

赖锦, 王贵文, 吴大成, 等. 姬塬地区长 8 油层组层序地层格架内成岩相展布特征[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1487-1502.

Lai Jin, Wang Guiwen, Wu Dacheng, et al. Diagenetic facies distribution in high resolution sequence stratigraphic framework of Chang 8 Oil Layers in the Jiyuan area[J]. Geology in China, 2014, 41(5): 1487-1502(in Chinese with English abstract).

姬塬地区长 8 油层组层序地层格架内成岩相展布特征

赖 锦¹ 王贵文^{1,2} 吴大成³ 曹江宁³ 张晓涛¹ 冉 冶¹ 姚亚斌⁴ 张永迪⁴

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000; 4. 中石油测井有限公司塔里木事业部, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:通过岩心观察并充分利用普通薄片、铸体薄片、阴极发光、X-衍射和扫描电镜等资料,对姬塬地区长 8 油层组储层的成岩作用、成岩矿物、成岩阶段和成岩演化序列特征等进行了研究。根据成岩作用类型及强度、成岩矿物等将储层划分为绿泥石衬边弱溶蚀、不稳定组分溶蚀、压实致密、高岭石充填和碳酸盐胶结 5 种成岩相。并通过岩心薄片资料刻度测井归纳出不同成岩相在 GR、AC 等测井曲线及其组合上的响应特征,由此实现各单井储层成岩相的连续划分。对长 8 油层组层序界面和基准面旋回与成岩相展布的关系进行了研究,结果表明层序界面附近不稳定组分溶蚀相及高岭石充填相较为发育,且各井之间对比性良好,同时层序界面也控制了碳酸盐胶结;中期基准面旋回的最大湖泛面处均发育井间可对比的压实致密相,长 8² 中期基准面下降半旋回砂体一方面易于遭受溶蚀产生次生孔,另一方面由于受沉积滞留和碎屑组分影响导致压实强度较弱,因此物性总体比长 8¹ 砂体好。

关键词:层序地层;成岩相;层序边界;体系域;长 8 油层组;姬塬地区

中图分类号:P618.13;P58 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)05-1487-16

姬塬地区位于鄂尔多斯盆地西部,区域构造属于伊陕斜坡,与天环坳陷毗邻^[1]。区内构造平缓,地层倾角小,基底沉降稳定,断层和褶皱不发育,只在局部地区发育低幅的鼻状隆起^[2]。上三叠统延长组是姬塬地区油气勘探的主要目的层,蕴藏了丰富的石油资源,具有烃源岩发育、生储盖组合配套、勘探领域广和潜力大的特征。根据岩性、沉积旋回和油层纵向分布规律可将延长组自上而下分为 5 个岩性段和长 1~长 10 共 10 个油层组,其中,进入长 8 期之

后,盆地北西向展布的构造格局和湖盆形态已基本形成,湖盆地形平缓开阔,坡度小于 1°,面积大^[3],因此长 8 油层组沉积以在水体浅、地形平缓部位形成的以水下分流河道为主体的浅水三角洲体系为主^[4]。相对较浅的水体、稳定的构造背景、平缓的坡度及充足的物源形成了纵向上相互叠置、平面上连片分布的大套砂体,这为大规模储集体系的发育创造了条件,也造就了长 8 大规模连续型油气藏的形成^[5]。近年来的勘探实践亦证明,姬塬地区长 8 油

收稿日期:2013-10-14;改回日期:2014-03-20

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05020-008)、国家自然科学基金项目“致密砂岩储层成岩相测井识别方法研究”(41472115)和中石油创新基金(2013D-5006-030)联合资助。

作者简介:赖锦,男,1988年生,博士生,从事沉积学、储层地质学与测井地质学研究;E-mail:sisylaijin@163.com。

通讯作者:王贵文,男,1966年生,教授,博士生导师,从事沉积学、储层地质学与测井地质学方面的教学与科研工作;E-mail:wanggw@cup.edu.cn。

层组岩性油藏具有含油面积大、分布范围广,平均单井油层厚度大的特征,与长4+5、长6油层组共同构成了研究区的主力产层^[6]。

深入认识等时地层格架内的层序结构特征和沉积体系的时空展布规律是提高延长组岩性油藏勘探开发效益的关键^[7]。且长8储层虽整体形成于有利的沉积相带,但由于其在漫长的地质历史时期经历了复杂的成岩作用改造,现今总体表现为低孔、低渗、微孔喉的特征,储层整体表现比较致密且非均质性强,这直接影响了油气勘探开发的效果和储量规模的进一步扩大^[8]。因此,不同于构造油藏“找高点”,研究区长8岩性油藏勘探的关键是优质储集体的预测^[9]。事实上,“砂中找储”,即对该类低渗透储层的成岩相展开深入研究从而在其中寻找优质储层的分布,是进行该类储层综合评价和有利区带预测的重要方法^[6]。

研究表明,将成岩作用、成岩相研究与层序地层相结合,通过深入探讨层序地层格架内储层孔隙流体演化规律及其对成岩改造时空分异的制约过程,研究层序边界和不同体系域(不同级次基准面旋回)对成岩作用类型和强度、成岩矿物以及成岩演化过程的控制及其对储层物性的影响,可更为有效地对储层成岩作用和物性变化时空分布规律进行解析和预测^[10-15],有助于认识砂体储层物性的差异和岩性-地层等隐蔽油气藏的油气富集规律^[6],可为储层的区域评价和预测提供新的思路,并有助于层序地层识别、划分与对比的研究^[17]。

本文由此充分利用普通薄片、铸体薄片、阴极发光、X-衍射、扫描电镜分析等资料,对长8油层组储层的成岩作用、成岩矿物、成岩环境、所处成岩阶段和成岩演化序列特征等进行了研究。并根据成岩作用类型和强度、成岩矿物及其对储层物性的影响将储层划出不同的成岩相。并通过岩心薄片资料刻度测井,标定出不同成岩相在不同测井曲线及其组合上的响应特征,从而建立不同成岩相的测井识别准则,由此实现各单井储层成岩相的连续划分。最后以Cross的高分辨率层序地层学理论和方法技术为指导,将成岩相置于层序地层格架内,分别就层序界面和体系域(基准面旋回)对储层成岩相展布的控制进行了深入探讨。这一方面可为长8油层组优质储层追踪对比及预测提供有力地质依

据,另一方面也能为具有类似地质特征的碎屑岩储层成岩层序地层的研究提供借鉴。

1 长8油层组高分辨率层序地层划分

上三叠统延长组为鄂尔多斯盆地受晚三叠世印支运动影响进入内陆拗陷湖盆沉积之后的第一个沉积旋回^[2],其沉积相的时空演化代表了一次大型内陆拗陷敞流湖泊沉积形成、扩张、萎缩和消亡的完整演化旋回过程^[3],总体构成了一个超长期基准面旋回层序(即二级层序或称构造层序)^[18]。众多专家学者对鄂尔多斯盆地延长组层序地层划分展开了卓有成效的研究工作,在层序级次与层序构成的划分方面虽存在一定分歧^[19-20]。但根据野外露头、岩心、录井、测井和地震等资料运用高分辨率层序地层学理论和方法,一般是将延长组自下而上划分为SQ1~SQ5共5个三级层序。其中,SQ1对应长10段油层组,为湖盆初始扩张时期沉积,SQ2(长9-长8₂),为湖盆初始扩张时期沉积,SQ3(长8₁~长7),为湖盆逐渐鼎盛期沉积^[21],SQ1至SQ3层序最大湖泛面(长7₃油页岩)构成超长期基准面旋回的基准面“上升不对称半旋回”结构,反映湖盆由缓慢沉降快速到快速沉降,基准面持续上升、湖盆沉积范围持续扩张的沉积动力学过程^[22]。SQ4(长6~长4+5~长3)为湖盆萎缩期沉积,SQ5(长2~长1)为湖盆退缩消亡期沉积^[21]。SQ3层序最大湖泛面至SQ5层序构成了超长期基准面旋回的基准面“下降不对称半旋回”结构,反映了构造抬升导致湖盆开始填平补齐、基准面震荡性下降、湖盆沉积范围震荡性萎缩的沉积动力学过程^[22]。

按不同级次的基准面旋回特征,长8油层组可进一步划分出2个中期旋回层序和6个短期旋回层序^[5,6,23]。长8₁和长8₂分别对应2个中期旋回层序,代表在长8油层组沉积早期和晚期所经历的二次较大的湖侵-湖退沉积旋回,而6个短期旋回则相当于韵律性的湖进-湖退旋回,各中期和短期基准面旋回层序可进行区域上的等时对比(图1)^[5,23]。一般长8₂为湖盆初始扩张时期的高位体系域(HST)沉积,以相对稳定构造背景下形成的浅水三角洲前缘沉积为主,最大湖泛面对应为长9“李家畔页岩”,而长8₁油层则是湖盆逐渐鼎盛时期的以三角洲沉积为主的低位体系域(LST)沉积,最大湖泛面对应为长7“张家滩页岩”^[21]。

