

Types and Logging Prediction Methods of Diagenetic Facies in the Tight Reservoir of Mixed Siliciclastic-Carbonate Lacustrine Successions from Yingxi Area, Qaidam Basin

Quanqi Dai^{1,2*}, Guiwen Wang^{1,2#}, Xuqiang Fan^{1,2}, Zhibo He^{1,2}, Xing Zhao^{1,2}, Lijuan Ma³, Yafeng Li⁴, Kunyu Wu⁴

¹State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing

²College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing

³Exploration Utility Department, Petro China Qinghai Oilfield Company, Jiuquan Gansu

⁴Research Institute of Exploration & Exploitation, Petro China Qinghai Oilfield Company, Jiuquan Gansu
Email: daiqq0614@163.com, #wanggw@cup.edu.cn

Received: July 7th, 2019; accepted: July 22nd, 2019; published: July 29th, 2019

Abstract

The upper section of the Lower Ganchaigou Formation in the Yingxi area of the Qaidam Basin is a typical compact reservoir of mixed Siliciclastic-carbonate Lacustrine Successions. Classification characteristics of diagenetic facies and log characterization are critical to guide oil and gas exploration in this area. The analysis results of X-ray diffraction, thin sections and scanning electron microscopy indicate that the types of reservoir minerals are dominated by dolomite, calcite, quartz and clay minerals. The diagenesis is mainly divided into compaction, cementation, rupture and dissolution. According to the mineral composition and diagenesis type and strength, the diagenetic facies are divided into diagenetic microfracture facies, dissolution facies, intercrystalline pore facies and compacted dense facies. Among them, compacted dense facies and intercrystalline pore facies are widely developed, and diagenetic microfracture facies and dissolved facies are favorable diagenetic facies. Sandy or sandy limy dolostone is favorable for the development of diagenetic microfracture facies. The dissolution facies is mostly developed in the high carbonate minerals. The commonly developed micritic carbonate minerals and high-content clay minerals are the reasons why the intercrystalline pore facies and compacted dense facies developed. On the basis of clarifying the main controlling factors of diagenetic facies, the sensible logging parameters of the diagenetic facies response were selected and characterized by principal component analysis. The results show that the change frequency of the vertical diagenetic facies is fast, and the diagenetic microfractures are often associated with structural fractures. However, in the superposition of no structural fractures, the petrophysical properties of dissolution facies are the best. The compacted lithofacies have the worst petrophysical properties.

*第一作者。

#通讯作者。

Keywords

Diagenesis, Diagenetic Facies, Well Logs Prediction, Reservoir Quality, Tight Mixed Siliciclastic-Carbonate

柴达木盆地英西地区湖相混积岩致密储层成岩相类型与测井表征方法

代全齐^{1,2*}, 王贵文^{1,2#}, 范旭强^{1,2}, 贺智博^{1,2}, 赵 星^{1,2}, 马丽娟³, 李亚锋⁴, 伍坤宇⁴

¹中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京

²中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京

³青海油田勘探事业部, 甘肃 酒泉

⁴青海油田勘探开发研究院, 甘肃 酒泉

Email: daiqq0614@163.com, #wanggw@cup.edu.cn

收稿日期: 2019年7月7日; 录用日期: 2019年7月22日; 发布日期: 2019年7月29日

摘 要

柴达木盆地英西地区下干柴沟组上段作为一套典型的湖相混积岩致密储层, 成岩相的分类特征与测井表征对指导该区的油气勘探具有至关重要的作用。X衍射、薄片和扫描电镜等资料表明, 储层矿物类型以白云石、方解石、石英和黏土矿物为主, 成岩作用主要分为压实作用、胶结作用、破裂作用和溶蚀作用。根据矿物组分和成岩作用类型与强度, 将成岩相划分为成岩微裂缝相、溶蚀相、晶间孔相和压实致密相。其中, 压实致密相和晶间孔相发育广泛, 成岩微裂缝相和溶蚀相为有利成岩相。含砂或砂质灰云岩有利于成岩微裂缝相的发育, 溶蚀相多发育在碳酸盐矿物含量高的层段, 普遍发育的泥粉晶碳酸盐矿物和高含量的黏土矿物是导致储层晶间孔相和压实致密相广泛发育的根本原因。在明确成岩相主控因素的基础上, 通过挑选成岩相应敏感性的测井参数, 运用主成分分析法对成岩相类型进行测井定量表征。结果表明, 单井纵向成岩相类型变化频率快, 成岩微裂缝相常与构造裂缝伴生, 而在无构造裂缝的叠加作用时, 溶蚀相物性最好, 压实致密成岩相物性最差。

关键词

成岩作用, 成岩相, 测井表征, 储层质量, 致密混积岩

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混积岩是碳酸盐岩和陆源碎屑岩之间的过渡类型, 在全球各大盆地分布广泛。近年来, 有关混积岩的研究多集中于海相和淡水滨浅湖相, 多聚焦于混积岩概念、成分比例、岩性命名和层序划分等基本理

论问题的讨论,但成岩相的类型特征、主控因素及测井表征等研究少有报道[1]-[6]。在现今油气勘探阶段,认为油气藏是若干有利“相”耦合作用的产物,寻找富油气聚集区带的核心是寻找有利储集相带[7] [8] [9]。因此,在烃源岩和构造沉积相等成藏地质条件基本明确的情况下,寻找受成岩相控制的优质储集体是现阶段油气勘探工作的主要目标。根据成岩作用、成岩矿物等划分出的不同类型成岩相在结构、矿物成分、物性上的差异,导致了成岩相在测井曲线上具有不同响应特征[10] [11]。目前虽然通过测井资料直接识别储层成岩相尚存在一定局限性,但通过精细解析不同的测井曲线信息,可以总结出测井资料对储层不同成岩相的响应特征从而达到成岩相测井连续表征,以便更好地指导油气勘探[11] [12]。

英西地区位于柴达木盆地西北部英雄岭构造带西北端,受喜山晚期隆起反转构造作用,沟壑纵横,海拔普遍在 3000 米以上[13] [14]。该区古近系下干柴沟组上段(E32),发育一套油气资源储量丰富的湖相混积岩地层,孔隙度平均值为 7.85%、渗透率普遍小于 1 mD,矿物成分复杂、成岩作用多样、薄互层频繁,具有典型的“咸化”、“致密”、“非均质强”特点。作为高原咸化湖盆背景下的混积岩致密储层,复杂的成岩相发育特征严重制约了油气的勘探开发。因此,明确成岩相类型特征及其影响因素,实现成岩相的测井连续表征,是现阶段亟待解决的关键问题。

2. 储层岩性和物性特征

英西地区 E₃² 储层 400 块 X 射线衍射全岩矿物结果表明,主要矿物类型有(铁)白云石、方解石、石英、长石、(硬)石膏、黄铁矿和黏土矿物(表 1),个别样品含有少量菱镁矿和钙芒硝等。其中,(铁)白云石含量分布范围最大(1.2%~93.6%),平均含量也最高(37.8%);方解石和黏土矿物的含量分布范围较为接近,分别为 1.2%~53.4%和 0.3%~49.8%,两者平均含量基本相同,分别为 17.8%和 17.9%;陆源碎屑中石英含量分布范围为 1.5%~45.8%,平均含量为 11.7%,长石含量分布范围为 1.1%~34.9%,平均含量为 9.9%,较石英有所减少;蒸发矿物中(硬)石膏含量分布范围较大(0.3%~66.8%),但平均含量仅为 5.5%;黄铁矿含量分布范围最小,介于 1.4%~10.2%,平均含量也最低,为 4.8%(表 1)。同时,储层矿物成分三角图主要成两端元分布,岩性主要以组分混积岩、灰质云岩、砂质(含砂)灰云岩和含泥灰云岩为主(图 1)。由于英西地区沉积水体咸化、古气候干旱,且湖平面变化速率快,造就了矿物类型多样,含量分布范围广,岩性复杂的特征[15] [16]。储层总体以泥晶灰云岩为主,具有晶粒小、泥质含量多、掺杂膏质、陆源碎屑间歇性发育的特点,揭示出其远物源、相对快速堆积的深湖一半深湖沉积特征。

