

大陆斜坡和陆隆区可能广泛分布天然气水合物的地震地层学证据

朱岳年编译 杜建国审

提 要 一般而言,大陆斜坡海相地层的地震反射剖面中所显示的异常反射事件,是与其沉积物中形成含天然气水合物的层带,及其基底含游离态天然气有关。美国得克萨斯大学海洋科学研究所对全美海域地震反射资料分析研究发现,沿美国东海岸西墨西哥海域、北哥伦比亚海域和北巴拿马海域。和沿巴拿马、阿卡普尔科及墨西哥海域展布的太平洋中美大陆边缘,均分布有天然气水合物层,推测其分布于700~4400m深的水下海底浅埋(距海底面深100~1100m)沉积物中。

几何关系、反射系数、反射极性、温度和压力关系均表明,大陆斜坡地震剖面中异常反射层的出现,是由含天然气水合物的沉积物层基底中含有游离态天然气引起的。多数情况,天然气水合物的分布是与地层构造异常(背斜、地层倾斜)有关,因为这些构造有利于天然气运移和富集。当富集的天然气遇到合适的温度和压力条件时,便可生成天然气水合物。根据天然气水合物的生成边界,可以确定地热梯度。但是,利用这种方法所确定的地温梯度要比常规方法所测定的值大。

一、 引 言

在高压天然气输送管道中,由于常常发生堵塞事件,而导致天然气水合物首次被发现 (Hammerschmidt, 1940; Deaton and Frost, 1946)。通常,天然气水合物的结构是水的冰笼结构以物理状态包裹着气体分子。这里的气体分子未直接参与化学平衡。当水中饱含天然气时,天然气水合物就在适当的压力和温度条件下生成(图1; Stoll et al, 1971; Claypool and Kaplan, 1974; Miller, 1974)。

首次推测海底存在天然气水合物,是由于在美国东大陆边缘的布莱克角外海岭地震剖面中发现了海底模拟反射层(BSR)。后来,在布莱克角外海岭实施深海钻探计划(DSDP)时,发现海底沉积物中含有丰富的甲烷。这样,便认为异常的海底模拟反射层的出现,是与海底沉积物中存在天然气水合物有关(Hollister et al, 1972)。Bryan (1974)研究认为,布莱克角外海岭地震剖面显示的反射高振幅可以解释为天然气水合物带的基底含有游离态的天然气层。Tucholke等(1977)研究发现,布莱克角外海岭异常的海底模拟反射层的分布,正好与甲烷+3%NaCl+水体系中天然气水合物生成的压力和温度相态边界分布一一对应(图1)。该天然气水合物带可从异常反射层一直延伸至海底面。

当前,调查天然气水合物的主要目的在于确定其分布的广泛性,除此,本文利用数字地震反射资料来确定海底模拟反射层的特性,进而来识别这种反射标志,和认识甲烷水合物形成分布的地质条件。