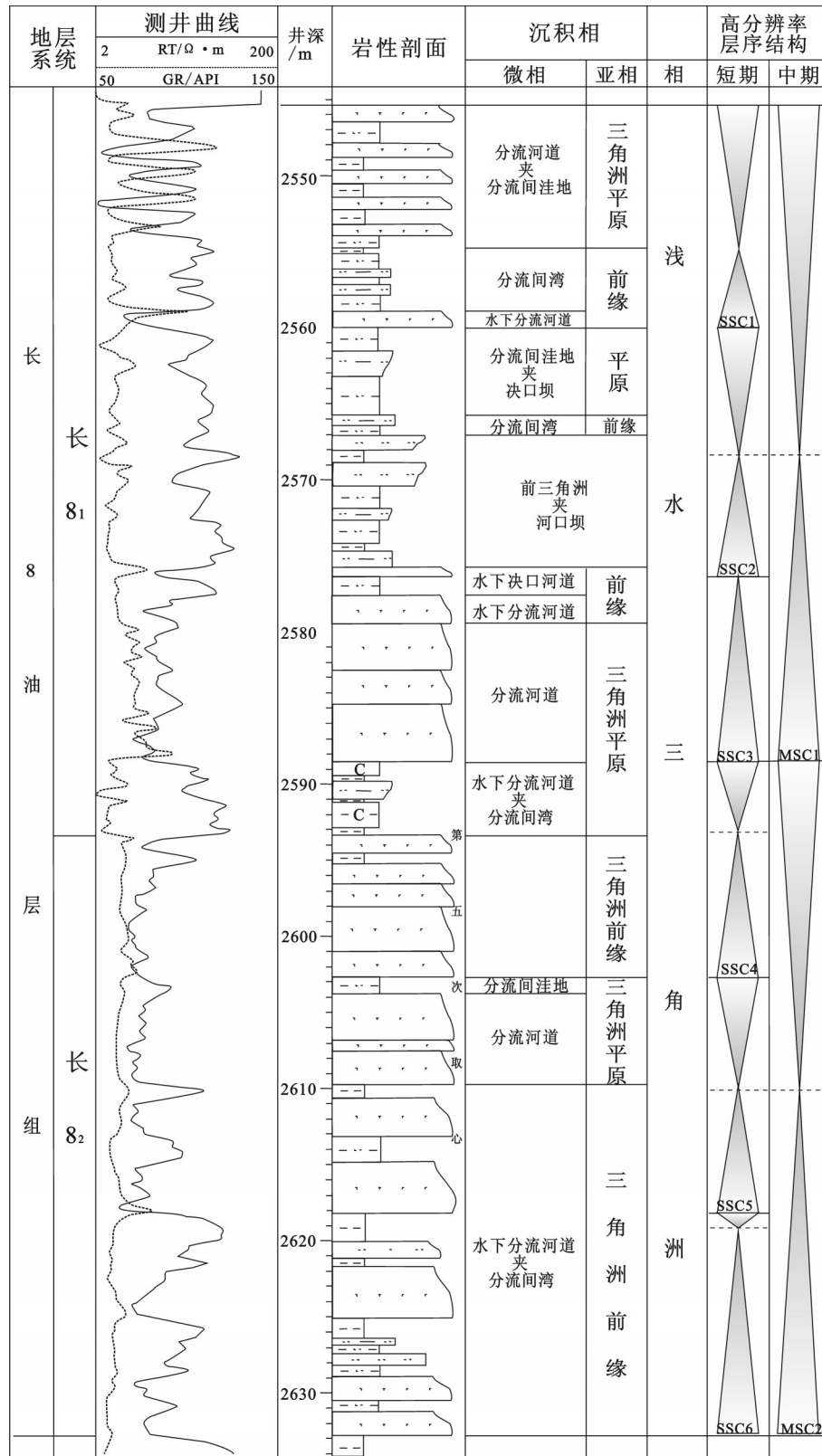


图1 姬塬地区长8油层组沉积相综合柱状图(据文献[23]修改)

Fig.1 Composite columnar section of sedimentary facies of the Chang 8 oil layers in Yanchang Formation of Jiyuan area (modified after reference [23])

2 储层成岩作用及成岩演化序列特征

2.1 储层成岩作用、成岩矿物特征

普通薄片、铸体薄片、阴极发光观察以及X-衍射和扫描电镜分析表明,长8油层组储层在漫长的地质历史时期经历了压实压溶、胶结等破坏性成岩作用以及溶蚀、破裂等建设性成岩作用,现今正处于中成岩阶段A期^[1]。多类型、不同强度的成岩作用的叠加对储集岩原生孔隙的保持、破坏以及次生孔隙的形成、保持和破坏都产生极为重要的影响。

2.1.1 压实压溶作用

压实压溶作用导致长8油层组储层原生粒间孔隙保存较少,颗粒之间多为点-线、线接触,少量为缝合接触,塑性颗粒发生变形,具定向排列趋势(图2-a),且石英颗粒表面出现一定的破裂纹(图2-b),说明已达到中等-强压实强度。由于长8储层浅水三角洲沉积背景,沉积物并未经过较长距离的搬运与淘洗,其中抗压实能力较强的石英含量相对较少,沉积物发生了一定程度的压实致密化作用,在埋藏深度小于2500 m时,压实作用是导致储层孔隙减小的主要因素。当压实作用达到一定深度时则被压溶作用所代替,并继续破坏储层原生孔隙和部分次生孔隙,且压溶作用产生的SiO₂在过饱和的条件下随着孔隙流体流动又可以在粒间孔隙中以自生石英或加大边的形式沉淀下来(图2-b),进一步破坏储层的孔渗性能^[24]。

2.1.2 胶结作用

长8油层组储层胶结物类型尤以钙质(图2-c、d)、硅质(图2-e)、高岭石(图2-f)和绿泥石(图2-g)为主。胶结作用是使长8油层组砂岩储层致密化的另一重要原因,储层在中-强压实背景下,自生矿物的进一步充填导致其原生孔隙几乎丧失殆尽。当然早期环边状的绿泥石由于一方面不但能有效地阻止石英增生,另一方面还能使岩石固结较早,增加其抗压强度,同时阻止压溶作用的发生,从而有利于保护储层原生孔隙,因此早期环边状胶结的绿泥石对储层物性起建设作用^[25-26]。

2.1.3 溶蚀作用

长8油层组上覆的长7湖相泥页岩中丰富的有机质随着埋深的加大逐渐热演化生烃,生烃过程中

伴随的有机质脱羧基作用可生成一定的有机酸(如羧酸和酚类)并释放出CO₂和氮等组分,这些酸性物质随着油气一起充注到长8储层中,将导致其中的不稳定组份发生溶蚀,形成粒内、粒间溶孔^[5](图2-h-j)。另一方面早成岩时期的大气淡水淋滤也能促进储层砂岩中的长石、岩屑的溶解。由于研究区长8储层中可供溶蚀的长石、岩屑组分较丰富,因此溶蚀作用对砂岩孔隙度的改善作用是非常显著的,局部层段砂岩的孔隙度可以更高达15%以上,这主要就是溶蚀作用形成的次生孔隙的贡献^[1]。

2.1.4 破裂作用

破裂作用形成的裂缝和微裂缝虽不能显著提高储层的储集性能,但可以非常有效地改善储层的渗流性能。长8油层组大多发育宽度较小的裂缝(图2-k,l)。在强压实胶结原生孔隙基本消失背景下,次生溶孔和裂缝的发育程度最终决定了储层的物性好坏。

2.2 储层成岩演化序列特征

姬源地区长8油层组埋深2000~2500 m,早白垩世末(100 Ma)最大埋深达到3150 m,受盆地长期沉降作用影响,成岩压实作用强烈,地层原始孔隙度大量降低,再加上胶结等成岩作用以及受地应力和局部构造挤压作用产生的微裂缝影响,储集层物性总体较差且非均质性较强^[27]。通过以上对长8储层砂岩成岩特征综合判断,认为姬源地区长8储层典型成岩演化序列为:机械压实→绿泥石粘土膜胶结→石英自生加大→长石、岩屑溶蚀→高岭石沉淀→石油充注→晚期碳酸盐胶结(铁方解石、铁白云石等)⑧裂缝发育。

3 储层成岩相划分及其测井响应特征

成岩相为成岩环境的物质表现,是沉积物在特定沉积和物理化学环境中,在成岩作用下,经历一定成岩阶段和序列的产物,包括岩石颗粒、胶结物、组构和孔洞缝等特征^[28]。在上述对储层成岩作用、成岩矿物、成岩阶段和成岩演化序列等特征认识的基础上,结合前人研究成果^[1,29],主要根据成岩作用类型和强度、成岩矿物及其对储层物性的影响,将长8油层组储层划分为5种成岩相:绿泥石衬边弱溶蚀、不稳定组分溶蚀2种建设性成岩相以及压实

