

文章编号:1672-9854(2007)-04-0051-10

中国海相油气田勘探实例之十

塔里木盆地哈得逊海相砂岩油田的勘探与发现

周新源,杨海军,蔡振忠,赵福元,胡剑风

(中国石油塔里木油田分公司)



周新源

摘要 哈得逊油田位于满加尔凹陷哈得逊构造带的一个鼻状隆起上,是塔里木盆地发现的首个亿吨级海相砂岩油田。它发现于1998年2月,于2000年8月投入生产,2004年底累计探明石油地质储量 $8\,202 \times 10^4 \text{ t}$,2005年实现控制石油地质储量 $2\,820 \times 10^4 \text{ t}$,2006年原油年产量达到 $202 \times 10^4 \text{ t}$ 。油田由石炭系海相东河砂岩段油藏与中泥岩段2个薄砂层油藏组成,埋深超过5 000 m。主力油藏东河砂岩油藏是一个具有统一温度压力系统和倾斜油水界面的地层-构造复合型油藏,勘探开发难度大。论述了油田的发现、勘探开发历程及油藏的基本地质特征,总结了对超深层、低丰度大油田采用勘探开发一体化模式,边滚动勘探开发边科研攻关,使油田储量和产能规模不断上升的实践和认识。

关键词 塔里木盆地;哈得逊油田;早石炭世;海相地层;砂岩油气藏;油藏特征;油气勘探史;勘探启示

中图分类号:TE122.14 **文献标识码**:A

周新源 1963年生,教授级高级工程师。现任中国石油塔里木油田分公司总经理。1983年毕业于西南石油学院石油地质专业,2005年获石油大学(北京)博士学位。长期从事塔里木盆地油气勘探、研究与生产管理。通讯地址:841000 新疆库尔勒塔里木油田分公司

哈得逊油田是塔里木油田分公司迄今为止发现和投入开发规模最大的整装海相砂岩油田。它的发现是中国海相油气勘探理论和实践的一次突破。哈得逊油田的发现,以及由此形成的理论体系和配套勘探开发技术系列,对塔里木盆地克拉通区海相砂岩岩性地层油气藏的勘探具有重大意义^{[1]①}。

1 油田概况

哈得逊油田位于新疆维吾尔自治区沙雅县境内的塔里木河南岸洪泛平原上,其区域构造隶属于塔里木盆地北部拗陷满加尔凹陷北部的哈

得逊构造带(图1)。油田现已探明石炭系下统卡拉沙依组中泥岩段二、三、四号砂层(分别简称 C^{5-2} 、 C^{5-3} 、 C^{5-4})和巴楚组东河砂岩段(简称 C^9)四个油藏,主要产层为石炭系底部东河砂岩段。油藏具有超深(埋深超过5 000 m)、构造幅度低(小于34 m)、储层厚度薄且变化大(0~29 m)、含油面积大(叠合面积达200 km²左右)、油水界面倾斜(高差在90 m以上)、原油性质分区明显、储量丰度低(大部分含油范围内小于 $30 \times 10^4 \text{ t/km}^2$)的特征^{②③}。累计探明石油地质储量 $8\,202 \times 10^4 \text{ t}$,控制石油地质储量 $2\,820 \times 10^4 \text{ t}$ 。2006年油田年产原油达 $202 \times 10^4 \text{ t}$ 。油田的基本参数见表1^②。

收稿日期:2007-06-02;改回日期:2007-09-13

① 江同文,朱卫红,昌伦杰,等. 哈得逊亿吨级超深海相砂岩油田高效勘探开发技术. 塔里木油田分公司,2004.

② 赵福元,邸宏利,赵飞,等. 哈得4油田2003年新增探明储量报告. 塔里木油田分公司,2003.

③ 赵福元,张亚光,孙丽霞,等. 哈得4油田新增探明储量报告. 塔里木油田分公司,2001.

