

文章编号:1000-0550(2016)04-0694-13

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2016.04.010

利用测井交会图法定量表征致密油储层成岩相 ——以鄂尔多斯盆地华池地区长7致密油储层为例

冉 冶¹ 王贵文^{1,2} 赖 锦¹ 周正龙¹ 崔玉峰¹ 代全齐³ 陈 晶¹ 王抒忱¹

(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.中国石油大学(北京)非常规天然气研究院 北京 102249)

摘 要 根据岩芯观察并综合利用普通薄片、铸体薄片、阴极发光、扫描电镜等资料结合物性分析,对鄂尔多斯盆地华池地区长7致密油储层成岩作用、成岩矿物等进行了研究。根据储层成岩作用类型及强度、成岩矿物组合特征等,将研究区成岩相定性划分为不稳定组分溶蚀相、黏土矿物充填相、碳酸盐胶结相以及压实致密相四类。通过常规测井中对成岩相具有较高灵敏的伽马、密度、声波时差、补偿中子孔隙度、电阻率的测井曲线分析,利用密度—伽马交会图法进一步对四类成岩相进行定量划分,并建立研究区成岩相的测井定量识别标准。以华池地区城96井为例,其单井纵向的成岩相测井定量识别划分结果与取样点薄片鉴定结果、试油结论和物性分析等均具有良好的对应,验证了模型的可靠性。成岩相测井定量表征方法的研究,为后期致密油储层综合评价以及有利发育区带预测提供了理论指导和技术支持。

关键词 成岩相 测井交会图 长7油层组 致密油储层 华池地区

第一作者简介 冉 冶 女 1991年出生 硕士研究生 储层沉积学和测井地质学 E-mail: ranye19910102@sina.com

通讯作者 王贵文 男 教授 E-mail: wanggw@cup.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

随着美国、加拿大、澳大利亚为等国家非常规油气的商业性开发,致密油目前已在全球能源结构中占据重要地位,并将成为全球重要的油气接替资源^[1-4]。致密油储层的形成一般经历较复杂的成岩作用,通常压实、胶结等破坏性成岩作用不利于孔隙的保存^[5];而储层中孔渗较好的层段往往与有利于原生孔隙保存和次生孔隙发育的建设性成岩作用有关^[6],同时成岩过程中烃源岩成熟释放的有机酸也可以导致次生孔隙的形成^[7]。事实上,在一定构造沉积背景下,除上述成岩作用的影响以外,复杂致密油储层的形成与分布还与成岩矿物、成岩事件、成岩环境、成岩演化序列等有关^[8]。成岩相是成岩环境的物质表现并能够反映成岩环境的岩石学特征、地球化学特征和岩石物理特征,它是在特定的沉积和物理化学环境中、在成岩与构造等作用下,沉积物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^[9-11]。成岩相高度概括了自沉积物形成之后至变质作用发生前的成岩作用、成岩矿物、成岩环境、成岩事件、成岩演化序列等因素,在很大程度上影响着储层物性、控制着有效储层的形成和“甜点”发育,是决定储集层性能和油气富集的核心要素之一^[8-9]。因此,对储层尤其是经历了复杂成岩作用过程的致密油储层展开成岩相研究在储层的评价和预测领域具有广阔的应用前景。目前对于储层成岩相的研究主要是根据岩芯样品以及反映样品微观特征的扫描电镜、铸体薄片、阴极发光等资料^[6]。但由于岩芯样品资料的有限性以及薄片资料的多解性和不连续性,很难完成研究区单井纵向以及连井横向上的成岩相连续分布的研究。前人对鄂尔多斯盆地陇东地区致密油储层的研究主要集中在沉积相、储层特征、成岩作用、孔隙演化等方面^[12-17],也有学者对成岩相以及其测井识别进行了探讨^[18-19],但对于该区成岩相测井定量表征方面的研究还比较欠缺。故本文以陇东华池地区长7致密油储层为例,在取样点根

收稿日期:2015-07-13; 收修改稿日期:2015-08-20

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05020-008); 国家自然科学基金(41472115) [Foundation: China National Science and Technology Major Project, No. 2011ZX05020-008; National Natural Science Foundation of China, No.41472115]

据岩芯、薄片资料确定成岩相类型的基础上,利用岩芯、薄片资料刻度常规测井来分析不同成岩相的测井响应特征,再通过对成岩相具有较高灵敏度的伽马、密度、电阻率等测井曲线的交会图分析,进一步对四类成岩相进行定量划分,并建立单井纵向上的成岩相定量测井识别模型,以指导后期致密油储层的综合评价以及有利发育区带的预测,并为其他相似油田精细储层成岩相研究提供借鉴。

1 区域地质特征

1.1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于中国中北部地区,是中国内陆第二大沉积盆地,面积约 $32 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[20],是一个沉积稳定、拗陷迁移、扭动明显的多旋回克拉通叠加盆地^[21]。鄂尔多斯盆地同时也是我国重要的含油气盆地和油气生产基地^[22],其油气资源量巨大,具有重要的研究价值和经济价值。华池地区位于甘肃省庆阳市华池县境内,面积约 $1\ 000 \text{ km}^2$,构造位置位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡西南缘,属陇东地区^[13](图 1);其构造发育特征符合鄂尔多斯盆地的典型构造特征,总体地层平缓,无明显构造起伏,无明显断层发育,表现西倾单斜背景上局部发育小型鼻状隆起^[23-24]。三叠系延长组为鄂尔多斯盆地主要含油气层之一,是在盆地持续拗陷和稳定沉降过程中堆积的河流—湖泊相陆源碎屑岩系,纵向上划分为 10 个油层组^[21,24-26]。在长 7 油层组沉积时期,湖盆发育达到鼎盛,华池地区位于湖盆中心,其沉积相类型以半深湖—深湖相为主,多为重力流沉积,三角洲发育规模较小且以三角洲前缘亚相为主,岩性致密复杂^[27],该区长 7₁、长 7₂发育的砂质碎屑流、浊流和滑塌成因的砂岩与长 7₃发育的烃源岩源储一体或紧邻,为致密油的形成提供了良好的条件^[28-30]。

1.2 储层基本特征

通过岩芯观察以及薄片分析,华池地区长 7 致密油储层岩性主要为岩屑砂岩、岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩(图 2)。岩石薄片镜下鉴定结果表明:石英含量主要分布在 23.9%~55.8%,平均 37.5%;长石含量 8.8%~45.0%,平均 20.5%,以钾长石和钠长石为主,其中钾长石含量 4.6%~28.7%,平均 12.8%;岩屑 20%~61%,平均 38%,岩屑成分复杂,多以变质岩岩屑和岩浆岩岩屑为主,体积分数为 4%~42%,平均 29%,沉积岩岩屑较少。颗粒间为点—线、凹凸式接触,支撑方式为颗粒支撑。储层填隙物含量较高,杂

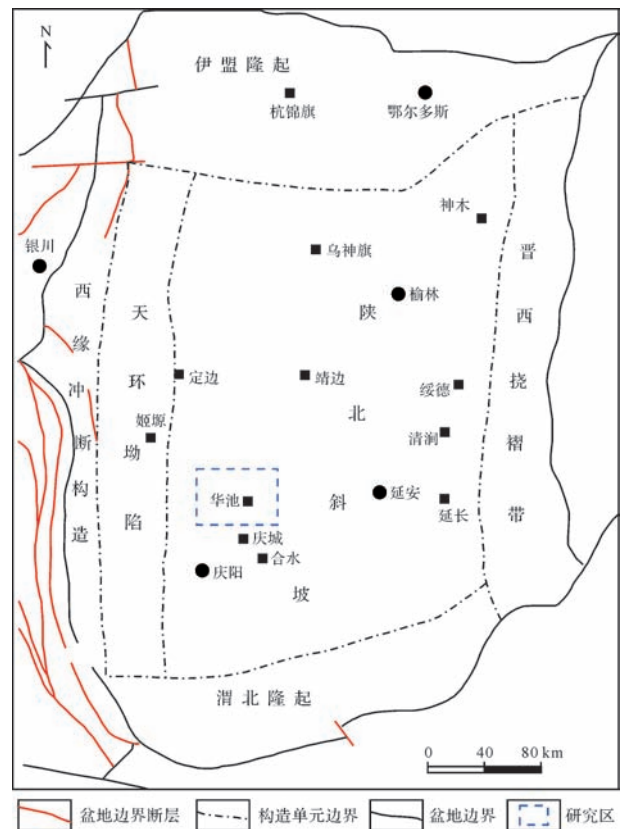


图 1 工区构造图(据高辉等^[31],赖锦等^[32]修改)

