

无机生成的盐下油田

袁学诚

(中国地质调查局发展研究中心,北京 100037)

摘要:盐下油气田具有明显的无机生成特征,是深部找油气的一个新领域。勘探盐下油气田有三个关键,即:地质观念的改变,地球物理资料处理的进步与钻探技术的提高。现在已知90%的油气田与膏盐共存。盐层可作为盐下油气田的找矿标志。对盐层的精确成像,可大幅度地提高找寻盐下油气田的成功率。这同时也为寻找我国急缺的钾盐矿床提供重要的资料。

关键词:盐下油田;逆时偏移;油盐兼探

中图分类号:TE122.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)01-0039-11

1 工业盐下油田的发现与发展

在1995年召开的美国石油地质学年会,以及在同年召开的美国沉积研究协会海湾海岸分会的16届研究会议上,Holly Harrison等宣称,菲利普斯(Phillips)石油公司与阿纳达科(Anadarko)石油公司及美国石油公司(AMOCO)在墨西哥湾发现Mahogany盐下油气田。并指出这是第一次在墨西哥湾发现工业盐下油气田^[1]。

Mahogany油气田距路易斯安那海岸129 km。据Holly Harrison等^[1]报道,Mahogany 1号井(OCS-G-12008)处海水深5 m,在井深114 m处,在外来盐岩层下的上新世—更新世的砂中钻遇石油和天然气(图1)。试油得到石油日产量7256桶,天然气日流量 $0.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。2号井(OCS-G-12008)在地表同一地点钻进深度5822 m,相当于真垂向深度5700 m处,在另一层试油,得到石油日产量4366桶和天然气日流量 $0.15 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

Mahogany油气田的发现首先要归功于地质学家思想上的革新。在20世纪20年代,曾在墨西哥湾盐底辟的突出部位和肩部打过钻。20世纪70—

80年代,在墨西哥湾西北外大陆架和陆坡打了几百口井,这些井通常都是打穿了侧向侵位的水平状膏盐层就停钻,也未试井,因而,墨西哥湾盐下油气田一直沉睡到20世纪末^[3-4]。



图1 Mahogany油气田位置及1995年以来钻穿外来盐层的钻孔位置^[1]

Louisiana shelf—路易斯安那大陆架;Louisiana slope—路易斯安那陆坡;Sigsbee escarpment—锡格斯比海崖;Mississippi fan—密西西比深海扇

Fig.1 Map showing wells that were drilled through the allochthonous salt since1995^[1]

收稿日期:2013-07-29;改回日期:2013-12-25

基金项目:中国地质调查局“中国地质构造区划综合研究与区域地质调查综合集成”项目(1212010811033)资助。

作者简介:袁学诚,男,1928年生,教授级高级工程师,从事深部地球物理研究工作;E-mail:xcyuan@263.net。

从20世纪80年代早期到90年代末期,地质学家从实践中逐步认识到盐运移的侧向侵位与盐下圈闭是共存的^[5],开始对外来盐层的侵位和变形的认识有了深刻的变化。他们钻透巨厚的盐层,终使深埋的油气始见天日。

图2是Mahogany油气田外来盐片的平面分布范围及3条二维地震剖面A—A',B—B'及C—C'的分布位置。图3~5为这3条二维地震剖面的剖面图^[1]。图6是墨西哥湾从大陆架到深水盐下地质剖面概念图。

墨西哥湾盐下油气田的发现引起震动,它将油气勘探引入一个勘探盐下油气田的新时代。继Mahogany盐下油田的发现之后不久,南大西洋的巴西近海就再一次奏起发现盐下油田的凯歌^[6]。

从2004年开始,巴西在其东南的Campos, Santos, Espirito Santo等近海盆地勘探盐下油气田(图7~8)。目的层古近—新近系和上白垩统。

Campos是巴西近海沉积盆地中油气产量最大的一个,面积约600000 km²。从2005—2006年施工的第一口井(1-RJS-617D)和第二口井(1-RJS-628A)在深水区都打到极厚的盐层。在1-RJS-628A垂直井中试井,在约2000 m水深,约2000 m



图2 外来盐片范围及二维地震剖面位置^[1]
Fig.2 Map showing limits of salt sheets and location of three 2D seismic lines^[1]

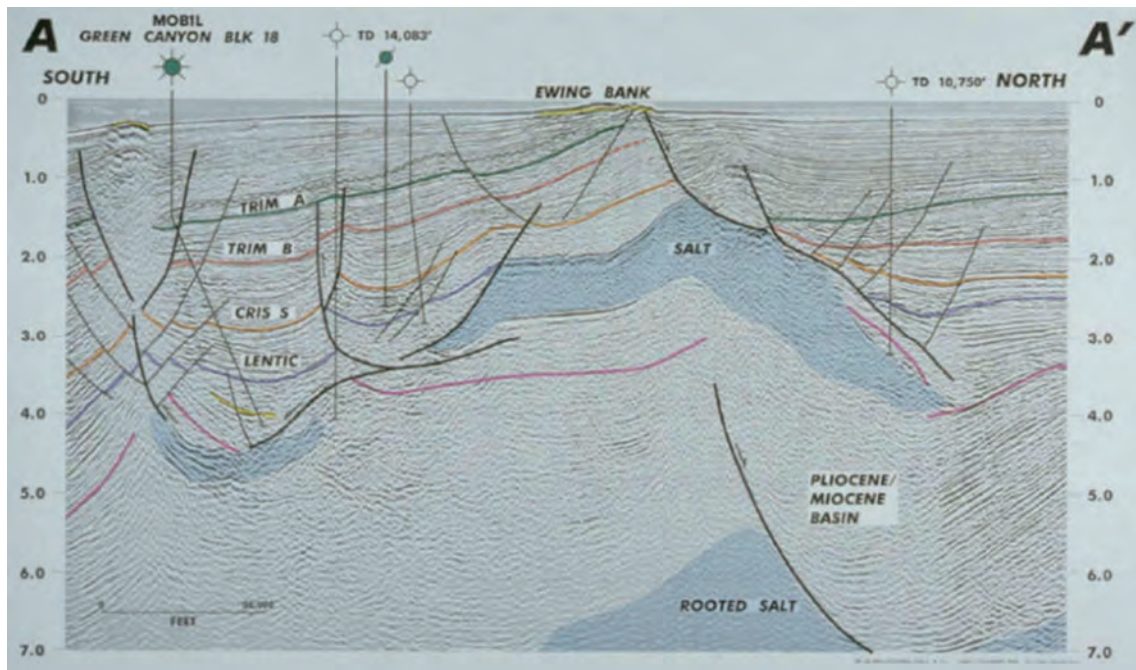


图3 A—A'为南北走向2D地震剖面,图中显示Ewing Bank逆冲断层在盐下变成一个铲状断层^[1]
Fig.3 Seismic line A—A' (a north—south 2D line) showing that the Ewing Bank thrust may become a listric fault below salt^[1]

