

文章编号:1000-0550(2014)06-1132-08

墨西哥湾北部深水区 Wilcox 沉积特征及沉积模式研究

卢景美^{1,2} 张金川¹ 严杰² 王丹² 张量²

(1.中国地质大学(北京)能源学院 北京 100083;2.中海油研究总院海外评价中心 北京 100028)

摘要 墨西哥湾北部盆地的始新—古新统 Wilcox 是深水区重要的储集层和产油层,埋深大,分布广。前人对 Wilcox 的沉积类型认识存在不同的观点,本文通过岩芯观察、薄片分析,结合测井、录井资料和地震资料,对深水区的 Wilcox 砂岩的沉积环境和沉积特征进行了深入研究。研究表明,Wilcox 砂岩为深水扇沉积,中等到好分选,细粒—极细粒,以岩屑砂岩和长石质岩屑砂岩为主。结合沉积物源分析和盐岩演化形变形成的微盆地对 Wilcox 沉积的影响,建立了 Wilcox 深水沉积模式,下陆坡区为受盐岩微盆地控制的水道沉积,盆地区为深水扇沉积。

关键词 墨西哥湾盆地 Wilcox 组 沉积环境 深水扇 盐相关微盆地

第一作者简介 卢景美 女 1974 年出生 博士研究生 高级工程师 石油地质综合评价 E-mail: lujm1@cnooc.com.cn

中图分类号 TE121.3 **文献标识码** A

0 引言

近年来,深水油气储量已成为全球油气储量增长的亮点,油气发现集中在以墨西哥湾、巴西和西非为代表的深水盆地^[1-4]。深水油气勘探已成为国际油公司每年上游预算的一个重要组成部分。墨西哥湾深水油气储量主要集中在盐上的上新统、盐下的中新统和始新统一古新统的 Wilcox 储层中。墨西哥湾深水储量不断增长,其中贡献比较大的是盐下 Wilcox 储层,其油气发现具有“两大一高”特点,储量规模大,储层埋深大,测试产量高。Wilcox 储层主要分布在水深 1 000~3 000 m,一般 Wilcox 储层埋深在 7 000~10 000 m 的深度,除了西部的 Perdido 带埋藏较浅,约在 4 000 m。去掉水深后储层埋深为 4 000~7 000 m,依据国内盆地的油气勘探经验,早已超过了碎屑岩储层的经济基底,为什么在墨西哥湾深水盆地埋深这么大的储层测试产量还如此高?其储层沉积机理和物性特征控制因素如何?本文结合墨西哥湾深水盆地近年钻井资料和中侏罗统盐岩的演化形变等最新研究成果,探讨该时期深水沉积的特点和沉积受控因素,建立 Wilcox 沉积模式并讨论了 Wilcox 储层物性影响因素。

1 Wilcox 组沉积特征

发育于始新统一古新统的 Wilcox 组在墨西哥湾

西北海岸盆地(陆上)是主要的产层,最早的勘探和生产活动始于 1920 年的德州南部和东南部,钻井揭示了 Wilcox 为河流、三角洲和浅海相砂岩,可采储量在陆上超过 $8\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然气。墨西哥湾深水盆地的 Wilcox 油气发现距陆上气田约有 400 km,在深水区分布范围约 $8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。深水区揭示的 Wilcox 岩石组分不同于陆上,说明其沉积搬运过程不同于陆上。对于深水区 Wilcox 沉积类型存在较大的争议,有研究者认为深水区的 Wilcox 是陆上三角洲通过陆坡峡谷在海平面下降时在低位域的沉积^[1]。随着盐下地震勘探技术的逐步攻关,盐下地震成像效果越来越好,结合不断增加的钻井对深水 Wilcox 组的发育演化背景和沉积储层认识水平不断得到提高。本文研究认为 Wilcox 为深水扇沉积,是在重力作用下通过陆架和陆坡区河道搬运至半陆坡和盆地的深水沉积。

1.1 地震相特征分析

陆坡区 Wilcox 地震特征表现为夹在两层连续的低频强反射层之间的低频弱反射或杂乱反射,连续性较差,但局部可见连续强反射。盆地深水区 Wilcox 组地震反射特征与陆坡区类似,也表现为夹在两层连续的低频强反射层之间的低频弱反射或杂乱反射,连续性差或不连续,局部也可见连续强反射(图 1)。这种地震反射特征与深水扇沉积相的地震反射特征比较吻合。而且墨西哥湾现今研究成熟度比较高的第