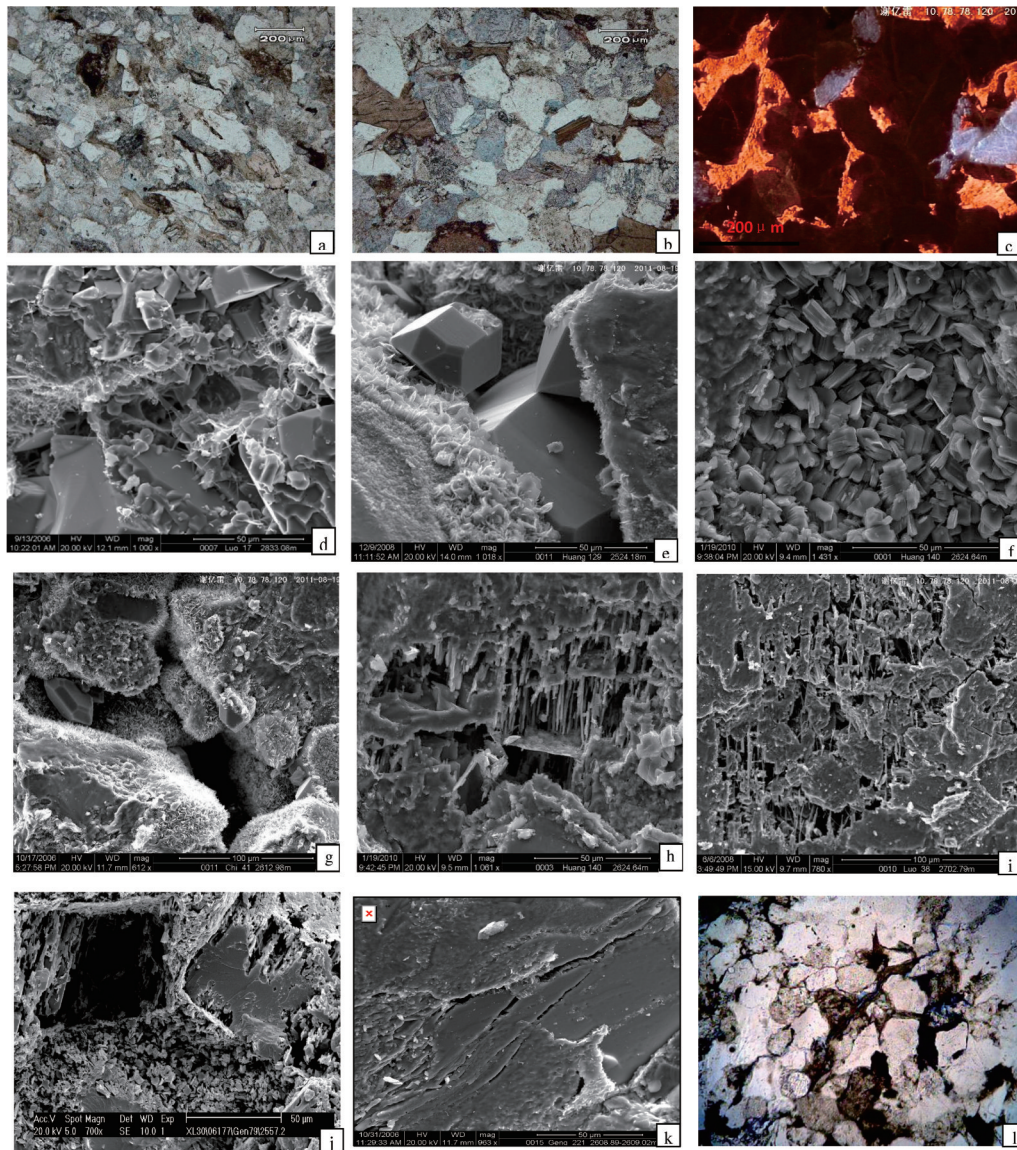


图2 长8油层组储层镜下成岩特征

a—颗粒线接触为主,塑性颗粒发生变形,罗32井,2857.8 m,单偏光;b—石英颗粒表明出现压裂纹,且见部分石英加大边,塑性颗粒发生变形,安68井,2244.33 m,单偏光;c—石英发蓝紫色—褐色光,发光微弱,长石发亮蓝色光,发育蚀变,方解石交代、胶结发育,发明亮的橙黄色光,耿166井,2792.16 m,阴极发光;d—铁白云石、石英加大及伊利粘土充填孔隙,罗17井,2833.1 m,SEM;e—部分孔隙中石英充填生长,黄129井,2524.18 m,SEM;f—书页状、手风琴状高岭石粘土充填孔隙,黄140井,2624.64 m,SEM;g—玫瑰花瓣状绿泥石膜沿颗粒表面胶结,少量石英充填残余粒间孔,池41井,2612.98 m,SEM;h—长石部分发生溶蚀产生溶孔,黄140井,2624.64 m,SEM;i—少量长石溶蚀产生粒内溶孔,罗38井,2702.79 m,SEM;j—长石粒内溶孔,耿79井,2557.2 m,SEM;k—微裂缝,耿221井,长8₁,2608.89m;l—微裂缝,池37井,长8₁,2588.1 m

Fig.2 Photomicrographs showing microscopic diagenetic features of Chang 8 reservoirs

a—Grains exhibit planar grain contacts, deformation of soft grains, Luo 32, 2857.8m, plainlight (PPL);
 b—Quartz grains are fractured at the surface, deformation of soft grains, An 68, 2244.33m, PPL;
 c—Quartz assumes blue—purple, brown, feldspars assumes light blue, and calcite cements occluding pores or replacing framework grains is shown in bright orange, Geng 166, 2792.16m, cathodoluminescence;
 d—Fe—dolomite, quartz overgrowth, and illite fills the pores, Luo 17, 2833.1m, SEM;
 e—Authigenic quartz occludes the pore throat, Huang 129, 2524.18m, SEM;
 f—Book or accordion like kaolinite fills the pores, Huang 140, 2624.64m, SEM;
 g—Rose like chlorite developed at the surface of the grains, minor quartz fills the residual intergranular porosity, Chi 41, 2612.98m, SEM;
 i—Secondary dissolution porosity caused by partial dissolution of feldspar grains, Luo 38, 2702.79, SEM, j—Intragranular porosity of feldspar dissolution, Geng 79, 2557.2m, SEM; k—Micro—fracture, Geng 221, 2608.89m; l—Micro—fracture, Chi 37, 2588.1m

致密、高岭石充填和碳酸盐胶结3种破坏性成岩相。

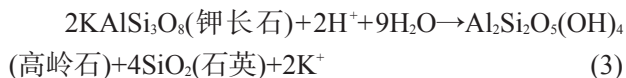
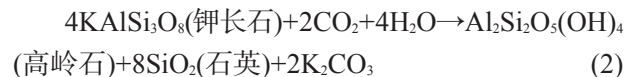
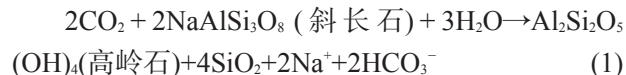
3.1 成岩相划分

3.1.1 碳酸盐胶结相

姬塬地区长8油层组为一套煤系地层,早期酸性地层水条件导致其缺乏早期碳酸盐胶结物^[1],成岩演化后期孔隙水向碱性条件转化使得碳酸盐胶结物析出,占据孔隙且缩小喉道,对储层物性具有强烈的破坏作用,呈充填孔隙式胶结或嵌晶式胶结(图2-c)。长8油层组水下分流河道以及河口坝砂体中均发育钙质胶结致密相,且主要出现在与砂泥岩接触处附近。这是由于泥质组分在成岩转化过程中析出大量钙质Ca²⁺,由此在砂泥接触面附近形成大量方解石等碳酸盐胶结物^[30]。在常规测井曲线上一表现为密度大^[31](大于2.6 g/cm³)、声波时差低、自然伽马低、电阻率曲线呈齿状,呈“钙尖峰”。

3.1.2 高岭石充填相

煤系地层中成岩早期细菌有氧呼吸产生的CO₂和有机酸可促进长8油层组中斜长石的高岭石化,如式(1)^[32]。早成岩早期阶段钾长石在大气淡水的淋滤下也可蚀变而成高岭石,其反应过程可表达为如式(2)^[24],后期随着有机质的成熟在有机酸的参与下也可以溶蚀而形成高岭石,如式(3)^[33]。高岭石虽有一部分晶间孔,一定程度上能增加储层储集空间,但由于油水密度差产生的浮力一般不足以克服毛细管压力来驱替晶间微孔中的地层水,因此高岭石晶间孔对长8油藏而言多为无效孔隙,且它作为溶蚀作用的伴生产物将减少一部分次生孔隙^[34],将使储集层的物性变差(图2-f)。高自然伽马(>100 API)、高中子(>15%)、低密度(<2.6 g/cm³)、中-高声波时差和低电阻率为其测井响应特征^[31]。



3.1.3 压实致密相

研究区平缓的大斜坡构造背景导致长8油层组储层整体埋深差异不大,沉积物所受压实作用强度

没有本质差异。当然成岩作用的强度同时受到沉积物组分和结构的影响^[35],泥岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩等岩性由于颗粒粒度细且其中的塑性颗粒如黑云母、千枚岩、板岩等含量较高,抗压实能力较强石英颗粒含量相对较低,导致其经历压实强度较强^[31],形成压实致密成岩相,储层物性较差或不具备储层性能。测井曲线上表现为中-高自然伽马(80~120 API)、高中子(>15%)、高密度(>2.6 g/cm³)和高中子-密度孔隙度差异大^[29]。

3.1.4 绿泥石衬边弱溶蚀相

岩性主要由细砂岩、粉细砂岩等组成,物性一般较好,是研究区最有利的成岩相(图2-g)。绿泥石衬边胶结相主要发生在火成岩屑含量高、石英含量中等的较成熟砂岩中,火成岩屑的蚀变能为绿泥石胶结物的形成提供充足的Fe物质来源^[25,36]。中等自然伽马值(60~90API),低中子值(<13%),低密度(<2.6 g/cm³),中子-密度差异小(小于7个石灰岩孔隙度单位)为其主要测井响应特征^[29],其较低的密度特征可较好地与压实致密相区分^[31],而根据其高U低Th高Pe的特征又可与高岭石充填相(低U高Th低Pe)区分开来。

3.1.5 不稳定组分溶蚀相

溶蚀作用扩大了孔隙、连通了喉道,使储层孔隙度增大,渗流能力增强。该成岩相发育层段一般表现出较好的物性特征,孔隙度一般大于10%,是仅次于绿泥石衬边弱溶蚀的建设性成岩相。测井曲线上表现为低自然伽马(<100API),低密度(<2.6 g/cm³),低声波时差,中等中子(12%~22%),中子-密度差异中等(介于7~11.5个石灰岩孔隙度单位)^①。

且根据测井原理,一般情况下中子、密度测井反映储层总孔隙度,而声波时差则反映基质孔隙度,不反映次生孔隙(主要是裂缝孔隙以及粒内溶孔)^[37]。如沉积物在压实作用的基础上经历了胶结,则储层的实测孔隙度应小于通过声波时差拟合得到的理论孔隙度,反之当实测岩石孔隙度大于理论孔隙度时,则沉积物可能经历了溶蚀作用的叠加^[38]。因此不稳定组分溶蚀相发育的层段其中子-密度孔隙度往往比声波孔隙度为高^[29,38],且二者之间差异越大,说明溶蚀作用越强。

①毛志强.鄂尔多斯盆地西北部延长组低渗透砂岩成岩相测井评价应用基础研究[R].项目验收汇报,2011.

