

自生“加大”含铁白云石胶结物特征及 对致密砂岩储层的影响

——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组4+5段为例

高阳^{1,2}, 刘春³, 白晓佳⁴, 王志章¹, 杨振², 陈嘉豪¹, 崔航¹

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油石油勘探开发研究院, 河北廊坊 065007; 3. 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023; 4. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000]

摘要:随着油气勘探的不断深入,致密砂岩储层越来越受到人们的关注,特别是关于致密化的成因及油气充注的时间。利用岩石学、岩石地球化学以及储层物性资料,综合分析鄂尔多斯盆地陇东地区延长组4+5段中含铁白云石胶结物产出特征、成因及其对储层质量的影响。研究表明:自生含铁白云石主要以白云岩岩屑的“次生加大边”形式出现,其形成与早成岩晚期碎屑白云岩的压溶和Fe质交代有关;少量含铁白云石交代长石颗粒。岩石粒度、黑云母碎屑含量、沉积微相控制含铁白云石胶结物的含量与分布,进而控制储层质量。在镇原和环县地区含铁白云石胶结物的含量高于华池和白豹地区;在水下分流河道中上部 and 河口坝中部,含铁白云石胶结物含量有增加的趋势。黑云母等碎屑的蚀变可能是最主要的Fe质来源。在水下分流河道底部砂体中,含铁白云石胶结物的含量一般小于3%,孔渗性整体较好;在水下分流河道顶部砂体中,这种胶结物的含量通常大于3%,储层质量一般较差。该研究成果将对相似地质条件下致密储层形成机理的分析提供一定的依据。

关键词:自生矿物;含铁白云石;储层质量;致密砂岩;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Cement characteristics of overgrown authigenic ferron dolomite and its impact on tight sandstone reservoirs qualities: Case study of the Chang 4 & 5 members of Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin

Gao Yang^{1,2}, Liu Chun³, Bai Xiaojia⁴, Wang Zhizhang¹, Yang Zhen², Chen Jiahao¹, Cui Hang¹

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China; 3. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 4. Exploration and Development Research Institute of Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China]

Abstract: The tight sandstone reservoirs have drawn more and more attention along with increasing hydrocarbon exploration activity. This is particularly true with regard to the mechanism of tightening and its relation with the timing of hydrocarbon charging. We analyzed the occurrence and growth mechanism of ferron dolomite cements in the Chang 4&5 members and their impact on reservoir properties in the Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin, combined with a study on lithology, petrogeochemistry and physical properties of reservoirs. The results show that the authigenic ferron dolomite mainly occurs as “secondary overgrowth” of detrital dolomite, the generation of which is caused by the pressure solution of detrital dolomite and the ferron metasomasis at the late stage of early diagenesis. That is a small scale metasomasis of feldspar particles by ferron dolomite. The size of grains, the content of biotite debris as well as the sedimentary microfacies function to control the content and distribution of ferron dolomite cements, which in turn will control the reservoir property. The content of ferron dolomite cements in Zhenyuan and Huanxian areas is higher than that in Huachi and Baibao areas. The amount of ferron dolomite cements tends to increase at the middle-to-upper section of sub-

收稿日期:2018-08-18;修订日期:2019-05-30。

第一作者简介:高阳(1983—),男,博士研究生,储层地质学。E-mail:gaoyang69@petrochina.com.cn。

通讯作者简介:王志章(1962—),男,教授、博士生导师,储层地质学。E-mail:whx3998@vip.sina.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41872102);国家科技重大专项(2016ZX05007-003)。

merged distributary channels and the middle mouth bars. The ferron is mainly originated from the dissolution of biotite debris. The sand bodies of the bottom of submerged distributary channels facies usually have an overall good porosity and permeability only if the content of cements is less than 3%. However, the cement content tends to exceed 3% in the sand bodies on top of submerged distributary channels facies, resulting in lower reservoir quality. The results obtained in the study can provide indications to the analysis of tight reservoir formation mechanism in similar geological conditions.

