

古地层厚度计算方法的探讨

陈章明 万龙贵

(大庆石油学院)

碎屑岩类和粘土岩类压实固结成岩作用的研究颇早。1930年, L. F. Athy 就整理了美国宾夕法尼亚和俄克拉何马南部二叠系页岩的孔隙度、密度随埋藏深度而变化的关系曲线。五十年代以后, 这方面的研究逐渐兴起, 其模拟实验也纷纷开展。一般认为, 砂岩的最终压实率为 20% 左右, 泥岩的最终压实率为 70% 左右。但是, 碎屑岩类和粘土岩类从沉积初始至最终阶段的压实率变化过程, 尚待研究。

既然碎屑岩和粘土岩的压实率随其上覆负载的不断增加而逐渐增大, 沉积岩层的厚度是逐渐变薄的, 那就应当提出古地层厚度的概念, 并用来研究古构造的发展史和地层埋藏深度史。这样做势必比利用现代地层厚度来研究上述问题更符合自然现象。我们从开展不同岩类的压实模拟实验入手, 得到了各类岩石的压实率、密度随压力而变化的经验公式, 探讨了古地层厚度的近似计算方法, 并以实例比较了用古地层厚度和用今地层厚度恢复古构造发展史的差别, 从而认识到差异压实在有些构造的发展过程中有重要意义。

一、碎屑岩和粘土岩的压实率变化模式

我们进行了粗砂、中砂、细砂、粉砂和粘土等沉积物控温控压的连续压实模拟实验。其中碎屑岩类的原样均配置正态分布粒级, 并掺合 5—6 % 的胶结物和密度为 1.06g/cm^3 的盐水; 粘土样品也是用密度为 1.06g/cm^3 的盐水调混成原始淤泥状态。然后在 $3^\circ\text{C}/100\text{m}$ (地温梯度) 的控温条件下逐步地增压。在样品的压实程度达到稳定状况后, 才继续增加压力值及其相应的温度值, 所以每一压力值的压实时间为 2—3 天。碎屑岩类样品的最大压力均在 800kg/cm^2 以上 (此时的压实率随压力而变化的情况已相当稳定了)。粘土样品的压实稳定压力较大, 故其最大实验压力达到 1200kg/cm^2 。这些实验比较符合自然界沉积岩经受的压实历史过程。

压实实验结果如图 1 所示。粒级大小控制着压实率随压力增大变化的规律

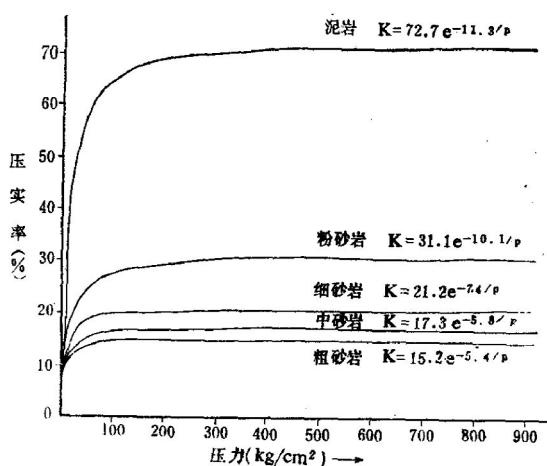


图1 沉积物压实率随压力变化情况

性,是很明显的。压实率随压力增加而急剧增大的阶段,对各类沉积物是不同的。粗砂、中砂、细砂最短,限于 10kg/cm^2 以内;粉砂次之,为 20kg/cm^2 以内;粘土类最大,在 40kg/cm^2 以内。压实率随压力增加而缓慢增大的阶段及压实率趋于稳定的阶段,也具有同样规律性,即随沉积物的粒级减小而有规律地增大(表1)。

表1 各类沉积物压实率变化阶段

压力					
----	--	--	--	--	--

A, b ——反映不同岩性压实率特征的参数,粒级越大则 A 值和 b 值越小,反之亦然(表2)。

表2 各类沉积物压实特征参数

压实特征参数	粗 砂	中 砂	细 砂	粉 砂	粘 土
A	15.2	17.3	21.2	31.1	72.7
b	5.4	5.8	7.4	10.1	11.3

压实模拟实验表明,泥质岩与各种粒级的砂岩之间的压实率差 ΔK , 随粒级差和压力而变化(图2):

$$\Delta K = A' \cdot e^{-b'/P} \quad (2)$$

式中: ΔK ——同一压力值下粘土与各粒级砂岩之间的压实率差, %;