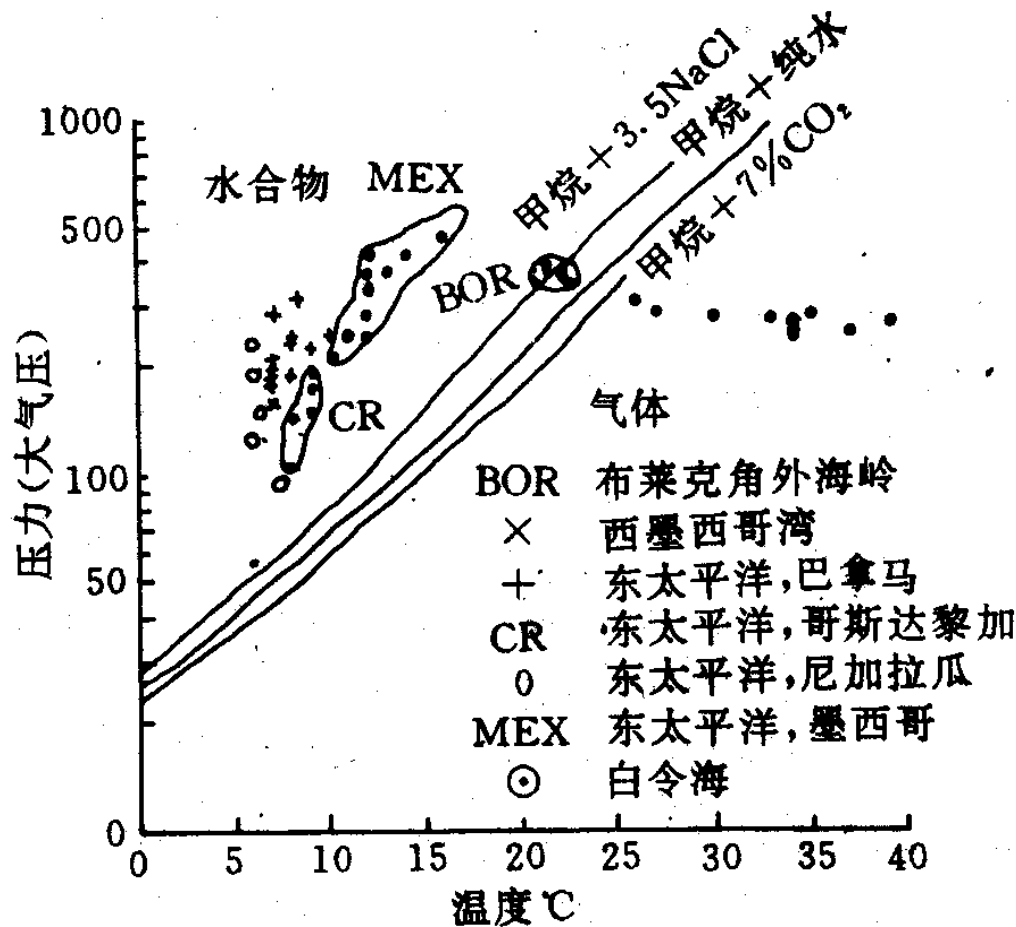


图1 天然气水合物稳定关系

(据Unruh and Katz, 1949; Kobayashi et al, 1951; Marshall et al, 1964; Tucholke, 1977)

二、天然气水合物的产出

美国得克萨斯大学海洋科学研究所收集了美国东海、墨西哥湾、加勒比海、和太平洋边缘的巴拿马、阿卡普尔科与墨西哥海域的3000km长的多道共深点(CDP)地震反射剖面资料。分析资料后确定了异常反射层分布的位置,发现这些位置完全符合天然气水合物产出的条件。