边压实的特点和欠压实情况下,岩石孔隙度偏离正常压实趋势的基本事实。

二、基本原理

岩石主要有两部分组成：一是固体部分；二是充满岩石孔隙的流体部分。孔隙中流体的量可用孔隙度（ ϕ ）来度量，其表达式：

$$\phi = \frac{V_{孔}}{V_{总}}$$

孔隙度（ ϕ ）是岩石孔隙体积（ $V_{孔}$ ）和岩样总体积（ $V_{总}$ ）之比。岩石固体部分的数量可用颗粒比（ $1 - \phi$ ）来度量，它是岩石固体部分的体积（ $V_{固}$ ）与岩样总体积之比，其表达式

$$1 - \phi = \frac{V_{固}}{V_{总}}$$

我们假定，沉积层经受压实作用时，沉积物的固体体积不变，导致沉积层减薄的主要原因是孔隙体积的缩小。因此，孔隙度（ ϕ ）和颗粒比（ $1 - \phi$ ）是衡量压实程度的一把尺子。

为了简化，我们假设研究对象是一个截面积等于1的柱状体沉积物，那么它的孔隙度和颗粒比就可以用孔隙高度（ $h_{孔}$ ）和固体高度（ $h_{固}$ ）和岩样总高度（ $h_{总}$ ）的比值来表示，即：

$$\phi = \frac{h_{孔}}{h_{总}}, \quad 1 - \phi = \frac{h_{固}}{h_{总}} \\ \therefore h_{固} = (1 - \phi) h_{总} \dots \dots \dots (2)$$

在压实过程中，柱形体沉积物的固体高度（ $h_{固}$ ）是不变的，柱形体沉积物总高度（ $h_{总}$ ）的变化取决于孔隙高度（ $h_{孔}$ ）的变化。

当柱形体沉积物的高度很小时，可把（2）式用微分的形式来表示：

$$dh_{固} = (1 - \phi) dh_{总}$$

考虑到沉积层是边沉积边压实的，在压实平衡条件下，沉积物的孔隙度（ ϕ ）和埋深（ H ）呈一定的函数关系，可用 $\phi = \phi(z)$ 来表示，这里把Z轴定为柱形体沉积物的高度座标，那么它的固体高度可用下面的积分式表示：

$$h_{固} = \int_{z_1}^{z_2} [1 - \phi(z)] dz \dots \dots \dots (3)$$

式中 z_1 、 z_2 是该柱形体上、下界面的埋藏深度。从图2中可知，沉积层固体高度（ $h_{固}$ ）相当于图中带斜线部分的面积。如果把（1）式代入（3）式，得：

$$h_{固} = \int_{z_1}^{z_2} (1 - \phi_0 e^{-Cz}) dz \dots \dots \dots (4)$$

式（4）是压实平衡条件下计算泥质沉积层固体高度的公式。

在沉积压实过程中，沉积层的埋深、厚度和孔隙度、颗粒比是在不断变化的，可以假设为不变的因素是固体高度。因此，可以通过公式（3）计算任何一个沉积层的固体高度值，并利用固体高度不变的基本假定求得沉积层在不同埋藏深度时的厚度。图3中的曲线为页岩孔隙度随埋藏深度呈指数关系的变化曲线（ $\phi = \phi_0 e^{-Cz}$ ）。现在页岩的

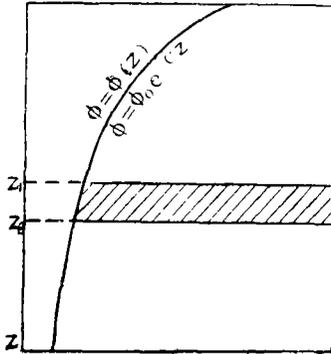


图2 单一沉积层固体高度计算图示

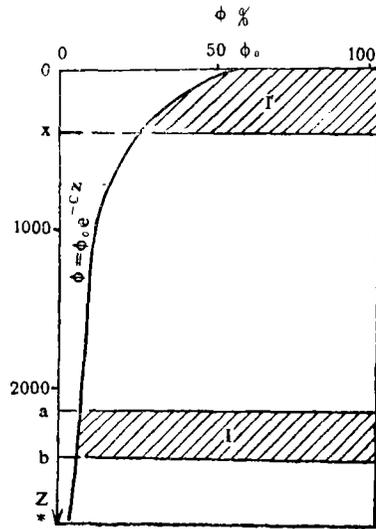


图3 单一沉积层古厚度计算图示

顶界深度为a，底界深度为b，它的厚度为b-a。该页岩层的固体高度应为：

$$h = \int_a^b (1 - \phi_0 \cdot e^{-Cz}) dz$$

它相当于图3中带斜直线 I 的面积。若要求它沉积时的古厚度，即把该层页岩恢复到地表，可根据固体高度不变的假定写出下式：

$$\int_a^b (1 - \phi_0 \cdot e^{-Cz}) dz = \int_0^x (1 - \phi_0 \cdot e^{-Cz}) dz \dots \dots \dots (5)$$

