

四川安岳地区须二段致密砂岩储层 成岩相特征及测井识别

柴毓^{1,2}, 王贵文^{1,3}, 赖锦¹

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 石油工业出版社有限公司, 北京 100011;
3. 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)

摘要:通过岩芯观察以及对普通薄片、铸体薄片、扫描电镜等资料的鉴定和分析,探讨了安岳地区须二段致密砂岩储层岩石学和物性特征、成岩作用、成岩阶段和成岩演化序列;基于不同成岩相的测井响应特征,利用自然伽马、声波时差、电阻率、密度和补偿中子孔隙度等常规测井参数建立了不同成岩相的测井识别标准,进而划分安岳地区各单井成岩相。结果表明:安岳地区须二段致密砂岩储层经历了压实、胶结等破坏性成岩作用和溶蚀、破裂等建设性成岩作用;根据成岩作用类型、成岩矿物及其对储层物性的影响,将储层划分为压实致密相、伊蒙混层充填相、碳酸盐胶结相、不稳定组分溶蚀相和成岩微裂缝相5种成岩相类型;结合试气资料,成岩微裂缝相常伴随构造裂缝的发育,含气性最好,而当没有裂缝的叠加作用时,不稳定组分溶蚀相含气性较好;成岩相特征、展布及其测井识别方法能有效评价致密砂岩储层并预测优质储集体发育带,为油气勘探提供地质依据。

关键词:致密砂岩;成岩作用;测井识别;储集体;须家河组;安岳地区;四川

中图分类号:P618.13;TE122.2

文献标志码:A

Diagenetic Facies Characteristics and Logging Recognition of Tight Sandstone Reservoir in Xu-2 Section of Anyue Area, Sichuan

CHAI Yu^{1,2}, WANG Gui-wen^{1,3}, LAI Jin¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Petroleum Industry Press Co., Ltd., Beijing 100011, China; 3. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: According to the core observation and identification of normal thin section, casting thin section and scanning electron microscope, the petrologic characteristics, physical properties, diagenesis, diagenetic stage and diagenetic evolution sequence of tight sandstone reservoir in the second member of Xujiahe Formation (Xu-2 Section) in Anyue area were discussed; according to the logging response characteristics of different diagenetic facies, the normal logging parameters including natural Gamma, acoustic, resistivity, density and compensated neutron porosity, etc., were used to build logging recognition criteria of different diagenetic facies, and then the diagenetic facies of single well in Anyue area was divided. The results show that the tight sandstone reservoirs in Xu-2 Section of Anyue area experience the destructive diagenesis including compaction and cementation, and constructive diagenesis including dissolution and fracture; based on type of diagenesis, diagenetic mineral and its effect on reservoir properties, the

收稿日期:2014-01-10

基金项目:国家科技重大专项项目(2011ZX05020-008)

作者简介:柴毓(1989-),女,天津人,理学硕士研究生,E-mail:cherrychai213@126.com。

reservoirs are divided into compaction tight facies, illite and smectite mixed filling facies, carbonate-cemented facies, dissolution of unstable component facies and diagenetic microfracture facies; based on the gas testing data, the diagenetic microfracture facies has favorable gas potential and normally develops with structural fractures, and the dissolution of unstable component facies has good gas potential without the superposition of fracture; diagenetic facies characteristics, distribution and logging recognition method can effectively evaluate tight sandstone reservoirs and predict high quality reservoir bodies, providing geological basis for hydrocarbon exploration.

Key words: tight sandstone; diagenesis; logging recognition; reservoir body; Xujiache Formation; Anyue area; Sichuan

0 引言

致密砂岩气已成为中国天然气增储的重要领域,是目前最为现实的非常规天然气资源^[1]。致密砂岩储层是指低孔隙度(小于10%)、低渗透率(小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的砂岩储层,其孔喉半径小于 $1 \mu\text{m}$,含气饱和度低(小于60%),依靠常规技术难以开采,需大规模压裂或特殊采气工艺技术才能产出具有经济价值的天然气^[1-11]。致密砂岩储层虽然孔隙度和渗透率都较低,但是大面积普遍含气,其富集程度主要受有利相带、优质储层、裂缝发育程度及局部构造控制,呈现局部富集的特点^[1]。因此,寻找具有工业开采价值的天然气储集层(即“甜点”),是致密砂岩气勘探与开发的重点^[12]。

四川盆地须家河组天然气勘探始于1956年,并先后发现了合川、新场、广安、安岳、八角场、洛带和邛西等致密砂岩大气田,探明天然气地质储量超过 $3\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[13-19],截至2010年底,安岳地区已探明储量达 $1\,171.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[20]。研究区须二段储层质量较差,总体上为一套典型的低孔低渗致密砂岩储层^[21]。砂岩在埋藏过程中经历复杂成岩作用而致密,因而成岩作用对其孔隙度和渗透率的改造起着关键作用,主要包括压实、胶结、溶蚀、破裂等类型。其中,溶蚀和破裂等建设性成岩作用是决定储层有效性的关键^[22]。在特定的沉积微相背景下,成岩作用类型、强度及其组合(即成岩相)决定了须二段有利成岩储集体“甜点”的形成与分布^[23],因此,成岩作用和成岩相的研究对该区天然气藏的储层综合评价和有利区带预测具有重要意义。

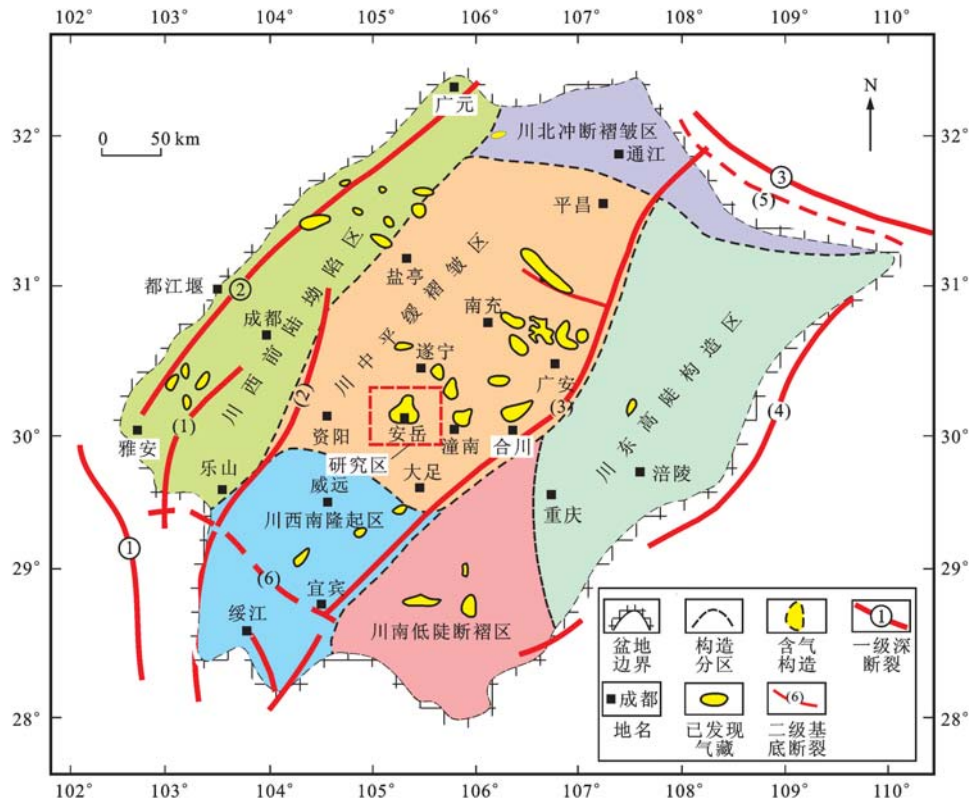
1 区域地质背景

四川盆地隶属扬子准地台西北部的次一级构造单元,向北至城口断裂,向南以峨眉—瓦山断裂为

界,东缘为七跃山断裂,西部紧邻龙门山断裂,是一个由盆地周围断裂和褶皱围限起来的菱形构造兼地貌盆地(图1)^[24]。盆地构造格局于中生代印支运动后期开始形成前陆盆地雏形,经燕山运动至喜山运动的多次叠加后逐渐定型^[25]。按区域构造类型,可将盆地划分为川中平缓褶皱区、川西前陆拗陷区、川东高陡构造区、川西南隆起区、川北冲断褶皱区和川南低陡断褶区6个二级构造单元^[13]。研究区位于川中平缓褶皱区中部,断层发育较少,背斜构造平缓^[21]。上三叠统须家河组全区都有分布,为一套辫状河三角洲沉积体系的互层状砂泥岩,地层厚度为500~600 m。须家河组自下而上可分为6段:须一、三、五段为黑色泥、页岩夹薄层粉砂岩或煤层,为滨浅湖相,是须家河组主要的烃源层及盖层;须二、四、六段为灰色中—细粒岩屑长石砂岩、长石岩屑砂岩,发育三角洲前缘水下分流河道、河口坝微相,是须家河组主要的含气储集层段。研究区须二段总体上为一套平缓构造背景下形成的低孔低渗致密砂岩储层^[26]。强烈压实作用对储层的致密化起重要作用,溶解和破裂作用是控制有效储层的主要因素,胶结作用也对储层的物性具有一定影响,因此,成岩相的研究是寻找须家河组低孔低渗砂岩储层“甜点”分布的关键^[22]。