Table 1. Correlation statistics of X-ray diffraction of E₃² formation in Yingxi Area
表 1. 英西地区下干柴沟组上段 X 衍射矿物含量统计表

矿物类型	最大值(%)	最小值(%)	平均值(%)
方解石	53.4	1.2	17.8
白云石 + 铁白云石	93.6	1.2	37.8
石英	45.8	1.5	11.7
长石	34.9	1.1	9.9
石膏 + 硬石膏	66.8	0.3	5.5
黄铁矿	10.2	1.4	4.8
粘土矿物	49.8	0.3	17.9

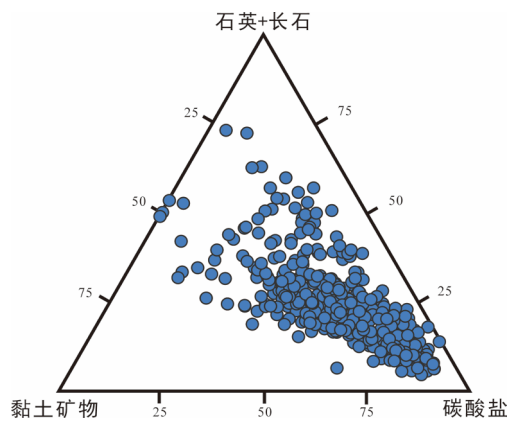


Figure 1. Composition characteristics of E_3^2 formation in Yingxi Area
图 1. 英西地区下干柴沟组上段矿物成分三角图

英西地区 E_3^2 储层孔隙度普遍小于 20%，主要介于 4%~12% 之间，平均值为 7.85% (图 2(a))；渗透率普遍小于 1 mD，平均值为 0.469 mD (图 2(b))。物性分布特征表明英西地区储层致密，压实改造作用强烈，储渗能力较差。随着孔隙度的逐渐增大，渗透率总体上有随之增加的趋势，但两者之间没有明确的相互控制关系(图 3)。相同孔隙度的岩石样品，渗透率值最大相差近 100 倍；相同渗透率的岩石样品，孔隙度值最大相差约 10% (图 3)。综上，英西地区 E_3^2 储层孔隙结构经历了复杂的成岩作用改造，非均质性极强。

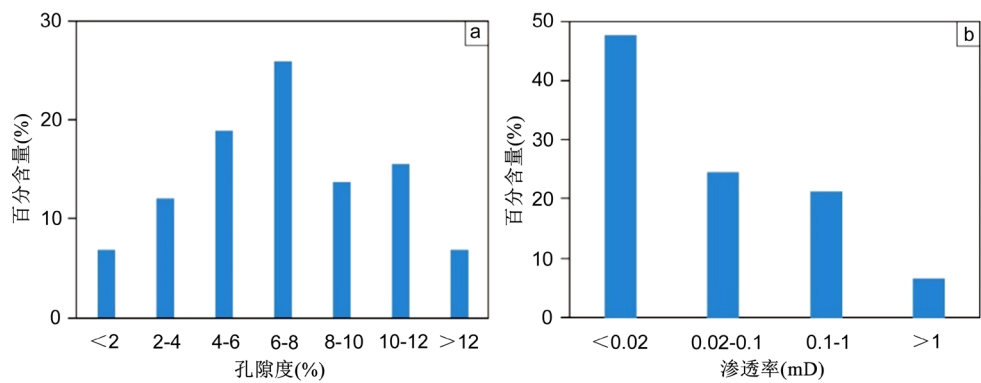


Figure 2. Physical distribution of E_3^2 formation in Yingxi Area (a) porosity (b) permeability
图 2. 英西地区下干柴沟组上段物性分布特征(a)孔隙度(b)渗透率

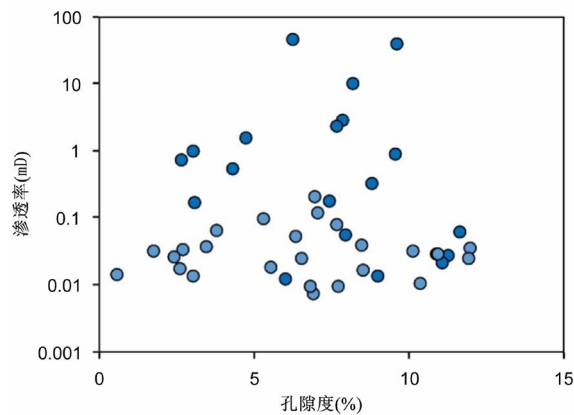
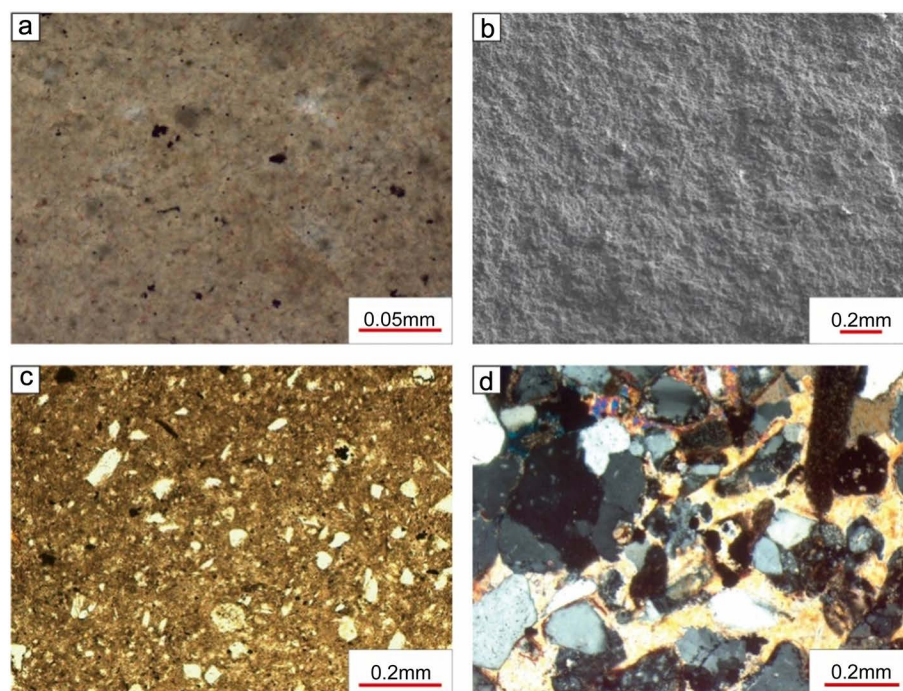


Figure 3. Relationship between porosity and permeability of E_3^2 formation in Yingxi Area
图 3. 英西地区下干柴沟组上段孔隙度与渗透率关系

3. 储层成岩作用类型

英西地区 E_3^2 储层在漫长的地质历史时期经历了压实、胶结等破坏性成岩作用以及溶蚀、破裂等建设性成岩作用。多类型、不同强度成岩作用的叠加对储集岩原生孔隙的保持及破坏和次生孔隙的形成、保持及破坏都起着极为重要的影响。

压实作用: 通过镜下观察发现, 岩石在埋藏过程中以机械压实作用为主, 颗粒或晶粒主要为线接触, 总体上堆积致密, 压实作用中等-强(图 4)。本区压实作用的发育与其特殊的成岩地质背景有关, 古近系渐新统英西地区处于干旱咸化的气候[14] [15] [16], 导致了碳酸盐岩重结晶速率快、晶粒泥晶化, 深湖-半深湖沉积环境致使泥质含量的偏高, 抗压实能力弱, 同时短期的中深埋藏也使压实作用进行的不彻底(图 4)。此外, E_3^2 储层烃类充注导致的异常高压背景, 一定程度上抑制了压实作用的进行。异常高压可导致储层欠压实作用的发生, 孔隙内流体承受了大部分上覆地层压力, 岩石颗粒压实变形程度减弱[17]。英西地区受喜山晚期由北向南强烈逆冲推覆作用影响[18], 强烈的构造挤压对储层的成岩压实产生了明显的影响, 构造挤压减孔量明显的受控于构造样式和局部构造应力的的大小, 同时导致膏质等塑性岩层发生变形。