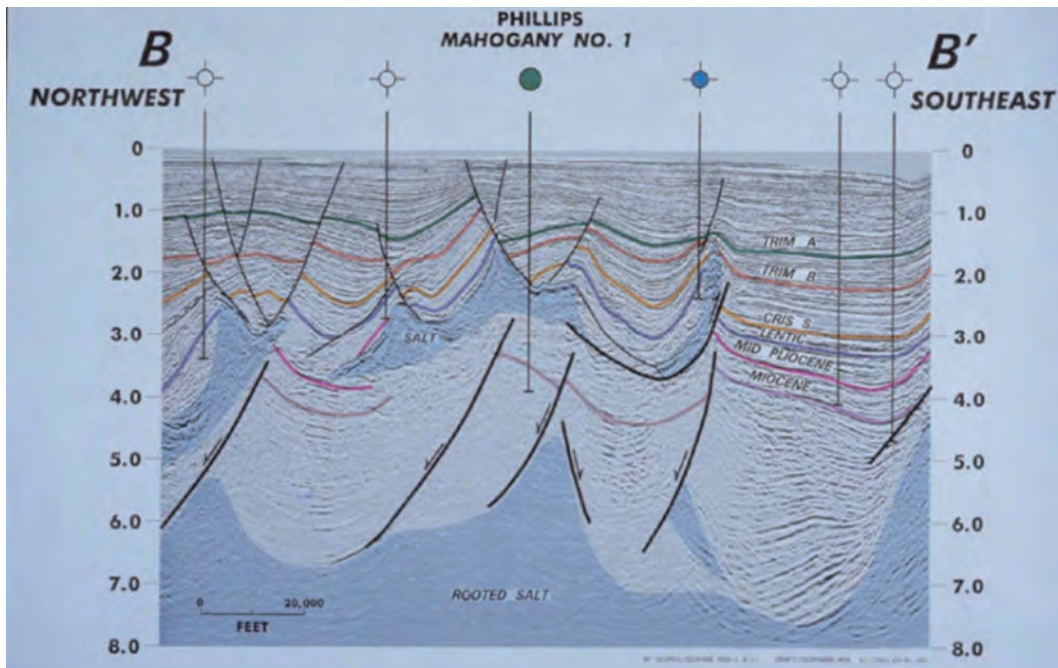


图4 B—B'地震剖面^[1]
Fig. 4 Seismic line B—B'^[1]

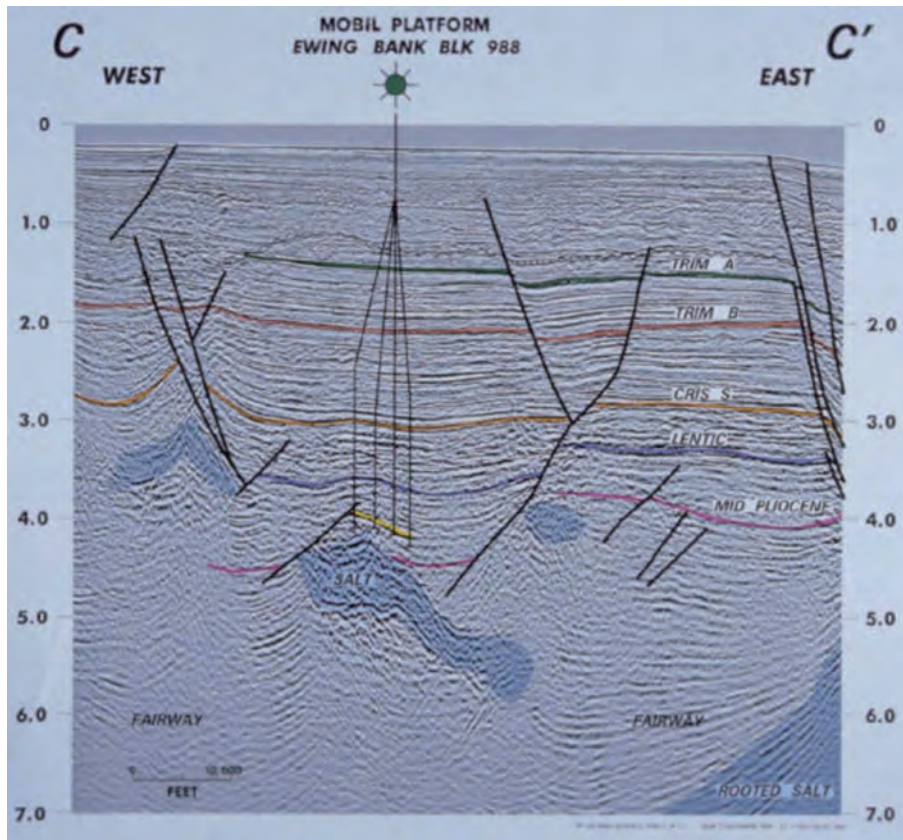


图5 C—C'地震剖面^[1]
Fig. 5 Seismic line C—C'^[1]

