

· 综合研究 ·

盐构造的识别、分类及与油气的关系

彭文绪*^① 王应斌^① 吴奎^① 彭刚^① 王德英^①
毛云新^② 张涛^②

(^①中海石油天津分公司,天津塘沽 300452;^②中海石油有限公司上海分公司,上海徐家汇 200030)

彭文绪,王应斌,吴奎,彭刚,王德英,毛云新,张涛. 盐构造的识别、分类及与油气的关系. 石油地球物理勘探, 2008, 43(6): 689~698

摘要 盐构造是近年来勘探的热点。本文详细介绍了运用重力特征、地震反射特征、现场录井及测井识别等识别盐构造的方法;分析了盐构造的沉积特点及成因;根据盐体的埋深、外部形态、盐构造成因及其与围岩的接触关系进行了分类。在此基础上,进一步论述了盐构造的形成机制、盐构造与油气的关系。由于盐构造的空间几何特征的复杂性,在勘探方法的选择上,应将三维地震观测作为基本的数据采集方式,将三维叠前深度偏移作为最终有效的处理手段。

关键词 盐岩 膏盐 盐构造 莱州湾凹陷 油气藏

1 引言

盐构造是指由于盐岩或其他蒸发岩的流动变形所形成的地质变形体。它们包括变形体本身及其周围的其他变形岩层^[1]。盐构造研究是世界含油气盆地构造研究的热点问题之一,其中有关伸展构造环境盐构造(如墨西哥湾盆地和北海盆地)及挤压环境下盐构造(如波斯湾盆地、塔里木盆地)的研究成果较多,从而极大地丰富了构造地质学理论,拓展了油气勘探开发的领域。盐与油气聚集有着极为密切的关系,盐体变形及其对沉积相带和砂体分布的影响可以形成不同类型的构造圈闭和地层—岩性圈闭。膏盐地层本身是含油气盆地中最有效的盖层。波斯湾盆地的石油蕴藏量占世界石油最终可采储量的65%,其中约60%的最终可采储量与盐构造有关。全球150余个含盐盆地主要分布在北半球,其中大多数分布在欧亚板块,北美次之^[2]。我国东部的潜江凹陷、东濮凹陷、东营凹陷等地区勘探也发现了与盐岩有关的油气聚集。以东濮凹陷为例,在已发现的14个油气田中,9个分布在具有盐岩沉积的北部地区,探明储量中93.7%的油和80%的气均分布在北部地区的盐岩中。

膏盐地层在钻井作业过程中经常发生塑性蠕变,膏盐岩地层中的盐岩溶解垮塌,膏岩、泥岩膨胀缩径,常常导致恶性卡钻事故,因此识别和预测膏盐层非常重要。

2 膏盐层的识别

盐岩包括石盐岩和钾镁质盐岩等。盐岩主要矿物为石盐(NaCl),并含少量其他盐类矿物(如钾石盐KCl)。盐岩为立方晶体,盐岩非常纯净时无色,当含有混入物或液体等包体时呈黑色、灰色、褐色、红色、白色等,吸潮、有咸味、易溶于水。钻井中见到的盐岩地层常混有其他物质,呈片状和块状,晶型也有一定变化^[3](图1)。目前,主要采用重力特征识别、地震反射特征识别、现场录井识别、测井识别及其他识别方法识别膏盐层。

2.1 膏盐层的重力特征识别

胜利油田东营凹陷膏盐层主要发育在沙四段地层中,与沉积地层呈互层分布,每一层的厚度不大,一般只有几米。膏盐层系主要岩性有:石膏岩、膏盐岩、含膏泥岩、泥质石膏岩、盐岩、石膏质泥岩、盐质泥岩及少量的膏质白云岩。岩心密度测定结果为:膏岩类的密度为2.19~2.89g/cm³,其中石膏、膏盐、泥

*天津市塘沽 609 信箱,300452
本文于2007年8月7日收到。

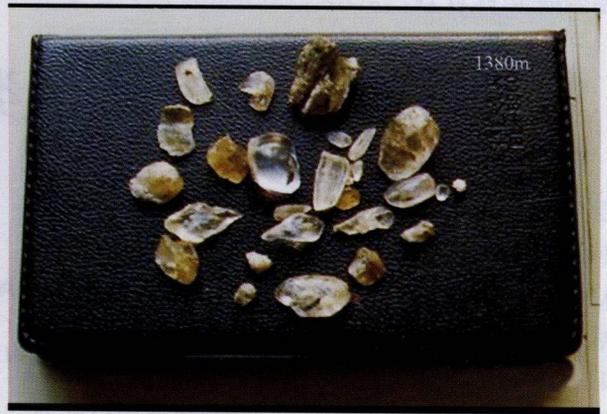
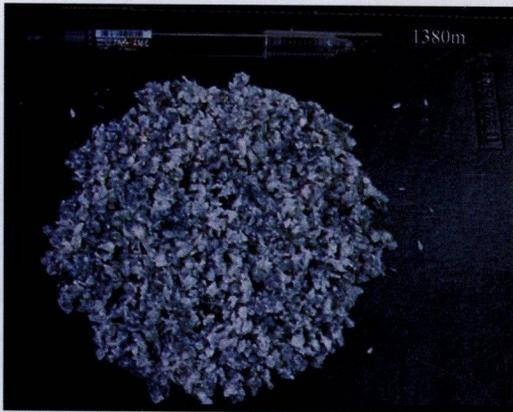


图1 济阳拗陷莱州湾凹陷 KL11 井沙河街组钻遇盐岩地层的录井特征(a)及晶体特征(b)

质石膏的密度在 2.7g/cm^3 以上,属高密度体;盐岩、石膏质盐岩、泥质盐岩的密度较低,在 2.6g/cm^3 以下,属低密度体。根据密度测井资料,沙四段非膏盐层的密度为 $2.24\sim 2.56\text{g/cm}^3$,所以膏盐层与赋存地层之间存在 $0.05\sim 0.33\text{g/cm}^3$ 的密度差,具有利用重力方法对膏盐层进行推断解释的地球物理基础。由于膏盐层与沉积地层互层,因此采用重力方法是不可能解释出各膏盐层的每一个薄层厚度的,只能将其作为一个密度等效层,即只能推断解释出膏盐层的等效厚度^[4]。总之,利用重磁资料识别膏盐层主要是以盆地规模为主,对于勘探新区有一定的参考价值。

