

鄂尔多斯盆地桥沟湾地区上三叠统 延长组层序格架内储层发育规律

潘杨辉^{1,2}, 魏钦廉³, 王宝⁴, 肖玲³

1. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059
2. 四川省核工业地质调查院, 成都 610061
3. 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安 710059
4. 中国石油青海油田分公司采油二厂, 青海海西州 816400

摘要 应用高分辨率层序地层学理论、测井小波分析及频谱分析方法, 对延长组层序地层单元进行定量识别, 共识别出 5 个长期、21~25 个中期基准面旋回层序。通过层序格架内储层发育规律分析, 认为可容空间与沉积物供应量的比值 (A/S) 及层序界面对储层的空间展布和物性变化具有明显的控制作用, 最有利的储层发育位置出现在长期基准面上升早期和下降晚期, 特别是中期和长期两个级次基准面相互重叠的界面两侧, 酸性孔隙流体沿着界面运移, 有利于形成次生孔隙, 对改善储集层储集性能有利。与传统层序地层方法相比, 该方法能消除人工划分层序的不确定因素, 提高旋回划分、对比的精度和准确性, 提高油气勘探成功率。

关键词 层序格架; 基准面旋回; 频谱分析; 层序界面; 延长组

中图分类号 P539.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.35.005

Distribution of Reservoirs in Sequence Stratigraphic at the Upper Triassic Yanchang Formation at Qiaogouwan Area in Erdos

PAN Yanghui^{1,2}, WEI Qinlian³, WANG Bao⁴, XIAO Ling³

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. Sichuan Institute of Nuclear Geology, Chengdu 610061, China
3. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710059, China
4. No.2 Oil Production Plant, Qinghai Oilfield Company of PetroChina, Haixi 816400, Qinghai Province, China

Abstract The high-resolution sequence stratigraphic theories, and the methods of wavelet analysis and frequency spectral analysis were used to define the sequence stratigraphic framework of the Upper Triassic Yanchang Formation, which have five long base-level cycles and 21 to 25 middle base-level cycles. Based on studying the relationship between the sequence stratigraphic chronostratigraphic framework and reservoir development, it is found that the development and distribution of reservoir has been apparently controlled by the A/S and boundary of sequence stratigraphy of Yanchang Formation. Sandstone reservoirs with relatively good properties occurred mainly at the early stage of the ascending long base-level cycle and the late stage of the descending middle base-level cycle, especially at both sides of the interface of long-term base level cycle and middle-term level cycles. Sour fluids migrate along the interface, favoring the formation of induced porosity, which can improve the reservoir. Compared with traditional method, this method can eliminate the uncertainty of artificial division of sequence, improve precision and accuracy of cycle division and correlation, and improve the success rate of oil and gas exploration.

Keywords sequence framework; base-level cycle; frequency spectral analysis; sequence boundary; Yanchang Formation

收稿日期: 2013-07-02; 修回日期: 2013-11-01

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目 (11JK0745)

作者简介: 潘杨辉, 博士研究生, 研究方向为层序地层与沉积相, 电子信箱: 38103445@qq.com; 魏钦廉 (通信作者), 副教授, 研究方向为石油地质, 电子信箱: wql@xsyuedu.cn



0 引言

以基准面变化为驱动机制的高分辨率层序地层学自提出以来,其理论和方法日臻完善,其新颖的思路及技术方法在盆地储层预测与对比等方面取得了成功的应用和发展,并在中国石油勘探开发领域取得了显著的经济效益^[1-3]。目前,国内外基于测井资料的层序地层分析方法多采用手工作业及定性研究,在划分的精度、量化的科学性及其划分的效率等方面仍有待进一步的提高。