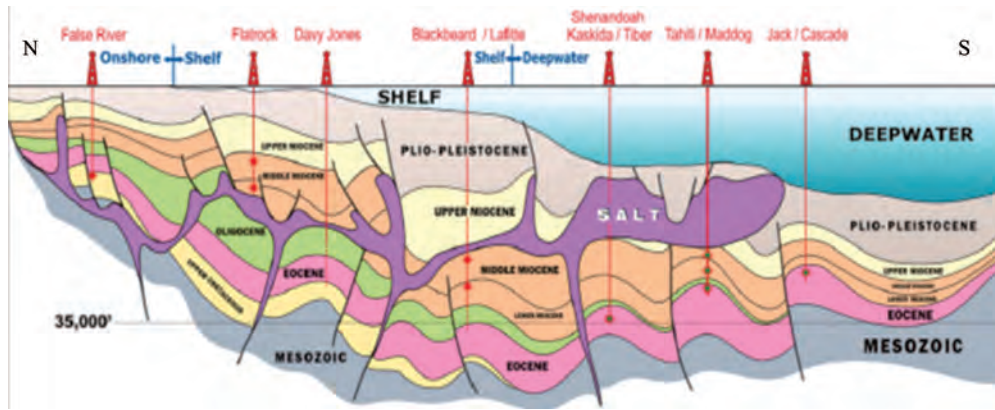


图6 墨西哥湾从大陆架到深水盐下地质剖面概念图^[2]

Onshore—海岸; Shelf—陆坡; Deepwater—深水; Plio-Pleistocene—上新世-更新世; Upper Miocene—上中新世; Middle Miocene—中中新世; Lower Miocene—下中新世; Eocene—始新世; Mesozoic—中生代; Salt—盐

Fig.6 Deep Shelf Subsalt versus Deepwater Subsalt^[2]

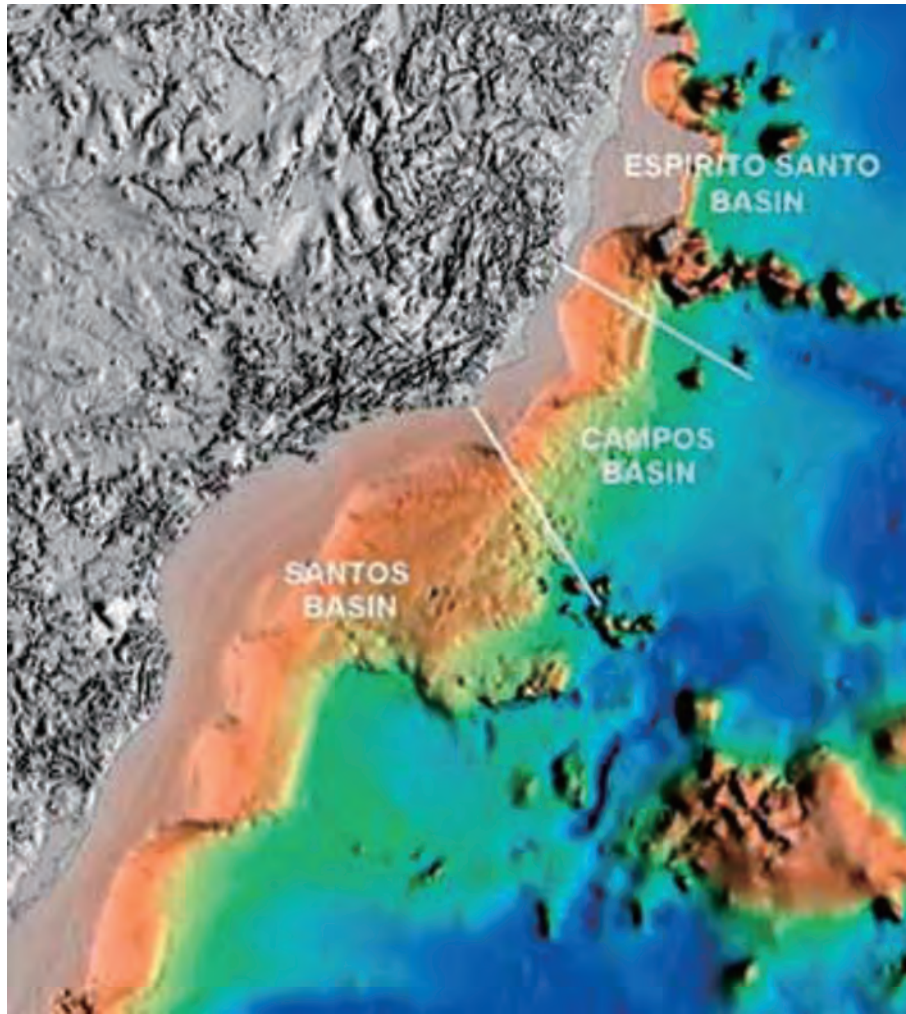


图7 巴西近海的Santos盆地, Campos盆地与Espirito Santo盆地^[6]

Fig.7 Maritime basin of Brazil^[6]

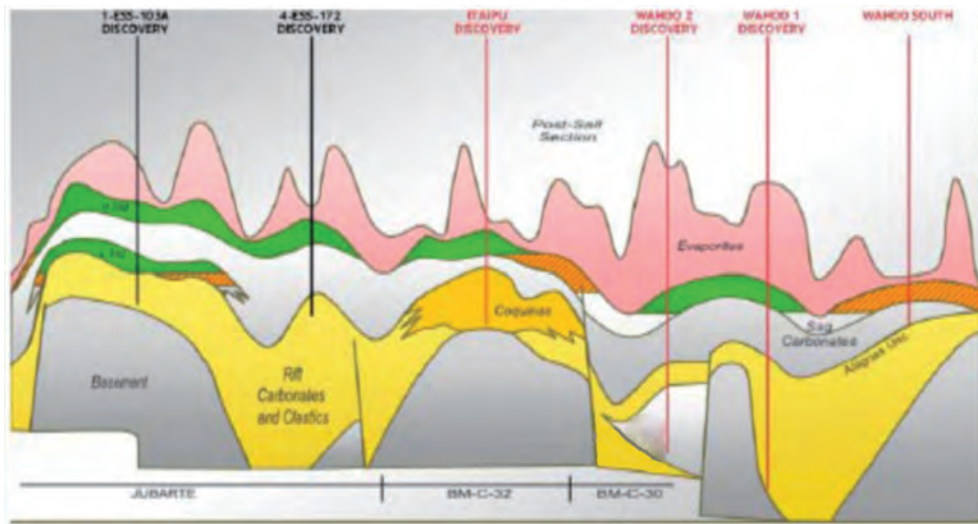


图8 阿纳达科石油公司 Campos 盆地内的 X 剖面
Fig.8 Anadarko's X-Section in Campos Basin

厚的盐层下约 1000 m 处,发现有产量极高的 30° API 轻油。油流达 4900 桶/d,天然气达 150000 m³/d,气油比约(GOR)180。其中一个代表性的剖面见图 8。