2.2 膏盐层地震反射特征识别

膏盐层地震反射特征的识别是钻井前膏盐地层最主要、最直接,也是最有效和最经济的识别方式。地震波在纯盐岩中的传播速度较高,一般为 $4000\sim 5000\text{m/s}$,与深度关系不大;盐岩密度较膏岩类地层低,较泥岩地层高,而且不随埋深而变化。碳酸盐岩的速度与石膏速度相近,一般为 $6000\sim 7000\text{m/s}$,与碎屑岩速度差一般为 1000m/s ^[5],速度的差异还与地层的埋深、地质年代、岩性、孔隙流体、温度、压力等有关。盐岩和围岩之间存在密度和速度差异,使得界面存在较大的波阻抗差,具有较大的反射系数。一般情况下,盐岩层具有强振幅、高连续、相对低频的地震反射特征,在盐岩沉积中心厚度较大的特殊情况下,可形成弱反射、较高频、中高连续的地震反射特征^[6]。

东濮凹陷膏盐地层表现出 5 种地震反射特征:

①平行连续反射,表现为强振幅、极强的连续性、中~高频、平行反射,表明盐岩韵律层未发生构造变

形,保持了原始沉积状态;②杂乱反射,为弱振幅、不连续、中~低频反射,同相轴杂乱,有时为空白反射,这种地震反射多出现在断层夹持的断块盐体,盐岩呈厚层状;③盐拱反射,为弱振幅、不连续,中~低频反射,同相轴以顶凸、底平为特征,表明盐岩受下伏地层隆起或横向挤压作用,造成盐岩流动而形成盐聚集状态;④细颈反射,为中强振幅、连续,中频反射,一般在断层顺盐层平行穿过或滑脱时出现,盐层顶部同相轴在断面之上向下弯曲,底部同相轴向上翘起,形成“细颈”反射特征;⑤楔形反射,为强振幅、连续、中~低频反射,盐岩波组一侧厚,另一侧显著变薄^[7]。

济阳拗陷莱州湾凹陷盐构造具有 3 种地震反射特征:①强振幅、强连续性、中~高频高角度平行连续反射(图 2);②弱振幅、不连续、中~低频杂乱反射,杂乱反射在不同地区的形态发生一定的变化,表明地震剖面上的盐拱形态也产生了一定的变化(图 2);③强振幅、低频弱连续反射,具有一定的连续性。剖面上局部隆起,上覆地层和外围反射连续或较连续,盐岩韵律层同相轴以顶凸、底平为特征。这类反射主要分布在盐构造的下部(图 2)。

盐岩在高温、高压条件下可变为塑性体,并含大量原生水,密度低,在上覆高密度沉积层的不均衡重力作用及构造应力作用下,可发生流动和构造变形。盐流动、盐变形可影响到地震反射的外形。在水平方差切片上,可以很清楚地看到膏盐地层的平面展布。利用这些特征有助于识别盐层、盐流动、盐变形和盐构造。

2.3 膏盐层的现场录井识别

由于盐岩易溶解,因而钻时小,钻速快。石膏层

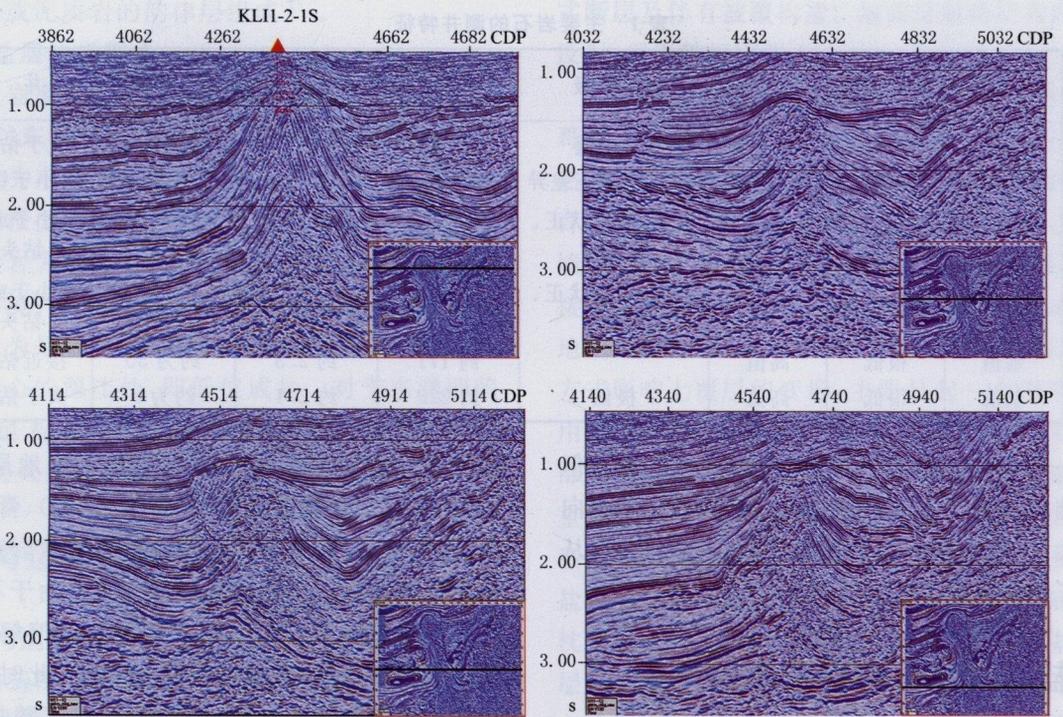


图 2 莱州湾地区三维地震剖面显示盐构造的形态变化(剖面右下角的水平振幅切片中横线位置与其相应的剖面位置对应)

一般较薄,钻时特征不明显。盐的溶解易造成井径扩大和钻井液性能不稳定;上覆地层压力的作用,巨厚膏盐层塑性变形易造成缩径卡钻;由于含盐泥页岩中盐的溶解和泥页岩的水化分散作用易造成井壁不稳定^[8]。

在使用非饱和盐水钻井液钻进时,据氯离子的变化就可以判定是否钻遇膏盐岩地层。在使用饱和盐水钻井液时,如果钻遇盐岩,盐岩会以岩屑形式返出^[9]。膏岩无论在淡水钻井液还是在饱和盐水钻井液中均会发生水化分散、破坏。井场的主要鉴定手段是:挑选不能确定的石膏岩样放入热盐酸溶解后,再加氯化钡溶液观察是否有硫酸钡白色沉淀。石膏的主要成份为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,灰白色软石膏岩屑新鲜断面滴上稀盐酸,稀盐酸呈珠状,不发生化学反应。稀氢氟酸(5%)与粉砂岩反应强烈,如果不停加入稀氢氟酸,可将粉砂岩腐蚀呈“糊状”。稀氢氟酸与膏盐层中的盐晶体不发生化学反应,即使白色石膏新鲜断面不反应,或者灰白色软石膏、盐质泥岩也都不发生化学反应。利用稀氢氟酸和上述岩性化学反应的不同结果,可快速识别不同类型钻头破碎的膏盐岩和粉砂岩,也是现场识别膏盐岩和粉砂岩的准确方法^[10]