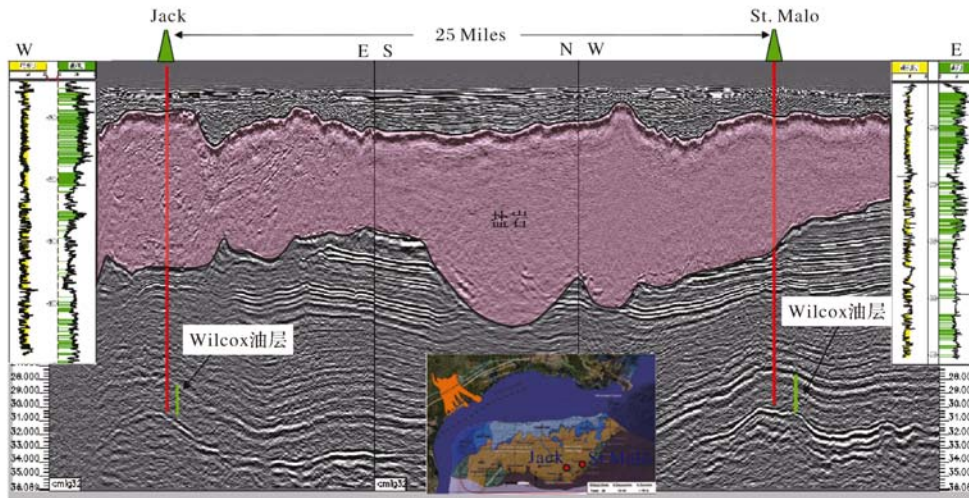


图 1 墨西哥湾深水 Jack 和 St.Malo 油田 Wilcox 地震反射特征

Fig.1 Seismic profile from Jack to St.Malo discovery shows the Wilcox amplitude in the deepwater of Gulf of Mexico

四纪深水扇体系地震反射特征也是以低频的弱反射或杂乱反射为主^[5]。

在两个连续低频强反射同相轴之间发育 Wilcox 地层,深水区不同的沉积微相的地震相特征差异较大。陆坡区 Wilcox 可以识别出三种地震微相,第一种是中到强振幅,平行到亚平行的连续反射特征,见明显的顶底,代表了侧向溢岸沉积;第二种为丘状和杂乱反射特征,中到弱振幅,连续性较差,底部边界有剥蚀特点,有水道充填特征;第三种是低频强振幅反射,由连续过渡到不连续特征,代表了朵页之间相互的叠置特征。深水盆地 Wilcox 顶底界面比较清晰,内部基本是弱反射、不连续特征。上下 Wilcox 界面为中、强振幅的连续反射界面,井上揭示为一套海相泥岩。

1.2 单井相分析

截至目前深水区约有 35 口井钻遇 Wilcox 储层,其砂岩厚度大,砂地比高达 70%,表明其供给物源为富砂沉积。Reading and Richards 依据深水沉积的颗粒大小和供给系统把深水沉积分为四类:富砾系统、富砂系统、砂泥混合系统和以泥为主的系统^[6]。富砂供给系统中最常见的沉积微相是叠置水道和水道化朵页体。

通过对墨西哥湾深水区钻井的自然伽马曲线特征的仔细研究和分析,并结合岩芯和岩屑资料研究,认为研究区 Wilcox 组为深水扇沉积,其亚相可划分为内扇、中扇和外扇(图 2)。内扇也称近端复合水道化扇,微相主要为复合水道和水道、进积朵页体和深

海泥。中扇也称块状河道复合体,微相包括水道、席状砂、深海泥。外扇也称扇端,微相见席状砂、边缘朵页体和深海泥。

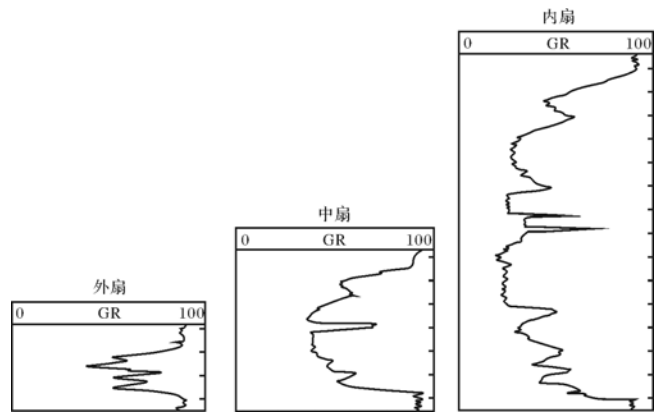
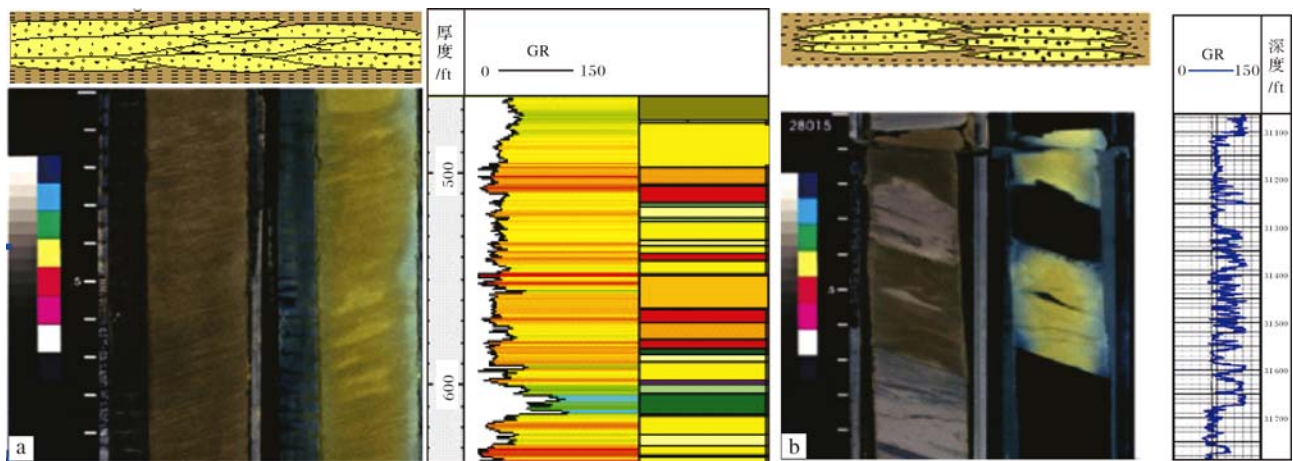