P ——上覆层压力, kg/cm^2 ;

A', b' ——反映粘土与各粒级砂岩之间压实率差随压力而变化的参数,粒级差越大则这两个参数值越大,反之亦然(表3)。

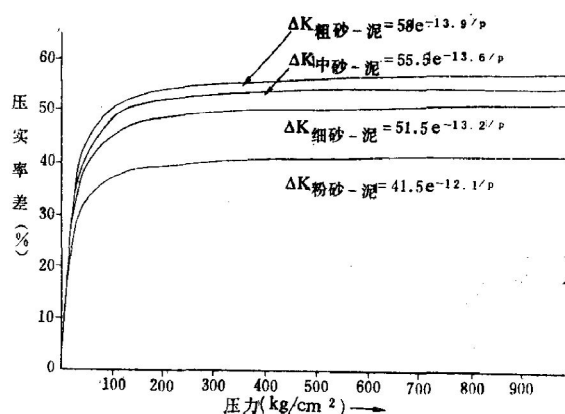


图2 砂-泥压实率差随压力变化情况

压实率差随压力而变化的趋势也可分3个阶段:第一阶段是急剧变化阶段,压力为 $0-40\text{kg/cm}^2$;第二阶段是缓慢变化阶段,压力为 $40-250\text{kg/cm}^2$;第三阶段是稳定阶

表3 压实率差的经验公式

岩石粒级差	压实率差随压力变化的经验公式
粗砂岩—泥岩	$\Delta K = 58e^{-13.9/p}$
中砂岩—泥岩	$\Delta K = 55.5e^{-13.6/p}$
细砂岩—泥岩	$\Delta K = 51.5e^{-13.2/p}$
粉砂岩—泥岩	$\Delta K = 41.5e^{-12.1/p}$

段，压力大于 250kg/cm^2 。这就是说，若上覆层密度为 2.1g/cm^3 ，则砂、泥岩之间的差异压实现象在埋深小于200m时随着压力的增大而显著增强，当上覆层厚达1200m之后，其差异压实现象已趋稳定。

沉积物在压实过程中，其密度随压力增大而变化。我们获得的经验公式见表4¹⁾。根据这些经验公式可以归纳出这样一个公式：

$$\rho_i = \rho_0 + A'' \cdot e^{-b''/H'} \quad (3)$$

式中： ρ_0 ——沉积物原始密度， g/cm^3 ；

ρ_i ——某一压力下沉积物的密度， g/cm^3 ；

A'', b'' ——反映岩石密度与埋深关系的参数，粒级越小，其值越大；

H' ——上覆层厚度的一半，m。

表4 各类沉积物密度随压力变化情况

样	品	密度随压力变化的经验公式
粗	砂	$\rho_i = 2.056 + 0.178e^{-6.22/p}$
中	砂	$\rho_i = 1.936 + 0.184e^{-6.96/p}$
细	砂	$\rho_i = 1.878 + 0.221e^{-9.04/p}$
粉	砂	$\rho_i = 1.789 + 0.327e^{-12.99/p}$
粘	土	$\rho_i = 1.429 + 0.914e^{-22.72/p}$

二、古地层厚度的计算法

如图3所示，A层沉积末期的原始厚度为 H_A^0 ，到B层沉积末期A层厚度被压缩了 h_A^B ，其层厚为 $H_A^B = H_A^0 - h_A^B$ 。到了C层沉积末期，A层被压缩了 h_A^C ，其层厚变为 $H_A^C = H_A^0 - h_A^C$ 。同理， $H_B^C = H_B^0 - h_B^C$ 。

- 1) 编者注：如果以符号 ϕ_0 表示沉积物的初始孔隙率， K_i 表示沉积物的瞬时压实率， ρ_m 表示沉积物中固态物质(颗粒)的平均密度，并假定沉积物孔隙中始终充满着密度为 $\rho_w \approx 1$ 的液体。那么，在理论上，

$$\rho_0 = \rho_m(1 - \phi_0) + \rho_w \phi_0, \quad (A)$$

$$\rho_i = \frac{\rho_m(1 - \phi_0) + \rho_w(\phi_0 - K_i)}{1 - K_i}, \quad (B)$$