Fig.1 Structural map of the study area (modified after Gao, et al.^[31], Lai, et al.^[32])

基以黏土杂基为主,胶结物包括自生石英,碳酸盐以及伊利石、伊蒙混层和绿泥石等黏土矿物胶结物,胶结类型主要以孔隙式和接触式为主。储层粒度主要为细砂、粉砂级别,磨圆为次棱角状,分选中等。

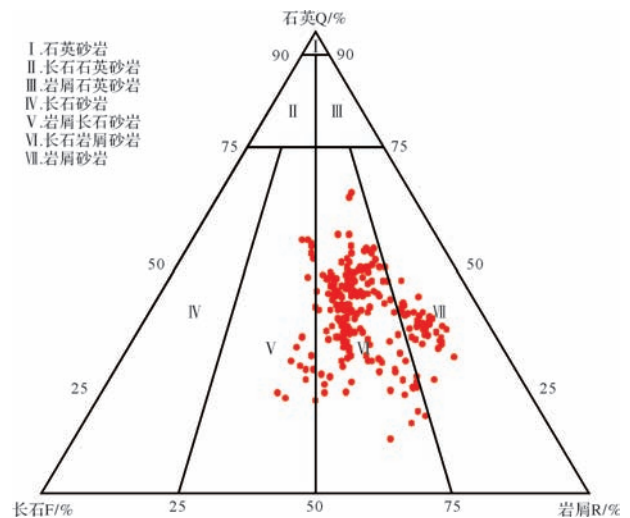


图 2 华池地区长 7 油层组致密油储层成分三角图

Fig.2 Triangular figure of the composition of Chang 7 tight oil reservoir in Huachi area

鄂尔多斯盆地华池地区长7致密油储层物性较差,孔隙度为0.5%~18.57%,主要分布在4%~10%,平均7.14%,地面空气渗透率为 $(0.02 \sim 1.82) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要集中在 $(0.05 \sim 0.2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $0.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,具有典型的致密油储层特征。

2 成岩相的定性划分及特征描述

鄂尔多斯盆地华池地区长7致密油储层经历的主要成岩作用为压实作用、胶结作用和溶蚀作用。其中压实作用主要以机械压实为主,在镜下多表现为:颗粒点一线、线接触,石英等脆性矿物多发生破裂,岩屑、云母等受挤压发生塑性变形,颗粒分选较差,多呈定向排列,压实作用强度中等—强。胶结作用则包括硅质、钙质及黏土矿物胶结,经扫描电镜与铸体薄片分析,主要表现为:次生石英加大以及自生石英,方解石连晶胶结以及铁白云石胶结,伊利石、绿泥石等黏土矿物充填于次生溶蚀孔隙,总体上胶结作用强度中等。溶蚀作用主要发育于长石和岩屑颗粒内部与边缘,在铸体薄片及扫描电镜下表现为:长石溶蚀形成蜂窝状,或者长石近完全溶蚀形成铸模孔。

目前国内外关于成岩相划分尚无统一的方案,根据前人研究成果^[33-38]以及研究区目的层段成岩作用类型和强度、成岩矿物及其对储集物性影响的分析,将研究区成岩相划分为不稳定组分溶蚀相、黏土矿物充填相、碳酸盐胶结相以及压实致密相四类成岩相(表1)。

2.1 不稳定组分溶蚀相

该类成岩相主要岩性为细砂岩、粉砂岩等,分选相对较好,发育溶蚀孔隙,未被伊蒙混层、方解石等次生矿物充填,镜下多为粒内溶蚀孔,长石部分或完全溶蚀(图3A,B,C);部分为粒间溶蚀(图3D)。其溶蚀强度与展布主要受岩石组分、附近烃源岩演化伴随的有机酸影响,多发生在长石和岩屑含量相对富集的砂质碎屑流和浊流底部以及与烃源岩直接接触的砂体内部,可以有效改善孔隙的连通性和渗透性。该类成岩相孔隙度8.1%~12.5%,平均9.7%;面孔率一般大于4.0%,最高可达9.5%,平均5.9%,具有较好的物性。不稳定组分溶蚀相在常规测井曲线上主要表现为中低伽马、中声波时差、中低密度和补偿中子孔隙度、中电阻率的特征(图4)。

表1 华池地区长7致密油储层成岩相类型及特征统计结果

Table 1 Statistical result of diagenetic facies types and characteristics of Chang 7 tight sandstone oil reservoir in Huachi area

成岩相	孔隙度		面孔率		结构与组分	发育层段 沉积微相	成岩作用特征	成岩作用 强度	常规测井 曲线特征
	范围	均值	范围	均值					
不稳定 组分 溶蚀相	8.1%~12.5%	9.7%	4.2%~9.5%	5.9%	细砂岩、粉砂岩等,分选相对较好	长石和岩屑含量相对富集的砂质碎屑流和浊流底部以及与烃源岩直接接触的砂体内部	溶蚀作用发育,多为次生溶蚀孔隙,未被伊蒙混层、方解石等次生矿物充填,接触式胶结	中压实 弱胶结 强溶蚀	中低 GR 中 AC 低 DEN 中低 CNL 中 RT
黏土 矿物 充填相	4.5%~11.4%	6.4%	1.0%~2.5%	1.5%	粉砂岩、极细粒岩屑砂岩,杂基含量高,分选中等	陆源杂基含量较高的砂质碎屑流以及浊流砂体内部	黏土矿物充填于孔隙或附着于颗粒表面,将粒间孔隙分割形成大量的黏土矿物晶间束缚孔隙,堵塞孔喉,接触式胶结	中强压实 中胶结 中溶蚀	中高 GR 中 AC 中 DEN 中高 CNL 中低 RT
碳酸盐 胶结相	4.1%~10.5%	5.9%	1.0%~2.5%	1.8%	细砂、粉细砂岩,分选中等,方解石、铁白云石等胶结物含量高	深水砂岩,以及与泥岩或烃源岩毗邻的砂体内部	方解石、铁白云石等胶结剂间孔隙或交代长石、岩屑等矿物,充填孔隙式胶结或嵌晶式胶结	弱压实 强胶结 弱溶蚀	中 GR 低 AC 中高 DEN 中低 CNL 中高 RT 高 GR
压实 致密相	<7.6%	3.1%	<2.0%	1.1%	泥岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,分选差,颗粒间主要为线接触	浊流顶部,深湖—半深湖	机械压实作用发育,基本无可视孔隙,接触式胶结或压嵌式胶结	强压实 弱胶结 弱溶蚀	中高 AC 中高 DEN 高 CNL 中低 RT

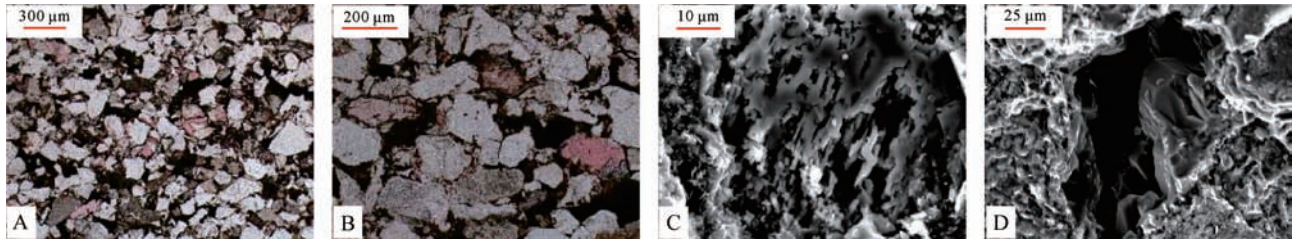


图3 不稳定组分溶蚀相典型薄片镜下特征

A.长石部分或完全溶蚀成铸模孔,亦可见长石高岭土化,长₇₂,城96井,2 003.87 m;B.长石完全溶蚀,可见自生石英颗粒沿溶孔边缘生长,长₇₂,城96井,2 003.76 m;C.扫描电镜下长石沿解理发生溶蚀且溶解呈蜂窝状,长₇₁,城96井,1 993.28 m;D.粒间溶蚀孔内部可见自生石英,孔隙部分被黏土矿物充填,长₇₂,城96井,2 004.37 m。

Fig.3 Typical thin section characteristics of instable components dissolution facies under microscope