图 2 Wilcox 内扇、中扇和外扇 GR 曲线特征

Fig.2 GR shows the different fan facies character of Wilcox

内扇水道和中扇水道相同点都表现在水道砂岩的箱状特征(图 3),不同的是厚度差别和横向连通性。内扇亚相主要由厚 7~31 m 的纯净、相互叠置的水道砂夹薄层的深海泥组成,由于内扇水道相互切割频繁,因此往往可以形成不同期次水道砂体在横向上的联通和纵向上的叠置,这种特征反映在岩芯上就是砂体以厚层的块状产出,有时可见小型的板状交错层理。中扇砂岩都有一个比较高伽马值的基底,和近端扇不同的是砂体都是独立的并且向上变细,到极细粒砂岩和粉砂岩。砂岩厚度比内扇薄,厚度在 3~15 m 左右。中扇水道横向上和纵向上的连通性都不及内



a. Wilcox 组内扇水道岩芯和测井曲线特征 L; b. Wilcox 组中扇岩芯和测井曲线特征

图3 Wilcox 内扇和中扇岩芯和测井曲线特征

Fig.3 Correlation of core and logging data of Wilcox Upper fan and Middle fan

扇水道,因此反应在井上其单层连续砂体厚度有限,自然伽马曲线也呈箱型,但规模小于内扇水道。由于在中扇位置水道开始呈发散状展布,流体常常溢出水道呈漫流状态,所以更容易沉积广布的席状砂层,在每一次席状砂层沉积的间歇期往往会沉积深海泥层,因此就形成了席状砂和深海泥的互层,自然伽马曲线表现为指状特征。

外扇亚相主要包括深海泥和席状砂微相,以深海泥为主,偶夹薄层的席状砂,以极细砂岩及粉砂岩为主。自然伽马曲线表现为稳定的高自然伽马值,偶尔出现指向低自然伽马值的针状突起曲线特征。

2 Wilcox 组深水沉积控制因素

深水沉积控制因素较多,包括相对海平面变化、物源供给体系、区域构造背景、沉积古地貌等。墨西哥湾新生代以来,经历了多次三级海平面变化旋回,但整体处于二级海平面变化的下降趋势中,Wilcox 沉积时期古新世—始新世经历了短暂的三个三级海平面下降,在陆架区可以识别出三个沉积旋回,但在深海盆地由于深水环境对海平面变化等因素的反应不敏感^[7],所以无法识别出相应的三个沉积旋回。因此,研究认为 Wilcox 组沉积主要控制因素是物源供给体系和沉积古地貌,即侏罗世卡洛夫时期沉积 Louann 母盐岩活动形成的微盆地对沉积的影响。

2.1 物源供给影响

墨西哥湾自古新世至上新世共发育了八大物源供给区^[8],它们随着墨西哥湾周缘的构造和气候变化,在不同时期的供给能力和分布范围各不相同。这

些物源在不同时期分别控制着墨西哥湾陆架及深水沉积的分布。古新世到早中新世,主要物源供应集中于北部边缘,以 Houston delta 和 Holly Spring delta 为主,且砂质含量较高,主要供给物源为 Rio Grande 河流。对于 Wilcox 深水扇的形成机理认识存在多种观点和多种模式,具有代表性的是 Rosenfield 和 Pindall (2003) 的墨西哥湾孤立说(低位域模式)和 Exxon 公司 Sweet(2011) 的温室气体下大河稳定供给模式。