鄂尔多斯盆地东北部延长组层序地层及其与储层分布规律研究尚不系统和深入,仅对长6油层组以上的层位延长组层序地层划分不同级次层序,并分析各级次层序的构成特征,而对延长组长6油层组以下的层序地层划分研究程度尚浅,从而直接影响寻找新的深层隐蔽油气藏和扩大勘探领域。此外,有关研究区层序地层研究成果还存在较大分歧^[4-8],且很少探讨储层对层序发育的响应关系。本文采用测井小波分析及频谱分析方法对层序地层单元进行定量识别,以期消除人工划分层序的不确定因素,提高旋回划分、对比的精度和准确性;并讨论层序格架内的A/S、层序界面与储层发育的关系,以期提高油气勘探成功率。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地处于华北地台的西部,是一个自中生代以来在稳定的华北地台上形成的大型内陆坳陷盆地,晚三叠世延长组沉积时空演化反映了这个大型淡水湖盆从发生、发展至消亡的完整过程。研究区处于盆地内最大的构造单元——陕北斜坡之上,为一平缓的西倾单斜,地层倾角小于1°,坡降6~8m/km,其上发育多排轴向北东—南西向或近东西的鼻状构造带。

延长组是鄂尔多斯盆地中生界时期内陆湖盆形成后的第一套生储油岩系,也是鄂尔多斯盆地主要勘探开发层位,其与下伏中三叠世的纸坊组呈平行不整合接触,与上覆早侏罗世富县组或延安组也是平行不整合接触。根据岩性和古生物特征,将延长组自下而上划分为5段,再结合其岩性、电性及含油性的差异,将5个岩性段进一步从下往上划分长10~长1油层组。

2 高分辨率层序划分

自然界中复杂周期运动往往都是由多个不同简单运动周期叠加而成的,地层测井序列是一定时间序列内各种沉积事件的物质记录,它能较好反映沉积旋回性特征^[9-12]。通过将不同周期沉积旋回信息叠加的测井曲线小波变换分解为各自不同级别的周期沉积旋回,以不同尺度曲线形态展示出来。经过一维连续小波变换后,得到一系列与深度和尺度相对应的小波变换系数,其地质意义:测井数据经过小波变换后,通过分析多种伸缩尺度下小波系数曲线所表现的明显周期性特征,与层序各级层序界面(特别是长期旋回层序界面)建立一定的对应关系,并作为测井层序地层划分的依据^[1]。

本文把自然伽马(GR)测井信号进行多层分解,研究认为d10层次测井沉积回旋界面与露头剖面或地震剖面中长期层序界面较吻合,它代表原始曲线中与长、基准面旋回相对应的低频部分。利用小波分析的这种自适应特征对测井曲线进行多尺度分析,选取信号中代表地质长周期的低频部分,用其识别大的长期旋回层序,用中等频率周期识别中期旋回层序,用高频旋回识别短期旋回。从高44井延长组GR曲线小波(dmey小波)特征看,该组小波曲线有5个较明显沉积旋回周期(图1);高44井中期层序旋回频谱分析曲线波峰I为0.003033,对应的中期旋回地层旋回厚度是41.2m;短期层序旋回频谱分析曲线波峰II为0.008372,对应的短期旋回地层旋回厚度是15.0m(图2)。