从地震剖面上可以看到,异常反射层主要沿被动大陆边缘和活动性大陆边缘分布(包括美国东部的布莱克角外海岭、东墨西哥湾、北巴拿马、南巴拿马、西哥斯达黎加、西尼加拉瓜、西危地马拉和西墨西哥海域等(图2)。这些异常反射层的分布好象受一定的条件限制,部分是受大陆边缘控制的,而不是受大地构造背景制约。它们主要分布于700~4400m深的水下海底浅埋(100~1100m)沉积物中。下面分别对不同分布区进形讨论。

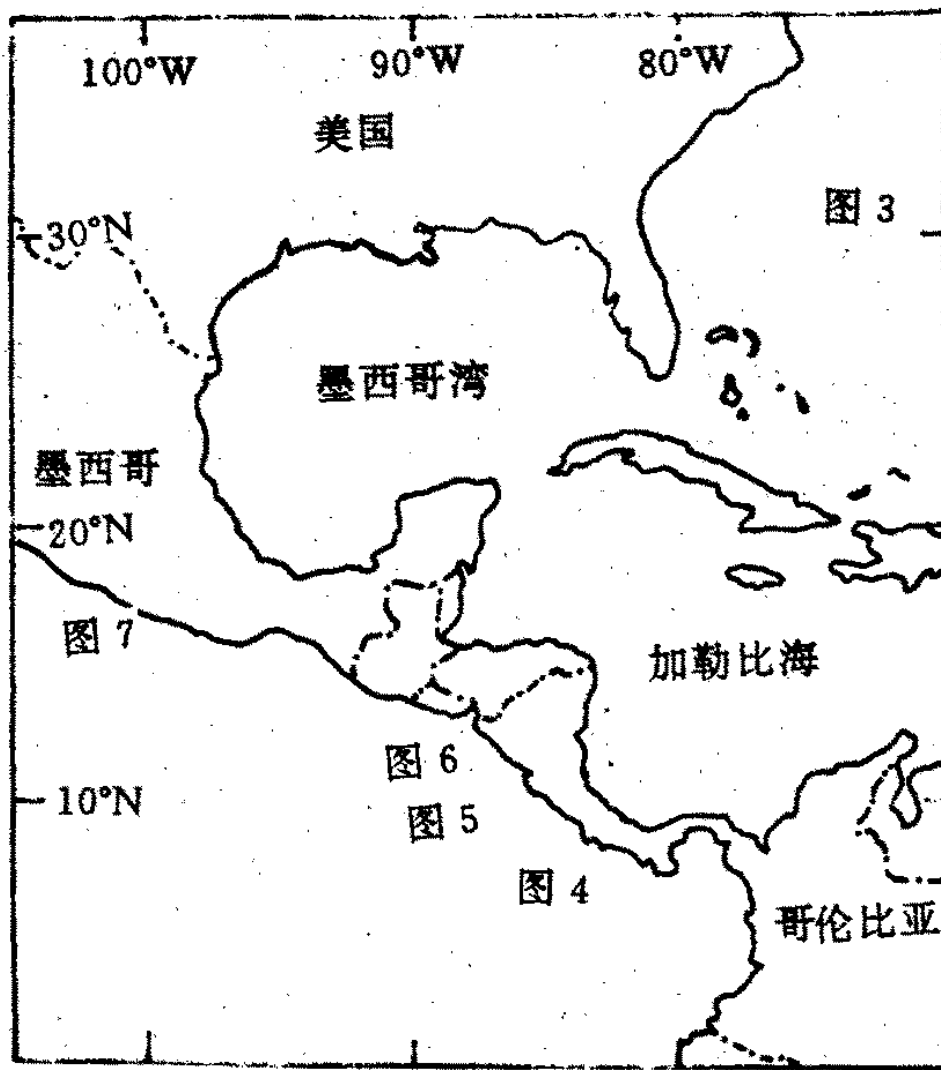
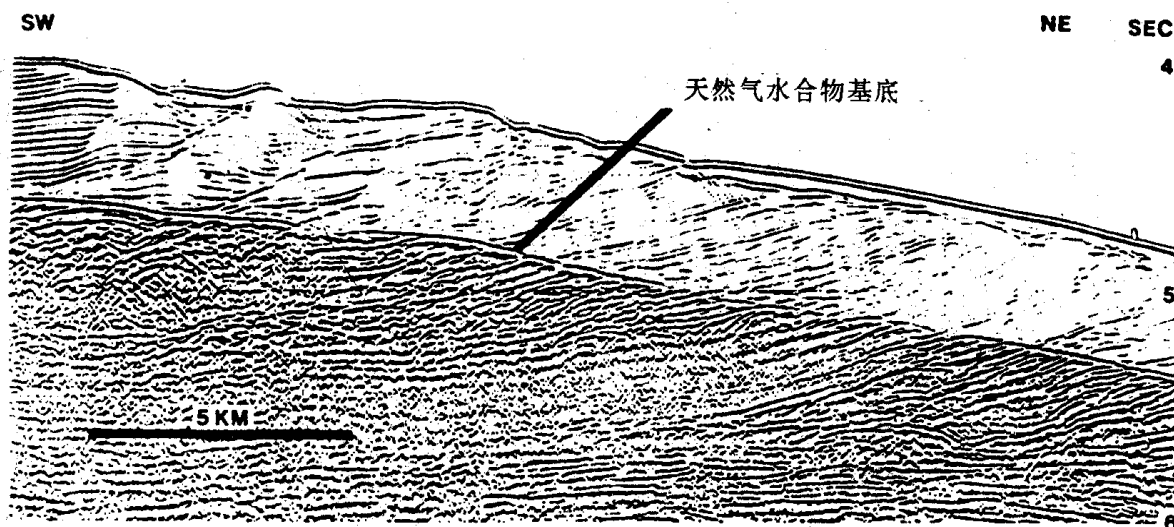