2 储层基本特征

通过岩芯观察以及铸体薄片、扫描电镜资料,安岳地区须二段储层主要为中—细粒灰白色、灰色岩屑长石砂岩,长石岩屑砂岩和长石砂岩(图2)。石英体积分数为33%~65%,平均为54.3%;长石为3%~24%,平均为19.1%,主要为钾长石和钠长石;岩屑为13%~62%,平均为26.8%,其中以沉积岩岩屑为主,其体积分数为3%~43%,平均为9.3%,其次为变质岩岩屑和火成岩岩屑。颗粒间以



①为安宁河;②为龙门山;③为城口;(1)为熊坡;(2)为龙泉山;(3)为华蓥山;(4)为七跃山;(5)为万源;(6)为峨眉—瓦山;

图件引自文献[13],有所修改

图 1 四川安岳地区位置

Fig. 1 Location of Anyue Area in Sichuan

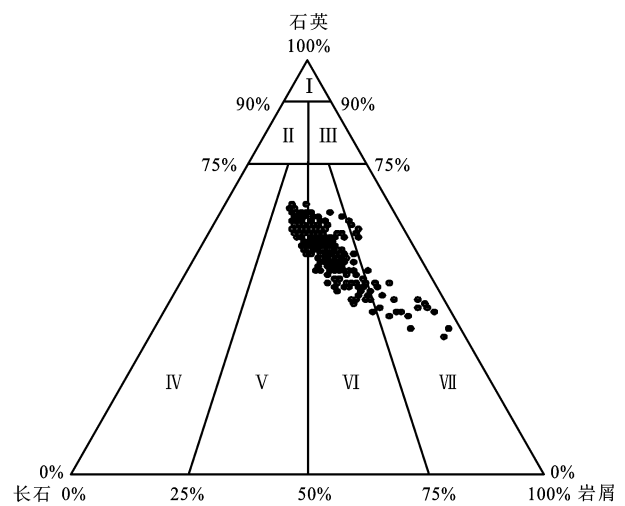
点一线、凹凸式接触关系为主。粒间填隙物含量较高,杂基以泥质杂基为主,体积分数为 1%~20%,胶结物以方解石、白云石、硅质及一些黏土矿物为主,含量少于 5%,以孔隙式和接触式胶结为主。颗粒分选中等,磨圆以次棱角—次圆状为主。总体上,安岳地区须二段储层结构成熟度中等,成分成熟度较低,显示近物源、相对快速堆积的辫状河三角洲前缘沉积特征。

根据岩芯常规测试资料,安岳地区须二段储层为典型的低孔低渗储层。其孔隙度为 0.67%~10.77%,平均为 7.34%,主要分布在 6%~10%;渗透率为 $(0.0006 \sim 274) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.58 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要分布在 $(0.01 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。孔隙度与渗透率具有良好的正相关关系,即随孔隙度增加,渗透率明显变大。总体上,安岳地区须二段储层具孔隙型储层特点,同时也有一些样品发育微裂缝,对储层渗透率有影响(图 3)。

3 储层成岩作用及其演化序列

3.1 储层成岩作用

通过岩芯观察以及普通薄片、铸体薄片和扫描



I—石英砂岩;II—长石质石英砂岩;III—岩屑质石英砂岩;

IV—长石岩屑质石英砂岩;V—长石砂岩;VI—岩屑

长石砂岩;VII—长石质岩屑砂岩

图 2 安岳地区须二段砂岩成分三角图

Fig. 2 Triangular Diagram Illustrating the Composition of Sandstone in Xu-2 Section of Anyue Area

电镜等分析,安岳地区须二段储层主要经历了压实、胶结、溶蚀、破裂等成岩作用。压实和胶结等破坏性成岩作用降低了孔隙度和渗透率,造成砂岩储层致

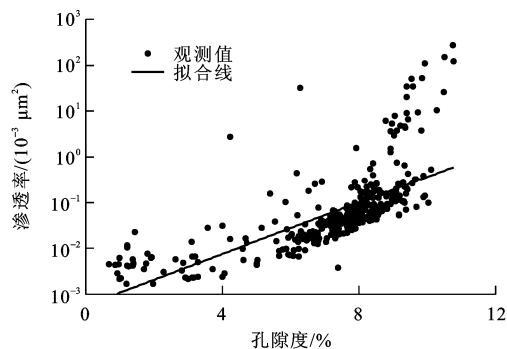


图3 安岳地区须二段储层孔渗关系

Fig. 3 Relationship Between Porosity and Permeability of Reservoir in Xu-2 Section of Anyue Area

密化;溶蚀、破裂等建设性成岩作用有利于形成致密砂岩背景下的优质储层。须家河组储层现今正处于中成岩阶段A期,多类型、多阶段成岩作用对储层孔隙的形成和演化起着重要作用^[27]。

3.1.1 压实作用

由于晚三叠世四川前陆盆地形成过程中的强烈挤压和埋深持续加大^[28],安岳地区须二段储层在埋藏过程中以压实作用为主,总体上压实作用较强,表现为碎屑颗粒呈点、线、凹凸状接触,颗粒排列较紧密,略具定向性,云母类片状矿物弯曲变形,石英、石英岩屑等刚性颗粒出现裂纹及破碎[图4(a)、(b)]。强压实作用致使本区须家河组砂岩原生孔隙度降低和储层致密化,后期随着沉积物的不断埋藏,机械压实作用减弱,并逐渐被压溶作用替代;同时,压溶组分SiO₂作为胶结物沉淀下来,须二段砂岩广泛发育

的石英次生加大现象与压溶作用相关,其降低了孔隙度,进一步破坏了储层物性^[28-31]。

3.1.2 胶结作用

安岳地区须二段碎屑岩储层中胶结物成分多样,以硅质和碳酸盐为主,其次为绿泥石、伊利石、白云石等。储层硅质胶结物体积分数较低(1%~2%),这可能是砂岩成分成熟度较低、长石蚀变程度高、塑性岩屑含量较高等原因所致^[31]。硅质胶结物主要以石英加大边的形式存在,加大边宽0.03~0.20 mm,铸体薄片可见石英次生加大现象[图4(a)、(b)];硅质胶结作用致使储层孔隙减少,物性变差,在石英含量较高的地方,硅质胶结物明显增加,石英加大现象普遍。

由于本区须家河组为煤系地层,地层水呈酸性,所以早期碳酸盐胶结发育较少;中成岩阶段A期后期,水介质开始向碱性转变,晚期方解石胶结物较为常见^[32]。须二段储层可见少量连晶方解石(体积分数为10%~20%),碎屑颗粒呈点状或悬浮状分布[图4(c)],为早期形成的碳酸盐胶结物。晚期碳酸盐胶结物充填长石溶蚀孔,占据孔隙且缩小喉道,降低储集体孔渗性,对储层物性有强烈的破坏作用。

其他胶结作用(如伊利石、绿泥石和伊蒙混层等黏土矿物胶结作用)在样品中也较为常见。伊利石、绿泥石、伊蒙混层主要呈片状、丝缕状充填在粒间或者以薄膜式附在颗粒表面[图4(d)],遇水膨胀或断裂堵塞喉道,从而降低渗透率^[32-33]。伊利石和绿泥石胶结物一般在深度大于2 000 m时形成,且含量