3.2 成岩相单井测井识别

由于成岩相总是与一定的成岩作用和成岩矿物联系在一起的,不同的成岩相一般具有不同的成岩作用、成岩矿物组合和储层孔隙发育特征^[1]。而成岩作用类型和强度以及成岩矿物的差异通常在测井曲线上具有不同的响应特征,因此可根据岩心薄片资料刻度测井原则,精细厘定不同成岩作用类型、强度和成岩矿物在不同测井曲线及其组合上的响应特征,并通过岩电、试油资料的修正和标定来确定不同层段成岩相类型^[39]。

以黄129井为例,按照上述总结的不同成岩相的测井响应特征,即可实现单井储层成岩相的连续

划分,划分结果与镜下薄片观察的结论可互相验证,且与试油结论也匹配良好,如2528~2534 m深度段,经测试其为含油层,其对应的成岩相类型主要为不稳定组分溶蚀和绿泥石环边弱溶蚀两种(图3),二者构成了姬塬地区长8油层组主要的有利孔隙性成岩相。相应地,其他干层对应层段成岩相为碳酸盐胶结和高岭石充填或是压实致密成岩相,碳酸盐胶结易出现于砂泥岩接触界面、泥质含量高层段多发育压实致密成岩相(图3)。

3.3 成岩相与储层物性

不同成岩相发育层段,其物性指标虽没有明显的边界,但总体而言压实致密成岩相对应物性最

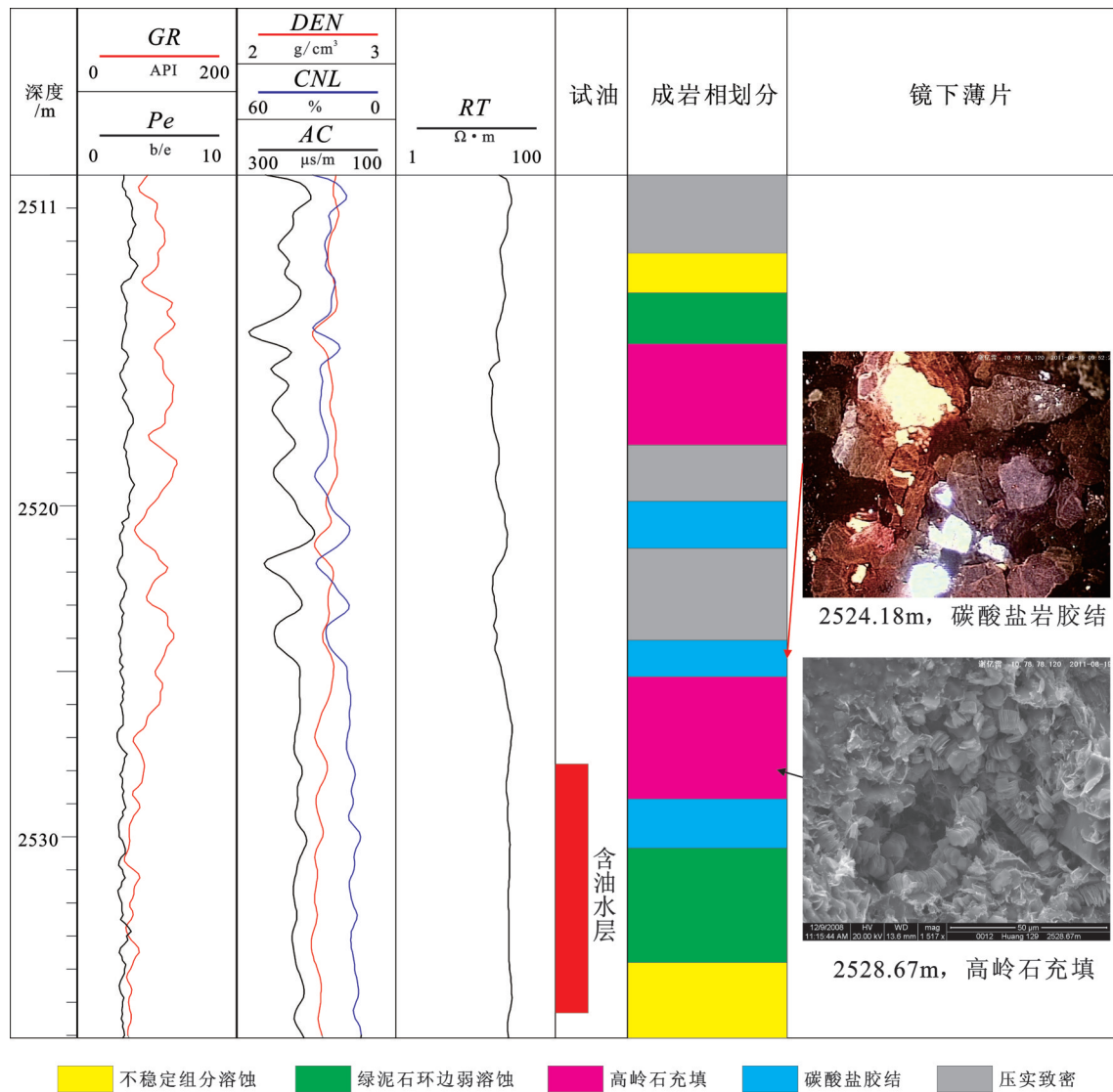


图3 黄129井长8油层组储层测井识别

Fig.3 Logging recognition of diagenetic facies of Chang 8 reservoir of Well Huang 129

差,主要就是该成岩相发育层段先天条件不足,沉积物抗压实能力弱,导致其与经历相同成岩演化序列的其他层段相比,压实程度更高而显得致密。碳酸盐胶结相发育层段对应物性也很差,高岭石充填相对应物性相对较好,当然物性最好的还属绿泥石衬边胶结弱溶蚀相发育层段,原生孔隙的保存导致其渗透率也较高(图4),但其发育层段较少。不稳定组分溶蚀相发育层段对应物性也较好,并且具有孔隙度高但渗透率没有显著提高的特征,这主要是由于不同的孔隙类型对储层渗透率的贡献不同,一般情况下,原生孔隙以粒间孔隙为主,具有喉道粗、连通性好的特征,因此对渗透率的贡献大,而次生溶蚀孔隙主要是长石等的粒内孔,喉道细,且孔隙常呈孤立状而相互不连通,因此对储层渗透率的贡献小^[40]。

4 长8油层组层序地层格架内成岩相特征

研究表明,在一个高分辨率层序地层单元形成时的湖平面旋回变化过程中,沉积物中的矿物成分和化学成分等皆相应发生周期性变化^[41],且湖平面变化、构造沉降、沉积物补给和气候变化等在层序形成的不同时期的差异导致不同层序具有相对独立的成岩作用和成岩演化过程^[42]。因此不同层序部位的成岩现象具有一定的规律性,包括不同体系域内以及层序界面附近成岩特征均具差异^[44]。层序地层决定了砂岩早期的成岩作用和成岩矿物特征,并对砂岩中后期成岩变化、孔隙演化以及储集层质量具有重要影响^[13,42],且尽管后期的成岩演化过程将掩盖一些早期的成岩特征,但是早期的成岩作用信息记录仍然可部分被保存下来^[43]。以下即就层序界面和不同体系域对储层成岩相展布的控制作用展开探讨。

4.1 层序边界附近成岩相特征

层序界面即分割不同层序的分界面,是一个重要的沉积转换面,代表湖平面及水深的变化,包含了丰富的地质信息,界面之处沉积物的堆积、孔隙流体地球化学性质、碎屑组分和结构特征都要发生相应的变化从而导致形成不同的成岩环境并将造就极具特色的成岩反应^[11,14,43]。如层序界面形成时期湖平面的相对下降使湖盆水体与大气水混合引

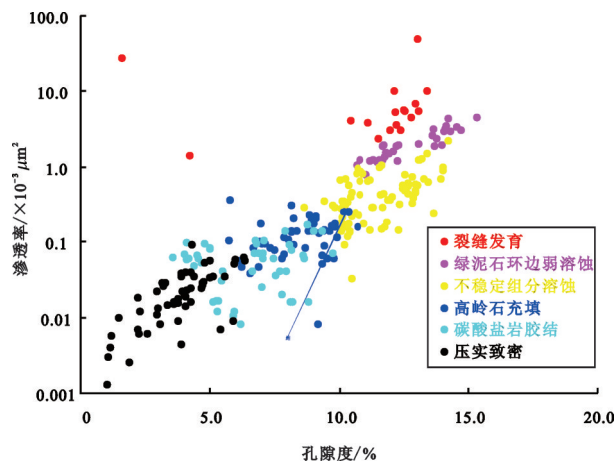


图4 长8油层组不同成岩相孔隙关系图

Fig.4 Crossplot of porosity and permeability of various diagenetic facies of Chang 8 reservoir

发不饱和大气淡水对沉积物的充注和淋滤,使得硅酸盐颗粒等普遍溶解^[42],形成大气淡水淋滤溶蚀带,同时界面之下伴生的蠕虫状高岭石含量明显增加^[11]。因此层序界面是控制成岩作用的一个重要因素,不同级别的层序界面一般具有不同的成岩作用过程和特征^[44]。

前已述及,长8油层组内部的层序界面位于长8₁与长8₂油层的分界面^[21],代表了相对湖平面上升到最高点并开始逐步下降的阶段,是长8₁低位体系域和长8₂高位体系域的分界面,该三级层序内部次一级的相对湖平面升降变化形成了四级(准层序组)高频层序界面。

薄片观察表明,临近长8₁与长8₂油层的层段,一是长石、岩屑溶蚀常见,同时也伴生有一定的高岭石充填(图5-a),二是界面之下碳酸盐胶结物也常见(图5-b)。而物性分析数据表明,层序界面之下的砂体随埋深逐渐增大,物性总体呈现先变好然后逐渐变差的趋势,即位于层序界面附近的一定深度砂体物性相对最好,远离层序界面,物性则逐渐较差(图6,耿166井层序界面处于2785 m)。这一点,在罗13井的物性统计数据中也可得到证明,图7中,层序边界之下的砂体,其储集物性也随着其距层序边界的距离的增大先略微增大后逐渐变差。此外,尚需要注意的是,在耿166井层序界面之下的5~10 m范围内,储层孔隙度和渗透率呈现出相对低值,薄片镜下鉴定结果表明,该范围内的砂体碳酸