图2 推测的中美地区产天然气水合物的位置图

图号代表的是后面各图的剖面位置

1、布莱克角外海岭

图3示出的是布莱克角外海岭的地震剖面，由图3可以看出，在0.6秒处分布有一强烈的反射层；这可能代表的是天然气水合物带的基底(Bryan, 1974; Tucholke et al, 1977; Shipley et al, 1978)。向陆倾斜的层面反射是由富甲烷的近海粉砂泥岩层引起的，它穿越海底模拟反射层(Hollester et al, 1972)。Bryan(1974)认为，这种高振幅反射异常可能是由天然气水合物层封闭天然气的运移而使游离态的天然气聚集于水合物层之下引起的。



(据Buffler et al, 1978; Shipley et al, 1978)

2、南巴拿马太平洋海域

图4示出的是南巴拿马太平洋海域的地震剖面图，海底模拟高振幅反射约出现在海底之下0.4秒处。常常这一层穿越倾斜的层面反射层。南巴拿马海域的其他地区相干反射未表现出附近存在天然气水合物的迹象，尽管下伏的沉积剖面至少有3秒厚。

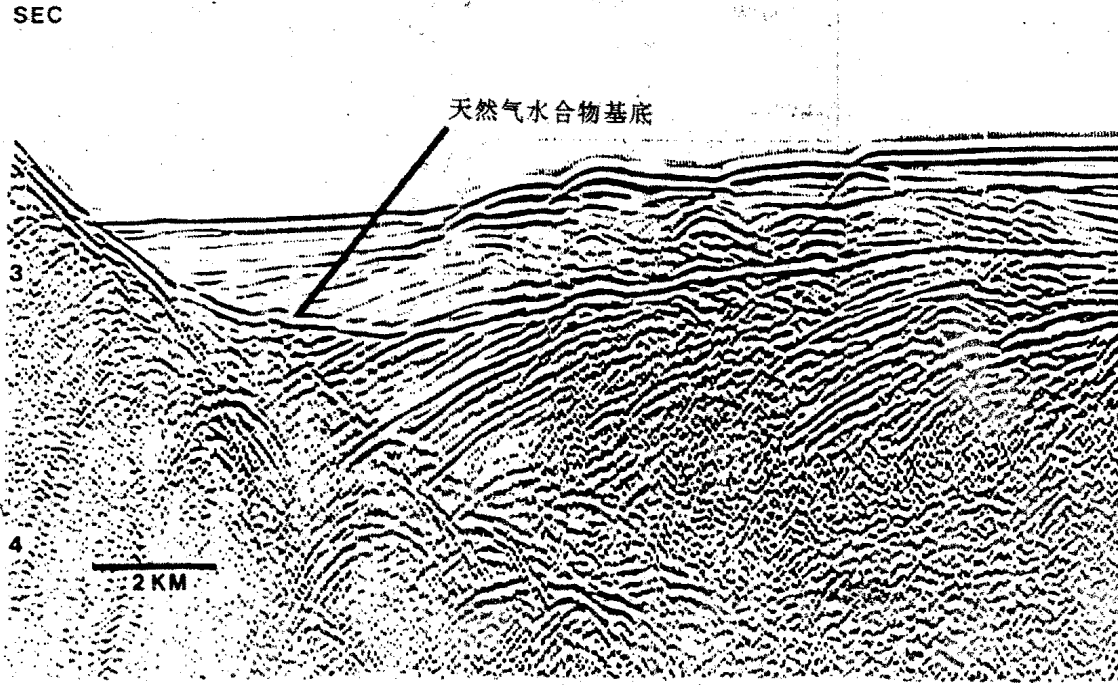


图4 巴拿马太平洋海域的12褶积地震反射剖面图

3、尼科亚半岛、各斯达黎加海域

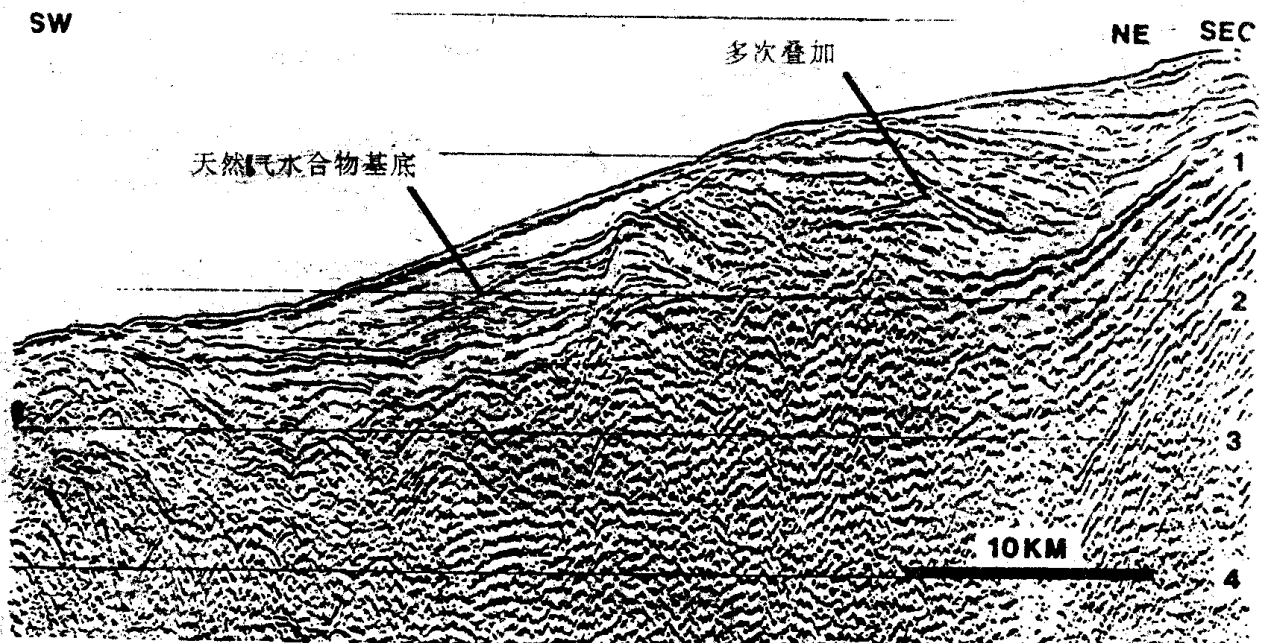


图5 尼科亚半岛、各斯达黎加海域24褶积地震反射剖面图

(据Buffler and Watkins, 1978)

尼科亚半岛、哥斯达黎加海域浅层沉积物中的异常反射层，出现在一个非补偿性沉积盆地中的水深小于1000m的沉积层中，该盆地之下为中美海沟内斜坡的变形和加积物区(Buffler et al, 1978)。这种反射清晰地切穿原始层面反射层。

4、尼加拉瓜海域

横穿尼加拉瓜大陆边缘的一个地震反射剖面资料(Rouston and Shaub, 1977)揭示出，该弧前盆地的朝海方向上部斜坡(即浅水海底)也存在异常反射层的情况(图6)。这种异常反射层穿越水深约800~2400m(1.1~3.2s)的海底层面反射层；目前，对这种巨厚的向海倾斜的斜坡沉积盖层剖面特征知之甚少。当应用速度校正时，由小部分组成的反射约在3.0秒处向陆地方倾斜。这种地形可能影响天然气的运移。