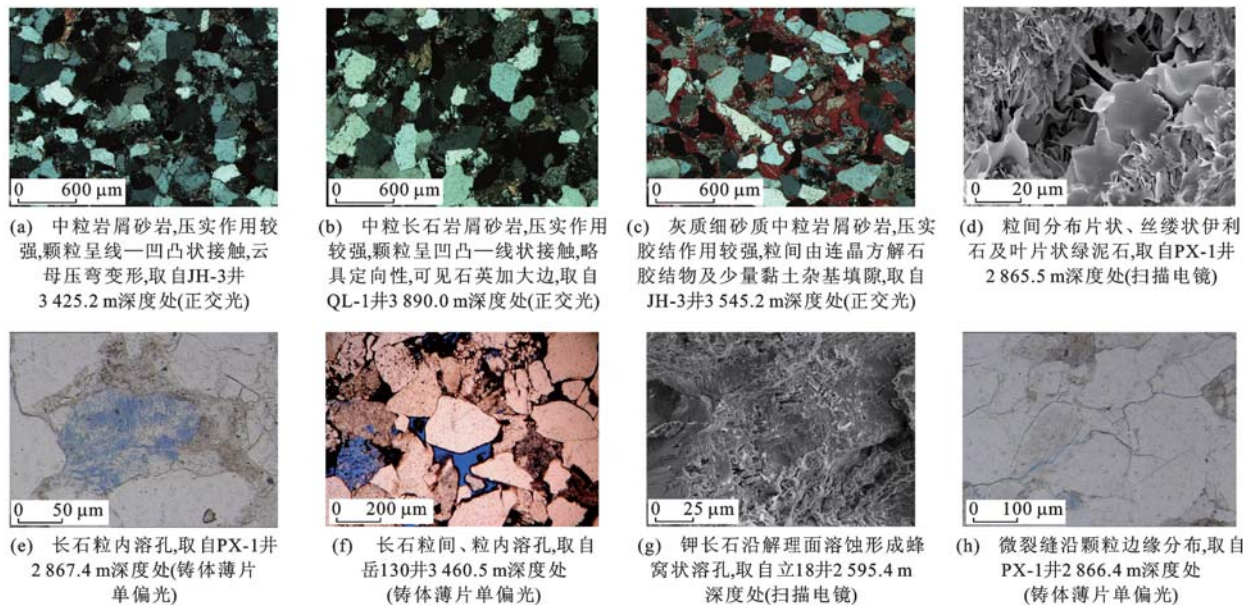


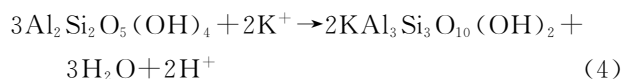
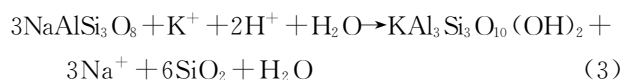
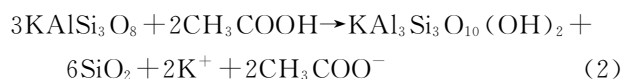
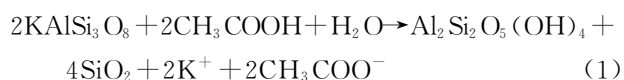
图4 安岳地区须二段储层成岩作用显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of Reservoir Diagenesis in Xu-2 Section of Anyue Area

随埋深增加而逐渐增高^[34]。

3.1.3 溶蚀作用

通过镜下观察,安岳地区须二段砂岩储层溶蚀现象较为普遍,从沉积期一直持续到中成岩阶段。主要溶蚀作用为早成岩阶段后期砂岩储层的不稳定组分被生烃产生的酸性流体溶蚀,所形成的次生孔隙是须二段主要的孔隙类型及气藏储集空间。溶蚀作用主要是对骨架颗粒中的长石以及变质岩岩屑的溶蚀,其次是对黏土矿物的溶蚀^[35]。随着埋深增加,须一段和须三段的泥岩热演化生成的油气向须二段储层运移,并携带大量有机酸和 CO₂ 使长石溶解形成高岭石^[36],同时长石溶蚀有助于晚期石英胶结物的沉淀,钾长石的溶解反应见式(1)^[37]。钾长石和钠长石被溶蚀形成伊利石胶结物的反应见式(2)和式(3)^[38-39]。须二段储层众多薄片并未观察到高岭石,这与须二段地质历史时期埋深较大有关;在较高的地温下(120℃~150℃),不稳定的高岭石在富钾条件下向伊利石和石英转化,反应见式(4)^[40];在转化的过程中,反应也能产生一定量的酸性水,促进硅铝酸盐的溶解^[41]。



长石类骨架颗粒沿解理、双晶面或边缘溶解,形成粒间、粒内溶孔以及蜂窝状溶孔等[图 4(e)~(g)]。溶蚀作用总体上改善了砂岩的孔渗性和孔喉连通性,增加储层储集空间,是须家河组最主要的建设性成岩作用。

3.1.4 破裂作用

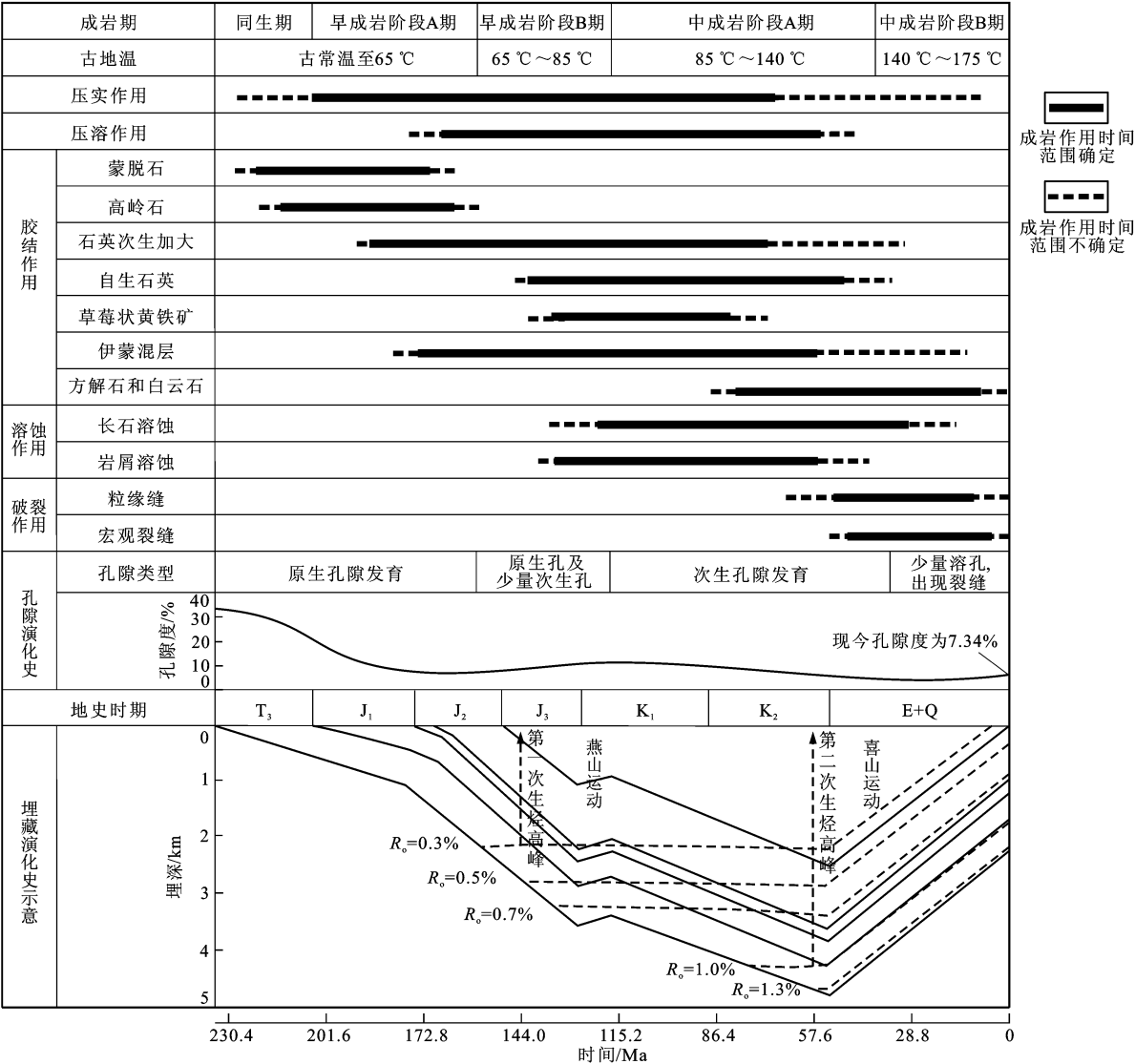
破裂作用主要是指由构造运动或压实作用而产生缝隙。所形成的构造缝和微裂缝增加了裂缝的宽度与密度,虽不能显著提高储层的储集性能,但裂缝的存在可以有效地改善致密砂岩的渗流性,是改善须家河组储层物性的一种重要的建设性成岩作用^[42]。构造破裂作用不属于一般意义上的沉积成岩作用,但破裂作用导致岩石产生构造裂缝、微裂缝,对后期成岩作用、储集性能有重要作用,因此,将其作为广义上的成岩作用加以讨论^[43]。

铸体薄片观察到的微裂缝宽度主要为 0.005~0.050 mm,少部分为 0.05~0.10 mm,且裂缝多沿颗粒边缘发育,在裂缝延长方向上有分叉现象,裂缝多相互穿插和切割[图 4(h)]。沿微裂缝常见溶蚀现象,表明裂缝促进了次生溶孔的形成。