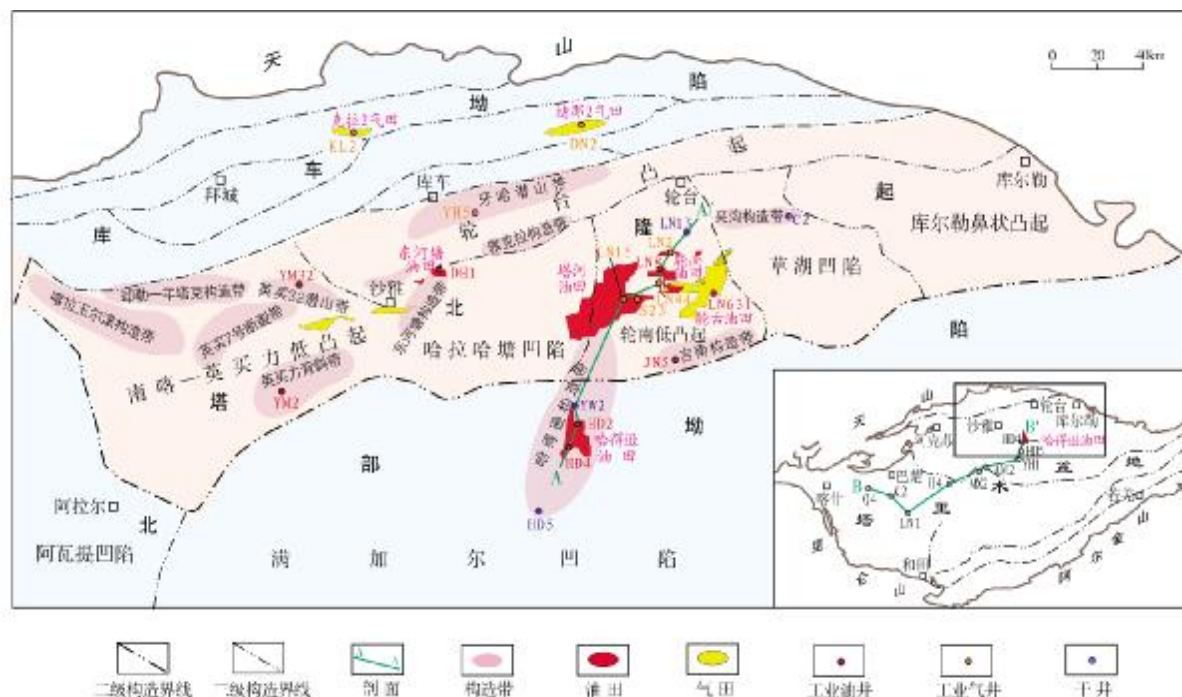


图1 塔里木盆地哈得逊油田地理及构造位置图

2 勘探开发历程

2.1 早期勘探阶段——发现油田

哈得逊构造带的地震勘探工作始于1986年。1990年和1993年相继在北部隆起东河塘构造和沙漠腹地塔中4构造发现海相砂岩油田,掀起了针对石炭系东河砂岩油藏勘探的热潮。勘探目的层石炭系在塔中—满加尔地区自下而上发育巴楚组、卡拉沙依组和小海子组,可划分9个岩性段(C^1-C^9),在满加尔凹陷北部缺失 C^7-C^8 段(表2)^②。1996年在 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ 地震测网的基础上,落实了哈得1、哈得2两个石炭系东河砂岩低幅度背斜构造圈闭。1998年2月21日,部署在哈得1构造圈闭上的HD1井在石炭系下统中泥岩段(C^5)中的薄砂层完井试油,用7.94 mm油嘴求产,获日产 103 m^3 的高产油流。HD1井虽然首次在满加尔凹陷获得了油气勘探突破,“意外地”发现了哈得逊油田薄砂层油藏,但设计勘探目的层——石炭系底部东河砂岩段(C^9)优质储层却在井下缺失了。随后在哈得1构造圈闭北高点部署的HD2井在中泥岩段薄砂层也试获工业油流,但也与HD1井一样缺失了东河砂岩

段。1998年10月上交HD1-2井区石炭系中泥岩段油藏控制储量 $1008 \times 10^4\text{ t}$,含油面积 61.5 km^2 。

HD1井和HD2井东河砂岩低幅度构造圈闭的勘探虽然相继失利了,但发现了哈得逊前石炭纪古鼻隆。结合塔里木盆地东河砂岩沉积与分布受前石炭纪古(鼻)隆起控制的特征,综合研究认为哈得逊前石炭纪古鼻隆的下倾方向很可能赋存有东河砂岩这套优质海相砂岩储集体,并发育东河砂岩地层超覆型圈闭。为此,1998年9月在海拔相对较低的哈得4号东河砂岩低幅度背斜构造圈闭南高点部署了HD4井,以继续探索东河砂岩油气藏。HD4井钻遇石炭系东河砂岩段24 m,并发现良好油气显示。1998年11月30日对石炭系东河砂岩段 $5069.64 \sim 5076.72\text{ m}$ 井段中途测试,用8 mm油嘴求产,获日产 266 m^3 的高产油流(图2),从而首次在满加尔凹陷发现东河砂岩优质油藏,极大地拓宽了塔里木盆地石炭系东河砂岩油气藏的勘探范围。

2.2 整体评价阶段——初步探明油田

HD4井东河砂岩获高产工业油流后,随即对该区勘探进行了整体部署。1999年初编制了油藏评价部署方案及滚动开发规划方案,本着整体部署、分步

表 1 哈得逊油田基本参数表

油气田名称		哈得逊油田
油气田位置		新疆维吾尔自治区沙雅县
区域构造位置		塔里木盆地北部坳陷满加尔凹陷哈得逊构造带
发现井(时间)		HD1 井(1998-02-21); HD4 井(1998-11-30)
发现井流量		HD1 井(卡拉沙依组 C ⁵ 段):油 103 m ³ /d; HD4 井(巴楚组 C ⁹ 段):油 266 m ³ /d
首次产油时间		2000-08-31
探明地质储量(年份)		石油 8 202 × 10 ⁴ t (2004)
储量丰度		(14 ~ 50) × 10 ⁴ t/km ²
可采储量(年份)		1935.74 × 10 ⁴ t (2004)
发现依据		哈得逊地区存在石炭系东河砂岩低幅度背斜圈闭,HD1 井和 HD4 井钻探发现石炭系海相砂岩油藏,在勘探开发一体化思路的指导下,通过高精度三维地震勘探、滚动评价勘探,发现并探明油田
油藏特征	圈闭类型	地层—构造复合型圈闭、岩性圈闭
	圈闭形成时间	加里东晚期—喜马拉雅期
	圈闭面积	91.5 km ² (巴楚组 C ⁹ 段顶面)
	含油面积(年份)	C ⁹ 段:136.2km ² (2004); C ⁵ 段:117.2km ² (2004)
	圈闭高度	6 ~ 22 m
	油藏埋深	5 000 ~ 5 100 m
	油藏厚度	C ⁹ 段:0 ~ 30 m; C ⁵ 段:0.5 ~ 2 m
	油气来源	寒武系—奥陶系
	原油性质	密度: 0.8672 ~ 0.937 3 g/cm ³ ; 黏度: 8.997 ~ 61.15 mPa·s; 凝固点: -4 ~ -30 ℃; 含硫量: 0.55% ~ 1.73%
	地层压力	52.03 ~ 63.19 MPa
	压力系数	1.11
	盖层	下白垩统卡拉沙依组中泥岩段(C ⁵); 巴楚组角砾岩段(C ⁶)
	层位	下白垩统卡拉沙依组中泥岩段 C ⁵ 段; 巴楚组东河砂岩段(C ⁹)
储集层	主要岩性	C ⁹ 段:石英细砂岩; C ⁵ 段:长石细砂岩
	沉积环境	潮坪相,滨岸相
	总厚度	7 ~ 40 m
	有效厚度	C ⁹ 段:0 ~ 30 m; C ⁵ 段:0.5 ~ 2 m
	孔隙类型	粒间孔隙、粒间溶蚀孔隙
	孔隙度	12.5% ~ 20.4%
	渗透率	(25.1 ~ 222) × 10 ⁻³ μm ²
	含油饱和度	42% ~ 73.5%