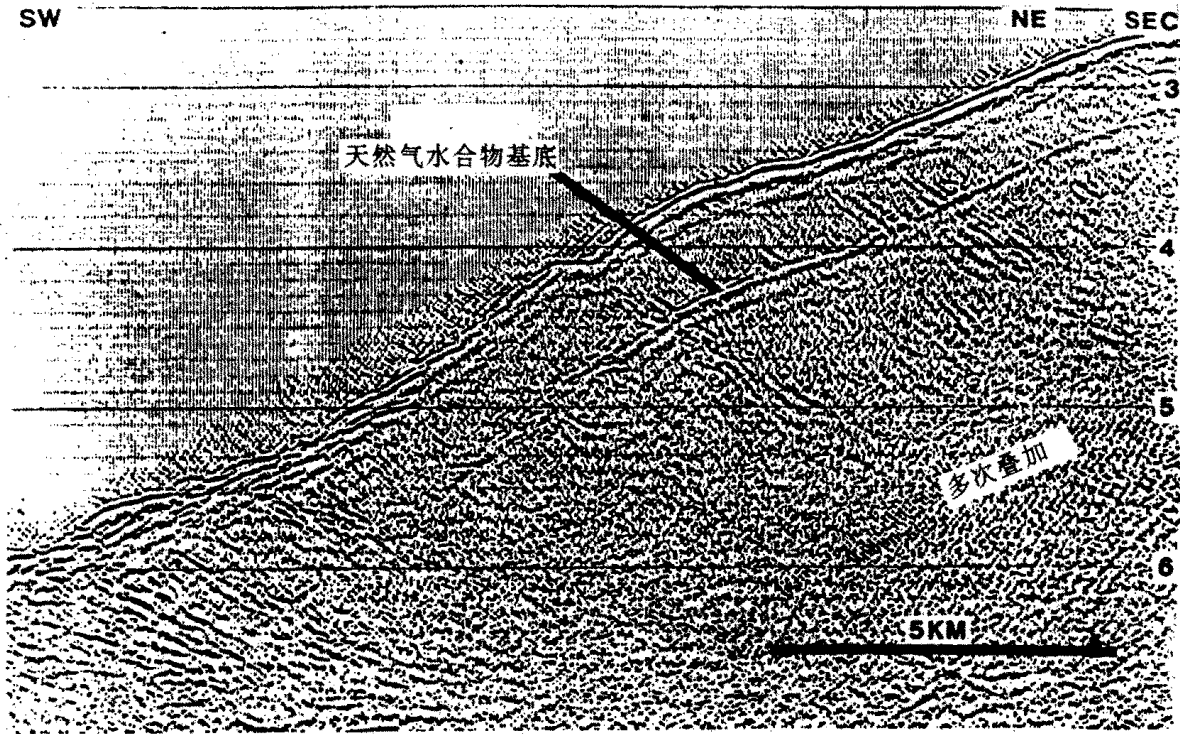


图6 尼加拉瓜海域的一个24褶积的地震剖面图

(据Houston and Shaub, 1977)

5、阿科普尔科和墨西哥南部海域

对阿科普尔科和墨西哥南部的中美海沟内斜坡调查发现，这一带也存在异常反射层的情况(图7)。增生棱柱体中的朝陆方向倾斜的层面反射层穿切高振幅的海底模拟反射层。这可能与天然气水合物的基底有关(Shi pl ey et al, 1979)。

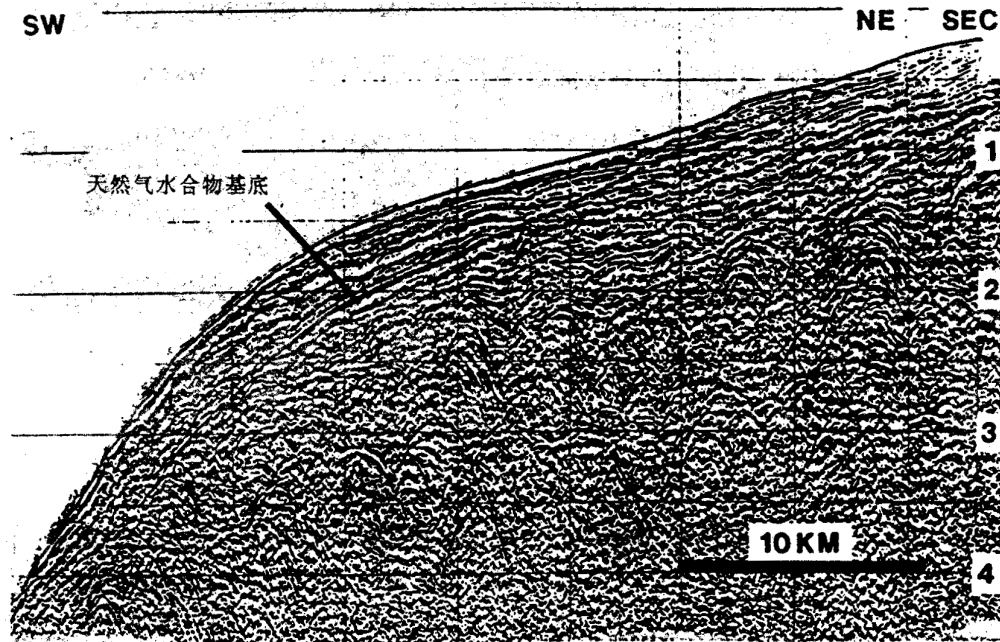


图7 中美海沟内斜坡阿科普尔科和墨西哥地区的波方程偏移24褶积的地震反射剖面 (Shipley et al, 1979)

6、其它区域

除上述5个海域外，还有几个区域也发现存在有异常反射层。这些地区包括(1)巴拿马和哥伦比亚海域的水深在1500~3000m的轻微褶曲的沉积剖面之上的加勒比海；(2)构造背景相似于尼加拉瓜和哥斯达黎加实例的西危地马拉海域；和(3)墨西哥湾中墨西哥海岭区水深在1200~2000m的背斜区及其它地区的岩芯采样区。墨西哥湾产出的天然气水合物仅限定在紧闭背斜上，它所显示的异常反射要比其它地区弱(Buffler et al, 1979、图4、5)。

三、反射特征

一般认为，异常反射是与天然气水合物层相关的。有几项不同的指标一直用于鉴别与天然气水合物有关的异常反射，并帮助区分这种反射与其它非正常反射之间的不同。与天然气水合物有关的反射，可能具有反射极性倒转、反射系数明显变大和显示出随水深增加而海底中水合物层的深度增加的特征。这里最后的一个特征完全与天然气水合物稳定的压力和温度条件相吻合。振幅和极性在数字反射资料中表现得最为清楚。当然，这些指标没有哪一个对水合物是唯一的，对其最终的证明还需等待原地采样和测定地温。在西墨西哥湾进行的深海钻探66号航测线上可能提供了这一异常反射存在的新资料。