3.2 储层成岩演化序列与孔隙演化史

按照行业标准《碎屑岩成岩阶段划分》(SY/T 5477—2003),结合安岳地区须二段的成岩作用类型和特征,探讨经镜下鉴定的自生矿物类型和形成顺序以及黏土矿物、岩石内构造特征等,认为本区须二段储层经历同生期、早成岩阶段 A 期和 B 期,目前处于中成岩阶段 A 期^[21]。根据构造-埋藏演化史、成岩作用、自生矿物成因、各成岩矿物共生组合关系等,可以初步确定安岳地区须二段储层的成岩演化序列为:机械压实→压溶作用→石英次生加大→伊蒙混层胶结→油气充注→长石和岩屑溶蚀→晚期石英次生加大、自形石英生成→伊利石胶结和晚期方解石胶结→构造挤压作用产生裂缝(图 5)。

晚三叠世到早侏罗世为同生成岩作用阶段,沉积物快速堆积,储层因压实作用使原生粒间孔隙迅速减少,保存孔隙度约为 24%;早成岩阶段 A 期,对应层段埋深小于 2 000 m,温度一般低于 65℃,成岩作用以机械压实为主,后期过渡为化学压溶作用,孔隙度明显降低,该阶段末期原生孔隙度为 10%~22%,平均为 15.4%;早成岩阶段 B 期,对应层段埋深为 2 000~3 000 m,温度为 65℃~85℃,随着埋深加大,由于缺乏早期碳酸盐胶结物,压实作用明显,原生孔隙继续减少,颗粒基本呈点一线状接触,石英颗粒发生压溶作用形成第 I 期石英加大边,晚侏罗纪时期有机质进入生烃门限,开始生成大量有机酸溶蚀储层中的长石、岩屑颗粒,从而形成次生孔隙^[44],早白垩世储层孔隙度降至 7%~15%范围内,成为致密储层^[45];中成岩阶段 A 期,储层持续埋深,在晚白垩世末期达到最大,为 4 500~5 000 m^[13],有机酸的溶蚀作用是这个阶段最主要的成岩作用^[24]。由于长石持续被溶蚀和石英压溶作用,成岩流体中硅质过饱和形成第 II、III 期石英加大边,分布在石英颗粒周边和粒间孔隙中,使储层变得更为致密,在该阶段后期,成岩流体中盐度增高,出现晚期碳酸盐胶结物(含铁方解石、铁白云石等),使原本致密的砂岩孔隙度更小了^[37],同时,强压实作用形成微裂缝及喜山期构造抬升导致构造裂缝发育,改善了储层物性,现今平均孔隙度最终变为 7.34%。



图件引自文献[45]和[46];R_o为镜质体反射率

图 5 安岳地区须二段储层成岩作用序列及孔隙演化史

Fig. 5 Diagenesis Sequence and Porosity Evolution History of Reservoir in Xu-2 Section of Anyue Area

4 储层成岩相

4.1 成岩相类型

成岩相是沉积物在构造、流体、温压等条件下经历一定成岩作用和演化阶段的产物,包括岩石颗粒、胶结物、组构、孔洞缝等综合特征。成岩相是表征储集体性质、类型和优劣的成因性标志,反映了现今矿物成分和组构面貌^[47]。有利成岩相的研究有助于预测致密砂岩中的有效储集体,从而指导油气勘探^[22]。目前,国内外学者一般根据成岩矿物、成岩事件、成岩环境等划分成岩相,这直接反映了沉积物所经历的成岩作用和成岩阶段的特征^[47]。由于安岳地区须二段储层受到多种成岩环境下多种成岩作用的叠加,所以可以通过某种成岩环境下发生的主

要成岩作用来命名成岩相^[44]。对须二段储层物性影响较大的成岩作用类型有压实、胶结、溶蚀和破裂作用,主要成岩矿物为方解石、白云石、伊蒙混层和伊利石。根据成岩作用类型、成岩矿物及其对储层物性的影响,将须二段储层划分为压实致密相、伊蒙混层充填相、碳酸盐胶结相、不稳定组分溶蚀相和成岩微裂缝相 5 种成岩相。它们具有多种成岩作用、成岩矿物组合及不同储层孔隙发育特征。

4.1.1 压实致密相

安岳地区须二段储层压实致密成岩相主要分布于三角洲前缘的水下分流间湾等水动力较弱的沉积相带,储层岩性为泥岩、泥质粉砂岩等,其中塑性岩屑(如云母、千枚岩、板岩等)含量相对较高,颗粒粒度较细或者颗粒分选差、砂泥混杂,易于被压实,在

后期的深埋过程中逐渐被压实致密^[29]。早成岩阶段压实作用较强烈,颗粒主要呈点—线状紧密排列,塑性岩屑弯曲变形[图 6(a)、(b)],孔隙度小于 5%,

面孔率较低,物性很差或不具备储集性能^[48]。测井曲线响应特征为中—高自然伽马、中—高密度、高补偿中子孔隙度和中—低声波时差。

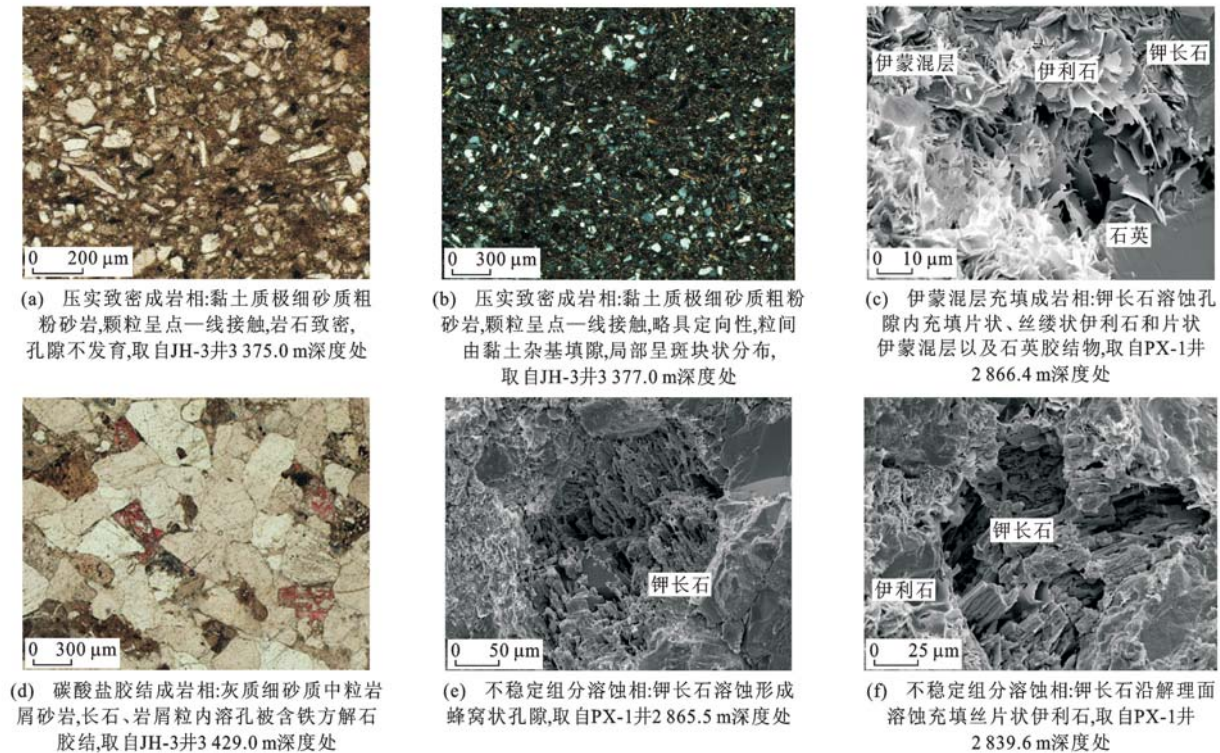


图6 安岳地区须二段储层不同成岩相显微照片

Fig. 6 Photomicrographs of Different Diagenetic Facies of Reservoir in Xu-2 Section of Anyue Area

4.1.2 伊蒙混层充填相

安岳地区须二段储层黏土矿物以伊利石、伊蒙混层为主,因此,将伊利石、伊蒙混层充填划为同一类成岩相。伊蒙混层充填相在本区主要发育于结构成熟度较差的沉积相带中,主要表现为杂基伊利石化及伊利石交代碎屑颗粒边缘等^[49]。伊蒙混层对孔隙的充填易于堵塞孔隙喉道,使储层物性变差,孔隙结构变得更为复杂,因此,该成岩相属破坏性成岩相。伊利石多是溶蚀作用的伴生产物,可见残余溶蚀孔隙,储集性能差—中等,渗流性能差,一般对应差储层或非储层段。伊利石的形成过程通常伴随有石英的形成,因而在伊利石以及伊蒙混层胶结的地方可见石英次生加大[图 6(c)],但总体上储层石英次生加大以及自生石英的含量相对少,因此,本文没有把硅质胶结成岩相单独划分出来。伊蒙混层充填成岩相在测井曲线上表现为高自然伽马值、高补偿中子孔隙度和较低密度。