Rosenfield 认为在 55 Ma 时,古地层重建表明在该时期古巴和佛罗里达板块的碰撞导致佛罗里达海峡关闭,此时墨西哥湾成为孤立的盆地,大量水分蒸发导致水位急速下降^[9]。Roger Higgs 认为有 1~2 km 的下降。因此在低位域时在陆架区发育深切峡谷。Yoakum 和 Lavaca 峡谷发育于德州南部,Chicon-tepec 峡谷发育于墨西哥的中东部。峡谷深 1 km,延伸约 80 km (Galloway *et al.*, 1991)^[10]。Rosenfield 认为这种规模的峡谷发育只有在干旱时期才能发育,比如黑海和地中海。正是这些规模较大的深切谷把物源输送到陆坡和盆地,形成了延伸规模约 400 km 的 Wilcox 深水沉积。

很多学者包括 Galloway (2008) 都质疑孤立学说和海平面下降假说,认为即便佛罗里达海峡是关闭的,但北佛罗里达的 Suwanee 海峡在古新世时期是打开的,墨西哥湾并没有完全孤立^[11]。另外 Wilcox 井上钻遇的地层也不支持该观点,在井上没有揭示互层的蒸发盐或者薄层的蒸发盐岩。因为在地中海的中新统地层 (Ryan, 2009) 上发育非常典型的互层状蒸发盐岩^[12]。

ExxonMobil 公司的 Sweet 和 Blum 认为 Wilcox 沉积时期是在温室环境下发育的大河,并且在河口的韵律摆动并不频繁的情况下为深水盆地提供了稳定富砂沉积物源^[13],在 Wilcox 沉积末期中晚始新世到渐新世则进入冰室气候,河口强制发生高频的摆动,大部分沉积物都堆积在陆架区,深水盆地发育相对富泥沉积。

两种观点最大不同之处在于对 Wilcox 沉积规模和富砂特征形成原因解释不同,一种认为是海平面下降形成的下切谷输送物质到深海,一种认为是在海平面上升期间有大河稳定供应沉积物源而形成的大规模富砂深海盆地沉积。其实,深水沉积在低位域和高位域时都可形成。最关键的是有源源不断的河流输送物质到深水区。

2.2 盐岩活动对 Wilcox 深水沉积的影响

盐岩在墨西哥湾深水盆地的演化历史中扮演着非常重要的角色,它的物理性质决定了其易流动、变形的特点,因此它的形变过程和沉积地层之间是相互作用的。要讨论盐岩古地貌对 Wilcox 沉积的影响,一定要先研究盐岩沉积背景、盐岩的演化过程及其在演化过程中的构造形变。

墨西哥湾盆地经历了 3 个主要演化阶段。第一

阶段从晚三叠世到中侏罗世卡洛夫期为同裂谷阶段,南北美板块拉开导致发育北西南东向的地堑和半地堑,河流湖泊相的沉积地层填充其中;第二个阶段为漂移期,从中侏罗世至晚白垩世时期,在此阶段发育了厚层的 Louann 盐岩(从 Callovian 到 Early Oxfordian),晚侏罗世时期盆地发育了海相泥灰岩和碳酸盐岩的优质烃源岩;第三个阶段是从晚白垩世开始的热沉降阶段,也称为被动陆缘阶段,与典型的被动陆缘盆地不同的是,晚白垩世至新近纪,随着周缘造山运动,陆缘碎屑输入较多,沉积速率大于沉降速率,导致中侏罗世母盐多期活动,形成了独具特色的盐相关构造异常发育的富含油气的被动陆缘盆地。中侏罗世沉积的母盐经后期的改造,对沉积储层、烃源岩的成熟度、油气运移和聚集等都产生了极大的影响^[14]。

墨西哥湾深水盆地塑性盐岩受板块运动和沉积负载的影响也可划分为三个演化阶段。

第一阶段是在晚侏罗世,受南北美板块拉开影响,母盐随着板块演化洋壳扩张也发生了初始的流动和变形,盐岩向洋壳方向移动。Hudec 等研究认为在晚侏罗世,墨西哥湾盐盆一分为二,南部随于卡丹板块逆时针旋转到现今位置,此时大洋开始扩张,出现洋壳。盐岩在此过程中随着盆地的拉伸也向洋壳方

