

辽河西部凹陷杜84块兴隆台I油层隔夹层识别、成因及分布特征

吴俊^{1,2},樊太亮^{1,2},高志前^{1,2},李晨^{1,2},张涛^{1,2},马聪明³

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院,北京 100083; 2. 中国地质大学(北京) 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室,北京 100083; 3. 中国石油长庆油田分公司 第一采油技术服务处,甘肃 合水 745400]

摘要:隔夹层是储层非均质性的主要控制因素之一,探讨隔夹层为油藏精细描述和剩余油研究奠定基础。以岩心、生产动态数据为基础,综合辽河西部凹陷曙一区1735口测井资料,利用电性及物性测试分析,按照岩心标定测井曲线,编制5种参数(声波时差、深侧向电阻率、感应电导率、孔隙度和渗透率)交会图。将研究区的隔夹层分为泥质隔夹层和物性隔夹层两类,并建立两类隔夹层定量划分标准和识别模板。研究区隔夹层发育主要受控于洪泛期沉积、局部区域水动力减弱、多期河道切割侵蚀、前积(侧积)和河床滞留沉积的综合作用。泥质隔夹层主要集中分布在滨浅湖和分流间湾处,物性隔夹层主要分布在水下分流河道分支处及分流间湾的局部;在靠近物源区,隔夹层分布较少且较孤立,仅在两期河道叠置间发育,而在远离物源区分布明显增多且厚度增大;隔夹层在垂向上的分布与所处的基准面旋回关系密切,在中期旋回上升半旋回的3个阶段,隔夹层自下而上数量增多、厚度增大。最后提出隔夹层的岩性、物性、厚度及展布特征影响蒸汽辅助重力泄油(SAGD)技术对辽河油田稠油的生产。

关键词:隔夹层;高分辨率层序地层;兴隆台I油层组;沙河街组;杜84块;辽河西部凹陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Identification, origin and distributions of barriers/baffles Xing-I oil layer in Block Du-84 of the western Liaohe Depression

Wu Jun^{1,2}, Fan Tailiang^{1,2}, Gao Zhiqian^{1,2}, Li Chen^{1,2}, Zhang Tao^{1,2}, Ma Congming³

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. No. 1 Oil Production Department, PetroChina Changqing Oilfield Company, Heshui, Gansu 745400, China)

Abstract: Barriers/baffles in reservoirs have been considered as one of the control factors of reservoir heterogeneity. A study on barriers/baffles may provide a sound foundation for a fine characterization of reservoirs and a more accurate prediction of remaining oil distribution. By combining core observation and dynamic production data as well as logging data of 1 735 wells in the Shuyi Block in western Liaohe depression, we drew cross plots of five parameter (i. e. interval transit time, lateral resistivity, induction conductivity, porosity and permeability) in accordance with core calibrated logging curves, and analysis result of electrical and physical property tests. We classified the barriers/baffles into two types (shaly barriers/baffles and physical barriers/baffles) and established a standard and a template for their quantitatively identification. The barriers/baffles developed in the study area were mainly controlled by factors including sedimentation of flooding stage, weakening local hydrodynamics, multi-stage fluvial erosion cuttings, progradation and riverbed lag deposition. The shaly barriers/baffles were mainly distributed in shallow lakes and interdistributary bays, while the physical barriers/baffles were mostly located in bifurcations of underwater channels and local areas of interdistributary bays. Barriers/baffles were scarce and isolated in the stacked channels near provenance. However, they were more frequent and thicker away from provenance. Their vertical distribution was closely related with the base level cycles and their number and

收稿日期:2015-01-20;修订日期:2016-12-21。

第一作者简介:吴俊(1991—),男,博士研究生,层序地层学及油藏精细描述。E-mail:zgdxzxbjw@126.com。

通讯作者简介:樊太亮(1961—),男,教授、博士生导师,层序地层学及隐蔽油气藏勘探理论与技术。E-mail:fantl@cugb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41102078);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB214802)。

thickness got larger from bottom up in the ascending semi-cycles of the middle-long term base level cycles. We also proposed that the lithology, physical properties, thickness and distribution of barriers/baffles had certain effects upon the performance of SAGD (steam-assisted gravity drainage) in heavy oil discovery of Liaohe Oilfield.

Key words: barrier/baffle, high-resolution sequence stratigraphy, Xing-I oil layer, Shahejie Formation, Block Du 84, western Liaohe Depression

隔夹层在垂向上能够阻挡油气的渗流和运移,不利于油田的开发,尤其在在我国东部多数油田开发的中后期,隔夹层对于研究储层的非均质性,进行合理的层系划分、温压系统、油水关系解释及生产动态监测等具有重要的意义^[1-2]。杜84块作为辽河油田稠油生产开发的重要区块,兴隆台油层组I油层(简称兴I油层,下同)的开发主要采用蒸汽辅助重力泄油(SAGD)技术,运用直井和水平井联合作业模式,即直井注入蒸汽,水平井采油。伴随开发的不断深入,隔夹层控制着渗流单元的空间分布,影响蒸汽对于重质原油的烘烤及地层的有效加热和垂向渗流,从而出现蒸汽热量大部分损失、生产成本增高、原油的动用程度较低等一系列日益突出的矛盾。本研究以杜84块兴I油层为例,从隔夹层的识别和分类着手,结合岩心、测井与实验测试等资料来开展工作,运用高分辨率层序地层学理论分析隔夹层的成因和空间展布特点,为进一步开展油藏精细描述、实现剩余油挖潜奠定基础。

1 区域概况

杜84块地处辽河西部凹陷西斜坡中段,被西部杜115断层、北部的杜32断层和东部的杜79断层联合夹持,呈长条状向南东方向倾斜的单斜构造。研究区总面积为5.24 km²,钻井1735口,平均井间距50~60 m。兴I油层属于古近系沙河街组的沙一段与沙二段,与上覆的馆陶组、下伏的沙三上亚段呈角度不整合接触^[3-5]。笔者^[6]在前期研究工作中将兴I油层分4个小层,自下而上依次为XI²⁻², XI²⁻¹, XI¹⁻²和XI¹⁻¹,东北部地层厚度较大,沿着西南和西北方向厚度逐渐减薄,4个小层的厚度平稳,各小层的平均厚度约为6.5 m。从XI²⁻²小层到XI¹⁻¹小层,地层厚度呈现低幅度增长的趋势。兴I油层沉积期为盆地扩张期,盆地范围不断扩大,河流注入湖盆,其物源来自东北方向且距离物源近,碎屑物供给充足,属于扇三角洲前缘沉积体系,可分为水上分流河道、水下分流河道、水上分流间湾、水下分流间湾、河口坝和滨湖等6个微相类型^[6]。

2 隔夹层识别与分类

归功于陆相油气储层分布的复杂性,我国隔夹层

的研究相对成熟。根据物性、沉积环境和成因特点,隔夹层分为三个大类:泥质隔夹层、物性隔夹层和钙质隔夹层^[7-11]。其中,钙质隔夹层的形成主要与成岩作用中有机质随着温度与压力改变时,与地层水中的钙、镁离子结合生成碳酸盐岩胶结物有关,与胶结、溶解等表生期及埋藏期成岩作用所形成非均质性密切联系,其分布的随机性相对较强^[11]。10口井的岩心观察发现钙质隔夹层在研究区极少发育,甚至不发育且很难识别。SAGD生产中发现隔夹层,尤其是泥质隔层厚度较大,蒸汽加热很难突破其遮挡,而物性隔夹层厚度较小,注入一段时间蒸汽后,通过热传导实现对物性隔夹层上部油层的加热。本文主要讨论泥质隔夹层和物性隔夹层两个大类。