4.1.3 碳酸盐胶结相

碳酸盐岩胶结相在安岳地区须二段的分布受地层流体介质及湖盆层序演化的控制^[49],主要发育于

三角洲前缘还原环境下的水下分流河道及与分流间湾毗邻的河口坝砂体之中,尤其是在邻近泥岩的砂层顶、底附近相对富集^[29,50]。由于砂岩中的碳酸盐胶结物来源于相邻泥岩,泥岩在压实作用下释放出大量的饱和碳酸盐压实流体,且砂—泥接触面水岩相互作用较活跃,易发生碳酸盐溶解和沉淀,形成碳酸盐胶结物充填粒间及交代颗粒,使储层物性变差,所以碳酸盐胶结相属破坏性成岩相^[51-52]。须二段储层碳酸盐胶结物主要为含铁方解石和铁白云石[图 6(d)],同时可见连晶状的早期方解石,并形成颗粒漂浮在胶结物中的“悬浮砂”构造[图 4(c)]。后期的方解石胶结物还会充填于构造裂缝中,进一步破坏储层物性。常规测井曲线响应特征为低自然伽马、大密度(一般大于 $2.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、低声波时差、低补偿中子孔隙度;电阻率曲线表现为明显的“钙尖峰”^[49],高电阻率在电成像(FMI)测井图像上呈现亮黄色或者亮色条带模式^[29]。

4.1.4 不稳定组分溶蚀相

在安岳地区须二段水下分流河道以及河口坝砂体中常发育溶蚀相,储层孔隙度增大,对本区储集空

间的形成有重要影响。须二段储层成分成熟度较低,不稳定矿物(长石、岩屑等)含量相对较高;在强压实-压溶和胶结作用背景下,原生孔隙基本消失,形成的次生溶蚀孔决定了低孔低渗储集物性;该成岩相是最主要的建设性成岩相。长石沿解理面溶蚀形成蜂窝状溶孔[图 6(e)],并伴生有次生石英、高岭石、伊利石等胶结物[图 6(f)]。在测井曲线上,该成岩相表现为低自然伽马值、低密度、中等补偿中子孔隙度测井值。

4.1.5 成岩微裂缝相

考虑到薄片镜下观察到较多的成岩微裂缝,本文将成岩微裂缝相单独划分出来。为了与构造宏观裂缝区分,微裂缝通常是指宽度小于 0.1 mm 的裂缝[图 4(h)],主要是由于成岩过程中刚性颗粒经过压实、破裂而形成的,通常规模较小,对储层改造作用相对有限^[23]。成岩微裂缝的展布及强度主要受构造应力带影响,常对应于构造挤压应力或者成岩压实作用较强烈的层段,一般也是构造裂缝发育规模较大的层段。同时,孔隙水沿裂缝流动而发育次生溶孔,改善了储集性能,属建设性成岩相。在常规测井曲线上,该岩相表现为中—低密度、低电阻率、高声波时差的特征。

4.2 成岩相与储层物性

根据成岩相薄片镜下特征、成岩相测井识别特征和物性资料,不同成岩相储集层物性之间均有一定程度的重叠(图 7),总体上以成岩微裂缝相物性最佳,其次是不稳定组分溶蚀相,再次是伊蒙混层充填相和碳酸盐胶结相,压实致密相最差。压实致密相发育层段的沉积物粒度细且泥质含量高,抗压实能力差;由于储层成岩阶段埋深较大,所以其易被压实而致密,物性最差,孔隙度为 1%~4%,渗透率为 $(0.001\sim0.05)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。碳酸盐胶结相储层物性也很差,平均孔隙度为 2.33%,平均渗透率为 $0.01\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。伊蒙混层充填层段物性也较差,平均孔隙度为 5.11%,平均渗透率为 $0.02\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。

表 1 安岳地区须二段储层成岩相测井响应特征统计结果

Tab. 1 Statistical Results of Logging Response Characteristics of Diagenetic Facies of Reservoir in Xu-2 Section of Anyue Area

成岩相类型	自然伽马/API		声波时差/ $(\mu\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$		补偿中子孔隙度/%		密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$		电阻率/ $(\Omega\cdot\text{m})$	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
成岩微裂缝	52~103	76	213.3~288.7	238.7	5.9~13.0	9.7	2.51~2.60	2.57	13.0~26.9	18.6
不稳定组分溶蚀	53~94	70	169.9~237.9	206.6	2.8~10.4	8.2	2.43~2.66	2.54	12.3~48.4	27.0
伊蒙混层充填	90~101	95	180.4~216.5	192.9	8.2~18.0	11.2	2.50~2.78	2.60	16.0~38.0	21.8
碳酸盐胶结	28~60	37	162.7~202.9	181.9	4.7~11.7	7.0	2.59~2.74	2.67	43.6~108.0	65.3
压实致密	91~150	116	164.5~197.6	183.9	7.9~30.0	19.2	2.51~2.74	2.67	6.9~39.2	16.0

不稳定组分溶蚀相储层物性较好,平均孔隙度为 7.68%,平均渗透率为 $0.08\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。成岩微裂缝相储层物性最好,平均孔隙度为 9.23%,平均渗透率为 $34.64\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,微裂缝大大提高了储层的渗流能力,控制了储层产能。因此,不稳定组分溶蚀相和成岩微裂缝相储集层是下一步寻找优质储层的重点。

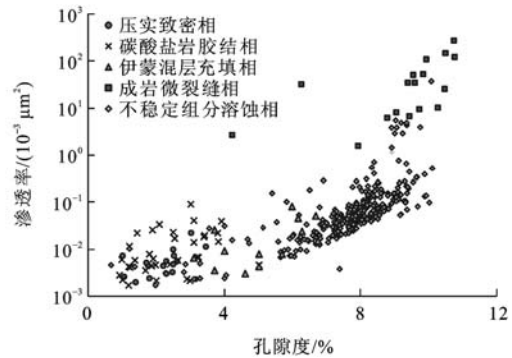


图 7 安岳地区须二段储层不同类型成岩相孔渗关系
Fig. 7 Relationship Between Porosity and Permeability of Various Diagenetic Facies of Reservoir in Xu-2 Section of Anyue Area

5 成岩相测井识别

5.1 成岩相测井响应特征

取芯井的岩芯薄片资料毕竟有限,而测井资料相对齐全,因此,在利用有限的岩芯薄片资料确定成岩相的基础上,识别不同成岩相的测井曲线特征,从而建立成岩相测井判别模型及评价方法^[48]。根据铸体薄片、扫描电镜等资料确定岩芯取样点的成岩相类型;利用对成岩相敏感度较高的常规曲线(自然伽马、电阻率、声波时差、密度和补偿中子孔隙度)建立不同类型成岩相的测井识别标准(图 8、表 1);利用测井参数关系图能够较好地地区分不同成岩相类型(图 8),从而根据各测井曲线与成岩相的对应关系进行单井成岩相分析,识别有利的建设性成岩相和优质储层^[53]。

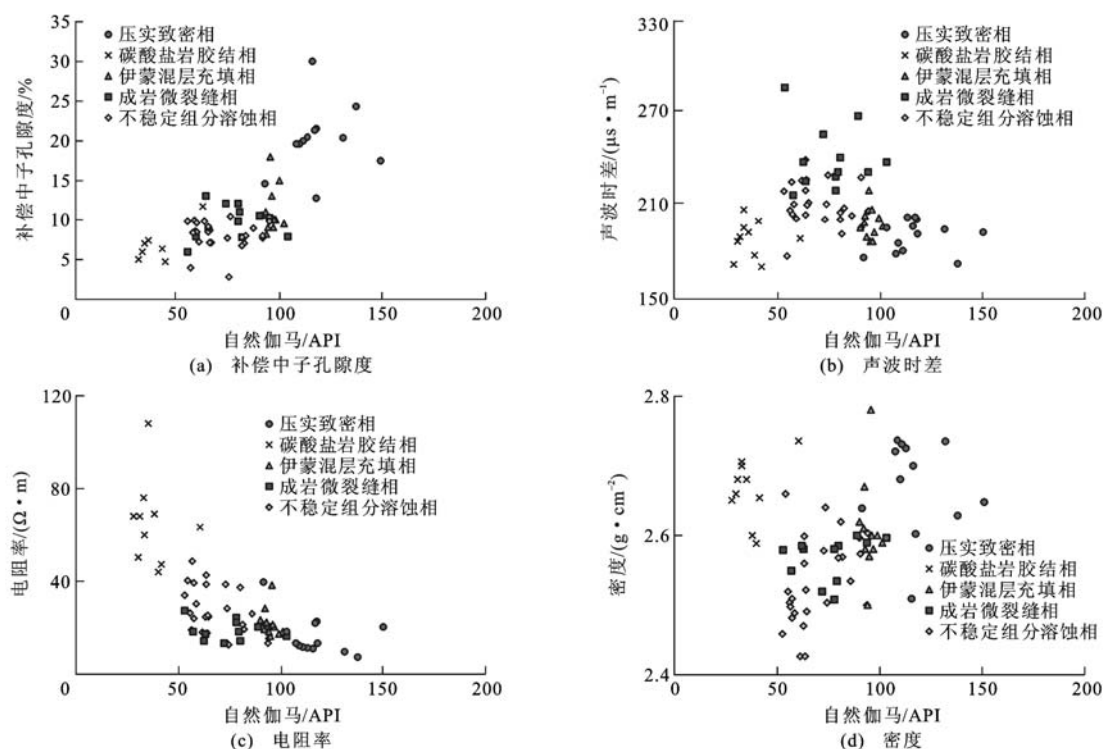


图 8 安岳地区须二段储层不同类型成岩相测井参数关系

Fig. 8 Relationships Between Logging Parameters of Different Diagenetic Facies of Reservoir in Xu-2 Section of Anyue Area