Key words: authigenic mineral, ferron dolomite, reservoir quality, tight sandstone, Ordos Basin

在近年来的油气勘探中,非常规的致密砂岩储层日益受关注^[1-2]。致密砂岩储层通常是指孔隙度较低(3%~12%)、渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩储层^[3-4]。前人将致密砂岩的成因主要归结为沉积控制和成岩控制两种机制^[1,5-7],前者强调沉积物中含有过多的泥质杂基或塑性颗粒;后者强调多种自生矿物对原生孔隙的破坏,特别是发生在成分成熟度较高的砂岩中。

自生加大胶结是一种常见的胶结物结构类型,通常发育在碎屑石英^[8-9]、长石、锆石颗粒的边部^[10],严重降低岩石的孔渗性。Morad等^[11]通过扫描电镜观察发现,在泥晶石灰岩中的方解石微晶周围普遍发育次生加大胶结,后期这些方解石连生在一起;同时发现自生方解石可以共轴生长在具有压溶边的棘皮类生物碎片上。自生“加大”胶结发育在白云岩碎屑周边较为少见^[12],形成过程类似于Morad等^[11]描述的方解石微晶次生加大后连晶生长;白云岩碎屑为“基座”,也有人将这种现象解释为内源碳酸盐胶结^[13]。在鄂尔

多斯盆地,陇东油区是中国石油长庆油田勘探开发的最主要战场^[14-15]。在三叠系延长组,普遍发育含油的低孔低渗和致密砂岩储层^[15-16]。在延长组4+5段(长4+5段),自生“加大”含铁白云石胶结作用是控制储层质量的因素之一。在研究区,成岩作用现象丰富,储层控制因素较多,如塑性云母被压实形成假杂基、绿泥石包膜以及石英次生加大等^[13]。本文通过183个铸体薄片、35个扫描电镜样品、200余组物性数据以及14组电子探针分析数据,分析这类次生“加大”胶结物的产出特征、分布规律和成因机制等,初步探讨自生含铁白云石对储集空间的影响,旨在明确该区致密储层成因和“甜点”分布规律,为该区致密油勘探提供科学的地质依据。

1 地质背景

陇东地区位于鄂尔多斯盆地西南部(图1),包括

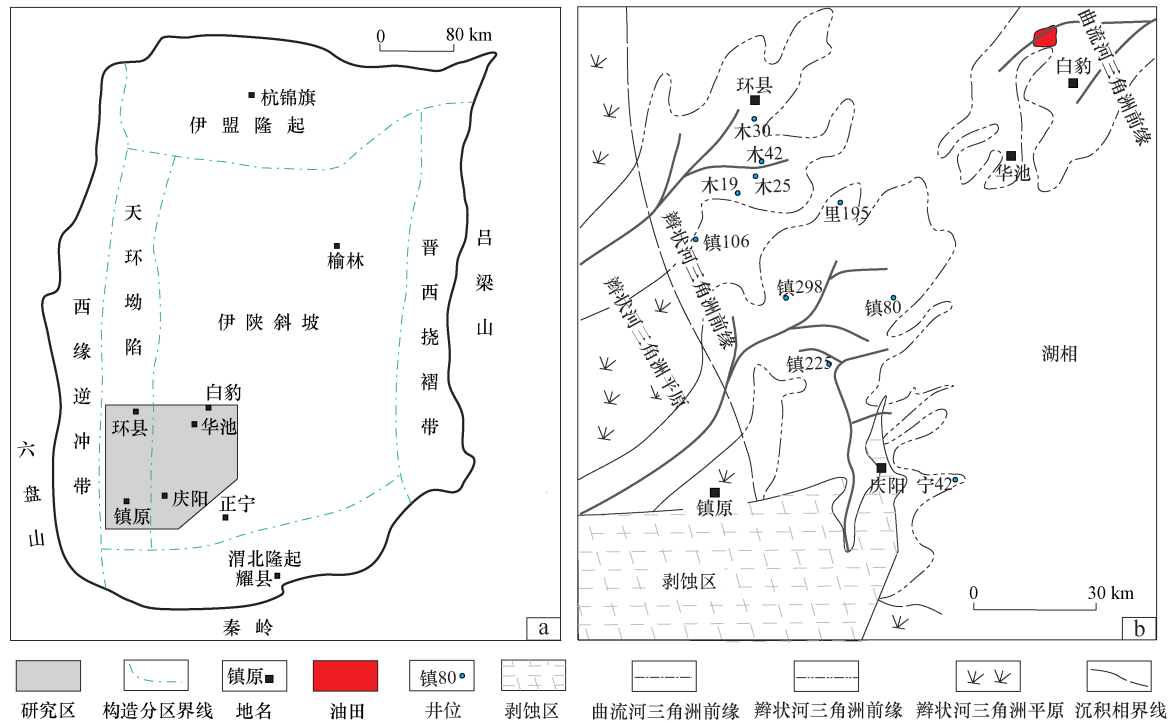


图1 鄂尔多斯盆地构造带划分(a)及研究区位置(b)^[13]
Fig. 1 The division of structural elements in Ordos Basin (a) and the location of the study area (b)^[13]

