

doi: 10.12029/gc20200115

宋光永, 官清顺, 庞皓, 夏志远, 李森明, 伍劲, 田明智, 黄学兵. 2020. 柴达木盆地西部斜坡区下干柴沟组下段高精度层序地层及砂体构型分析[J]. 中国地质, 47(1): 188–200.

Song Guangyong, Gong Qingshun, Pang Hao, Xia Zhiyuan, Li Senming, Wu Jin, Tian Mingzhi, Huang Xuebing. 2020. High-precision sequence stratigraphy and sandbody architecture of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, 47(1): 188–200 (in Chinese with English abstract).

柴达木盆地西部斜坡区下干柴沟组下段高精度层序地层及砂体构型分析

宋光永¹, 官清顺¹, 庞皓², 夏志远¹, 李森明¹, 伍劲¹, 田明智¹, 黄学兵³

(1. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油青海油田分公司采油五厂, 甘肃 敦煌 736202;
3. 广东省地质局第六地质大队, 广东 江门 529040)

摘要: 精细刻画砂岩储层内部结构, 可为柴达木盆地西部(柴西)斜坡区古近系下干柴沟组下段岩性油气藏勘探开发指明方向。以高精度层序地层学、砂体构型分析理论和方法为指导, 以 3D 地震、钻/测井、岩心资料为基础, 井震联合标定, 综合分析了柴西斜坡区下干柴沟组下段层序地层发育规律与层序格架内砂体结构特点。结果表明, 柴西斜坡区下干柴沟组下段整体为一个区域性湖侵序列, 内部可划分为 2 个三级层序, 4 个四级层序(EMSQ1~4)。下干柴沟组下段沉积期, 由早至晚, A/S(可容纳空间与沉积物供给比值)持续增大, 四级层序结构由向上变深的半旋回型逐渐转变为向上变浅为主、向上变深为次的非对称型。沉积相则由辫状河三角洲平原演变为前缘、滨浅湖亚相。研究区主要发育分流河道、水下分流河道、滩坝 3 类储层砂体, 砂体叠加样式和分布规律与四级层序结构相关。三角洲平原分流河道砂体主要发育于 EMSQ1 中, 砂体相互切割和叠置程度高, 连通性好; 三角洲前缘分流河道砂体主要发育于 EMSQ2~3 中, 多呈叠加-孤立型, 连通性差; 滨浅湖滩坝砂体主要发育于 EMSQ4 中, 砂体呈孤立状, 层内连通性佳, 层间连通性差。指出现阶段岩性油气藏勘探应重点围绕 EMSQ4 层序内发育的滨浅湖滩坝砂体展开。

关键词: 油气; 层序地层; 砂体构型; 油气勘查工程; 柴达木盆地西部; 青海

中图分类号: P 618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2020) 01-0188-13

High-precision sequence stratigraphy and sandbody architecture of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin

SONG Guangyong¹, GONG Qingshun¹, PANG Hao², XIA Zhiyuan¹,
LI Senming¹, WU Jin¹, TIAN Mingzhi¹, HUANG Xuebing³

(1. Petrochina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;

2. PetroChina Qinghai Oil Field Company, Dunhuang 736202, Qinghai, China; 3. No. 6 Geological Party,
Guangdong Geological Bureau, Jiangmen 529040, Guangdong, China)

Abstract: Characterizing the internal architecture of the reservoir of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of

收稿日期: 2018-06-08; 改回日期: 2019-09-16

基金项目: 国家“十三五”科技重大专项(2017ZX05001-002), 中国石油柴达木盆地重大科技专项(2016E-0201-01)联合资助。

作者简介: 宋光永, 男, 1985 年生, 工程师, 主要从事油气储层地质学; E-mail: 305098792@qq.com。

Western Qaidam Basin can provide some reference for the exploration and development of lithologic reservoirs in this area. Guided by high-precision sequence stratigraphy, sandbody architecture theory and method, the authors studied the characteristics of sequence stratigraphy and sandbody architecture in the Lower Xiaganchaigou Formation on the basis of well-seismic combined calibration and comprehensive analysis of seismic, well logging, drilling and core data. The results show that the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin is a large regional lacustrine invasion sequence, which can be divided into 2 third-order sequences and 4 fourth-order sequences (EMSQ1~4). From early to late, A/S (the ratio of accommodating space and sediment supply) continues to increase, whereas the sequence structure of the fourth sequence gradually changes from deepening-upward semi-cycle to non-symmetric deepening-upward full-cycle. Meanwhile, the sedimentary facies changes from braided river delta plain to delta front, and finally changes to shore-shallow lacustrine facies. The stacking patterns and distribution regularity of different types of sandbodies are closely related to the fourth-order sequence structure. The distributary channel sandbodies in delta plain facies are mainly developed in EMSQ1, and cut each other and overlap vertically so that their connectivity is very good. The subaqueous distributary channel sandbodies in delta front are mostly developed in EMSQ2~3, and are isolated or overlapped occasionally so that their connectivity is not very good. The beach-bar sandbodies of the shore-shallow lacustrine facies are chiefly developed in EMSQ4, and are isolated from each other so that their connectivity is bad. It is concluded that the further exploration of lithologic reservoirs should focus on shore-shallow lacustrine beach-bar sandbodies in EMSQ4 sequence.

Key words: oil and gas; sequence stratigraphy; sandbody architecture; oil-gas exploration engineering; Western Qaidam Basin; Qinghai Province

About the first author: SONG Guangyong, male, born in 1985, engineer, engages in the study of petroleum reservoir geology; E-mail: 305098792@qq.com.

Fund support: Supported by National Major Technology Program of 13th Five Year Plan (No. 2017ZX05001-002) and Qaidam Basin Major Science and Technology Program of Petrochina (No. 2016E-0201-01).

1 引言

层序地层学理论在地层划分和对比、地层时空展布、油气成藏规律等根本问题上提出了全新的模式,拓展了油气勘探思路(王继纲等,2010)。随着富油气区各种地质资料的逐步丰富,层序地层学研究不断从盆地级别的层序地层格架和体系域分析向区域性沉积微相、储层乃至烃源岩发育规律预测的高精度层序地层研究深化(夏景生等,2017)。在成熟探区,通过高频层序格架内进行小层划分与对比,搞清砂体时空展布特征、储层流动单元特征,可对有利储集体进行精细的描述、预测与评价,成为岩性油气藏勘探开发的有力保障(邓宏文等,1996;郑荣才等,2000)。露头、岩心、测井和地震数据的综合是高精度层序地层学应用的基础。缺失任何一种数据所得出的认识都会限制层序地层学解释的“分辨率”(Catuneanu et al., 2009)。

柴西斜坡区是柴达木盆地主要的油气聚集区,下干柴沟组下段是该区主要石油勘探目的层。迄

今,已发现的油田其油藏类型均以构造油气藏为主(付锁堂,2016)。近年来,该区已经开始注重岩性油气藏勘探,也相继在七个泉、红柳泉、砂西及跃进斜坡部署了一批岩性圈闭探井,尽管有油气发现但是一直没有取得较大的突破(施辉等,2013;赵谦等,2017)。究其原因,地层及砂体时空展布、油气成藏规律的认识仍然停留在传统的地层划分与对比阶段,迫切需要高精度层序地层学理论与技术支持。

针对以上问题,本文在总结前人研究成果基础上,应用高精度层序地层学理论和方法,通过叠前时间偏移连片三维地震资料与钻井、测井资料紧密结合,建立柴西斜坡区下干柴沟组下段四级层序地层格架,并结合岩心、测井资料,明确了层序格架内的沉积砂体成因类型及分布演化规律,为该区油气藏精细勘探及评价提供可靠依据。

2 区域地质背景

柴达木盆地位于青藏高原北部,是一个中新生代山间陆相含油气盆地(金之钧等,2004)。柴西南

地区夹持于盆地西北边界阿尔金山和西南边界祁漫塔格山之间,东北部以XI号断层为界,东抵东柴山,面积约7500 km²,是新生代发育的前陆拗陷区(图1)(李兰斌等,2010;施辉等,2013)。柴西南区油气资源丰富,区域构造主要包括昆北断阶带、七个泉—砂西、跃进、乌南三大斜坡区和红狮、切克—扎哈泉两大凹陷区(张晓宝等,2011)。两大凹陷为柴西南区奠定了充足的油源基础,三大斜坡区是有利的油气运移与聚集场所,岩性油藏勘探潜力巨大(宗贻平等,2010;王艳清等,2016)。本文所讲柴西斜坡区是指七个泉、红柳泉、砂西尕斯、跃进四个相连地区组成的斜坡区。四者具有统一的构造沉积演化背景,内部层序结构可对比。