2.1 隔夹层识别

近些年来关于隔夹层的研究,诸多学者采用很多方法,如地质统计学法、小波神经网络分析法、地震属性分析法、岩心观察法、交会图法和蜘蛛网图模式法等^[12-17]。其中岩心观察是隔夹层识别最直观且准确的方法。研究区只有10口取心井,数目相对较少。因此在充分利用岩心的前提下,将声波时差(AC)、深侧向电阻率(RT)、感应电导率(CON)、孔隙度(POR)和渗透率(PERM)等常规测井、物性参数有效地结合,绘制多参数交会图(图1),建立该区隔夹层定量识别标准(表1)。

2.2 隔夹层分类

针对隔层和夹层的特点,以取心井岩心识别隔夹层为基础,利用岩性、电性及物性等参数确定隔夹层识别模板(图2),从而分出泥质隔夹层和物性隔夹层。

2.2.1 泥质隔夹层

在测井上主要体现为泥岩特征:AC高值,GR高值,SP接近泥岩基线,RT/RS呈现低值且幅值很小近乎为零,CON高值,扩径明显,POR和PERM近乎为零(表1;图2)。一般来说,岩石中矿物含量高、密度大、孔隙度低,含水饱和度高的岩石,其导热率就大。而泥质隔夹层主要包含泥岩、含泥粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,泥岩的导热性相对较差不易于热能的传导。

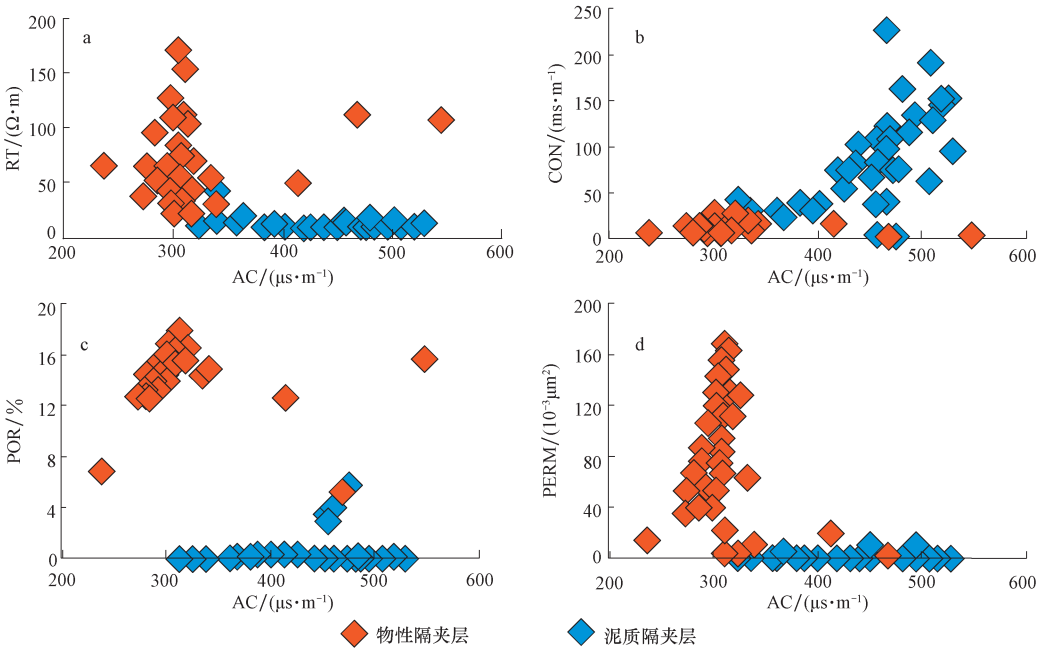


图 1 辽河西部凹陷杜 84 块兴 I 油层隔夹层测井参数交会图

Fig. 1 Crossplots of logging parameters of the barriers/baffles in Xing-I oil layer in Block Du-84 of the western Liaohe Depression

表 1 辽河西部凹陷杜 84 块兴 I 油层隔夹层识别标准
Table 1 Identification criteria for the barriers/baffles in Xing-I oil layer in Block Du 84 of the western Liaohe Depression

类型	AC/ ($\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	RT/ ($\Omega \cdot \text{m}$)	CON/ ($\text{ms} \cdot \text{m}^{-1}$)	POR/%	PERM/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
泥质隔夹层	340 ~ 530	0 ~ 25	25 ~ 200	0 ~ 4	0 ~ 1
物性隔夹层	230 ~ 350	25 ~ 150	5 ~ 40	0 ~ 16	20 ~ 160

2.2.2 物性隔夹层

以粉砂岩和细砂岩为主(图 3b),还包括杂基支撑的细砾岩、泥砾岩和颗粒支撑的砾岩,泥质含量较高。物性隔夹层有一定的孔隙和渗透性,但由于沉积时砂岩层中细粒薄砂岩胶结作用致使物性变差,加之泥质团块受交代或重结晶作用的改造导致在测井上表现为:AC 值较低,GR 值低于泥质隔夹层,CON 高值,SP 稍高于泥质隔夹层,RT/RS 高值,扩径不明显,POR 变化幅度大,PERM 较泥质隔夹层显著升高(表 1,图 2)。以粉砂岩和细砂岩为主的物性隔夹层(图 3b,c),其导热系数较大,有利于蒸汽的热传导,蒸汽携带的热量在油层中可以进行有效的热交换。

3 隔夹层成因

由于隔夹层成因比较复杂,受多种因素控制,因此

截止目前尚无统一的隔夹层成因分类方案^[18]。隔夹层一般根据成因类型可分两个大类:沉积作用和成岩作用^[11,19-20]。结合该区沉积特征、岩心和测井资料,提出本区隔夹层成因主要分为 5 个方面。

1) 洪泛期沉积,在洪泛期伴随着湖平面的上升和有效可容纳空间向陆上迁移,基准面达到最高值,可容纳空间远大于沉积物的供给量。在扇三角洲前缘砂体之上的水体加深,兴 I 油层沉积末期属于滨浅湖亚相,水动力相对减弱,粉砂质泥岩、泥岩等悬浮物质大量沉积且较容易保存,形成大套的灰绿色泥岩(图 3a)。泥质纯且致密,水平纹层较发育,单层厚度大(局部达到 11.8 m)且连续性很好,在该区作为与上覆的馆陶组的隔层。

2) 局部区域水动力减弱,分流间湾处水动力明显减弱,水体的搬运、携带沉积物的能力急剧下降,细粒悬移物质逐渐沉降堆积增多,往往发育有块状或水平层理^[11]。根据分流间湾的所处的位置分为水上分流间湾和水上分流间湾两个类型,在水上分流间湾处发育的泥岩以灰绿色为主(图 4a),而在水下分流间湾处的泥岩以灰白色为主(图 3d,图 4b),常发育水平层理,上部发育槽状交错层理(图 4c),表明此时水动力减弱,水能相对平稳而后能量增强。分流间湾和分流河道、河口砂坝等微相在垂向上组合产出^[21]。隔夹层的连续性很容易受分流间湾所处位置的影响,此处形成的隔夹层厚度不大,规模比较小。