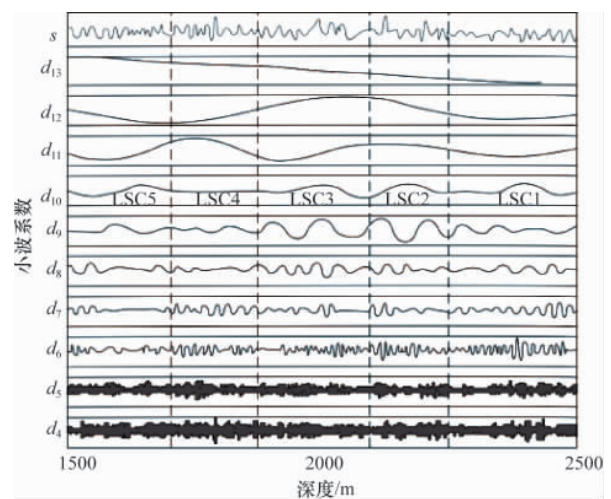


图1 高44井测井曲线小波分析
Fig. 1 Wavelet analysis of logging of Gao 44 well

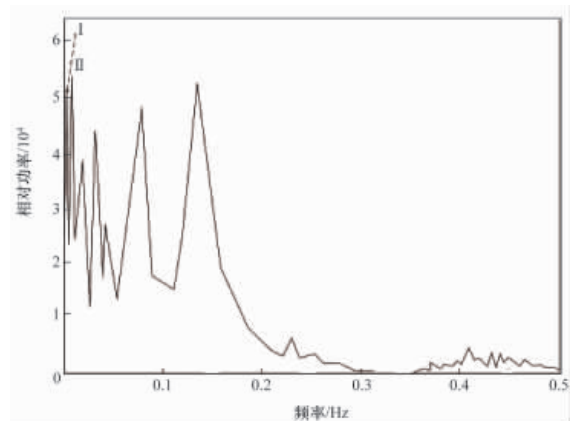


图2 高44井频谱分析曲线
Fig. 2 Frequency spectral analysis of Gao 44 well

在沉积相、小波及频谱分析基础上,对研究区延长组进行了高分辨率层序划分和对比,提出长期、中期两个级别的层序地层综合划分方案,将延长组划分为5个长期(LSC)、21~25个中期(MSC)基准面旋回层序(图3),从LSC1→LSC3→LSC5沉积环境为曲流河三角洲前缘→浅湖→三角洲平原沉积,反映了沉积环境水深逐渐变深后又逐渐变浅的过程。