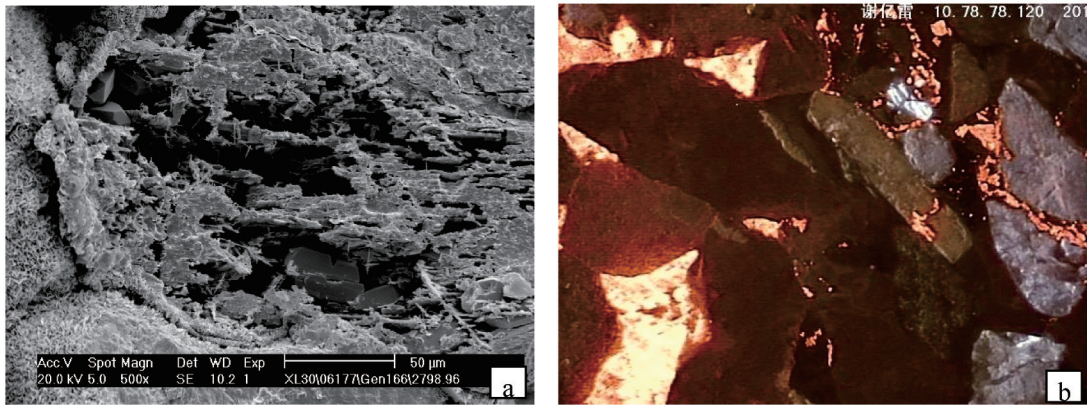


图5 层序界面附近的微观成岩特征

a—耿166井长8₂,2798.96 m 长石粒内溶孔,扫描电镜;b—石英发蓝紫色、褐色光,发光微弱。长石发亮蓝色、土黄色等光,方解石发橙色光,耿166井长8₂,2792.16 m,阴极发光,×100

Fig.5 Microscopic diagenetic features in the vicinity of sequence boundary

a—Intragranular dissolution pores of feldspars, SEM, Geng 166, 2798.96 m;

b—Quartz assumes blue-purple, brown, Feldspars assume light blue, and calcite cements assume bright orange, Geng 166, 2792.16 m, cathodoluminescence

盐胶结物普遍较为发育,使得储层致密化(图5-b)。

从各单井层序界面处成岩相测井识别结果来看,临近层序界面的层段,不稳定组分溶蚀相以及高岭石充填相较为发育,且各井之间具有良好的对比性(图8),说明层序界面对溶蚀作用的控制。事实上,层序界面附近的砂体发生溶蚀是普遍现象^[11],当然由于高岭石的伴生性,也可能导致局部层段的物性变差,这可以较好地解释为什么层序界面之下的砂体普遍物性变好但也有有一部分物性较差的原因。此外,层序界面之下的砂体碳酸盐胶结相也较为发育,且各井之间也具有较好的对比性,说明,层序界面确实也是控制碳酸盐胶结相发育的一个重要原因。究其原因,主要是由于层序界面形成时,不饱和和大气弱酸性淡水将对沉积物的充注和淋滤,使得层序界面处的长石、岩屑等硅铝酸盐矿物普遍发生溶蚀,同时层序界面代表相对较长的沉积驻留时间^[11],随着大气淡水往下不断渗滤,其中的Ca²⁺浓度将不断相应增加而CO₂分压则不断降低,有利于碳酸盐胶结物的形成^[45],事实上,无论是海相还是陆相地层,层序界面之下砂体的碳酸盐胶结作用均较为普遍^[11,15]。当然在与水下分流间湾等微相相邻的砂泥岩接触面附近,由于泥质组分在成岩转化过程中易析出Ca²⁺,导致长8₂油层中与泥岩毗邻的水下分流河

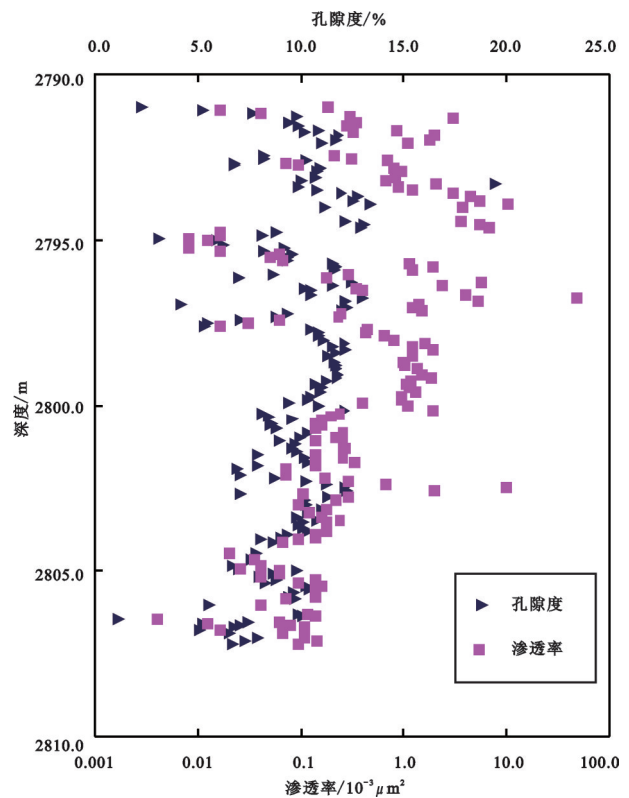


图6 耿166井孔隙度和渗透率随深度变化关系图

Fig.6 The variation of porosity and permeability with the burial depth of Well Geng 166

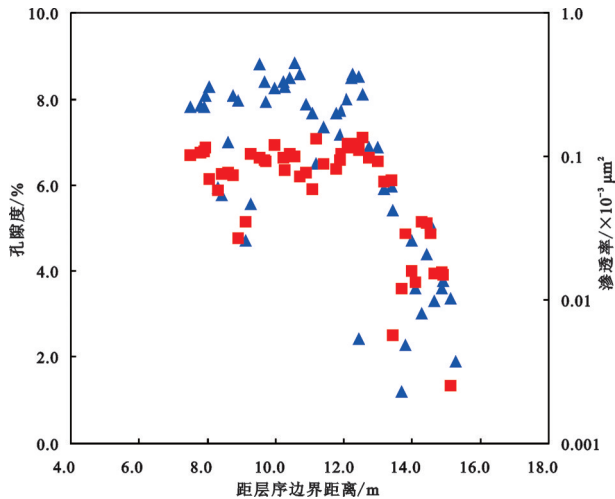


图7 罗13井储层物性与其距层序边界距离关系
Fig. 7 The relationship between the reservoir property and the distance from the sequence boundary of Well Luo 13

道砂体也会可见一定的碳酸盐胶结物,即所谓的“底钙”或“顶钙”现象^[46]。这也是为什么在层序地层格架内其他部位也能见碳酸盐胶结物的原因(图8)。

因此,层序界面控制了早期的溶蚀作用和碳酸盐胶结作用,在界面下的高位体系域砂体中的碳酸盐胶结物含量一般相对较高^[47]。另外,成岩演化期,层序界面可作为流体运移的优势通道^[5,43,48],促进层序界面上下骨架砂体中的长石颗粒等的溶蚀形成粒间溶孔、长石粒内溶孔等主要的石油储集空间(图8),即层序界面附近纵向上相互叠切,平面上连片分布的连通砂体极易构成透镜状岩性油气藏^[22]。

4.2 不同体系域成岩相特征

湖平面的升降变化导致沉积体系域不断进行着从低位、湖侵到高位体系域的演变,不同体系域具有不同的岩性组合^[49],且其垂向上的演化即控制了成岩环境的变化,由此将引导出不同的成岩作用类型、组合特征及其演化序列^[11]。相对湖平面变化驱动了沉积物孔隙流体化学组成等即成岩环境的演变,影响着早期成岩作用类型和强度^[50],在湖平面变化过程中它们也有着截然不同的成岩演化路径,与温度、压力、沉积物组分和结构等一起影响着中后期的成岩作用类型^[42],并形成不同的成岩序列^[16],最终控制了储层孔隙演化的过程从而决定了储层质量差异^[51]。

前已述及,长₈₁至长₇最大湖泛面构成了SQ3

长期基准面旋回的上升半旋回,对应经典层序地层学中的低位体系域沉积;而长₉至长₈₂构成了SQ2长期基准面旋回的下降半旋回,对应经典层序地层学中的高位体系域沉积。

从岩石学特征来看,长₈₂油层即基准面下降半旋回砂体岩性以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主,长₈₁基准面上半旋回砂体以长石岩屑砂岩和岩屑砂岩为主,说明随着基准面的上升,沉积物中的岩屑含量相应增加而长石含量相应减少,石英含量则没有明显变化(图9)。常规物性分析结果表明,长₈₂油层物性明显好于长₈₁油层(图10),各单井纵向上成岩相测井识别结果表明,长₈₂砂体总体上不稳定组分溶蚀相较于发育,而长₈₁砂体溶蚀作用要么处于层序界面附近,要么处于该砂体顶部与长₇烃源岩毗邻的层段(有机酸性水溶蚀),但总体溶蚀的规模不如长₈₂砂体大(图8),这也验证了层序界面对下覆砂体溶蚀作用的控制,当然这可能也与其长₈₁砂体较低的长石含量有一定关系。

从层序地层格架内压实致密成岩相的展布来看,每一个中期基准面旋回的最大湖泛面附近,均发育井间可对比性强的压实致密相(图8),主要就是最大湖泛面处水体较深,沉积物颗粒粒度较细,在埋藏成岩演化过程中易于被压实而致密。且由于长₈₁砂体沉积时可容纳空间逐渐增大,水动力减弱,导致沉积颗粒的粒度等逐渐变细,抵抗压实的能力逐渐变弱,因此长₈₁砂体也易于被压实而致密。而相反地,由于长₈₂高位域砂体在下一个低位域(即长₈₁)时期处于相对暴露状态^[43],除沉积物遭受大气淡水淋滤产生溶蚀孔隙外,另一方面是由于相对短暂的沉积间断一定程度上减缓了压实作用,导致其压实作用强度比层序界面之上的沉积物要弱,有利于原生孔隙的保存^[43,48]。