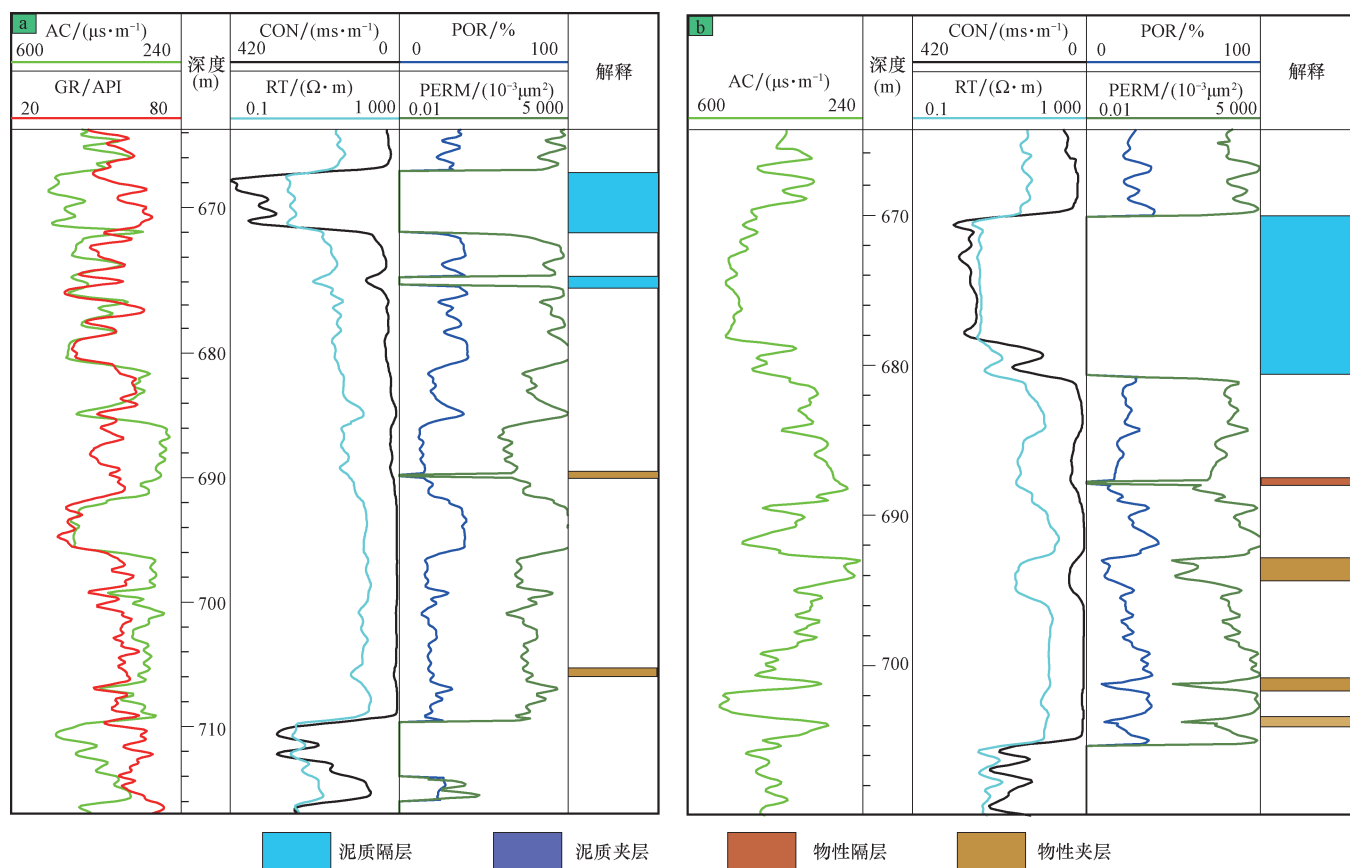


图 2 辽河西部凹陷杜 84 块兴 I 油层泥质隔夹层和物性隔夹层测井识别模板

Fig. 2 Logging response characteristics of shaly and physical barriers/baffles in Xing-I oil layer in Block Du 84 of the Shu 1 area, western Liaohe Depression

a. 杜 84-53-117 井; b. 杜 84-47-97 井

3) 多期河道切割侵蚀,随着搬运水动力的减弱,在河道的砂砾岩上覆盖着一层粒度相对较小的粉砂质泥岩或泥质粉砂岩,代表着一期河道沉积结束至下一期河道沉积开始之间短暂期间内的细粒物质的沉积^[21-22]。由于多期河道的叠加和切割作用,后期河道强烈的下切和冲刷,先期河道顶部细粒沉积未得到完全保存,从而使得隔夹层厚度局部变薄甚至缺失,分布比较随机,厚度小、多且杂乱。例如,在杜 84-馆观 6 井中显示两套细砂岩中富含油,中间夹杂着一套 6 cm 厚的浅灰色泥岩,从而形成阻碍油气运移的物性隔夹层(图 3e)。

4) 前积(侧积)作用,受沉积物供给速度快,分流河道容易迁移摆动很不稳定,即使在暂时性的分流河道口处形成的河口坝也很容易被后期的沉积作用破坏,因此扇三角洲前缘河口坝发育很差。仅在局部河口坝前段远离物源处,当可容纳空间最大而沉积物供给量最小时,水动力也较小,细粒物质发生前积或侧积,一般为泥质粉砂岩或粉砂质泥岩为主,在河口坝处隔夹层呈现斜列式展布,厚度相对较小(图 3b)。

5) 河床滞留沉积,在河道底部形成的有定向和非定向排列的泥砾岩构成,主要包含砂砾岩、泥砾岩和泥质砾岩,颗粒的分选性很差。由于辫状河岸质地疏松,抗侵蚀性差,侧向迁移十分迅速,随着迁移作用减弱,河流侵蚀两岸、河床底部的泥砾岩快速堆积而成^[16,20],夹杂着粉砂质、泥质,分选较差。在后期的压实、破裂作用中,半固结的泥砾受压变形致使吼道堵塞,砂体致密化,孔隙度和渗透率进一步降低。河道冲刷面向河道边缘尖灭减薄,连续性相对较差。

4 隔夹层展布特征

4.1 单井隔夹层层序

研究表明在纵向隔夹层的分布与所处的中长期基准面旋回有密切联系^[22-24]。在研究区的兴 I 油层剖面上,自下而上隔夹层的厚度逐渐增大,在基准面顶部达到最大。以笔者前期对该区高分辨率层序地层分析研究为契机^[6],根据中期旋回基准面 3 个阶段来表征隔夹层在单井上的垂向分布特征(图 5)。