2.4 膏盐层的测井识别

如今测井方法中的密度测井曲线和中子测井曲线及自然伽马测井曲线是划分淡水泥浆中砂泥岩岩性的主要方法,其中微电极、自然电位测井更为重要。但在碳酸盐岩和盐水泥浆砂泥岩剖面中,以自然伽马测井更为重要,电阻率和井径测井可作为一般参考。利用自然伽马曲线可进行砂、泥、盐岩性划分:盐岩的自然伽马值最低,砂岩比盐岩稍高,页岩最高,泥岩比页岩稍低^[6]。膏盐地层电阻率一般较高,在莱州湾地区最高可以达到 $74805 \Omega \cdot \text{m}$,远高于砂泥岩和碳酸盐岩类。盐岩的电性特征主要表现为高电阻率、极低微电极、低自然伽马、中子孔隙度几乎为零,体积密度相对较低、声波时差小、传播速度高的特点,而且在水基泥浆下扩井径(表 1)。表 1 中列出各主要岩性的测井特征。

2.5 其他识别方式

当高盐浓度区与低盐浓度区的岩体连接时,就会发生扩散现象。水溶液、电解液中的盐质浓度与电阻率之间的关系是很容易理解的,电阻率一般与氯化物浓度成正比。于是只要测量出电阻率,就能建立与盐浓度的关系。如果已知空间变化状况,还可以进一步建立与扩散率之间的关系^[11]。由此可

表1 主要岩石的测井特征

岩性	自然电位	自然伽马	电阻率	微电极	声波时差 μs/m	体积密度 g/cm ³	中子孔隙度 (%)	井径
泥岩	基值	高值	低,平直	低,平直	>300	2.2~2.65	高值	大于钻头直径
砂岩	明显异常	低值	低到中等	中等,明显正差异	250~380	2.1~2.5	中等	略小于钻头直径
石灰岩	无异常	比砂岩低	高值	高值,锯齿状正、负异常	165~250	2.4~2.7	低值	小于或等于钻头直径
白云岩	大片异常	比砂岩低	高值	高值,锯齿状正、负异常	155~250	2.5~2.85	低值	小于或等于钻头直径
石膏岩	基值	很低	高值		约171	约2.3	约为50	接近钻头直径
岩盐	基值	很低	高值	极低	约220	约2.1	约为0	大于钻头直径

以识别一些地震资料难以识别的盐构造外边界。但是对于陆相沉积而言,电阻率的影响因素较多,横向变化也大,因此实践中需要利用较多的钻井资料,从而限制了此种识别方法的应用。

3 膏盐层的沉积特点及成因

3.1 膏盐层的沉积特点

膏盐岩是一套特殊的沉积体,与特定的沉积环境密切相关,主要发育于沉降速率小于沉积速率盆地,部分发育于沉降速率等于沉积速率的地区。因为只有当沉降速度小于沉积速度情况下,湖、海盆的沉积环境才有可能大范围地由半封闭性的泻湖转化为封闭性的盐湖环境,盆地水体盐浓度才有可能急剧增高,进入膏盐岩大量沉积阶段。当沉降速度等于沉积速度时,盆地沉积环境可以由局限海逐步演化为泻湖环境。随着蒸发作用的加强,相应出现蒸发成因的碳酸盐和石膏沉积。中国南方诸盆地具有沉积多旋回的演化特征,有利于出现多期的膏盐岩沉积环境。膏盐岩盖层分布的层位主要有中~下寒武统、石炭系、中~下三叠统、白垩系~古近系^[12]。

从长期基准面旋回看,含盐层段发育期为构造沉陷期,处于长期基准面上升期或低频层序的水进期。从中期及短期基准面旋回看,盐韵律组及单个盐韵律形成于高频层序低水位期^[13]。在封闭盐湖沉积作用过程中,蒸发岩系地层受蒸发沉淀作用影响,形成特定的沉积层序,按照结晶的先后呈层状堆积,一般情况下,由下而上是黏土或石灰岩、白云岩、硬石膏岩、石盐岩、钾镁质盐岩、上覆石盐岩、上覆硬石膏岩。在平面展布上表现为,从边缘到盆地中心,依次由石灰岩、白云岩、石膏或硬石膏岩、石盐及钾

镁盐岩等岩相带组成。简化的膏盐岩地层层序特征,从下而上为碳酸盐岩(灰岩、白云岩)、石膏岩(石膏岩、硬石膏岩)和盐岩(石盐岩、钾镁质盐岩),其层序从理论上构成一个完整的旋回。这是由于不同矿物的溶解度差异造成的。由于碳酸盐的溶解度低,只要湖水稍微浓缩,碳酸盐就开始沉淀,此时,仍可能有陆源碎屑物质的供给,因此易形成碳酸盐岩与暗色泥岩互层。当水体浓缩到10%时,石膏开始沉淀,主要形成石膏纹层。当水体浓缩到5%时,盐岩开始沉淀,由于盐岩的溶解度高,其沉淀的速度也快,因此往往形成厚层的盐层^[13]。

东濮凹陷纯盐层单层沉积厚度一般为10~90cm,常呈灰白色,部分因混有铁质而呈棕红色,具玻璃光泽,有一定透明度,晶体大小约8~12mm,个别可达20mm。纯盐一般夹于深水暗色泥页岩和油页岩中间,间或夹有具水平层理的泥岩、泥膏岩或页岩。东濮凹陷沙三段除见到艾氏鱼、鲈形目及德弗兰藻外,还见到反映典型海相环境的钙质超微化石,表明该盆地很可能是一个与当时海侵的古海和古海湾相连通或海陆过渡的半咸水盆地,盐岩主要发育于北部地区深水区。纵向上,盐岩呈块状并与深灰色泥岩、砂岩交互出现,组成盐岩~泥岩~砂岩“三层式”韵律互层。盐韵律层厚度达几百米,单层厚度可达20多米。平面上,盐岩以不同时期形成的洼陷为中心呈椭圆或不对称椭圆形展布^[7]。东濮凹陷盐岩、石膏、碳酸盐岩在垂向上有明显的沉积序列,每一个完整的序列由3部分组成。每一沉积序列开始为暗色泥岩与薄层碳酸盐岩韵律互层;之上为薄层石膏或暗色泥岩夹薄层石膏或暗色泥岩中含各种石膏晶体,最上部为10~30cm厚的盐岩层。厚层盐岩的基本结构是由10~30cm的纯盐岩与1~3cm