根据现有探井揭示地层情况来看(图1),柴西斜坡区纵向上钻遇了八套地层,即更新统七个泉组(Q₁₊₂)、上新统狮子沟组(N₂³)、上油砂山组(N₂²)、下油砂山组(N₂¹)、中新统上干柴沟组(N₁)、渐新统下干柴沟组上段(E₃²)、下干柴沟组下段(E₃¹)、古始新统路乐河组(E₁₊₂)。砂岩粒度自下而上具有粗

(E₁₊₂-E₃¹)—细(E₃²-N₁¹)—粗(N₂³-Q₁₊₂)的变化特征,颜色具有棕红(E₁₊₂-E₃¹)—灰,深灰(E₃²-N₁)—棕褐色(N₂¹-N₂²)—灰黄色(N₂³-Q₁₊₂)的变化特征。反映了柴西南区新生代以来经历了湖侵—湖退沉积演化特点(王艳清等,2014)。本次研究以下干柴沟组下段(E₃¹)为研究对象。该套地层在柴西斜坡区厚度为200~400 m不等,岩性主要为棕灰色砂砾岩、含砾砂岩、灰色细砂岩、粉砂岩与棕灰色、灰色泥岩互层,属于辫状河三角洲—湖泊沉积体系(牟中海等,2014)。

柴西南区新生代构造演化受控于青藏高原的隆升,历经E₁₊₂-E₃¹断陷期,E₃²-N₂¹拗陷期,N₂²-Q构造反转期(付锁堂,2014)。柴西斜坡区自古近纪以来,基本上处于沉降、沉积阶段。早期断陷的构造背景,使得该区形成西高东低的斜坡,尽管后期发生挤压反转,但并未改变这一构造格局。因而柴西斜坡区一直以来就是油气的指向区。红狮凹陷及切克—扎哈泉凹陷的油气主要通过储层与XI号西南倾逆断层及阿拉尔断层等输导层沿上倾方向进

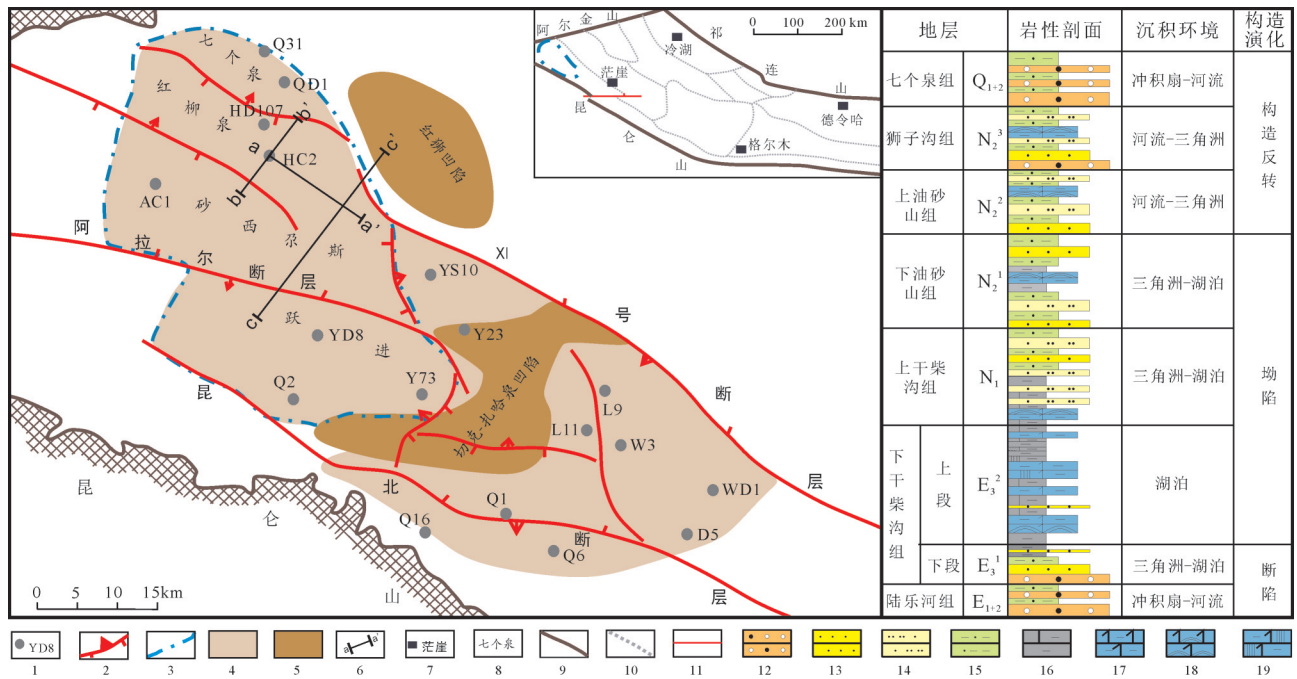


图1 研究区位置及区域背景简图

1—井位;2—逆断层;3—研究区范围;4—斜坡区;5—凹陷区;6—剖面位置;7—城市;8—构造;9—盆地边界;10—构造界线;11—走滑断层;12—砂砾岩;13—中—粗砂岩;14—粉细砂岩;15—砂质泥岩;16—灰质泥岩;17—泥晶灰云岩;18—藻灰云岩;19—含膏灰云岩

Fig.1 Location of the study area and map of regional settings

1—Well;2—Reverse fault;3—Study area;4—Slope area;5—Depression area;6—Profile location;7—City;8—Tectonics;9—Basin boundary;10—Tectonic boundary;11—Strike-slip fault;12—Glutenite;13—Medium-coarse sandstone;14—Fine siltstone;15—Sandy mudstone;16—Lime mudstone;17—Lime dolomiticrite;18—Algal limestone;19—Gypsum dolomite

入柴西斜坡区形成油气藏(牟中海等,2014)。

3 地层层序格架特征

3.1 三级层序及其界面特征

三级层序是以不整合面和与之相对应的整合面为界所限定的一套地层单元。三级层序的识别与划分主要根据地震反射内部结构特征及井震联合标定来确定(Catuneanu et al., 2006; 吴因业等, 2011)。作为复杂的陆相层序,划分时不严格参考地层的时间跨度(徐怀大, 1997)。结合前人对柴西斜坡区层序地层研究成果,根据地震反射终止方式及内部地震相差异识别出研究区下干柴沟组下段3个三级层序界面(图2),分别标记为SB1(T₅)、SB3、SB5(T₄)。

层序界面SB1(T₅)相当于下干柴沟组下段底界,在七个泉、红柳泉、砂西地区为平行不整合面,超覆于路乐河组之上。在盆地周缘及跃进四号地区,下干柴沟组下段直接覆于基岩之上,SB1界面对应为基岩风化壳。地震剖面上表现为上超反射结构特征(图2);界面上下岩性、电性均表现突变接触。录井及岩心资料揭示,层序界面以下为路乐河组棕褐色、紫红色砂质泥岩夹泥质含砾砂岩或基岩风化壳灰白色、灰绿色花岗岩夹变质岩。界面之上为一套厚层杂色砾岩、砂砾岩,常发育大型交错层理、斜层理及块状层理。界面上下电性也有差异,表现为:界面之上低电阻、低自然伽马、高声波时差,界面之下相对高电阻、高自然伽玛、低声波时差。全区可对比性强。

层序界面SB3位于下干柴沟组内部,为A/S(可容纳空间与沉积物供给比值)突变界面,是沉积物源供给增大的结果。地震剖面上显示该界面上下地震反射特征差异较大,界面之上为强振幅、连续性好的特征,界面之下表现为弱振幅、连续性较差的特征(图2)。该界面岩性、电性特征显著,岩性上为一套辫状河三角洲前缘分流河道砂体,电性表现为突变接触,GR、SP曲线表现为低值点,向湖盆方向位于向上粗-向上变细的叠加样式转换处。该界面之上发育的分流河道砂体是红柳泉地区重要的油气聚集有利层段(牟中海等,2014)。