盆地一级构造带天环坳陷的南部和伊陕斜坡的西南部,面积约为 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,占盆地总面积的 25%,是目前中国石油长庆油田勘探与开发的重点区域^[17-18]。近年来,在陇东地区发现了 2 个亿吨级整装油田——西峰油田和环县油田,进一步推动了鄂尔多斯盆地延长组的精细勘探与评价。本文研究区位于陇东地区中部,包括镇原、环县、华池和白豹等 4 个地区,勘探面积约为 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$,是陇东地区增储上产的主力区块^[19-20]。

延长组沉积时期,陇东地区古地貌特征表现为西高东低,沉积物成因和性质随着构造沉降和湖平面的变化而改变,形成了一套水体较浅的河湖三角洲沉积^[21]。延长组自下而上被划分为长 10—长 1 共 10 个段,主要岩性为厚层、块状细—粗粒长石砂岩,其中长 10—长 7 段沉积期是湖盆的形成时期,长 7 段为盆地主力烃源岩;长 6—长 3 段沉积期是以三角洲建设为主的发展时期;长 2 段沉积期湖盆逐渐萎缩,至长 1 段沉积期湖盆衰亡^[22-23]。东西两大物源体系在陇东地区汇聚^[21]。西部的六盘山在延长组沉积时期出露震旦系石英岩、中基性火山岩及寒武系—奥陶系的浅变质岩、碳酸盐岩,供源形成辫状河三角洲;东部物源区吕梁山北段在长 4+5 段时期出露前震旦系花岗岩、片麻岩、黑云母—角闪石片岩,供源形成曲流河三角洲^[20]。

研究区目的层段为长 4+5 段,该油层组是鄂尔多斯盆地的主要烃源岩层之一,其沉积物粒度偏细^[21,24],其中镇原+环县地区发育来自西部物源体系的辫状河三角洲前缘沉积,华池+白豹+庆阳地区主要发育来自东北部物源体系的曲流河三角洲前缘沉积^[21]。整体上,长 4+5 段沉积厚度约为 100 m,自上而下可划分为长 4+5¹ 和长 4+5² 共 2 个小层;地层平均埋深约为 1 950 m。目前研究区已有 164 口井钻遇长 4+5 油层,平均油层厚度 6.2 m,平均孔隙度 10.9%、平均渗透率 $0.83 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;获得工业油流井 82 口,单井平均试油产量 9.78 t/d,最高 72.0 t/d。由于物源和沉积体系的差异,镇原—环县地区和华池—白豹地区在岩石类型、岩矿组成、成岩作用特征以及储层质量等方面均存在明显差异^[13]。

2 含铁白云石特征及成因

2.1 含铁白云石特征

在研究区,据薄片分析岩石组分中含有一定量的白云岩岩屑(图 2),在镇原和环县地区含量平均约为 6.8%,在华池和白豹地区平均约为 2.3%。白云岩岩屑具有刚性和易溶解的特性。显微镜下观察发现,通

常在其颗粒表面生长着后期形成的含铁白云石晶体,这是一种特殊的再生生长胶结作用。

含铁白云石胶结物通常出现在白云岩碎屑周边或者附近(图 2,图 3)。统计 180 余张铸体薄片发现,这种含铁白云石平均占岩石组分的 3%~4%(另外,石英加大胶结物平均占 3%~4%,伊利石和绿泥石胶结物占 4%~6%)。扫描电镜下可见自生含铁白云石菱面体生长在白云岩颗粒基座上(图 2a);通过茜素红染色,偏光显微镜下常见白云岩岩屑的“次生加大”现象,“加大边”是被染成蓝色的含铁白云石胶结物(图 2b,c);在阴极发光显微镜下,白云岩碎屑呈暗红色,其“加大边”为红色(图 2d—f)。背散射照片显示,碎屑白云岩为灰色,自生含铁白云石胶结物为灰白色,白云石和含铁白云石解理面平行,共轴生长(图 2g,h)。这种类型自生含铁白云石,平均化学成分包括 10.72% 的 MgO,29.14% 的 CaO,13.80% 的 FeO 以及其他物质(表 1;图 4a)。在黑云母含量较高和沉积物粒度较细的部位,如在水动力较弱的水下分流河道中上部和河口坝中部,抗压实能力降低,后期压溶作用明显,“加大边”较宽(图 2g,h)。整体上,碎屑白云岩含量与含铁白云石胶结物含量呈现正相关关系(图 4b)。少部分含铁白云石以交代物的形成出现,交代溶蚀后的长石颗粒;或者直接沉淀于颗粒之间的孔隙中,这里不做研究。