从等式中求解x，得该页岩层沉积时的底界深度，其厚度为x-0。同理，可以计算出在任何一个深度d处的厚度，只需把(5)式中的0改为d，求解x，x-d为其厚度。

图4表示要恢复岩石类型不同的一套岩层在其自身沉积末时的古厚度。这里同样可按照固体高度不变的假定，首先把最上面的I层(单一岩石类型)恢复到地表，并确定其底界深度，即使带斜直线 I 的面积等于 I' 的面积。接着从 I' 层的底界向下恢复 II 层，使带黑点的 II' 和 II 的面积相等，然后以此类推，对第 III 层，第 IV 层逐层进行恢复，此时要求每一单层的岩石类型是单一的，而且对不同的岩石类型(如砂岩、泥岩、灰岩)应按照它自身的孔隙度随深度变化的曲线进行计算。按此原则所恢复的沉积层厚

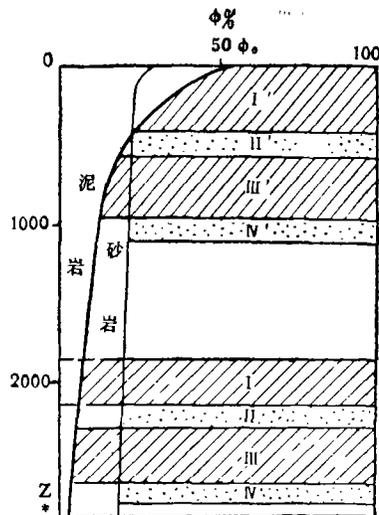


图4、砂、泥岩互层剖面中沉积层古厚度计算图示

度，既考虑了不同岩石类型压实状况的不同，又考虑了沉积层边沉积边压实的因素。由于沉积层厚度是按岩性不同逐层进行恢复的，故称之为“逐层恢复法”。地层古厚度恢复工作量是很大的，因此需要编制适当的计算机程序用计算机进行处理。

假若厚层泥岩中出现欠压实的状况。泥岩在欠压实段的孔隙度比正常压实时大（见图5），如果不加以考虑就会出现厚度误差，使恢复的古厚度增大。为此，可对泥岩欠压实段的 $\phi-H$ 曲线用一元多次方程或其它方程进行拟合，再用此方程对泥岩欠压实段进行固体高度计算，以此可以消除厚度误差。

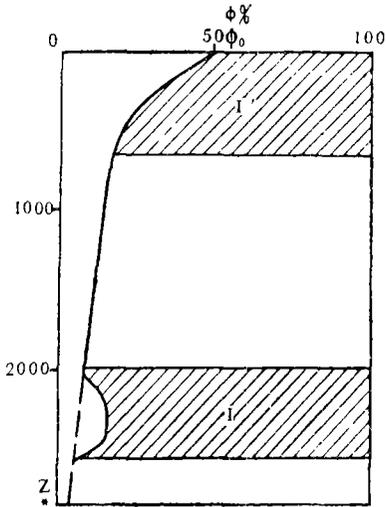


图5 对泥岩欠压实段进行古厚度计算图示

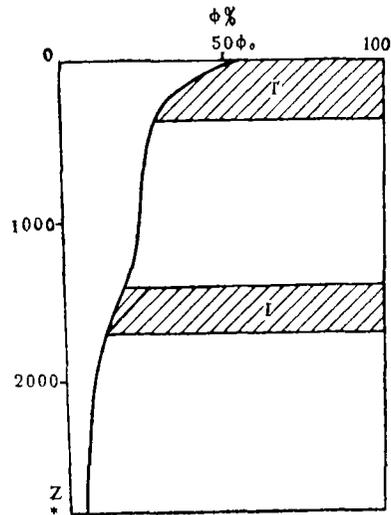


图6 对因粘土矿物转化造成偏离正常趋势线的泥质岩层进行古厚度计算图示

此外，在沉积层深埋和压实过程中，粘土矿物会发生转化，层间距较大的蒙脱石可以转化为层间距较小的伊利石，使粘土矿物的层间结合水转变为孔隙自由水。一旦孔隙中的自由水被驱出，将导致泥岩孔隙度下降，泥岩层减薄（图6）。在这种情况下，同样应该用它自身的孔隙度随深度变化曲线（EF段）进行固体高度计算。