层序界面SB5对应于T₄(相当于下干柴沟组下段顶)反射界面,见顶超地震反射结构特征。在盆地边缘,该界面为超覆不整合界面。界面之上,研究区整体岩石颜色由红色转变为灰色,反映该层序界面是一个氧化环境向还原环境转换的界面(肖传桃等, 2013)。GR、SP曲线低值点,岩、电性呈进积式沉积特征(七30井、七东1井等),AC曲线台阶式突变(红28井、东得1井等),是中期基准面旋回下降-上升转换面,之上GR值又逐渐升高,泥灰岩增多。

由上述3个三级层序界面限定,柴西南区下干柴沟组下段垂向上存在SQ1、SQ2两个三级层序,分别代表2次湖进、湖退和三角洲退积、进积过程(张晓宝等,2011)。

3.2 四级层序及其界面特征

四级层序是高精度层序地层研究的基本内容,是三级层序内部相对明显的次一级沉积基准面变

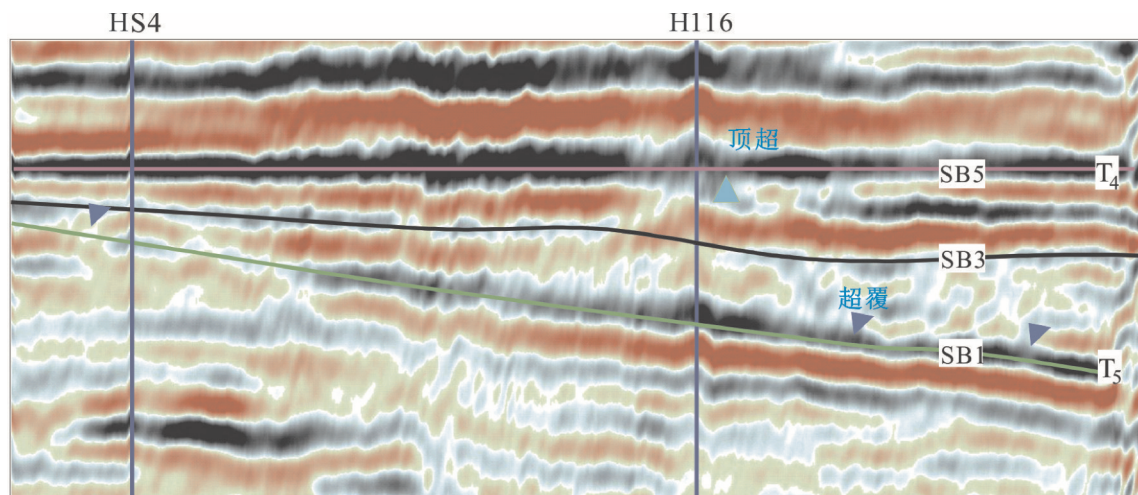


图2 柴西斜坡区下干柴沟组下段地震层序特征图

Fig.2 Seismic sequence characteristics of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin

化形成的沉积旋回,与高频湖平面升降、物源供给和构造沉积的叠加有关(邓宏文等,1996;郑荣才等,2000;夏景生等,2017)。柴西斜坡区下干柴沟组下段四级层序界面主要在井-震精细标定、沉积微相与测井相分析基础上,通过界面上下沉积机制(基准面旋回结构类型和叠加样式)的不同来识别。下干柴沟组下段共划分出4个四级层序(图3),从下至上依次为 EMSQ1、EMSQ2、EMSQ3、EMSQ4。层序界面分别为 SB1~SB5。

EMSQ1(相当于 E₃¹下部):处于新一期湖盆发

育早期(相对于路乐河期),沉积物供给量(S)迅速增多,但可容纳空间(A)增加有限,处于 A/S<<1 阶段(刘翥等,2015);层序由底部冲刷面和向上变深的非对称型结构为特征,缺少下降半旋回。钻井岩性表现为棕灰色厚层砾岩、砂砾岩,粒序特征不明显或略显向上变细粒序特征。粗粒砂岩顶部与泥岩为突变接触,泥岩颜色呈棕红色,岩性不纯,多为含砂砾质泥岩;砂岩段 GR 测井曲线表现为齿化箱形、钟形;岩心沉积相分析表明 EMSQ1 为三角洲平原沉积,由相互叠置的厚层分流河道砂体构成。

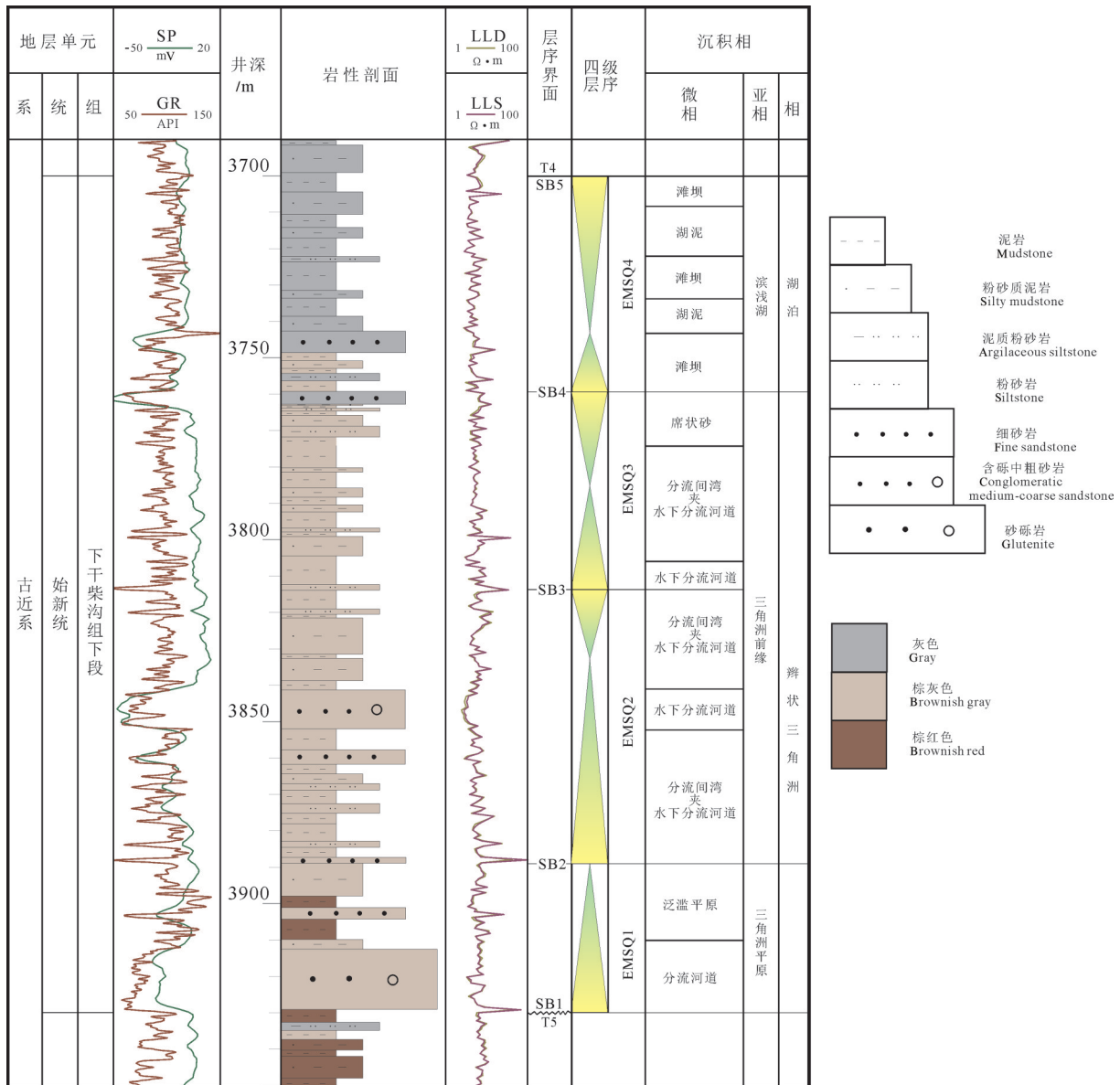


图3 柴西斜坡区下干柴沟组下段沉积相和高精度层序地层综合柱状图

Fig.3 Sedimentary facies and high-resolution sequence stratigraphy of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin

