

巴楚地区东河塘组致密砂岩储层成岩相研究

彭 军¹, 吴慧明¹, 韩浩东¹, 杨素举², 张涵冰¹, 刘 露¹

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 中国石化 西北油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:根据沉积学和储层地质学原理和研究方法,利用岩石薄片和扫描电镜等测试分析资料,在储层岩石学和成岩作用特征研究的基础上,开展了巴楚地区东河塘组致密砂岩储层成岩相研究。研究认为,东河塘组储层发育6种成岩作用,以压实作用、胶结作用和溶蚀作用为主,成岩阶段为中成岩A-B期。根据视压实率、视胶结率、视溶蚀率及溶蚀量4个参数值和沥青充填情况,将东河塘组储层划分为中等压实中等胶结强溶蚀相(Ⅰ)、中等压实中等胶结中等溶蚀相(Ⅱ)和中等压实中等胶结弱溶蚀相(Ⅲ)等7种成岩相类型,其中Ⅰ—Ⅲ相为有利成岩相。利用测井资料,采用 k 最邻近分类算法对研究区17口井进行成岩相测井连续自动识别,得出东河塘组上砂岩段储层成岩相以Ⅵ相为主,有利成岩相主要分布在伽2—玉2—巴5井区和群6—BK8—BT4—KT1井区,下砂岩段储层成岩相以Ⅱ相为主,有利成岩相主要分布在伽2—群6—BK8—巴2—康1井区,比上砂岩段更发育。有利成岩相的研究,可为优质储层预测提供地质依据。

关键词:成岩相;成岩作用;致密砂岩;东河塘组;巴楚地区

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Study on diagenetic facies of the Donghetang tight sandstone reservoirs in Bachu area

Peng Jun¹, Wu Huiming¹, Han Haodong¹, Yang Suju², Zhang Hanbing¹, Liu Lu¹

(1. School of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. Exploration and Production Research Institute of Northwest Oilfield Branch Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Sedimentological principles and investigation approaches were combined with thin sections, scanning electron microscope data on the study of tight sandstone reservoir diagenetic facies in Donghetang formation, Bachu area. The result dictates that reservoirs of the formation were shaped by 6 diagenesis effects but only three of which, namely compaction, cementation and dissolution, had played most part. The Formation was determined to be in an A-B stage of middle diagenesis phase. Based on four parameters (apparent compaction rate, apparent cementation rate, apparent dissolution rate, amount of dissolution) and asphalt-filling of the formation, we recognized seven kinds of diagenetic facies in the formation contains, including medium compaction and cementation with strong dissolution facies (Ⅰ), medium compaction and cementation with medium dissolution facies (Ⅱ), medium compaction and cementation with weak dissolution facies (Ⅲ) and etc., among which, type I to Ⅲ are considered facies with exploration potentials. Relevant log data and the k -nearest neighbor classification method were also used to differentiate continuously and automatically the diagenetic facies of layers penetrated by 17 wells in the research area. The result shows that the upper Formation is dominated by type Ⅵ facies, with the most favorable facies occurring in Ga2-Yu2-Ba5 and Qun6-Bakai8-Batan4-Kangtan1 wellblocks, and the lower part is more developed than the upper one and dominated by type Ⅱ facies, with the most favorable facies occurring in Ga2-Qun6-Bakai8-Ba2-Kang1 wellblock. The study may serve as a geological basis for high-quality reservoir prediction.

Key words: diagenetic facies, diagenesis, tight sandstone, Donghetang Formation, Bachu area

成岩作用是储集层发育和形成的必经过程,对储层质量和非均质性具有很强的控制作用^[1-4]。在埋藏期,随温度、压力、流体等成岩介质条件的变化而呈现

出不同的成岩作用类型、成岩强度和成岩组合,而这些条件是改善或破坏储层物性的关键因素^[1-5]。成岩作用决定了成岩相的形成过程和最终定型^[2]。成岩相是

收稿日期:2015-10-20;修订日期:2016-03-08。

第一作者简介:彭军(1968—),男,博士、教授、博士生导师,沉积学、储层地质学及层序地层学。E-mail: pengjun@swpu.edu.cn。

通讯作者简介:吴慧明(1991—),男,硕士研究生,储层地质学。E-mail: whm3986@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05002-003)。

沉积物在特定的成岩环境下经由多种成岩作用和演化的综合产物,它包含岩石颗粒、胶结物、组成结构和孔洞缝特性及其演变的综合面貌,是表征储层性质、类型和好坏的成因性标志^[5-7]。对成岩相研究还存在争议,由于各种成岩相对应的形成机理复杂多样,还没有统一的概念和划分方法^[2,5]。前人主要依据沉积相、成岩矿物、成岩作用类型、成岩强度、孔隙类型及其对储层物性的影响进行成岩相类型的划分^[5-9]。

巴楚地区位于塔里木盆地的西部(图1),具多期断裂活动,区内构造复杂^[10-11]。近年勘探,在巴楚西部的泥盆系东河塘组中见良好的油气显示和工业油气流,说明东河塘组勘探潜力大^[11-12]。前人对研究区东河塘组的研究多集中在沉积特征、储层特征及非均质性、孔隙结构等方面,而对东河塘组砂岩成岩作用和成岩相的研究相对薄弱^[11-15]。本文主要依据岩石薄片、铸体薄片、扫描电镜、X-衍射等测试分析资料,分析了东河塘组储层特征和成岩作用特征,在此基础上重点对成岩相展开研究,依据成岩类型和成岩强度划分成岩相类型,并总结其特征。同时,建立成岩相的测井响应特征,探索利用测井资料来划分成岩相类型的方法,研究成岩相的时空分布并指出有利成岩相的分布

范围,为研究区油气勘探的有利目标预测提供坚实的地质依据。

1 储层基本特征

1.1 储层岩石学特征

研究区东河塘组砂岩储层发育3种岩石类型,即岩屑石英砂岩、石英砂岩和岩屑砂岩,以岩屑石英砂岩为主(图2)。储层碎屑成分以石英为主,平均含量为86%,其次是岩屑,平均含量为9.1%,以千枚岩岩屑和变质石英岩岩屑为主,长石含量最低,平均含量为2.4%,常见钾长石和斜长石,钾长石含量略高于斜长石(表1),镜下可见云母、电气石、锆石等重矿物,含量较少。总体上,东河塘组储层的成分成熟度较高。填隙物中杂基含量较低,平均为1.3%,且分布不均,以泥质和铁质为主。胶结物含量较高,平均为15.9%,以钙质矿物为主,硅质矿物和粘土矿物次之(表1)。粒度以中-细粒和细粒为主,分选性中等-好。磨圆度以次棱角状为主,次棱角状-次圆状次之。颗粒以点-线接触为主,线接触次之,具颗粒支撑结构。砂岩结构成熟度中等-高。