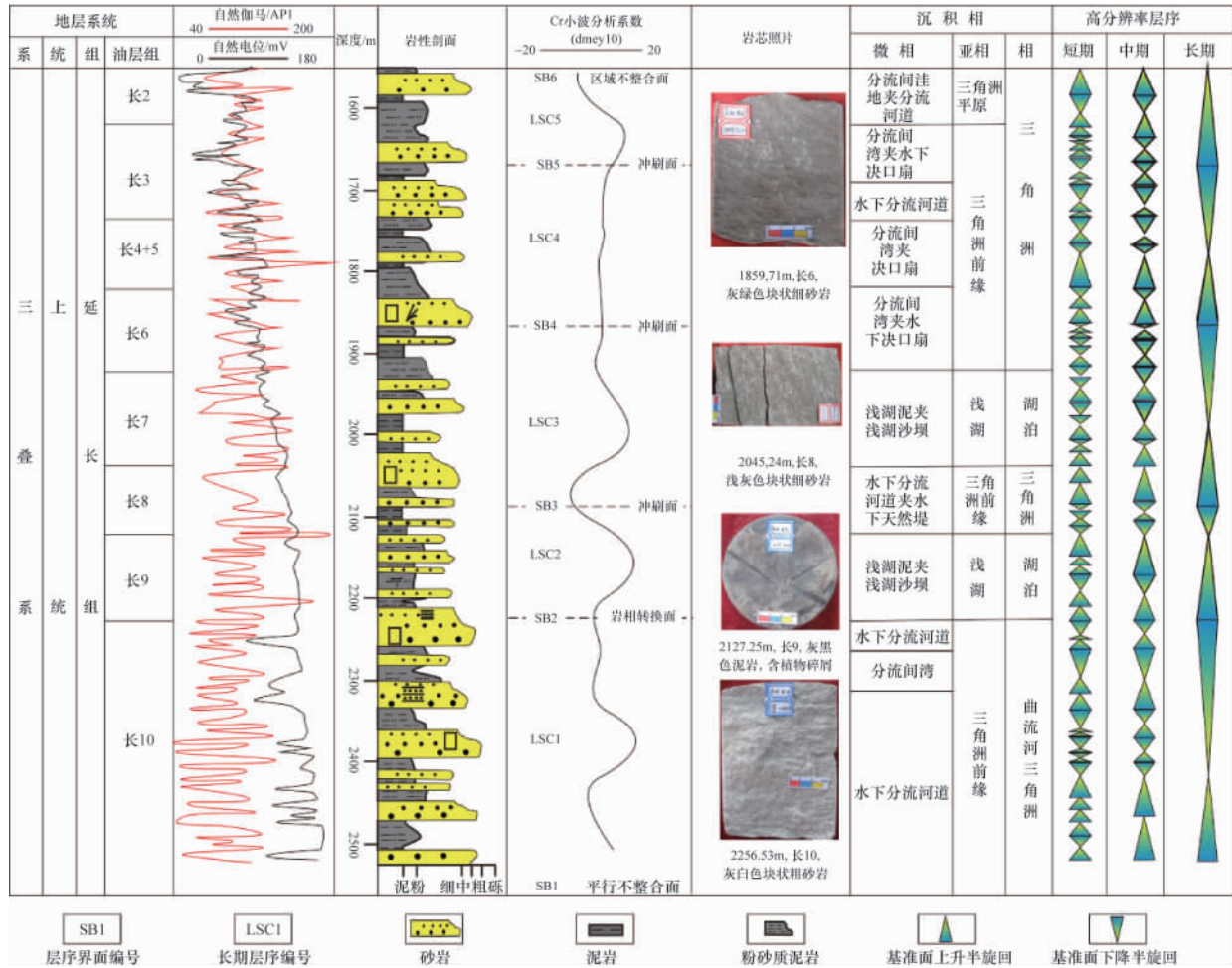


图3 高44井高分辨层序划分

Fig. 3 High-resolution sequence stratigraphic division of Gao 44 well

3 层序格架内储层发育规律

3.1 层序格架内 A/S 与砂体发育关系

按照高分辨率层序地层学理论,可容空间与沉积物供应量比值(A/S)的变化,决定了有效可容空间中沉积物保存程度、堆积速度、砂泥比值和砂体分布空间结构^[13,14]。

A/S 值对不同基准面旋回内储集砂体空间展布有重要影响,长期基准面下降晚期→基准面上升初期过程中,具有低可容纳空间和高沉积物供给(A/S<1),导致水道落差大、水流速度快和搬运能力增强,粗粒沉积物得以保存,而细粒沉积物则被分选和溢出带走,长期或中期基准面旋回上部的细粒沉积物多被冲刷,储集砂体呈叠合状分布,单层砂厚较大、砂地比高、砂体连通性较好,因此位于层序分界面两侧(长期基准面下降晚期→基准面上升初期过程中)发育的长期或中期基准面旋回砂体较发育,是储集层最有利的发育部位(图4)。

随着 A/S 值的增加,位于洪泛面两侧长期或中期层序基准面旋回,由于有效可容空间增大,沉积物供应量减少(A/S>>1),水流速度变缓和,搬运能力降低,沉积物粒度变细,分选性变差,同时泥质和云母等矿物含量增加,由于冲刷

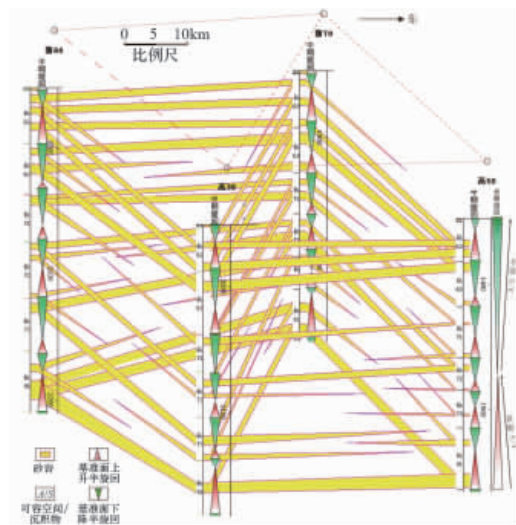
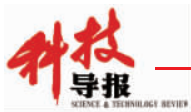


图4 层序格架内 A/S 与砂体发育关系

Fig. 4 Relation between A/S and sand body distribution in sequence framework



作用不明显,层序地层保存较完整,主要由砂、泥岩互层构成以退积为主的演化序列,砂体单层厚度小,被较厚的泥岩夹(隔)层分隔,平面上呈连通性较差条带状,旋回周期内砂地比值低。此外,从层序格架内砂体分布图(图4)可以发现,北东—南西方向(新79—高38井方向),砂体连通性较其他方向好,反映出北东—南西方向为沉积物来源方向。