2.2 初步探讨含铁白云石成因

由图 4b 可以看出,研究区自生“加大”含铁白云石胶结物的含量随着白云岩岩屑含量的增加而增大,这说明含铁白云石与白云岩岩屑具有成因联系。研究区西部的六盘山在延长组沉积时期出露有寒武系—奥陶系的浅变质岩、碳酸盐岩,风化破碎后能够提供白云岩碎屑^[20]。在埋藏压实作用下,陆源白云岩碎屑表面开始溶解,同时被铁质交代,在碎屑周边沉淀含铁白云石胶结物。这一压溶—交代—沉淀过程,有外源的 Fe^{2+} 和少量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 参与(图 3)。铁离子的交代是按埋藏深度逐步进行的(图 4a)。它通常出现在早成岩的末期,机械压实作用的中后期,此时研究区的绿泥石环边可能正在形成^[13]。在刚性且易溶解的白云岩岩屑表面,逐渐发生压溶作用。正是因为这种压溶作用,早期绿泥石包膜难以包裹白云岩岩屑。

沉积期河流带来丰富的溶解铁在研究区三角洲—滨浅湖环境中絮凝卸载,为成岩早期形成的自生含铁白云石和绿泥石提供了物质来源^[25-26]。部分 Fe 和 Mg 离子也可能来源于砂岩附近的泥岩,但大部分来源