Santos 盆地水深超过 2000 m。面积约 12300 km²。整个地区均覆盖高分辨率、高质量的三维地震。2014 年该盆地盐下油田产量可望达 36.8 万桶/d。到 2020 年,公司将在 Santos 盆地安装 23 个海上平台,建立 2 个油气集输中心。预计 2017—2018 年投产,将使巴西的天然气产量由 2009 年的 5×10⁷ m³/d 提高到 2020 年的 8×10⁷ m³/d。

进入 21 世纪,盐下油气田的勘探步入快速增长期。成为世界油气增长的一个亮点。除了北美和南美沿海外,北海、西非、波斯湾等地都得到丰硕的勘探成果。

2 盐下油气田具有明显的无机生成特征^[7]

2.1 由于有膏盐覆盖使得源自地幔的油气得以保存

盐下油气田之所以称为盐下油气田是它们均有一层膏盐盖层。

膏盐的成因至今仍然存在分歧。传统的观点认为膏盐是在封闭的盆地环境中及干旱炎热气候条件下海水强烈蒸发作用形成。这个观点有充分的实验依据,得到广泛认可。但是仍有许多疑点^[8]:

①在许多著名盐堆积中发现丰富的潮湿气候

下才能生长的植物化石;②在许多著名盐堆积中发现有不可能由蒸发形成的矿物;③中国东部侏罗—白垩纪及新生代含盐系的盐岩相大都不是单纯的蒸发模式,而是偏心的单盐岩相和小喷巨盐模式;④盐矿床的同位素年龄往往晚于其围岩;⑤盐矿中液体包裹体的温度测定表明,盐沉积的温度高于围岩;⑥有的地方,盐层特别巨厚,难以想象要有多少海水蒸发才能得到这样巨厚的盐层。

化解这个矛盾最合理的解释可能是,存在 2 种成因各不相同的膏盐堆积:一种是本地盐层,它们大都是由海水蒸发形成;而另一种则是由于盐的塑性流动,在有利的构造条件下二次堆积形成的外来盐层,它们在搬运过程中可能有外来的植物、矿物卷入,成盐岩时间晚于它们的围岩,由于盐的热导率高它们的温度高于它们的围岩。因此上述 6 个疑点为勘探工作鉴别二次外来堆积盐矿提供了一组重要标志。

那么为什么盐体与油气会有地区上共同存在的依存关系是另一个受到关注的问题。世界上大多数含盐盆地都是含油气盆地,约 90% 的油气与含盐盆地有关。现在来看,并不是盐体与油气在形成时有成因联系,而是由各种通道运移到近地表的地幔生成的油气,绝大部分都没有被保存下来,只有在地表存在膏盐的地区它们难于向大气逃逸,才得以保存,形成油储。

图9示盐体与油气储的关系示意图^[2]。图中盐下(Subsalt)意为盐的空间分布下,系指被年青地层覆盖的外来盐层(allochthonous salt)下的区域。盐前(Presalt)意为盐的沉积时间前,系指在一个被较老地层覆盖下的本地盐层(autochthonous salt)下的地层;盐后(Postsalt)一词则指盐的沉积时间后。

2.2 形成盐下油气田要有一定的构造条件

全球近年来发现的重要的盐盆地以及盐下油气田主要位于地壳被强烈拉张的近海盆地(图10~11)^[9-10]。尤其是大西洋近海的大陆边缘和特提斯海

域。如近年来成功勘探盐下油气田的墨西哥湾和北海位于北大西洋的两岸,巴西和西非位于南大西洋的东西两侧。

大西洋之所以成为当今的大洋是由于中生代以来,位于它中央的洋中脊离散边界连续扩张的结果,它以每年5~10 cm的速度向东西两个方向扩张。并在大洋两侧形成广袤的被动大陆边缘。

Ian Bryant等(2012)^[11]曾对南大西洋东西两岸区域地层按地质时代作了对比研究,对大陆边缘沉积演化作出了一个板块规模的地质多单元模型。并依此对资料匮乏地区作矿产远景评价。最近的

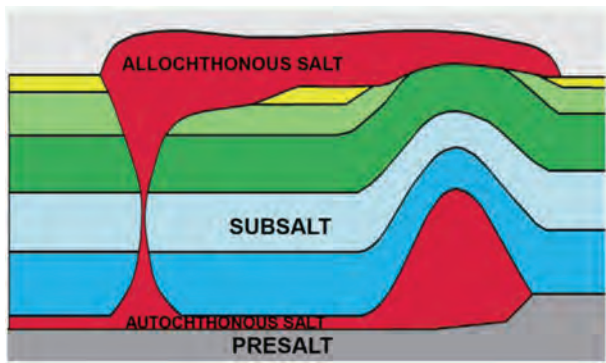


图9 盐下与盐前^[9]
Fig. 9 Subsalt versus presalt^[9]



图11 全球近海盐席的分布^[10]
Fig.11 Distribution of offshore salt sheets^[10]