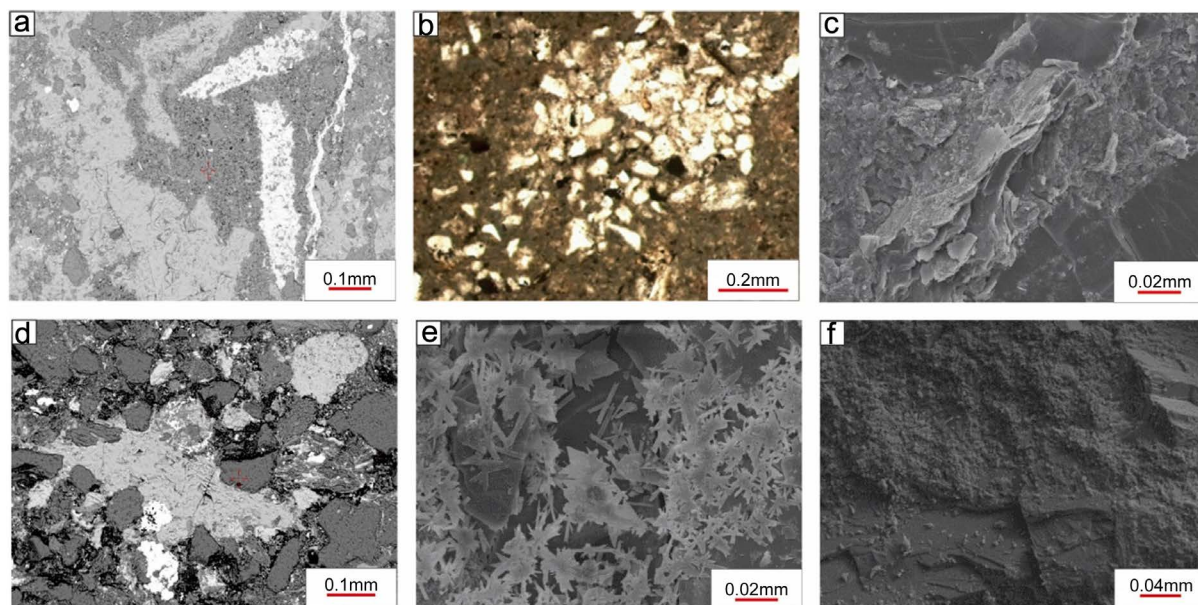
(a) 压实作用中等-强, 晶粒细小, 原生孔隙欠发育, 狮 41-2 井, 4192.95 m, 泥晶灰(云)岩; (b) 压实作用中等-强, 孔隙少有发育, 狮 41-6-1 井, 3866.7 m, 灰质泥岩; (c) 压实作用中等-强, 泥质混杂导致孔隙少有发育, 狮 49-1 井, 3749.16 m, 泥质泥晶灰(云)岩; (d) 压实作用中等, 颗粒点接触, 孔隙式胶结, 狮 41-6-1 井, 3868.57 m, 含膏细中粒岩屑长石砂岩

Figure 4. Characteristic pattern of compaction of E_3^2 formation in Yingxi Area

图 4. 英西地区下干柴沟组上段储层压实作用特征

胶结作用: E_3^2 沉积早期干旱、咸化的古气候使沉积水体浓缩, 以碱性成岩环境为主, 泥晶方解石、泥晶白云石、石膏和石盐等矿物可以直接从沉积水体中析出, 形成同生期胶结物, 这决定了 E_3^2 储层胶结物矿物主要为方解石、白云石、石膏、钙芒硝和石盐等(图 5(a), 图 5(b))。早期的碳酸盐胶结限制了压实压溶作用的进行, 同时由于陆源供给少, 且硅质在碱性环境下未达到过饱和很少沉淀, 在 E_3^2 储层中, 石英的次生加大基本不发育。尽管后期有酸性流体侵入, 使长石岩屑溶蚀产生一定的硅质, 但仍未改变碱

性环境的背景, 只在局部产生极少数的硅质胶结。根据大量薄片观察发现, E_3^2 储层粘土矿物组合以它生伊利石和伊/蒙混层矿物为主, 次为绿泥石矿物(图 5(c)), 反映了偏碱性成岩环境, 碳酸盐岩中世代和无世代胶结作用发育, 主要以基底式产出(图 5(d))。此外, 硬石膏也常以胶结物的形式充填于孔隙和裂缝之间(图 5(e), 图 5(f)), 降低了储层储集性和渗流能力。综上, 英西地区 E_3^2 储层发育碳酸盐、硫酸盐和黏土矿物胶结, 胶结作用强烈、胶结物含量高, 降低储层的孔渗大小, 对储层物性具有强烈的破坏作用。



(a) 狮 25 井, 3996.71 m, 泥晶灰云岩; (b) 狮 38 井, 2796.52 m, 泥晶灰云岩; (c) 狮 40 井, 3579.31 m, 泥质砂岩, 伊利石黏土矿物; (d) 狮 37 井, 2695.83 m, 背散射电子图像, 石膏、钙芒硝、金红石都为胶结物; (e) 狮 40 井, 3579.31 m, 泥质砂岩, 硬石膏完全充填; (f) 狮 41-2 井, 4074.42 m, 泥晶白云岩, 硬石膏脉

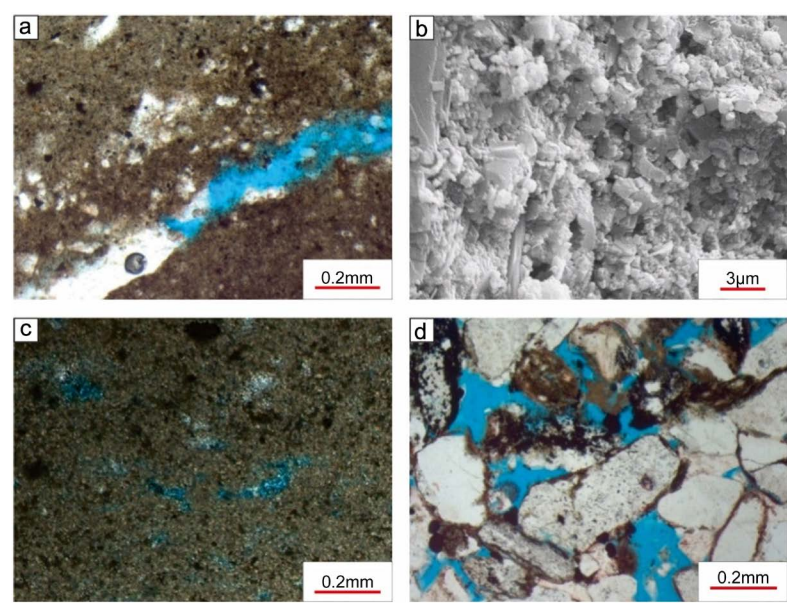
Figure 5. Characteristic pattern of cementation of E_3^2 formation in Yingxi Area

图 5. 英西地区下干柴沟组上段储层胶结作用特征

溶蚀作用: 镜下观察发现, E_3^2 储层溶蚀孔隙较为发育, 溶蚀作用主要发育于白云石、石膏和岩屑颗粒内部与边缘, 以及少部分粒间碳酸盐胶结物中(图 6)。 E_3^2 为深湖 - 半深湖沉积环境, 属于源储一体或紧邻烃源岩, 广泛发育泥晶白云岩和膏岩, 不稳定组分含量高, 在成岩过程中由于酸性流体的侵入, 发生溶蚀作用, 使储集性能变好。同时构造活动产生的大量断层和裂缝作为有机酸渗流通道, 有利于溶蚀作用的进行。对于 E_3^2 储层来说, 酸性流体主要有两个来源: 1) N_2^1 沉积末期, E_3^1 和 E_3^2 烃源岩进入低成熟演化阶段, 产生了大量有机酸与 CO_2 , 同时由于喜山构造活动使断层开启, 更深层 E_3^1 烃源岩生成的有机酸可沿断层向上运移到 E_3^2 储层中[19]; 2) N_2^2 沉积末期至今, E_3^2 烃源岩进入生油高峰期, E_3^1 烃源岩处于过成熟期, 同时 N_2^2 沉积末期处于喜山运动晚期的 IV 幕和 V 幕, 英雄岭构造带再次发生强烈挤压, 在深层形成大量逆冲断层, 酸性流体能够通过早期断层及新生断层流动[18] [19]。英西地区 E_3^2 储层溶蚀孔隙的发育除与油气运聚时期带来的酸性流体有关外, 表生暴露时期的大气淡水淋滤也能产生一定量的白云岩晶间溶孔、膏溶孔和岩屑的粒内溶孔和粒间溶孔。