的含石膏或泥质岩的韵律层组成^[13]。

3.2 膏盐层的成因

蒸发岩系地层形成环境至今依然存在很大的争议,尤其对东濮凹陷盐岩的成因和盐源有多种认识:顾家裕认为东濮凹陷盐岩形成于高山深盆环境^[14];李任伟等根据溴微量元素和硫同位素认为东濮凹陷古近系盐岩为非海相成因^[15];苏惠等认为是低山深盆浅水环境^[16],盐源源自周围隆起区的奥陶系;也有研究认为是振荡式深盆浅水成盐模式^[17],盐岩沉积于湖中心的深洼处,即低位成盐。对于东濮凹陷的盐源也提出了陆源^[16]、海侵^[18~20]、深部卤水^[21~22]等几种可能。

4 盐构造研究进展

4.1 盐构造的分类

盐构造泛指在重力、浮力和区域应力等综合作用下,由盐岩、泥岩及其他密度低于上覆地层的物质形成的底辟构造。借鉴底辟构造类型的划分,盐构造大致有以下 4 种划分方案:①根据盐体在地表下的埋深情况,分为浅、中、深三类;②根据盐构造的外部形态,分为盐单斜、盐枕、盐丘、盐脊或盐山;③根据盐构造的成因,分为原生、次生、残余盐丘;④根据盐体与围岩的接触关系,分为刺穿型、隐刺穿型、非刺穿型盐构造。一般多采用盐构造外形加成因进行分类^[23]。

东濮凹陷盐构造类型包括:①原生板状盐岩构造,这种类型的盐构造是原始沉积的,与上下地层呈平行整合接触,岩层内由多个连续到较连续、呈平行亚平行结构、强到中强振幅的相位组成。由于受区域构造应力场的影响,该盐构造表现为不均衡升降,产生区域性倾斜,上翘方向一侧多以断层和不同岩性的围岩接触,下倾方向因受物源影响常伴有明显的相变,与围岩呈齿状接触。②次生盐岩墙构造,这类盐岩构造从几何外形上看似一堵墙,在剖面上为一侵入式呈参差不平的面,有可能是形成于盐体上覆地层中的断层或裂缝向下直通盐体内,盐体内的高压盐水顺着这些断层或裂缝上升后重结晶而形成的。③后生变形盐岩构造,此种盐岩类型为盐岩沉积后流动的产物,具多种外形,凸透镜形、丘形、钟形、锥形、楔形等,轮廓清楚,大多表现为刺穿围岩或围岩超覆于盐岩之上,上覆地层常发育有莲花状

式断层及伴有披覆构造。地震反射特征为内部杂乱反射,反射轴短而强^[24]。

伸展盆地盐构造的研究相对比较成熟,在墨西哥湾盆地和北海盆地,盐岩层在张应力、差异负荷、热对流等作用下发生流动而影响上覆层的构造发育,形成各种类型的盐构造,如盐丘、盐株、盐滚、盐墙、盐背斜、盐枕、盐盖、盐蘑菇、盐塔、盐冰川、盐焊接和断层焊接构造等。在区域挤压型盆地或前陆盆地中,盐在变形中的作用不像伸展区那样以主动的方式影响上覆层的变形,主要是起一个滑脱面的作用,从高压区(如向斜下部)被拉向低压区(如背斜核部)。盐及其厚度对变形样式和变形的传递起到了重要作用,有盐存在时,挤压区盐上层拆离褶皱是典型的变形样式,向斜往往很宽,背斜很窄。挤压区的盐较少发育到刺穿阶段,大多停留在主动底辟或盐枕阶段,一般没有盐冰川或盐泉构造,有时盐可顺断层面被拖曳到地表。库车凹陷将盐构造简单分为盐上构造、盐下构造和盐间构造。盐上构造指盐上层系由于挤压作用和下伏盐层的变形而导致上覆脆性碎屑岩层变形而形成的各种构造,主要包括逆冲断层及相关褶皱、逆冲推覆构造、背冲断块构造、三角带和盐成凹陷等;盐间构造指盐(膏)层本身由于塑性流动、重力滑覆、逆冲推覆和重力扩展作用所形成的各类构造。不存在伸展区常见的蘑菇状和鸭头状盐体,也不存在盐盖和龟背构造、盐枕构造、盐焊接构造。盐下构造包括背冲断块或断褶构造、叠瓦冲断带和双重构造等^[25]。

考虑到济阳拗陷莱州湾凹陷的实际钻井资料,大量的膏盐地层与泥岩地层呈互层状态,泥岩甚至占含盐地层的 56.5% (表 2),因此有学者提出了盐—泥构造的概念^[26]。但是济阳拗陷东营凹陷的盐—泥构造样式包括盐—泥枕构造、盐—泥滚~滑脱断层簇~滚动背斜构造、盐—泥核背斜~拱顶断层簇构造。

表 2 渤海莱州湾地区膏盐地层特征

	含盐地层 厚度	盐岩	膏岩	泥岩	页岩
厚度(m)	285.0	110.5	1.5	171.0	2.0
层数	1	27	1	32	2
占地层总厚度的 百分比(%)	100.0	38.8	0.1	60.0	0.1

4.2 盐构造的形成机制

盐构造形成机制可以归纳为6种:①浮力作用,该机制认为当盐或泥层埋藏到一定深度时,上覆层的密度变得大于盐或泥层的密度,导致了密度反转,产生 Rayleigh-Taylor 不稳定性,促使盐或泥构造的发育。然而该机制强调上覆层一般要达到一定厚度时才能形成密度反转,并且不稳定性只有在上覆层也为流变体时才能产生。②差异负载作用,差异负载作用在盐或泥构造的发育中具有普遍性,但其引发的构造变形往往是局部的,且变形幅度较小,并非盐或泥构造最根本的触发机制^[26]。差异负载作用通常分为三种类型:其一为由沉积的差异造成拗陷中部与盆地边缘沉积厚度的差异,以及上覆地层沉积的厚度差异,从而在盐膏层底部产生差异负载作用;其二由差异压实所产生;其三由剥蚀作用造成盆地边缘一边构造抬升、盆地中心相对沉降产生的相对差异沉降而形成的剥蚀差异负载作用^[27]。③重力滑动(被动大陆边缘斜坡区)或重力扩展作用。④热对流作用。⑤挤压作用。⑥伸展作用。