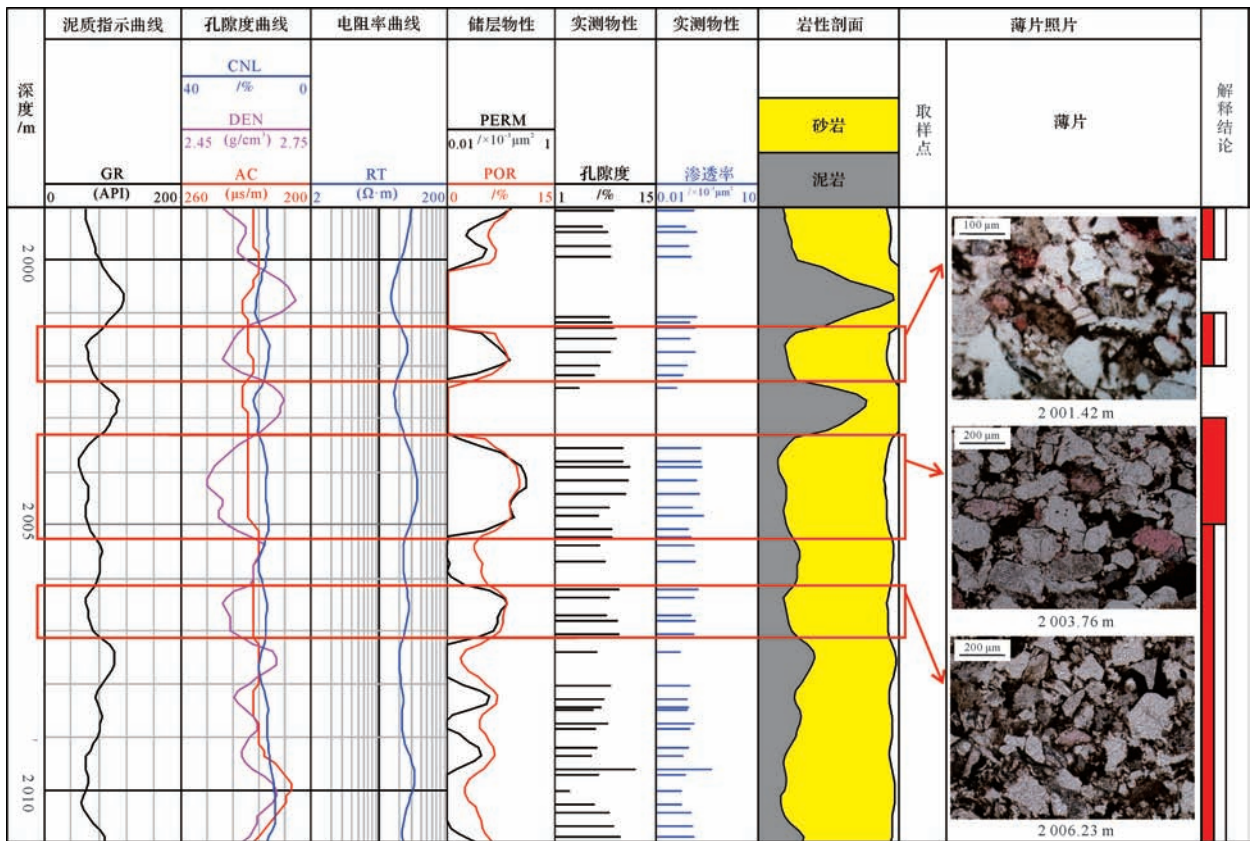


图4 不稳定组分溶蚀相常规测井曲线特征

Fig.4 Conventional logging curve characteristics of instable components dissolution facies

2.2 黏土矿物充填相

岩性主要为粉砂岩、极细粒岩屑砂岩。根据扫描电镜和铸体薄片分析,华池地区的主要黏土矿物为伊利石、伊蒙混层和绿泥石,多分布在粒间并吸附有机质呈黑褐色(图5A,B)。伊利石多充填孔喉生长,丝状伊利石也可存在于网状式的伊蒙混层内部(图5C,D);绿泥石多以填隙物充填于孔喉内部,使得喉道变细甚至消失,但较少见到绿泥石膜。总体来说,黏土

矿物充填于孔隙或附着于颗粒表面,将粒间孔隙分割形成大量的黏土矿物晶间束缚孔隙^[31],堵塞孔喉,降低孔隙连通性,为破坏性成岩相。多发育在陆源杂基含量较高的砂质碎屑流以及浊流砂体内部,颗粒粒度较细,分选中等。孔隙度4.5%~11.4%,平均6.4%;面孔率1.0%~2.5%,平均1.5%,物性相对较差。黏土矿物充填相在常规测井曲线上的特征为中高伽马、中声波时差和密度、中高补偿中子孔隙度和中低电阻

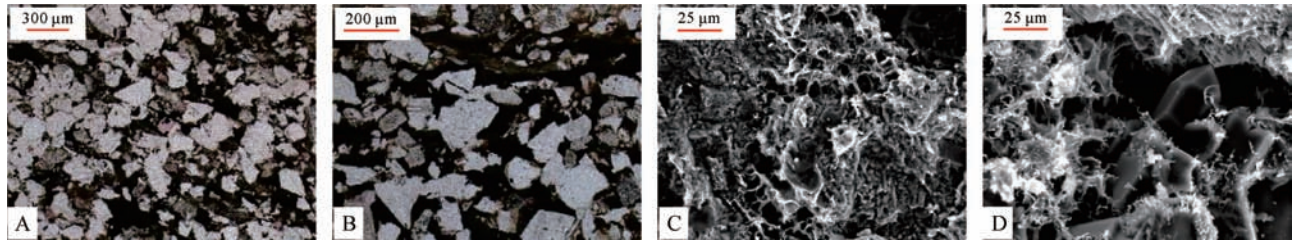


图5 黏土矿物充填相典型薄片镜下特征

A. 黏土矿物吸附有机质呈黑褐色,溶孔偶见,长 7_1 ,城96井1 993.42 m; B. 粒间充填黑色黏土矿物,长 7_1 ,城96井1 995.40 m; C. 絮状伊蒙混层充填孔隙,溶孔偶见,长 7_2 ,城96井1 997.69 m; D. 片状以及丝缕状伊利石、絮状伊蒙混层充填大部分孔隙,可见自生石英沿孔隙边缘生长,长 7_1 ,城96井1 994.40 m。

Fig.5 Typical thin section characteristics of clay minerals filling facies under microscope