表 2 满加尔凹陷石炭系岩性段划分及储盖关系

系	统	组	层号	岩性段		哈得逊油田 储盖关系
				满加尔南部	满加尔北部 (哈得逊油田)	
石炭系	上统	小海子组	C ¹	小海子灰岩段	小海子灰岩段	
				含灰岩段	含灰岩段	
	下统	卡拉沙依组	C ²	砂泥岩段	砂泥岩段	
			C ³	上泥岩段	上泥岩段	
			C ⁴	标准灰岩段	标准灰岩段	
			C ⁵	中泥岩段	中泥岩段	砂泥岩互层构成储/盖组合
		巴楚组	C ⁶	生物碎屑灰岩段	角砾岩段	盖层
			C ⁷	下泥岩段		
			C ⁸	(含砾砂岩段, 缺失)	(缺失)	
			C ⁹	东河砂岩段	东河砂岩段	优质储层 (局部地区内部夹层可作盖层)
志留系			S			

实施、跟踪研究、及时调整的原则,逐步钻探了 3 口评价井(HD401、HD 402 和 HD 403)和 2 口开发井(HD1-2 和 HD 4-2)(图 3)。通过评价勘探,2000 年 1 月上交探明石油地质储量 3 068.1 × 10⁴t,溶解气地质储量 7.94 × 10⁸m³。

2.3 勘探开发一体化阶段——成为亿吨级油田

针对哈得逊油田油藏埋深大、构造幅度低、油层薄、东河砂岩尖灭线准确落实难的特点,塔里木油田分公司决定实施勘探开发一体化模式,边滚动勘探边科研攻关,逐步加深认识,确保油田储量不断增加,产能规模不断扩大,变边际油田为高效油田。

在滚动勘探开发过程中,关键井的部署对不断扩大东河砂岩油藏的范围与规模具有重要意义。2000 年底部署的 HD1-9 井,原来预计东河砂岩油层的厚度为 3 m,实钻油柱高度达 12.5 m(增加了 9.5 m),向东和向南扩大了东河砂岩油

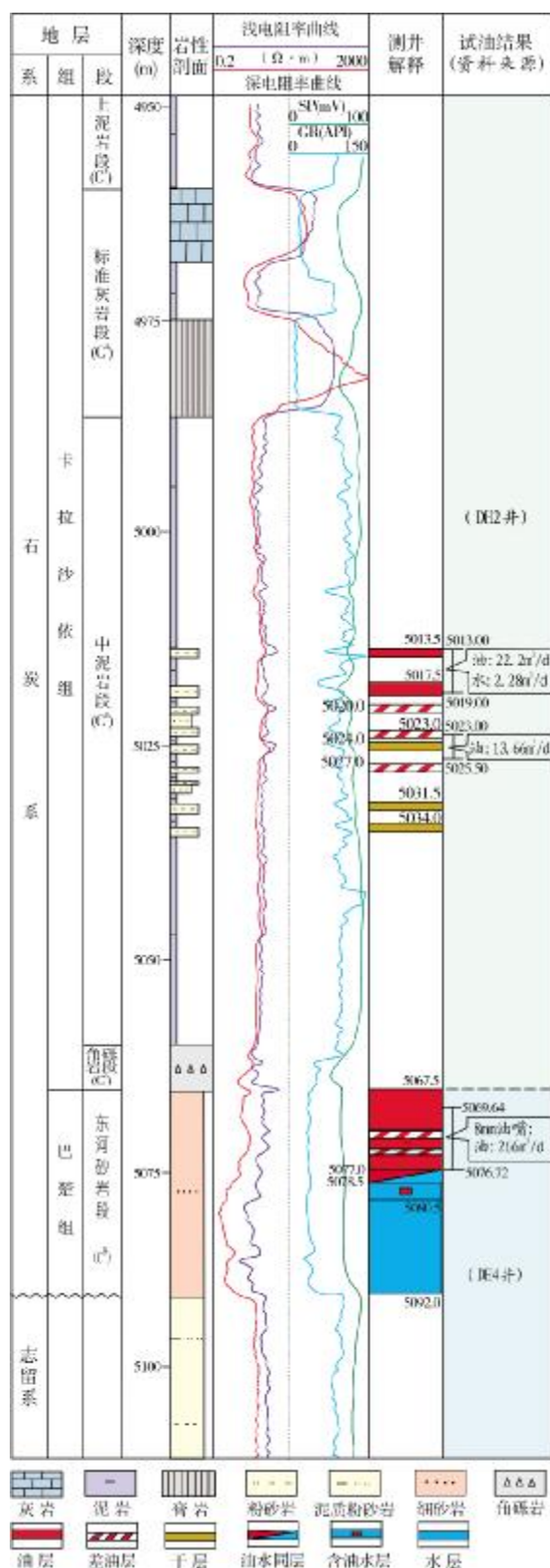


图2 哈得逊油田综合柱状图

藏的含油范围(图3)。2001年底全油田探明储量达 $4130 \times 10^4 \text{ t}$ 。

在进一步深化认识哈得逊油田油藏地质特征的前提下,2001年5月编制完成了全油田 $80 \times 10^4 \text{ t}$ 产能扩建开发方案,整体部署45口井,先实施薄砂层方案井,滚动评价东河砂岩油藏。在实施过程中,不仅发现了东河砂岩油藏的连片分布,而且发现东河砂岩尖灭线往北偏移,在东河砂岩油藏与东河砂岩尖灭线之间存在一物性致密带(图3),至2002年底全油田累计探明石油储量达 $4869 \times 10^4 \text{ t}$,实际产能达 $85 \times 10^4 \text{ t}$,当年生产原油 $81.6 \times 10^4 \text{ t}$ 。