渤海湾盆地伸展构造背景下的盐构造成因机制研究有很长的历史,其中东营凹陷古近系盐构造研究有多种观点,其成因机制包括以下3个方面:①塑性层因围压失去平衡向压力梯度降低的方向发生塑性流动;②岩层的密度反转引起塑性流动;③重力滑移作用。此外还强调了水平张扭应力场的影响^[26]。费琪等认为在东营凹陷的底辟构造的形成过程中,垂直(重力)和水平(扭应力)两个方向的应力都有较强的表现,并着重强调了重力因素是造成底辟构造的直接原因^[28]。戈红星等根据动力尺度物理模拟提出东营凹陷的3个构造带分别是对薄皮区域伸展和盐源层塑性流动的响应^[29]。刘晓峰等针对东营凹陷盐-泥层的特殊性和盐-泥构造样式以及盆地构造演化的背景,认为区域伸展作用下的重力滑动作用是东营凹陷盐-泥构造形成的主导机制。重力滑动作用表现为触发盐-泥层的聚集——隆升和引起薄皮滑脱作用。由此将盐-泥构造演化历程划分为盐-泥枕发育期和滑脱断层~盐-泥滚~盐-泥核背斜发育期^[26]。

在我国西部挤压环境下,库车前陆褶皱冲断带中段下古近系发育一套盐岩层系,库车前陆褶皱带中段盐相关构造形成的早期可能与重力作用有关^[25],晚期主要与强烈挤压和逆冲推覆作用有

关^[25]。库车拗陷盐构造的成因受多重作用影响,差异负载是库车拗陷盐构造初始形成时的动力来源,中新世—上新世中晚期差异负载作用是盐构造形成与缓慢生长的主要动力。盐上盖层快速沉降是该期盐构造生长缓慢的主要原因。上新世中晚期以来强烈的区域挤压作用是库车拗陷盐构造发育的主控因素,构造挤压决定了盐构造的样式、分布与规模,并促进了差异负载、重力作用与浮力作用的发展,以区域挤压为主的多种作用造成了库车拗陷盐构造晚期异常高速地生长^[27]。区域上盐构造演化具有分段性,在重力滑动、重力扩展、区域挤压和塑性流动作用的联合控制下,形成盐枕构造,呈长条形带状分布。库车前陆褶皱冲断带盐枕构造的演化序列具有由北往南迁移的特点^[30]。

4.3 盐构造的模拟

盐构造模拟包括物理模拟和数值模拟两方面,其中物理模拟方面的成果最为丰富。一般利用石英砂和聚合硅树脂代替上覆层和盐层,开展的模拟包括区域伸展背景下的盐构造、沉积差异负荷引起的盐构造、盐下基底断裂活动引起的盐构造等^[2]。

模拟试验表明断陷盆地底辟的演化序列为:底辟早期发展阶段,局部盐岩运移,线形盐墙同期变形,成熟底辟形成晚期,底辟活动阶段。物理模拟实验揭示了盐底辟构造演化的三阶段特征:①复活底辟阶段,盐体在地堑底部形成盐墙;②主动底辟阶段,盐体向上隆起并刺穿上覆层;③被动底辟阶段,底辟出露地表,如果源盐供应充足,底辟的生长速率与地层沉积速率一般会保持一致。

挤压环境下盐构造砂箱模拟结果表明,在薄皮变形的前陆褶皱—冲断带地区,构造变形主要与地层发生滑动时遇到的阻力有关。戈红星等以东濮凹陷文留构造为重点研究对象,模拟了盐从盐丘~盐底辟~后期塌缩在盐栓肩部和顶部形成逆断层的过程^[31],研究了简单基底断裂和基底地垒对盖层(盐层与上覆层)形变的控制以及盐溶或盐撤(指盐体从观察面的一个部位转移到另一个部位,但总面积保持不变)构造。

4.4 盐构造的地震资料采集、处理

对于与盐岩有关的构造(其空间几何特征复杂),应采用三维观测作为基本的数据采集方式。从二维和三维地震资料的对比可以清楚地看出,受盐构造侧向反射的影响,二维地震资料中的假隆起在

三维地震资料中不存在(图 3)。至于三维观测宽方位的选择,应考虑到经济投入、设备能力、处理能力和宽窄方位所产生的效果差别。宽方位有很多优点,但这些优点是在必须保证每一个方位上有一定覆盖次数的基础上才能体现出来,而且这些优势往往与地下介质的各向异性特性有关。当这些条件不完全具备时,宽方位的优势得不到发挥,窄方位观测反而具有优势。根据我国西部与盐岩有关的构造的

具体情况,只要横向覆盖次数不特别少,窄方位观测(纵横比 <6)也能得到满意的效果^[32]。

盐下构造的成像问题一直是地球物理学家努力的方向。即使是同一块三维地震资料,由于选取的处理参数不同,也会有不同的成像效果,尤其是速度谱解释对盐下成像效果影响最大(图 4)。针对盐下构造成像采用叠前深度偏移最有效。模拟数据分频成像处理表明,利用低频信号可以提高深层的成像质