颗粒包膜状的绿泥石一般在准同生期和早成岩A期形成,绿泥石环边胶结弱溶蚀成岩相一般出现于最大湖泛面附近的砂体中(图8),主要就是湖盆水体的扩张和陆源碎屑物质的注入,会导致粘土矿物胶结增多^[48],在安静的弱还原性古水介质环境中沉积时期河流搬运来的富铁的絮凝胶体发生水解溶蚀,当孔隙流体中铁、镁离子达到一定含量时,就会有绿泥石从碱性水中析出^[52],在与其毗邻的水下分流河道与河口坝砂体中形成绿泥石包膜。

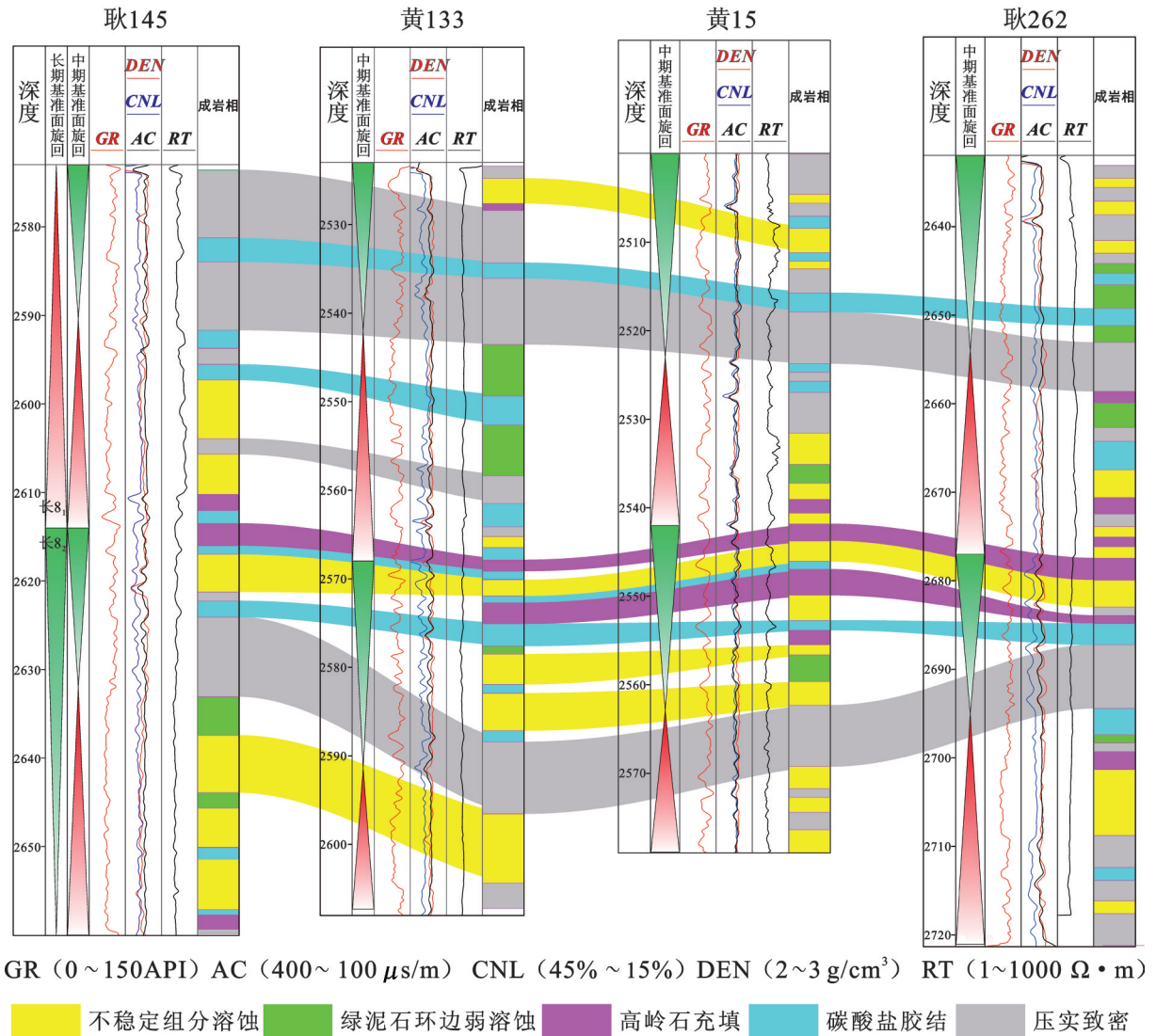


图8 层序地层格架内成岩相横向对比图

Fig.8 The horizontal distribution of diagenetic facies in the sequence stratigraphic framework

最终是层序地层格架控制下的沉积体类型的差异,以及层序界面和体系域差异所导致的成岩相展布的分异共同决定了长8₂砂体物性总体要好于长8₁油层。

4.3 优质储集体发育层位

研究表明,低可容纳空间条件更有利于储层的发育,层序界面附近长期基准面旋回上升半旋回的早中期(长8₁油层底部)以及下降半旋回的中晚期(长8₂油层顶部)形成的砂体一般具有较好的储集性能^[20,21-22]。层序地层格架内成岩相测井识别的结果

也表明层序界面附近不稳定组分溶蚀较为发育,且长8₂油层相较于长8₁砂体而言建设性成岩相较为发育,因此储集物性较长8₁砂体较好。且长8₂高位域的水下分流河道砂体相对于长8₁油层有更长的延伸距离和更大的宽度,在向湖方向被前三三角洲泥岩封堵更有利于形成岩性油藏,总体而言,有利的油气分布区主要位于长8₂油层(基准面旋回下降期)和层序界面附近^[23,53]。

在高分辨率层序地层格架内对长8油层组成岩相的展布特征等进行深入探讨,研究层序对砂体和成

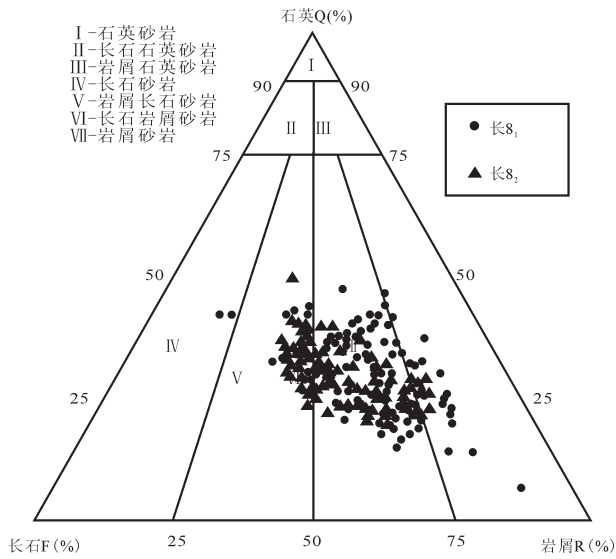


图9 姬塬地区长8油层组砂岩成分三角图
Fig.9 Triangular diagram of Chang 8 reservoir sandstone

岩相的时空分布规律的控制,可对油气富集的控制因素做出合理的分析,实现对优质储层发育区带的综合评价和预测^[54],并最终预测有利含油区块的分布。油气勘探工作必须将宏观层序地层和微观成岩作用研究相结合,这样才能获得最佳勘探效果^[16]。

5 结论

(1)利用成岩作用类型和强度、成岩矿物及其对储层物性的影响将长8油层组储层划分为绿泥石衬边弱溶蚀相、不稳定组分溶蚀相、压实致密成岩相、高岭石充填相和碳酸盐胶结5种成岩相。

(2)通过岩心薄片资料刻度测井的方法归纳总结了5种不同成岩相在AC、GR、DEN、CNL和RT等测井曲线上的响应特征,由此利用测井曲线实现各单井纵向上的成岩相划分。

(3)层序界面附近的层段不稳定组分溶蚀相以及高岭石充填成岩相较为发育,且各井之间具有良好的对比性,此外,层序界面之下的砂体碳酸盐胶结相也较为发育。层序界面控制了早期的溶蚀作用和碳酸盐胶结作用。

(4)最大湖泛面处均发育井间可对比的压实致密相,长8₂中期基准面下降半旋回(高位域)砂体一方面易于遭受溶蚀,另一方面由于受沉积间断和碎屑组分影响导致压实程度较弱,因此物性总体好于

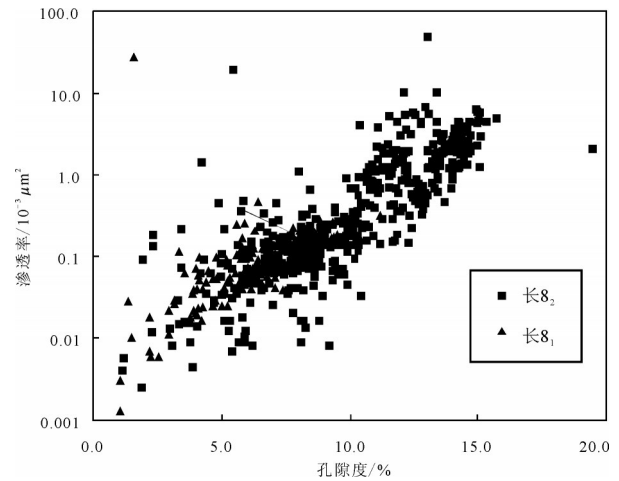


图10 姬塬地区长8₁和长8₂油层孔渗关系图
Fig.10 The cross plot of porosity/permeability of Chang 8₁ and Chang 8₂ oil layers in the Jiyuan area

长8₁低位体系域砂体。

参考文献(References):