EMSQ2:相比EMSQ1,沉积物供给量减少,可容纳空间继续增加,但仍然处于 $A/S < 1$ 阶段。层序中同时保存有基准面上升和下降半旋回沉积记录,但以向上变深的基准面上升半旋回为主的非对称型结构为特征。钻井岩性表现为向上变细的棕灰色含砾细砂岩,层序顶部出现棕灰色泥岩。砂岩段GR测井曲线表现为齿化钟形,由于沉积物供给量减少,砂岩厚度较EMSQ1明显减薄;EMSQ2为三角洲前缘沉积,由水下分流河道砂体和分流间湾泥岩互层组成的叠置体。

EMSQ3:相比EMSQ2,沉积物供给量继续减少,可容纳空间继续增加,逐渐演化至 $A/S \approx 1$ 阶段。层序中同时保存有基准面上升和下降半旋回沉积记录而具有向上变深后复变浅的对称型结构为特征,层序底部由弱冲刷面或砂泥岩岩性突变面组成。钻井岩性由下而上表现为灰色薄—中层状细砂岩→薄层粉砂岩→棕灰色泥岩→薄—中层状砂岩组成。EMSQ3为三角洲前缘沉积,由水下分流河道砂体和分流间湾泥岩互层组成的叠置体。

EMSQ4:随着沉积物供给持续减少,可容纳空间持续增加,已经演化至 $A/S > 1$ 阶段。层序虽然同时保存有基准面上升和下降半旋回沉积记录,但下降半旋回厚度大于上升半旋回厚度。钻井岩性由下至上表现为灰色薄层粉砂岩→灰色泥岩→薄—中层粉—细砂岩组成。EMSQ4为滨浅湖沉积,由滨浅湖泥岩和滩坝砂岩互层组成的叠置体。由于陆源沉积物供给不足,局部发育碳酸盐岩沉积。

SB1为河道冲蚀底界,下切河道GR测井曲线表现为箱状或钟形形态,层序界面位于下切河道的底部。由于河床滞留沉积常具钙质胶结,电阻率曲线在界面处常呈明显的“尖峰”状。SB2仍然为河道冲蚀底界,与SB1不同的是,此时河道动能弱,砂体厚度和粒度均明显减小,反映在测井曲线上,GR呈现为指状叠加,包络线为钟形形态。最底部的河道滞留层电阻率曲线也具有“尖峰”。SB3及SB4为沉积旋回的转换面,层序界面位于反映进积的反旋回和反映加积或退积的正旋回转换处,反映了基准面下降到最低部位后逐渐升高的过程(石兰亭等,2013)。因此,GR曲线包络线呈现为半圆弧形,层序界面位于半圆弧的中点附近。

4 层序格架内储层砂体类型及发育规律

4.1 储层砂体类型及特征

柴西斜坡区众多探井取心表明,下干柴沟组下段典型储层砂体沉积微相类型分为分流河道、水下分流河道、滩坝3种类型(图4)。其他砂体类型如河口坝、席状砂、决口扇等占比小或者厚度薄,基本不能构成有效储层。河口坝砂体不发育,指示研究区三角洲类型属于浅水缓坡三角洲,以河流作用占绝对优势。该类三角洲在剖面上自陆向湖平缓延伸,倾角极小,没有陡的前缘斜坡,也不能划分出倾角突变的顶积、前积和底积三层构造(李延平等,2005;赖锦等,2018)。

分流河道砂体发育在辫状河三角洲平原亚相中,复合砂体累计厚度7~21 m。取心资料显示,分流河道岩性粗,以棕灰色砂砾岩、砾状砂岩为主,分选中等到较差,杂基含量在4%左右。说明沉积水体能量高,但水流速度不稳定、沉积速度快。砂岩中层理发育且规模大,底部可见底冲刷构造,河床滞留砾石直径在2~5 cm。分流河道砂体通常由多个向上变细的正韵律旋回构成,整体上看粒序特征不明显,正粒序均在单一小层内发育。该单一小层的厚度0.5~1.5 m不等。单一小层岩石组合为:砾岩—砂砾岩—含砾砂岩—粗砂岩,自下而上砾石含量变少、砾径变小、岩性变细,呈渐变粒序结构特征。单层砂体的顶底均为突变接触。伽马曲线以齿化箱形为特征(图4)。

水下分流河道砂体发育在辫状三角洲前缘亚相中,复合砂体厚度2~6 m。岩性以灰色细砂岩、含砾中—粗砂岩为主,成分成熟度及结构成熟度都比分流河道砂体高,说明沉积物搬运距离相对较长,搬运速度较慢。砂岩中层理类型有平行层理、交错层理。底部可见冲刷面,底砾岩相对不发育。垂向上,水下分流河道砂体与分流间湾泥岩构成“二元结构”,由含砾中—粗砂岩相—细砂岩相—粉砂岩相—泥质粉砂岩相—泥岩相组成的岩性组合构成。反映沉积水体能量逐渐减弱的沉积过程,GR曲线形态多为钟形(图4)。