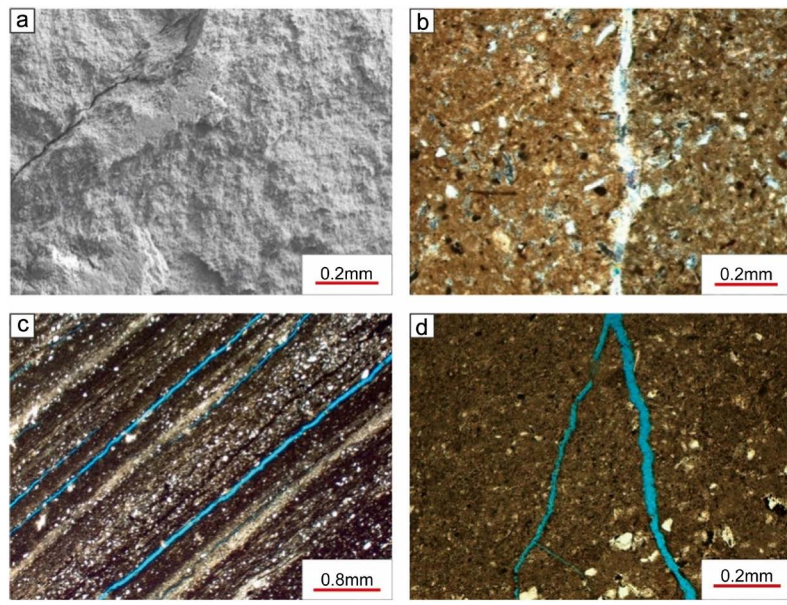
破裂作用: 构造破裂作用不属于一般意义上的沉积成岩作用, 但破裂作用导致岩石产生大量的裂缝和微裂缝, 是沉积物沉积后的一项重要改造作用[10] [20], 故在此将其作为广义上的成岩作用加以讨论。破裂作用形成的微裂缝虽不能显著提高储层的储集性能, 但可以非常有效地改善储层的渗流能力。深埋藏导致强压实的同时也产生了裂缝, 增大了裂缝的宽度与密度, 提高了渗流能力, 有效地沟通了孔隙空

间的流体。同时由于英西地区断裂发育广泛、活动强烈，镜下可见众多的微裂缝，主要发育于泥晶碳酸盐岩中，且沿裂缝常见溶蚀现象(图 7)。其中构造微裂缝多表现为平直状，且切割埋藏期形成的各种胶结物，当富碳酸盐岩流体沿裂缝流动时，通常发生沉淀作用，造成部分裂缝被充填的现象。此外，部分成岩微裂缝多为层理间溶蚀缝，基本无胶结物充填，连通性好。



(a) 41-6-1 井, 3854.87 m, 泥晶灰(云)岩, 溶蚀缝; (b) 狮 203 井, 4502.43 m, 晶间溶孔, 泥晶灰岩; (c) 狮 41-6-1 井, 3865.18 m, 晶间扩溶; (d) 狮 41-6-1 井, 3868.5 m, 含膏细中粒岩屑长石砂岩, 粒间溶孔

Figure 6. Characteristic pattern of dissolution of E_3^2 formation in Yingxi Area
图 6. 英西地区下干柴沟组上段储层溶蚀作用特征



(a) 狮 41-6-1 井, 3855.15 m, 泥晶灰(云)岩, 破裂缝发育; (b) 狮 203 井, 4502.48 m, 粉砂质泥晶云岩, 微裂缝充填胶结物; (c) 狮 41-6-1 井, 3849.65 m, 粉砂质泥晶灰岩, 层间溶蚀缝; (d) 狮 49-1 井, 3850.21 m, 泥质泥晶灰(云)岩, 溶蚀缝

Figure 7. Characteristic pattern of rupture of E_3^2 formation in Yingxi Area
图 7. 英西地区下干柴沟组上段储层破裂作用特征

4. 储层成岩相划分

英西地区 E_3^2 经历了极其复杂的成岩史, 受多种成岩环境下不同成岩作用的叠加与改造, 因此其不可能是某种单一成岩环境的产物, 其中必定有一种或两种主要的成岩作用控制着孔隙的演化, 并决定其目前的总貌。因此, 综合考虑近年来国内外学者对成岩相的研究成果[10] [11] [21] [22] [23], 针对英西地区储层矿物种类较多, 本文以某种成岩环境下发生的主要成岩作用来命名成岩相, 以体现某一层段所受的最主要成岩作用和强度等特征。通过大量的岩心观察和薄片鉴定, 结合扫描电镜、X 射线衍射及岩心物性等分析, 将英西地区 E_3^2 储层共划分出了 4 种成岩相: 成岩微裂缝相、溶蚀相、晶间孔相和压实致密相。

4.1. 成岩微裂缝相

构造作用对储层的控制主要表现之一为形成断裂和裂缝, 为流体提供运移通道和容纳空间, 同时为次生孔隙的形成和储层的渗透性创造了有利条件[10] [20]。成岩过程中形成的裂缝主要包括深埋持续压实或差异压实导致刚性颗粒边缘形成粒缘缝等微裂缝, 亦或者是成岩过程中矿物脱水形成成岩收缩缝等。需要说明的是, 此次划分成岩微裂缝相主要考虑到镜下观察到众多的成岩微裂缝(宽度通常小于 0.1 mm), 主要是由刚性颗粒的破裂而形成, 这里把颗粒的破裂作用当做一种广义的成岩作用考虑。

在压实胶结导致原生孔隙减少的背景下, 次生溶孔和微裂缝的发育最终决定了储层物性的好坏。英西地区 E_3^2 储层镜下观察均可见溶蚀缝和破裂缝两种成因类型, 包括深埋持续压实或差异压实作用形成沿晶粒和颗粒边缘分布的微裂缝, 或层间发育的一定量层间缝, 其大部分被溶蚀作用改造(图 7)。岩性由于以泥晶碳酸盐岩和泥岩为主, 因此微裂缝的存在可以有效作为流体的运移通道, 可能进一步被溶蚀形成溶蚀缝, 使得储层孔隙得以沟通, 渗透性进一步增强, 间接地控制了次生孔隙空间的形成和分布。矿物含量对微裂缝发育的控制主要体现于碳酸盐矿物有利于微裂缝的发育, 而碎屑和黏土矿物含量高时并不普遍发育微裂缝(图 8)。同时由于深埋藏过程中的持续压实及烃源岩的持续排烃作用, 也能产生一定量的微裂缝, 这对于沟通孔隙空间的流体, 提高储层渗流能力是非常有意义的。

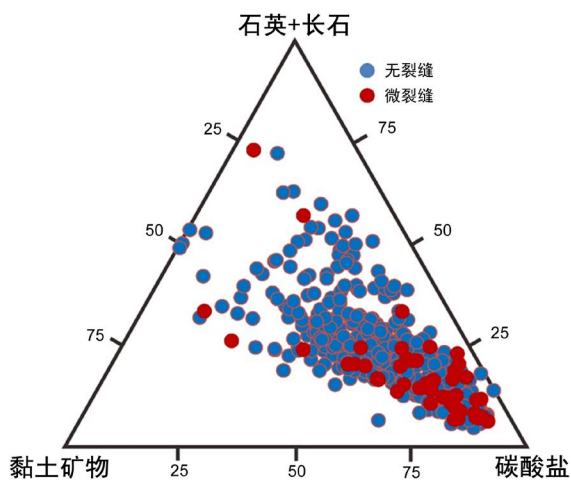


Figure 8. Relationship between microfracture and lithology of E_3^2 formation in Yingxi Area