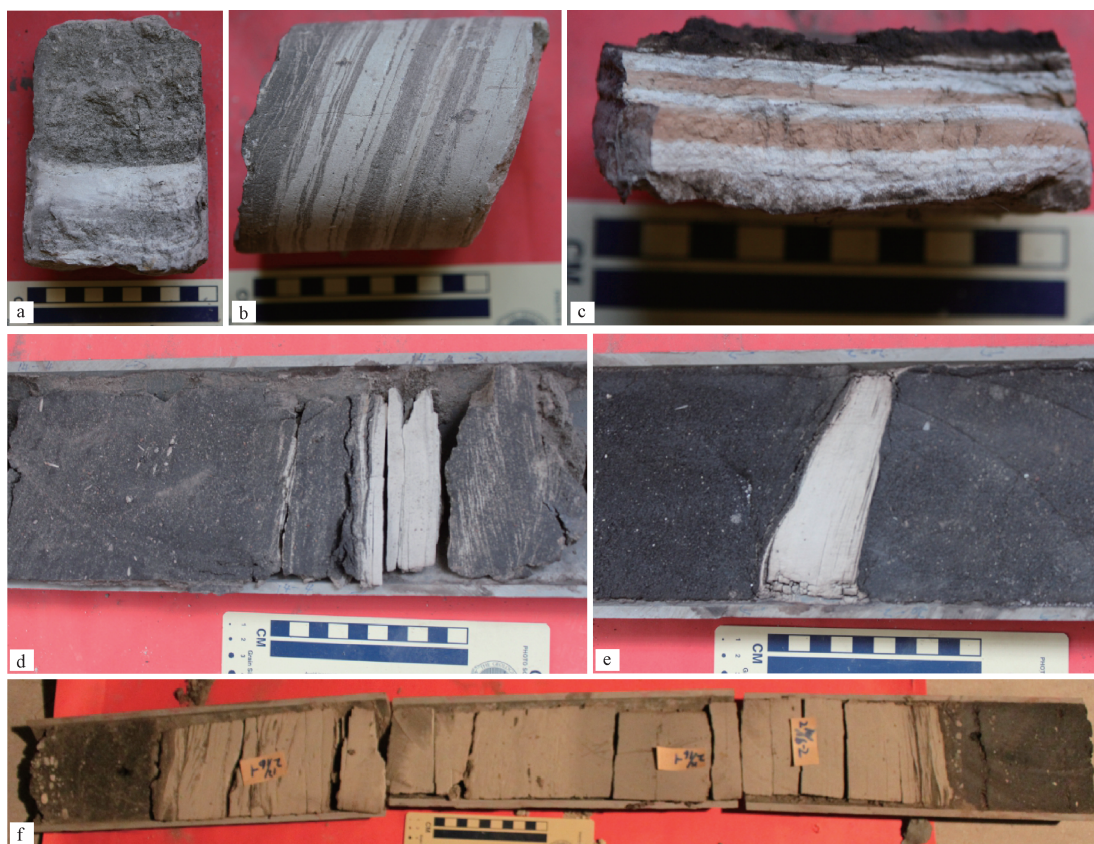


图3 辽河西部凹陷杜84块兴I油层泥质隔夹层和物性隔夹层岩心特征

Fig. 3 Core features of shally and physical barriers/baffles in Xing-I oil layer in Block Du 84 of the western Liahe Depression

- a. 灰白色细砂岩与灰绿色粉砂质泥岩中夹杂灰白色泥质条带形成的泥质隔夹层,小型水平层理发育,杜203井,埋深709.58 m;
 b. 灰绿色泥岩与灰白色粉砂岩纹层状互层形成物性隔夹层,单个纹层厚度为2~5 mm,底部发育波状层理,曙1-30-44井,埋深620.35 m;
 c. 灰绿色泥岩与红褐色泥岩互层形成物性隔夹层,水平层理,局部夹杂富含油粉砂岩,曙1-30-44井,埋深628.6 m;
 d. 含油细砂岩夹杂着灰白色泥岩,杜84-馆观6井,埋深600.31 m;
 e. 富含油粉砂岩夹杂着浅灰色泥质,形成隔夹层阻挡油流运移,杜84-馆观6井,埋深612.05 m;
 f. 含油灰绿色泥质粉砂岩和粉砂质泥岩中夹杂厚度0.7 m的灰绿色泥岩,形成泥质隔夹层,杜84-观110井,埋深668.50 m



图4 辽河西部凹陷杜84块兴I油层分流间湾处的泥岩

Fig. 4 Mudstone in the interdistributary bay in Xing-I oil layer in Block Du 84 of the western Liahe Depression

- a. 灰绿色泥岩,夹杂泥砾,发育变形层理,杜228井,埋深704.98 m;
 b. 灰白色泥岩,可见明显的水平纹层,杜84-65-67井,埋深662.82 m;
 c. 顶底为粉砂岩和富含油粉砂岩,中间夹杂灰白色泥岩,灰白色泥岩发育水平层理,上部发育槽状交错层理,曙1-30-44井,埋深706.3 m

在中期旋回上升初期至早期的低可容纳空间状态,短期旋回呈现 A_1 型,即 $A/S \ll 1$ 至 $A/S < 1$ 缓慢递增。扇三角洲前缘区沉积物的存储能力较弱,靠近湖盆中心区大量的粗粒沉积物推进并保存下来,细粒沉积较少。 A_1 型常常由多个连续叠置的水上分流河道和水下分流河道砂体组成,受河道砂体的分选改造作用形成的叠置砂体厚度大、粒度较粗、泥质含量较少且物性很好。仅仅在河道冲刷面底部的滞留沉积处发育有少量的物性隔夹层,连续性较差。

在中期旋回上升早-中期,可容纳空间处于低-中高速增长状态,短期旋回显示 A_2 型或 C_2 型,即 $A/S < 1$ 至 $A/S \geq 1$ 递增。随着湖平面和基准面的不断上升,向物源方向可容纳空间逐渐增大,向湖盆中心区沉积物的供给量逐渐减少。在 A_2 型晚期和 C_2 型上升半旋回的后期一下降半旋回的初期,细粒沉积物堆积增多并得到较好的保存,物性中等-较好。在前后叠置的两期河道砂体之间粉砂质、泥质含量增多,后期由于压实、胶结、交代等成岩作用后形成孔隙度和渗透率都较低的物性隔夹层。

在中期旋回上升的晚期,洪泛期湖平面上升达到最高点,可容纳空间达到最大值,即 $A/S > 1$ 至 $A/S \gg 1$ 快速递增。随着基准面上升时,可容纳空间 A 的增加量大于沉积物的供给量(S),靠近湖盆中心区碎屑物源的供给量减少。洪水溢出河道,流动速度骤减,细粒悬浮沉积物大量堆积^[25-26],物性中等-较差,大套的灰绿色泥岩夹杂着粉砂质泥岩形成连续的隔夹层。此处的泥岩多发育水平层理,压实作用明显,封隔作用比较好。夹层主要由于短暂而局部的小型洪泛作用,一般厚度较小,延伸较小,稳定性差。

4.2 隔夹层平面分布特征

受沉积期次及规模的影响,全区隔夹层分布差异较大。隔层的分布相对较稳定,连续性好,夹层厚度相对较小,连续性较差。整体来说夹层钻遇率比隔层钻遇率高(图 6)。

泥质隔层展布特征与东北方物源方向一致,呈东北-西南方向分布。泥质隔层主要分布在 XI^{1-1} 顶部以及 XI^{1-1} — XI^{1-2} 之间。自下向上泥质隔层数量呈明