5.2 单井成岩相分析

根据不同成岩相的测井响应特征,对安岳地区须二段进行成岩相纵向上的划分(图 9)。通过对安岳地区各单井成岩相的划分,储层纵向上非均质性较强,不同层段可发育不同类型的成岩相;压实致密相常对应水下分流间湾沉积微相,其泥质含量高且易于被压实致密;不稳定组分溶蚀相广泛分布于水下分流河道大套砂岩中,部分与气层、水层、差油层对应;碳酸盐胶结相呈薄层分布于与泥岩相毗邻的砂体中,其规模和位置与流体组成和性质、碳酸盐岩沉淀的物理化学条件有关^[49];伊蒙混层充填相常对应高自然伽马、高补偿中子孔隙度、低密度的层段;成岩微裂缝相储层常与构造裂缝伴生,试气资料表明其含气性较好,裂缝的发育规模越大,往往对应储层产能也越高。干层对应层段一般不发育裂缝,后期可能与破坏性成岩相叠加,导致其变得致密,含气性差。

6 结 语

(1)安岳地区须二段储层岩性以中—细粒灰白色、灰色岩屑长石砂岩,长石岩屑砂岩,长石砂岩为主,结构成熟度中等,成分成熟度较低,为典型的低孔低渗致密砂岩储层。

(2)须二段储层经历机械压实、胶结等破坏性成岩作用和溶蚀、破裂等建设性成岩作用,目前处于中

成岩阶段 A 期。

(3)基于岩芯观察以及普通薄片、铸体薄片和扫描电镜等资料,须二段储层可被划分为 5 种成岩相:压实致密相、碳酸盐胶结相、伊蒙混层充填相、不稳定组分溶蚀相和成岩微裂缝相。

(4)通过岩芯、薄片特征识别各类成岩相,归纳总结不同成岩相的常规测井曲线响应特征,建立了不同成岩相的测井定量识别标准,同时对单井成岩相进行了划分。结合试气资料表明,成岩微裂缝相常伴随构造裂缝的发育,含气性较好,有效控制了天然气的富集和高产,无裂缝时不稳定组分溶蚀相常对应优质储层,是寻找致密砂岩气藏的关键。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 李建忠,郭彬程,郑 民,等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 607-615.
LI Jian-zhong, GUO Bin-cheng, ZHENG Min, et al. Main Types, Geological Features and Resource Potential of Tight Sandstone Gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 607-615.
- [2] 郭迎春,庞雄奇,陈冬霞,等. 川西坳陷中段须二段致密砂岩储层致密化与相对优质储层发育机制[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(增 2): 21-32.

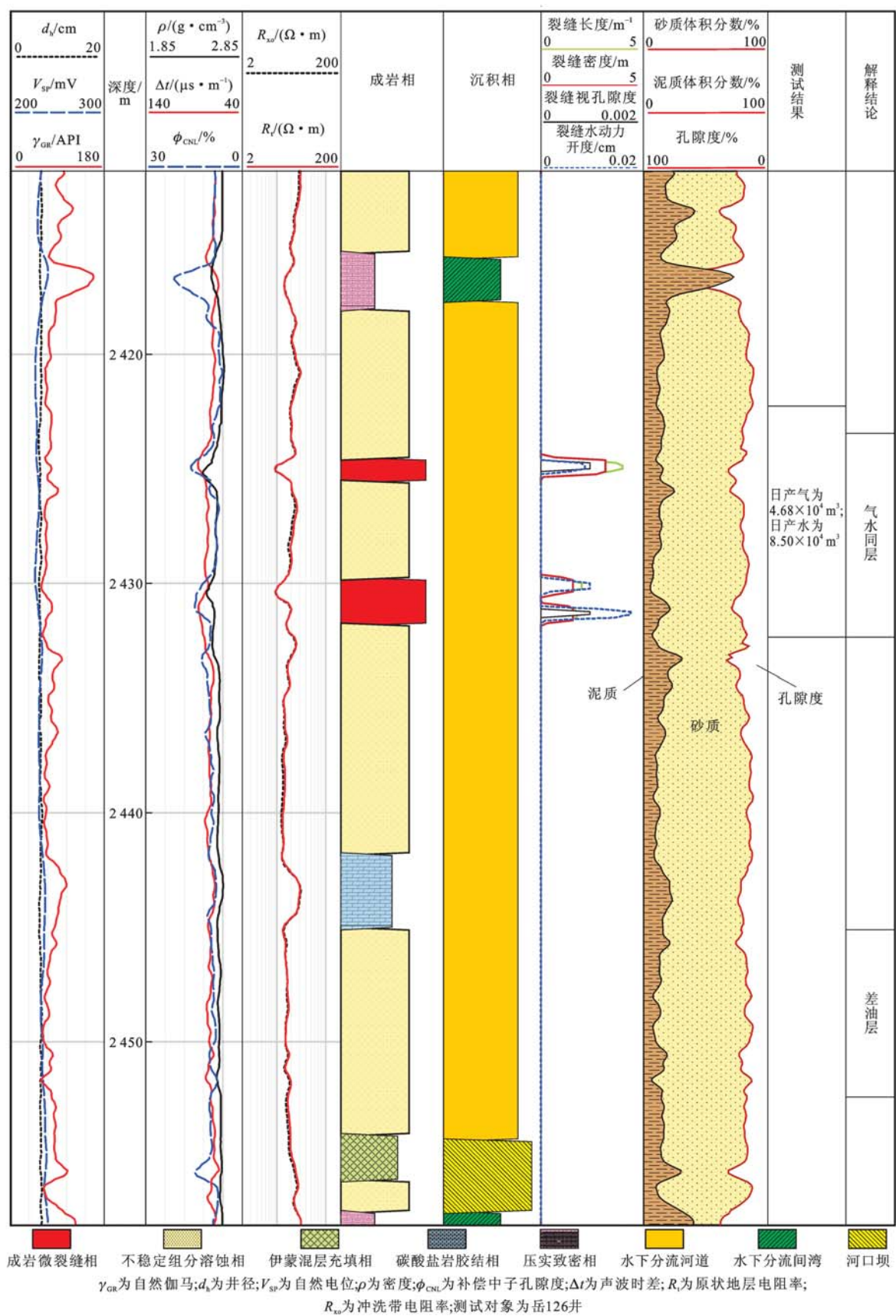


图 9 安岳地区须二段成岩相测井响应特征及成岩相类型划分

Fig. 9 Logging Response Characteristics and Division of Diagenetic Facies of Reservoir in Xu-2 Section of Anyue Area