2002年底,哈得逊油田北部的HD11井在哈得11石炭系东河砂岩地层圈闭中钻遇东河砂岩段(C⁹)并获低产油流。为了证明HD11井与哈得逊油田的关系,2003年初部署了评价井HD111井,该井在东河砂岩段钻遇油层3.7m。同时在 $80 \times 10^4 \text{ t}$ 产能扩建开发方案实施过程中,发现东河砂岩油藏的油水界面逐渐向西北倾斜。因此,如何合理解释该倾斜油水界面的形成机理并以此准确预测东河砂岩油藏的原油分布规律和含油范围,成为哈得逊油田高效滚动开发和储量规模不断增大的关键。研究人员从油藏特征、古构造演化、成藏地球化学和数值模拟等方面入手,深入分析了哈得逊油田东河砂岩油藏的油气充注成藏过程,创造性地提出了“后油藏”概念和“非稳态动态成藏”理论。该理论合理地解释了东河砂岩油藏油水界面倾斜的形成机理,预测了哈得逊油田东河砂岩油藏具有继续向西北扩大的趋势,及时指导了东河砂岩油藏的滚动勘探开发部署。尤其是HD4-30、HD4-44、HD4-46、HD112、HD113、HD404、HD17、HD171等井的成功钻探,使哈得逊油田东河砂岩油藏的含油面积和油藏规模继续扩大(图3)。截止2004年底,哈得逊油田探明+控制石油地质储量达 $11022 \times 10^4 \text{ t}$,其中探明储量 $8202 \times 10^4 \text{ t}$,控制储量 $2820 \times 10^4 \text{ t}$,成为国内首个超亿吨级海相砂岩油田。2006年油田年产油达 $202 \times 10^4 \text{ t}$,成为塔里木油田分公司最大的原油生产基地。

3 油田地质特征

3.1 良好的成藏条件

哈得逊油田位于满加尔凹陷北部的哈得逊构造

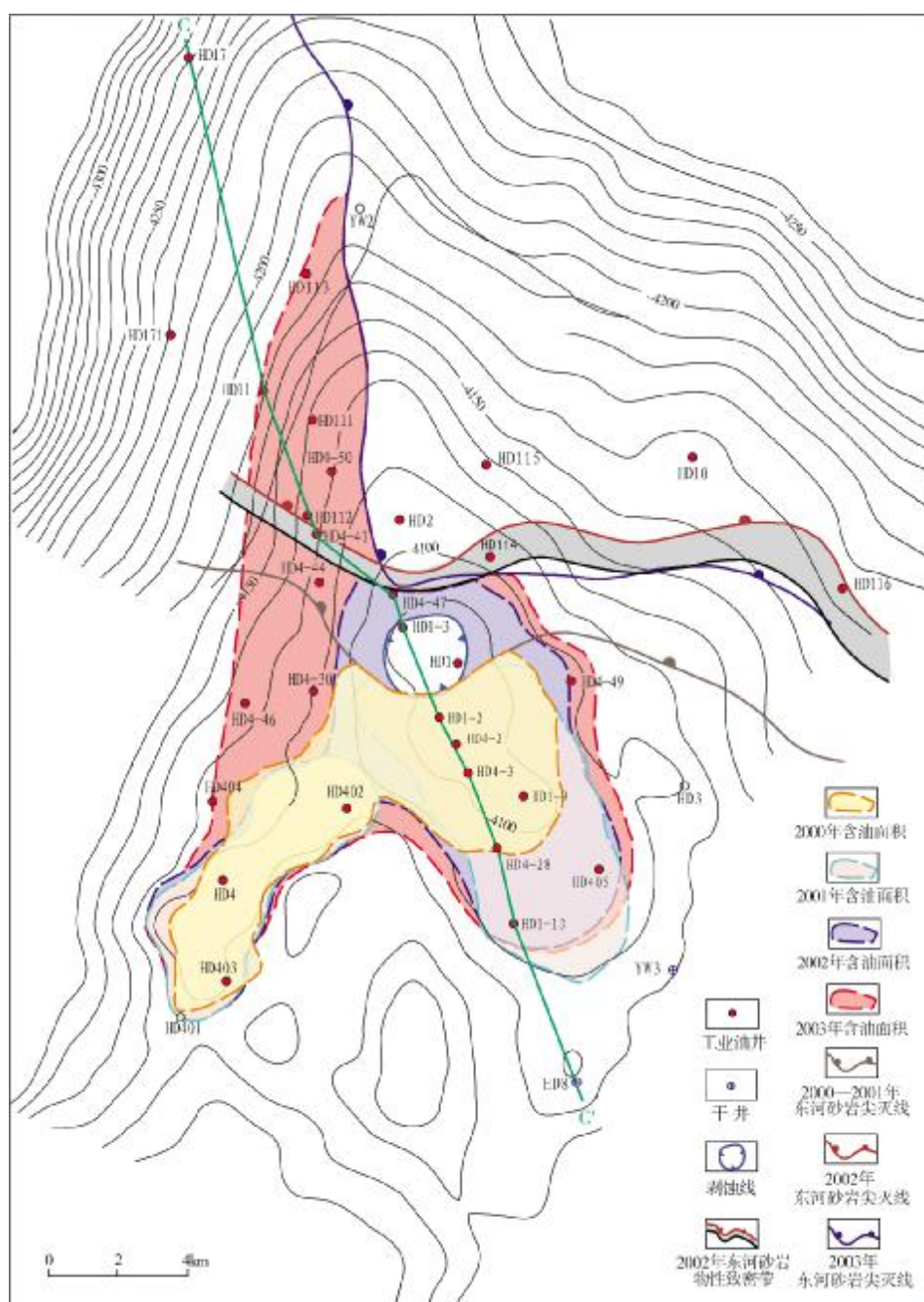


图3 哈得逊油田石炭系东河砂岩油藏含油面积图

造带上, 该构造带北侧与塔北隆起的轮南低凸起相接, 隶属轮南低凸起向南延伸的鼻状构造带, 属于典型的凹中隆^[2]。纵向上, 由下古生界、上古生界、中—新生界三大构造层所组成, 发育有 O/S、S/C、P/T 等地层不整合面。下古生界构造层呈南低北高、南厚北薄特征,