在基准面上升和下降过程,有效可容纳空间会发生迁移和变化,由其控制的沉积物体积划分过程如发生在同一地理位置,与之相对应的沉积响应特征可称之为相分异。由图5可以看出,延河剖面长4+5地层为三角洲前缘沉积,由于相分异作用造成 ssc1 和 ssc2 短期基准面旋回沉积砂体类型、砂体连通性等有所差异,ssc1 为中-低可容纳空间,砂体成叠置分布,连通性较好,发育板状和楔状层理沉积构造;而 ssc2 为中-高可容纳空间,砂体之间有泥岩分割,连通性较差,上升基准面上部主要为泥岩沉积,反映出较高的可容纳空间特征。

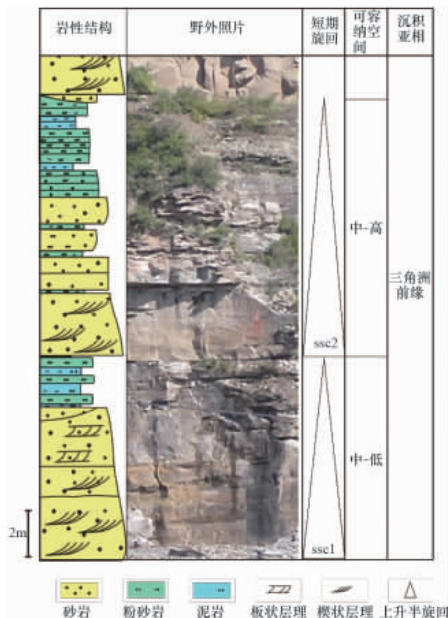


图5 延河剖面长4+5相分异作用与砂体发育关系
Fig. 5 Relation between facies differentiation and sand body development of Chang 4+5 in Yanhe profile

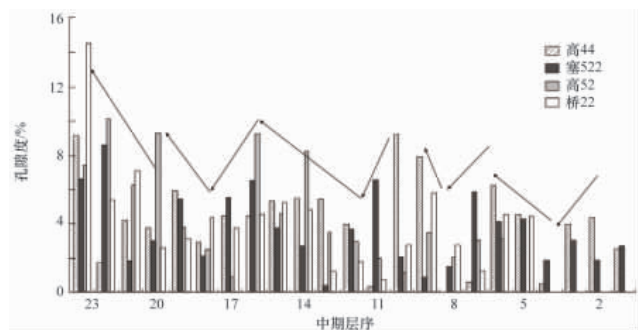
3.2 层序格架内储集性能变化规律

层序地层与储层的储集性能也有密切的关系,一方面表现为不同级次基准面变化过程中,随着 A/S 值的变化,引起沉积物沉积过程中的砂体厚度、粒度大小及分选性和泥质含量等变化,间接或直接控制储层物性发育分布特点;另一方面表现为处于层序界面附近的砂岩与远离层序界面的砂岩相比,两者储集性能差别较大,特别是较大规模侵蚀不整合面对储集性能有明显影响。

3.2.1 A/S 值对储层物性影响

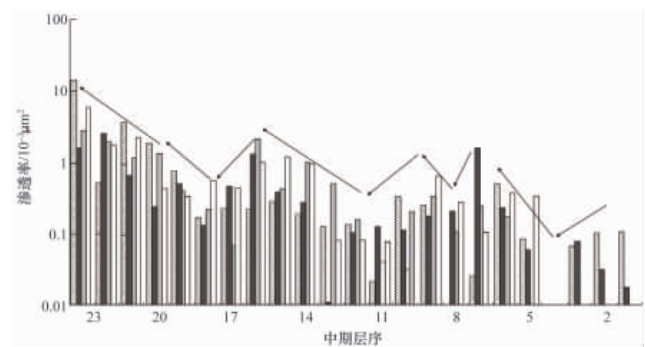
在地层基准面上升初期或下降晚期,以低可容纳空间和高沉积物补给 ($A/S < 1$) 为特点,形成强烈进积的(水下)分流

河道砂体,在河流环境则形成连续叠置河道砂体,砂体呈块状分布,物性较好。处于基准面上升中期时,随着基准面上升速度加快,可容纳空间增大和沉积物补给量略趋变小 ($A/S < 1 \rightarrow A/S > 1$), (水下) 分流河道侧向迁移能力和活动范围扩大,分流汇合作用也增强,岩相相序的保存相对较好或组合趋于多样化,砂岩粒度变细、厚度变小、泥质含量和片状矿物增高,其储层物性呈现逐渐变差的趋势;在基准面逐渐下降、可容空间和 A/S 值减小过程中,砂体自下而上呈现粒度向上变粗、片状矿物含量和泥质减少、分选性变好的趋势,从而使得孔隙度、渗透率值逐渐增高(图6)。