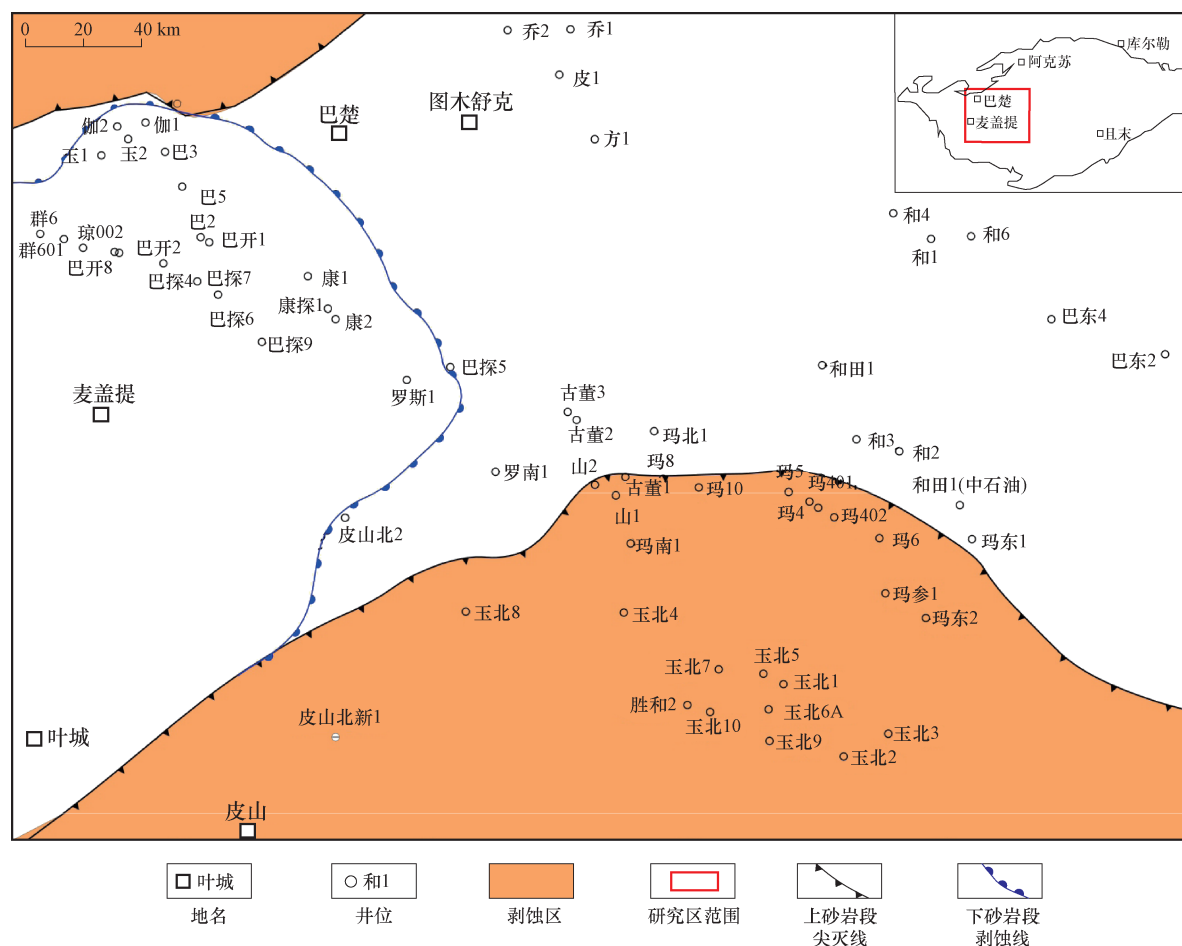


图1 巴楚-麦盖提地区地理位置及井位分布

Fig. 1 Map showing the geographic location of the Bachu-Maigaiti area and well locations

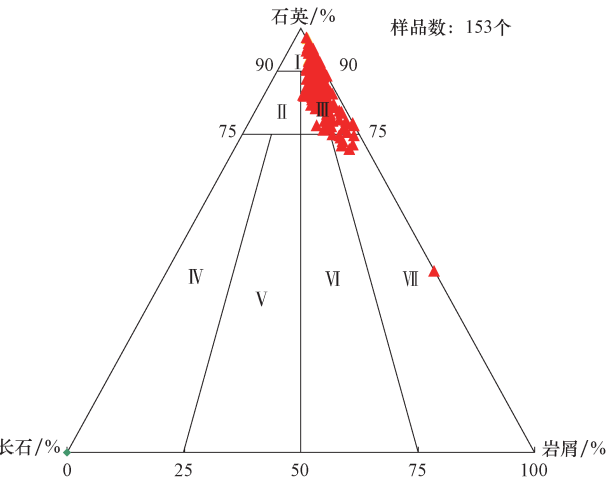


图 2 巴楚地区东河塘组储层砂岩类型
ig. 2 Sandstone types in the Donghetang reservoirs, Bachu area
I. 石英砂岩; II. 长石石英砂岩; III. 岩屑石英砂岩; IV. 长石砂岩;
V. 岩屑长石砂岩; VI. 长石岩屑砂岩; VII. 岩屑砂岩

1.2 储层物性及孔隙类型

研究区储层孔隙度平均为 5.56%, 渗透率平均为 $2.96 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于特低孔-特(超)低渗致密储层。储层中孔隙主要为残余原生粒间孔和次生溶孔。原生粒间孔是储层的主要储集空间, 占储集空间的 57%, 多为不规则的三角形或多边形(图 3e)。次生孔隙比较发育, 占储集空间的 43%。次生孔隙以粒间溶孔为主, 主要由杂基溶蚀和颗粒边缘溶蚀所形成, 大小约在 2~5 mm, 大多呈不规则状、港湾状分布(图 3a,b), 其次是粒内溶孔, 由不稳定长石及岩屑的粒内不完全溶蚀所形成, 直径较小, 在 0.5~1 mm, 大多呈不规则状(图 3a,b)。此外, 还发育少量铸模孔和微裂缝(图 3c,i)。

2 储层成岩作用类型及特征

研究区大量岩石薄片、铸体薄片和扫描电镜等资料分析表明, 东河塘组储层经历了 6 种成岩作用, 即压实作用、胶结作用、溶蚀作用、交代作用、油气充注和破裂作用, 以前 3 种成岩作用为主, 成岩阶段为中成岩 A-B 期。

压实作用对储层原生孔隙破坏较大, 整体属于中等压实, 表现为碎屑颗粒定向排列, 多呈点-线接触(图 3i), 或石英、长石等刚性矿物因受压出现裂纹(图 3f), 或塑性颗粒(软质岩屑、云母)压实变形。

胶结作用破坏了储层原生和次生孔隙, 发育钙质胶结、硅质胶结、粘土矿物胶结和硬石膏胶结等多种胶结, 其中以钙质胶结、硅质胶结和粘土矿物胶结最为普遍。钙质胶结发育两期: 早期方解石呈连晶胶结, 颗粒“悬浮”于胶结物中(图 3f), 形成于压实较弱的浅埋藏环境; 晚期方解石呈斑块状或晶粒状胶结, 以铁方解石、铁白云石为主(图 3g), 形成时间较晚。硅质胶结以 I-II 级的石英次生加大边和分布于孔隙边缘的自生石英颗粒产出为主(图 3e)。粘土矿物胶结以伊利石和伊/蒙混层为主, 多呈片状或丝缕状, 以颗粒包膜或衬垫式充填于粒间(图 3k,l)。

溶蚀作用对东河塘组储层的孔隙结构类型、孔隙大小以及储集性能有重要的促进作用, 以长石、岩屑、钙质胶结物溶蚀为主, 常形成粒间溶孔、粒内溶孔, 部分完全被溶蚀形成铸模孔(图 3a-c)。

3 成岩相类型划分及其特征

3.1 成岩相类型划分

为了定量表征压实作用、胶结作用和溶蚀作用的强度, 引入“视压实率、视胶结率和视溶蚀率”3 个参数^[16-19]。根据式(1)一式(3)计算出视压实率、视胶结率和视溶蚀率, 分别将压实作用、胶结作用和溶蚀作用定量划分为强、中、弱 3 个等级。为了更准确判断成岩强度, 又引入了颗粒接触关系、孔隙类型和溶蚀量 3 个参数来辅助判断压实和溶蚀作用强度(表 2)。

视压实率 = $\frac{\text{原始孔隙度} - \text{粒间体积}}{\text{原始孔隙度}} \times 100\%$ (1)

视胶结率 = $\frac{\text{胶结物体积}}{\text{胶结物体积} + \text{粒间孔体积}} \times 100\%$ (2)

视溶蚀率 = $\frac{\text{次生溶蚀面孔率}}{\text{总面孔率}} \times 100\%$ (3)

表 1 巴楚地区东河塘组储层碎屑成分及填隙物成分统计
Table 1 Statistics of detrital and interstitial matter component of the Donghetang Formation, Bachu area

取值参数	碎屑成分含量/%							填隙物成分含量/%						石英/(长石 + 岩屑)	样品数/个
	石英	长石		云母	岩屑			燧石	杂基	胶结物					
		钾长石	斜长石		沉积岩	变质岩	火成岩			方解石	白云石	伊利石	硅质		
最小值	43	0	0	0	0	2	0	0.5	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.75	155
最大值	95	4	4	6	42	11	4	4	41	43	3	9	6	37.5	
平均值	86	1.6	1.4	2	3.4	4.6	1.2	1.8	1.3	8.3	0.9	2.7	2.3	8.01	
		2.4			9.1					15.9					