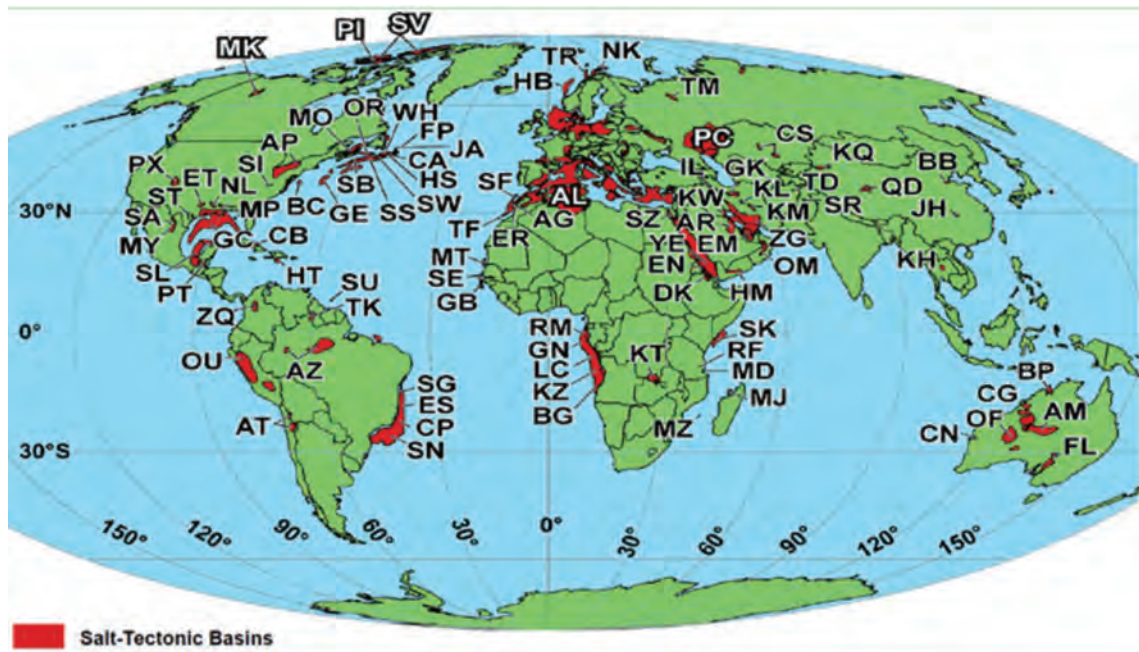


图10 全球盐盆地分布图^[9]
Fig.10 Global distribution of salt basins^[9]

实例之一是在加纳近海的土伦阶(K₁₋₂)低水位浊积扇的成功勘探经验用到法属圭亚那,并发现了Zaedyus矿田。

图12为大西洋两岸共轭地震剖面^[10]。巴西近海 Santos 盆地剖面(图12-a)穿过 Lula 盐前(pre-

salt)油田,这里所引用的是一2D反射地震剖面。地震剖面揭示在盐下的盐前沉积厚约2 km。安哥拉近海 Kwanza 剖面(图12-b)根据3D地震剖面得来,它是一个发育良好的盐前盆地。它与盐后沉积之间有一层形态极其复杂的盐层。

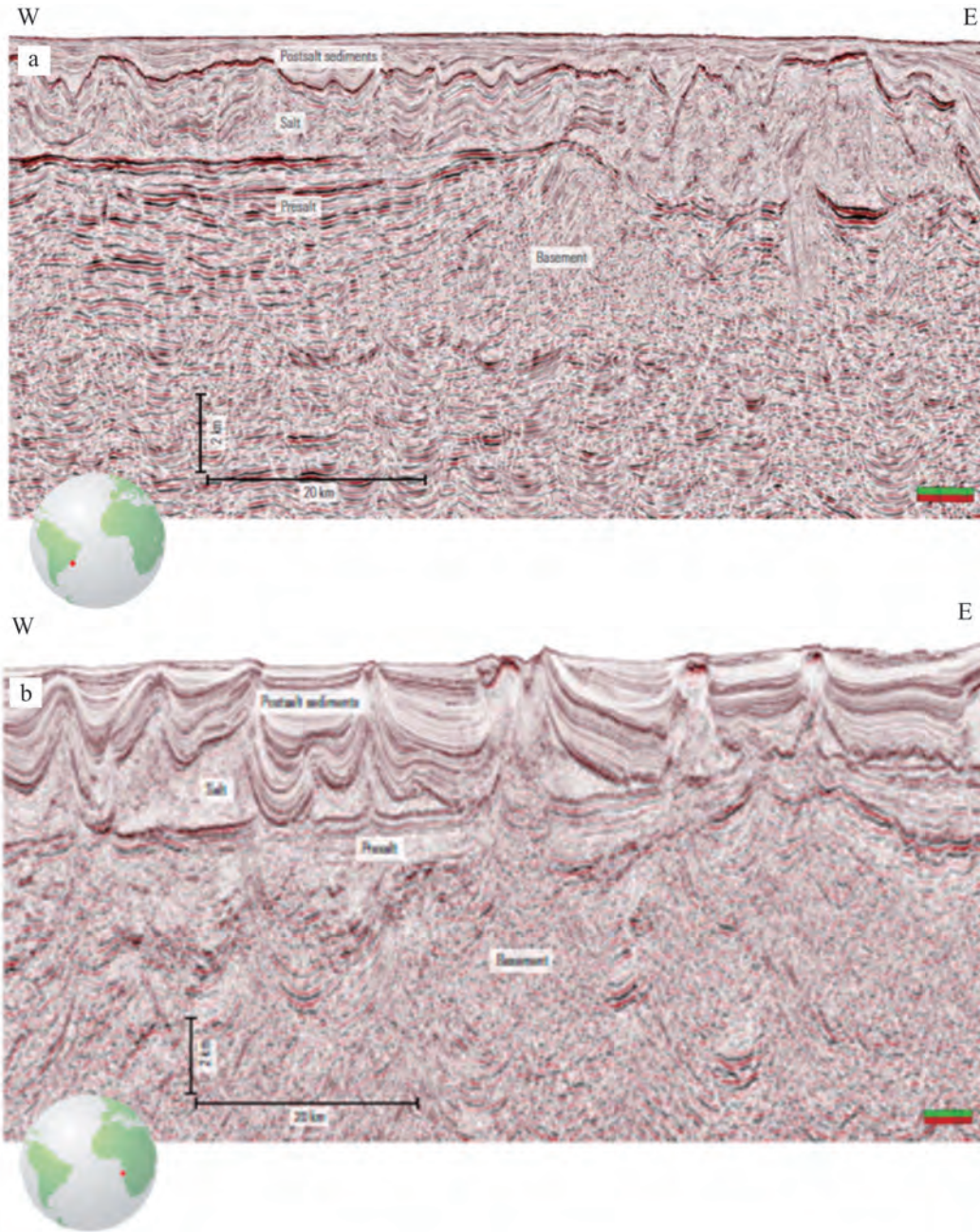


图12 大西洋两岸地震剖面:穿过南美巴西近海 Santos 盆地地震剖面(a),穿过西非安哥拉 Kwanza 盆地地震剖面(b)^[10]