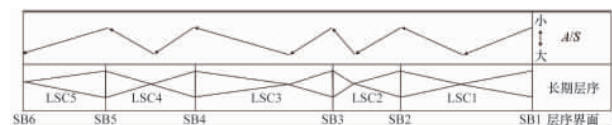
(a) 中期层序孔隙度特征

(a) Porosity characteristics of medium sequence



(b) 中期层序渗透率特征

(b) Permeability characteristics of medium sequence



(c) 长期层序及其界面特征

(c) Long-term sequence and interface features

图6 层序格架内孔隙度、渗透率纵向变化趋势

Fig. 6 Variation trend of porosity and permeability of Yanchang Formation

研究区 LSC1~LSC4 长期层序格架内的砂体储集性能均与 A/S 值变化很吻合, A/S 值增大, 物性变差, A/S 值减小, 物性变好; 长期层序 LSC5 砂体储集性能却随着 A/S 值增大而增大, 究其原因是 LSC5 层序受到后期构造剥蚀(图6(a)), 与上覆地层富县组呈不整合接触, 长时间的大气淡水淋滤作用

对储层物性改善起到积极作用。

3.2.2 层序界面对储层性能的影响

层序界面是不同级别层序的侵蚀不整合面或无沉积作用面及与之可对比的整合面,它也是重要沉积相转换面,同时还是沉积水动力条件发生改变中介面。因此,受沉积水动力条件控制,处于层序界面上下和离界面远近不同的储集砂岩分布及其物性会发生变化,尤其是发育侵蚀不整合界面,侵蚀、溶滤等成岩变化会对储层物性产生深远影响。研究区存在 SB1~SB6 6 个层序(长期基准面)界面(图 6(a)),其中 SB1 与 SB6 层序界面为一不整合面,SB2~SB5 层序界面是无沉积作用面或与之可对比的整合面,它们对储层物性好坏也产生重要影响。

(1) 不整合层序界面对储层发育的影响。位于上三叠统

延长组顶部的层序界面 SB6 是印支运动末期鄂尔多斯盆地发生区域性整体构造抬升作用形成,在不整合面形成过程中,长期大气淡水淋滤作用对次生溶蚀孔隙的发育起到积极促进作用。距不整合界面远近程度不等,砂岩中碎屑长石的含量、长石高岭石化作用的强弱、砂岩次生溶孔的发育程度、储层物性高低均发生规律性变化,总体而言,距离不整合面较近的地方,储层物性较好(图 6(a)、(b))。

(2) 其他层序界面对储层发育的影响。除 SB1 与 SB6 不整合层序界面外,SB2~SB5 4 个层序界面同样对储层发育具有一定的影响,这些层序界面是岩性转换面或冲刷面(图 7(a)),储层物性较好(图 6(a)、(b)),酸性流体沿着界面运移,有利于形成次生孔隙,例如镰 129 井(图 7(b))和天 222 井的长 6 储层发育的粒间溶孔(图 7(c))。