即，

$$\rho_i = \frac{\rho_0 - \rho_w K_i}{1 - K_i} \approx \frac{\rho_0 - K_i}{1 - K_i}. \quad (C)$$

根据我们建议的理论公式(C)算得的 ρ_i 值，同根据表4经验公式算得的 ρ_i 值是相近的，但式(C)比较简单。还要指出的是，由于上覆层密度是自上而下逐渐增加的， H' 与 p 之间的关系并不是线性关系，所以式(3)与表4公式并不是严格吻合的。

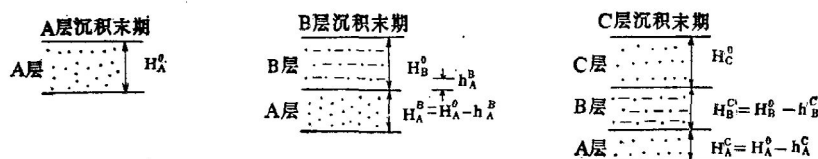


图3 沉积过程的地层厚度变化

设 H_A^0 压缩成 H_A^B 时的压实率为 $K_A^B = h_A^B / H_A^0$, 则 $h_A^B = K_A^B \times H_A^0$, 某一地层在任一时期的古地层厚度为:

$$H_i = H_0 (1 - K_i) \quad (4)$$

式中: H_i ——计算层段在某一地质时期的古地层厚度, m;

K_i ——计算层段在该地质时期的古压实率, %;

H_0 ——计算层段的原始厚度, m。

$$H_0 = \frac{H_n}{1 - K_n} \quad (5)$$

式中: H_n ——计算层段的现代厚度, m;

K_n ——计算层段的现代压实率, %。

因此, 任一地质时期的计算层段古地层厚度可以通过下列公式计算而得:

$$H_i = \frac{H_n}{1 - K_n} (1 - K_i) \quad (6)$$

式中 H_n 通过录井工作或其它方法取得。 K_n 及 K_i 值的确定方法简介于下:

1. 计算层段现代压实率 (K_n) 的确定

首先, 根据密度测井或岩样实测而取得计算层段及其上覆各岩层的现代密度值 (不同岩性分别测取。注意: 后生作用对岩石密度值增大的影响应予以消除)。然后根据计算层段的上覆岩层总厚度及平均密度值计算出上覆层负载。于是, 可按照公式 (1) 分别计算出各类岩石的现代压实率。岩石现代压实率的数值不仅与现代的上覆压力大小有关, 它与地质历史中所承受的最大压力 (或最大埋深) 的关系更密切。所以, 在确定岩石现代压实率时要注意综合考虑所计算层段的现代埋深与地史上的最大埋深 (后者更重要)。

2. 计算层段古压实率 (K_i) 的确定

先按上述方法计算出该计算层段的上覆岩层当时的厚度, 此值即代表该计算层段在当时的古埋藏深度。接着按公式 (3) 计算该上覆层在此地质时期的岩层古密度 (ρ_i)。然后取各类岩性的密度平均值及该上覆层厚度来计算上覆层造成的负载。最后, 利用此压力值和公式 (1) 计算该层段内各类岩石的古压实率 K_i 。

在具体恢复各地质时期的古地层厚度时, 必须考虑自然界沉积物是在不断增加上覆沉积层 (即不断增加上覆压力) 的情况下, 逐渐压缩减薄的 (图3)。计算 A 层在 A 层沉积末期的古地层厚度按公式 (5) 简易计算其原始厚度即可; 而计算 A 层在 B 层沉积末期的古地层厚度时, 必须先计算 B 层的原始厚度及此时的岩层古密度, 从而计算 B 层对 A 层造成的压力, 然后计算此压力条件下 A 层的古压实率; 于是 B 层沉积末期的 A 层古厚

度便可按公式(6)计算而得。当计算C层沉积末期A层的古厚度时,则须先按上法计算B层此时的古厚度及其古密度、古压力值,然后求得此时期C层和B层的总重量对A层所造成的古压力值,于是A层此时期的古压实率便可求得。最后按公式(6)计算A层的古厚度,即为所求的最终数据。