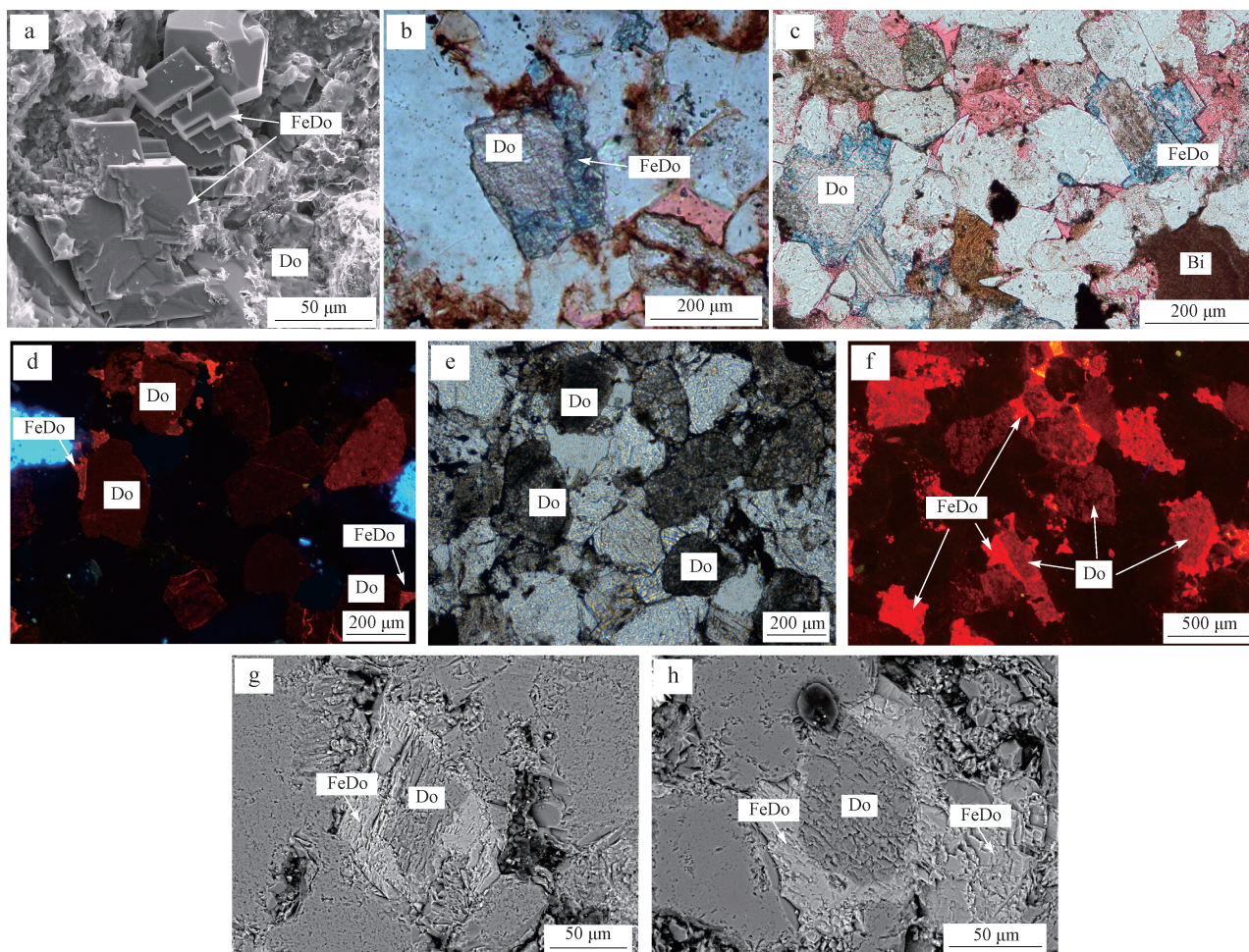


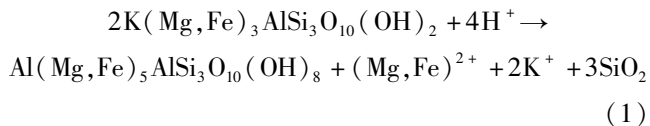
图2 陇东地区含铁白云石胶结物镜下特征

Fig. 2 The microscopic characteristics of ferron dolomite cements in Longdong area

a. 含铁白云石晶体在白云岩岩屑表面再生长, 里195井, 埋深1 864.3 m; b. 白云岩岩屑周围生长含铁白云石胶结物, 白286井, 埋深1 988.2 m, 单偏光, 红色铸体, 染色片; c. 白云岩岩屑周围沉淀的含铁白云石胶结物, 木25井, 埋深2 332.12 m, 单偏光, 红色铸体, 染色片(来自文献[12]); d. 白云岩碎屑(暗红色, 含有粘土故发光弱)具含铁白云石加大边(红色, 铁含量低, 见电子探针分析), 木42井, 埋深2 391.3 m, 阴极发光片照片; e. 是d同视域下偏光显微镜照片; f. 阴极发光显微镜下白云岩碎屑的次生加大现象, 镇106井, 埋深2 482.68 m; g, h. 碎屑白云石具有含铁白云石胶结物环边, 镇289井, 埋深1 954.3 m

Do. 白云岩碎屑; FeDo. 含铁白云石; Bi. 黑云母

于黑云母碎屑和白云岩岩屑的溶解、蚀变。薄片观察表明(图2c), 黑云母表面见到明显的铁质析出, 反应式可以表达为^[25-26]:



2.3 成岩演化

含铁白云石胶结物主要发育在镇原和环县地区, 现以这两个地区为例, 分析含铁白云石形成的成岩演化过程(图5, 图6)。

在镇原和环县地区长4+5段储层中, 早期的成岩作用以千枚岩和黑云母等塑性颗粒的压实变形为主要

特征(图5a)。水下分流河道的下部和河口坝的上部由于沉积水动力较强, 片状的黑云母和泥质杂基含量低, 抗压实能力较高; 水下分流河道的上部 and 河口坝的中下部由于沉积水动力较弱, 黑云母和杂基含量高, 抗压实能力较低, 因此在不同的沉积相带黑云母含量不同, Fe的来源和数量差异明显。至早成岩中后期, 粘土杂基中的蒙脱石大量转化为伊蒙混层和伊利石, 释放出丰富的SiO₂。富含SiO₂的孔隙流体在压实作用排驱下, 向高孔、成熟度较高的砂岩运移。至早成岩晚期, 碳酸盐岩碎屑在化学压实作用下发生溶解, 同时黑云母蚀变析出的Fe离子参与碳酸盐岩碎屑的再生长胶结作用, 沉淀含铁白云石胶结物。这种再生长胶结作用在粒度相对较小的水下分流河道上部和河口坝中