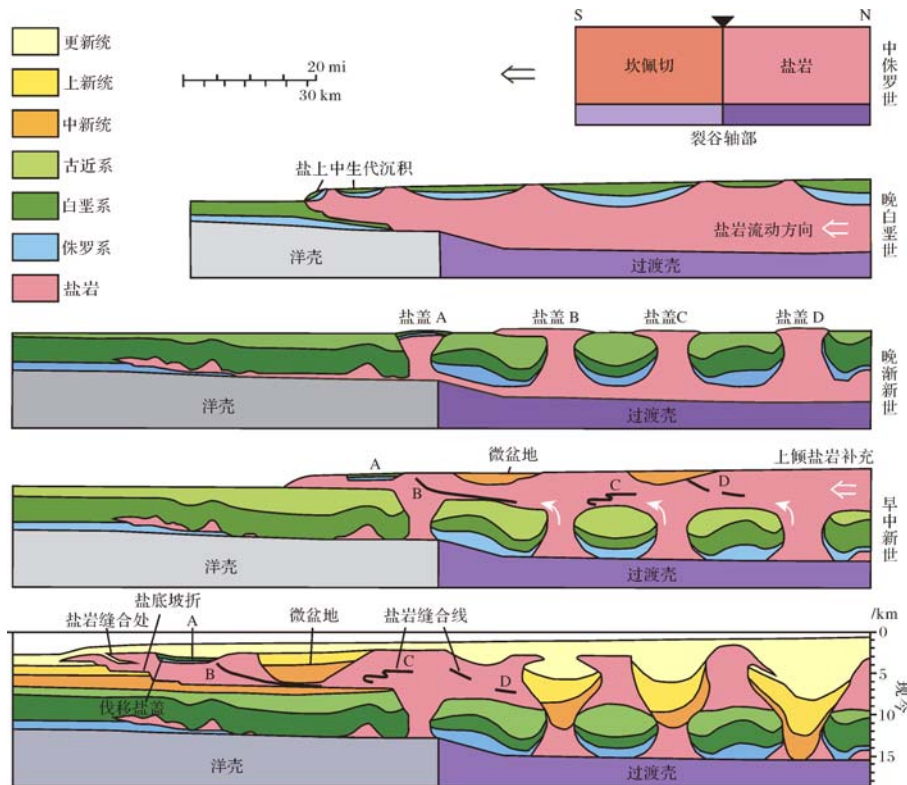


图 4 Louann 盐岩演化阶段图(据 Michael R. Hudec, AAPG Bulletin, 2013 有修改,剖面位置见图 6)

Fig.4 Louann salt revolution period(modified from Michael R. Hudec, 2013, Profile location on Fig.6)

向流动,甚至部分盐岩和地层越过过渡壳,超覆在洋壳之上^[15](图4)。在盐岩向洋壳流动的过程中,盆地中心部位的盐岩减薄,向盆地外围盐岩厚度增加,洋壳部位盐岩厚度最薄。在白垩纪时期处于构造的平静期,沉积了碳酸盐岩台地。

第二个阶段晚古新世—渐新世,盐岩发生初始塑性变形,形成盐岩微盆控制古新世—始新世的 Wilcox 沉积。随着北部拉米拉造山运动,为墨西哥湾提供了大量的陆缘碎屑输入。盐岩在沉积负载作用下开始再次活动,形成盐株、盐枕、小型盐舌等多种盐构造,在盆地中部发育多个盐岩微盆。在洋壳区由于盐岩厚度薄,盐构造变形较弱,多发育盐枕和盐脊构造等^[16]。

第三个阶段中新世—现今,由于沉积速度大于沉降速度,造成陆架地区沉积物变厚,年轻的第三纪沉积物不断向海推进,导致深水区发育大量盐岩刺穿。同时,由于陆架抬升和陆坡上倾部分沉积载荷的压力,引起盐体向海方向发生横向流动,并超覆年轻的深海沉积之上。这时期发育大量的盐蓬构造,甚至多个盐蓬缝合,形成新的盐蓬,在盐蓬之上开始发育中新世—更新世微型盆地^[17],目前浅层的部分盐岩仍在活动,现今的海底地形可以反映盐岩形成的各种微型盆地。

墨西哥湾现今微盆地多分布在陆坡区域,其大小从直径几公里到十几公里,深度几十米到几百米^[18]。这些微盆地常常被陆坡水道切割并相互连接,这就形成了由微盆地连接而成的串珠状水道。这种微型盆地构造在古近纪也存在,其大小规模和现代盐岩运动造成的微盆地相似。古新世至始新世沉积时,在古陆坡区也发育类似于现今陆坡的微盆地,因此在 Wilcox 沉积时期的古陆坡环境下也会存在类似现今的这种盐岩微盆地连接而成的串珠状水道。

盐岩微盆地的形成是盐岩和沉积物之间相互作用的结果,体现在盐岩撤出和沉积物在微盆地的堆积,微盆地继续接受沉积,并加速盐岩的流动。在盐岩撤出的初期盐丘顶部开始出现浅的低洼地带,沉积物优先沉积于此,随着盐岩撤出的继续进行盐丘顶部的洼地会变的越来越深,这会导致更多的沉积物沉积,而沉积物堆积形成的重力负载又会进一步促进盐岩的撤出,最终就会形成沉积厚度明显大于周边地区的微盆地 (Minibasin)。除了对沉积厚度的控制以外,微盆地在水道搬运沉积物的过程中还起到了沉淀池的作用。陆坡上的微盆地通常被陆坡水道切割而