图 8. 英西地区下干柴沟组上段储层微裂缝与岩性关系

此外, 英西地区微裂缝受胶结充填影响, 分为未充填、半充填和全充填三类, 不同充填类型的微裂缝其对储层孔渗具有明显不同的控制作用: 全充填微裂缝不能有效提高孔隙度和渗透率大小(图 7(b)); 半充填微裂缝能够有效提高孔隙度大小, 但对渗透率没有明显改善(图 6(a)); 未充填微裂缝中溶蚀缝能够明显提高储层孔隙度和渗透率大小(图 7(d)), 但破裂缝仅仅能够提高储层渗流能力, 其对储集能力贡献不大。

4.2. 溶蚀相

该成岩相即在压实背景下以白云质和膏质的溶蚀作用占优势,溶蚀对 E_3^2 储层物性来说是最主要的建设性成岩作用。英西地区储层虽然基质部分普遍具有低孔低渗的特点,但仍发育孔隙度相对较高的优质储层,这除了原生孔隙保存较好之外,另外一个原因就是溶蚀孔隙的贡献。虽然 E_3^2 处于半深湖-深湖沉积环境,但其中隆起地带在降雨量减少时可能暴露地表,此时地层遭受暴露改造,大孔洞能够在此条件下形成。事实上,大气淡水只能对距离地表一定范围之内的沉积物进行淋滤,这导致大气淡水中的 CO_2 对碳酸盐岩胶结物的改造有限[24][25]。但是由于英西地区储层微裂缝普遍发育,为流体提供了有利渗流通道,易于储层内部孔隙在成岩阶段进行溶蚀改造。因此,该溶蚀相发育层段如在裂缝发育的叠加作用下可形成裂缝性溶蚀孔隙型储层,也可作为主要的优质储集体发育层段。此外,不同矿物抗溶蚀能力也控制了溶蚀相的发育,含灰白云岩面孔率普遍高于混积白云岩,其中含泥白云岩面孔率最低(图 9),这也表明碳酸盐矿物含量越高越有利于溶蚀作用的发育。

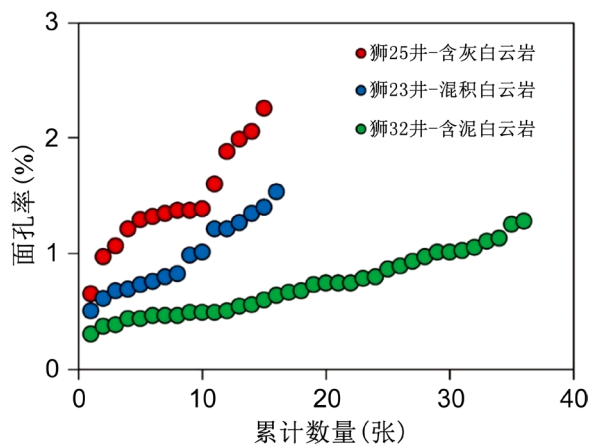


Figure 9. Relationship between surface porosity and lithology of E_3^2 formation in Yingxi Area

图 9. 英西地区下干柴沟组上段储层面孔率与岩性关系

4.3. 晶间孔相

英西地区 E_3^2 沉积时气候干燥,属于典型的干旱咸化环境,有利于蒸发泵作用的进行,该类白云岩一般为泥粉晶白云岩,晶粒细小,常含石膏或硬石膏夹层。这也决定了储层孔隙类型以弥散式分布的晶间孔为主,孔径虽小,但数量可观,能够提供足够的储集空间。从矿物含量与孔隙度相关性也可以看出,随着石英和长石含量的增加,孔隙度随之有明显的减小(图 10)。白云石含量的增高,明显有利于孔隙度的增大(图 11(a)),但随着方解石含量的增加,孔隙度便随之减小(图 11(b))。因此,研究区白云岩化作用既能形成大量的晶间孔,又能够提高储层岩石骨架颗粒的抗压实能力,在抑制机械压实作用进一步进行的同时改善了储集性能,也为后期溶蚀作用即次生溶孔的形成奠定了结构和物质基础。

4.4. 压实致密相

前已述及,英西地区 E_3^2 储层压实作用中等-强的原因与其特殊的成岩地质背景有关,英西地区古气候干旱咸化,导致了碳酸盐重结晶速率快、晶粒泥晶化,深湖-半深湖沉积环境致使泥质含量的偏高,抗压实能力弱。多数碳酸盐岩的原生孔隙经历压实作用后失去了储集性能,压实作用的发育对储层具有极大的负面影响。如图 12,粒度较细的部分其孔径大小明显小于粒度较粗的部分。因此,某些层段由于泥质含量高,或者颗粒粒度较细的原因,导致该类别沉积物抵抗压实作用程度的能力较弱,从而变得致密。

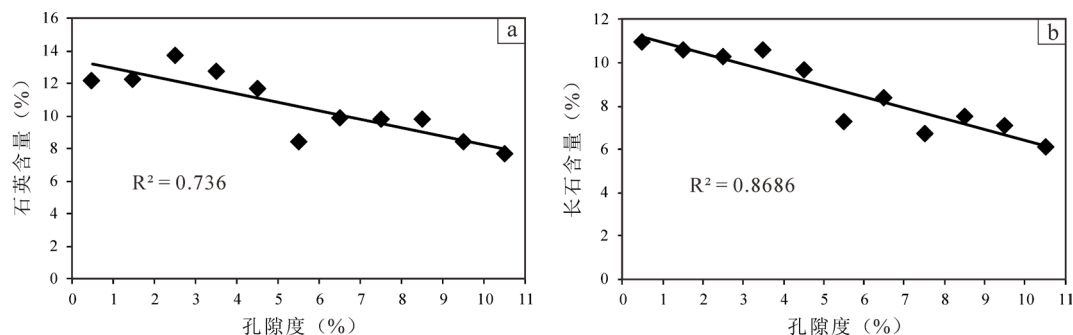


Figure 10. Relationship between porosity and debris content of E_3^2 formation in Yingxi Area

图 10. 英西地区下干柴沟组上段储层孔隙度与碎屑含量关系

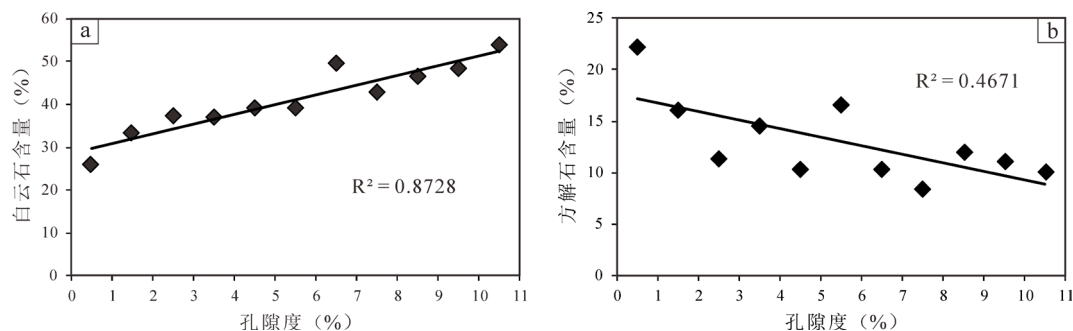


Figure 11. Relationship between porosity and carbonate content of E_3^2 formation in Yingxi Area

图 11. 英西地区下干柴沟组上段储层孔隙度与碳酸盐含量关系

4.5. 压实致密相

前已述及, 英西地区 E_3^2 储层压实作用中等 - 强的原因与其特殊的成岩地质背景有关, 英西地区古气候干旱咸化, 导致了碳酸盐重结晶速率快、晶粒泥晶化, 深湖 - 半深湖沉积环境致使泥质含量的偏高, 抗压能力弱。多数碳酸盐岩的原生孔隙经历压实作用后失去了储集性能, 压实作用的发育对储层具有极大的负面影响。如图 12, 粒度较细的部分其孔径大小明显小于粒度较粗的部分。因此, 某些层段由于泥质含量高, 或者颗粒粒度较细的原因, 导致该类别沉积物抵抗压实作用程度的能力较弱, 从而变得致密。