综合上述，逐层恢复法的核心是计算各个单一岩层的固体高度，其关键是确定各种不同岩石类型的孔隙度随深度的变化曲线，并用相应的数学方程进行拟合。如果 $\phi-H$ 曲线比较简单，可以用一个数学方程去拟合，如果 $\phi-H$ 曲线比较复杂（出现欠压实等情况），可以分段进行拟合。目前不同岩石类型的孔隙度——深度曲线可以藉助于实验室物性的测定资料，可以通过声速测井或密度测井资料或通过现代沉积物的压实模拟实验资料来确定，有关这个问题在沉积压实的书刊上已有大量论述，这里不再赘述。

我们知道，不同沉积盆地，盆地内不同的二级构造单元，不同的沉积环境，各种岩石类型的 $\phi-H$ 曲线是不同的，甚至不同的钻井沉积层的压实和欠压实等情况也不尽相同，因此，若能对每一口钻井都能取得各种岩石类型的 $\phi-H$ 曲线，并以此恢复本井各地史时期的古厚度，那是非常理想的情况。如果资料不够，只能采用平均孔隙度——深度

曲线进行计算。所谓平均孔隙度是指在某一个区域内，某一个深度间隔范围内，某一岩石类型孔隙度的平均值。运用平均孔隙度进行计算就很难消除因欠压实或矿物转化所造成的厚度误差。

三、应用

1. 用“逐层恢复法”计算古厚度，用古厚度编制的地质等厚图比用传统的用今厚度编制的地质等厚图更接近于真实，它在古构造、古地理分析上以及油气生成、运移、聚集等问题的研究上有更大的实用价值。

2. 计算压实量和差异压实量

在石油地质文献里经常出现沉积背斜，差异压实构造等术语。一般下伏有一个砂质扇形体，或者有一个古河道砂岩体，在其上复地层中出现一个鼻状构造或背斜构造，人们很容易得出这是沉积背斜或差异压实背斜的结论。然而，鼻状构造或背斜构造是否由单一的差异压实因素造成，换句话说，差异压实能产生多大幅度的构造，这就需要计算压实量和差异压实量。

压实量 ($H_{压}$) 是指某地史时期某沉积层的古厚度 ($H_{古}$) 和今厚度 ($H_{今}$) 之差，即

$$H_{压} = H_{古} - H_{今}$$

差异压实量是指两点间压实量之差。图7是在一个水下古隆起上沉积了一套沉积层

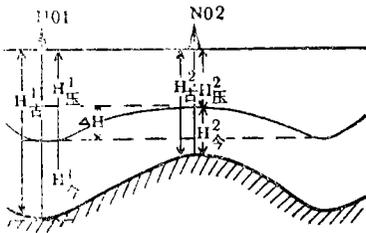


图7 在一个水下古隆起上，用差异压实量来度量差异压实构造幅度图示

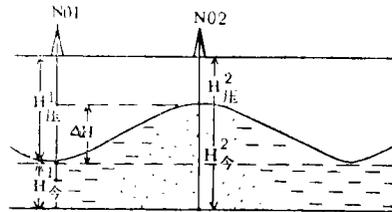


图8 因岩性不同所形成的差异压实构造幅度用差异压实量来度量的图示

A, 沉积时在井₁处厚 $H_{古}^1$ ，在井₂处厚 $H_{古}^2$ 。经压实，它们的今厚度分别为 $H_{今}^1$ 和 $H_{今}^2$ ，它们的压实量分别为 $H_{压}^1$ 和 $H_{压}^2$ 。井₁和井₂间的差异压实量 $\Delta H = H_{压}^1 - H_{压}^2 = (H_{古}^1 - H_{今}^1) - (H_{古}^2 - H_{今}^2)$ 。由图中可见，差异压实构造的幅度可以用差异压实量来表示。图8是由于岩性的不同所形成的差异压实构造，这种类型的差异压实构造的幅度同样可以用差异压实量来度量。由此，我们可以编制地层压实量等值线平面图来研究差异压实构造的形态和幅度。我们也可以选择横切构造的几口井，求其差异压实量来表示差异压实构造的幅度。

3. 计算沉积层底界面的变化值。

上面讨论的差异压实构造有一个共同点，即沉积层的底界面在沉积时和压实后均没有发生变化，变化的只是沉积层的顶界面。实际上沉积层的底界面因各种因素的作用而发生变化，底界面产状的改变同样影响顶界面产状的改变。