表 1 陇东地区含铁白云石胶结物电子探针分析结果

Table 1 The characteristics of ferron dolomite cements under electron microprobe in Longdong area

样品号	井号	深度/m					合计
			MgO	CaO	MnO	FeO	
1	木 25	2 271.30	9.40	28.68	1.21	16.05	55.34
2	木 25	2 324.35	10.30	27.70	1.17	14.18	53.35
3	木 25	2 324.35	10.11	29.09	1.10	14.20	54.50
4	木 25	2 325.20	10.12	28.38	1.28	15.19	54.96
5	木 25	2 325.20	10.54	28.47	1.31	14.69	55.01
6	木 25	2 325.20	10.16	28.59	1.23	15.19	55.17
7	木 25	2 323.50	11.89	30.57	0.33	11.92	54.71
8	宁 42	1 279.37	11.77	31.04	0.66	11.58	55.05
9	镇 225	1 885.15	9.64	29.93	1.72	12.89	54.18
10	镇 225	1 885.15	12.03	29.09	1.46	12.57	55.15
11	镇 225	1 886.50	11.37	29.09	1.25	13.64	55.35
12	镇 298	1 978.20	9.45	29.05	0.41	15.33	54.24
13	镇 298	2 166.30	12.03	29.72	1.53	12.21	55.49
14	镇 298	2 215.10	11.23	28.61	1.63	13.61	55.08
平均			10.72	29.14	1.16	13.80	54.83

下部净砂岩中较为常见。由于镇原和环县地区黑云母碎屑含量较低,且 Fe 离子被含铁白云石占据,未达到绿泥石矿物的饱和条件,因此,在岩石孔隙中少见绿泥石胶结物。从早成岩末期至中成岩早期,泥岩中的有机质开始进入成熟阶段,排出大量的有机酸进入砂岩储层中,长石等颗粒被溶蚀(图 5b)。孔隙水性质由早期的碱性迅速转变为酸性,粘土矿物转化过程中释放的 SiO₂ 以及长石溶蚀产生的 SiO₂ 沉淀,开始形成石英的次生加大边(图 5c)。与此同时,油气充注、进入正在致密化的砂岩储层。这种致密化储层是由于细粒的沉积物受压实作用和含铁白云石胶结、硅质胶结作用改造形成。由于油气的两期注入^[27],伴随孔隙水 pH 值的两次降低, SiO₂ 两次较大规模沉淀,形成两期石英的次生加大胶结(图 5b)。自生的伊利石后期干扰了第二期硅质加大的形成。由于长石含量较低,长石的溶蚀整体相对较弱。根据伊蒙混层粘土矿物中蒙脱石含量为 15% 可知,现今该套致密砂岩储层处于中成岩 A 期末(图 6)。

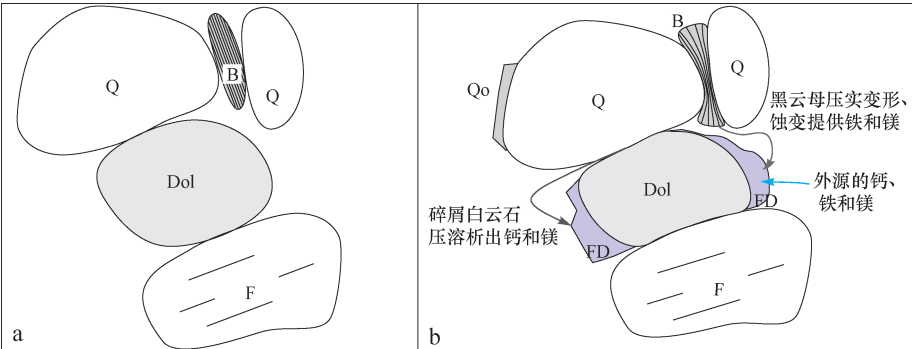


图 3 陇东地区自生“加大”含铁白云石胶结物成因模型

Fig. 3 A genetic model showing the formation of overgrown authigenic ferron dolomite cements in Longdong area

a. 初始压实状态,随后白云岩碎屑发生压实-溶解(压溶);b. 白云岩碎屑溶解和黑云母碎屑蚀变产生的 Fe, Mg, Ca 等物质在白云岩碎屑边部再生生长胶结,可见平整的晶面