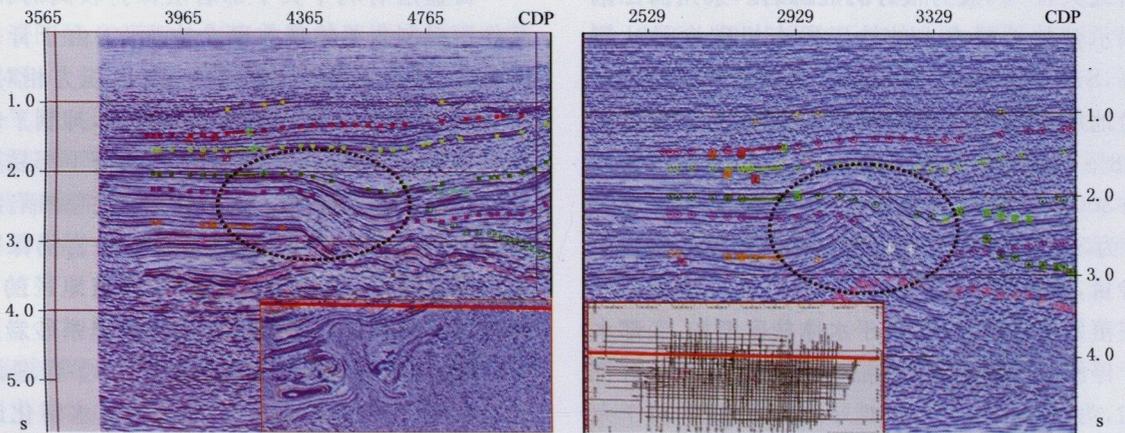


图 3 莱州湾地区盐构造北部同一位置的三维测线(左)和二维测线(右)对比

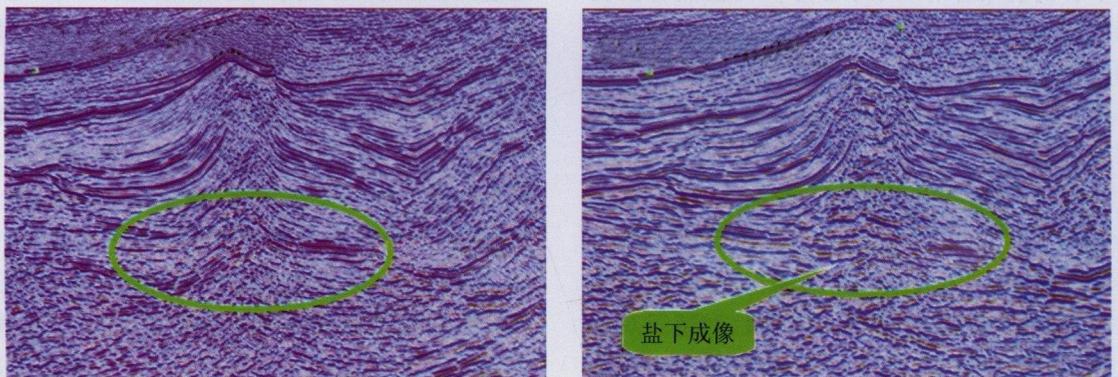


图 4 三维叠前时间偏移新(右)老(左)剖面

量。济阳拗陷由于膏盐层对地震波场的强烈吸收和散射作用,且膏盐地层呈非均匀分布,往往造成其下伏地层成像困难。因此设计了一个简化的膏盐层模型,采用波动方程黏弹性介质波场数值模拟技术。通过分析单道记录中以膏盐层为界的浅层和深层地震反射信号振幅谱的频率差异,表明介质对波场的散射和吸收作用与地震信号的频率密切相关,高频信号衰减快,低频信号具有较强的抗散射和抗吸收能力,更易于穿透处于蠕变状态的非均匀膏盐层。根据此项模拟结果,并结合目标区实际地质情况,建

立了膏盐层地质模型,使最终的成像效果有了很大改善^[33]。

4.5 盐构造与油气的关系

4.5.1 膏盐对烃源的影响

第十届世界石油会议上,罗马尼亚学者巴尔茨根据对 108 块盐岩分析指出,每 100g 盐岩中的有机质含量达到 15~4500mg,仅次于黏土或泥岩,居第二位。实际上从前面的分析可以看出,纯净的盐和石膏都不含有有机质,不具备生烃的条件,也就是说该学者的测量数据很可能是盐岩地层中夹杂的泥岩有

机质含量的反映,应该不具备代表性。从东濮凹陷的沉积环境分析来看,盐膏岩分布局限,多分布于凹陷沉积中心,且多与深色泥岩、页岩互层,表明气候存在干旱与潮湿高频韵律变化。干旱期湖平面下降,湖水浓缩到一定浓度就在湖盆中心沉淀结晶膏盐、盐岩,在沉积中心一侧的斜坡地带同时形成扇三角洲砂体与盐岩。潮湿期湖平面上升,偶而伴以海泛的影响,湖平面水位高,在湖盆中心处就沉积了深色泥岩或页岩^[13],成为很好的烃源岩。莱州湾凹陷钻并揭示膏盐地层之上的沙三段有机碳含量达到4.24%,S1+S2为30.89mg/g,是很好的烃源岩。与膏盐地层互层的沙四段暗色泥岩有机质含量达到1.38%,S1+S2为7.57mg/g,也是好的烃源岩(S1为300℃时检测的单位质量储集岩中的烃含量;S2为300℃~600℃时检测的单位质量储集岩中的烃含量,单位为mg/g)。

在蒸发岩形成初期,由于水体盐度增加,底部水体近于停滞,河流供给及湖泊中的大量生物和有机质死亡,为转化成石油形成雄厚的物质基础;由于大套盐岩的快速堆积,使下伏暗色泥岩快速与氧隔绝,不仅利于有机质的保存,同时还为下伏生油岩提供充足的热源和地层压力,对有机质的热演化起到促进作用。由东濮凹陷沙河街组盐岩与生油岩的关系可以看出,生油岩分布随盐岩的发育而增加,并随盐岩减小而减小^[34]。

4.5.2 膏盐对盖层条件的影响

常规油气资源的直接盖层主要有泥页岩和盐(膏)岩两种类型,而膏盐层非常致密,具有较高的排驱压力,而且其厚度很大,所以具有物性和超压双重封闭机制,在盖层分级中属于特级盖层^[33]。即使是膏盐地层中有大断层通过,其侧向封堵能力也极强,盐构造围区形成一系列的小型油气藏就是由膏盐地层良好的侧向封堵造成的。库车拗陷古近系膏盐层、膏泥岩层基本覆盖整个拗陷,厚度巨大(100~3000m),封盖力强(封盖的克拉2井膏泥岩实测突破压力达60MPa),为形成库车拗陷最重要的富气单元——白垩系油气系统起到了重要的作用。据全球大型油气田盖层岩性的统计表明,虽然泥页岩盖层分布最广,占80%以上,但泥页岩所封盖的石油储量仅占全球石油储量的22%;而分布面积仅占8%的膏盐盖层,却封盖了全球总油气储量的55%^[35]。统计中国13个主要含气盆地数据表明,

其中有4个盆地发育膏盐岩,勘探发现气田165个,占全国气田总数的40%;探明气层气储量 $15718.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国气层气总储量的36%^[12]。值得注意的是,由于膏盐地层具有很强的流动性,膏盐地层的上拱会在一定程度上破坏盐下原生油气藏;盐拱顶部易受盐岩溶蚀的影响,形成一系列的正断层,也会破坏油气储层。