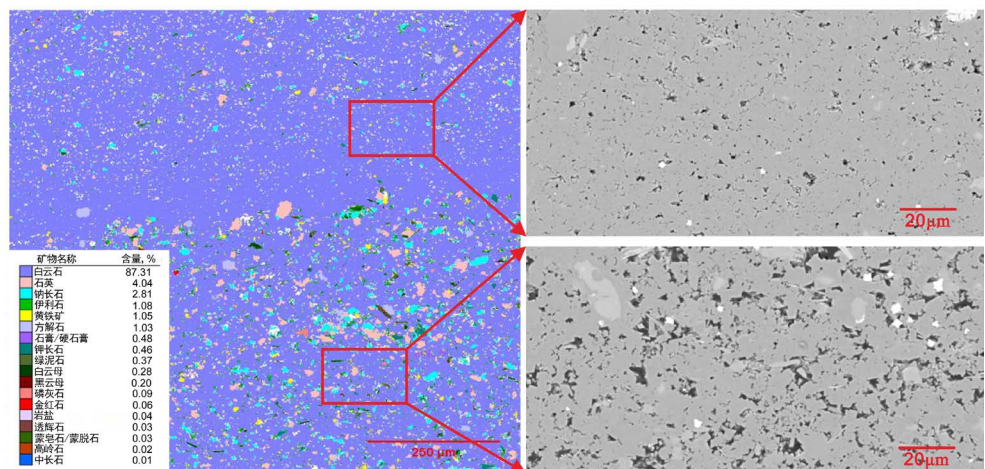


Figure 12. Relationship between particle size and pore size of E_3^2 formation in Yingxi Area

图 12. 英西地区下干柴沟组上段储层粒径与孔隙大小特征

此外, 沉积物虽然长期处于浅埋藏状态, 但后期的深埋作用对于沉积物的压实起了关键作用, 由于强烈的构造挤压产生的侧向应力也能使得沉积物压实致密, 或者沉积物分选差, 砂泥混杂, 成岩压实过程中泥质被压进入孔隙中, 从而导致其经历压实强度较强。从岩性三角图可以看出, 孔隙度较小的部分主要分布在泥质含量高的岩性中, 同时碎屑含量高的部分也存在部分孔隙度较低的情况(图 13)。因此该区目的层是沉积物颗粒粒度较细和泥质含量高的内在岩石学特征导致压实致密成岩相的形成, 该成岩相储层段一般物性较差或者不具备储层性能。

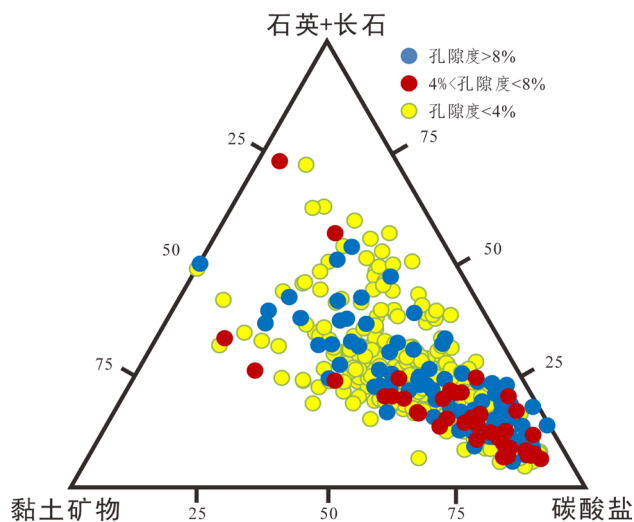


Figure 13. Relationship between porosity and lithology of E_3^2 formation in Yingxi Area
图 13. 英西地区下干柴沟组上段储层孔隙度与岩性关系

5. 储层成岩相测井定量表征

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, 同时混积岩储层由于其矿物成分复杂且随深度变化大, 造成经历不同成岩作用类型和强度的沉积物测井响应特征相同或者近似, 或者经历相同成岩作用的层段由于成岩矿物成分及含量不同造成其测井响应特征的明显差异, 这二者将增加测井识别成岩相的难度[10] [11]。本次研究考虑到英西地区 E_3^2 储层经历了复杂的成岩作用叠加, 各成岩作用的参数之间的差异较小, 且储层普遍同时具有强压实、钙质胶结程度高、微孔隙发育的特征, 在不同测井曲线上的响应特征不明显。因此, 以系统取心的狮 41-2 井为纽带, 根据深度归位后的岩心薄片资料刻度测井原则, 单井纵向剖析了各种成岩相类型在测井响应特征上的差别, 从而建立成岩相与测井信息之间的响应关系。由图 14 知, 成岩作用在测井特征上表现为: 成岩作用好到差, GR 有增高趋势, DEN 有增高趋势, 白云石含量减少, 黏土含量增加。

在明确不同类型成岩相在测井参数响应规律后, 通过岩心观察、铸体薄片和扫描电镜等资料划分 62 个样品点成岩相类型, 选取每点对应井深段常规测井参数中 GE 和 DEN, 岩性扫描测井中的白云石含量、黏土含量、石英含量及石膏含量作为测井刻度参数, 总结出了各类型成岩相测井参数分布规律。常规测井响应中, 成岩微裂缝相 GR 值最低, 压实致密相 GR 值最高, DEN 值溶蚀相最低、压实致密相最高(表 2)。岩性扫描测井中, 成岩微裂缝相、溶蚀相和晶间孔相中的石膏含量相差不大; 成岩微裂缝相的白云石含量平均值高达 0.53%, 而白云石含量最低的压实致密相平均值仅为 0.07%; 黏土矿物含量方面, 有利的成岩相其含量越低, 且四种成岩相之间含量差别较大; 石英含量方面, 溶蚀相中含量最高, 成岩微裂缝相与晶间孔相的石英含量居中且基本相等, 压实致密相中含量最小(表 2)。