Q. 石英碎屑;Qo. 石英加大;F. 长石碎屑;B. 黑云母碎屑;Dol. 白云岩碎屑;FD. 含铁白云石胶结物

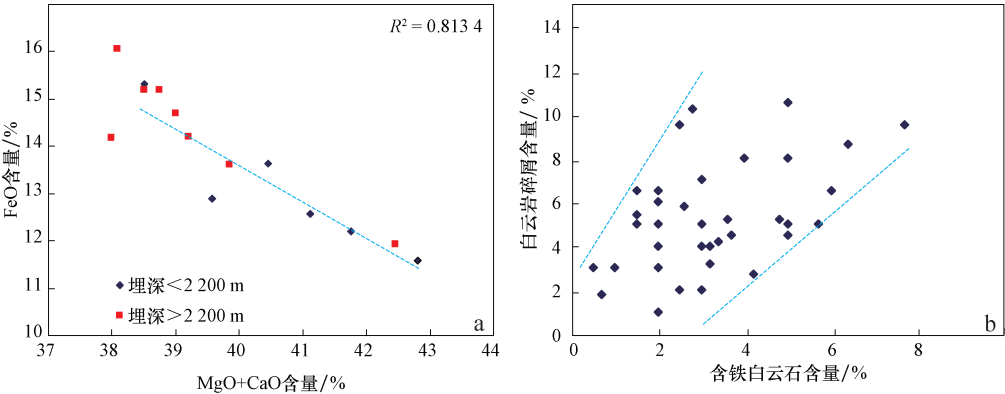


图 4 镇原和环县地区长 4+5 段含铁白云石胶结物成分及含量

Fig. 4 The composition and content of ferron dolomite cements in the Chang 4 & 5 members of the Triassic

Yanchang Formation in Zhenyuan and Huanxian areas

a. 含铁白云石胶结物成分分析;b. 白云岩岩屑与自生“加大”含铁白云石胶结物含量交汇图

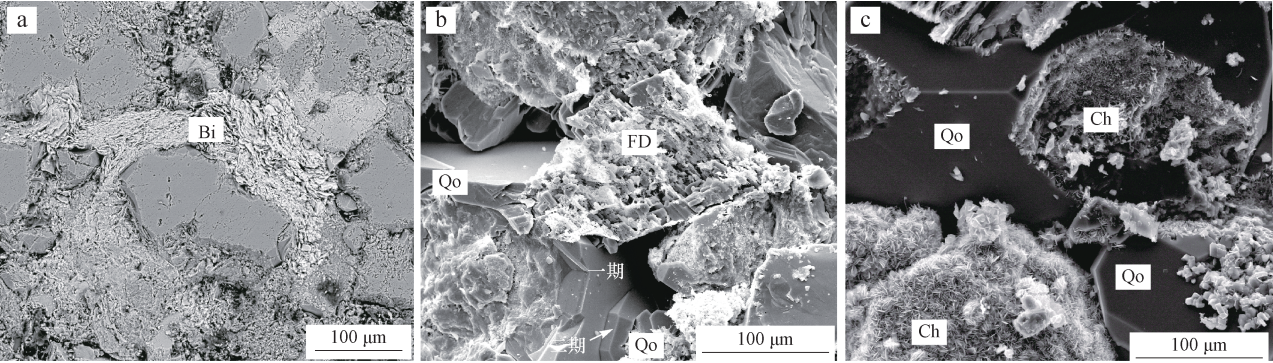


图 5 镇原和环县地区长 4 + 5 段成岩作用镜下特征

Fig. 5 The microscopic characteristics of the diagenesis for the Chang 4 & 5 members of the Triassic Yanchang Formation in Zhenyuan and Huanxian areas

- a. 黑云母碎片蚀变、被压实变形,形成假杂基,镇 289 井,埋深 1 954.3 m; b. 长石溶蚀和石英的两期次生加大,镇 9 井,埋深 2 096.25 m; c. 石英局部加大且自形晶面平整,加大边较厚,早期的绿泥石包膜明显抑制次生加大胶结,镇 131 井,埋深 2 132.03 m
- Bi. 黑云母; FD. 长石溶蚀; Qo. 石英次生加大; Ch. 绿泥石