- GUO Ying-chun, PANG Xiong-qi, CHEN Dong-xia, et al. Densification of Tight Gas Sandstones and Formation Mechanism of Relatively High-quality Reservoir in the Second Member of the Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(S2): 21-32.
- [3] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.
- ZOU Cai-neng, ZHU Ru-kai, WU Song-tao, et al. Types, Characteristics, Genesis and Prospects of Conventional and Unconventional Hydrocarbon Accumulations—Taking Tight Oil and Tight Gas in China as an Instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [4] 董晓霞, 梅廉夫, 全永旺. 致密砂岩气藏的类型和勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 351-355.
- DONG Xiao-xia, MEI Lian-fu, QUAN Yong-wang. Types of Tight Sand Gas Accumulation and Its Exploration Prospect[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3): 351-355.
- [5] 杨克明, 朱宏权. 川西叠覆型致密砂岩气区地质特征[J]. 石油实验地质, 2013, 35(1): 1-8.
- YANG Ke-ming, ZHU Hong-quan. Geological Characteristics of Superposed Tight Sandstone Gas-bearing Areas in Western Sichuan[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35(1): 1-8.
- [6] 王金琪. 中国非常规油气地质概论: 兼议砂岩储层致密化质变问题[J]. 天然气工业, 2013, 33(9): 7-16.
- WANG Jin-qi. A Brief Discussion of Unconventional Oil and Gas Geology in China: Qualitative Change in the Densification of Sandstone Reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(9): 7-16.
- [7] 黄小琼, 张连进, 郑伟, 等. 安岳地区上三叠统须二上亚段致密砂岩气藏气井产能控制因素[J]. 天然气工业, 2012, 32(3): 65-69.
- HUANG Xiao-qiong, ZHANG Lian-jin, ZHENG Wei, et al. Controlling Factors of Gas Well Deliverability in the Tight Sand Gas Reservoirs of the Upper Submember of the Second Member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Anyue Area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3): 65-69.
- [8] 蒋裕强, 张春, 邓海波, 等. 黏土矿物对低渗致密砂岩储渗性能的影响[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(6): 39-47.
- JIANG Yu-qiang, ZHANG Chun, DENG Hai-bo, et al. Influences of Clay Minerals on Physical Properties of Low Permeability and Tight Sandstones[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2013, 35(6): 39-47.
- [9] 陈昭国. 川西拗陷与北美致密砂岩气藏类比分析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(1): 71-76.
- CHEN Zhao-guo. Analogy Analysis of West Sichuan Depression and Northern America Sandstone Gas Reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2012, 34(1): 71-76.
- [10] 王长城, 田蒙, 冉祝荣, 等. 通南巴构造须四段致密砂岩优质储层预测[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(3): 65-70.
- WANG Chang-cheng, TIAN Meng, RAN Zhu-rong, et al. High-quality Reservoir Prediction on the Tight Sandstone in Fourth Member of Xujiahe Formation in the Tongnanba Structure[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2012, 34(3): 65-70.
- [11] 王芳, 冯胜斌, 何涛, 等. 鄂尔多斯盆地西南部延长组长7致密砂岩伊利石成因初探[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27(4): 19-22.
- WANG Fang, FENG Sheng-bin, HE Tao, et al. Study on Origin of Illite in Chang-7 Tight Sandstone of Yanchang Formation in the Southwest of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2012, 27(4): 19-22.
- [12] 张峭楠. 致密天然气砂岩储层: 成因和讨论[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 1-10, 18.
- ZHANG Shao-nan. Tight Sandstone Gas Reservoirs: Their Origin and Discussion[J]. Oil and Gas Geology, 2008, 29(1): 1-10, 18.
- [13] 赵文智, 王红军, 徐春春, 等. 川中地区须家河组天然气藏大范围成藏机理与富集条件[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 146-157.
- ZHAO Wen-zhi, WANG Hong-jun, XU Chun-chun, et al. Reservoir-forming Mechanism and Enrichment Conditions of the Extensive Xujiahe Formation Gas Reservoirs, Central Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 146-157.
- [14] 罗志立, 韩建辉, 罗超, 等. 四川盆地工业性油气层的发现、成藏特征及远景[J]. 新疆石油地质, 2013, 34(5): 504-514.
- LUO Zhi-li, HAN Jian-hui, LUO Chao, et al. The Discovery, Characteristics and Prospects of Commercial Oil and Gas Layers/Reservoirs in Sichuan Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2013, 34(5): 504-514.
- [15] 王鹏, 沈忠民, 刘四兵, 等. 川西拗陷须家河组天然气成因类型及气源对比[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2013, 28(6): 8-13.
- WANG Peng, SHEN Zhong-min, LIU Si-bing, et al.

- Study on Genetic Types and Sources of Natural Gas of Xujiahe Formation in West Sichuan Depression[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2013, 28(6): 8-13.
- [16] 蔡杰, 张敏. 四川盆地上三叠统须家河组煤系气源岩芳烃地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2013, 35(3): 325-330.
- CAI Jie, ZHANG Min. Geochemical Characteristics of Aromatic Hydrocarbons of Coal-bearing Gas Source Rocks from Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35(3): 325-330.
- [17] 叶礼友, 钟兵, 熊伟, 等. 川中地区须家河组低渗透砂岩气藏储层综合评价方法[J]. 天然气工业, 2012, 32(11): 43-46.
- YE Li-you, ZHONG Bing, XIONG Wei, et al. An Integrated Evaluation Method of Xujiahe Low-permeability Sandstone Gas Reservoirs in Middle Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(11): 43-46.
- [18] 张春, 蒋裕强, 王立恩, 等. 川东北地区须家河组二段储层差异性分析[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(2): 29-36.
- ZHANG Chun, JIANG Yu-qiang, WANG Li-en, et al. Analysis of Reservoir Differences of Member 2 of the Xujiahe Formation in Northeast Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2013, 35(2): 29-36.
- [19] 王鹏, 李瑞, 刘叶. 川西坳陷陆相天然气勘探新思考[J]. 石油实验地质, 2012, 34(4): 406-411.
- WANG Peng, LI Rui, LIU Ye. New Thoughts of Continental Gas Exploration in Western Sichuan Depression[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2012, 34(4): 406-411.
- [20] 戴金星, 倪云燕, 吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 257-264.
- DAI Jin-xing, NI Yun-yan, WU Xiao-qi. Tight Gas in China and Its Significance in Exploration and Exploitation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.
- [21] 张响响, 邹才能, 朱如凯, 等. 川中地区上三叠统须家河组储层成岩相[J]. 石油学报, 2011, 32(2): 257-264.
- ZHANG Xiang-xiang, ZOU Cai-neng, ZHU Ru-kai, et al. Reservoir Diagenetic Facies of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 257-264.
- [22] 张响响, 邹才能, 陶士振, 等. 四川盆地广安地区上三叠统须家河组四段低孔渗砂岩成岩相类型划分及半定量评价[J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 50-57.
- ZHANG Xiang-xiang, ZOU Cai-neng, TAO Shi-zhen, et al. Diagenetic Facies Types and Semiquantitative Evaluation of Low Porosity and Permeability Sandstones of the Fourth Member of Xujiahe Formation Guang'an Area, Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(1): 50-57.
- [23] 杨升宇, 张金川, 黄卫东, 等. 吐哈盆地柯柯亚地区致密砂岩气储层“甜点”类型及成因[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 272-282.
- YANG Sheng-yu, ZHANG Jin-chuan, HUANG Wei-dong, et al. "Sweet Spot" Types of Reservoirs and Genesis of Tight Sandstone Gas in Kekeya Area, Turpan-Hami Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 272-282.
- [24] 朱如凯, 邹才能, 张鼎, 等. 致密砂岩气藏储层成岩流体演化与致密成因机理[J]. 中国科学: D辑, 2009, 39(3): 327-339.
- ZHU Ru-kai, ZOU Cai-neng, ZHANG Nai, et al. Diagenesis Fluid Evolution and Tight Genesis of Tight Sand Gas Reservoir[J]. Science in China: Series D, 2009, 39(3): 327-339.
- [25] 戴朝成, 郑荣才, 朱如凯, 等. 四川类前陆盆地中西部须家河组储层特征[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 47-55.
- DAI Chao-cheng, ZHENG Rong-cai, ZHU Ru-kai, et al. Reservoir Characteristics of the Xujiahe Formation in Central-west Sichuan Analogous Foreland Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(1): 47-55.
- [26] 李梅, 赖强, 黄科, 等. 低孔低渗碎屑岩储层流体性质测井识别技术——以四川盆地安岳气田须家河组气藏为例[J]. 天然气工业, 2013, 33(6): 34-38.
- LI Mei, LAI Qiang, HUANG Ke, et al. Logging Identification of Fluid Properties in Low Porosity and Low Permeability Clastic Reservoirs—A Case Study of Xujiahe Fm Gas Reservoirs in the Anyue Gas Field, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(6): 34-38.
- [27] 张庄, 曾伟, 杨西燕. 蜀南地区上三叠统须家河组成岩相划分[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(6): 13-15, 23.
- ZHANG Zhuang, ZENG Wei, YANG Xi-yan. The Division and Distribution of Diagenetic Facies of Xujiahe Formation in Upper Triassic, South Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28(6): 13-15, 23.
- [28] 陈冬霞, 庞雄奇, 杨克明, 等. 川西坳陷中段上三叠统须二段致密砂岩孔隙度演化史[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(增1): 42-51.