自南向北志留系—奥陶系逐层削蚀尖灭; 上古生界构造层缺失泥盆系, 石炭系直接超覆于志留系之上, 受晚喜马拉雅期以来构造反转的影响, 总体表现为南高北低、南厚北薄的特征; 中—新生界构造层呈南薄北厚、南高北低的特征 (图 4)。

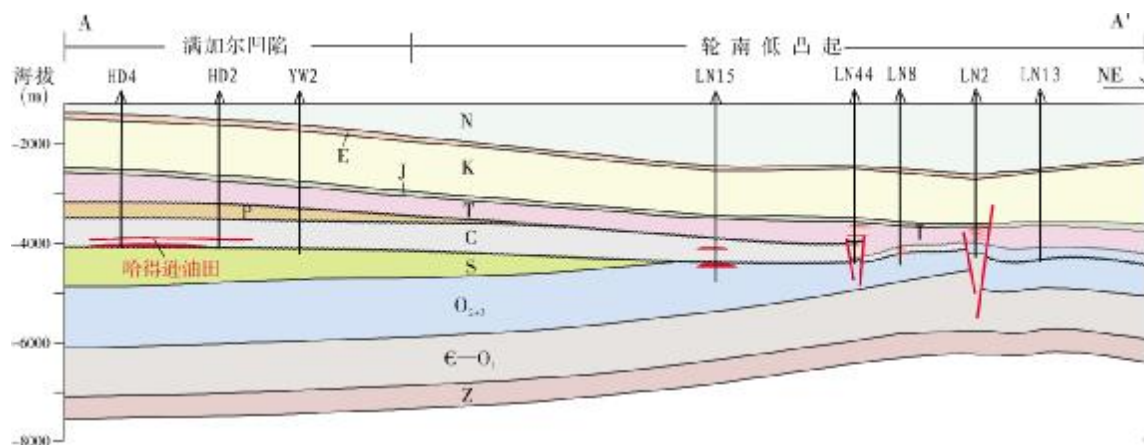


图4 满加尔凹陷哈得逊油田—轮南低凸起轮南油田南北向地质剖面

A—A' 剖面位置见图1

满加尔凹陷哈得逊油田的原油,与轮南低凸起上的轮古油田和塔河油田的原油具有同源性质,均来自于满加尔凹陷寒武系—奥陶系的海相烃源岩^[3]。

油田内发育两套优质储盖组合,一是石炭系中泥岩段(C^5)内部连续型砂岩泥岩互层储盖组合;二是石炭系中泥岩段—东河砂岩段储盖组合,储层为东河砂岩段(C^9),盖层是角砾岩段(C^6)及中泥岩段的巨厚泥岩层(C^5 下部)(图2,表2)。

晚喜马拉雅期以来构造反转作用,使得上古生界构造层呈南高北低的格局,为轮南低凸起及周缘的油气藏向北运移调整提供了条件^[4],地层不整合面和大面积分布的海相砂岩成为油气调整运移的良好输导层(图4)。

3.2 典型的地层—构造复合型圈闭

哈得逊构造带是在早古生代晚期—晚古生代早期古隆起背景上形成的石炭系低幅度背斜构造带,呈北东—南西向展布。在漫长的地质历史中,经历了多次大的以翘倾作用为主的构造变动(图5),区内以斜坡为主,断裂和二级构造带不发育。

哈得逊油田石炭系东河砂岩油藏为一大型的地层—构造复合型油藏。在东河砂岩段顶面构造图(图5b)上,YW2—HD2—HD1井一线发育一个南北向鼻梁,从总体上看,哈得逊东河砂岩油藏的圈闭类型为由东河砂岩顶面构造等高线与东河砂岩尖灭线共同组成的地层—构造复合型圈闭。油藏东南面受构造控制,东北面受地层控制,西北面可能

还受岩性控制。

中泥岩段构造为古鼻隆上的继承性披覆构造。



图5 哈得逊油田区域构造古今位置图

(a) 在前石炭纪油田位于向南倾没的古鼻隆南部;
(b) 油田现今位于石炭系向北倾没的今鼻隆北部
古、今构造呈“翘翘板”式升降,哈得逊油田正位于枢纽部位

3.3 优质的海相砂岩储层

石炭系发育两套优质海相砂岩储层。

主力产层是东河砂岩段，它是晚泥盆世晚期至早石炭世早期在西低东高的古地貌背景上沉积的海侵体系的底砂岩或底砂砾岩段，在全盆地范围内它是一个穿时的岩石地层单元，亦是一套异时同相沉积的砂体（图6）。储层下部属于临滨带的中下临

滨沉积，中上部属于前滨—中上临滨沉积。岩性以细粒石英砂岩为主；储集岩孔隙类型以粒间溶孔为主；储层以中等孔隙度、中—高渗透率为主。孔隙度分布在12.5%~20%之间，平均13.8%；渗透率分布为 $(50 \sim 1000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均 $222 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。平面上，东河砂岩储层在尖灭线附近物性相对较差，远离尖灭线地区，储层物性明显变好，总体上具有南部物性好、北部物性相对稍差的特征。