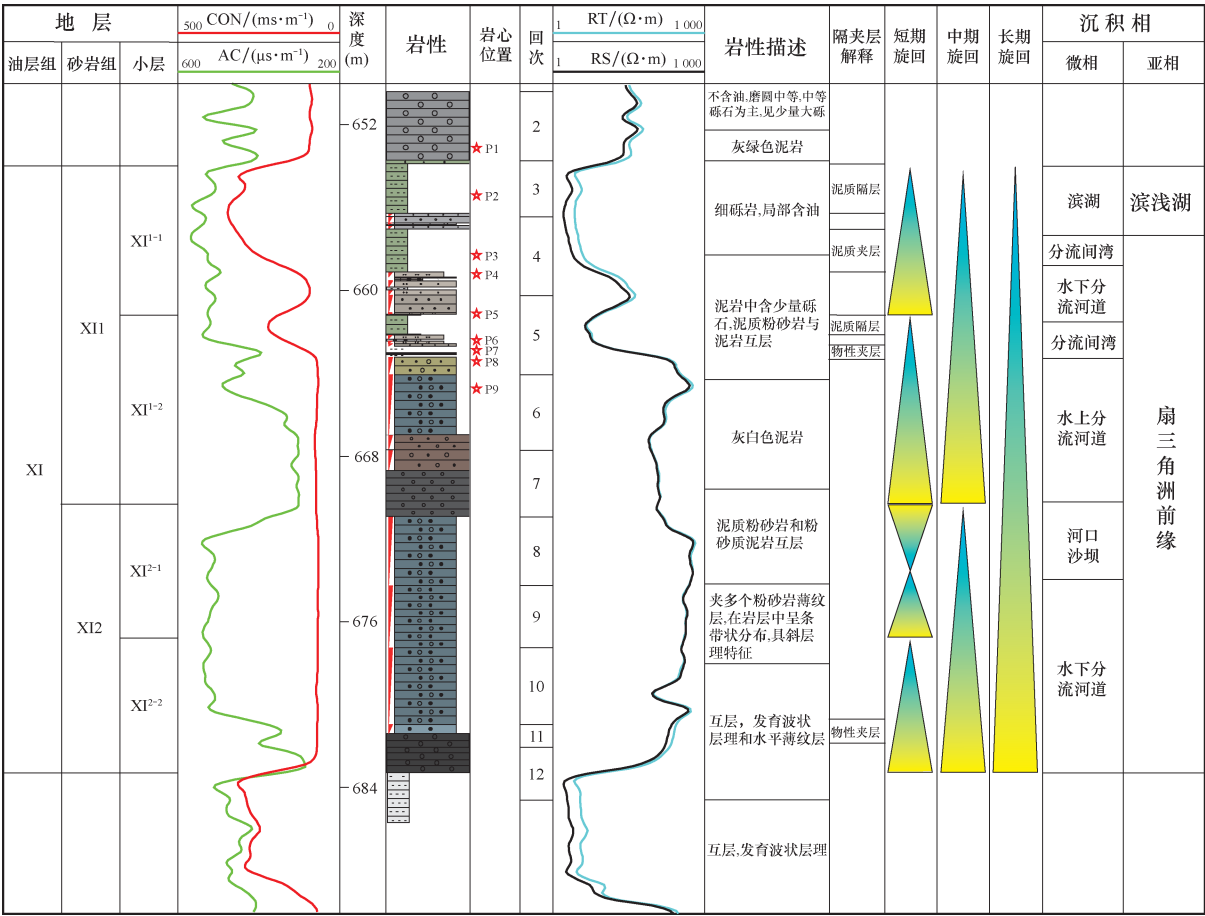


图 5 辽河西部凹陷杜 84 块兴 I 油层杜 84-59-87 井沉积相-层序地层综合柱状图

Fig. 5 Comprehensive sedimentary facies-sequence stratigraphic column of Well Du 84-59-87 in Xing-I oil layer in Block Du 84 of the western Liaohe Depression

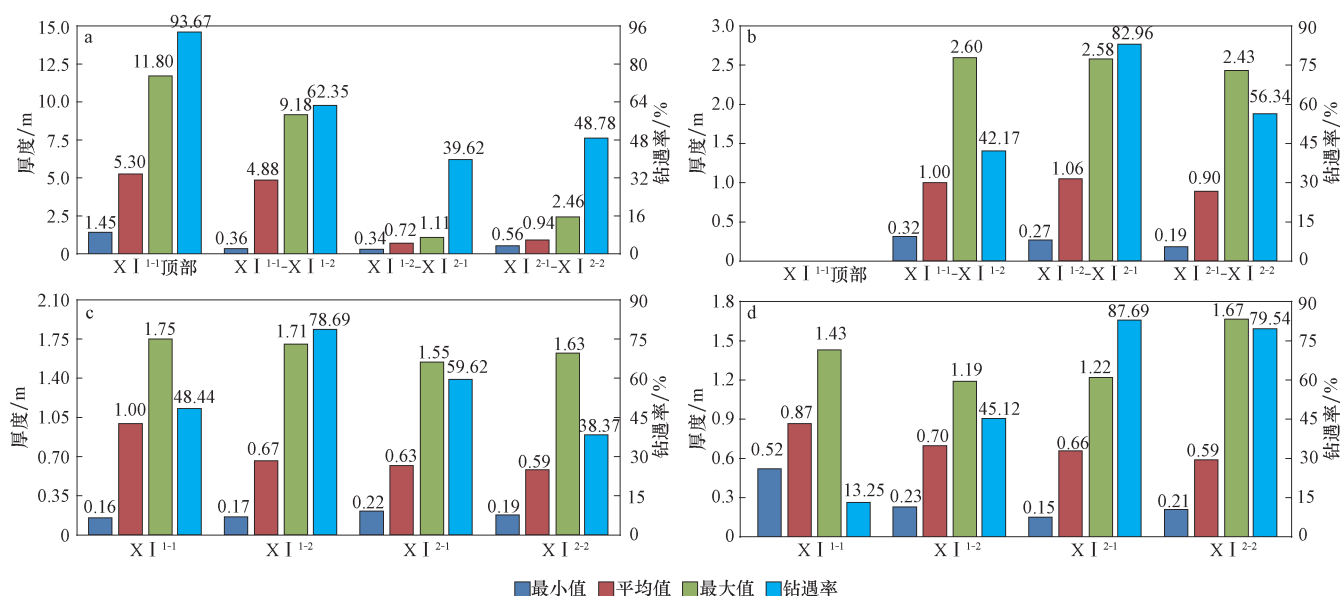


图6 辽河西部凹陷杜84块兴I油层隔夹层厚度及钻遇率统计柱状图

Fig. 6 Statistical histograms of barrier/baffle thickness and drilling encounter rate of Xing-I oil layer in Block Du 84 of the western Liaohe Depression

a. 泥质隔层; b. 物性隔层; c. 泥质夹层; d. 物性夹层

显增多、加厚。其中,处于滨浅湖亚相沉积环境下的 XI^{1-1} 顶部,泥质隔层的钻遇率高达93.67%,平均厚度为5.3 m,局部区域厚达11.8 m(图6a)。由于其分布范围广泛、连续性好且厚度稳定,测井上易于识别,在小层划分和对比中将其作为标志层。 XI^{1-2} — XI^{2-1} 之间的泥质隔层平均厚度最薄,仅为0.72 m,钻遇率仅为39.62%。泥质夹层作为薄层零星夹杂在厚储层中,其单层厚度较泥质隔层显著减小,主要分布在 XI^{1-1} 和 XI^{1-2} 中,其中 XI^{1-2} 泥质夹层最为发育,钻遇率可达到78.69%。泥质夹层的最大厚度为1.75 m,且出现在 XI^{1-1} 小层。4个小层中自下向上泥质夹层数量增多,平均厚度增大(图6c)。

物性隔夹层远离物源区的东南部呈带状分布。物性隔层在 XI^{1-1} 顶部不发育,主要分布在 XI^{1-2} 与 XI^{2-1} 之间,钻遇率达82.96%,平均厚度与泥质隔层相差较大,最大厚度仅为2.6 m。其中物性隔层的最大、最小及平均厚度值相差较小,基本分别维持在2.50、1.00和0.25 m左右(图6b)。物性夹层与厚储层呈互层分布,横向延伸小,比较零散,主要分布在 XI^2 砂岩组中,其中 XI^{2-1} 物性夹层最为发育,钻遇率可达到87.69%。物性夹层最大厚度为1.67 m出现在 XI^{2-2} 中。自下向上物性夹层数量减少,钻遇率从 XI^{2-1} 的79.54%迅速下降至 XI^{1-1} 的13.25%,但平均厚度增大,在 XI^{1-1} 中平均厚度达到最大值0.87 m,且最小厚度达到0.52 m(图6d)。

4.3 隔夹层纵向分布特征

杜84块兴I油层物源来自东北方向。为进一步分析隔夹层在全区的分布特征,以单井隔夹层剖析为基础,在垂直物源和平行物源方向分别选取一条剖面进行分析。

隔夹层的空间分布与沉积微相一致。在靠近物源区,即水上分流河道处物源比较充足,水动力强,冲刷能力较大,泥质或粉砂质等不太容易沉积和保存,隔夹层分布较少且较孤立,仅在两期河道叠置间发育隔层;在远离物源区,即水下分流河道的远端,水动力减弱,受河道频繁迁移、改道作用的影响,隔夹层的分布明显增多且厚度明显增大(图7)。

泥质隔夹层分布主要集中在滨湖和分流间湾微相中。隔层发育在上升半旋回顶部,A/S值最大,由于在 XI^{1-1} 时期湖侵作用水体相对较深,水动力条件弱,较粗粒碎屑沉积少,泥质、粉砂质泥岩等细粒沉积物增多且容易保存,因此在 XI^{1-1} 的顶部形成隔层厚度大,连续性好,在全区大面积分布。图8AB顺物源剖面 XI^{1-1} 小层,在杜84-50-164井-杜84-49-79井中泥质隔层厚度将近占据小层的90%;图8CD垂直物源剖面 XI^{1-1} 小层,杜84-47-101井-杜84-43-97井-杜84-39-97井中泥质隔层占据整个小层。泥质夹层在 XI^{1-1} — XI^{1-2} 较为发育,连续性很好,主要分布在水上分流河道和水下分流河道交界处、河道边