- CHEN Dong-xia, PANG Xiong-qi, YANG Ke-ming, et al. Porosity Evolution of Tight Gas Sand of the Second Member of Xujiahe Formation of Upper Triassic, Western Sichuan Depression[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(S1): 42-51.
- [29] 赖 锦, 王贵文, 郑懿琼, 等. 金秋区块须四段储层成岩相及测井识别[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(5): 41-49.
- LAI Jin, WANG Gui-wen, ZHENG Yi-qiong, et al. Diagenetic Facies of Xujiahe Formation Member 4 Reservoir in Jinqu Area and the Logging Recognition [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2013, 35(5): 41-49.
- [30] 纪友亮. 油气储层地质学[M]. 2 版. 北京: 中国石油大学出版社, 2009.
- JI You-liang. Petroleum Reservoir Geology[M]. 2nd ed. Beijing: China University of Petroleum Press, 2009.
- [31] 周 彦, 黎 平, 谭秀成, 等. 川东北须家河组砂岩储层成岩特征研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(6): 20-24.
- ZHOU Yan, LI Ping, TAN Xiu-cheng, et al. Study on Diagenesis Characteristics of Sandstone Reservoir in Xujiahe Formation, Northeastern Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2011, 33(6): 20-24.
- [32] 李士祥, 胡明毅, 李浮萍. 川西前陆盆地上三叠统须家河组砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(4): 535-539.
- LI Shi-xiang, HU Ming-yi, LI Fu-ping. Diagenesis and Porosity Evolution of Upper Triassic Xujiahe Formation Sandstone in Western Sichuan Foreland Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(4): 535-539.
- [33] 闫建萍, 刘池洋, 张卫刚, 等. 鄂尔多斯盆地南部上古生界低孔低渗砂岩储层成岩作用特征研究[J]. 地质学报, 2010, 84(2): 272-279.
- YAN Jian-ping, LIU Chi-yang, ZHANG Wei-gang, et al. Diagenetic Characteristics of the Lower Porosity and Permeability Sandstones of the Upper Paleozoic in the South of Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(2): 272-279.
- [34] 朱筱敏, 米立军, 钟大康, 等. 济阳拗陷古近系成岩作用及其对储层质量的影响[J]. 古地理学报, 2006, 8(3): 295-305.
- ZHU Xiao-min, MI Li-jun, ZHONG Da-kang, et al. Paleogene Diagenesis and Its Control on Reservoir Quality in Jiyang Depression [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 295-305.
- [35] 李 阔, 曾 韬, 潘 磊. 川东北地区须家河组储层特征研究[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(1): 46-51.
- LI Kuo, ZENG Tao, PAN Lei. Reservoir Characteristics of Xujiahe Formation in Northeastern Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(1): 46-51.
- [36] 赖 锦, 王贵文. 川中蓬莱地区须二段气藏特征及有利含气区预测[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(5): 43-49.
- LAI Jin, WANG Gui-wen. Gas Reservoir Characteristics of the Second Member of Xujiahe Formation and Prediction of Favorable Gas Bearing Zones in Penglai Area, Central Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(5): 43-49.
- [37] 张 翥, 田作基, 吴胜华, 等. 川西须家河组储层成岩演化[J]. 岩石学报, 2008, 24(9): 2179-2184.
- ZHANG Nai, TIAN Zuo-ji, WU Sheng-hua, et al. Study on Xujiahe Reservoir Diagenetic Process, Sichuan Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(9): 2179-2184.
- [38] 魏文文, 黄思静, 郇金来. 伊利石形成相关反应的热力学计算及其对砂岩成岩作用研究的意义[J]. 地质科技情报, 2011, 30(1): 20-25.
- WEI Wen-wen, HUANG Si-jing, HUAN Jin-lai, et al. Thermodynamic Calculation of Illite Formation and Its Significance on Research of Sandstone Diagenesis [J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(1): 20-25.
- [39] 张鹏辉, 张金亮, 董紫睿, 等. 松辽盆地长岭凹陷中部上白垩统砂岩成岩作用及成岩相带[J]. 矿物岩石, 2012, 32(4): 94-101.
- ZHANG Peng-hui, ZHANG Jin-liang, DONG Zi-rui, et al. Diagenesis and Favorable Diagenetic Facies of Upper Cretaceous Sandstones in the Middle of Changling Depression in Songliao Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2012, 32(4): 94-101.
- [40] 史基安, 晋慧娟, 薛莲花. 长石砂岩中长石溶解作用发育机理及其影响因素分析[J]. 沉积学报, 1994, 12(3): 67-75.
- SHI Ji-an, JIN Hui-juan, XUE Lian-hua. An Analysis on Mechanism of Feldspar Dissolution and Its Influencing Factors in Feldspar-rich Sandstone Reservoir [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(3): 67-75.
- [41] 郭德运, 郭艳琴, 李文厚, 等. 富县探区上三叠统延长组成岩作用及孔隙结构特征[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 264-273.
- GUO De-yun, GUO Yan-qin, LI Wen-hou, et al. Diagenesis and Pore Structure Characteristic of Yanchang Formation of Upper Triassic in Fuxian Exploration Area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 264-273.

- [42] 钟大康,朱筱敏,王红军. 中国深层优质碎屑岩储层特征与形成机理分析[J]. 中国科学: D辑, 2008, 38(增1): 11-18.
ZHONG Da-kang, ZHU Xiao-min, WANG Hong-jun. Characteristics and Formation Mechanism Analysis of Deep Buried Sandstone Reservoirs in China[J]. Science in China: Series D, 2008, 38(S1): 11-18.
- [43] 王正允,张紫光,陈梦蛟,等. 冀北拗陷雾迷山组的成岩作用及成岩相特征——以辽宁省凌源县魏杖子剖面为例[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(4): 1-8.
WANG Zheng-yun, ZHANG Zi-guang, CHEN Meng-jiao, et al. Diagenesis and Features of Diagenetic Facies of Wumishan Formation of Jibei Depression—By Taking the Weizhangzi Section of Lingyuan County in Liaoning Province for Example [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(4): 1-8.
- [44] 申艳,谢继容,唐大海. 四川盆地中西部上三叠统须家河组成岩相划分及展布[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(3): 21-25.
SHEN Yan, XIE Ji-rong, TANG Da-hai. Division and Distribution of Diagenetic Facies in Upper Triassic Xujiahe Formation, Central-west Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2006, 29(3): 21-25.
- [45] 段新国,李爽,宋荣彩,等. 四川盆地须二段储层孔隙演化定量描述[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(2): 35-42.
DUAN Xin-guo, LI Shuang, SONG Rong-cai, et al. Quantitative Description of Pore Evolution of the Second Formation of Xujiahe Reservoir in Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2011, 33(2): 35-42.
- [46] GUO Q L, LI X D, ZOU C N, et al. Predicting the Distribution of the Tight Sandstone Gas in the Hechuan Play, Sichuan Basin, China[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2012, 60(3): 186-199.
- [47] 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 Cai-neng, TAO Shi-zhen, ZHOU Hui, et al. Genesis, Classification and Evaluation Method of Diagenetic Facies[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(5): 526-540.
- [48] 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段储层为例[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 820-828.
SHI Yu-jiang, XIAO Liang, MAO Zhi-qiang, 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 Petroli Sinica, 2011, 32(5): 820-828.
- [49] 杜业波,季汉成,朱筱敏. 川西前陆盆地上三叠统须家河组成岩相研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(3): 358-364.
DU Ye-bo, JI Han-cheng, ZHU Xiao-min. Research on the Diagenetic Facies of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Western Sichuan Foreland Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(3): 358-364.
- [50] 孟元林,高建军,牛嘉玉,等. 扇三角洲体系沉积微相对成岩的控制作用——以辽河坳陷西部凹陷南段扇三角洲沉积体系为例[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 36-39.
MENG Yuan-lin, GAO Jian-jun, NIU Jia-yu, et al. Controls of the Fan-delta Sedimentary Microfacies on the Diageneses in the South of Western Liaohe Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 36-39.
- [51] 曾溅辉,彭继林,邱楠生,等. 砂-泥岩界面碳酸盐溶解-沉淀反应及其石油地质意义[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(6): 760-764.
ZENG Jian-hui, PENG Ji-lin, QIU Nan-sheng, et al. Carbonate Dissolution-precipitation in Sandstone-shale Contact and Its Petroleum Geological Meanings[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(6): 760-764.
- [52] 张友,侯加根,李娜,等. 黄骅坳陷塘34断块古近系沙河街组一段下部储集层特征及控制因素[J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 383-392.
ZHANG You, HOU Jia-gen, LI Na, et al. Reservoir Characteristics and Controlling Factors of the Lower Part of Member 1 of Paleogene Shahejie Formation in Tang 34 Block, Huanghua Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3): 383-392.
- [53] 张海涛,时卓,石玉江,等. 低渗透致密砂岩储层成岩相类型及测井识别方法——以鄂尔多斯盆地苏里格气田下石盒子组8段为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 256-264.
ZHANG Hai-tao, SHI Zhuo, SHI Yu-jiang, et al. Diagenetic Facies Types and Logging Identification Methods for Low-permeability Tight Sandstone Reservoirs—A Case Study on the 8th Member of Xiashihezi Formation in Sulige Gasfield, Ordos Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2012, 33(2): 256-264.