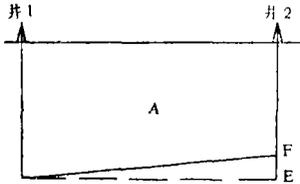


图9 A层沉积末，A沉积层的分布状况

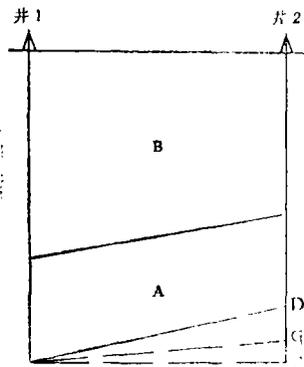


图10 B层沉积末，A、B沉积层的分布状况(A层的底界面在井2处抬升)

图9是A层沉积末，A沉积层的分布状况。井₂处底形较高，在井₂处A沉积层的古厚度比井₁处薄，厚度差为EF。后来接受B层沉积，A层被压实，并伴有A层底界面产状的变化。B层沉积末A、B沉积层的分布状况如图10所示。从图9中可知，在井₁和井₂处A沉积层底界面的高差(EF)等于井₁处A层的古厚度减去井₂处A层的古厚度，即：

$$\overline{EF} = H_{古}^1(A) - H_{古}^2(A)$$
 同理，在图10中，B层沉积末，井₁和井₂处A沉积层底界面的高差CD为A+B层古厚度之差，即：

$$\overline{CD} = H_{古}^1(A+B) - H_{古}^2(A+B)$$

令CG = EF，则

$$\overline{DG} = \overline{CD} - \overline{EF}$$

$$= [H_{古}^1(A+B) - H_{古}^1(A)]$$

$$- [H_{古}^2(A+B) - H_{古}^2(A)]$$

这样，至B层沉积末A层底界面的变化值可以通过上式计算结果，编制B沉积层A+B层的古厚度和A沉积末A层的古厚度之差值的等

值线图或横剖面加以研究。

沉积层顶界面的变化量应该是沉积层自身差异压实量及其底界面变化量之和。如果某沉积层顶界面的变化量等于它自身的差异压实量，其底界面的变化量等于零，则此构造纯属差异压实构造。如果某沉积层顶界面的变化量等于其底界面的变化量，则此构造和差异压实无关。

大庆油田所在圈闭——大庆长垣锥型的形成机理是一个长期争论不休的问题。主要有两种意见，一种意见根据松辽盆地北部河成三角洲砂岩体的分布和大庆长垣古构造形态的对比，认为大庆长垣的锥型是由于三角洲砂岩体经差异压实所致；另一种意见认为大庆长垣锥型和盆地基底断块的差异沉降作用有关。为了深入探讨这个问题，我们选择了大庆长垣南北各一条钻井剖面对其下白垩统青山口组、姚家组和嫩江组一至四段的地层剖面进行古厚度计算，其结果见表1。

大庆长垣钻井横剖面地层古厚度数据

表 1

| 剖面 | 井号 | 地层名称 | 地层古厚度 $H_{古}$ (米) | | 压实量 $H_{压}$ (米) | $H_{古}(A+B)$ (米) | $H_{古}(A+B) - H_{古}(A)$ (米) |
|--------|------|----------|-------------------|--------|-----------------|------------------|-----------------------------|
| | | | 姚家组沉积末 | 嫩四段沉积末 | | | |
| 长垣南部剖面 | 召15 | 青山口组十姚家组 | 723 | 598 | 126 | 1388 | 665 |
| | 葡1 | | 787 | 673 | 114 | 1327 | 540 |
| | 阳深1 | | 775 | 650 | 125 | 1426 | 651 |
| | 古5 | | 816 | 686 | 130 | 1469 | 653 |
| 长垣北部剖面 | 升4 | (A) | 497 | 348 | 149 | 1113 | 616 |
| | 达2 | | 465 | 313 | 152 | 1085 | 620 |
| | 松基6 | | 649 | 577 | 72 | 1249 | 600 |
| | 萨5 | | 663 | 602 | 61 | 1284 | 621 |
| | 拉172 | | 837 | 748 | 89 | 1492 | 655 |