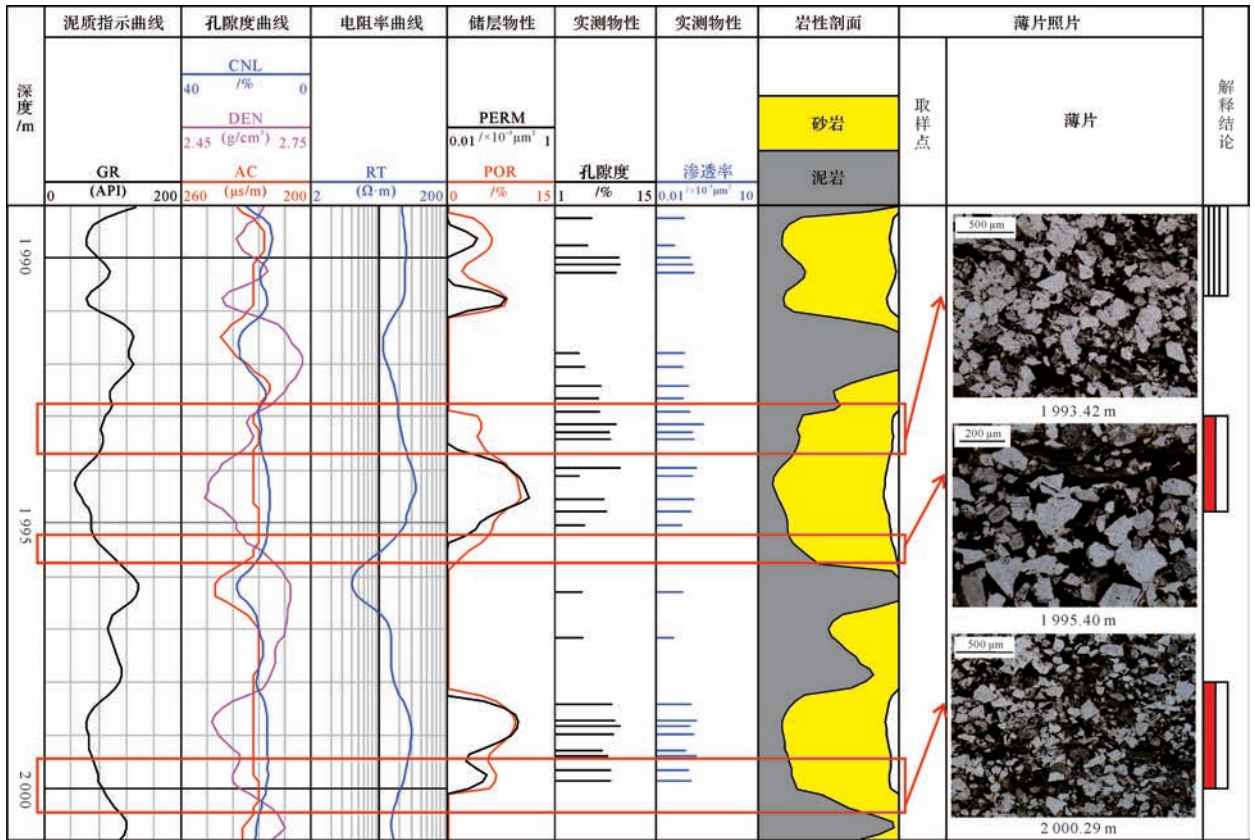


图6 黏土矿物充填相常规测井曲线特征

Fig.6 Conventional logging curve characteristics of clay minerals filling facies

率(图6)。

2.3 碳酸盐胶结相

岩性主要为细砂岩、粉细砂岩,分选中等。镜下主要表现为方解石、铁白云石等胶结粒间孔隙或交代长石、岩屑,充填孔隙式胶结或嵌晶式胶结,多发育于白云岩碎屑或灰岩碎屑附近(图7A,B,C),并呈斑点状分布(图7D),胶结物含量大约10%~25%。地层

流体的作用决定了该类成岩相的强度与展布,通常发育在深水砂岩以及与泥岩或烃源岩毗邻的砂体内部^[29,39]。研究区碳酸盐胶结相发育层段溶蚀作用较弱,物性也较差:孔隙度4.1%~10.5%,平均5.9%;面孔率1.0%~2.5%,平均1.8%。碳酸盐胶结相在常规测井曲线上呈现中伽马、低声波时差、中高密度、中低补偿中子孔隙度和中高电阻率的特征(图8)。

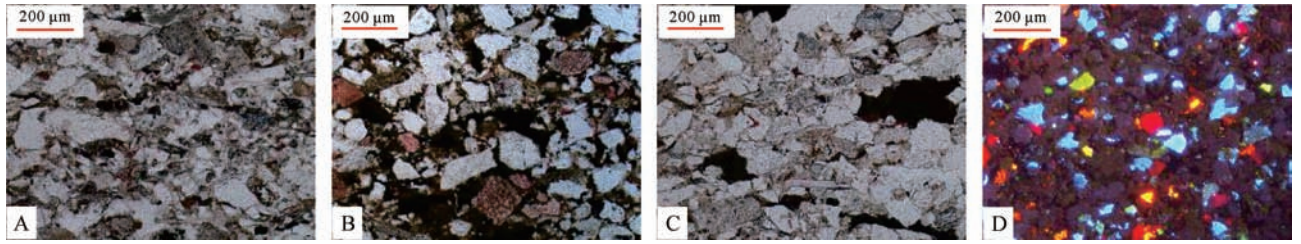


图7 碳酸盐胶结相典型薄片镜下特征

A.铁白云石被染成蓝紫色,沿白云岩碎屑生长,可见长石高岭石化,溶孔含量很低,长7₁,城96井,1 996.15 m;B.灰岩碎屑被染成褐红色,呈泥微晶结构,其附近方解石胶结物较发育,长7₁,城96井,1 988.31 m;C.颗粒线性接触,白云岩碎屑表面风化,附近可见铁白云石胶结物,亦可见菱铁矿与泥质混生,长7₂,城96井,2 006.78 m;D.方解石和白云石呈亮橙色,铁方解石呈暗红色,长石呈蓝色,石英呈土黄色,碳酸盐胶结物多呈斑点状分布,阴极发光,长7₁,城96井,1 992.90 m。

Fig.7 Typical thin section characteristics of carbonate cementation facies under microscope

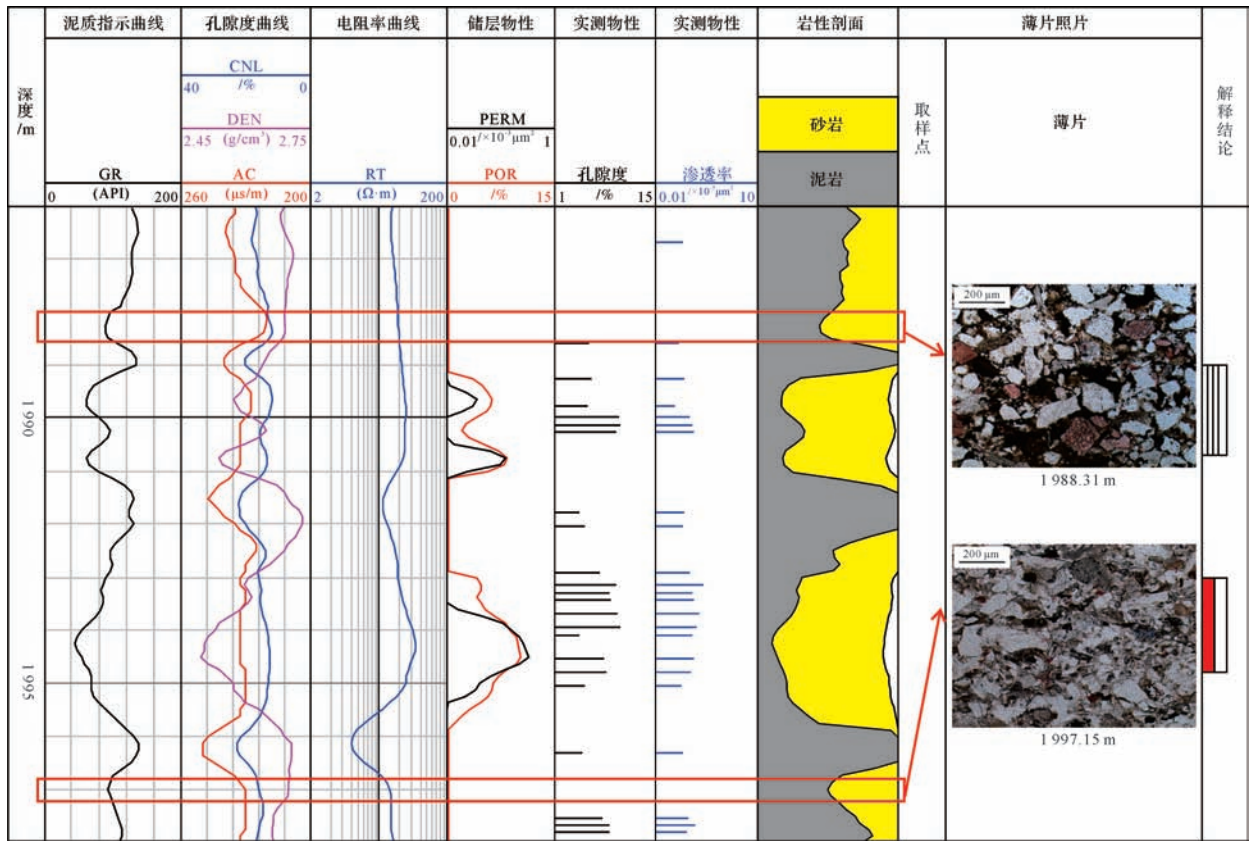


图8 碳酸盐胶结相常规测井曲线特征

Fig.8 Conventional logging curve characteristics of carbonate cementation facies

2.4 压实致密相

该类成岩相岩性主要为泥岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,分选差。镜下主要表现为颗粒粒度较细,且颗粒间主要为线接触;云母、板岩、千枚岩等塑性矿物和岩屑含量较高,石英颗粒含量相对较低,且多发生破裂和定向排列;胶结物含量少,黏土杂基含量较高(图9)。多发育于浊流顶部或深湖一半深湖。孔隙

度一般小于7.6%,平均3.1%;面孔率小于2.0%,平均1.1%。压实致密相在常规测井曲线上具有中等到高的伽马值、中高声波时差、高密度和中子孔隙度以及中低电阻率的特征(图10)。