滩坝砂体发育在滨浅湖亚相中,砂体厚度1~4

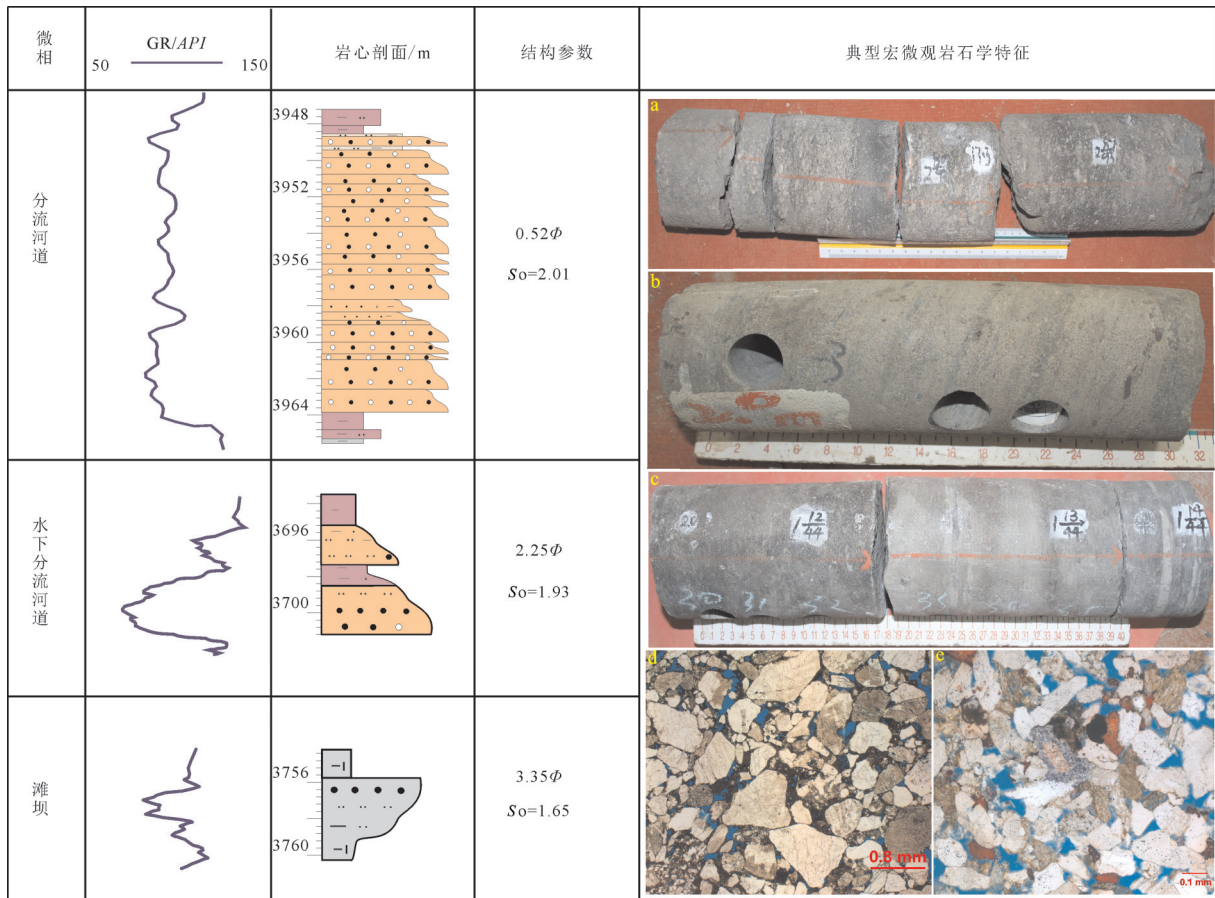


图4 柴西斜坡区下干柴沟组下段储层砂体类型及特征

a—SX51井3955.6~3956.3m,棕灰色泥质细砂岩—砾状粗砂岩,两期正粒序,分流河道微相; b—SX60井3696.0~3696.3m,板状交错层理,灰色含砾中砂岩,水下分流河道微相; c—S102井3756.4~3756.9m,反粒序,低角度交错层理,滩坝微相; d—SX-51井3952.77m含砾中粗砂岩,分选一般,粒间泥质杂基约占4%,分流河道微相; e—S102井3755.95m极细—细粒砂岩,分选较好,粒间杂基含量低,见少量内碎屑,滩坝微相

Fig. 4 Characteristics and genesis of reservoir sandbody of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin

a—Well SX51, 3955.6–3956.3m, brownish gray argillaceous fine sandstone to conglomerate coarse sandstone, two fining–upward sequences, distributary channel; b—Well SX60, 3696.0–3696.3m, tabular cross–bedding, gray conglomeratic sandstone, underwater distributary channel; c—Well S102, 3756.4–3756.9m, a coursing–upward sequence, low–angle cross–bedding, beach–bar microfacies; d—Well SX–51, 3,527.77 m, conglomeratic coarse–medium sandstone, medium sorting, intergranular argillaceous matrix accounting for about 4%, distributary channel; e—Well S102, 3759.95 m, very fine–fine grained sandstone, good sorting, low matrix content, a small amount of internal debris, beach–bar microfacies

m. 岩性以灰色细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩为特征。成分成熟度及结构成熟度最高,层理类型主要为低角度交错层理。垂向上,滩坝砂体通常与滨浅湖泥间互分布,构成向上变粗的反韵律旋回,其岩性组合为:灰色含灰泥岩—灰色泥质粉砂岩—灰色粉砂岩—灰色细砂岩。GR曲线形态多为漏斗形(图4)。滩坝砂体分布于向上变浅旋回的上部。

4.2 层序格架内砂体发育规律

超短期和短期旋回中的砂体结构对基准面升降引起的水深、水动力条件、沉积强度和作用方式的变化最为敏感,其时空展布和演化规律,可为小

层砂体划分和等时追踪对比为依据,以及对储集砂体的几何形态预测、评价和进行精细描述,提供重要的地质信息(邓宏文等,1996;王涛等,2014)。

基于岩心沉积微相分析、测井相分析和高精度层序地层分析,建立了柴西南区下干柴沟组下段连井骨架砂体对比剖面(图5,图6),开展了下干柴沟组下段四级层序格架内砂体结构特征及演化模式研究。EMSQ1时期,可容纳空间较小,物源供给很充足,处于A/S<<1阶段。层序叠加样式表现为一个独立的上升半旋回,缺失下降半旋回。由连井对比剖面可以看出,砂体主要发育于旋回中下部,砂

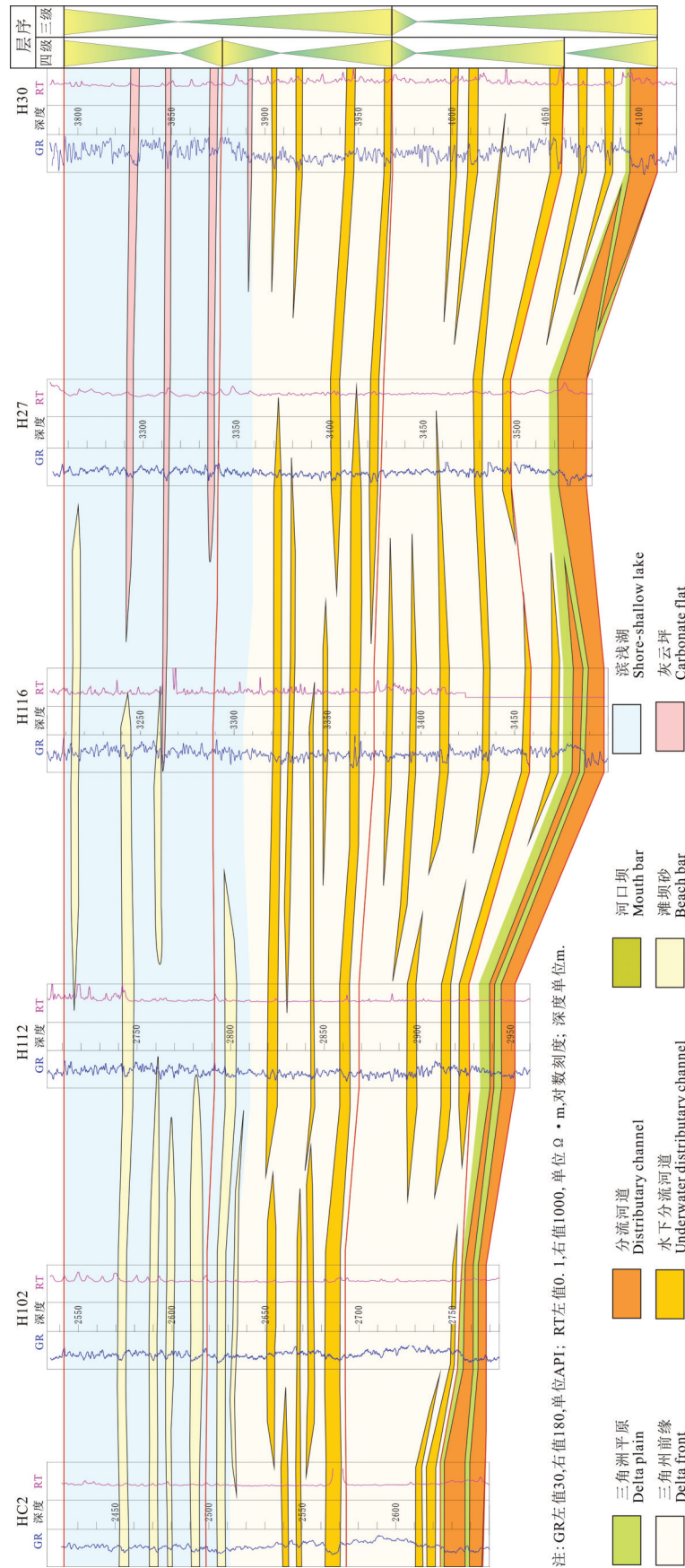


图5 柴西斜坡区下干柴沟组下段层序格架内砂体结构剖面(顺物源方向,图1中aa'剖面)
 Fig. 5 Sandbody architecture section in sequence stratigraphic framework of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin (parallel to source direction)