4.5.3 膏盐对储层条件的影响

膏盐层有利于其下部岩层保持较高的孔隙度,其作用机制主要体现在两个方面:①由于膏盐岩密度稳定、热导率高,下伏地层经受的压力相对较小,压实程度低,其下地层热量容易散出,抑制了储层的成岩作用,使原生孔隙得以保存,因而下部易形成异常高压而产生裂缝等。例如,在滨里海凹陷富盐的西坡地带5000m深处,泥盆系石英砂岩仍保留高达24%的孔隙度,塔里木盆地秋立塔克地区的东秋5井古近系膏盐层以下的新生界和白垩系砂岩裂缝发育,孔隙度大,储集性能优良^[36,37]。②当埋深达到一定深度时,石膏会脱去大量的结晶水转化成硬石膏,这些水富含有机酸,在高温高压作用下,溶解作用进一步加强,形成较好的次生孔隙。因此膏岩层通过对深部地层温度、压力的影响,使其分布程度与深层次生孔隙发育层段存在密切的关系。渤南洼陷在5000~6000m的深度段内的孔隙度仍可保留在4.34%~6.44%之间,为深层油气的储集提供了良好的空间。在一定条件下,膏盐岩也可以作为油气储集层,因为石膏向硬石膏转变时大量脱水,体积将减少约30%,这有助于形成硬石膏晶间孔。这些晶间孔在未被胶结的情况下具备储存油气(尤其是气)的能力。

4.5.4 与膏盐有关的构造样式和油气藏类型

在被动大陆边缘伸展构造背景下,与膏盐有关的圈闭主要有以下几种类型^[38]。

(1)简单的丘状背斜 由盐栓或冠岩上微微拱起的砂层组成背斜,但这种聚集油气的简单丘状背斜并不常见。盐栓顶部的油气储层往往由于断层、分隔的透镜状砂体或局部不整合而复杂化。

(2)中央地堑系 隆起盐栓之上的中央地堑系地层控制着许多盐丘上部的油气层位置。断层下降盘和上升盘都可能成为产层。早期发现油气大多产自盐丘顶部之上的砂岩或冠岩层,后来在靠近盐株不同部位的储集层中发现油气藏。

(3)翼部圈闭 一种是在盐体隆起以前或是与盐体隆起同期形成的,另一种是由盐向上侵入并刺穿大段沉积岩而形成的翼部圈闭,其中包括:①由盐檐或冠岩檐突遮挡的砂层;②靠盐株遮挡、靠断层泥带遮挡或页岩鞘遮挡的砂层;③单一的和复杂的断层圈闭。

(4)断层及不整合圈闭 复合砂层由于断层而陷落或上升使砂层紧贴不渗透的页岩层时就会形成良好的圈闭。

东濮凹陷北部与盐岩有关的油气藏主要有以下几种类型:①盐岩上拱浅层歪式背斜油气藏;②盐下背斜油气藏;③断层遮挡油气藏;④盐墙遮挡油气藏;⑤盐丘侧向遮挡油气藏;⑥三向盐丘单斜油气藏;⑦盐相变遮挡油气藏。

挤压环境下的盐构造样式更加丰富多彩。库车前陆褶皱带发育盐上、盐间和盐下三套不同的构造样式。盐上构造样式主要包括逆冲断层及断层相关褶皱、盐推覆构造、三角带构造和盐成凹陷。盐间构造样式主要包括盐枕构造、盐间断褶构造和盐焊接构造等。盐下构造样式主要包括叠瓦冲断带、双重构造、背冲断块或断褶构造。研究表明,库车前陆褶皱带盐上、盐间和盐下构造样式形态迥异,但它们是在统一应力场作用下形成的,在成因上有着密切联系,其动力学机制与重力作用、挤压作用和盐岩层塑性流动作用密切相关^[25]。

4.5.5 与盐构造有关的油气运聚

膏盐岩层对油气运移和聚集的影响主要表现在以下几个方面^[34,36,39]:①膏盐层发生软流,引起了局部盐岩、石膏的加厚,使上覆地层发生隆起。在隆起的过程中,由于地层伸张而发生破裂,往往形成“屋脊式”的生长断层或开启的裂缝,油气沿这些断层和破裂通道运移、聚集形成油气藏。另外盐运动可形成盐柱和盐刺穿构造,盐柱的持续上升,可以使高压生烃泥岩体上面的致密“壳”发生拱张,形成一些开启的断裂、裂缝,导致“壳”被高压流体胀裂,从而使其中的含烃流体向上运移。②热盐发生自由对流,导致油气的运移。盐构造附近,由于盐度和温度的共同影响,引起流体的密度差,从而导致自由对流。盐体构造变动会改变地下流体的动力系统,主要形成密度反转和异常高压两种驱动机制^[37]。在密度反转驱动机制下,盐体溶解在较浅的部位产生卤水,有助于产生孔隙流体密度反转,

驱动流体大范围的垂向和横向流动。此时生长断层和与盐底辟相伴的断裂能够提供垂向运移的通道,大规模上倾方向的横向运移受下倾方向运移的卤水补充。随着盐席边缘的溶解,孔隙流体密度反转,下伏的低盐度孔隙水被下降的卤水置换产生横向或垂向运移。在异常高压驱动机制下,异常高压多发育于盐丘所在的区域,盐体的底辟作用是高异常压力形成的原因之一。若盐层直接覆盖在碎屑岩层之上时,未固结沉积物中的孔隙水不能通过盐层,由于上覆岩层的压实,地层水便会形成孔隙流体的异常高压。③膏盐岩发生运动,形成了各种盐构造如盐丘,这些盐构造为油气聚集提供了场所,盐构造也为盐下圈闭的保存提供了良好的条件。在构造强烈挤压的过程中,盐下圈闭的应力得以释放,使得高幅度构造不易遭到破坏,从而有利于油气的聚集。

5 盐构造研究面临的挑战

(1)盐构造的精确成像是采集处理技术发展中的瓶颈。由于盐构造、走滑断层、构造反转以及浅层气烟囱等复杂地区的速度横向变化很大,叠前深度偏移需要精确的速度模型才能确保构造准确成像。尤其是运用该项技术对盐构造成像时,需要判断膏盐层的顶底面,然而,在新区、探井较少时往往存在很多不确定性。宽方位角和 Q-Marine 等采集技术的运用有望解决盐下构造及高陡构造的反射成像问题。

(2)膏盐地层的钻前预测精度有待于提高。膏盐地层的钻井、录井技术有待进一步提高,含盐地层的钻井技术研究论文很多,对应措施也很到位,但工程预测精度在钻前难以满足。由于盐岩发育层系埋深大、速度高,地震反射特征不明显或者呈杂乱反射,地震资料品质较差,难以达到精细预测的要求。

(3)进一步恢复盐构造及围区沉积体系,包括盐构造演化对沉积的影响或者相互作用、古构造的恢复等。但是由于存在推覆构造、走滑断层和构造反转,从而增加了古构造恢复的难度。膏盐地层的沉积环境和来源至今尚无统一的认识,未来很可能向多元化方向发展。随着不同类型的与膏盐有关油气藏的勘探发现,盐构造形成和演化的模拟也会更加丰富。