应当注意,各计算层段内存在着各类岩性段。计算古地层厚度时,因其压实率各异,故需分别计算其各自的古厚度,最后取其总值。

若计算层太厚,则需分小段分别求其古地层厚度,然后取其总值,才能较准确地代表计算层的古厚度。计算层段划分越薄,则计算层的古厚度值越准确。上覆层压力值小于 40Kg/cm^2 ,或计算层厚度的划分大于 20m (按今地层厚度值计)时,则对古厚度值的计算结果影响较大。例如(表5)S-66井 K_1Y_{2+3} 段今地层厚度为 83m ,将其整层作为一个计算层的计算结果,在 K_1Y_{2+3} 段末期的古厚度为 190.8m ,但将 K_1Y_{2+3} 段(83m)分为4个小层按沉积物逐次加压减薄的规律进行计算结果,则为 153.9m 。对比两者,其差值达 36.9m 。地层中泥岩所占比例越大,则这种误差越大。如表5所示,S-66井和S-68井的 K_1Y_{2+3} 段今地层厚度同是 83m ,但前者砂/泥高(0.886),后者砂/泥低(0.566),结果S-66井的上述计算误差为 36.9m ,而S-68井的上述计算误差为 46.5m 。所以,计算层划分越细,则所恢复的古地层厚度值越接近自然界的真实情况。根据图1、图2的曲线特征以及我们试算对比的结果,我们认为计算层段的厚度以 20m 为一计算单元即可满足地质要求。

表5 计算层厚度过大造成的误差情况

井号及层位	今地层厚度(m)	今地层砂/泥值	整层计算的 K_1Y_{2+3} 末期古 厚度(m)	分为4个计算层而 算得的 K_1Y_{2+3} 末 期古厚度(m)	两种计算结果的 差值(m)
S-66井 K_1Y_{2+3}	83	0.886	190.8	153.9	36.9
S-68井 K_1Y_{2+3}	83	0.566	214.0	167.5	46.5

三、古地层厚度的实用意义

目前,研究古构造发育史时广泛应用厚度法,所取厚度值系现代地层厚度,只在一定程度上能反映古构造的起伏情况。但是沉积层在漫长的地质年代中经受上覆沉积层所造成的负载,逐步压实减薄,才形成今日的厚度。也就是说,一个岩层的厚度在不同时期是不同的。因此,用厚度法研究古构造发育史时必须用古地层厚度值,否则势必影响古构造的起伏幅度值及埋藏深度值。

图4、图5是横切莎尔图构造及其两侧的古201、莎64、莎65、莎66、莎267、莎68、达1井在姚家组一段至嫩江组一段各时期的古构造剖面图。图4是利用今地层厚度值绘制的,图5是根据该区钻井地质、密度测井资料按上述方法选定参数后,恢复 K_1Y_1 、 K_1Y_{2+3} 和 K_1n_1 层在 K_1Y_1 末、 K_1Y_{2+3} 末、 K_1n_1 末的古地层厚度值而绘成的。对比图4和图5,可明显地看出以下几个现象。

1. 剖面上同一地质时期、同一地层界面的埋藏深度在图4和图5上明显地不一致,

用古地层厚度值恢复的古地层界面埋藏深度大于用现代地层厚度值所恢复的。显然,用古地层厚度值恢复古构造更符合自然现象。如表6、表7及图4、图5所示, K_1y_1 段底面在 K_1n_1 末期的古构造剖面特征,用今地层厚度值显示为自 S-64 井向东到 D-1 井呈一向东抬起的单斜(图4),而用古地层厚度值则在 S-65 井、S-66 井处显示出单斜上有一明显的凸起。

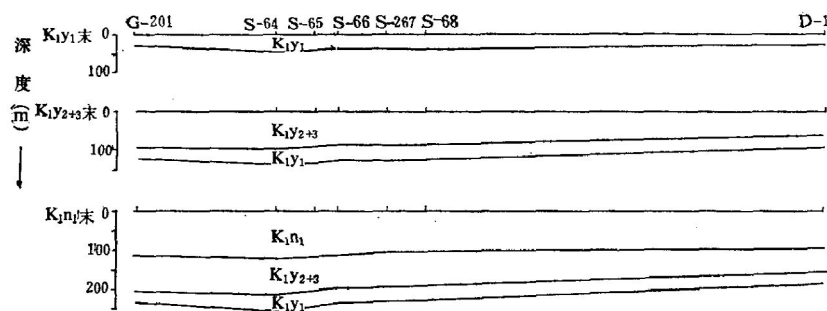


图4 古201—莎66—达1井 K_1y_1 末至 K_1n_1 末 K_1y_1 底面古构造发育剖面图
(用今地层厚度值绘)