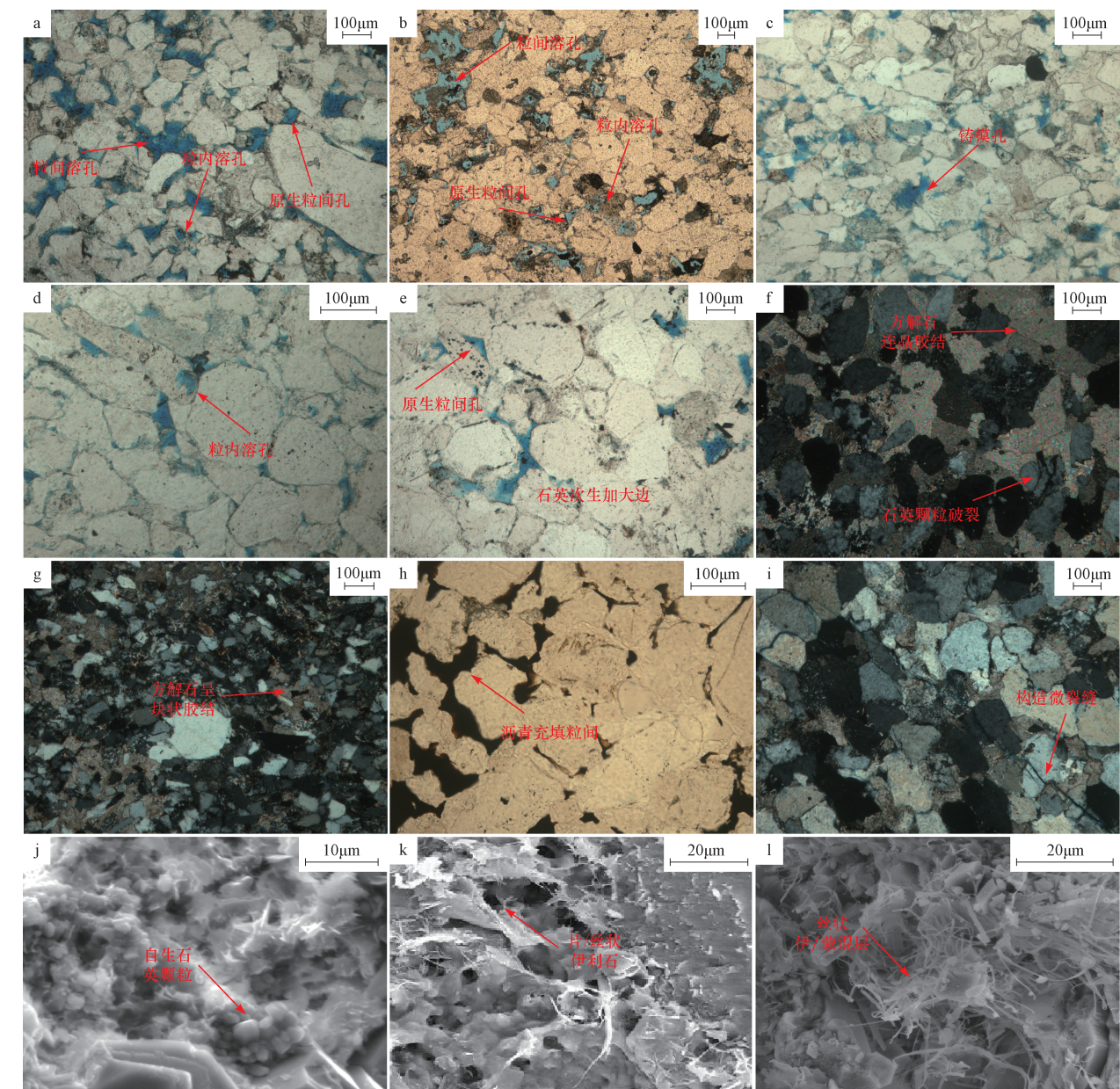


图3 巴楚地区东河塘组储层各成岩相类型显微特征

Fig.3 Diagenesis facies characteristics of reservoirs in the Dohetang Formation in Bachu area

a. 原生粒间孔和粒间溶孔非常发育,另见粒内溶孔和铸模孔,BK8井,埋深4 924.40 m, D_3d ;b. 粒间溶孔非常发育,另见粒内溶孔和铸模孔,KT1井,埋深2 188.65 m, D_3d ;c. 原生粒间孔和粒间溶孔较发育,BK9井,埋深4 959.69 m, D_3d ;d. 颗粒定向排列,呈线接触,见少量粒内、粒间溶孔,BK9H井,埋深4 961.49 m, D_3d ;e. 石英次生加大 I - II级,BT4井,埋深4 885.03 m, D_3d ;f. 方解石呈连晶胶结,或交代碎屑颗粒,石英颗粒破裂,BT4井,埋深4 882.5 m, D_3d ;g. 方解石呈块状胶结,BK8井,埋深4 971.44 m, D_3d ;h. 沥青充填在石英颗粒加大边之外的粒间孔中,玉2井,埋深3 655.17 m, D_3d ;i. 颗粒定向排列,呈点 - 线接触,构造微裂缝刺穿石英颗粒,BK8井,埋深4 922.65 m, D_3d ;j. 粒表分布自生石英颗粒,BK8井,埋深4 921.27 m, D_3d ,扫描电镜;k. 片状及丝状伊利石,BT5井,埋深2 544.54 m, D_3d ,扫描电镜;l. 丝缕状伊/蒙混层,玉2井,埋深3 731.90 m, D_3d ,扫描电镜

表2 压实作用、胶结作用和溶蚀作用的成岩强度划分标准

Table 2 Diagenesis intensity standard of compaction, cementation and dissolution

成岩强度	压实作用		胶结作用	溶蚀作用		
	视压实率/%	颗粒接触关系	视胶结率/%	视溶蚀率/%	溶蚀量/%	孔隙类型
强	>70	线 - 凹凸接触或线接触	>70	>60	>6	粒内、粒间溶孔与铸模孔
中等	30~70	点 - 线接触或线接触	30~70	25~60	3~6	直径小的粒内、粒间溶孔
弱	<30	点接触	<30	<25	<3	零星分布溶孔

根据成岩作用类型和成岩强度,本文共划分出了7种成岩相类型:中等压实中等胶结强溶蚀相(Ⅰ)、中等压实中等胶结中等溶蚀相(Ⅱ)、中等压实中等胶结弱溶蚀相(Ⅲ)、强压实中等胶结弱溶蚀相(Ⅳ)、弱压实强胶结弱溶蚀相(Ⅴ)、中等压实强胶结弱溶蚀相(Ⅵ)以及针对由于沥青部分或完全充填粒间孔而出现低孔-低渗或高孔-低渗的现象,单独划分出沥青充填相(Ⅶ)。

3.2 各成岩相类型特征

中等压实中等胶结强溶蚀相(Ⅰ):以岩屑石英砂岩为主,其次是石英砂岩。粒度为中-细粒,颗粒以点-线或线-点接触为主。视压实率平均为40.81%,压实程度中等。胶结物含量平均为8%,以钙质胶结为主,其次是硅质胶结,视胶结率平均为42.43%,胶结程度中等。压实作用和胶结作用不强,原生孔得以保存较多,具有较好的连通性,为流体的流动提供通道,促进溶蚀作用发生。次生粒间溶孔和粒内溶孔均较发育,局部发育少量铸模孔(图3a,b),溶蚀量平均为4.41%。该相的孔隙度平均为12.6%,渗透率平均为 $16.37 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是最有利的成岩相。

中等压实中等胶结中等溶蚀相(Ⅱ):以岩屑石英砂岩为主。粒度中-细粒或细粒,颗粒多呈点-线或线-点接触。视压实率平均为43.61%,视胶结率平均为50.53%。胶结物含量平均为9.64%,以钙质胶结和硅质胶结为主。压实和胶结程度均中等,但比Ⅰ相的程度强,原生孔隙保存和连通性较好。视溶蚀率平均为46.97%,溶蚀量平均为3.46%,以次生粒间溶孔和粒内溶孔为主(图3c)。该相的孔隙度平均为8.2%,渗透率平均为 $2.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是有利的成岩相。

中等压实中等胶结弱溶蚀相(Ⅲ):以岩屑石英砂岩为主,石英砂岩次之。粒度为细-极细粒或中-细粒,颗粒以点-线或线-点接触为主。视压实率平均为49.91%,视胶结率平均为59.43%,视溶蚀率平均为38.87%,溶蚀量平均为1.73%。压实作用和胶结作用强度中等,比Ⅰ相、Ⅱ相的程度强,保留部分原生孔,而溶蚀作用相对较弱。胶结物含量平均为9.64%,以钙质和粘土矿物胶结物为主,硅质胶结物次之。粘土矿物以伊利石和伊/蒙混层为主,充填粒间或附着颗粒表面,降低了孔隙度和连通性,不利于溶蚀作用(图3d)。该相孔隙度平均为6.03%,渗透率平均为 $0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是较有利的成岩相。