Postsalt sediments—盐后沉积;Salt—盐;Presalt—盐前;Basement—基岩

Fig.12 Seismic lines across conjugate presalt rifted margins^[10]

由于大西洋洋中脊的不断扩张,将地幔内形成的取之不尽的丰富的油气资源源源不绝的带到地面,在有膏盐覆盖的地区保存下来,形成巨厚的油储。

中国的南海是一个正在拉伸扩展的新生洋盆,在它的周边形成被动大陆边缘,与大西洋有及其相似的构造环境,应是寻找盐下油田的理想地区。

2.3 覆盖膏盐层的高孔隙率地层皆可成为储油层

地幔内形成并上升到地壳的油气资源遇到有高孔隙率的地层,并且其上有膏盐覆盖的地区便滞留下来,成为油储。不管是在基底岩石内,花岗岩内,还是喷出岩内。巴西盐下油田一直延伸到没有浮游生物的深海,也是无机生油的一个证据。

3 打开盐下油气田的三把钥匙

打开 Mahogany 油气田神秘之门依靠三把钥匙。除了地质学家思想观念的革新外,地震勘探资料处理的进步与勘探盐体勘探技术的提高是成功勘探盐下油田的另外两把同等重要的钥匙。

3.1 地震勘探资料处理的进步

勘探盐下油田必须应用反射地震勘探。但将反射地震用于盐下油气田勘探遇到前所未有的棘手问题,这就是如何对像盐体这样的断续分布、形体怪异的复杂构造(图3~5)精确成像,以便正确地确定钻井位置。

要想对盐体进行精确成像,重要的问题之一是要对地震资料进行有效的偏移。

反射地震勘探的基本理论是建立在水平成层介质的基础上的,因而早期的反射地震主要应用在寻找缓倾斜构造圈闭。但即使是缓倾斜构造,得到的结果也会失真,需要进行纠正。这种将采集到的倾斜界面上的反射波记录经过计算纠正,以得到地下反射界面的准确空间几何位置,还它以本来面目的处理成像技术称为偏移。

20世纪60年代以前,地震偏移几乎都用手工操作。以各炮点为圆心以单程旅行时为半径作圆弧,并作出它们的切线,就可以得到“经过偏移的”真实的反射面,偏移后反射面倾角变陡,反射段变短。

20世纪70年代,随着计算机的快速发展并应用到地震勘探中来,Claerbout^[12]提出用有限差分法解单程波动方程的偏移技术。这是反射地震数据处

理中的一个划时代的进步。有限差分法解单程波动方程的偏移技术重建地震波在地下传播过程中的波场,从这些传播过程的波场中提取使地震界面成像的那些数据,组成地震偏移剖面。

如偏移的地震数据表示在以时间为纵坐标的坐标系中时称为“时间偏移”。这种类型的偏移假设地下介质的速度变化是连续的,它的缺点是复杂地下构造(尤其是盐体)边界上速度往往是突变的,会降低成像质量。如偏移的地震数据表示在以深度为纵坐标的坐标系中时称为“深度偏移”,它们必须从时间坐标的地震数据中计算得来。因而,这个方法必须要一个速度模型。建立速度模型往往要历经反复修改的过程。这种偏移的好处是它能成功的用于横向速度突变的地区,而这些地区恰好是石油地质学家最感兴趣的地区。广泛应用的深度偏移算法有:Kirchhof 深度偏移和逆时偏移(RTM)等。

逆时偏移(RTM)^[13](PGS, 2007)是1982年在Dallas 召开的第52届SEG 偏移研究工作会议上,AMOCO公司的Dan Whitmore在会上报告中提出的。实践证明,盐下油气田反射地震资料中采用逆时偏移能取得优异的结果。

逆时偏移是基于三维全波动方程,未作任何近似假设的偏移技术。由于计算机能力和编程的进步,已成为大规模三维地震测量中普遍采用的技术。

在作偏移处理时,转换波往往都是忽略不计的。在给定波传播的起始条件以及速度模型后,波动方程可以描述波前在任何时间任何点位的物理位置:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla^2 u + s$$

上式为双程声波方程。

其中 $u=u(x, y, z, t)$ 为压力场; $c=c(x, y, z)$ 为速度场; $s=s(x, y, z, t)$ 为源项(source term)。

过去,受制于数据采集和计算机计算成本,对于侧向速度变化介质的唯一现实的深度偏移算法是Kirchhoff 偏移。它是单程或近轴的偏移,Kirchhoff 偏移求解波动方程假设速度是连续变化的,可以对不太复杂的高角度构造成像。但是RTM是一种双程的偏移方法,它能更精确地实施波动方

程,精确的描述倾角达 70° 的复杂介质中的波的传播,能够得到反射体的振幅及构造位置。

逆时偏移求解上列波动方程的步骤为:一、给出解波动方程的边界条件,这就是根据地质和地球物理资料,提出一个地下构造的起始模型。二、对地震勘探中的每一炮,实时计算震源波场的正问题模型。即是,对每一个炮点的波场用网格速度模型进行外插,并存储每一时间步的波场。三、实时计算检波器波场的反问题模型。即是将每一炮的接收波场在同一速度模型中进行回传,并存储每一时间步的波场。四、在地下每一点将震源波场和检波器波场进行互相关。五、将成像取样值相加并输出到成像单元。

图13-a是一均匀盐体穹隆的模型,背景颜色由冷变暖代表速度由低速到高速的连续变化。图13-b是用单程波动叠前深度偏移算法得到的处理结果,在盐体侧面突出外延的部分成像较差。因此,此处的油气圈闭难于认知。图13-c是用逆时偏移(双程波动叠前深度偏移算法)得到的处理结果,成像质量非同凡响的提高。盐体边界包括盐体突出外延的地方处处连续。沉积岩反射被盐体切割清晰可见。