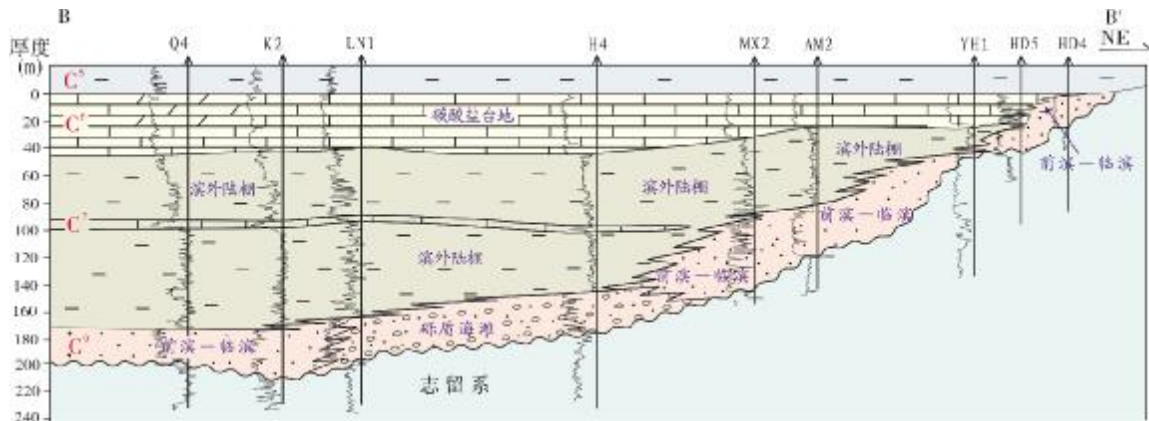


图6 塔里木盆地巴楚凸起—满加尔凹陷石炭系东河砂岩连井沉积相图

B—B'剖面位置见图1。C⁵—C⁰层号见表2

另一套储层是中泥岩段内部夹的薄砂岩层，该套储层为潮坪相的潮间带亚相沉积，因潮水浸过后能量迅速衰减，形成了厚度薄、面积大的席状砂^[5-6]。岩性以细粒长石砂岩为主；储集岩孔隙类型以受溶蚀作用改造的原生孔为主；储层物性以中孔、中渗为主，总体具由南而北物性变差的趋势：南部的HD1—2井孔隙度在13.70%~19.28%之间，平均15.78%；渗透率为 $(25 \sim 429) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均 $131 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。向北距HD1—2井1.7 km的HD1井孔隙度为5.26%~20.4%，平均12.50%，渗透率为 $(0.068 \sim 449) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均 $77.92 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，为一套中—高孔渗性储集层。

3.4 油藏具倾斜的油水界面

哈得逊石炭系油藏由薄砂层油藏和东河砂岩油藏组成，其中薄砂层油藏为由四个砂体组成的薄层边水层状油藏。

东河砂岩段上部的致密砂岩隔层将东河砂岩油藏分为上部边水层状油藏和下部底水块状油藏两个油藏（图7），主要受现今东河砂岩地层—构造复

合型圈闭控制，油水界面与构造等高线不一致，自东南向西北逐渐降低，最大高差达178.33 m。

受东河砂岩段储集性能的非均质性影响，在晚喜马拉雅期以来构造反转引起的石油向南部构造高部位调整过程中，东河砂岩段顶部因储层物性差，原油再运移速度缓慢，而且存在一个致密钙质砂岩底板，在北部HD17—HD11井区还形成一个残余油分布区。

东河砂岩油藏原油具有中高密度（0.8718~0.9373 g/cm³，平均0.898 g/cm³）、中高黏度（8.972~61.5 MPa·s，一般10~20 MPa·s）、低凝固点（-4~-30℃）、低含硫（0.55%~1.73%）、低含蜡（1.64%~12.97%）、高含胶质及沥青质（10.56%~20.62%）的特征，且原油密度西北高东南低，自西北向东南，原油密度由0.935 g/cm³逐渐下降至0.870 g/cm³。

东河砂岩油藏天然气相对密度较大（1.02~1.23），甲烷含量较低（15.46%~34.32%），氮气含量高（一般30%~40%），为典型的湿气。

地层水为CaCl₂型，平均密度1.1584 g/cm³，氯根含量平均156 000 mg/L，总矿化度平均为257 000 mg/L。

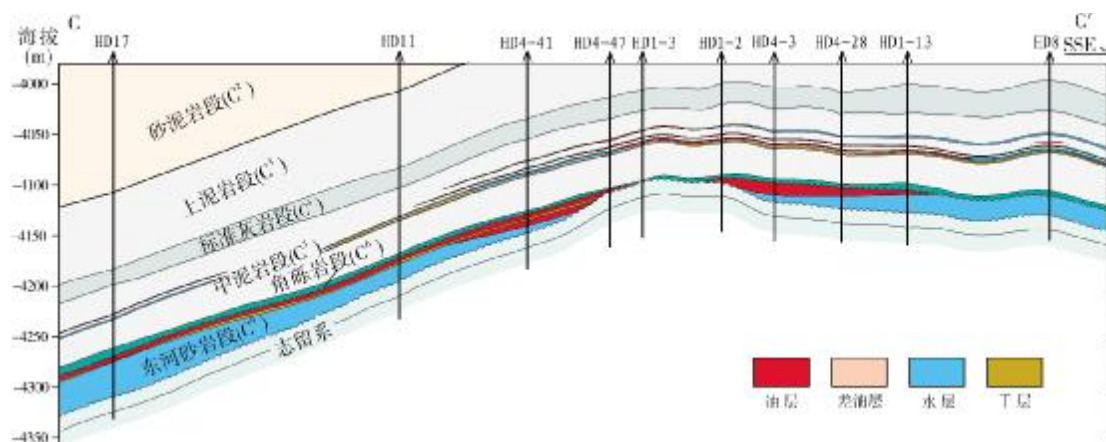


图7 哈得逊油田 HD17—HD1-13—HD8 井石炭系油藏剖面图

C—C' 剖面位置见图1

4 勘探认识与启示

4.1 锲而不舍，坚持不懈——勘探成功的关键

自1990年发现国内第一个海相砂岩油田——东河塘油田后，为了加快追索东河砂岩高产油层，1991—1992年在塔北隆起实施了一场以石炭系东河砂岩段为勘探目的层的区域勘探仗。西至塔北隆起英买力低凸起英买2号背斜，向东到哈拉哈塘凹陷，再到轮南低凸起围斜部位、草湖凹陷周边，先后部署了25口探井，但仅在东河塘油田外围发现了3个小的含油构造（东河4、东河6、东河14），在吉拉克背斜北翼发现1个中型地层超覆气藏（轮南59），其余21口探井全部失利^[7]。

塔北隆起石炭系东河砂岩油藏的追索虽然成效不大，未能达到预期目标，但在这一轮大范围追索继续向塔中隆起延伸后，在沙漠腹地首次发现了塔中4石炭系东河砂岩高产油田。塔中4油田的发现，表明石炭系东河砂岩优质储层有广阔的勘探前景。继塔中4油田之后，又接连发现了塔中10、塔中6、塔中16、塔中24、塔中40、塔中47等多个东河砂岩油气田群^[7]。