相互连接,从而形成了通往深海盆地由微盆地连接而成的串珠状水道。正是由于这种特殊的水道,沉积物在搬运的过程中优先沉积于微盆地中,尤其是粒径较大的沉积物会优先沉积,这就造成了粗碎屑沉积物优先沉积于陆坡的微盆地内,而下陆坡微盆地和深海盆地的沉积物则以泥质沉积和极细粒沉积物为主。

对比研究陆架区和深水区 Wilcox 的砂岩成分认为,从陆向海逐渐由石英砂岩向长石和岩屑砂岩过渡,石英含量逐渐降低。分析形成这种结果的主要因素是和盐岩活动形成的微盆地有关,当携带沉积物的流体进入微盆地 (Minibasin) 时,由于冲刷作用增加了来自 Minibasin 边缘的滑塌沉积和浊流沉积,这也使得通过水道搬运至深海盆地的沉积物成分发生了明显的变化。原沉积物中的石英含量相对降低,而粒度较小的陆坡沉积物 (岩屑等) 颗粒成分增加。Wilcox 组砂岩在陆架区多为石英砂岩,而同时期经过陆坡水道搬运至深海盆地的砂岩则是以岩屑砂岩和长石质岩屑砂岩为主,而且粒径也明显变细,由中砂岩变为细粒到极细砂岩—粉砂岩。

基于以上对 Wilcox 沉积物源的分析、盐岩微盆对沉积的控制及沉积负载和盐岩的相互作用等研究,建立了 Wilcox 深水沉积的模式图 (图5)。稳定的大河长期供应沉积物质,在陆架区发育三角洲沉积,被动陆架边缘盆地存在具有滑脱性质的塑变层 Louann 盐岩,在重力滑脱和重力扩张的共同作用下,发育盐岩微盆地,水道在微盆地中发育,形成串珠状水道,或称为受限水道。在盆地区开阔区发育富砂盆地扇沉积。

3 Wilcox 组有利储层分布

Wilcox 在深水区的沉积厚度在 500 m 左右,富含砂岩,砂地比在 40%~70%。目前钻遇 Wilcox 地层的大部分井位于现今的超深水区,古沉积环境也为深水区的下陆坡到盆地部位。岩芯观察认为是极细粒到细粒长石质岩屑砂岩和岩屑砂岩,岩屑成分以变质岩和沉积岩为主。Wilcox 在深水区又可划分为上下段,中间被 10~20 m 深海泥岩隔开。下 Wilcox 分选较好,相对上 Wilcox 粒度较粗,表明是水道轴部的沉积。上 Wilcox 为细粒到极细粒砂岩,分选中到差。Wilcox 组虽为富砂沉积,但砂岩单层厚度薄,单层最大厚度在 8~31 m 之间。平均孔隙度和渗透率表明 Wilcox 砂岩主要为中孔低渗型储层。目前在超深水的 Wilcox 钻井没有因为储层原因导致失利的。