未采用逆时偏移处理前,在墨西哥湾勘探盐下油气田的成功率仅5%,采用逆时偏移新技术,成功率上升到25%^[14]

3.2 膏盐的钻探工作(Paul Farmer, et.al, 1996)^[14]

盐在常温常压下会发生假塑性流动。致使盐体的钻探会遇到许多问题。例如因泥浆不适合导致孔壁弱化,盐的蠕变导致缩孔,盐的溶解导致扩孔(图14-a)。又如盐的快速运动在水泥固井井壁产生凹凸线纹使井孔变形(图14-b)。盐的运动还可能使井孔侧向位移变形以致毁坏(图14-c)。在选择井液、钻头、套管、固井等方面都要作特殊考虑。

在泥浆的选用方面,与普通沉积岩系中,侧向应力小于来自覆盖的垂向应力不同,酷似液体的盐的围压近似覆盖应力。因而,如果孔内液压小于盐体强度,钻井就会发生缩孔、堵孔、变形、损坏以致无法固井。为保持孔径,要选择井液使钻孔缩小降到最低。在盐体中钻进需要根据不同情况用盐浓度饱和或不饱和的水基、油基泥浆以及合成井液。低盐水基泥浆可平衡盐的蠕变侵蚀和溶解,以保持钻孔大小。高浓度水基泥浆要溶解足够的盐去抵消蠕变,在高温下变得不饱和并发生扩孔。用油基泥浆和合成泥浆可以防止溶解,但费用贵,并且会使盐层漏水,漏气以及析出矿物,并且不能抵消蠕变。

进入盐层后,要用重量能控制住盐的流动的泥浆。钻进速度要快(18~46 m/h),这样可以快速固井,清孔和扩孔。少量清水循环可以清除孔内及附着在井壁的盐,但必须注意防止冲溢、扩孔和缩孔

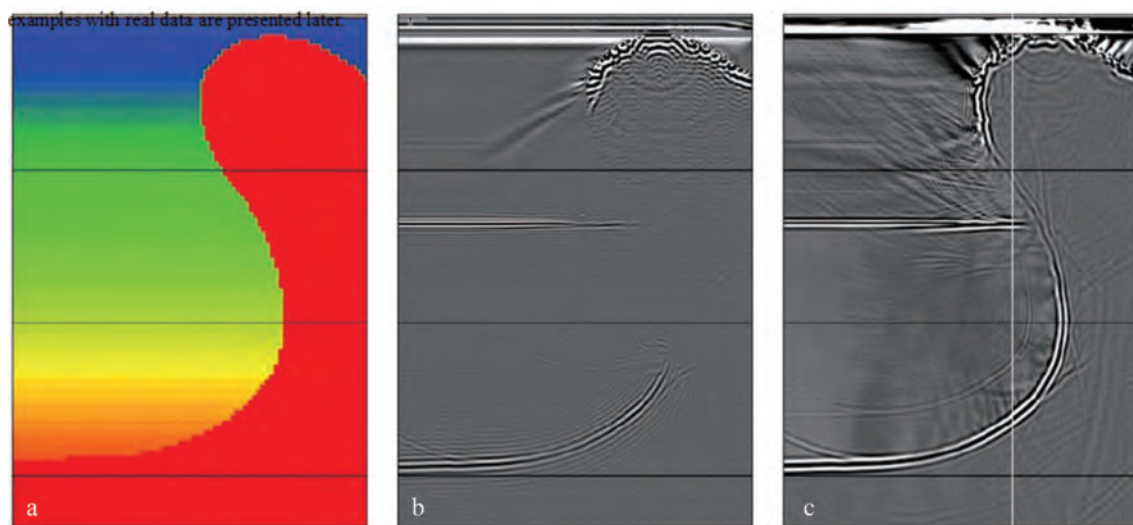
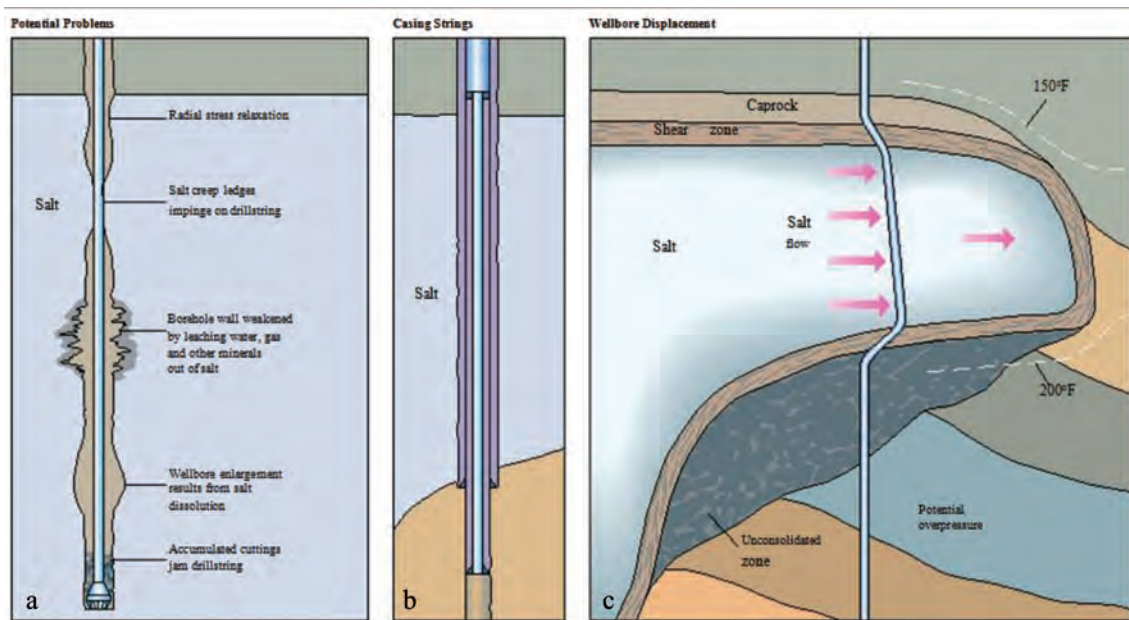