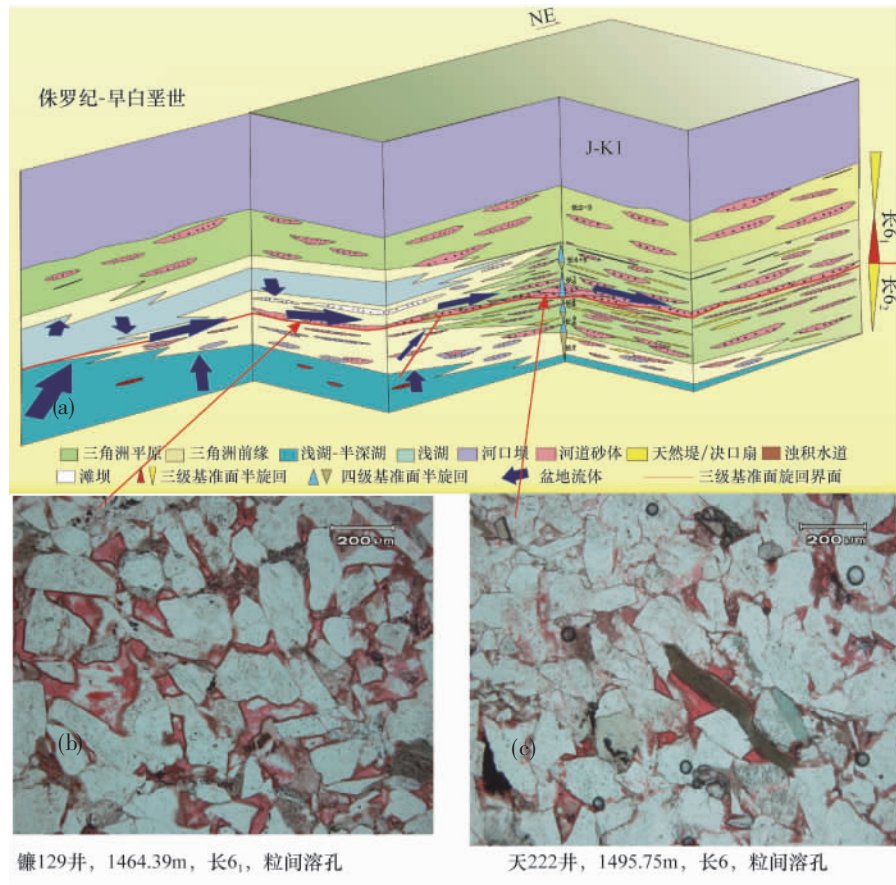


图 7 酸性流体沿界面砂体运移形成次生孔隙(SQ4 层序底界面)

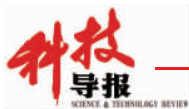
Fig. 7 Sour fluids migration along interface and the formation of induced porosity

4 结论

(1) 在露头剖面和岩心观察基础上,利用测井曲线小波分析与频谱属性方法对层序地层单元进行定量识别,以期消除人工划分层序的不确定因素,在延长组共划分出 5 个长期层序旋回和 23 个中期层序旋回。

(2) A/S 值对储层的空间展布和物性变化具有明显控制作用。最有利储层发育位置往往出现在长期基准面上升早期

和下降晚期旋回中,特别是长期和中期两个级次基准面相互重叠的界面两侧。由于相分异作用造成各级基准面旋回沉积砂体类型 and 砂体连通性等有所差异,中-低可容空间的基准面旋回,其砂体成叠置分布,连通性较好,而中-高可容纳空间的基准面旋回,砂体之间有泥岩分割,连通性较差。LSC1~LSC4 长期层序储层物性与 A/S 值成负相关,而 LSC5 长期层序储层物性却随着 A/S 比值增加而增加,究其原因是后期构



造剥蚀,长时间大气淡水淋滤作用对储层物性改善起到积极作用。

(3) 研究区存在 6 个三级层序界面,其中 SB1 与 SB6 层序界面为构造不整合面,SB2~SB5 层序界面则是无沉积作用面或相应的整合面。不同类型层序界面均对储层物性改善具有一定影响,酸性孔隙流体易沿着界面运移,有利于形成次生孔隙,对改善储集层储集性能有利。

参考文献 (References)