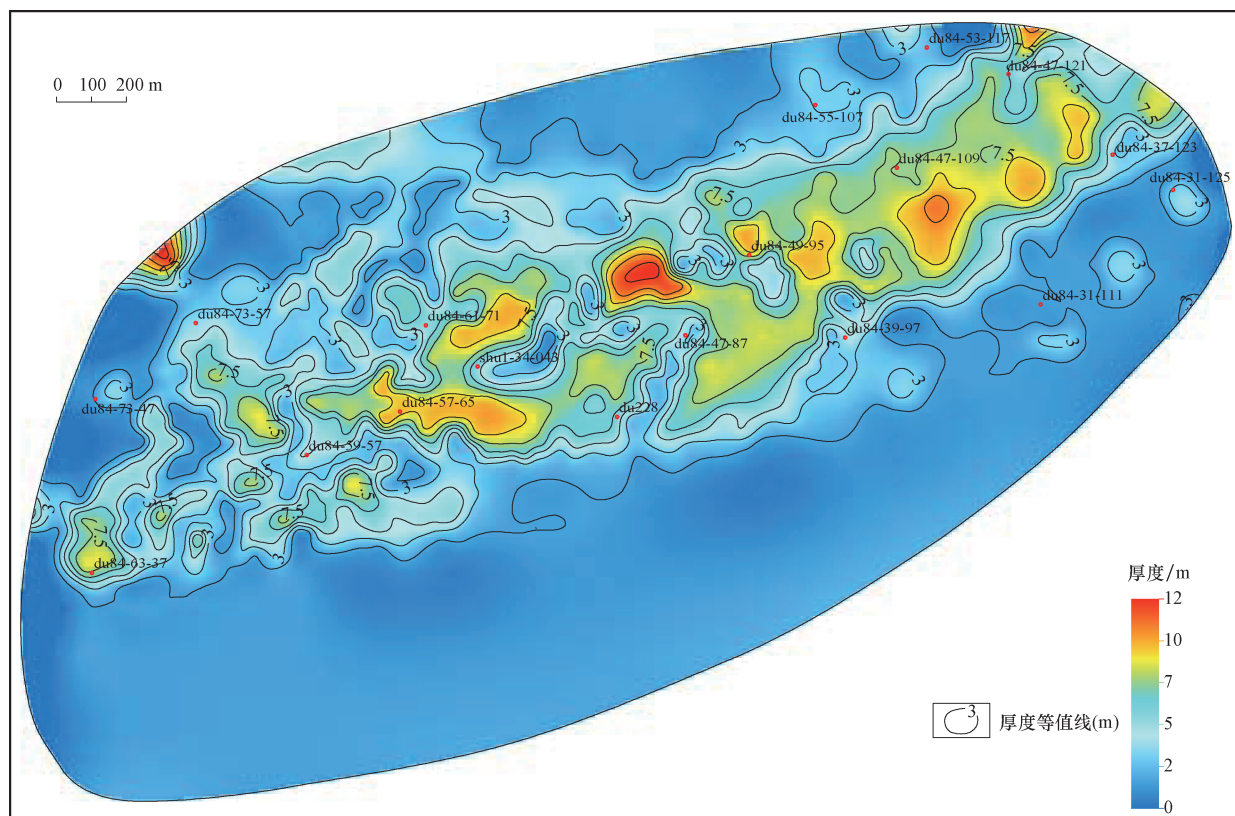


图7 辽河西部凹陷杜84块I油层 XI^{1-1} 顶部泥质隔层厚度分布

Fig. 7 Thickness distribution of the shaly barriers/baffles in top XI^{1-1} in Xing-I oil layer in Block Du-84 of the western Liaohe Depression

缘或分流间湾处, $XI^{1-2} \sim XI^{2-1}$ 和 $XI^{2-1} \sim XI^{2-2}$ 泥质夹层分布在河道侧向迁移较弱区,连续性较差。

物性隔夹层主要分布在水下分流河道分支处及分流间湾处。物性隔夹层分布在厚储层的内部,其连续性较差,延伸距离较短,物性隔夹层厚度与泥质隔夹层相比相差很大。其中,在 $XI^{2-1}—XI^{2-2}$ 最为发育,同时在 XI^{2-2} 底部水下分流河道冲刷面之上的滞留沉积处发育, $XI^{1-1} \sim XI^{1-2}$ 物性隔夹层零散分布在河道边缘部位。

5 隔夹层对生产动态的影响

隔夹层岩性、物性、厚度和延伸范围影响着注入蒸汽的有效作用空间^[27]。隔夹层总体积越大,平面延伸范围越广,影响蒸汽向上或侧向移动,注入蒸汽热损失率越高,层间动用程度差异越大,开采效果越差^[28]。在本区采用大套油层合采的方式,尤其是该区直井—水平井开采的模式,纵向蒸汽的超覆效应明显,厚储层内适量夹层的出现,有效的遏制蒸汽向上超覆,使油层井段得到较为均匀的动用。

5.1 隔层

兴I油层中存在连续且厚度较大的隔层使得蒸汽仅能在横向上运动,限制蒸汽腔在垂直方向上的扩散的高度,降低油层的实际泄油厚度,最终降低SAGD的采收率。作为注蒸汽开采的隔层能在垂向上对热载体起到封闭遮挡与限制阻碍的作用,使其在两个隔层之间形成一个完整的热流通体系,以确保注入的热能得到充分的利用。隔层封闭的蒸汽腔中的高温蒸汽不仅可以降低原油的粘度、油水界面张力从而改善贾敏效应,还能保障高温蒸汽对岩石的冲刷作用解除井筒附近钻井液等的污染。在完整的热流通体系中,稳定隔层的存在保证蒸汽腔中有效加热半径长期处在一个相对稳定的范围,随着热量的不断扩散,原油粘度降低,泄油半径越大,产量就不断增加。在注汽强度大、注汽时间长,虽然注入油层热量多,但发生汽窜机率增大,从而造成本井油层纵向动用程度降低和无谓的热损耗,影响生产效果。 XI^{1-1} 小层顶部发育大套灰绿色泥岩和 $XI^{1-1}—XI^{1-2}$ 小层之间发育厚层泥质隔层能有效防止气窜。