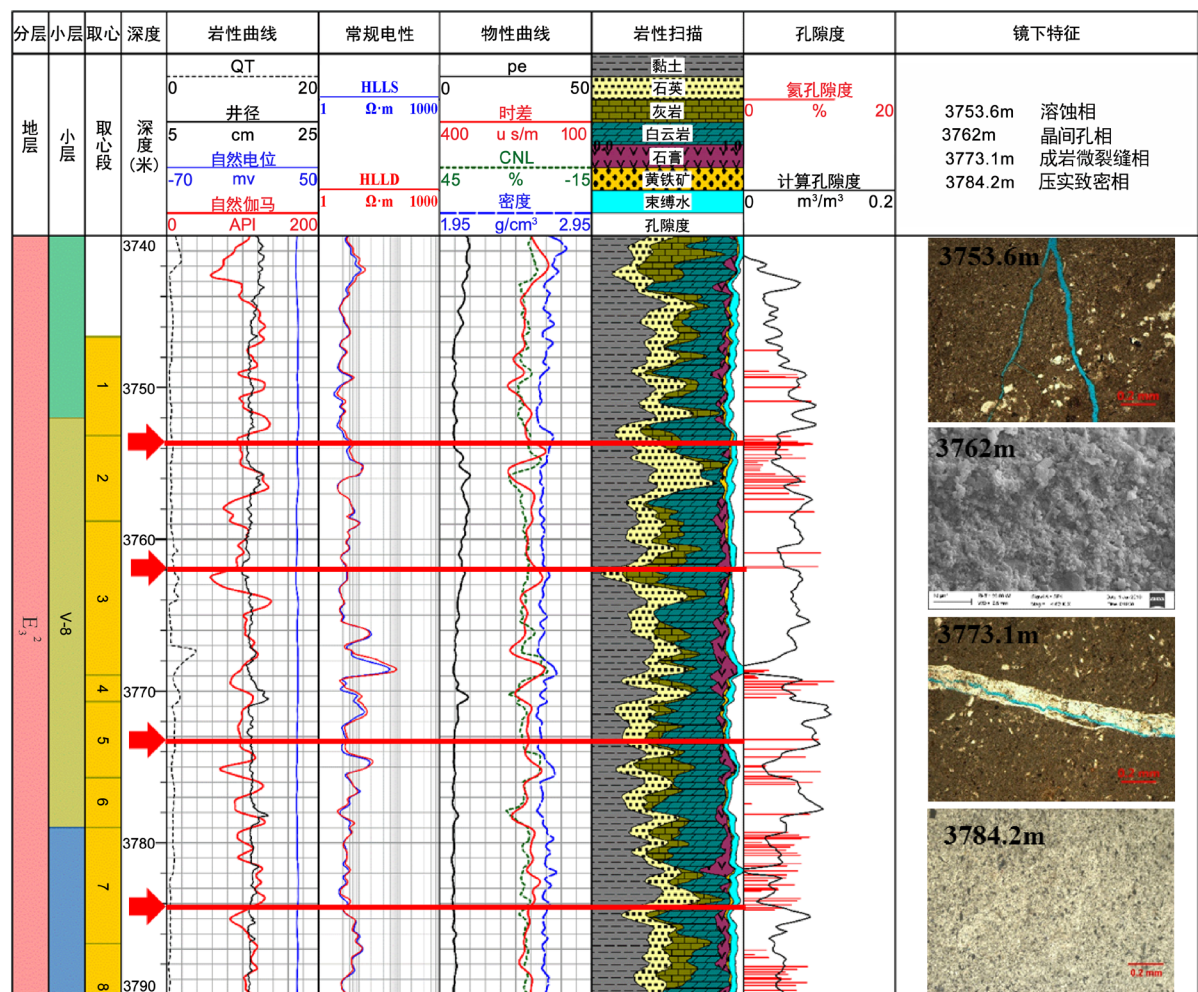


Figure 14. Log characteristics for diagenetic facies of E_3^2 formation in Yingxi Area

图 14. 英西地区下干柴沟组上段储层成岩相测井对应特征

Table 2. Statistical results of diagenetic facies logging response of E_3^2 formation in Yingxi Area

表 2. 英西地区下干柴沟组上段成岩相测井响应特征统计

成岩相类型	GR (API)	DEN (g/cm^3)	AN (%)	DOL (%)	ILL (%)	QUA (%)
成岩微裂缝相	86-113/72	2.24-2.74/2.59	0.02-0.07/0.05	0.26-0.66/0.53	0.01-0.13/0.07	0.12-0.43/0.18
溶蚀相	71-115/88	2.54-2.60/2.57	0.02-0.09/0.06	0.21-0.5/0.36	0.12-0.22/0.17	0.08-0.43/0.23
晶间孔相	79-120/90	2.51-2.81/2.68	0-0.15/0.07	0.18-0.4/0.24	0.19-0.37/0.28	0.06-0.28/0.17
压实致密相	80-129/97	2.58-2.84/2.71	0-0.55/0.15	0-0.1/0.07	0.13-0.66/0.36	0.01-0.16/0.09

注：“/”后为平均值。

基于以上成岩相在测井参数上的响应规律,运用主成分分析法,以 GR、DEN、AN、DOL、ILL 和 QUA 参数为基础,计算了 62 个样品点主成分 Z1 和 Z2,并根据类型不同依次投点建立成岩相测井识别图版(图 15)。其中主成分 Z1 和 Z2 可利用多元线性回归方法求得,该方法是寻求自变量与因变量之间的最优关系的一种数学方法,是根据已知的自变量 $X_1, X_2, \dots, X_P$ 和因变量 Y 的 N 组原始观测值,用最小二乘法计算回归系数的估值,建立回归方程[10]。回归的如下主成分计算公式(1)和(2):

$$Z1 = 15.86 - 4.82 * DEN - 0.032 * GR - 3.779 * AN + 2.58 * DOL - 4.66 * ILL + 4.647 * QUA \quad (1)$$

$$Z2 = 33.64 - 11.85 * DEN - 0.027 * GR + 1.43 * AN - 3.27 * DOL + 2.63 * ILL + 2.46 * QUA \quad (2)$$

(GR——伽马; DEN——密度; AN——石膏; DOL——白云石; ILL——黏土; QUA——石英)。

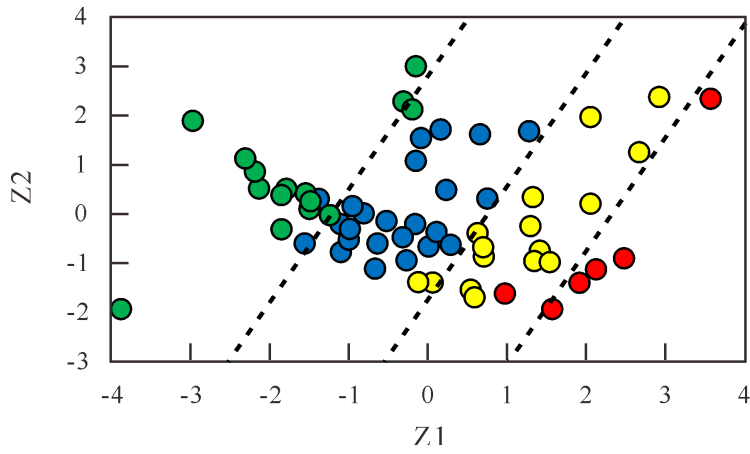


Figure 15. Log identification chart for diagenetic facies of E_3^2 formation in Yingxi Area
图 15. 英西地区下干柴沟组上段储层成岩相测井识别图版

一个地区的岩心薄片资料总是有限的,而测井资料一般较为丰富齐全,因此可在地质岩心薄片分析确定成岩相的基础上分析不同成岩相的测井曲线特征,确定常规通用的成岩相测井识别标准,从而有效评价成岩相[10][11]。图 16 为狮 41-2 井成岩相纵向连续识别结果,各类型成岩相与核磁共振测井结果匹配良好,同时单井纵向成岩相变化频率高,这与英西地区复杂的成岩过程有直接关系。根据成岩相类型与物性分析的匹配结果知,成岩微裂缝相常与构造裂缝相伴生,因此是主要的裂缝型“甜点”发育带,而在无构造裂缝的叠加作用时,溶蚀相物性最好。物性差层段一般裂缝不发育,或沉积相较差且成岩作用较强,形成压实致密成岩相。储层虽形成于有利的沉积微相带,但由于后期破坏性的成岩相如碳酸盐岩胶结作用,也导致其变得致密。

6. 结论

- 1) 英西地区 E_3^2 储层为咸化湖盆背景下的深湖 - 半深湖混积岩沉积,储层矿物有方解石、(铁)白云石、石英、长石、(硬)石膏、黄铁矿等。成岩作用类型有:压实作用、胶结作用、破裂作用和溶蚀作用,其中储集空间类型以晶间孔隙为主,伴有粒间孔隙、溶蚀孔隙和微裂缝的发育。孔隙度主要介于 4%~12%之间,平均值为 7.85%,渗透率普遍小于 1 mD,平均值为 0.469 mD。孔渗关系复杂,储层具备低孔、低渗的特点。
- 2) 储层白云石含量增加有利于孔隙度的增大,含砂或砂质灰云岩有利于微裂缝的发育,溶蚀作用多发育在碳酸盐矿物中,且多与溶蚀缝伴生,广泛发育的泥粉晶级别晶粒是导致储层致密的根本原因。根据矿物含量及成岩作用类型,将成岩相划分为 4 种类型:成岩微裂缝相、溶蚀相、晶间孔相和压实致密相。四种类型成岩相中压实致密相和晶间孔相广泛发育,成岩微裂缝相和溶蚀相为有利成岩相。