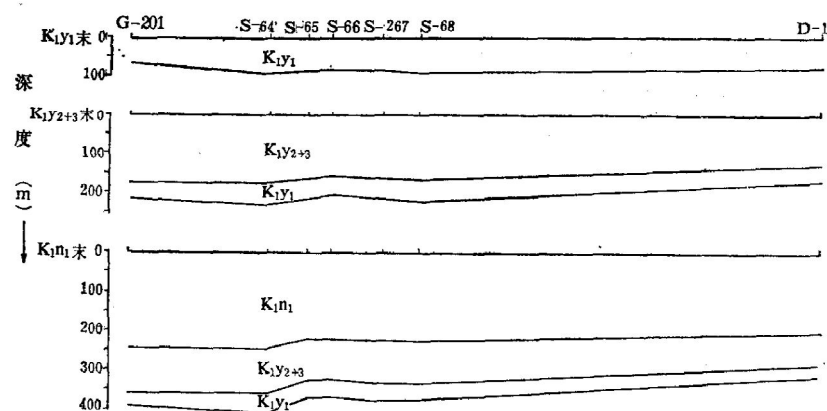


图5 古201—莎66—达1井 K_1y_1 末至 K_1n_1 末 K_1y_1 底面古构造发育剖面图
(用古地层厚度值绘)

2. 因为砂岩、泥岩在同一压力条件下的压实率有差异,我们在计算古地层厚度时,是对每一计算层内的不同岩性分别进行计算而后取其总和,作为该计算层的古厚度值。由于应用了古地层厚度值,砂、泥岩厚度比不同所造成的差异压实现象能够明显地显示出来。例如,表6中莎66井与莎68井的 K_1y_{2+3} 段,今地层厚度均为83m,但砂/泥值不

表6 今地层厚度及今地层砂泥比值

项目 剖面 层组	今地层厚度(m)							今地层的砂/泥值						
	G-201	S-64	S-65	S-66	S-267	S-68	D-1	G-201	S-64	S-65	S-66	S-267	S-68	D-1
K_1n_1	116.5	122.5	114.5	113.0	108.5	107	98	0.159	0.172	0.258	0.190	0.160	0.126	0.256
K_1y_{2+3}	90	90.5	90	83	87	83	59.5	0.682	0.757	1.00	0.886	0.974	0.566	0.630
K_1y_1	28.5	42	40	37	35	38	26	0.781	0.750	1.00	0.805	0.750	0.652	0.300

表 7 古 地 层 厚 度

时代 井号 层组	K ₁ Y ₁ 末							K ₁ Y ₂₊₃ 末						
	G-201	S-64	S-65	S-66	S-267	S-68	D-1	G-201	S-64	S-65	S-66	S-267	S-68	D-1
K ₁ n ₁														
K ₁ Y ₂₊₃								177.3	174	160	154	165.2	167.5	126.2
K ₁ Y ₁	67.8	95.6	85.2	82.0	80.3	89.2	70.7	39.7	57.5	52.8	51	48.5	53.7	43.4

续表 7

K ₁ n ₁ 末						
G-201	S-64	S-65	S-66	S-267	S-68	D-1
241.9	247	217.7	222.2	221.9	224.9	202.4
113.5	111.5	107.4	100.7	108.2	106.1	77.8
33.7	49	45.3	42.8	41.1	45.2	32.7

同, 莎 66 井 (0.886) 大于莎 68 井 (0.566), 恢复古地层厚度后, 在 K₁Y₂₊₃ 时末 K₁Y₂₊₃ 段的古厚度在莎 66 井为 153.9m, 而在莎 68 井为 167.5m, 二者差 13.6m, 这就是差异压实的结果。

3. 应用古地层厚度值恢复生油凹陷的埋深史, 显然各生油层在地史时期的埋藏深度比用今地层厚度值恢复者要大得多。这对

研究生油门限深度将更符合实际。例如, 古 201 井 K₁Y₁ 段底界深度用各时期古地层厚度计算, 其在 K₁n₁ 时末已达到 389m, 而用今地层厚度计算结果, 在同一时期 (K₁n₁ 时末) 的埋藏深度仅有 235m (见图 4、图 5 及表 6、表 7), 相差达 154m 之多。