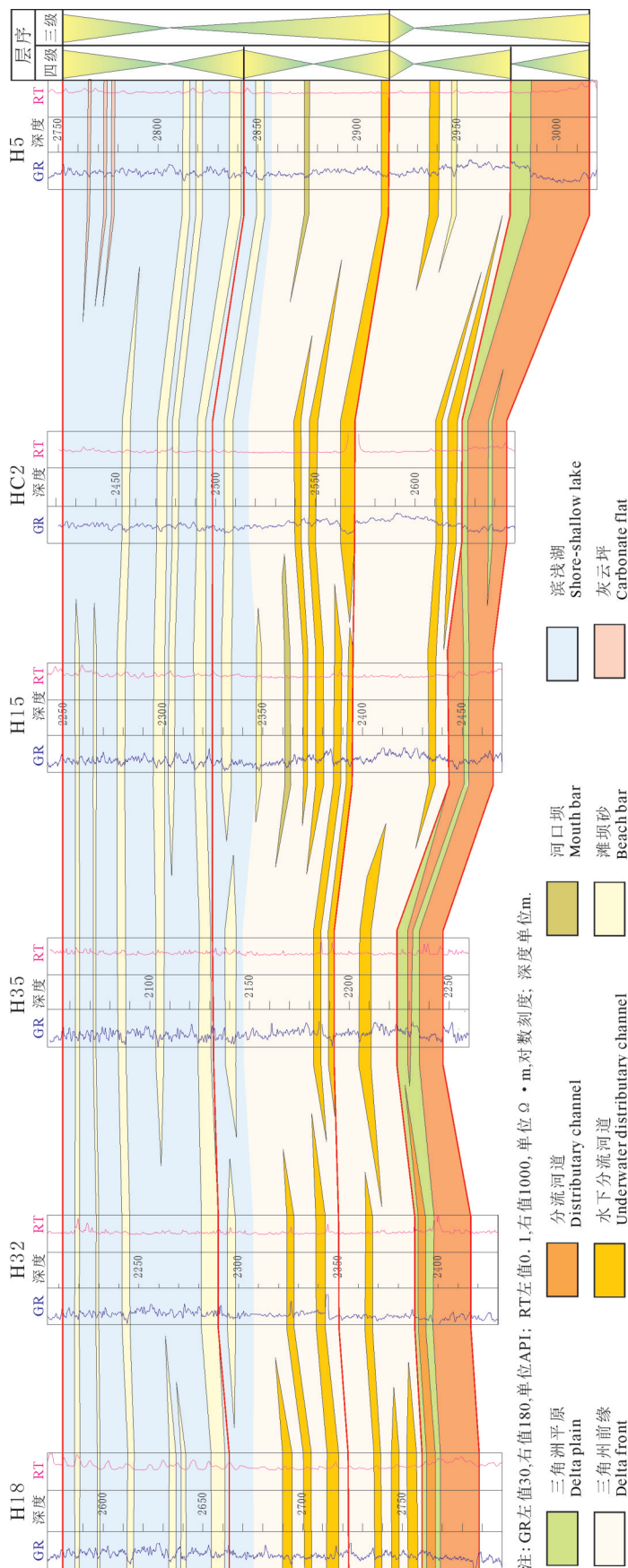


图6 柴西斜坡区下干柴沟组下段层序格架内砂体结构剖面(垂直物源方向,图1中bb'剖面)
Fig. 6 Sandbody architecture section in sequence stratigraphic framework of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin (vertical to source direction)

体纵向切割叠加、横向相互拼接,砂体宽而广,复合河道砂体内部泥质隔(夹)层发育程度低,储层连续性好,非均质性较弱;顺着物源方向,砂体厚度呈明显减薄趋势。砂体骨架由辫状河三角洲平原分流河道构成,沉积水体能量大,岩性以砾岩、砂砾岩为主。EMSQ2、EMSQ3时期,可容纳空间逐步增大,但物源供给量有所减少,A/S缓慢增大,处于A/S<1阶段。层序叠加样式为以上升半旋回为主的不完全对称型向上升、下降半旋回对称型过渡,发育辫状河三角洲前缘沉积,纵向上由多套水下分流河道砂体构成,呈叠加-孤立型、侧向延伸不远,河道砂体之间泥质隔(夹)层广泛发育,骨架砂体位于基准面上半旋回的底部,储层连续性差,非均质性强。EMSQ4时期,可容纳空间快速增加,物源供给进一步减少,研究区大部分进入湖泊沉积范围。层序叠加样式转变为以下降半旋回为主的非对称型,发育滨浅湖沉积,滩坝砂体纵向上呈孤立型、横向上沿湖岸线方向(垂直物源方向)延伸远。储层连续性较好,非均质性弱。层序发育特征与柴西南湖盆演化特征一致,以退积叠加样式为特征。

通过上述对比,不难发现砂体结构与四级层序旋回结构特征、A/S比值具有良好对应关系(图7)。基准面的上升和下降影响A/S比值的变化,进而对砂体发育类型和几何形态分布特征产生影响(孙春燕等,2017)。随着A/S比值增大,单层砂体厚度减薄,单砂体之间叠置概率降低,砂体结构模型由切叠型向侧叠型过渡,最终转变为孤立型,导致油藏

规模变小。

5 勘探策略

柴西南斜坡地区下干柴沟组下段具备大型构造岩性油气藏形成的地质条件。与其紧邻的红狮凹陷及切克一扎哈泉2大生油凹陷,发育优质烃源岩,为构造岩性油气藏形成提供了油源条件。而柴西南斜坡区整体的斜坡构造背景为油气运移聚集创造了先决条件(张晓宝等,2011)。根据上述层序格架及砂体构型特点,结合该区含油气系统规律综合分析认为,EMSQ1发育三角洲平原分流河道砂体,纵向相互切割叠置,累计厚度大,横向连片分布,连通性好,主要可发育构造油气藏,勘探目标应以有断层封堵的构造高点为重。如已发现投产的尕斯地区,发育成排成带的断背斜和断鼻等构造。以此为基础的尕斯油田自投产以来迄今已连续24年稳产百万吨,为青海油田石油工业的发展贡献巨大(付锁堂,2016)。但此类构造圈闭绝大多数已经被钻探,剩余勘探潜力小。EMSQ2、EMSQ3发育三角洲前缘分类河道砂体,砂体规模及横向连通性均不及EMSQ1,可发育构造或岩性油气藏,应在分流河道砂体精细刻画基础上,优选构造高点为钻探目标。但砂体规模不大及封堵条件不确定使得该层序勘探风险较大。EMSQ4发育滨浅湖滩坝砂体,砂体厚度虽小,但具有离烃源岩距离近、侧向封堵及顶板封盖条件佳等优越成藏条件,而且砂体面积大、平面展布稳定,较易形成小规模高丰度岩性油

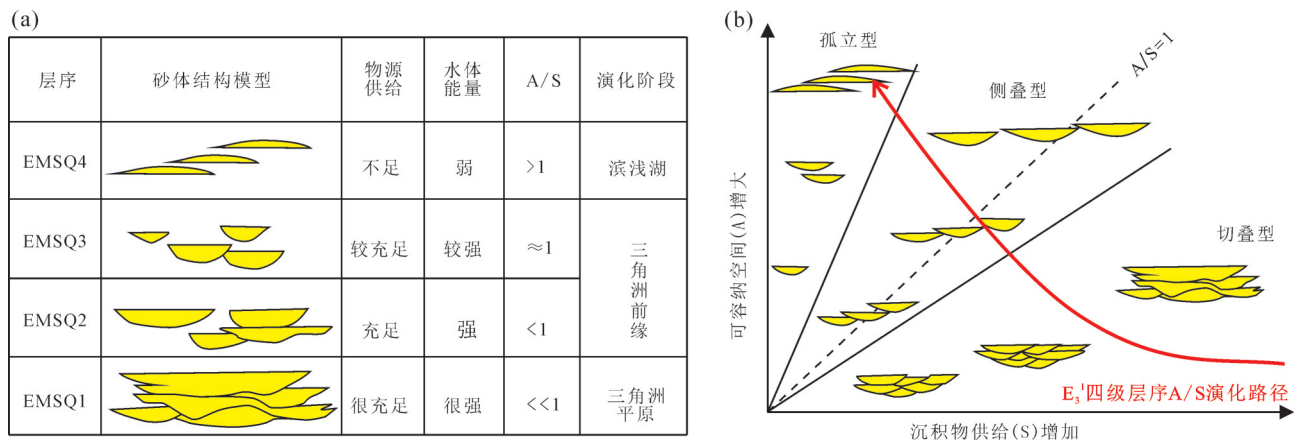


图7柴西斜坡区下干柴沟组下段层序格架内砂体结构特征(a)及成因分析(b)

Fig. 7 Sandbody architecture model (a) and its genesis (b) in sequence stratigraphic framework of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin

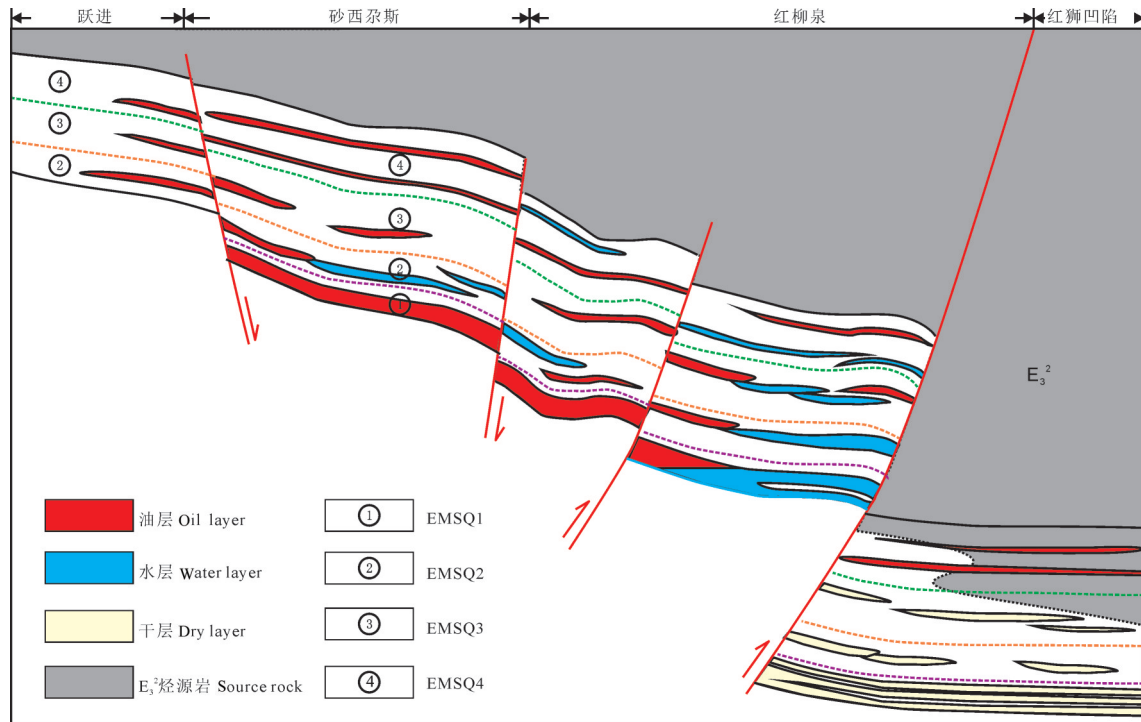


图8 柴西斜坡区下干柴沟组下段基于层序格架内砂体结构的成藏模式图(图1中cc'剖面)

Fig. 8 Reservoir-forming model of the Lower Xiaganchaigou Formation in the slope area of Western Qaidam Basin based on sandbody architecture in sequence stratigraphic framework

气藏(图8),是现阶段柴西南斜坡区岩性油气藏勘探的重点目标。通过滩坝砂体形成机理研究、借助地震沉积学方法可进一步明确砂体平面展布规律,从而预测该类岩性油气藏时空分布。

6 结 论

(1)对柴西斜坡区下干柴沟组下段开展高精度层序地层研究,识别出了3个三级层序界面,2个四级层序界面,自下而上划分出EMSQ1、EMSQ2、EMSQ3、EMSQ4等4个四级层序,并建立了研究区四级层序地层对比格架。根据基准面升降演化规律,明确EMSQ1层序为向上变深的半旋回型,EMSQ2、EMSQ3层序主要为向上变深的非对称型旋回,EMSQ4层序主要为向上变深复变浅的对称型旋回。层序发育特征与柴西南湖盆演化特征一致,以退积叠加样式为特征。

(2)下干柴沟组下段内部骨架砂体由分流河道、水下分流河道、滩坝三类砂体构成。受基准面旋回结构类型和叠加样式的控制,4个四级层序的砂体结构特征不同。EMSQ1发育分流河道砂体,呈

叠置型,单层厚度大,并相互叠置和切割,横向连通性好;EMSQ2、3发育水下分流河道砂体,呈侧叠-孤立型,横向连通性一般;EMSQ4发育滩坝砂体,纵向上呈孤立型,向物源方向进积。砂体结构与基准面旋回结构特征、A/S比值具有良好对应关系。

(3)基于层序格架内砂体构型的成藏条件探讨分析,认为EMSQ1层序剩余勘探潜力小,EMSQ2、3层序勘探风险较大,EMSQ4层序容易形成小规模高丰度岩性油气藏,是现阶段柴西南斜坡区岩性油气藏勘探的重点攻关目标。

致谢:感谢中国石油青海油田分公司勘探开发研究院油藏评价室全体同事提供资料支持和技术支撑;感谢审稿专家和编辑部老师给予的宝贵意见和建议!

References

- Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P. 2009. Towards the standardization of sequence stratigraphy[J]. *Earth-Science Reviews*, 92 (1/2):1-33
- Catuneanu O. 2006. *Principles of Sequence Stratigraphy*[M]. Amsterdam Elsevier.

- Deng Hongwen, Wang Hongliang, Li Xizhe. 1996. Identification and correlation techniques of sequence stratigraphic base-levels and their application[J]. *Oil & Gas Geology*, 17(3):177-184 (in Chinese with English abstract).
- Fu Suotang. 2014. Natural gas exploration in Qaidam basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 19(4): 1-10(in Chinese with English abstract).
- Fu Suotang. 2016. Potential oil and gas exploration areas in Qaidam Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 21(5):1-10(in Chinese with English abstract).
- Jin Zhijun, Zhang, Mingli, Tang Liangjie, Li Jingchang. 2004. Evolution of Meso-Cenozoic Qaidam basin and its control on oil and gas[J]. *Oil & Gas geology*, 25(6):603-608(in Chinese with English abstract).
- Lai Jin, Han Nengrun, Jia Yunwu, Ji Yushan, Wang Guiwen, Pang Xiaojiao, He Zhibo, Wang Song. 2018. Detailed description of the sedimentary reservoir of a braided delta based on well logs[J]. *Geology in China*, 45(2):304-318(in Chinese with English abstract).
- Li Lanbin, Sun Lina, Sun Jiazhen, Wu Guangda, Liu Dong. 2010. Analysis of fault features in southwest Qaidam basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 45(3):443-447(in Chinese).
- Li Yanpin, Chen Shumin, Song Yongzhong, Wang Shibo, Song Tiexing, Li Ruyi. 2005. Sedimentary characteristics of shallow lake - delta system in Quan 3, 4 Formation, Fuyang Oilfield, Daqing Changyuan and its eastern area[J]. *Daqing Petroleum Geology & Development*, 24(5):13-16(in Chinese).
- Liu Jiang, Zheng Rongcai, Wang Haihong, Hou Changbin, Wang Changyong. 2015. High resolution sequence analysis and sand body prediction of Chang 9 oil set in Hongjingzi area, Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 42(2):710-719(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhanguo, Zhu Chao, Li Senming. 2017. Geological features and exploration fields of tight oil in the Cenozoic of western Qaidam Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 44(2): 196-204(in Chinese with English abstract).
- Mou Zhonghai, Ma Lining, Ma Dade, Liao Rui, Xu Liangwei. 2014. Main Controlling factors of lithologic reservoirs of Lower Ganchaigou Formation below Hongliuquan Structure of Qaidam basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 19(6):24-32(in Chinese with English abstract).
- Shi Lanting, Pan Shuxin, Guo Weihua, Wang Jiangong, Wang Tianqi, Dong Lihong. 2010. Sequence boundary characteristics and its high resolution sequence stratigraphic framework of the Middle oil-bearing beds in the south of Songliao Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(2):235-242(in Chinese with English abstract).
- Shi Hui, Liu Zhen, Lian Liangda, Mao Yakun, Zhang Qingxue, Yang Qianzheng. 2013. Enrichment regularity of lithologic reservoirs in plateau saline lacustrine basin: taking the southwestern Qaidam basin for example[J]. *Natural Gas Geoscience*, 24(4):701-711(in Chinese with English abstract).
- Sun Chunyan, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, Deng Qingjie. 2017. Characteristics of reservoir sand bodies within high-resolution sequence framework: A case from the 3rd and 4th members of Quantou Formation in Zhou 311 area, northern Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 38(6):1019-1031(in Chinese with English abstract).
- Wang Jigang, Liu Feng, Mu Pengfei, Dong Bo, Cui Ling. 2010. Application of sequence stratigraphy in prediction of lithologic reservoirs: A case study of the Lower Member of Xiaganchaigou Formation in Qigequan area, southwest of Qaidam Basin[J]. *Journal of Yangtze University (Nat. Sci. Edit)*, (2):216-219(in Chinese).
- Wang Tao, Hou Mingcai, Wang Wenkai, Wang Feng, Wu Heng, Su Zhongtang. 2014. Sand body configuration of sequence stratigraphic framework of the 8th Member of the Permian Lower Shihezi Fm in Zhao 30 wellblock, eastern Sulige Gas Field, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 34(7):27-33(in Chinese).
- Wang Yanqing, Liu Yuntian, Huang Geping. 2014. Paleogene - Neogene Sedimentary System and Hydrocarbon Distribution in the Western Qaidam Basin[M]. *Petroleum Industry Press* (in Chinese).
- Wang Yanqing, Zhang Yongshu, Xia Zhiyuan, Yang Tiyan, Song Guangyong, Xu Feng, Liu Zhanguo. 2016. An analysis of Cenozoic hydrocarbon generation potential and salty characteristics of Yiliping depression in Qaidam basin[J]. *Geology in China*, (4): 1317-1330(in Chinese with English abstract).
- Wu Yinye, Zhu Rukai, Luo Ping, Yuan Xuanjun, Hou Lianghua, Zhang Tianshu. 2011. Advance on sedimentology and sequence stratigraphy: A summary from 18th international sedimentary congress[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(1): 199-206(in Chinese with English abstract).
- Xia Jingsheng, Liu Xiao, Li Wenhua, Zhang Boming, Wen Wen, Li He, Fan Rong, Xue Lin. 2017. Study on high-resolution sequence stratigraphy and sedimentary system of middle-deepbeds on western slope, Nanpu sag[J]. *China Petroleum Exploration*, 22(5): 72-81(in Chinese with English abstract).
- Xu Huaida. 1997. Some problems in study of continental sequence stratigraphy[J]. *Oil & Gas Geology*, 18(2):83-89(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaobao, Ping Zhongwei, Zhang Daowei, Wang Qi, Tao Huifei, Wang Guocang. 2011. Formation conditions of structural lithological oil and gas reservoirs and exploratory prospects in the southwest of the Qaidam Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 22(2):240-249(in Chinese with English abstract).
- Zhao Qian, Zhou Jiangyu, Li Lanbin, Liu Xinyao, Zhang Chen, Guang Jiamin. 2017. Analysis of Oligocene sedimentary characteristics and subtle oil reservoir prediction in the Qigequan area, Qaidam basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 24(4):22-