1、反射极性和振幅

Bryan(1974)认为，天然气水合物层之下聚集有游离态的天然气层可以解释高振幅的异常反射特征。这种情况将引起异常反射层边界处的地层密度和波速减小，并导致负的反射系数产生。这样，将可用反射极性倒转，以及垂向反射系数的变化来估计反射波振幅的变化。

Shipley(1979)研究了布莱克角外海岭地区、西加勒比海、以及其它地区的数字地震资料，发现反射极性倒转是与异常反射层的出现相伴随的。图8展示的是这种异常反射层的相态倒转情况。海底多次反射(相位也是倒转的)用数字表示以便比较，并很容易地识别和绘出极性倒转情况。

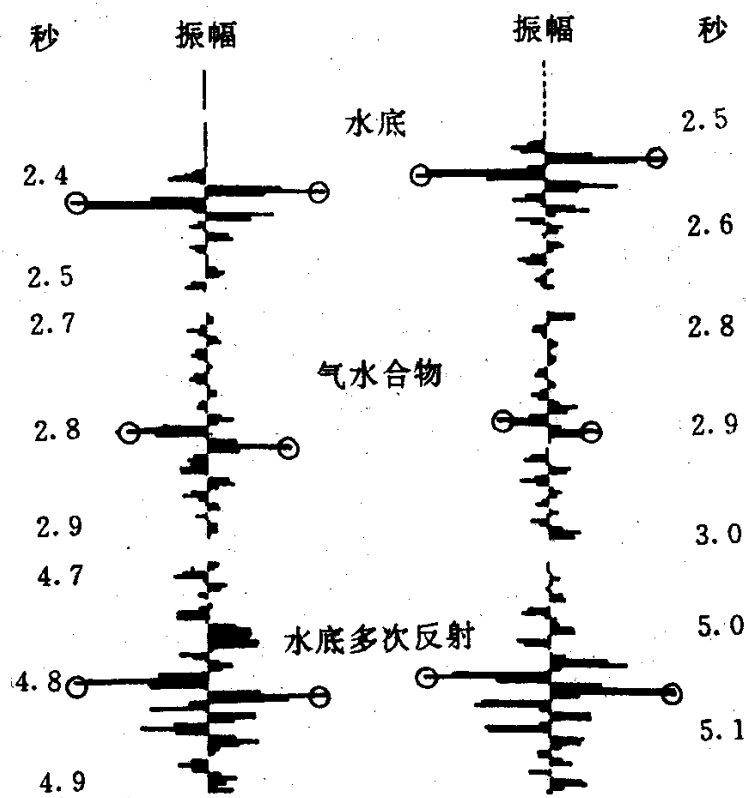


图8 从南巴拿马地区获取的两个单轨迹地震反射记录

(该图绘制出了与天然气水合物伴生的反射极性倒转情况)

对布莱克角外海岭、巴拿马两侧的太平洋和加勒比海区异常反射的垂向反射系数进行了估计(表1), 以便了解与这种反射有关的波速和密度的变化情况。采用初始反射波振幅与多次海底回返声波振幅的比值方法, 对垂向反射系数进行了估计, 并且对回返波的振幅进行了校正, 以便考虑其反射的发散损失。通过汇总反射子波的最大和最小值的绝对值, 并结合多道发射的单干短波发散轨迹进行振幅估算, 对沉积剖面中的吸收未进行校正。反射系数变化范围很宽是由相邻炮点引起的。表1中所示的仅仅是不同炮点数的垂向反射系数的平均值及标准偏差值。这里出现大的偏差值可能是由所采用的振幅测量方法和 / 或干涉和其它地质效应引起的, 然而, 这些值确实给出了反射系数的定量估计值。表1中的百分率变化栏是根据下式

$$\text{反射系数} = (\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1) / (\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2)$$

测定的海底界面和水合物边界的波速百分率变化与密度百分率变化的比值。

表1 垂向反射系数估计值

地区	海底界面	水合物	变化率(%)	N*
布莱克角外海岭	0.21 ± 0.04	-0.12 ± 0.04	-21 ± 8	13
西加勒比海, 巴拿马	0.19 ± 0.05	-0.10 ± 0.04	-18 ± 8	11
东太平洋, 巴拿马	0.18 ± 0.02	-0.05 ± 0.03	-10 ± 6	10

*炮点数

波速和密度对异常反射的相对贡献难以精确估计。然而, 以布莱克角外海岭作为实例, 如果反射异常仅仅是由波速减小造成的, 则波速应从1.7km/s降至1.3km/s。如果反射系数仅取决于密度下降, 则密度应从1.9g/cm³减小至1.5g/cm³。当然, 这些是最大值的变化情况, 因为如果密度确实降低; 则波速也减小。

但是, 根据多道技术对波速信息推导研究发现, 在所限定的方法内这些反射并未有波速异常显示(Tanner and Koehler, 1969)。同样, Bryan(1974)用原始声纳速度研究了布莱克角外海岭地区, 发现没有明显的波速异常存在。这样, 好象高反射系数和极性倒转是与低的密度和波速的薄层间隔有关。这将与天然气水合物作为一种盖层封闭天然气和水的运移而形成游离气层和高孔隙水压完全吻合。