强压实中等胶结弱溶蚀相(Ⅳ):以石英砂岩为主。分选较好,粒度为细-中粒,颗粒呈线接触。视压实率平均为72.27%,压实作用强,储层原生粒间孔隙

保存较少。视胶结率平均为64.29%,胶结物含量平均为7.04%,以硅质胶结物为主,使孔隙进一步堵塞(图3e),导致溶蚀作用较弱。视溶蚀率平均为37.05%,溶蚀量平均为1.13%。强烈的压实作用和硅质胶结作用是储层致密的主要原因。该相的孔隙度平均为4.5%,渗透率平均为 $0.76 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是不利储层发育的成岩相。

弱压实强胶结弱溶蚀相(Ⅴ):以岩屑砂岩为主。分选中等,粒度为细粒,颗粒呈点-线接触。视压实率平均为23.94%,压实作用程度较弱。而胶结作用强,胶结物含量平均为25.9%,主要发育钙质胶结,含量最高为43%,平均为22.3%。方解石呈连晶胶结,使颗粒呈“悬浮”状(图3f),有较强的抗压能力,交代部分碎屑颗粒,导致溶蚀作用较弱,储层原生孔隙和次生孔隙均不发育,是储层致密的主要原因。该相的孔隙度平均为3.2%,渗透率平均为 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是不利储层发育的成岩相。

中等压实强胶结弱溶蚀相(Ⅵ):以岩屑石英砂岩为主,其次是石英砂岩。分选中等-好,粒度中-细粒,颗粒呈点-线接触。视压实率平均为44.17%,压实作用中等。视胶结率平均为87.58%,胶结物平均含量15.14%,以碳酸盐胶结物为主。方解石呈块状胶结,其次是硅质和粘土矿物胶结,堵塞孔隙,使储层致密,流体流动不畅通。溶蚀量平均为0.79%,视溶蚀率平均为40.36%,溶蚀作用弱(图3g)。该相的孔隙度平均为3.99%,渗透率平均为 $0.09 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,也是不利储层发育的成岩相。

沥青充填相(Ⅶ):镜下观察发现沥青完全或部分充填粒间孔和粒内溶孔。当沥青完全充填孔隙时,储层孔隙度和渗透率均很低(图3h),当沥青部分充填孔隙时,由于沥青附着在颗粒边缘,导致储层的孔隙度高,而渗透率极低(图3i)。该相的有机质含量较高,平均为11.45%,主要发育在岩屑石英砂岩中,压实和胶结程度弱-中等,孔隙度平均为4.86%,渗透率平均为 $0.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

上述各成岩相类型特征研究表明:Ⅰ相物性最好,是最有利的成岩相;Ⅱ相物性较好,是有利的成岩相;Ⅲ相物性中等,是较有利的成岩相;Ⅳ—Ⅵ相物性较差,是非有利成岩相(表3;图4)。

4 成岩相测井自动识别

4.1 成岩相测井响应特征

由于取心资料有限,根据岩石薄片所划分的成岩相在垂向上分布不连续,因此需要利用垂向上连续性好的测井资料来开展成岩相研究。不同成岩相在岩石

表 3 巴楚地区东河塘组储层各成岩相类型岩性、成岩强度和物性参数统计

Table 3 Statistics of lithology ,properties ,and diagenetic intensity of various diagenetic facies in Donghetang reservoirs ,Bachu area

成岩相	岩性	视压实率/%	视胶结率/%	视溶蚀率/%	溶蚀量/%	孔隙度/%	渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	样品数/ 个
I :中等压实中等胶结强溶蚀相	以岩屑石英砂岩为主,石英砂岩次之	21.85 ~ 57.52 40.81	30.77 ~ 54.05 42.43	15.29 ~ 100 46.45	2.00 ~ 8.00 5.36	8.30 ~ 16.20 12.60	0.13 ~ 71.30 16.37	11
II :中等压实中等胶结中等溶蚀相	岩屑石英砂岩	11.12 ~ 67.21 43.61	24.24 ~ 84.11 50.53	16.67 ~ 95.24 46.97	1.00 ~ 7.00 3.46	4.50 ~ 13.00 8.20	0.06 ~ 59.40 2.35	41
III :中等压实中等胶结弱溶蚀相	以岩屑石英砂岩为主,石英砂岩次之	17.25 ~ 68.85 49.91	32.43 ~ 81.48 59.43	0 ~ 83.33 34.43	0 ~ 3.50 1.73	2.00 ~ 9.43 6.03	0.03 ~ 0.99 0.25	18
IV :强压实中等胶结弱溶蚀相	石英砂岩	63.18 ~ 85.84 72.27	46.15 ~ 100 64.29	16.67 ~ 100 37.05	0 ~ 3.00 1.13	2.10 ~ 8.50 4.50	0.04 ~ 6.57 0.76	12
V :弱压实强胶结弱溶蚀相	岩屑石英砂岩	12.21 ~ 29.51 23.94	57.14 ~ 100 82.74	0 ~ 45.45 8.65	0 ~ 2.50 0.43	0.20 ~ 6.40 3.20	0.01 ~ 1.36 0.20	15
VI :中等压实强胶结弱溶蚀相	以岩屑石英砂岩为主,石英砂岩次之	1.93 ~ 66.29 44.17	60.61 ~ 100 87.58	0 ~ 100 40.36	0 ~ 3.50 0.79	1.50 ~ 6.70 3.99	0.01 ~ 0.32 0.09	40
VII :沥青充填相	以岩屑石英砂岩为主,石英砂岩次之	8.06 ~ 47.90 30.75	25.00 ~ 100 55.10	0 ~ 100 29.00	1.00 ~ 4.40 0.40	0.50 ~ 7.50 4.86	0.02 ~ 0.59 0.18	14

注:表中数据为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

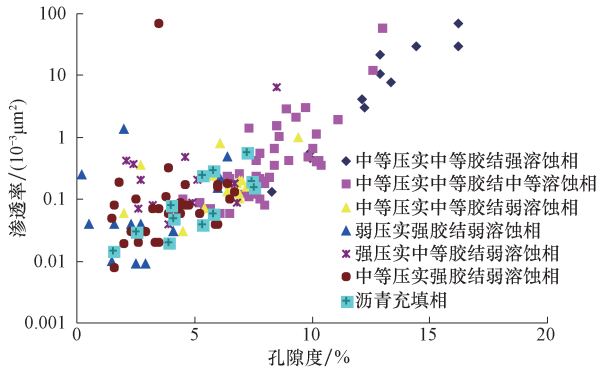


图 4 巴楚地区东河塘组储层不同成岩相类型
孔隙度 - 渗透率关系

Fig. 4 Crossplot of porosity and permeability for various diagenetic facies of reservoirs in the Donghetang Formation ,Bachu area

结构、成分和物性上的差异,表现在地层波速、密度、放射性及电阻率等物理性质的变化上,导致了它们在测井曲线上具有不同的响应特征^[20]。本文选取了对成岩相较敏感的中子(CNL)、密度(DEN)、声波时差(AC)、自然伽马(GR)和深、浅侧向电阻率(RD,RS)6条常规测井曲线^[8,21],依据岩石薄片划分的成岩相类型,在取心段建立各成岩相的测井响应特征。首先,利用声波时差分别与浅侧向电阻率、中子和自然伽马曲线交会区分中等压实中等胶结强溶蚀相、中等压实中等胶结中等溶蚀相、中等压实强胶结弱溶蚀相和强压实中等胶结弱溶蚀相(图 5a—c)。其次,利用声波时差与密度曲线交会区分中等压实中等胶结中等溶蚀相和中等压实中等胶结弱溶蚀相(图 5d)。最后,利用自

然伽马与深侧向电阻率曲线区分中等压实中等胶结中等溶蚀相、弱压实强胶结弱溶蚀相和沥青充填相(图 5e)。由此,建立各成岩相的测井曲线特征(表 4)。

虽然各类成岩相的测井响应值存在一定差异,但部分测井值之间还是会存在重叠及交叉现象。蜘蛛图是以能够反映相特征的各测井参数值作为辐射轴,以不同成岩相之间的差别为依据,从而以图形区分不同成岩相^[7]。根据图 5f 可以定性区分出各成岩相: I—III 相在 AC 曲线上表现出高值,在 RD, RS, DEN 和 CNL 曲线上表现出低值,反映了其物性相对较好; IV—VII 相表现相反。