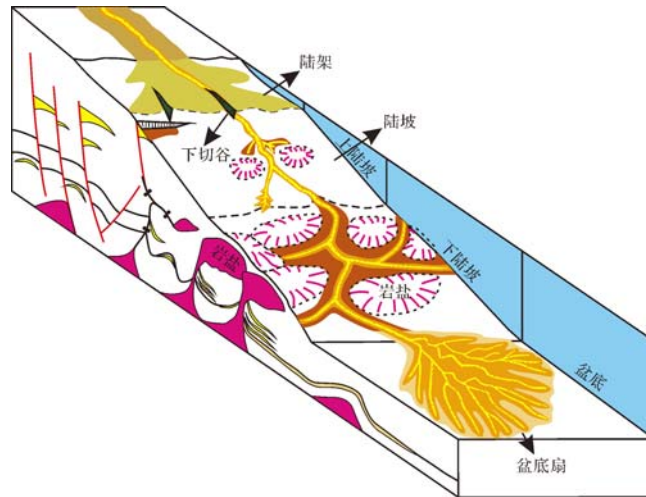


图 5 墨西哥湾古新统一始新统 Wilcox 深水沉积模式

Fig.5 Paleocene to Eocene-age Wilcox deepwater depositional model in GOM

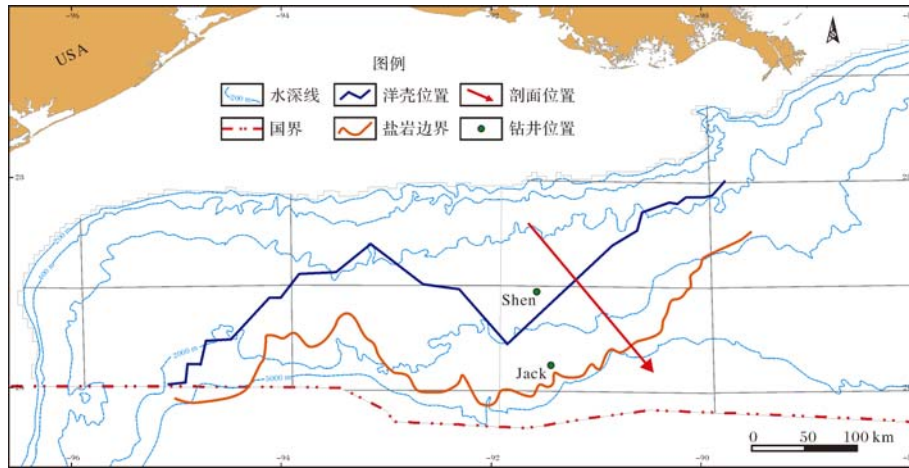


图 6 Wilcox 沉积依洋壳位置划分两个相带

Fig.6 Two sedimentary distributions of Wilcox was divided by oceanic boundary

结合前面分析的侏罗系 Louann 盐岩的演化对 Wilcox 组沉积的影响, Wilcox 平面的沉积可以依据洋壳位置划分两个相带(图 6), 洋壳以内的为内带, 主要沉积下陆坡的受限水道, 储层物性较好。内带 Wilcox 的钻井较少, Shen 井是其中代表, 砂岩平均孔隙度可以达到 25% 左右。洋壳向盆的方向划分为外带, 主要为富砂的盆地扇沉积, 储层物性相对内带稍差。外带钻井的平均孔隙度在 19% 左右。

Jack 油田发现井于 2004 年钻探, 揭示 Wilcox 含油层, 顶部埋深 7 500 m, 去掉 2 100 m 水深后, 埋深为 5 400 m。Jack2 井于 2005 年钻探, 2006 年测试, 射开 40% 的上 Wilcox 储层, 获得稳定的产能 6 000 桶/天。相邻油田 ST Malo 也于 2013 年在 Wilcox 储

层测试获得 13 000 桶/日产^[19]。

Wilcox 储层埋深虽大, 但有巨厚的盐岩覆盖, 在外带区上覆盐蓬厚度在 2 100~6 000 m 不等, 厚层的盐岩有利于改善盐下储层的物性, 尤其是可以改善盐下储层的孔隙度^[20], 其原因在于: ①盐岩密度稳定, 一般保持在 2.15~2.20 g/cm³ 之间, 这一稳定物理性质使盐下地层经受的压力相对较小, 压实程度也低, 砂岩中的大孔隙得以保留。②盐岩热导率高, 隔热性差, 盐下地层热量容易散失, 其成岩演化作用的速度明显降低, 因而使砂岩中的高孔隙率得以保持。③异常高压形成大量裂缝。墨西哥湾盆地中大部分钻井揭示目的层发育异常高压。因此厚层的盐蓬发育延缓了 Wilcox 储层的成岩作用, 稳定的且低于碎屑岩

的密度使得压实作用也比正常地层低,因此 Wilcox 在埋深大的情况下也具有较好的孔隙度条件。

4 主要认识和结论

(1) 通过地震和钻井资料综合分析, Wilcox 组为深水扇沉积,其亚相可划分为内扇、中扇和外扇。内扇也称近端复合水道化扇,微相主要为复合水道和河道、进积朵页体和深海泥。中扇也称块状河道复合体,微相包括水道、席状砂、深海泥。外扇微相见席状砂、边缘朵页体和深海泥;

(2) Wilcox 沉积受控于长距离稳定物源和盐岩形成的古地貌影响, Louann 母盐演化形成的微盆地控制 Wilcox 在陆坡区和盆地区的沉积相分布;

(3) 建立 Wilcox 深水沉积模式,下陆坡区为受限水道沉积,在盆地区为盆地扇沉积,相对应的平面上依据洋壳位置划分为两个相带,内带储层物性相对较好;

(4) 后期厚层盐蓬的发育有利于 Wilcox 储层孔隙度的保存。

致谢 在论文撰写过程中受到了于水、康洪全和韩文明等专家的亲切指导,在此一并感谢。

参考文献 (References)