图13 盐穹的反射地震资料处理^[13]

Fig.13 Seismic reflection data processing for a salt dome^[13]

图 14 盐体钻探中的问题^[14]Fig.14 Spectrum of challenges in subsalt drilling and completion^[14]

的发生。

盐体的热导率高于围岩,致使其上覆岩层加热而下垫岩石冷却。因为盐是盆地流体的阻挡层,如果外溢流体不足以达到正常压实程度,盐下将出现高压。一旦盐下沉积岩被穿透。就会有流体流失。

冲刷、缩孔、凹凸线纹以及运动盐体等均会造成非均匀负载加到井壁。增厚井壁要比高强度套管等更能抵抗这些负载的阻力,因此,如果盐的蠕变率较低时可采用水泥厚壁固井。在盐体迅速流动的极端情况下,水泥固结的内壁会出现凹凸线纹。穿过盐层的固井部分受到张力、压力,以及流体静力学等不均匀力,紧挨着盐层下就要固井。

在固井外部与钻井之间需要浇灌水泥,以减少不均匀负载效应。泥浆加厚的时间要长以使泥浆进入到固井中去盐饱和的水泥可以防止盐的溶解。清水和低盐的泥浆可以避免滞后,且易于操作,但是对盐的长时间暴露会使水泥失效。在 20 世纪 80 年代晚期的实践解决了这个问题^[15],研制出钻过盐体的泥浆,如 Dowell SALT BOND 水泥系统。

4 结束语

发明维生素 C 的诺贝尔医学奖金获得者 Albert Szent-Gyorgyi (1893—1986 年)曾为发明(创新)作

了一个通俗的界定。他说:“所谓发明就是能看到所有人都看到的,想到没有人想到的。”(Discovery consists of seeing what everybody has seen, and thinking what nobody else has thought.)。

地质学家 Parke A. Dickey 教授为找油的光明前景作出了一个不同寻常的展望:“过去我们常常认为石油已经找绝,但是事实上往往只是我们的思想走到了绝境。”(Several times in the past we have thought we were running out of oil whereas actually we were only running out of ideas.)^[2]。

致谢:唐文榜教授审阅并提出宝贵修改意见,特此感谢。

参考文献(References):

- [1] Holly Harrison, Dwight 'Clint' Moore, Peggy Hodgkins. A geologic review of the Mahogany subsalt discovery: A well that proved a play(The Mahogany subsalt discovery: A unique hydrocarbon play, of shore Louisiana) [C]//AAPG Annual Conference & Exhibition, 2010.
- [2] Dwight "Clint" Moore. Pioneering the global subsalt/presalt play: The world beyond mahogany field[C]//AAPG Annual Conference & Exhibition, 2010.
- [3] Brooks R O, Denman E H. Changing Styles of Horizontal Salt Bodies 1984—1994(abs.) [C]//AAPG Annual Convention

- Abstracts, 1995: 13A.
- [4] Brooks R O, Hall D J. New structural concepts for the deep Miocene, southern Louisiana shelf[C]//AAPG Annual Convention Abstracts, 1995: 13A.
- [5] Brooks R O, Moore D C. Horizontal Components of Gulf of Mexico salt Tectonics[C]//AAPG, Hedberg Research Conference on Salt Tectonics. Bath, England, 1993: 1-4.
- [6] Peter Howard Wertheim, Dayse Abrantes. Brazil's Subsalt Offshore Story, Global Oil Insight, 2010.
- [7] 袁学诚, 李善芳. 无机生油假说及其在中国的应用前景[J]. 中国地质, 2012, 39(4): 843-854.
Yuan Xuecheng, Li Shanfang. Abiogenetic petroleum origin hypothesis and its application in China[J]. Geology in China, 2012, 39(4): 843-854(in Chinese with English abstract).
- [8] 张景廉. 论石油的无机成因[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 305.
Zhang Jinglian. On the Inorganic Origin of Petroleum[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 305(in Chinese).
- [9] Hudec M, Jackson M P A. Terra infirma: Understanding salt tectonics[J]. Earth-Science Reviews, 2007, 82: 1-28.
- [10] Ward R W, MacKay S, Greenlee S M, et al. Imaging sediments under salt: Where are we?[M]. The Leading Edge, 1994, 13(3): 834.
- [11] Ian Bryant, Nora Herbert, Paul Dailly, et al. Basin to basin: Plate tectonics in exploration, Oil field Review, 2012: 24.
- [12] Claerhout J F. Toward a unified theory of reflector mapping[J]. Geophysics, 1971, 36(3): 467-481.
- [13] PGS(A publication of Petroleum Geo-Services) TechLink, 2007, 7(1):1-4.
- [14] Paul Farmer, Douglas Miller, Andy Pieprzak, et al. Exploring the Subsalt[J]. Oilfield Review, 1996: 50-64.
- [15] Yearwood J, Drecq P, Rae P. Cementing Across Massive Salt Formations[C]//The 39th Annual Technical Meeting of the Petroleum Society of CIM, Calgary, Alberta, Canada, 1988.

Abiogenetic subsalt oilfields

YUAN Xue-cheng

(Research and Development Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: The subsalt oilfield has distinctive features of abiogenetic origin and is a new field for exploring oil and gas. There are three key problems in the exploration of subsalt oilfields, i.e., new geological concept, applying reverse time migration in seismic data processing and special techniques in drilling. As 90% of oil fields coexist with salt, salt might be a prospecting indicator for the oil and gas field. Precise imaging of salt using reverse time migration can improve successful rate for exploration of subsalt oilfields, and at the same time it can get precious information concerning salt. The exploration of oil and salt at the same time seems to be an effective policy.

Key words: subsalt oilfield; reverse time migration; exploration of oil and salt at the same time

About the author: YUAN Xue-cheng, male, born in 1928, senior engineer, engages in researches on deep geophysics; E-mail: xcyuan@263.net.