- 29 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai, Yin Shiming, Peng Jun. 2000. Sedimentary dynamic analysis of sequence structure and stacking pattern of base-level cycle[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3):369-375(in Chinese with English abstract).
- Zhong Yiping, Fu Suotang, Zhang Daowei, Zhang Yongshu. 2010. The idea and method for exploration of lithologic reservoir in south area in western Qaidam basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 31(5):460-462(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 邓宏文, 王洪亮, 李熙喆. 1996. 层序地层地层基准面的识别、对比技术及应用[J]. *石油与天然气地质*, 17(3):177-184.
- 付锁堂. 2014. 柴达木盆地天然气勘探领域[J]. *中国石油勘探*, 19(4): 1-10.
- 付锁堂. 2016. 柴达木盆地油气勘探潜在领域[J]. *中国石油勘探*, 21(5):1-10.
- 金之钧, 张明利, 汤良杰, 李京昌. 2004. 柴达木中生代盆地演化及其控油气作用[J]. *石油与天然气地质*, 25(6):603-608.
- 赖锦, 韩能润, 贾云武, 季玉山, 王贵文, 庞小娇, 贺智博, 王松. 2018. 基于测井资料的辫状河三角洲沉积储层精细描述[J]. *中国地质*, 45(2): 304-318.
- 李兰斌, 孙丽娜, 孙家振, 吴光大, 刘东. 2010. 柴西南地区断裂特征分析[J]. *石油地球物理勘探*, 45(3):443-447.
- 李延平, 陈树民, 宋永忠, 王始波, 宋铁星, 李如一. 2005. 大庆长垣及以东三、四段扶杨油层浅水湖泊-三角洲体系沉积特征[J]. *大庆石油地质与开发*, 24(5):13-16.
- 刘攀, 郑荣才, 王海红, 侯长冰, 王昌勇. 2015. 鄂尔多斯盆地红井子地区长9油层组层序分析与砂体预测[J]. *中国地质*, 42(2):710-719.
- 刘占国, 朱超, 李森明. 2017. 柴达木盆地西部地区致密油地质特征及勘探领域[J]. *石油勘探与开发*, 44(2):196-204.
- 牟中海, 马力宁, 马达德, 廖锐, 徐良威. 2014. 柴达木盆地红柳泉构造下干柴沟组下段岩性油藏主控因素[J]. *中国石油勘探*, 19(6): 24-32.
- 石兰亭, 潘树新, 郭维华, 王建功, 王天奇, 董丽红. 2010. 松辽盆地南部上白垩统中部组合层序界面的识别标志及高分辨率层序地层格架[J]. *沉积学报*, 27(2):235-242.
- 施辉, 刘震, 连良达, 毛亚昆, 张勤学, 杨乾政. 2013. 高原咸化湖盆岩性油气藏富集规律——以柴达木盆地西南区为例[J]. *天然气地球科学*, 24(4):701-711.
- 孙春燕, 胡明毅, 胡忠贵, 邓庆杰. 2017. 高分辨率层序格架内储层砂体发育特征——以松辽北部州311地区泉三、泉四段为例[J]. *石油与天然气地质*, 38(6):1019-1031.
- 王继纲, 刘丰, 穆鹏飞, 董波, 崔玲. 2010. 层序地层学在岩性油气藏预测中的应用——以柴西南七个泉地区下干柴沟组下段(E31)为例[J]. *长江大学学报(自科版)*, 7(2):216-219.
- 王涛, 侯明才, 王文楷, 王峰, 吴恒, 苏中堂. 2014. 苏里格气田召30井区盒8段层序格架内砂体构型分析[J]. *天然气工业*, 34(7): 27-33.
- 王艳清, 刘云田, 黄革萍. 2014. 柴达木盆地西部地区古近—新近系沉积体系与油气分布[M]. 北京:石油工业出版社.
- 王艳清, 张永庶, 夏志远, 杨体源, 宋光永, 徐峰, 刘占国. 2016. 柴达木盆地一里坪拗陷新生界咸化特征及生烃潜力分析[J]. *中国地质*, (4): 1317-1330.
- 吴因业, 朱如凯, 罗平, 袁选俊, 候连华, 张天舒. 2011. 沉积学与层序地层学研究新进展——第18届国际沉积学大会综述[J]. *沉积学报*, 29(1):199-206.
- 夏景生, 刘晓, 李文华, 张博明, 文雯, 李赫, 樊蓉, 薛林. 2017. 南堡凹陷西斜坡中深层高精度层序地层及沉积体系研究[J]. *中国石油勘探*, 22(5):72-81.
- 肖传桃, 何彬, 冯镇涛. 2013. 柴西南地区始新一中新统层序及其对岩性圈闭的控制[J]. *新疆石油地质*, 34(4): 378-385.
- 徐怀大. 1997. 陆相层序地层学研究中的某些问题[J]. *石油与天然气地质*, 18(2):83-89.
- 张晓宝, 平忠伟, 张道伟, 王琪, 陶辉飞, 王国仓. 2011. 柴西南地区E31构造岩性油气藏形成条件及有利勘探区带[J]. *天然气地球科学*, 22(2):240-249.
- 赵谦, 周江羽, 李兰斌, 刘馨遥, 张臣, 光佳敏. 2017. 柴达木盆地七个泉地区渐新世沉积特征与隐蔽油藏预测[J]. *油气地质与采收率*, 24(4):22-29.
- 郑荣才, 彭军, 尹世民. 2000. 基准面旋回结构与叠加样式的沉积动力学分析[J]. *沉积学报*, 18(3):369-375.
- 宗贻平, 付锁堂, 张道伟, 张永庶. 2010. 柴西南岩性油藏勘探思路及方法[J]. *新疆石油地质*, 31(5):460-462.