3 利用测井交会图定量划分成岩相

由于取样点的间断性且获得的岩芯薄片资料的

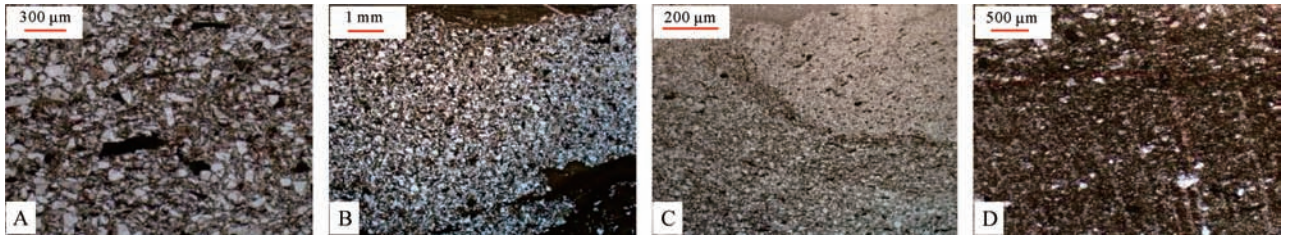


图9 压实致密相典型薄片镜下特征

A.分选差,颗粒大小不均,具定向性,白云岩碎屑多呈单晶粒状,石英颗粒表面可见压裂纹,云母等塑性矿物多发生弯曲变形,无可视孔隙,粒间由黏土杂基填隙,长 7_1 ,城96井,1 986.27 m;B.颗粒粒度细,脆性矿物石英等多发生破裂,长 7_1 ,城96井,1 988.31 m;C.显微变形层理,颗粒定向排列,长 7_2 ,城96井,2 007.43 m;D.黏土质细粉砂岩,絮状微纹层,石英颗粒斑块状分布并定向排列,可见微裂缝,长 7_1 ,城96井,1 992.29 m。

Fig.9 Typical thin section characteristics of tight compaction facies under microscope

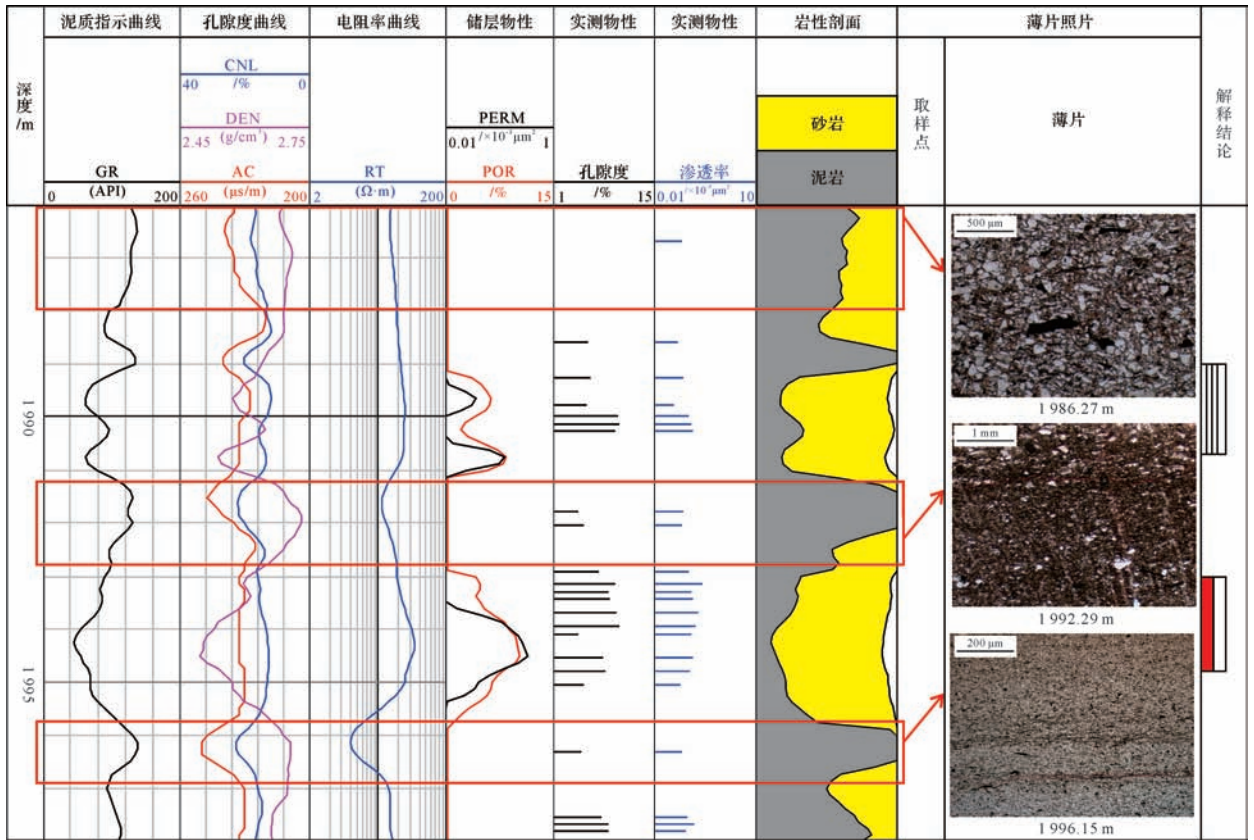


图10 压实致密相常规测井曲线特征

Fig.10 Conventional logging curve characteristics of tight compaction facies

有限性,不能够连续的反映储层成岩相^[40];而测井资料能够连续的获取包括密度、电阻率、泥质含量、元素或矿物组分等地层物理信息,因此可以根据有限的薄片等资料来确定取样点的成岩相类型,找出不同成岩相对应的测井曲线响应特征^[6],再通过测井交会图建立定量划分不同成岩相的识别标准,从而能够实现成岩相单井纵向上的定量表征。

3.1 测井曲线交会图分析及定量识别标准

选取城96井共83个样品数,利用对成岩相敏感度较高的常规测井曲线如自然伽马、密度、声波时差、补偿中子以及电阻率等建立交会图,能够清晰直观地识别成岩相的分界和所分布的区域(图11)。虽然各类成岩相的分布有重叠,但以密度—自然伽马交会图为例,能够较好的将四类成岩相进行区分。密度测井

能够反映储层的总孔隙度,伽马测井则能反映泥质含量。一般不稳定组分溶蚀相由于砂体相对较纯净且长石、岩屑多发生溶蚀作用,因此孔隙度高、泥质含量小;黏土矿物充填相由于高 GR 的伊利石、伊蒙混层等充填于粒间孔隙,使得储层密度和自然伽马均相对增大;碳酸盐胶结相由于成岩作用早期方解石和晚期含铁碳酸盐等的胶结作用,岩石变得十分致密,具有较高的密度;压实致密相主要发育在塑性岩屑或云母以及原生杂基含量较高的层段,其岩性包括泥岩、泥