4.2 成岩相测井自动识别

在总结各成岩相测井曲线响应特征的基础上,采用 k 最邻近分类(k -nearest neighbor classification)算法^[22-24],将岩石薄片划分的各类成岩相对应的测井参数值作为训练样本,对研究区东河塘组储层成岩相进行纵向连续自动识别。该算法的思想是:计算待划分样本与已知成岩相样本的距离或相似度,找到距离或相似度与待划分样本最近的 k 个邻居;然后,根据这些邻居所属的成岩相类型来判断待划分样本的类别。如果待划分样本的 k 个邻居大都属于同一个成岩相类型,那么待划分样本也属于这个成岩相类型;否则,对每个候选类别进行评分,按照某种规则来确定待划分样本的类别^[23]。 k 最邻近分类算法适用于类域较差或重叠较多的待分类样本集。巴楚地区东河塘组储层各

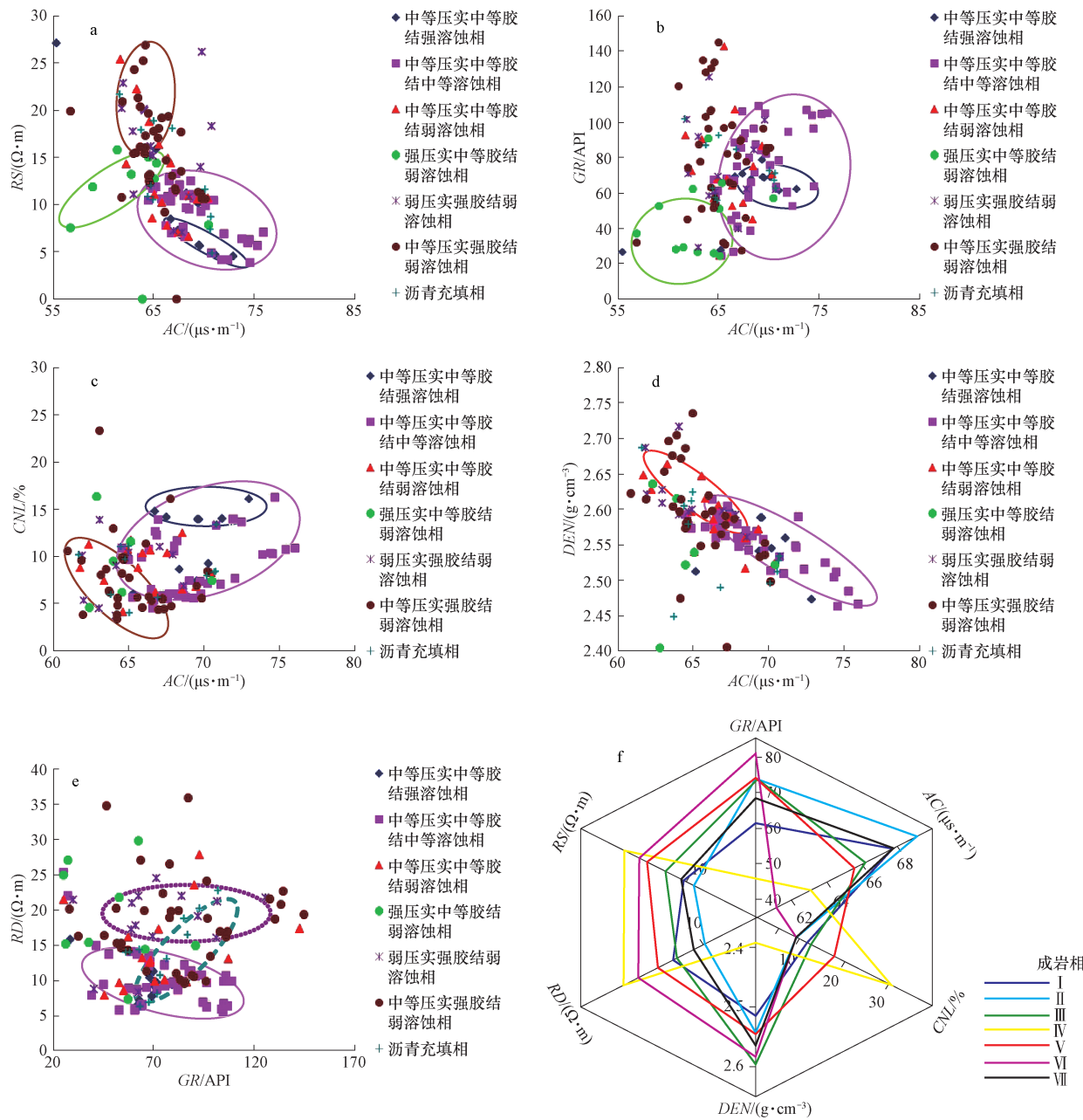


图5 巴楚地区东河塘组储层各成岩相测井参数交会图

Fig. 5 Logging responses of diagenetic facies of the Donghetang Formation, Bachu area

a. AC - RS 交会图; b. AC - GR 交会图; c. AC - CNL 交会图; d. AC - DEN 交会图; e. GR - RD 交会图; f. 各成岩相测井参数蜘蛛图
(AC, DEN, CNL, GR, RD, RS 分别代表声波时差、密度、中子、自然伽马和深、浅侧向电阻率测井值。)

表4 巴楚地区东河塘组储层各成岩相测井响应特征

Table 4 Logging responses of diagenetic facies of the Donghetang Formation, Bachu area

成岩相	$AC/(\mu s \cdot m^{-1})$	$DEN/(g \cdot cm^{-3})$	$CNL/\%$	GR/API	$RD/(\Omega \cdot m)$	$RS/(\Omega \cdot m)$
I: 中等压实中等胶结强溶蚀相	>67	2.13 ~ 2.60	7.38 ~ 16.01	60 ~ 80	6 ~ 16	4 ~ 12
II: 中等压实中等胶结中等溶蚀相	>65	2.39 ~ 2.60	4.55 ~ 16.26	40 ~ 110	5 ~ 25	4 ~ 13
III: 中等压实中等胶结弱溶蚀相	>65	2.52 ~ 2.78	4.14 ~ 12.47	45 ~ 95	7 ~ 23	6 ~ 25
IV: 强压实中等胶结弱溶蚀相	<65	2.08 ~ 2.64	4.61 ~ 11.59	25 ~ 90	>14	<15
V: 弱压实强胶结弱溶蚀相	61 ~ 70	2.17 ~ 2.72	3.39 ~ 10.99	40 ~ 100	15 ~ 25	7 ~ 26
VI: 中等压实强胶结弱溶蚀相	61 ~ 70	2.04 ~ 2.85	3.38 ~ 12.96	45 ~ 105	>9	9 ~ 27
VII: 沥青充填相	61 ~ 70	2.45 ~ 2.85	4.01 ~ 11.05	56 ~ 100	6 ~ 23	7 ~ 22

注: AC, DEN, CNL, GR, RD, RS 分别代表声波时差、密度、中子、自然伽马和深、浅侧向电阻率测井值。

类成岩相的测井参数之间存在明显的交叉重叠(图 5a—e),该算法正适用于该类决策分类。具体算法流程为^[24]:

1) 根据已知成岩相分类及其对应的测井响应值,生成训练样本集。

2) 求解待判别点与训练样本集中每个测井响应值样本的相似度,求解公式为:

$$S(\mathbf{d}_i, \mathbf{d}_j) = \frac{\sum_{k=1}^M (S_{ik} S_{jk})}{\sqrt{\sum_{k=1}^M S_{ik}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^M S_{jk}^2}} \quad (4)$$

式中: $S(\mathbf{d}_i, \mathbf{d}_j)$ 为相似度; $\mathbf{d}_i$ 为未知样本的测井响应值组成的向量; $\mathbf{d}_j$ 为第 j 个训练样本的测井响应特征向量; M 为特征向量的维数; S_{ik}, S_{jk} 分别为对应向量的第 k 维。