至1998年，石炭系东河砂岩已经成为塔里木油田在探明石油储量和石油年产量方面都是最多的勘探目的层系。尽管东河砂岩勘探难度已越来越大，基本上已没有储备的东河砂岩构造圈闭，但勘探家们对东河砂岩这套优质储层依然痴心不改，情

有独钟。明显的构造圈闭没有了，需要重新继续探索低幅度构造圈闭和地层圈闭；隆起区勘探告一段落，继而开始向斜坡区和凹陷区探索。

1998年初，哈得1和哈得2两个东河砂岩低幅度构造圈闭的勘探虽然相继失利了，但发现了哈得逊前石炭纪古鼻隆。结合塔里木盆地东河砂岩沉积与分布受前石炭纪古（鼻）隆起控制的特征，综合研究认为哈得逊前石炭纪古鼻隆的下倾方向很可能赋存有东河砂岩这套优质海相砂岩储集体，并发育东河砂岩地层超覆型圈闭。为此在1998年9月又部署HD4井探索该东河砂岩地层超覆型圈闭。因此，HD4井东河砂岩油藏的发现与突破，正是这种锲而不舍、坚持不懈追踪探索东河砂岩油气藏的必然结果。

4.2 勘探开发一体化——高效勘探开发的保障

针对哈得逊油田的特点，采用勘探开发一体化模式，边滚动勘探开发边科研攻关，逐步加深认识，使油田储量不断增加，产能规模不断扩大，实现了变边际油田为高效油田。在滚动勘探开发过程中，一方面，地震与地质研究为滚动部署关键井提供了方向；另一方面，通过部署关键井，可以不断修正构造图的精度，不断提高对油藏的认识。创造性地提出了非稳态动态油藏成藏理论，合理解释倾斜油水界面的形成机理，及时指导了滚动勘探开发部署，油藏认识逐渐深化，含油面积和油藏规模不断扩大。

通过实施勘探开发一体化，打破开发传统模

式,开展地质、地震、测井、油藏工程、钻井工程、采油工艺联合攻关,不断引进和开发新技术、新方法、新工艺。在实践中攻关,在攻关中实践,不断突破技术瓶颈,丰富和发展了石油地质勘探和复杂油田开发的理论和实践,开创了塔里木盆地的“哈得逊模式”,最终实现了对哈得逊油田这个大深度、低幅度、薄储层、具有倾斜油水界面的复杂油藏的探明与高效开发。

4.3 多项技术联合攻关——高效勘探开发的关键

哈得逊油田地处塔里木盆地塔克拉玛干沙漠腹地,具有油层薄、埋深大、构造幅度低、石油储量丰度低(大部分含油范围内小于 $30 \times 10^4 \text{ t/km}^2$)、油水界面倾斜等特征,因此高效勘探开发难度非常大,主要表现在三个方面:(1) 东河砂岩尖灭点准确识别和尖灭线精细落实难;(2) 构造和圈闭准确落实难;(3) 油藏含油范围预测难。自 1998 年以来,塔里木油田分公司创造性地实施勘探开发一体化,使哈得逊油田从一个边际低效小油田一跃成为了中国石油的一个高效开发油田的典范。在其滚动勘探开发过程中形成的具有塔里木特色的海相砂岩隐蔽油气藏勘探开发技术系列与理论,极大地丰富、发展了中国隐蔽油气藏勘探开发技术与理论。

4.3.1 超深低幅度薄储层油藏三维地震描述技术

哈得逊地区地处塔里木河洪泛平原,地表条件十分复杂,给地震资料的采集处理带来较大困难。面对这一难题,首先加强地震资料采集、处理攻关,利用“高分辨率保真处理和 VTI 各向异性速度处理”这一特殊处理流程,充分提高地震资料的分辨率和信噪比,主频提高到 45 Hz,为东河砂岩尖灭线的准确识别及储层预测奠定基础;二是加强速度攻关研究,准确落实构造形态,开发井的绝对误差在 1‰ 以内,为勘探开发井位的部署提供了准确的基础数据;三是充分运用地震、地质、测井、钻井资料和地震解释技术,勘探与开发紧密结合,不断深化地质认识,准确落实东河砂岩尖灭线和厚度分布规律。

4.3.2 低电阻薄互层测井评价技术

哈得逊油田薄砂层油藏油层平均厚度小于 1.5 m,小于测井仪器的纵向分辨率,测井响应受围岩影响大;东河砂岩油藏低电阻油层电阻率与邻近

水层的电阻率接近,只有 $0.52 \Omega \cdot \text{m}$ (图 2),油水层判别和饱和度的计算难度都非常大。

测井技术人员在大量岩石物理实验基础上,用岩心刻度测井的方法建立并总结出了一系列的测井解释和评价技术,有效地解决了哈得逊油田低电阻和薄互层的测井评价技术难题。

4.3.3 高分辨率层序地层分析技术

针对哈得逊油田的储层发育特征,引入层序地层学的研究方法,建立完整的研究流程。

首先,根据塔里木盆地石炭纪地层研究的认识和地震解释,建立本区石炭系层序地层格架;

然后,根据主要目的层区域沉积演化规律的认识,结合地震精细解释,在区域钻井资料标定的基础上,划分出准层序(副层序),建立本区石炭系主要目的层层序地层格架;

第三步,在岩心观察和测井地层倾角处理解释的基础上,划分出岩层(小层)、纹层组级,在此基础上,完成流动单元划分,并进行油田范围内的精细对比,重点描述储层和夹层的分布规律;根据钻井数量的增加,不断修正和完善,建立全油田石炭系主要目的层精细层序地层格架;