- McDonnell Angela, Robert G. Loucks, William E. Galloway. Paleocene to Eocene deep-water slope canyons, western Gulf of Mexico: Further insights for the provenance of deep-water offshore Wilcox Group plays [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(9): 1169-1189
- 于水,程涛,陈莹. 尼日尔三角洲盆地深水沉积体系特征[J]. 地球科学, 2012, 37(4): 763-770 [Yu Shui, Cheng Tao, Chen Ying. Depositional characteristics of deepwater system in the Niger delta Basin [J]. Earth Science, 2012, 37(4): 763-770]
- 刘深艳,胡孝林,李进波. 巴西桑托斯盆地盐下大发现及其勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2011(4): 74-81 [Liu Shenyan, Hu Xiaolin, Li Jinbo. Great discovery and its significance for exploration in subsalt reservoir in Santos Basin, Brazil [J]. China Petroleum Exploration, 2011(4): 74-81]
- 范玉海,屈红军,张功成,等. 世界主要深水含油气盆地储层特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(5): 135-144 [Fan Yuhai, Qu Hongjun, Zhang Gongcheng, et al. Reservoir in the major oil-gas bearing deepwater basins of the world and their characteristics [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(5): 135-144]
- David B. R., Larry Z., David M. The Lower Tertiary Wilcox Trend in the Deepwater Gulf of Mexico [C]. AAPG Annual Convention, Long Beach, California, April 1-4, 2007
- Richards M., Bowman M., Reading H. Submarine-fan systems I: characterization and stratigraphic prediction [J]. Marine and Petroleum Geology, 1998, 15: 689-717
- Carvajal C R., Steel R J. Shelf-edge architecture and bypass of sand to deep water: Influence of shelf-edge processes, sea level, and sediment supply [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 62: 652-672
- Galloway W E., Ganey-Curry P E., Li X, et al. Cenozoic depositional history of the Gulf of Mexico basin [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(11): 1743-1774
- Rosenfield J., Pindall J. Early Paleogene isolation of the Gulf of Mexico from the World's Ocean implications for hydrocarbon exploration and eustacy [C]// Batolini C., Buffler R T., Blickwede J. The circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics. Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists Memoir 79, 2003: 89-103
- Galloway W E., Dingus W F., Paige R E. Seismic and depositional facies of the Paleocene-Eocene Wilcox Group submarine canyon fills, northwest Gulf Coast, USA [C]// Weimer P., Link M. H. Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems. New York: Springer-Verlag, 1991: 247-271
- Galloway W E. Depositional Evolution of the Gulf of Mexico Sedimentary Basin [M]// Hsu K J. The Sedimentary Basins of the United States and Canada, Sedimentary Basins of the World. Netherlands: Elsevier, 2008: 505-549
- Ryan W B F. Decoding the Mediterranean salinity crisis [J]. Sedimentology, 2009, 56(1): 95-136
- Sweet M L., Blum M D. Paleocene-Eocene Wilcox submarine canyons and thick deepwater sands of the Gulf of Mexico: very large systems in a greenhouse world, not a messinian-like crisis [J]. Gulf Coast Association of Geological Societies, 2011, 61: 443-450
- Jackson M P A., Roberts D G. Salt Tectonics: [C]// Jackson M P A., Roberts D G., Snelson S. Salt Tectonics: a global perspective. AAPG Memoir 65, 1995, 1-2
- Hudec M R., Martin P A J., Frank J P. Influence of deep Louann structure on the evolution of the northern Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(10): 1711-1735
- Hudec M R., Martin P A J., Daniel D Schultz-Ela. The paradox of minibasin subsidence into salt: clues to the evolution of crustal basins [J]. Geological Society of America Bulletin, 2009(121): 201-221
- Rowan M G. Structural styles and evolution of allochthonous salt, central Louisiana outer shelf and upper slope [C]// Jackson M P A., Roberts D G., Snelson S. Salt Tectonics: a global perspective. AAPG Memoir 65, 1995, 199-228
- Withjack M O., Galloway S. Active normal faulting beneath a salt layer: An experimental study of deformation patterns in the cover sequence [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(5): 627-651
- Paula D. Gulf of Mexico E&P to surge in 2013 [J/OL]. Houston: 2012 [2012-10-03]. <http://www.ogj.com/articles/2012/10/woodmac-deepwater-gulf-of-mexico-ep-to-surge-in-2013.html>.
- 张朝军,田在艺. 塔里木盆地库车坳陷第三系盐构造与油气 [J]. 石油学报, 1998, 19(1): 6-10 [Zhang Chaojun, Tian Zaiyi. Tertiary salt structure and hydrocarbon in Kuche depression of Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(1): 6-10]

Study on Depositional Characteristics and Model of Wilcox in the Deep Waters of Northern Gulf of Mexico

LU Jing-mei^{1,2} ZHANG Jin-chuan¹ YAN Jie² WANG Dan² ZHANG Liang²

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2. Overseas Assessment Center of CNOOC Research Institute, Beijing 100028)

Abstract: Paleocene to Eocene-age Wilcox Group which is deeply buried and distributed extensively is the significant oil-bearing reservoir in the deep waters of the northern Gulf of Mexico Basin. The different recognition of Wilcox sedimentary facies existed. In this article, by means of observing cores, analyzing sections and well logging data, we studied on the sedimentary environment and characteristics of the Wilcox group. The result shows that Wilcox group in the deep waters of the northern Gulf of Mexico pertained to deepwater basin-floor fan deposits. The sandstone is very fine to fine-grained arkostic and lithic sandstones. And, we analyzed the provenance of Wilcox and discussed the effect of salt related mini-basin controlling the deposition in deepwater setting. Based on this study, we propose a model for Wilcox deposition, in which the lower slope is defined as channel and there is deepwater fan in basin floor.

Key words: Gulf of Mexico Basin; Wilcox Group; sedimentary facies; basin-floor fan; salt related Mini-basin