质含量高的致密粉砂岩等,因此整体具有高 GR 的特征。

与此同时,根据对成岩相不同测井曲线响应特征值的统计与分析,建立成岩相定量测井识别标准,如表 2。

3.2 测井定量识别方法及程序

前已述及,密度—自然伽马交会图从直观上能够较好的对四类成岩相进行识别,因此利用对方交会图中的不同成岩相进行区域划分,建立识别图版,如图 12。

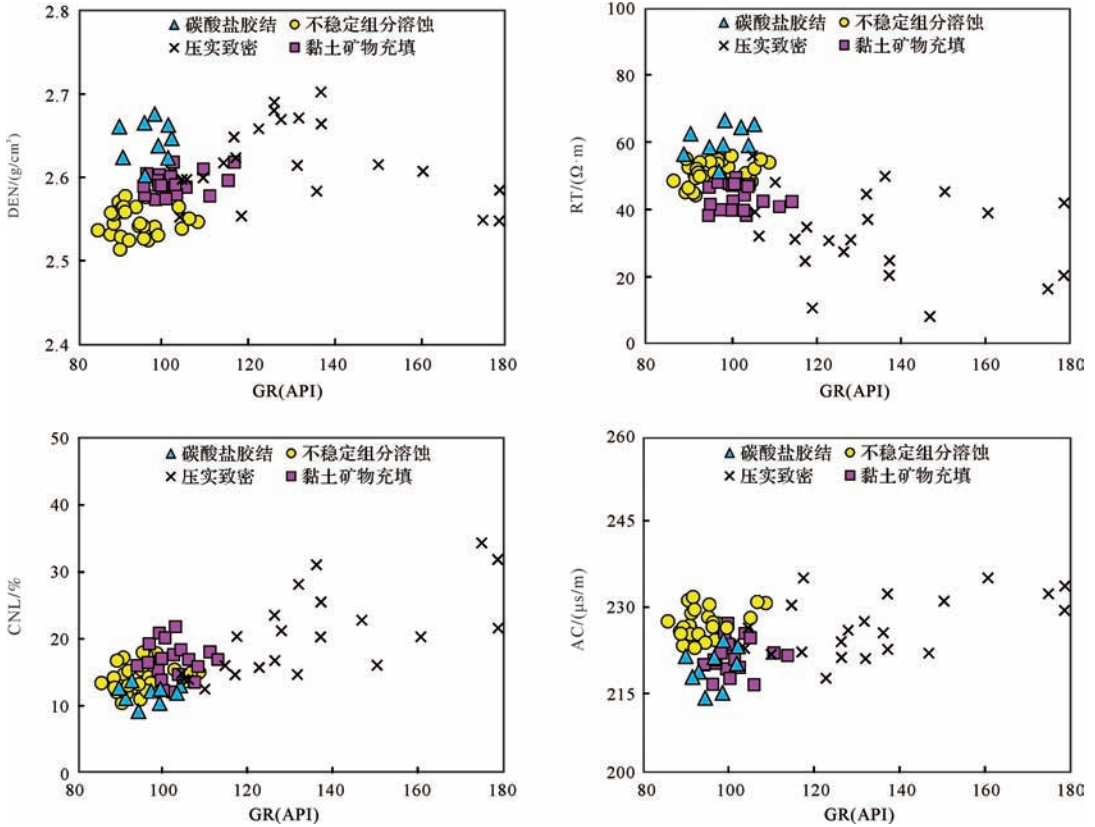


图 11 华池地区成岩相常规测井曲线交会图

Fig.11 Conventional logging crossplots for diagenetic facies in Huachi area

表 2 华池地区长 7 致密油储层成岩相测井相应特征统计结果

Table 2 Statistical results of diagenetic facies logging response characteristics of Chang 7 tight sandstone oil reservoir in Huachi area

成岩相类型	范围与均值	AC/ $\mu\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	CNL/%	DEN/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	GR/API	RT/ $\Omega \cdot \text{m}$
不稳定组分溶蚀相	范围	218~235	10~20	2.503~2.585	82~110	40~60
	均值	228	15	2.547	93	55
黏土矿物充填相	范围	215~230	12~25	2.558~2.623	93~118	29~52
	均值	219	19	2.564	106	41
碳酸盐胶结相	范围	210~230	9~15	2.589~2.692	83~105	48~75
	均值	218	12	2.621	97	61
压实致密相	范围	215~243	12~40	2.533~2.699	100~370	38~79
	均值	220	25	2.564	153	52

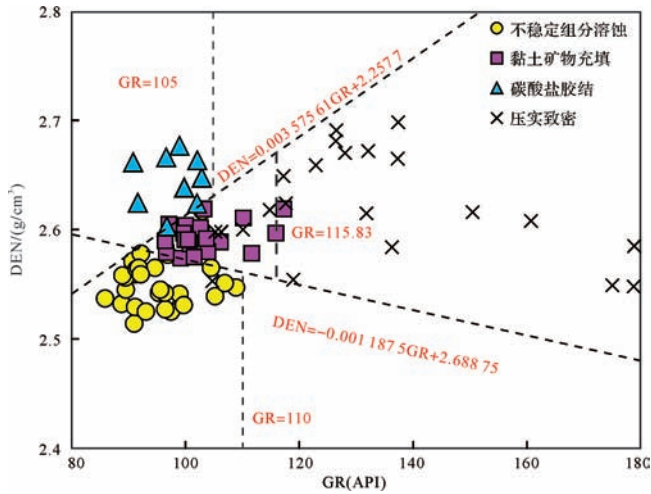


图12 成岩相测井识别图版

Fig.12 Diagenetic facies logging identification graph

利用 Fortran 软件编写成岩相定量划分程序的设计思路如下:

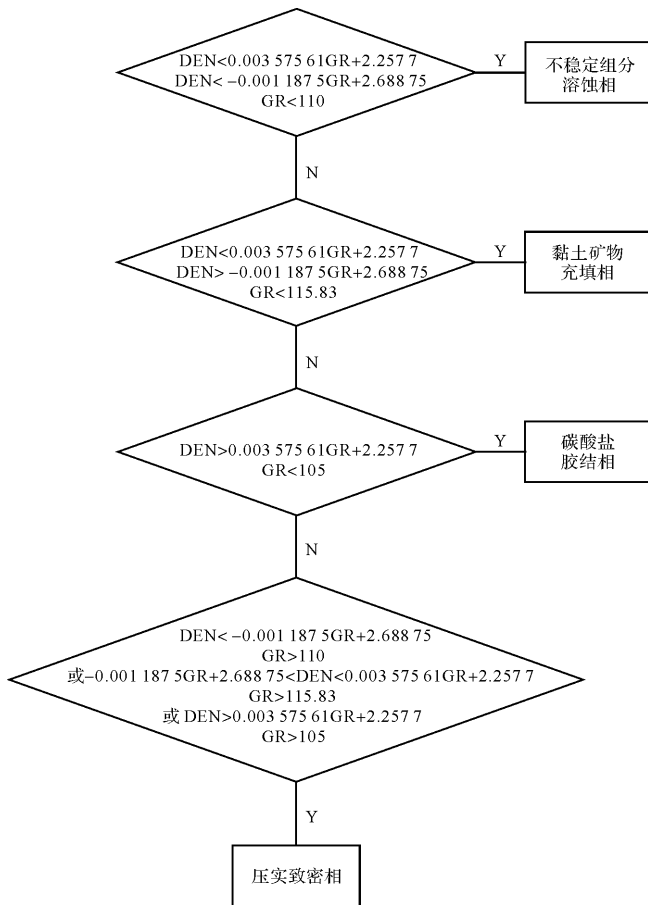


图13 程序流程图

Fig.13 Program flow chart

3.3 单井成岩相应用效果分析

为了验证上述定量识别方法的准确性,对城96

井的实际测井资料进行处理,实现了单井纵向上的成岩相定量划分。划分结果如图14所示,其表明长7致密油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。根据密度—伽马交会图得到的划分结果与图14中其他三条测井曲线(补偿中子孔隙度、声波时差和电阻率曲线)的形态变化能够较一致的反映不同成岩相类型,这也进一步说明了利用密度—伽马交会图定量表征成岩相的可行性。成岩相与储层的物性也具有较好的匹配性:不稳定组分溶蚀相对应的孔渗值较高,其次为黏土矿物充填相和碳酸盐胶结相,压实致密相具有低的孔渗值。成岩相与由伽马测井计算得到的岩性剖面也明显的对应关系:不稳定组分溶蚀相对应的砂质含量较高,而压实致密相则对应较高的泥质含量且易于被压实,黏土矿物充填相由于伊利石、伊蒙混层等充填孔隙使其泥质含量相对中等偏高,碳酸盐胶结相则具有明显的低泥质含量。同时,结合取样点的薄片鉴定,相应深度段(如图14中的四处取样点)的薄片鉴定的成岩相类型与利用测井交会图划分的成岩相具有一致性。另外,成岩相划分结果与油气解释结论匹配关系良好,即油层或差油层中主要为不稳定组分溶蚀相,而干层中致密砂岩相所占的比例相对增多、单层厚度也相对增大。

4 结论

(1) 根据岩石薄片鉴定,可将鄂尔多斯盆地华池地区长7致密油储层成岩相划分为四类,分别为不稳定组分溶蚀相、黏土矿物充填相、碳酸盐胶结相和压实致密相。

(2) 采用密度—伽马测井交会图对成岩相进行划分并利用软件处理划分程序,能够较准确地实现对四类成岩相的定量识别。

(3) 利用本文提出的测井交会图定量表征成岩相的方法,对研究区域96井进行了分析处理,单井划分结果与岩石薄片镜下鉴定结果、实测物性以及试油结论等相一致,验证了方法的可靠性。

参考文献 (References)

- 姚泾利,邓秀芹,赵彦德,等.鄂尔多斯盆地延长组致密油特征[J].石油勘探与开发,2013,40(2):150-158. [Yao Jingli, Deng Xiuqin, Zhao Yande, et al. Characteristics of tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 150-158.]
- 林森虎,邹才能,袁选俊,等.美国致密油开发现状及启示[J].岩性油气藏,2011,23(4):25-30,64. [Lin Senhu, Zou Caineng, Yuan