- [1] 姜在兴. 层序地层学研究进展: 国际层序地层学研讨会综述 [J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 1-8.
Jiang Zaixing. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 1-8.
- [2] 魏钦廉, 郑荣才, 肖玲. 惠州凹陷古近系珠海组-恩平组高分辨率层序格架与储层分布规律[J]. 地层学杂志, 2010, 34(1): 60-67.
Wei Qinlian, Zheng Rongcai, Xiao Ling. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(1): 60-67.
- [3] 邓宏文. 高分辨率层序地层学应用中的问题探析 [J]. 古地理学报, 2009, 11(5): 471-480.
Deng Hongwen. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(5): 471-480.
- [4] 党森, 赵虹, 李文厚, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区上三叠统延长组不同级次层序界面的识别[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 414-421.
Dang Ben, Zhao Hong, Li Wenhong, et al. Geology in China, 2007, 34(3): 414-421.
- [5] 陈飞, 罗平, 张兴阳, 等. 鄂尔多斯盆地东缘上三叠统延长组砂体结构与层序地层学研究[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 330-338.
Chen Fei, Luo Ping, Zhang Xingyang, et al. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 330-338.
- [6] 倪新锋, 陈洪德, 韦东晓. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组层序地层格架与油气勘探[J]. 中国地质, 2007, 34(1): 73-80.
Ni Xinfeng, Chen Hongde, Wei Dongxiao. Geology in China, 2007, 34(1): 73-80.
- [7] 傅强, 李益. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 8—长 7 油层组高分辨率层序地层格架及其地质意义[J]. 现代地质, 2006, 20(4): 579-584.
Fu Qiang, Li Yi. Geoscience, 2006, 20(4): 579-584.
- [8] 王居峰, 郭彦如, 张延玲, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组层序地层格架与沉积相构成[J]. 现代地质, 2009, 23(5): 803-808.
Wang Jufeng, Guo Yannu, Zhang Yanling, et al. Geoscience, 2009, 23(5): 803-808.
- [9] 段秋梁, 陈永进, 陈国强, 等. 测井曲线在地层基准面旋回划分中的应用[J]. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(1): 35-39.
Duan Qiuliang, Chen Yongjin, Chen Guoqiang, et al. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2002, 22(1): 35-39.
- [10] 李凤杰, 赵俊兴. 基于 Matlab 的测井曲线频谱分析及其在地质研究中的应用[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 531-534.
Li Fengjie, Zhao Junxing. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 531-534.
- [11] 赵伟, 姜在兴, 邱隆伟, 等. 小波分析划分层序单元的地质学理论基础、方法与应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 436-441.
Zhao Wei, Jiang Zaixing, Qiu Longwei, et al. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 436-441.
- [12] 聂永生, 魏生祥, 田景春, 等. 应用测井地层学进行地层对比研究[J]. 科技导报, 2013, 31(10): 35-39.
Nie Yongsheng, Wei Shengxiang, Tian Jingchun, et al. Science & Technology Review, 2013, 31(10): 35-39.
- [13] 邓宏文, 王红亮, 宁宁. 沉积物体积分配原理—高分辨率层序地层学的理论基础[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 305-313.
Deng Hongwen, Wang Hongliang, Ning Ning. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 305-313.
- [14] 郑荣才, 彭军, 吴朝容, 等. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 6-8.
Zheng Rongcai, Peng Jun, Wu Chaorong, et al. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 6-8.

(责任编辑 王媛媛)

· 学术动态 ·



第 29 次中国科技论坛聚焦“纳米材料与纳米结构的应用与发展”

2013 年 10 月 24 日,由中国科协主办、南京理工大学承办,主题为“纳米材料与纳米结构的应用和发展”的第 29 次中国科技论坛在南京召开。沈阳材料科学国家(联合)实验室主任、中国科学院院士卢柯,工信部赛迪研究院党委书记、高级工程师宋显珠,江苏法尔胜泓昇集团有限公司总工程师刘礼华,南京理工大学材料科学与工程学院院长朱运田担任论坛学术召集人。来自高等学校、科研院所、企业的纳米材料、纳米金属材料研究和应用领域的 100 余位专家学者参加论坛。

纳米科技是引领世界新一轮产业革命的重要力量,给材料、信息、绿色制造、生物和医学等领域带来了极大的发展空间。在本次论坛上,与会代表主要围绕大尺度纳米金属材料关键制备技术、力学性能和增韧研究、结构特征和变形机理、组织稳定性和提高方法及其应用等进行了深入交流,探讨了未来纳米金属领域亟待解决的关键问题、关键技术。

中国科技论坛是中国科协示范性的高端学术交流的品牌项目,主要是面对国家战略需求,针对制约中国经济科技发展中的重大问题组织跨学业、跨学科专家学者进行学术研讨。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35533/n38575/15151666.html>。