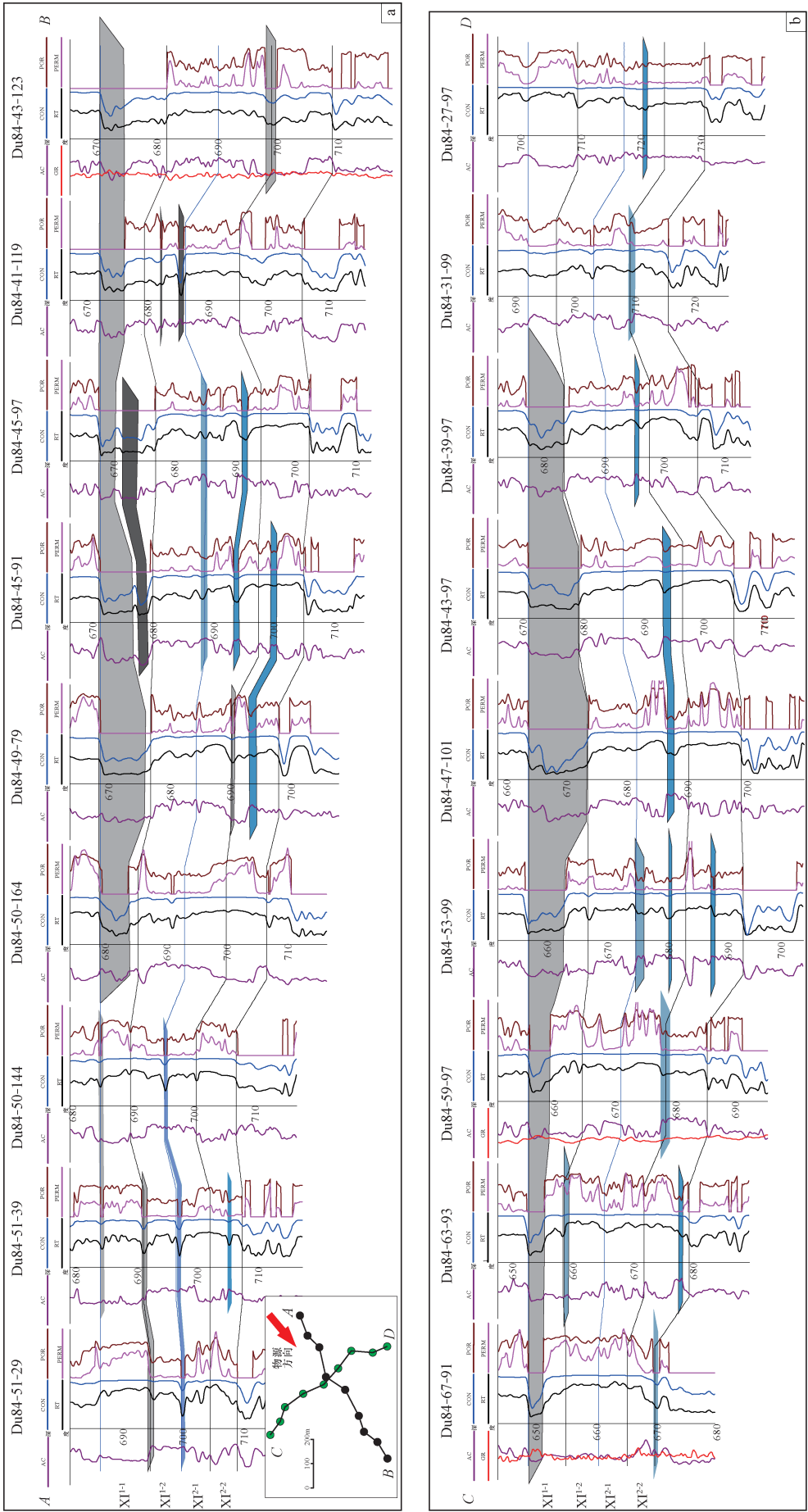


图8 辽河西部凹陷杜84块兴 I 组顺物源方向和垂直物源方向隔夹层分布
Fig.8 Barrier/baffle interlayer distribution of cross Sections of wells in direction parallel to the provenance and perpendicular to the provenance in Xing-I oil layer in Block Du 84 of the western Liaobe Depression

5.2 夹层

与隔层不同,本区夹层平面分布不连续,随机性强,岩性变化较大。不连续的夹层不能完全阻挡蒸汽腔的扩散和上升,随着蒸汽注入量的增加会绕过物性或泥质夹层而继续向上扩展。由于夹层的存在,蒸汽腔上升的速度减缓,同等条件下重力泄油的高度降低,延长高产油阶段的时间。当夹层厚度较小,分布面积不大时,夹层相对有利,主要因为夹层岩性一般较细,可以吸收蒸汽热能,对上、下油层加热,在适度、均匀发育夹层的油层中发现其蒸汽作用范围大,开采效果好;当夹层的分布面积越大,注入的蒸汽受控其限制,很难绕过夹层,累计产油越低

必须指出的是,隔夹层对于 SAGD 生产动态影响因素很多,仅研究物性和岩性的影响还是远远不够的。随着资料的完善和补充,下一步在 SAGD 水平生产井垂直方向上的延伸范围、沿水平方向延伸距离、注蒸汽直井的射孔相对隔夹层的位置等方面,进行隔夹层空间展布定量表征很有必要。

6 结论

1) 研究区隔夹层具有成因类型多样性的特点,主要受洪泛期沉积、局部区域水动力减弱、多期河道切割侵蚀、前积(侧积)和河床滞留沉积5个方面的综合作用。

2) 隔夹层在垂向上的分布与基准面旋回有关,在中期旋回上升初期至早期,短期旋回处于 A_1 型时,隔夹层仅在河道冲刷面底部的滞留沉积处发育;在中期旋回上升早-中期,短期旋回处于 A_2 型或 C_2 型,隔夹层发育在 A_2 型晚期和 C_2 型上升半旋回的后期和下降半旋回的初期;在中期旋回上升的晚期,洪泛期形成的大套灰绿色泥岩夹杂着粉砂质泥岩形成连续的隔夹层。

3) 受沉积期次及规模的影响,隔夹层分布在全区差异较大。泥质隔夹层展布特征与东北方物源方向一致,呈东北-西南方向分布。泥质隔层主要分布在 XI^{1-1} 顶部与上覆馆陶组 NG^{5-2} 小层交界处以及 $XI^{1-1}-XI^{1-2}$ 。泥质夹层零星作为薄层夹杂在厚储层中,主要分布在 XI^1 砂岩组中,自下向上夹层数量增多,平均厚度增厚;物性隔夹层在远离物源区的东南部呈带状分布,物性隔层主要分布在 $XI^{1-2}-XI^{2-1}$ 之间,物性夹层与厚储层互层分布,横向延伸小,主要分布在 XI^2 砂岩组中,自下向上物性夹层数量减少,但平均厚度增厚。隔夹层的空间分布受控于沉积环境。在靠近

物源区,即水上分流河道处物源比较充足,水动力强,泥质或粉砂质等不太容易沉积和保存,隔夹层的分布较少且较孤立,仅在两期河道叠置间发育隔层;在远离物源区,即水下分流河道的远端和边缘部位,受河道频繁迁移、改道作用的影响,隔夹层的分布明显增多且厚度明显增大。泥质隔夹层平面分布主要集中在滨湖和分流间湾微相中,物性隔夹层主要分布在水下分流河道分支处及分流间湾处。

4) 隔夹层的厚度和延伸的范围影响着注入蒸汽的有效作用范围。兴 I 油层连续隔层使得蒸汽仅能在横向上运动,限制蒸汽腔在垂直方向上的高度,降低油层的实际泄油厚度,最终降低 SAGD 的采收率;本区采用大套油层合采的方式,纵向蒸汽的超覆效应明显,厚储层内适量夹层的出现,可以有效的遏制蒸汽向上超覆,使油层井段得到较为均匀的动用。