注: $H_{古}(A+B)$: 嫩江组四段沉积末, 青山口组底至嫩四段顶的沉积层古厚度

$H_{古}(A)$: 嫩江组四段沉积末, 青山口组底至姚家组顶的沉积层古厚度

从表 1 中可知, 在大庆长垣南部截至嫩江组四段沉积末, 由于青山口组和姚家组地层的差异压实使姚家组顶面出现的构造幅度很小。葡 1 井处压实量最小, 它和召 15 井的差异压实量为 11 米, 和古 5 井的差异压实量为 16 米。与此同时, 因青山口组底界面的变化所造成的姚家组顶面的构造幅度较大, 葡 1 井相对于召 15 井上拱了 125 米 ($665 - 540 = 125$), 相对于古 5 井上拱了 113 米 ($653 - 540 = 113$)。可见, 在大庆长垣南部古隆起的形成因素上, 差异压实和底界面上拱相比, 只占十分之一左右, 是微不足道的。在大庆长垣北部截至嫩江组四段沉积末, 由于青山口组和姚家组地层的差异压实所形成的姚家组顶面构造是存在的。压实量最小的是萨 5 井, 它和拉 172 井间的差异压实量为 28 米, 和达 2 井间的差异压实量为 91 米。与此同时, 因青山口组底界面的变化所产生的姚家组顶面构造, 无疑也是存在的, 松基 6 井相对于拉 172 井上拱了 55 米 ($655 - 600 = 55$), 相对于达 2 井 20 米 ($620 - 600 = 20$)。可见两种因素形成的构造位置不完全重合, 在形成古隆起幅度上差异压实比底界面上拱的影响要大。由此可见, 大庆长垣锥型不是单一因素造成的, 基底断块的差异沉降在大庆长垣南部起重要作用, 大庆长垣北部差异压实因素应起主导作用。

四、存在的问题

1. 用“逐层恢复法”估算地层古厚度的精度主要取决于地层剖面中各种岩石类型的划分和各类岩石中 $\phi-H$ 曲线的求取。粘土沉积物的压实量与其矿物成分, 含矿量有密切的关系, 砂岩的孔隙度在很大程度上取决于它的粒度、分选性和堆集状况, 因此不同

物源区，不同沉积环境和水动力条件下形成的沉积物其中 $\phi-H$ 曲线是有区别的。这样要求我们作出大量的、含各种不同环境相应的各种岩石类型的 $\phi-H$ 曲线。实际上，至少目前这样做是不可能的。目前我们只能求取少数几种岩石类型（砂岩、泥岩）的 $\phi-H$ 曲线，无疑将对地层古厚度的计算带来误差。

2. 为了消除因泥岩欠压实和粘土矿物转化所造成的厚度误差，需要对每一口钻井建立自己的 $\phi-H$ 曲线，这和岩石绝对孔隙度的实验室测定资料不足是矛盾的。为此，需要利用声速测井或密度测井曲线求取各类岩石的孔隙度，砂岩在这方面的研究比较多，泥页岩比较复杂，必须作进一步的工作。

3. 沉积层固体高度不变是“逐层恢复法”的基本假定。但是，沉积层的压实过程是一个比较复杂的物理化学作用过程，在沉积压实过程中矿物的溶解和带出，新矿物的沉淀都会影响固体高度不变的假定。在碳酸盐岩发育区它的影响可能更大。此外，泥岩和膏盐层的塑性流动和岩石的回弹现象也直接改变沉积层的厚度。有关这些因素目前还无法引入数学模型中。

上述是计算地层古厚度误差的初步分析。尽管计算地层古厚度的“逐层恢复法”问题还很多，还不很完善，有许多因素还无法引入数学模型，然而，计算地层古厚度对于更正确地把握沉积盆地的演化史无疑是很必要的。

参 考 文 献

- [1] 袁亦楠、王衡鉴、曹文富，差异压实与大油气田，石油勘探与开发，1981年6月。
- [2] 真柄钦茨，压实与流体运移，石油工业出版社，1981年。
- [3] Raymond Perrier and Jacques Quiblier, Thickness Changes in Sedimentary Layers During Compaction History for Quantitative Evaluation AAPG. V58 NO.3 March 1974. P507—520.

METHOD OF “RECOVER LAYER BY LAYER” FOR CALCULATING THE PALEOTHICKNESS OF SEDIMENTARY LAYER

Yuan Bingcun

(Wuhan College of Geology)

Qian Yizhong

(Geophysical Exploration Company,
Daqing Oilfield)

Abstract

This paper describes the principle of the method by “recover layer by layer” for calculating the palaeothickness of sedimentary layer, and the applications and problems existed so far. The method of “recover layer by layer” is established on the concept of compaction of sedimentary layer, which applied the principle hypothesis that the solid height of sedimentary layer is not changed during the compaction. The thickness of sedimentary layer deposited in various geological periods could be recovered by calculating the solid height of sedimentary layer. The further calculations for compaction capacity, different compaction capacity, and changed value on the base boundary of sedimentary layer, the different compaction structures then could be analysed.