- [1] 王昌勇, 王成玉, 梁晓伟, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统延长组长8油层组成岩相[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 596-614.
Wang Changyong, Wang Chengyu, Liang Xiaowei, et al. Diagenetic facies of the Chang 8 oil bearing layer of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Jiyuan area, Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 596- 614(in Chinese with English abstract).
- [2] 白玉彬, 罗静兰, 王少飞, 等. 鄂尔多斯盆地吴堡地区延长组长8致密砂岩油藏成藏主控因素[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1159-1168.
Bai Yubin, Luo Jinglan, Wang Shaofei, et al. The distribution of Chang-8 tight sandstone oil reservoir of Yanchang Formation in Wubao area, central-south of Ordos Basin [J]. Geology in China, 2013, 40 (4): 1159-1168(in Chinese with English abstract).
- [3] 范玉海, 屈红军, 王辉, 等. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用——以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 382-389
Fan Yuhai, Qu Hongjun, Wang Hui, et al. The application of trace elements analysis to identifying sedimentary media environment: a case study of Late Triassic strata in the middle part of western Ordos Basin [J]. Geology in China, 2012, 39 (2): 382- 389(in Chinese with English abstract).
- [4] 廖一, 郑荣才, 王成玉, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油层组高分辨率层序分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(3): 481-488.
Liao Yi, Zheng Rongcai, Wang Chengyu, et al. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy in Chang-8 subsection of Yanchang formation, Jiyuan area of Ordos Basin[J]. Acta

- Sedimentologica Sinica, 2010, 28(3): 481–488(in Chinese with English abstract).
- [7] 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 等. 连续型油气藏形成条件与分布特征[J]. 石油学报, 2009, 30(3): 324–331.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, et al. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30 (3): 324–331(in Chinese with English abstract).
- [6] 史建南, 郑荣才, 韩永林, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油层组岩性油藏成藏机理研究[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(3): 129–133.
Shi Jiannan, Zheng Rongcai, Han Yonglin, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of lithologic reservoir of Chang 8 member in Jiyuan area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(3): 129–133(in Chinese with English abstract).
- [7] 李国新, 徐胜林, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区上三叠统长6段砂体展布规律研究[J]. 中国地质, 2012, 39(4): 923–937.
Li Guoxin, Xu Shenglin, Chen Hongde, et al. The distribution regularity of sand bodies in Chang 6 member of Upper Triassic Yanchang formation, Fuxian area, Ordos Basin [J]. Geology in China, 2012, 39(4): 923–937(in Chinese with English abstract).
- [8] 罗静兰, 刘小洪, 林潼, 等. 成岩作用与油气侵位对鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层物性的影响[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 664–673.
Luo Jinglan, Liu Xiaohong, Lin Tong, et al. Impact of diagenesis and hydrocarbon emplacement on sandstone reservoir quality of the Yanchang formation (Upper Triassic) in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 664–673(in Chinese with English abstract).
- [9] 邓秀芹, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破[J]. 古地理学报, 2011, 13(4): 443–455.
Deng Xiueqin, Fu Jinhua, Yao Jingli, et al. Sedimentary facies of the Middle – Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and breakthrough in petroleum exploration[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(4): 443–455(in Chinese with English abstract).
- [10] Mansurbeg H, Elghali M A K, Morad S, et al. The impact of meteoric water on the diagenetic alterations in deep– water, marine siliciclastic turbidites[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89(1/3): 254–258.
- [11] 韩登林, 张昌民, 尹太举. 层序界面成岩反应规律及其对储层储集物性的影响[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 449–454.
Han Denglin, Zhang Changmin, Yin Taiju. Diagenetic reaction pattern of the sequence boundary and its impacts on reservoir quality [J]. Oil and Gas Geology, 2010, 31(4): 449–454(in Chinese with English abstract).
- [12] El– ghali M K K, Mansurbeg H, Morad S, et al. Distribution of diagenetic alterations in glaciogenic sandstones within a depositional facies and sequence stratigraphic framework: Evidence from the Upper Ordovician of the Murzuq Basin, SW Libya[J]. Sedimentary Geology 2006, 19: 323–351.
- [13] Salem A M, Ketzner J M, Morad S, et al. Diagenesis and reservoir– quality evolution of incised– valley sandstones: Evidence from the abu madi gas reservoirs (upper Miocene), the Nile delta basin, Egypt[J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75: 572–584.
- [14] Ketzner J M, Morad S, Evans R, et al. Distribution of diagenetic alterations in fluvial, deltaic, and shallow marine sandstone within a sequence stratigraphic framework: Evidence from the Mullaghmore Formation (Carboniferous), NW Ireland [J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72(6): 760–774.
- [15] Ketzner J M, Morad S. Predictive distribution of shallow marine, low porosity (pseudo matrix– rich) sandstones in a sequence stratigraphic framework: example from the Ferron sandstone, Upper Cretaceous, USA [J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23: 29–36.
- [16] 张守鹏, 刘成东. 东营凹陷古近系层序地层对成岩规律的控制作用[J]. 地层学杂志, 2007, 31(增刊): 581–584.
Zhang Shoupeng, Liu Chengdong. Paleogene sequence stratigraphy in the Dongying depression and its functions of controlling diagenesis[J]. Journal of Stratigraphy, 2007, 31 (suppl): 581–584(in Chinese with English abstract).
- [17] 李国蓉, 曾允孚, 周心怀, 等. 十万大山地区下–中泥盆统白云岩成岩层序地层学研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 668–671.
Li Guorong, Zeng Yunfu, Zhou Xinhui, et al. Study on diagenesis– sequence stratigraphy of Lower– middle Devonian dolostone in Shiwandashan area, Guangxi, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2004, 31(6): 668–671(in Chinese with English abstract).
- [18] 孙萍, 罗平, 阳正熙, 等. 基准面旋回对砂岩成岩作用的控制——以鄂尔多斯盆地西南缘纳水河延长组露头为例[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(2): 179–184.
Sun Ping, Luo Ping, Yang Zhengxi, et al. The control of the sequence boundary over the sandstone reservoir and diagenesis: a case study of Yanchang Formation outcrop along the Ruishui River profile [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2009, 28(2): 179–184(in Chinese with English abstract).
- [19] 赵俊兴, 申赵军, 李良, 等. 大型内陆拗陷湖盆层序结构充填特征及其分布规律——以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2318–2326.
Zhao Junxing, Shen Zhaojun, Li Liang, et al. Sequence filling characteristics and distribution laws of large continental depressed lake basin: A case study of Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 27(8): 2318–2326(in Chinese with English abstract).
- [20] 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. Sequence stratigraphic framework of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos basin and petroleum exploration[J]. Geology in China, 2007, 34(1): 73–

- 80(in Chinese with English abstract).
- [21] 国吉安, 庞军刚, 王桂成, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组湖盆演化及石油聚集规律[J]. 世界地质, 2010, 29(2): 277-234.
Guo Ji'an, Pang Jungang, Wang Guicheng, et al. Lake basin evolution and petroleum accumulation of Late Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Global Geology, 2010, 29(2): 277-234(in Chinese with English abstract).
- [22] 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 Yanru, Zhang Yanling, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary facies of Yanchang Formation, Triassic System in Ordos Basin[J]. Geoscience, 2009, 23(5): 803-808(in Chinese with English abstract).
- [23] 韩永林, 王成玉, 王海红, 等. 姬塬地区长8油层组浅水三角洲沉积特征[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1057-1064.
Han Yonglin, Wang Chengyu, Wang Haihong, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water deltas in Chang-8 Subsection of Yanchang Formation, Jiyuan area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1057-1064(in Chinese with English abstract).
- [24] Higgs K E, Zwingmann H, Reyes A G, et al. Diagenesis, porosity evolution, and petroleum emplacement in tight gas reservoirs, Taranaki basin, New Zealand [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77: 1003-1025.
- [25] 刘金库, 彭军, 刘建军, 等. 绿泥石衬边胶结物对致密砂岩孔隙的保存机制——以川中—川南过渡带包界地区须家河组储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(1): 53-58.
Liu Jinku, Peng Jun, Liu Jianjun, et al. Pore-preserving mechanism of chlorite rims in tight sandstone—an example from the T3x Formation of Baojie area in the transitional zone from the central to southern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(1): 53-58(in Chinese with English abstract).
- [26] Ehrenberg S N, Nadeau P H, Steen Ø. Petroleum reservoir porosity versus depth: Influence of geological age [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(10): 1281-1296.
- [27] 刘昊伟, 王键, 刘群明, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统延长组长8油层组有利储集层分布及控制因素[J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 285-294.
Liu Haowei, Wang Jian, Liu Qunming, et al. Favorable reservoir distribution and its controlling factors of the Chang 8 interval of Upper Triassic Yanchang Formation in Jiyuan area, Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3): 285-294(in Chinese with English abstract).
- [28] 邹才能, 陶士振, 周慧, 等. 成岩相的形成、分类与定量评价方法[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(5): 526-540.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhou Hui, et al. Genesis classification and evaluation method of diagenetic facies[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 526-540(in Chinese with English abstract).
- [29] 石玉江, 肖亮, 毛志强, 等. 低渗透砂岩储层成岩相测井识别方法及其地质意义——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油层组储层为例[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 820-827.
Shi Yujiang, Xiao Liang, Mao Zhiqiang, et al. An identification method for diagenetic facies with well logs and its geological significance in low-permeability sandstones: A case study on Chang 8 reservoirs in the Jiyuan region, Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 820-827(in Chinese with English abstract).
- [30] Dutton S P, Loucks R D. Diagenetic controls on evolution of porosity and permeability in lower Tertiary Wilcox sandstones from shallow to ultra deep (200-6700 m) burial, Gulf of Mexico Basin, U.S.A.[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27: 69-81.
- [31] Ozkan A, Cumella S P, Milliken K L, et al. Prediction of lithofacies and reservoir quality using well logs, Late Cretaceous Williams Fork Formation, Mamm Creek Field, Piceance Basin, Colorado [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(10): 1699-1723.
- [32] Ehrenberg S N, Jakobsen K G. Plagioclase dissolution related to biodegradation of oil in Brent Group sandstones (Middle Jurassic) of Gullfaks Field, northern North Sea [J]. Sedimentology, 2001, 48: 703-721.
- [33] Islam A A. Diagenesis and reservoir quality of Bhuvan sandstones (Neogene), Titas Gas Field, Bengal Basin, Bangladesh [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35: 89-100.
- [34] 丁晓琪, 张哨楠, 葛鹏莉, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组储层成岩体系研究[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 97-104.
Ding Xiaoqi, Zhang Shaonan, Ge Pengli, et al. Research on diagenesis system of Yanchang formation reservoirs, Southeast Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1): 97-104.
- [35] Weber J, Ricken W. Quartz cementation and related sedimentary architecture of the Triassic Solling Formation, Reinhardswald Basin, Germany [J]. Sedimentary Geology, 2005, 175: 459-477.
- [36] Taylor T R, Giles M R, Hathon L A, et al. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: Models, myths, and reality[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94: 1093-1132.
- [37] 王欣, 薛林福, 遇运良, 等. 压实法石英砂岩成岩相识别及其应用[J]. 测井技术, 2012, 36(4): 387-391.
Wang Xin, Xue Linfu, Yu Yunliang, et al. Recognition of quartz sandstone diagenetic facies with compaction method [J]. Well Logging Technology, 2012, 36(4): 387-391(in Chinese with English abstract).
- [38] 张小莉, 沈英, 陈文学. 利用测井资料分析成岩作用对储集层的影响[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 127-131.
Zhang Xiaoli, Shen Ying, Chen Wenxue. Application of well Logging information to analysis on the effect of diagenesis in reservoirs [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 127-131(in Chinese with English abstract).
- [39] 赖锦, 王贵文, 王书南, 等. 碎屑岩储层成岩相研究现状及进