布莱克角外海岭(图3)和西巴拿马地震剖面示出,异常反射层上部的地层反射振幅明显的减小了。这里振幅的减小是真实的,它是与天然气水合物的存在有关,因为水合物层能产生声波阻抗。

在深海钻探计划的11号航线上钻遇到了含水合物的沉积物(Ho11ester et al, 1972)并发现较高的波速层是在海底面与水合物之间。原地钻探取样有助于确定天然气水合物产出的详细情况,并可解释地震资料中观测到的一些特征。

2、水深与海底水台物的深度之间关系

识别海底存在天然气水合物的最重要标志是地震剖面中显示出,随水深增加异常反射层的深度也增大的关系。这是根据天然气水合物形成的压力和温度关系图判断的。图9展示的是这一情况。

图9确实示出了含天然气水合物层的深度随海水深度增加而增大。然而,布莱克角外海岭剖面上进行的几项空间测量表明,海水深度及海底异常层的深度变化很大(图9)。天然气类型、地温梯度或其它地质参数的变化不可能限定在这样一个小的间隔内。这里的发散情况可能至少部分是由相态关系和资料处理造成的。在深度>2000m(约200大气压)时、水深的小变化则只能引起含水合物层的深度小的变化(图1)。水深变化100m将使水合物稳定的温度变化约0.3℃。如果地温梯度为4℃/100m,则反射层将下移约5m深。

认为异常反射是来自天然气水合物层的另一个实例是白令海地区,它在深海钻探计划的19号航线上钻遇到了天然气水合物(Creager et al, 1973)。这一地区的钻探资料表明,该反射异常层代表的是硅藻溶解层(Hein et al, 1978)。Creager等(1973)的图7地震剖面示出,随海水深度减小天然气水合物层在海底的深度增大,这种倒转预计是天然气水合物引起的。因此,白令海的例子并不适应于预演天然气水合物的一般关系,而正好支持了Hein等(1978)的结论,这一异常反射代表的是一个硅藻溶解层。

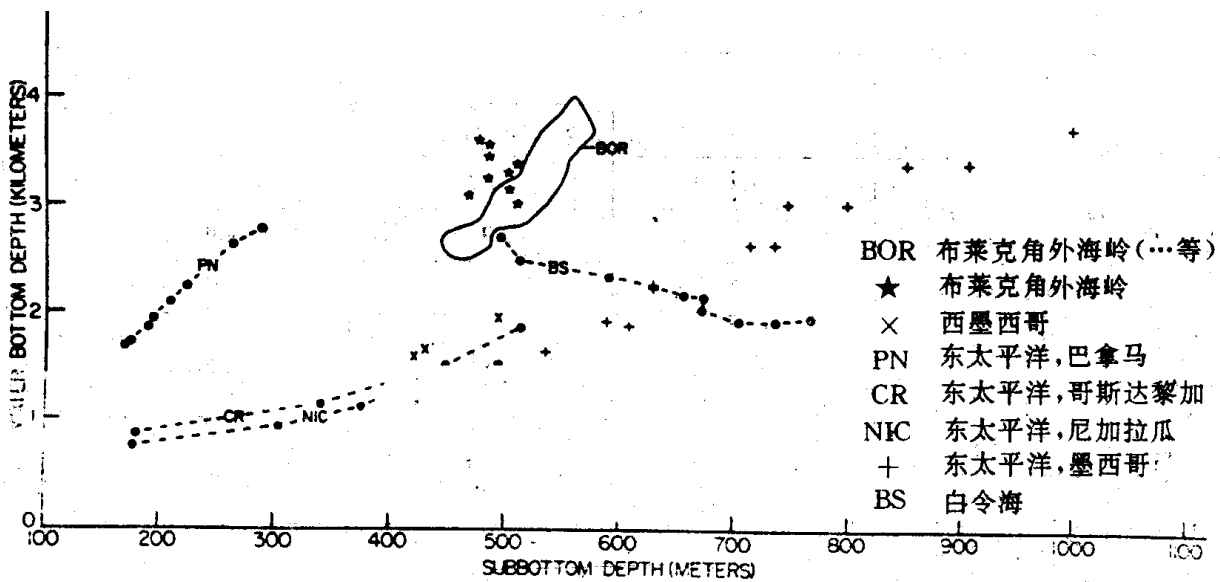


图9 海水深度与海底异常反射层深度之间的关系

深海钻探计划几个台站的气体组分资料表明,甲烷是主要的成分,其次是乙烷(通常小于1%)。乙烷和盐的存在会降低水合物的稳定性。Tucholke等(1977)采用的甲烷+3%NaCl+H₂O的稳定曲线可能最接近于推测的水合物产出条件(图1)。

根据这一假设,可以对水合物生成区的地温梯度作出估计。根据静水压力和岩石压力梯度,可以很容易地对压力梯度作出估算。根据出版的水文资料,可以对很多地区的海底温度进行预测,同样通过各种地球物理方法,可以确定异常反射层之上的沉积物的声速可能为100m/s(Le Pechon et al, 1968; Tanner and Koehler, 1969)。根据适当的地震反射分辨率,估算出甲烷水合物反射层的地温梯度变化率为10%~20%。表2绘出的是用上述方法计算的最小地温梯度值。