3) 计算待分类点在已知分类样本集中每类的权重,计算公式为:

$$p(\mathbf{d}_i, C_j) = \sum_{\mathbf{d}_j \in D} [S(\mathbf{d}_i, \mathbf{d}_j) y(\mathbf{d}_j, C_j)] \quad (5)$$

式中: $p(\mathbf{d}_i, C_j)$ 为权重; C_j 为类别,若 $\mathbf{d}_i$ 属于类 C_j ,那么函数值为 1,否则为 0; D 为样本集; $y(\mathbf{d}_j, C_j)$ 为类别属性函数。

4) 根据计算的权重,将未知样本划分为权重最大的已知成岩相类别。

根据上述方法,对巴楚地区 17 口井的东河塘组储层开展了成岩相的测井自动识别,以 BK8 井为例,结果如图 6 所示。

5 成岩相分布特征

5.1 成岩相纵向分布特征

统计研究区各井成岩相的测井自动识别结果,可知研究区东河塘组上砂岩段储层主要发育中等压实强胶结弱溶蚀相(Ⅵ相),其次是弱压实强胶结弱溶蚀相(Ⅴ相)和强压实中等胶结弱溶蚀相(Ⅳ相)。下砂岩段储层以中等压实中等胶结中等溶蚀相(Ⅱ相)为主,其次是中等压实中等胶结弱溶蚀相(Ⅲ相)和中等压实强胶结弱溶蚀相(Ⅵ相)。分析表明:有利成岩相(Ⅰ—Ⅲ相)主要发育在下砂岩段,对应的储层物性、油气显示、试油和测井解释结论结果都较好,说明储层的储集空间发育和物性明显受成岩相控制。以 BK8 井为例,在下砂岩段埋深 4 950.5 ~ 4 954.5, 4 956.0 ~ 4 960.5 及 4 991.5 ~ 4 999.5 m 段(图 6b),发育Ⅰ—Ⅲ相,对应的孔隙度为 13.62%,渗透率为 $32.48 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,试油结论为油层,油气显示为油浸、油斑,具有良好的匹配关系。

5.2 成岩相平面分布特征

在纵向成岩相类型划分的基础上,统计各井的优势成岩相类型,以研究区东河塘组的沉积相、孔隙度的平面分布为控制,得出了东河塘组储层成岩相在平面上的展布规律(图 7)。研究结果表明:

1) 上砂岩段储层成岩相平面上主要发育Ⅳ相和Ⅵ相。有利成岩相分布在研究区的西北地区,玉 2—巴 3 井区和 BT6—康探 1 井区分布Ⅰ相,群 6—BK8 井区和伽 1—伽 2—巴 5 井区分布Ⅱ相, BT7—BT4 井区分布Ⅲ相(图 7a)。

2) 下砂岩段砂体因剥蚀而仅分布在研究区西部,成岩相平面上主要发育Ⅱ相和Ⅲ相。有利成岩相发育更广泛,玉 1—玉 2—巴 3 井区分布Ⅰ相,伽 1—群 6—BK8—BT7—巴 2—康探 1 井区分布Ⅱ相, BT6 井区分布Ⅲ相(图 7b)。

3) 对比上、下砂岩段储层成岩相平面分布图,发现下砂岩段储层有利成岩相更加发育。

上述研究表明,有利成岩相的分布区就是油气产层、优质储层发育区,也是滚动勘探有利储层预测的目标区。因此,通过对有利成岩相的时空分布研究,可为研究区优质储层预测提供坚实可靠的地质依据。

6 结论

1) 根据不同成岩类型、成岩强度组合及沥青充填情况,将巴楚区东河塘组储层划分为 7 种成岩相类型:中等压实中等胶结强溶蚀相(Ⅰ)、中等压实中等胶结中等溶蚀相(Ⅱ)、中等压实中等胶结弱溶蚀相(Ⅲ)、强压实中等胶结弱溶蚀相(Ⅳ)、弱压实强胶结弱溶蚀相(Ⅴ)、中等压实强胶结弱溶蚀相(Ⅵ)和沥青充填相(Ⅶ)。Ⅰ—Ⅲ相物性好,为有利成岩相,Ⅳ—Ⅵ相物性较差,为不利成岩相。

2) 利用适用于类别交叉重叠情况下的 k 最邻近分类算法进行成岩相测井自动识别,能够获取可靠的结果。测井自动识别巴楚地区东河塘组储层各类成岩相,与对应的储层物性、油气显示、试油和测井解释结论都具有良好的匹配关系,验证了结果的可靠性。

3) 纵向上,巴楚地区东河塘组上砂岩段储层以Ⅵ相为主,下砂岩段储层以Ⅱ相为主。平面上,上砂岩段储层在玉 2—巴 3 井区和 BT6—康探 1 井区分布Ⅰ相,群 6—BK8 井区和伽 1—伽 2—巴 5 井区分布Ⅱ相, BT7—BT4 井区分布Ⅲ相。下砂岩段储层在玉 1—玉 2—巴 3 井区分布Ⅰ相,伽 1—群 6—BK8—BT7—巴 2—康探 1 井区分布Ⅱ相, BT6 井区分布Ⅲ相。其中,

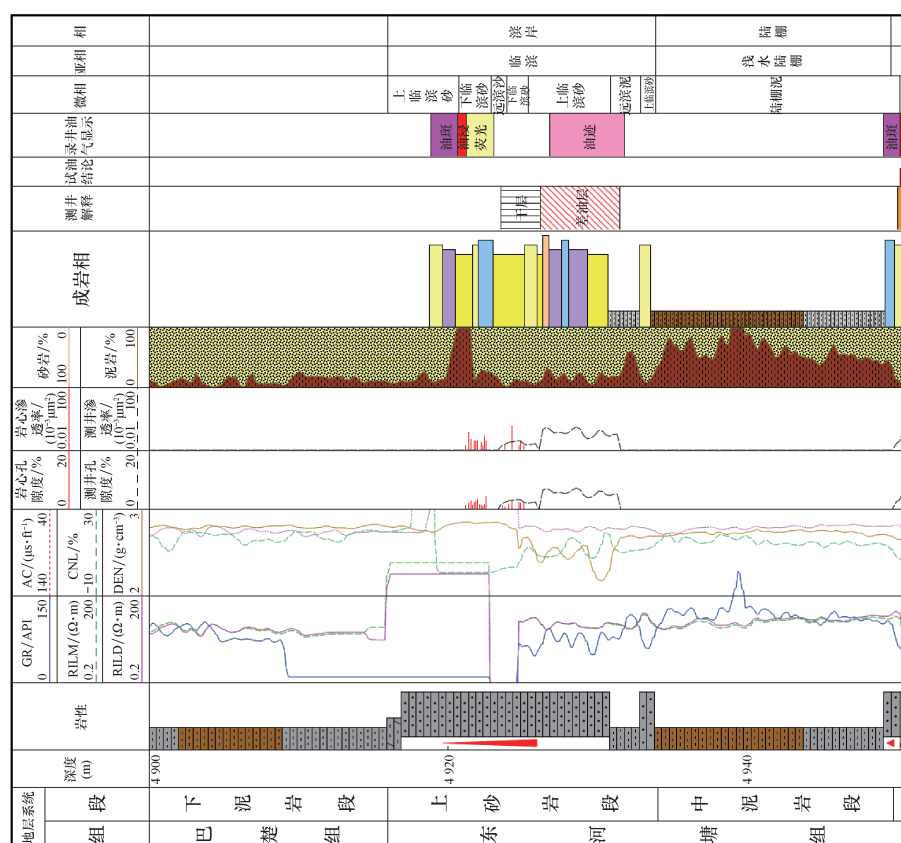
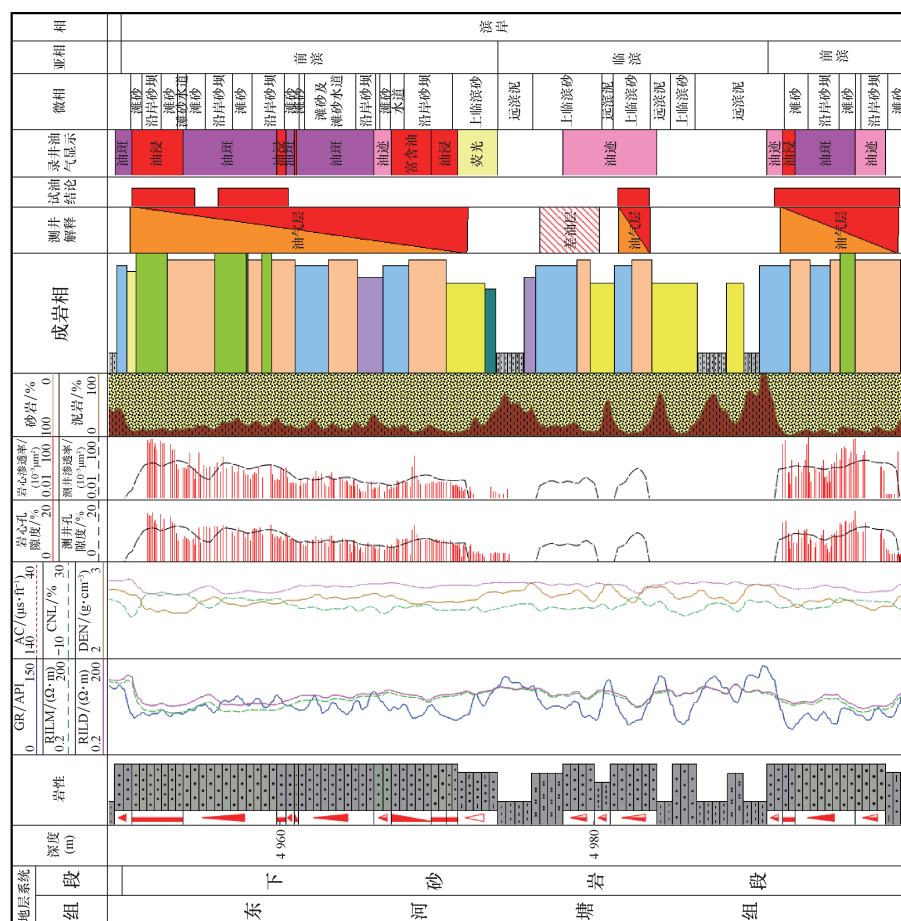