- 展[J].地球科学进展, 2013,28(1): 39-50.
- Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Shunan, et al. Research status and advances in the diagenetic facies of classic reservoirs [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(1): 39-50(in Chinese with English abstract).
- [40] Dutton S P, Loucks R D. Diagenetic controls on evolution of porosity and permeability in lower Tertiary Wilcox sandstones from shallow to ultra deep (200-6700 m) burial, Gulf of Mexico Basin, U.S.A.[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27: 69-81.
- [41] 赵俊青, 纪友亮, 张世奇, 等. 陆相高分辨率层序界面识别的地球化学方法[J]. *沉积学报*, 2004, 22(1): 79-86.
- Zhao Junqing, Ji Youliang, Zhang Shiqi, et al. Geochemical methods of boundary identification in terrigenous high-resolution sequence[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 79-86(in Chinese with English abstract).
- [42] Morad S, Ketzer J M, De Ros L F. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins [J]. *Sedimentology*, 2000, 47(supp.1): 95-120.
- [43] 谭先锋, 田景春, 陈兰, 等. 陆相断陷湖盆层序对成岩演化控制作用探讨——以东营箕状断陷湖盆古近系沙河街组为例[J]. *中国地质*, 2010, 37(5): 1257-1272.
- Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Chen Lan, et al. The control role of stratigraphic sequence in diagenetic evolution in the terrestrial fault basin: a case study of Paleogene Shahejie Formation in Dongying half basin[J]. *Geology in China*, 2010, 37(5):1257-1272(in Chinese with English abstract).
- [44] 邱桂强. 东营凹陷古近系成岩层序特征与储集差异性分析[J]. *沉积学报*, 2007,25(6): 915-922.
- Qiu Guiqiang. Analysis on lower Tertiary diagenetic sequence characteristics and their differences of reservoirs in Dongying Sag [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 915-922(in Chinese with English abstract).
- [45] 刘辰生, 郭建华, 朱美衡. 塔中围斜区石炭系东河砂岩段成岩层序地层学[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2006,37(增刊): 74-79.
- Liu Chensheng, Guo Jianhua, Zhu Meiheng. Sequence stratigraphy of Donghe sandstone of upper Deonian around Tazhong area[J]. *J. Cent. South Univ. (Science and Technology)*, 2006, 37(suppl.): 74-79(in Chinese with English abstract).
- [46] 李熙喆, 张满郎, 谢武仁, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界层序格架内的成岩作用[J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 923-933.
- Li Xizhe, Zhang Manlang, Xie Wuren, et al. The diagenesis in sequence stratigraphic framework of the upper Paleozoic, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 923-933(in Chinese with English abstract).
- [47] 姜向强, 李德江, 朱筱敏, 等. 克百地区三叠系储层成岩层序研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(2): 23-27.
- Jiang Xiangqiang, Li Dejiang, Zhu Xiaomin, et al. Study on diagenetic sequence stratigraphy in Triassic reservoir of the Kebai region, Junggar basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science& Technology Edition)*, 2009, 31(2): 23-27(in Chinese with English abstract).
- [48] 谭先锋, 田景春, 李祖兵, 等. 碱性沉积环境下碎屑岩的成岩演化——以山东东营凹陷陡坡带沙河街组四段为例[J]. *地质通报*, 2010, 29(4): 535-543.
- Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Li Zubing, et al. Diagenesis evolution of fragmental reservoir in alkali sediment environment—taking the Member 4 of Shahejie Formation of steep-slope zone in Dongying sag, Shandong, China for example[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(4):535-543 (in Chinese with English abstract).
- [49] 朱筱敏, 董艳蕾, 郭长敏, 等. 歧口凹陷沙河街组一段层序格架和储层质量分析[J]. *沉积学报*, 2007, 25(6) : 934-941.
- Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, Guo Changmin, et al. Sequence framework and reservoir Quality of Sha1 member in Shahejie formation, Qikou Sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6):934-941(in Chinese with English abstract).
- [50] 雷卞军, 付金华, 孙粉锦, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组层序地层格架研究——兼论陆表海沉积作用和早期成岩作用对相对海平面变化的响应[J]. *地层学杂志*, 2010, 34(2): 145-153.
- Lei Bianjun, Fu Jinhua, Sun Fenjin, et al. Sequence stratigraphy of the Majiagou formation, Ordos basin: sedimentation and early diagenesis related to ecstatic sea-level changes [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2010, 34(2): 145-153(in Chinese with English abstract).
- [51] Morad S, Al-Ramadan Khalid, Ketzer J M, et al. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(8): 1267-1309.
- [52] 田建锋, 陈振林, 凡元芳, 等. 砂岩中自生绿泥石的产状、形成机制及其分布规律[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(2): 200-206.
- Tian Jianfeng, Chen Zhenlin, Fan Yuanfang, et al. The occurrence, growth mechanism and distribution of authigenic chlorite in sandstone[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(2): 200-206(in Chinese with English abstract).
- [53] 陈飞, 王训练, 罗平, 等. 陕北地区上三叠统延长组层序地层格架内岩性油气藏分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2009, 40(4): 1146-1153.
- Chen Fei, Wang Xunlian, Luo Ping, et al. Analysis of litho-stratigraphic reservoirs distribution in sequence stratigraphic at the upper Triassic Yanchang formation in northern Shaanxi [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2009, 40(4): 1146-1153(in Chinese with English abstract).
- [54] 王昌勇, 郑荣才, 韩永林, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区上三叠统延长组第六段高分辨率层序-岩相古地理[J]. *地层学杂志*,

2009, 33(3): 326–332.

Wang Changyong, Zheng Rongcai, Han Yonglin, et al. High-resolution sequence stratigraphy and pale geography of the

interval 6 of the upper Triassic Yanchang formation in the Jiyuan region, Ordos Basin[J]. Journal of Stratigraphy, 2009, 33(3): 326–332(in Chinese with English abstract).

Diagenetic facies distribution in high resolution sequence stratigraphic framework of Chang 8 Oil Layers in the Jiyuan area

LAI Jin¹, WANG Gui-wen^{1,2}, WU Da-cheng³, CAO Jiang-ning³, ZHANG Xiao-tao¹, RAN Ye¹, YAO Ya-bin⁴, ZHANG Yong-di⁴

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, CNPC, Korla 841000, Xinjiang, China; 4. Tarim Department of China Petroleum Logging Co., Ltd., Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: Lithologic characteristics, reservoir property and pore structure, diagenesis, diagenetic minerals, diagenetic environment, diagenetic stage and diagenetic evolution sequence of Member 8 reservoir of Yanchang Formation were studied by making full use of normal thin sections, casting thin sections, cathodoluminescence, X-ray diffraction, scanning electron microscopy and core data. The results show that the reservoir has experienced such diagenetic processes as compaction, cementation, corrosion and fracture, and it is now at stage A of middle diagenetic process. 5 types of diagenetic facies were recognized based on diagenesis, diagenetic minerals and their effect on the reservoir quality, namely, weak corrosion with chlorite mat; corrosion of unstable components; compaction density, kaolinite filling, and carbonate cementation. The well logging response characteristics of different types of diagenetic facies were summarized on GR, SP, DEN, AC and CNL, and thus the logging recognition model and standard of diagenetic facies could be set up. Then the diagenetic facies was matched with the high resolution sequence stratigraphic framework. The results show that the sequence boundary between the Chang 8₁ lowstand systems tract and Chang 8₂ highstand systems tract controls the dissolution of the silicate minerals, the filling of the kaolinite and the cementation of carbonate cement, which suggests that diagenetic facies as corrosion of unstable components and kaolinite filling are very common in the vicinity of the sequence boundary, and they are strongly comparable between various wells; nevertheless, the carbonate cementation is also very common under the sequence boundary. The maximum flooding surface of the medium-term base level cycle corresponds to the compaction density diagenetic facies, the reservoir quality of Chang 8₂ highstand systems tract (the middle-term base-level's ascending semi-cycle) is better than that of Chang 8₁ lowstand systems tract (the middle-term base-level's falling semi-cycle) due to the following factors: (1) the Chang 8₂ sand bodies tend to be dissolved since they are located under the sequence boundary; (2) the Chang 8₂ sand bodies have high content of feldspars and are of coarser grain size and, what is more, the degree of compaction is lower than that of Chang 8₁ sand bodies due to the depositional hiatus after the formation of sequence boundary.

Key words: sequence stratigraphy; diagenetic facies; sequence boundary; systems tract; Chang 8 oil layers; Jiyuan area

About the first author: LAI Jin, born in 1988, male, doctor candidate, majors in the study of sedimentology, reservoir geology and well logging geology; E-mail: sisylaijin@163.com.