4. 既然古地层厚度与砂/泥值有关, 可以推知, 生油凹陷内透镜体砂岩发育地段, 在地质史上会有其应有的古构造显示, 它们利于直接圈闭油气。因此, 若利用地震波的纵波速度计算出该区的砂/泥值, 就可以利用古地层厚度法恢复其古构造发育史, 从而研究隐蔽油气藏形成的可能条件。

四、结 束 语

1. 不同粒级碎屑物及粘土的压实模拟实验证明: 沉积物压实率的变化特征与其颗粒大小有明显关系; 颗粒越细则最终压实率越大; 压实率急剧递增的压力段是, 粗粒者小于细粒者; 在同一压力条件下, 砂质岩与粘土岩之间的压实率差随粒级差的大小而异, 粒级差越大则压实率差越大, 反之亦然。

2. 利用地层厚度法研究古构造发育史或地层埋藏深度史时, 应当恢复地层的古厚度值, 以便更准确地反映自然现象。

3. 本文的计算方法考虑了砂、泥岩压实率的差异性, 所以恢复的古地层厚度值能反映差异压实对构造形成的作用。可以认为, 利用地震波的纵波速度计算出一个凹陷的砂/泥值并恢复其古地层厚度值后, 可以显示出差异压实造成的古构造情况, 从而有助于研究隐蔽油气藏的形成条件。

我们认为压实模拟实验结果及其经验公式, 基本上能反映沉积物压实过程的厚度变化趋势, 用来近似地恢复古地层厚度是可行的。但是自然界对古地层厚度的许多影响因

素(如时间、成岩后生作用等),尚须进一步深入研究。

(收稿日期 1983年1月12日)

参 考 文 献

- [1] Rieke III, H. H., Chillingarian, G. V., 1974, *Compaction of argillaceous sediments*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam·London·New York.
- [2] Chillingarian, G. V., Wolf, K. H., 1976, *Compaction of coarse-grained sediments, I*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam·Oxford·New York.
- [3] 陈章明、方祖康, 1982, 蒙脱石粘土连续温控压压实实验. 大庆石油学院学报, 第2期.

A CALCULATING METHOD ON THE FOSSIL THICKNESS OF STRATIGRAPHY

Chen Zhangmin Wan Longgui

(*Geological Department, Daqing College of Petroleum*)

Abstract

Modelling experiments of clay and clastic sediments of various particle sizes have been made and some empirical formulations are obtained. This kind of work has proved that the compactibility varies with the particle size, and the differentia of compactibility depend remarkably on the difference of particle size also, when the same condition of pressure have been undertaken.

The stratigraphical thickness is surely getting thinner with the increasing of compaction in the process of sedimentation and lithification. A calculating method is thus suggested for restoring the fossil stratigraphical thickness, with the Saertu structure, Daqing Oilfield, taken as an example, the fossil stratigraphical thickness of three formations of which have been restored on the basis of one of its cross sections. The results have demonstrated that the fossil tectonic pattern restored by means of fossil stratigraphical thickness fits more the reality, and is quite different from that restored by means of recent stratigraphical thickness.

美国技术(石油地质)代表团来华进行学术交流

应中国科协的邀请,由美国国际人民交流协会组织的美国技术(石油地质)代表团于1983年9月来华进行学术交流。该团由59名成员组成,来自16个州的石油公司和大学,包括董事长、经理、独立经营者、咨询地质家、地球物理家和大学教授等,有比较丰富的油气田勘探的实际经验,共计提交了35篇论文。中国方面参加这次学术交流的有石油工业部、地质矿产部和石油、地质院校的地质、地球物理家60人。

学术交流按专业分成3个小组进行,美国技术(石油地质)代表团宣读了12篇论文,内容比较广泛,包括油气资源评价、勘探策略、井口地质、地球物理方法、测井技术、石油勘探数据库等等。报告后进行座谈,互相提问,气氛十分热烈。

在此之前,应美国技术(石油地质)代表团的要求,由石油工业部有关单位的地质家向他们介绍了中国陆地和大陆架的石油地质特征和勘探远景,也受到热烈欢迎。

该团在北京活动后分组去克拉玛依油田、大港油田和南海西部石油分公司参观访问。

(童晓光)