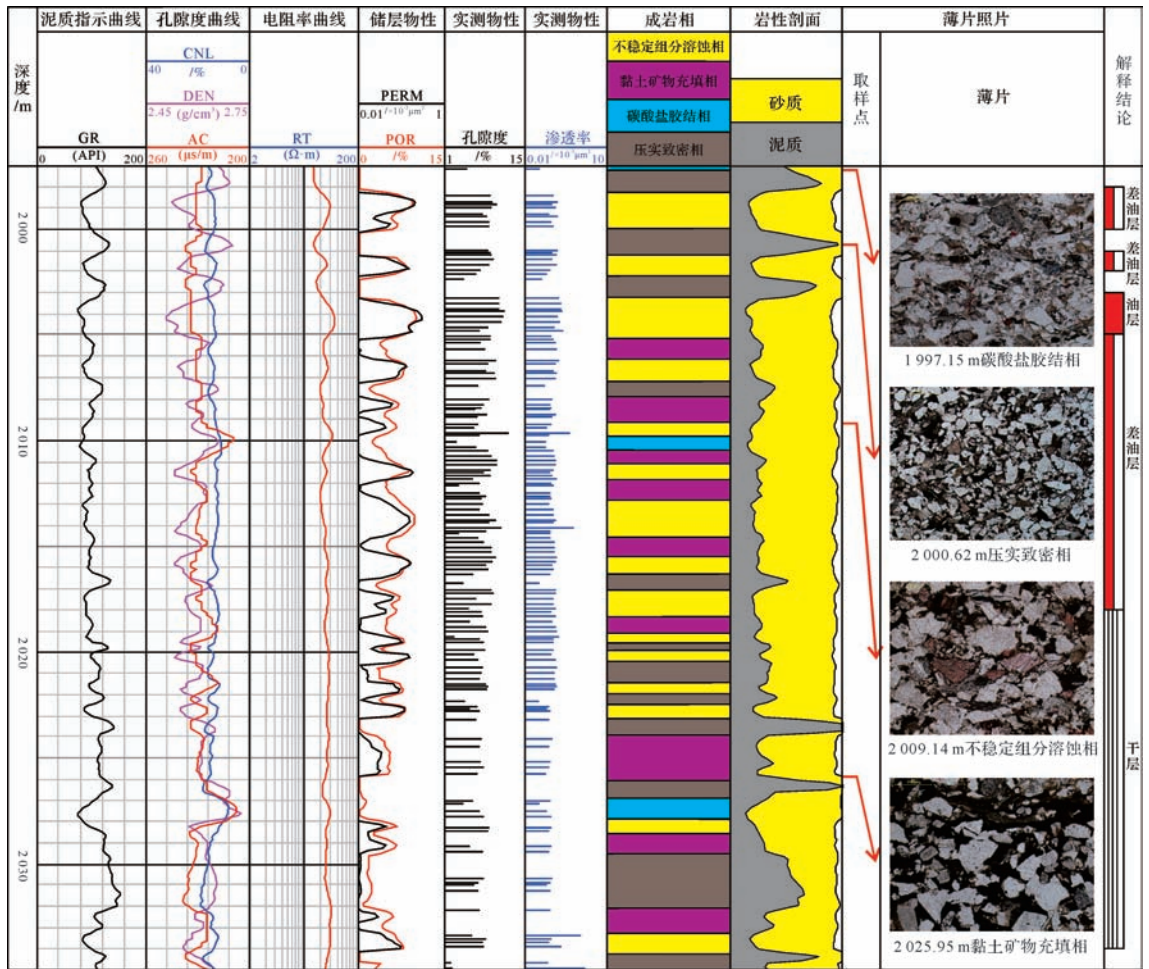


图 14 城 96 井单井成岩相划分

Fig.14 The division of diagenetic facies of Well Cheng 96

Xuanjun, et al. Status quo of tight oil exploitation in the United States and its implication[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(4): 25-30, 64.]

3 刘新,张玉纬,张威,等. 全球致密油的概念、特征、分布及潜力预测[J]. 大庆石油地质与开发,2013,32(4):168-174. [Liu Xin, Zhang Yuwei, Zhang Wei, et al. Concept, characteristics, distribution and potential prediction of the tight oil in the World[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2013, 32(4): 168-174.]

4 杨华,李士祥,刘显阳,等. 鄂尔多斯盆地致密油、页岩油特征及资源潜力[J]. 石油学报,2013,34(1):1-11. [Yang Hua, Li Shixiang, Liu Xianyang, et al. Characteristics and resource prospects of tight oil and shale oil in Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 1-11.]

5 刘宝珺,张锦泉. 沉积成岩作用[M]. 北京:科学出版社,1992:76-200. [Liu Baojun, Zhang Jinquan. Sedimentary Diagenesis[M]. Beijing: Science Press, 1992: 76-200.]

6 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 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): 820-828.]

7 张福顺,朱允辉,王芙蓉. 准噶尔盆地腹部深埋储层次生孔隙成因机理研究[J]. 沉积学报,2008,26(3):469-478. [Zhang Fushun, Zhu Yunhui, Wang Furong. Forming mechanism of secondary pores in deep buried reservoirs of Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(3): 469-478.]

8 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 Shu'nan, et al. Research status and advances in the diagenetic facies of clastic reservoirs[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(1): 39-50.]

9 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.]

10 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 Xiangxiang, Zou Caineng, Tao Shizhen, et al. Diagenetic facies types and semiquantitative evaluation of low porosity and permeability sandstones of the Fourth member Xujiahe Formation Guangan area, Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(1): 50-57.]
- 11 段新国, 宋荣彩, 李国辉, 等. 四川盆地须二段综合成岩相特征研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2011, 33(1): 7-14. [Duan Xinguo, Song Rongcai, Li Guohui, et al. Research of integrated diagenetic facies characteristics of T₃x₂ reservoir in Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2011, 33(1): 7-14.]
- 12 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等. 大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 19-28. [Zhu Xiaomin, Deng Xiuqin, Liu Ziliang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: An example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 19-28.]
- 13 朱小燕, 孙卫, 李建霆, 等. 陇东地区南梁地区长6储层特征研究[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(6): 903-907. [Zhu Xiaoyan, Sun Wei, Li Jianting, et al. Research on Triassic Chang 6 reservoir in Chenghao-Anliang area[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(6): 903-907.]
- 14 朱世发, 徐黎明, 朱筱敏, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组长4+5致密砂岩储层成岩作用特征[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(3): 22-27. [Zhu Shifa, Xu Liming, Zhu Xiaomin, et al. Diagenetic characteristics of tight sandstone of Chang 4+5 reservoir in Longdong area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(3): 22-27.]
- 15 王峰, 陈蓉, 田景春, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区长4+5油层组致密砂岩储层成岩作用及成岩相[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 199-206. [Wang Feng, Chen Rong, Tian Jingchun, et al. Diagenesis and diagenetic facies of the Chang 4+5 tight sandstone reservoirs in Longdong area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 199-206.]
- 16 钟大康, 祝海华, 孙海涛, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 61-68. [Zhong Dakang, Zhu Haihua, Sun Haitao, et al. Diagenesis and porosity evolution of sandstones in Longdong area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 61-68.]
- 17 杨华, 钟大康, 姚涇利, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组砂岩储层孔隙成因类型及其控制因素[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 69-76. [Yang Hua, Zhong Dakang, Yao Jingli, et al. Pore genetic types and their controlling factors in sandstone reservoir of Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 69-76.]
- 18 付晶, 吴胜和, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组储层定量成岩相研究[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 86-97. [Fu Jing, Wu Shenghe, Fu Jinhua, et al. Research on quantitative diagenetic facies of the Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 86-97.]
- 19 钟高润, 张小莉. 鄂尔多斯盆地延长组长7段致密储层成岩相测井识别方法——以陇东地区为例[J]. 国外测井技术, 2014(4): 23-27. [Zhong Gaorun, Zhang Xiaoli. Logging identification method for the diagenetic facies of tight reservoir in Member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin: A case study in Longdong area[J]. World Well Logging Technology, 2014(4): 23-27.]
- 20 何自新, 付金华, 席胜利, 等. 苏里格大气田成藏地质特征[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 6-12. [He Zixin, Fu Jinhua, Xi Shengli, et al. Geological features of reservoir formation of Sulige gas field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(2): 6-12.]
- 21 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 1-6. [Yang Junjie. Tectonic Evolution and Oil-Gas Reservoirs Distribution in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 1-6.]
- 22 李薇, 刘洛夫, 王艳茹, 等. 应用测井数据计算泥页岩厚度——以鄂尔多斯盆地延长组长7₃油层为例[J]. 中国石油勘探, 2012, 17(5): 32-35, 70. [Li Wei, Liu Luofu, Wang Yanru, et al. Application of logging data in calculating mud shale thickness[J]. China Petroleum Exploration, 2012, 17(5): 32-35, 70.]
- 23 李凤杰, 王多云, 徐旭辉. 鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组储层特征及影响因素分析[J]. 石油实验地质, 2005, 27(4): 365-370. [Li Fengjie, Wang Duoyun, Xu Xuhui, et al. The influential factors and characteristics of Triassic Yanchang Formation reservoir in Longdong area, Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2005, 27(4): 365-370.]
- 24 卢进才, 李玉宏, 魏仙祥, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组油页岩沉积环境与资源潜力研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(6): 928-932. [Lu Jincan, Li Yuhong, Wei Xianyang, et al. Research on the depositional environment and resources potential of the oil shale in the Chang 7 Member, Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(6): 928-932.]
- 25 何自新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 205-210. [He Zixin. Ordos Basin Evolution and Oil Gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 205-210.]
- 26 张哨楠, 丁晓琪. 鄂尔多斯盆地南部延长组致密砂岩储层特征及其成因[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(4): 386-394. [Zhang Shaonan, Ding Xiaoqi. Characters and causes of tight sandstones of Yanchang Formation in southern Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2010, 37(4): 386-394.]
- 27 邓秀芹, 付金华, 姚涇利, 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 Xiuqin, 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.]
- 28 杨华, 窦伟坦, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 254-263. [Yang Hua, Dou Weitan, Liu Xianyang, et al. Analysis on sedimentary facies of Member 7 in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 254-263.]
- 29 付金华, 邓秀芹, 张晓磊, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组深水砂