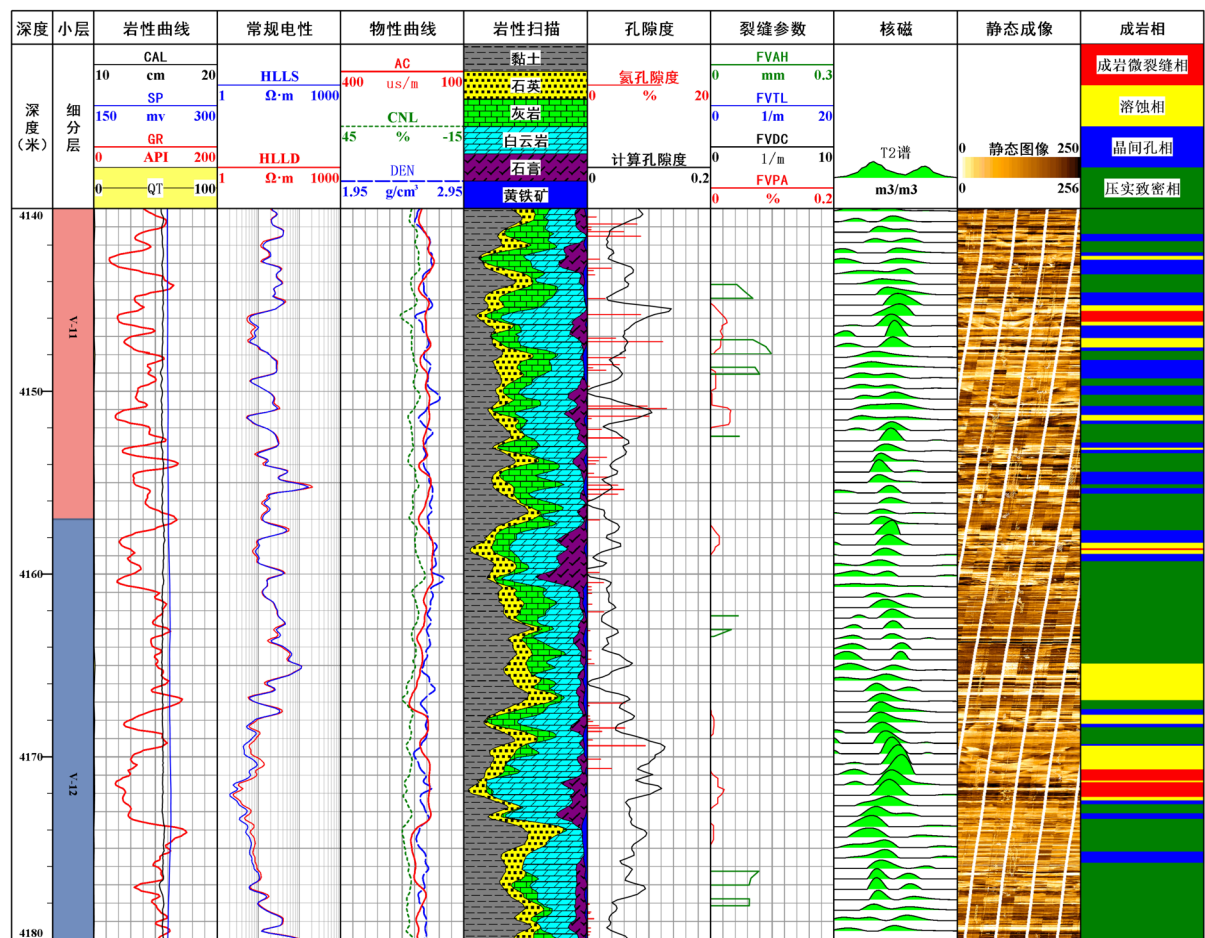


Figure 16. Log identification for diagenetic facies of well Shi41-2 of E₃² formation in Yingxi Area
图 16. 英西地区狮 41-2 井下干柴沟组上段成岩相测井连续识别

3) 基于测井对储层原始沉积矿物组分及成岩作用类型和强度的响应，通过挑选成岩相应敏感的测井参数，运用主成分分析法对储层成岩相进行了定量表征。其中，成岩微裂缝相具有低密度值、中自然伽马值、高碳酸盐矿物含量的特征，溶蚀相具有中密度值、低自然伽马值、高碳酸盐矿物含量的特征，晶间孔相具有中高密度值、中自然伽马值、中碎屑矿物含量的特征，压实致密相具有高密度值、高自然伽马值、高黏土矿物含量的特征。此外，英西地区复杂的成岩过程导致了单井纵向成岩相变化频率快，成岩微裂缝相常与构造裂缝伴生，因此是主要的裂缝型“甜点”发育带，而在无构造裂缝的叠加作用时，溶蚀相物性最好，压实致密成岩相物性最差。

基金项目

国家自然科学基金(41872133); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2016E-0108GF); 青海油田勘探事业部 2017 技术 05。

参考文献

[1] Anan, T.I. (2014) Facies Analysis and Sequence Stratigraphy of the Cenomanian-Turonian Mixed Siliciclastic-Carbonate Sediments in West Sinai, Egypt. *Sedimentary Geology*, **307**, 34-46.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2014.04.006>

- [2] Bernabéu, Á.P., Webster, J.M., Beaman, R.J., Reimer, P.J. and Renema, W. (2014) Filling the Gap: A 60 ky Record of Mixed Carbonate-Siliciclastic Turbidite Deposition from the Great Barrier Reef. *Marine and Petroleum Geology*, **50**, 40-50.
- [3] Coffey, B.P. and Sunde, R.F. (2014) Lithology-Based Sequence-Stratigraphic Framework of a Mixed Carbonate-Siliciclastic Succession, Lower Cretaceous, Atlantic Coastal Plain. *AAPG Bulletin*, **98**, 1599-1630.
<https://doi.org/10.1306/08211312087>
- [4] 袁剑英, 黄成刚, 夏青松, 等. 咸化湖盆碳酸盐岩储层特征及孔隙形成机理——以柴西地区始新统下干柴沟组为例[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 111-126.
- [5] 王越, 陈世悦, 张关龙, 等. 咸化湖盆混积岩分类与混积相带沉积相特征——以准噶尔盆地南缘芦苇沟组与吐哈盆地西北缘塔朗组为例[J]. 石油学报, 2017, 38(9): 1021-1035.
- [6] 杜金虎, 何海清, 杨涛, 等. 中国致密油勘探进展及面临的挑战[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(1): 1-9.
- [7] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-135.
- [8] 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): 173-185.
- [9] 崔玉峰. 致密砂岩储层成岩相测井定量表征方法及应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2017.
- [10] 冉冶, 王贵文, 赖锦, 等. 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[J]. 沉积学报, 2016, 34(4): 694-706.
- [11] 李国欣, 赵太平, 石玉江, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组碳酸盐岩储层成岩相测井识别评价[J]. 石油学报, 2018, 39(10): 1141-1154.
- [12] 夏志远, 刘占国, 李森明, 等. 岩盐成因与发育模式——以柴达木盆地英西地区古近系下干柴沟组为例[J]. 石油学报, 2017, 38(1): 54-65.
- [13] 张津宁, 张金功, 杨乾政, 等. 柴达木盆地西部膏盐岩发育特征与成因分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2016, 46(6): 867-875.
- [14] 苏妮娜, 金振奎, 宋璠, 等. 柴达木盆地古近系沉积相研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 2-7.
- [15] 黄成刚, 关新, 倪祥龙, 等. 柴达木盆地英西地区 E_3^2 咸化湖盆白云岩储集层特征及发育主控因素[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(2): 220-229.
- [16] 李海, 汤达祯, 许浩, 等. 柴达木盆地狮子沟油田古近系异常高压成[J]. 大庆石油地质与开发, 2013, 32(3): 29-34.
- [17] 韩天恒. 英雄岭构造带低-高构造格局、断裂特征及与油气藏关系研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2016.
- [18] 刘军, 刘成林, 董清源, 等. 柴达木盆地西部地区古近系-新近系天然气成藏期次研究[J]. 地学前缘, 2016, 23(5): 127-134.
- [19] 代全齐, 罗群, 张晨, 等. 基于核磁共振新参数的致密油砂岩储层孔隙结构特征——以鄂尔多斯盆地延长组7段为例[J]. 石油学报, 2016, 37(7): 887-897.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Kleipool, L.M., Reijmer, J.G., Badenas, B. and Aurell, M. (2015) Variations in Petrophysical Properties along a Mixed Siliciclastic Carbonate Ramp (Upper Jurassic, Ricla, NE Spain). *Marine and Petroleum Geology*, **68**, 158-177.
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.08.017>
- [24] 刘宝珺, 张锦泉. 沉积成岩作用[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 76-200.
- [25] Seyedmehdi, Z., George, A.D. and Tucker, M.E. (2016) Sequence Development of a Latest Devonian-Tournaisian Distally-Steeptened Mixed Carbonate-Siliciclastic Ramp, Canning Basin, Australia. *Sedimentary Geology*, **333**, 164-183.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.12.012>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/> 顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org