图6 巴楚地区BK8井东塘组储层成岩相测井自动识别结果

Cognition results of diagenetic facies for the Donghetang Formation

Fig.6 Automatic logging recognition

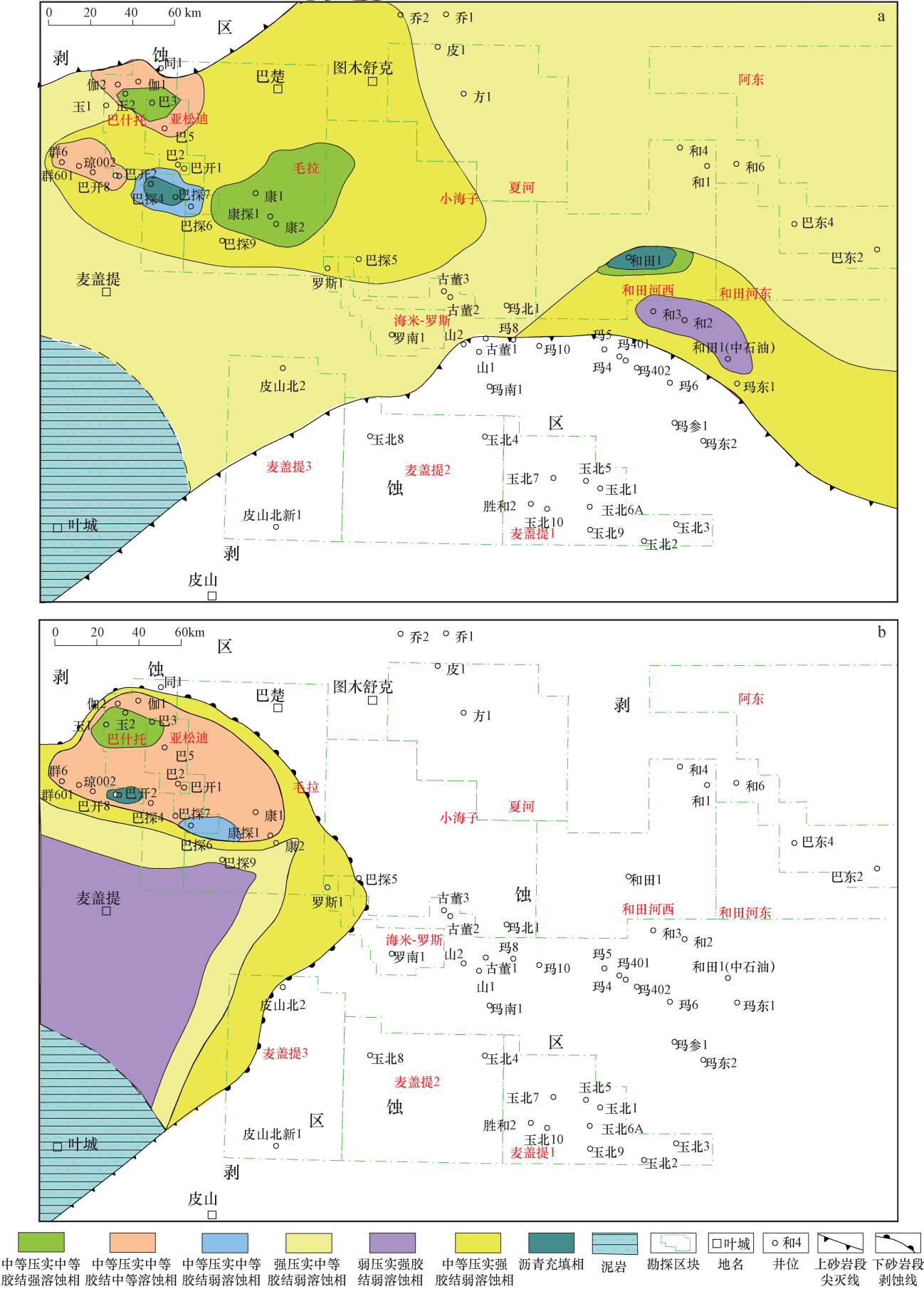


图 7 巴楚地区东河塘组储层成岩相平面展布

Fig. 7 Diagenetic facies plane distribution of the Donghetang Formation in Bachu area