- 岩与致密油的关系[J]. 古地学报, 2013, 15(5): 624-634. [Fu Jinhua, Deng Xiuqin, Zhang Xiaolei, et al. Relationship between deepwater sandstone and tight oil of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 624-634.]
- 30 任战利,李文厚,梁宇,等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组致密油成藏条件及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 190-198. [Ren Zhanli, Li Wenhou, Liang Yu, et al. Tight oil reservoir formation conditions and main controlling factors of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 190-198.]
- 31 高辉,孙卫,宋广寿,等. 鄂尔多斯盆地合水地区长8储层特低渗透成因分析与评价[J]. 地质科技情报, 2008, 27(5): 71-76. [Gao Hui, Sun Wei, Song Guangshou, et al. Origin analysis of extra low-permeability and evaluation of Chang 8 reservoir in Heshui area of Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(5): 71-76.]
- 32 赖锦,王贵文,陈敏,等. 基于岩石物理相的储集层孔隙结构分类评价——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长8油层组为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 566-573. [Lai Jin, Wang Guiwen, Chen Min, et al. Pore structures evaluation of low permeability clastic reservoirs based on petrophysical facies: A case study on Chang 8 reservoir in the Jiyuan region, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 566-573.]
- 33 高辉,孙卫. 鄂尔多斯盆地合水地区长8储层成岩作用与有利成岩相带[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2010, 40(3): 542-548. [Gao Hui, Sun Wei. Diagenesis and favorable diagenetic facies of Chang 8 reservoir in Heshui area, Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(3): 542-548.]
- 34 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 Yebo, Ji Hancheng, Zhu Xiaomin. 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.]
- 35 蒋裕强,刁昱翔,王猛,等. 川西南部须二段储层成岩作用与成岩相研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2014, 33(4): 509-516, 530. [Jiang Yuqiang, Diao Yuxiang, Wang Meng, et al. Diagenesis and diagenetic facies analysis on the second member of the upper Triassic Xujiahe Formation reservoir in the south of western Sichuan Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2014, 33(4): 509-516, 530.]
- 36 李渭,白霁,李文厚. 鄂尔多斯盆地合水地区长6储层成岩作用与有利成岩相带[J]. 地质科技情报, 2012, 31(4): 22-28. [Li Wei, Bai Ru, Li Wenhou. Diagenesis and favorable diagenetic facies of the Chang 6 reservoir in Heshui area, Ordos Basin[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(4): 22-28.]
- 37 赖锦,王贵文,黄龙兴,等. 致密砂岩储集层成岩相定量划分及其测井识别方法[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 128-138. [Lai Jin, Wang Guiwen, Huang Longxing, et al. Quantitative classification and logging identification method for diagenetic facies of tight sandstones[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 128-138.]
- 38 柴毓,王贵文,赖锦. 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[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(3): 38-51. [Chai Yu, Wang Guiwen, Lai Jin. Diagenetic facies characteristics and logging recognition of tight sandstone reservoir in Xu-2 section of Anyue area, Sichuan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(3): 38-51.]
- 39 孙海涛,钟大康,刘洛夫,等. 沾化凹陷沙河街组砂岩透镜体表面与内部碳酸盐胶结作用的差异及其成因[J]. 石油学报, 2010, 31(2): 246-252. [Sun Haitao, Zhong Dakang, Liu Luofu, et al. Carbonate cementation difference and its origin between exterior and interior surfaces of lenticular sandbody in Shahejie Formation of Zhanhua depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 246-252.]
- 40 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 Haitao, Shi Zhuo, Shi Yujiang, 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 & Gas Geology, 2012, 33(2): 256-264.]

Quantitative Characterization of Diagenetic Facies of Tight Sandstone Oil Reservoir by Using Logging Crossplot: A case study on Chang 7 tight sandstone oil reservoir in Huachi area, Ordos Basin

RAN Ye¹ WANG GuiWen^{1,2} LAI Jin¹ ZHOU ZhengLong¹ CUI YuFeng¹
DAI QuanQi³ CHEN Jing¹ WANG ShuChen¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Unconventional Natural Gas Institutes, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Huachi area is located in the southwest of Shanbei slope of Ordos Basin in China, with a flat strata and simple structure. Yanchang Formation of the Upper Triassic is terrigenous clastic rock series of fluvial facies and lacustrine facies, formed in the process of continuous depression and stable settlement in Ordos Basin, and vertically divided into 10 oil layers. During the deposition of Chang 7 member, the basin was in the maximum lake flooding period, developing sandy debris flow and turbidite fans in the center and on the slope. Having experienced long diagenetic evolution, Chang 7 member formed current reservoir characteristics. Diagenetic facies is the material reflection of diagenetic environment, and the combination of diagenesis and diagenetic minerals, and it is also the production of diagenesis and evolution stages in specific sedimentary, physical and chemical environment. Diagenetic facies includes the characteristics of rock particles, cement, fabric and cracks-holes, which highly generalizes diagenesis, diagenetic minerals, diagenetic environment, diagenetic events, and diagenetic evolutionary sequence during the period between the formation of sediment and the occurrence of metamorphism. The research on cores of diagenetic facies are diagenesis and diagenetic minerals. What's more, diagenetic facies plays an important role in the formation of effective reservoir, therefore to study diagenetic facies of tight sandstone oil reservoir has a broad application prospects. In this paper, diagenesis and diagenetic minerals of Chang 7 tight sandstone oil reservoir in Huachi area of Ordos Basin are studied by using core observation, thin section examination, scanning electron microscope data, cathode luminescence and physical property analysis. According to the types and intensity of diagenesis and the combination feature of diagenetic minerals, diagenetic facies in the study area is qualitatively divided into four types, including instable components dissolution facies, clay minerals filling facies, and carbonate cementation facies and tight compaction facies. Then based on the analysis of conventional logging curves, such as gamma log, density log, acoustic transit time log, compensated neutron log and resistivity log, which are sensitive to diagenetic facies, crossplots are made to further quantitatively classify the four diagenetic facies and establish logging cognition model of diagenetic facies. Take Well Cheng 96 in Huachi area, for example, the quantitative recognition and classification of diagenetic facies coincide well with thin section of sampling point, formation testing and physical property analysis in single well on the longitude, which verifies the reliability of the model. The study of quantitative logging characterization method of diagenetic facies can provide theoretical guidance and technical support for comprehensive assessment of tight sandstone oil and for prediction of favorable zones in oil-gas reservoir development.

Key words: diagenetic facies; logging crossplot; Chang 7 oil layer; tight sandstone oil reservoir; Huachi area