出版的地温梯度在5°×5°区域上的平均值(Langseth and von Herzen, 1970)。一般小于根据相边界关系确定的地温梯度(表2)。图1中采用的地温梯度是Langseth和von Herzen(1970)的布莱克角外海岭的资料。尽管根据天然气水合物稳定域预测的南阿卡普尔科的最小地温梯度为2.1℃/100m,但是根据Langseth和von Herzen(1970)估计它的平均值为1.4℃/100m。西巴拿马、西尼加拉瓜和西墨西哥湾海域的天然气水合物稳定域表明,它们的最小

梯度分别为5.9°C、2.6°C / 100m, 它们高于已出版的Langseth和von Herzen的值。布莱克角外海岭4°C / 100m的地温梯度完全与Tucholke等(1977)引证3.95°C / 100m的热流值相吻合, 而其平均值为1.2°C / 100m。

天然气水合物的生成会对其周围沉积物的物理特征具有明显影响。Stoll和Bryan(1979)研究发现, 天然气水合物的生成可以引起地层热导性的减小。这一点与根据冻结沉积物特性为基础的预测结果相反(Stoll, 1974)。但是, 这可能帮助解释了为什么图1中很多资料绘制出的稳定曲线均正好落在水合物的稳定域。

也许, 由地温梯度导出的天然气水合物分布的更多信息, 与其相邻的常规热流资料比较将可帮助解决这些问题。

表2 地温梯度值

区域	声波速度 ^① (km / s)	地温梯度°C / 100m	
		5° x 5° 平均值 ^②	水合物估计值 ^③
布莱克角外海岭	1.7	1.2	
		3.95 ^④	4.0
西墨西哥湾	1.8	0.7	2.6
东太平洋	1.7	0.6	5.9
巴拿马			
东太平洋	1.7	1.2	2.8
哥斯达黎加			
东太平洋	1.6	0.6	2.6
尼加拉瓜			
东太平洋	2.1	1.4	2.1
墨西哥			

①根据地震反射资料计算的。

②据Langseth和van Herzen(1970)。

③是根据甲烷水合物稳定的压力和温度为基础的最小值。

④据Tucholke等(1977)。

四、讨 论

已有很多资料证实, 大陆斜坡和陆隆区存在有异常的地震反射层, 这些异常层可以解释为含天然气水合物的沉积层。从较大的反射系数、反射极性倒转、海底异常反射层的深度随海水深度增加而增大的关系来判断, 它们与天然气水合物生成的压力和温度条件完全吻合。大陆斜坡和陆隆区有天然气富集并且可以运移至水合物稳定域的可能性, 均说明有天然气水合物生成。这些推测的异常反射层需要直接钻探采样来确认是否是含水合物层, 并了解具体的水合物形成的物理条件。

沿洋盆边缘分布的天然气水合物。可能受控于甲烷的有效源。由于大陆边缘对大陆斜坡具有实质性的富有机质贡献, 所以天然气水合物生成的关键因素是天然气的生成和纯水中富集天然气的饱和程度。天然气沿倾斜地层向上运移在大陆斜坡的很多地区均可发生, 所以认为大陆斜坡有天然气水合物产出。

在布莱克角外海岭, 朝陆方向倾斜的地层可能使天然气在稳定相边界内富集起来。这种类似的构造控制, 可能在其它地区也存在, 如美国东海大陆边缘(Tucholke et al, 1977)。在墨西哥湾海岭区背斜岩芯中天然气水合物的发现, 也说明天然气向上运移的重要性, 西墨西哥海域的地震剖面显示出具有朝陆方向倾斜的地层, 这样便具有能使天然气向上运移而进入水合物相稳定域的条件。南巴拿马、北巴拿马和北哥伦比亚海域地层的构造倾斜可能也控制着天然气的运移。

哥斯达黎加剖面(图5)和尼加拉瓜剖面(图6)的异常反射层是这些实例中的两个例外。对哥斯达黎加地区进行波速倾斜校正后检验发现, 该剖面在水合物反射层之下确实存在一些朝陆方向倾斜的反射层。该水合物反射层消失的水深为1.9秒, 那里的下伏地区几乎近于直立。尼加拉瓜剖面看来也是一个例外, 这就说明气体是正常运移进入地层的, 或例外地在原地就产有很丰富的天然气。

西墨西哥地区约有10%的区域适合形成天然气水合物, 实际上也只有这样一个比例的地区才表现出异常反射。调查的详细特征表明, 天然气水合物产出直接是与朝陆倾斜地层压相关的。中美海沟内斜坡的许多地段具有这样的

高构造特征，而使气体在层面有效运移消失。这些资料说明，天然气水合物的分布仅限定在朝陆倾斜地层的地区，或者象大陆沉积边缘以及构造异常带。如果这些条件是天然气水合物生成和可能是游离盗天然气圈闭形成的部分基本因素，则巨大的力陆边缘地区可能含有潜在的天然气水合物资源。然而，只有详细的调查才能确定水合物的实际分布带。

来源：史斗，孙成权，朱岳年编. 国外天然气水合物研究进展. 兰州：兰州大学出版社，1992. 131~143.



[返回](#)