参 考 文 献

- [1] 戈红星, JACKSON 等. 盐构造与油气圈闭及其综合利用. 南京大学学报(自然科学版), 1996, 32(4): 640~649
- [2] 汤良杰等. 含油气盆地盐构造研究进展. 地学前缘, 2005, 12(4): 375~383
- [3] 胥菊珍, 蒋飞虎, 张孝义等. 河南东濮凹陷古近系沙河街组盐岩沉积特征及成因. 古地理学报, 2003, 5(2): 162~170
- [4] 刘展, 赵健, 李云平, 赵文举. 东营凹陷膏盐层的重震联合解释技术. 石油大学学报(自然科学版), 2005, 29(6): 16~19, 22
- [5] 崔炳富, 牟中海. 利用地震层速度进行定量岩性预测及在塔西南地区的应用. 石油地球物理勘探, 2002, 37(增刊): 61~65
- [6] 庞尚明, 陈发亮, 李勤英. 东濮凹陷盐岩地震地质特征研究. 石油物探, 2005, 44(6): 605~608
- [7] 何亚伟等. 东濮凹陷沙三段盐构造类型及地震识别. 石油地球物理勘探, 2003, 38(5): 552~556
- [8] 孟庆生, 江山红, 石秉忠. 塔河油田盐膏层钻井液技术. 钻井液与完井液, 2002, 19(6): 74~76, 79
- [9] 尚锁贵. 膏盐岩地层地质特征与录井技术. 录井工程, 2006, 17(4): 10~13
- [10] 孙玉华等. 复合钻井条件下粉砂岩与膏盐岩的准确识别. 录井技术, 2004, 15(1): 38~40, 49
- [11] Amal Vittachi 等著, 王海霞译. 一种利用近井眼电阻率测量进行远距离盐丘成像的新方法. 测井与射孔, 2004, (1): 31~34
- [12] 金之钧等. 中国南方膏盐岩分布特征. 石油与天然气地质, 2006, 27(5): 571~583, 593
- [13] 屈红军, 李文厚, 苗建宇, 庞军刚. 东濮凹陷濮卫洼陷盐岩发育规律及成因探讨. 中国地质, 2003, 30(3): 309~314
- [14] 顾家裕. 东濮凹陷形成环境. 石油实验地质, 1986, 8(1): 22~28
- [15] 李任伟, 辛茂安. 东濮盆地蒸发岩的成因. 沉积学报, 1989, 7(4): 141~148
- [16] 苏惠等. 东濮凹陷沙三段盐岩成因. 石油勘探与开发, 2006, 33(5): 600~605
- [17] 禹金营, 张洪安, 慕小水, 顾勤. 东濮凹陷盐岩沉积模式研究. 江汉石油学院学报, 2003, 25(3): 40~42
- [18] 张建军, 李治, 刘贤武. 东濮凹陷沙河街组盐岩成因研究. 断块油气田, 1998, 5(5): 18~22
- [19] 林又玲, 吴贤涛, 潘结南等. 东濮凹陷老第三系沙河街组盐类沉积模式新见. 古地理学报, 2000, 2(4): 66~75
- [20] 任来义, 林桂芳, 赵志清等. 东濮凹陷早第三系的海侵事件. 古生物学报, 2000, 39(4): 553~557
- [21] 金强, 黄醒汉. 东濮凹陷早第三纪盐湖成因探讨. 华东石油学院学报, 1985, (1): 1~13
- [22] 陈发亮, 朱晖, 李绪涛等. 东濮凹陷下第三系沙河街组层序地层划分及盐岩成因探讨. 沉积学报, 2000, 18(3): 386~388
- [23] 齐兴宇, 黄先雄, 寿建峰, 李燕英. 东濮凹陷盐岩与油气. 石油学报, 1992, 13(1): 23~29
- [24] 胥菊珍, 张孝义, 张虹, 贺艳梅. 东濮凹陷北部古近系与盐岩有关的油气藏类型. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 152~156
- [25] 汤良杰, 贾承造, 皮学军等. 库车前陆褶皱带盐相关构造样式. 中国科学(D辑), 2003, 33(1): 38~46
- [26] 刘晓峰, 解习农, 张成, 姜涛. 东营凹陷盐一泥构造的样式和成因机制分析. 地学前缘, 2005, 12(4): 403~409
- [27] 邬光辉, 蔡振中, 赵宽志, 董立胜, 师骏. 塔里木盆地库车拗陷盐构造成因机制探讨. 新疆地质, 2006, 24(2): 182~186
- [28] 费琪, 王燮培. 初论中国东部含油气盆地的底辟构造. 石油与天然气地质, 1982, 3(2): 113~123
- [29] Ge Hongxing, Vendeville B C, Jackson M P A. Salt tectonics in the Dongying and Dongpu depressions, Bohai Bay Basin, China—A new interpretation based on physical modeling results. *International Geological Congress 30, Abstracts, Resumes 30*, 1996, 2: 288
- [30] 汤良杰, 贾承造, 金之钧等. 库车前陆褶皱冲断带中段古近系盐枕构造. 地质科学, 2003, 38(3): 281~290
- [31] 戈红星. 文留盐构造成因与掩埋机制. 石油学报, 1997, 18(2): 35~40
- [32] 熊翥. 我国西部与盐岩有关构造油气勘探地震技术的几点思考. 勘探地球物理进展, 2005, 28(2): 77~80, 89
- [33] 余德平等. 利用低频信号提高膏盐区深层成像质量. 石油物探, 2006, 45(3): 234~238
- [34] 高霞, 谢庆宾. 浅析膏盐岩发育与油气成藏的关系. 石油地质与工程, 2007, 21(1): 9~11
- [35] 贾承造, 赵文智, 魏国齐等. 盐构造与油气勘探. 石油勘探与开发, 2003, 30(2): 17~19
- [36] 王东旭, 曾溅辉, 宫秀梅. 膏盐岩层对油气成藏的影响. 天然气地球科学, 2005, 16(3): 329~333
- [37] 孙海龙. 渤南洼陷膏盐层发育与深层储层孔隙发育的关系. 河南石油, 2005, 19(2): 14~16
- [38] 金文正, 汤良杰, 万桂梅. 浅谈盐及其相关构造与氧气的关系. 西北油气勘探, 2005, 17(3): 29~34
- [39] 刘晓峰, 解习农. 与盐构造相关的流体流动和油气运聚. 地学前缘, 2001, 8(4): 343~349

(本文编辑:金文昱)