第四步,利用测井参数的精细处理解释数据体,在沉积相控制的前提下,完成储层属性模型的建立,从而建立了全油田精细的储层地质模型。

4.3.4 成藏理论创新在复杂油藏滚动开发中的应用

勘探实践表明,哈得逊海相砂岩油田最显著的特性就是其东河砂岩油藏的油水界面自东南向西北逐渐降低,海拔高程最大相差达 178.33 m——这在国内外是绝无仅有的。因此,如何合理解释该倾斜油水界面的形成机理并以此准确预测东河砂岩油藏的原油分布规律和含油范围,成为哈得逊油田高效滚动开发和储量规模不断增大的关键。

从油藏特征、古构造演化、成藏地球化学和数值模拟等方面入手,深入分析了哈得逊油田东河砂岩油藏的油气充注成藏过程,创造性地提出了“后油藏”概念和“非稳态动态成藏”理论。研究认为,油气成藏全过程可以分为前油藏阶段、油藏阶段、后油藏阶段三个阶段,在地质历史的长河中,油气水的平衡是一种动态平衡,某一时期的油气水平衡是相对而短暂的,油气藏的存在相对其整个地史发展过程

来讲也是短暂的,以油气藏形式存在的油气聚集量相对油气总量也是很少的一部分,大部分油气是处于前油藏阶段或后油藏阶段。在后油藏阶段,油气运移的主要动力是浮力和构造应力,运动的方式以体积流为主(浮力流渗流)。当构造运动引起圈闭的溢出点发生变化时(如构造翘倾),油气在浮力作用下发生连续的侧向运动(受毛细管阻力的影响及相渗的控制),当圈闭的盖层被断层破坏时,油气沿断层发生垂向运动(不受毛细管力影响),当油藏被抬升至地表、储层上倾方向被削蚀时,油气发生侧向运动和垂向漏失。由于后油藏阶段是一个相对长期的过程,在此阶段油气总体上表现为散失(最后形成残余油);但在散失的过程中也可能发生多次聚集,此阶段的油气聚集表现为动态聚集,因此我们将这种油藏消亡过程的动态油气聚集单元称为“后油藏”。这种动态聚集的后油藏通常具有油水界面倾斜、流体性质差异大等特征。这一定义特别突出了油气聚集中的动态概念,与传统意义油藏具有较大的差异。一方面,作为古油藏自然破坏后的一种油气富集形式,后油藏是油气勘探的主要对象,也是进行油气田描述和预测的基本单元;另一方面,油藏开发过程作为后油藏过程的特例,在油藏消亡过程中也会形成局部动态富集,其含油饱和度介于原始含油饱和度和残余油饱和度之间,这是油藏投入开发后最重要的对象,也是进行滚动开发调整和改善采油的主要目标。

根据这一非稳态动态成藏理论预测,哈得逊油田东河砂岩油藏具有继续向西北扩大的趋势。2004年部署的HD17和HD171两口探井相继获得工业油流,从而证实了该理论的预测非常成功。HD17井区新增含油面积85.6 km²,新增控制石油地质储量1756 × 10⁴ t,至此,国内第一个海相砂岩亿吨级油田诞生了。

哈得逊油田的重大发现以及由此形成的勘探开发配套技术系列,将对塔里木盆地乃至所有克拉通地区海相砂岩隐蔽油气田的勘探具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] Sun Longde, Zhou Xinyuan, Song Wenjie, et al. Donghe sandstone subtle reservoir exploration and development technology in Hade 4 Oilfield [J]. *Petroleum Science*, 2004, 1(4): 35-43.
- [2] 赵靖舟, 田军, 廖涛, 等. 塔里木盆地哈得逊隆起的发现及其勘探意义 [J]. *石油学报*, 2002, 23(1): 27-31.
- [3] 何文渊, 郑多明, 李江海, 等. 塔里木盆地哈得逊油田油气成藏机理 [J]. *地质地球化学*, 2001, 29(3): 15-18.
- [4] 肖中尧, 黄光辉, 王培荣, 等. 塔里木盆地哈得逊及相邻地区原油含氮化合物分布特征及油藏充注方向探讨 [J]. *地球化学*, 2003, 32(3): 263-270.
- [5] 孙丽霞, 周勇, 李宇平, 等. 哈得 4 油田石炭系薄砂层沉积模式及储集特征 [J]. *新疆石油地质*, 2003, 24(1): 44-47.
- [6] 赵靖舟, 吴保国. 塔里木盆地哈得 4 油田成藏模式探讨 [J]. *中国石油勘探*, 2001, 6(1): 20-23.
- [7] 梁狄刚. 塔里木盆地九年油气勘探历程与回顾 [J]. *中国石油勘探*, 1999, 4(2): 53-56; 1999, 4(3): 57-62.

编辑: 赵国宪

Cases of Discovery and Exploration of Marine Fields in China (Part 10):

Hadexun Sandstone Oilfield in Tarim Basin

Zhou Xinyuan, Yang Haijun, Cai Zhenzhong, Zhao Fuyuan, Hu Jianfeng

Abstract: Hadexun Oilfield is the first marine sandstone one with 100×10⁶t petroleum reserves in Tarim Basin. It is discovered in February 1998 and began to yield oil in August 2000. It has held the total proved petroleum reserves in-place of 82.02×10⁶ t till the end of 2004 and estimated reserves of 28.2×10⁶ t in 2005. The annual crude oil output reached to 2.02×10⁶ t in 2006. The oilfield is located at a nosed rise in Hadexun belt north of the Mangar Depression in the Tarim basin. The oil reservoirs consist of main Carboniferous Donghe Sandstone Member and two thin sandstone layers within Middle Mudstone Member, which have a burial depth over 5,000 m and an amplitude below 34m. Considerable difficulties were encountered in exploration and development of the field because the main Donghe Sandstone oil reservoir is a subtle stratigraphic-anticlinal trap with a unified temperature-pressure system and an inclining oil/water interface and complicated geological conditions. Exploration and exploitation history of the oilfield, general geological characteristics of the superdeep oil reservoirs, and experience and enlightenment during exploration and development are reviewed.

Key words: Early Carboniferous; Marine formation; Sandstone reservoir; Characteristic of reservoir; Exploration history; Hadexun Oil Field; Tarim Basin

Zhou Xinyuan: male, Senior geologist, Professor. Add: PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000 China