a. 上砂岩段储层成岩相平面展布; b. 下砂岩段储层成岩相平面展布

下砂岩段储层的有利成岩相更加发育。

4) 有利成岩相的分布区就是有利储层预测的目标区。通过对有利成岩相的时空分布研究,可为优质储层预测提供地质依据。

参 考 文 献

- [1] 霍磊,孙卫,李长政,等.安塞砖窑湾地区长6₁储层成岩作用及成岩相特征研究[J].延安大学学报(自然科学版),2014,33(4):45-50.
Huo Lei, Sun Wei, Li Changzheng, et al. Study on characteristics of the Chang 6₁ reservoir diagenesis and diagenetic facies in Zhuan-yao-wan-Ansai area[J]. Journal of Yanan University(Natural Science Edition), 2014, 33(4): 45-50.
- [2] 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.
- [3] Morad S, Al-Ramadan K, 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.
- [4] 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.
- [5] 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):509-530.
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): 509-530.
- [6] 白烨,薛林福,石玉江,等.测井成岩相自动识别及其在鄂尔多斯盆地苏里格地区的应用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(1):35-41.
Bai Ye, Xue Linfu, Shi Jiangyu, et al. An automatic identification method of log diagenetic facies and its application in Sulige area, Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition), 2013, 37(1): 35-41.
- [7] 赖锦,王贵文,陈阳阳,等.川中蓬莱地区须家河组须二段储层成岩相与优质储集层预测[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(2):432-455.
Lai Jin, Wang Guiwen, Chen Yangyang, et al. Diagenetic facies and prediction of high quality reservoir of Member 2 of Xujiahe Formation in Penglai area, central Sichuan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(2): 432-455.
- [8] 赖锦,王贵文,王书南,等.碎屑岩储层成岩相测井识别方法综述及研究进展[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(12):4942-4953.
Lai Jin, Wang Guiwen, Wang Shunan, et al. Overview and research progress in logging recognition method of clastic reservoir diagenetic facies[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(12): 4942-4953.
- [9] 李丙喜,王秀娟,马俊胜,等.成岩相在低渗透砂岩储层评价中的应用[J].特种油气藏,2013,20(6):30-34.
Li Bingxi, Wang Xiujuan, Ma Junsheng, et al. Reservoir characteristics and controlling factors in Lower Tertiary of Dongping area in the Qaidam Basin[J]. Special Oil and Gas Reservoir, 2013, 20(6): 30-34.
- [10] 杨勇,汤良杰,岳淑娟,等.塔里木盆地巴楚隆起古董山断裂带构造特征及活动时代[J].石油与天然气地质,2014,35(1):116-123.
Yang Yong, Tang Liangjie, Yue Shujuan, et al. Structural characteristics and active ages of the Gudongshan fault belt in Bachu uplift, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 116-123.
- [11] 林斌,郭巍,李成博,等.塔里木盆地巴楚-麦盖提地区泥盆系储层特征及影响因素[J].世界地质,2014,33(1):120-136.
Lin Bin, Guo Wei, Li Chengbo, et al. Reservoir characteristics and influencing factors in Devonian in Bachu-Maigaiti area, Tarim Basin[J]. Global Geology, 2014, 33(1): 120-136.
- [12] 张福顺,雷鸣,李建交,等.巴楚地区泥盆系东河塘组储集特征及控制因素[J].大庆石油学院学报,2011,35(2):24-28.
Zhang Fushun, Lei Ming, Li Jianjiao, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of the Devonian Donghetang Formation in Bachu area in Tarim Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2011, 35(2): 24-28.
- [13] 张永东,邵志兵,乔桂林,等.塔里木盆地巴麦地区东河塘组储集层特征与成岩作用[J].石油实验地质,2014,36(2):176-181.
Zhang Yongdong, Shao Zhibing, Qiao Guilin, et al. Reservoir characteristics and diagenesis of Devonian Donghetang Formation in Bachu-Maigaiti area[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2): 176-181.
- [14] 李建交,曹自成,岳勇.塔里木盆地巴楚隆起泥盆系东河砂岩成岩作用研究[J].石油实验地质,2014,44(2):125-128.
Li Jianjiao, Cao Zicheng, Yue Yong. Diagenesis of Devonian Donghetang sandstones in Bachu Uplift, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 44(2): 125-128.
- [15] 孙守亮,苏飞,郭巍,等.塔里木盆地巴麦地区泥盆系储层非均质性及其主控因素[J].地质与资源,2014,23(5):470-475.
Sun Shouliang, Su Fei, Guo Wei, et al. Heterogeneity of Devonian reservoir and its major controlling factors in Bachu-Maigaiti area, Tarim Basin[J]. Geology and Resources, 2014, 23(5): 470-475.
- [16] 刘伟,窦齐丰,黄述旺,等.成岩作用的定量表征与成岩储集相研究——以科尔沁油田交2断块区九佛堂组(J₃f)下段为例[J].中国矿业大学学报,2002,31(5):399-403.
Liu Wei, Dou Qifeng, Huang Shuwang, et al. Quantitative characterization of diagenesis and diagenetic reservoir facies—A case study of lower member of J₃f of Jiao 2 block in Kerqin oilfield[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(5): 399-403.
- [17] 代金友,张一伟,熊琦华,等.成岩作用对储集层物性贡献比率研究[J].石油勘探与开发,2003,30(4):54-55.
Dai Jinyou, Zhang Yiwei, Xiong Qihua, et al. The study on contribution rate of diagenesis for reservoir physical property[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(4): 54-55.

- factors of SEC reserve evaluation[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 33–34.
- [6] 赵文智, 毕海滨. 论储量评估中的单元划分[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(3): 309–314.
- Zhao Wenzhi, Bi Haibin. A discussion on the unit classification in reserve estimation[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(3): 309–314.
- [7] 张付新. SEC 剩余经济可采储量影响因素分析[J]. 油气地质与采收率, 2013, 20(3): 93–94.
- Zhang Fuxin. Influencing factors analysis of SEC reserves[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(3): 93–94.
- [8] 喻秋兰, 唐海, 吕栋梁, 等. 气井产能递减规律研究[J]. 天然气勘探与开发, 2012, 35(5): 41–52.
- Yu Qiulan, Tang Hai, Lv Dongliang, et al. Productivity decline law of gas well[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2012, 35(5): 41–52.
- [9] Arps J J. Analysis of declines curve[J]. Trans. AME, 1945, 16: 228–247.
- [10] 周慧敏, 贾彬, 汪毅, 等. Arps 递减分析法在大牛地气田的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013(5): 175.
- Zhou Huimin, Jia Bin, Wang Yi, et al. Application of Arps in Daniudi gas field[J]. China petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013, (5): 175.
- [11] 王永祥, 张君峰, 毕海滨, 等. 油气储量评估方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- Wang Yongxiang, Zhang Junfeng, Bi Haibin, et al. Assessment methods for oil and gas reserves[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [12] 卢涛, 刘艳侠, 武力超, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田致密砂岩气藏稳产难点与对策[J]. 天然气工业, 2015, 35(6): 43–52.
- Lu Tao, Liu Yanxiao, Wu Lichao, et al. Challenges to and countermeasures for the production stabilization of tight sandstone gas reservoirs of the Sulige gas field, Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(6): 43–52.
- [13] 王念喜, 王香增, 张丽霞, 等. 基于渗流特征的低渗透致密砂岩气藏气井生产规律[J]. 天然气工业, 2009, 29(4): 82–85.
- Wang Nianxi, Wang Xiangzen, Zhang Lixia, et al. Production law based on percolation for a gas well in tight sandstone gas reservoirs with low permeability[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(4): 82–85.
- [14] 王海兰, 辜利江, 廖阔. 低渗透气田气井生产工艺技术研究[J]. 天然气技术与经济, 2013, 7(2): 30–32.
- Wang Hailan, Gu Lijiang, Liao Kuo. Production technology used for low permeability gasfield[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2013, 7(2): 30–32.
- [15] 胡允栋, 萧德铭, 王永祥. 按 SEC 标准进行油气证实储量评估的基本原则[J]. 石油学报, 2004, 25(2): 19–20.
- Hu Yundong, Xiao Deming, Wang Yongxiang. The principles for estimating proven reserves following SEC standards[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(2): 19–20.
- [16] 张伦友, 彭宽军. 石油天然气储量价值评估方法研究[J]. 天然气勘探与开发, 2005, 28(3): 69–72.
- Zhang Lunyou, Pen Kuanjun. The research of estimation method in the reserves value of oil and gas [J]. Gas Exploration and Development, 2005, 28(3): 69–72.

(编辑 张玉银)

(上接第 255 页)

- [18] 孙思敏. 低渗透储层成岩作用定量表征与成岩储集相——以吉林新立油田泉头组三、四段为例[J]. 沉积与特提地质, 2007, 27(2): 100–105.
- Sun Simin. Quantitative characterization of diagenesis and diagenetic reservoir facies of the low permeability reservoirs; An example from the 3rd and 4th Members of the Quantou Formation in the Xinli oil field, Jilin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(2): 100–105.
- [19] 贾承造, 魏国齐. 塔里木盆地构造特征与含油气性[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊1): 1–8.
- Jia Chengzao, Wei Guoqi. The structure characteristics and oiliness of the Tarim Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(S1): 1–8.
- [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.
- 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 in Guangan area, Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(1): 50–57.
- [21] 石江玉, 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 油层组为例[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 820–827.
- Shi Jiangyu, 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.
- [22] 郑伟, 马艳丽, 赵凤荣. 改进的 KNN 算法在煤种分类中的应用[J]. 煤炭技术, 2011, 30, (1): 46–47.
- Zhen Wei, Ma Yanli, Zhao Fengrong. Application of improved KNN algorithm in categorization of coal type[J]. Coal Technology, 2011, 30(1): 46–47.
- [23] 张著英, 黄玉龙, 王翰虎. 一个高效的 KNN 分类算法[J]. 计算机科学, 2008, 35(3): 170–172.
- Zhang Zhuying, Huang Yulong, Wang Hanhu. A new KNN classification approach [J]. Computer Science Technology, 2008, 35(3): 170–172.
- [24] 何胡军, 毕建霞, 曾大乾, 等. 基于测井曲线斜率的 KNN 分类算法常规测井裂缝识别——以普光气田礁滩相储层为例[J]. 中外能源, 2014, 19(1): 70–74.
- He Hujun, Bi Jianxia, Zeng Daqian, et al. Fracture identification in conventional log through KNN classification algorithm based on slope of logging curve—A case study of reef flat facies reservoir in Puguang gasfield[J]. Sino-Global Energy, 2014, 19(1): 70–74.

(编辑 李 军)