参 考 文 献

- [1] Song Z. Determination of effective thickness for oil reservoirs with extra-low permeability [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27 (6): 103 - 106.
- [2] Gingras M K, Räsänen M, Ranzi A. The significance of bioturbated inclined heterolithic stratification in the southern part of the Miocene Solimoes Formation, Rio Acre, Amazonia Brazil [J]. *Palaios*, 2002, 17(6): 591 - 601.
- [3] 陈义国. 曙一区杜84块兴隆台西超稠油开发技术探讨[J]. 西部探矿工程, 2008, 09: 106 - 109.
Chen Yiguo. Super heavy oil development technology in the west of Xinglongtai Du 84 block, Shul area [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2008, 09: 106 - 109.
- [4] 党彝, 赵虹, 周立发, 等. 辽河油田曙一区杜84块兴隆台油层储层非均质性[J]. 石油与天然气地质, 2002, 04: 382 - 386.
Dang Ben, Zhao Hong, Zhou Lifa, et al. Reservoir heterogeneity of Xinglongtai oil in Du 84 block of Shuguang-1 area, Liaohe layer oil-field [J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 04: 382 - 386.
- [5] 苏生瑞, 张靖宇, 毛彦龙. 辽河油田曙一区杜84块兴隆台油层构造应力场研究[J]. 西安工程学院学报, 2001, 01: 11 - 15.
Su Shengrui, Zhang Jingyu, Mao Yanlong. Studies on the tectonic stress field in the Block 84 of Liaohe oilfield [J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 2001, 01: 11 - 15.
- [6] 吴俊, 樊太亮, 刘慧盈, 等. 辽河西部凹陷曙一区杜84块I组高分辨率层序地层[J]. 石油与天然气地质, 2015(3): 429 - 436 + 446.
Wu Jun, Fan Tailiang, Liu Huiying, et al. High resolution sequence stratigraphy of Xing I Formation in the Du 84 Block, Shu 1 area, Western Sag of Liaohe Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015(3): 429 - 436 + 446.
- [7] Zhang W, Zhang J, Xie J. Research on reservoir bed heterogeneity, interlayers and seal layers and controlling factors of 2 + 3 sands of upper second member, Shahejie Formation, in the west of the Pucheng Oilfield [J]. *Petroleum Science*, 2008, 5(2): 135 - 144.
- [8] Lønne I. Physical signatures of ice advance in a Younger Dryas ice-

- contact delta, Troms, northern Norway: implications for glacier-terminus history [J]. *Boreas*, 1993, 22(1): 59–70.
- [9] 邵志平. 冷家堡油田冷41块沙三油层地质综合研究[D]. 东北石油大学, 2011.
- Gao Zhiping. Comprehensive geology research for S32 formation of Block Leng 41 of Lengjiabao oilfield [D]. Northeast Petroleum University, 2011.
- [10] 隋新光. 曲流河道砂体内部建筑结构研究[D]. 大庆石油学院, 2006.
- Sui Xinguang. Study on internal structure of meandering river channel sand body [D]. Daqing Petroleum Institute, 2006.
- [11] 王国鹏, 何光玉. 双河油田厚油层内夹层分布特征[J]. 石油勘探与开发, 1995, 02: 55–58+100.
- Wang Guopeng, He Yuguang. Distribution of the intercalations in the thick reservoirs, shuanghe oilfield [J]. *Oil Exploration and Development*, 1995, 02: 55–58+100.
- [12] 林承焰, 侯连华, 董春梅, 等. 应用地质统计学方法识别隔夹层—以辽河西部凹陷沙三段为例[J]. 石油实验地质, 1997, 03: 245–251.
- Lin Chengyan, Hou Lianhua, Dong Chunmei, et al. Geostatistics applied to the identification of interbeds, with Sha-3 member of western Liaohe depression taken as an example [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1997, 03: 245–251.
- [13] 张恒山, 闵小刚. 基于MCMC算法的地质统计学相控反演技术[J]. 科技创新与应用, 2013, 09: 13–15.
- Zhang Hengshan, Min Xiaogang. Geostatistical inversion of control based on MCMC algorithm [J]. *Technology Innovation and Application*, 2013, 09: 13–15.
- [14] 瞿子易, 罗鑫, 谢润成, 等. 小波神经网络在隔夹层研究中的应用[J]. 石油天然气学报, 2009, 04: 265–268+432.
- Qu Ziyi, Luo Xin, Xie Runcheng, et al. Application of WNN in the studies of interbeds [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 04: 265–268+432.
- [15] 高磊, 明君, 闫涛, 等. 地震属性综合分析技术在泥岩隔夹层识别中的应用[J]. 岩性油气藏, 2013, 04: 101–105.
- Gao Lei, Ming Jun, Yan Tao, et al. Application of seismic attribute analysis technique to the identification of mudstone interbeds [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 04: 101–105.
- [16] 印森林, 吴胜和, 陈恭洋, 等. 基于砂砾质辫状河沉积露头隔夹层研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 04: 29–36.
- Yin Senlin, Wu Shenghe, Chen Gongyang, et al. A Study on intercalation of sand-gravel braided river deposit based on outcrop section [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2014, 04: 29–36.
- [17] 程皇辉, 侯国栋, 龚飞. 扇三角洲前缘砂砾岩储层隔夹层成因及识别方法[J]. 新疆地质, 2013, 03: 269–273.
- Cheng Huanghui, Hou Guodong, Gong Fei. The interlayer causes and the recognition method of fan delta front sand-conglomerate reservoir [J]. *Xinjiang Geology*, 2013, 03: 269–273.
- [18] 徐寅, 徐怀民, 郭春涛, 等. 隔夹层成因、特征及其对油田开发的影响——以塔中地区海相砂岩储层为例[J]. 科技导报, 2012, 15: 17–21.
- Xu Yin, Xu Huamin, Guo Chuntao, et al. Origin, characteristics and effects on oilfield development of interlayer of shore sandstone reservoir in Tazhong area [J]. *Science & Technology Review*, 2012, 15: 17–21.
- [19] 张吉, 张烈辉, 胡书勇, 等. 陆相碎屑岩储层隔夹层成因、特征及其识别[J]. 测井技术, 2003, 03: 221–224+265.
- Zhang Ji, Zhang Liehui, Hu Shuyong, et al. The genesis and characteristics and identification of intercalations in non-marine reservoir with clastic rock [J]. *Well Logging Technology*, 2003, 03: 221–224+265.
- [20] 王健. 储层隔夹层模型研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- Wang Jian. Research on the modeling of interlayers in reservoir [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [21] 张君劼, 于兴河, 章彤, 等. 滴12井区八道湾组扇三角洲隔夹层对注采效果的影响[J]. 新疆石油地质, 2013, 05: 548–551.
- Zhang Junjie, Yu Xinghe, Zhang Tong, et al. The interlayers and effects on injection-production relationship in fan delta of Badaowan Formation, Di-12 Well Area in Cainan Oilfield [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 05: 548–551.
- [22] 雍自权, 杨锁, 钟韬, 等. 大涝坝地区巴什基奇克组隔夹层特征及分布规律[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2010, 01: 50–54.
- Yong Ziquan, Yang Suo, Zhong Tao, et al. Features and distribution of insulating layers of Bashijiqi Formation in Dalaoba area, Tarim Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2010, 01: 50–54.
- [23] 刘庆松. 雅克拉地区亚格列木组高分辨率层序地层学与储层特征研究[D]. 成都理工大学, 2008.
- Liu Qingsong. Research on high resolution sequence stratigraphy and reservoir characteristics of Yageliemu formation in Yakela [D]. Chengdu University of Technology, 2008.
- [24] 陈景山, 彭军, 周彦, 等. 基准面旋回层序与油层单元划分关系[J]. 西南石油大学学报, 2007, 02: 162–165+196.
- Chen Jingshan, Peng Jun, Zhou Yan, et al. The relation of base level cycle sequence to reservoir divisions [J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 02: 162–165+196.
- [25] Cai J G, Bao Y J, Yang S Y, et al. Research on preservation and enrichment mechanisms of organic matter in muddy sediment and mudstone [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(5): 765–775.
- [26] 王安东. 河流相储层隔、夹层的研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- Wang Andong. The research of interlayers and interbeds in fluvial reservoir [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [27] 王海生. 超稠油驱泄复合立体开发关键参数研究与探讨[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 04: 93–100.
- Wang Haisheng. Research and Discuss on Key Parameters of Steam Flooding and Gravity Drainage Tridimensional Development in Super Heavy Oil Reservoir [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2014, 36(4): 93–100.
- [28] 赵鹏飞, 王勇, 李志明, 武静. 加拿大阿尔伯塔盆地油砂开发状况和评价实践[J]. 地质科技情报, 2013, 01: 155–162.
- Zhao Pengfei, Wang Yong, Li Zhiming, et al. Oil sand Development status and Evaluation practice in Alberta Basin, Canada. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 01: 155–162.