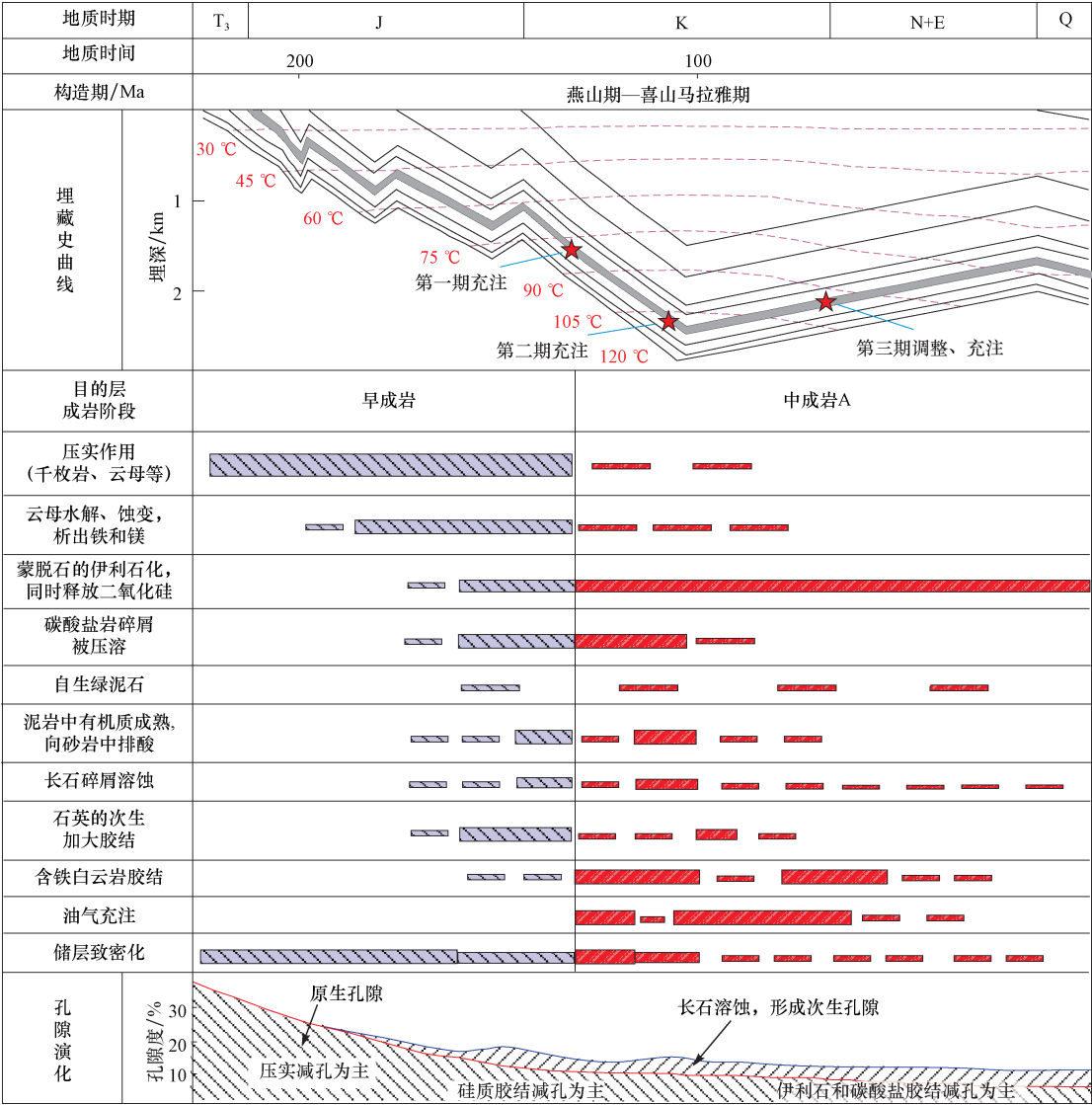


图 6 镇原和环县地区长 4 + 5 致密砂岩储层成岩演化及孔隙演化

Fig. 6 The diagenetic and pore evolution of tight sandstone reservoirs in the Chang 4 & 5 members of the Triassic Yanchang Formation in Zhenyuan and Huanxian Area

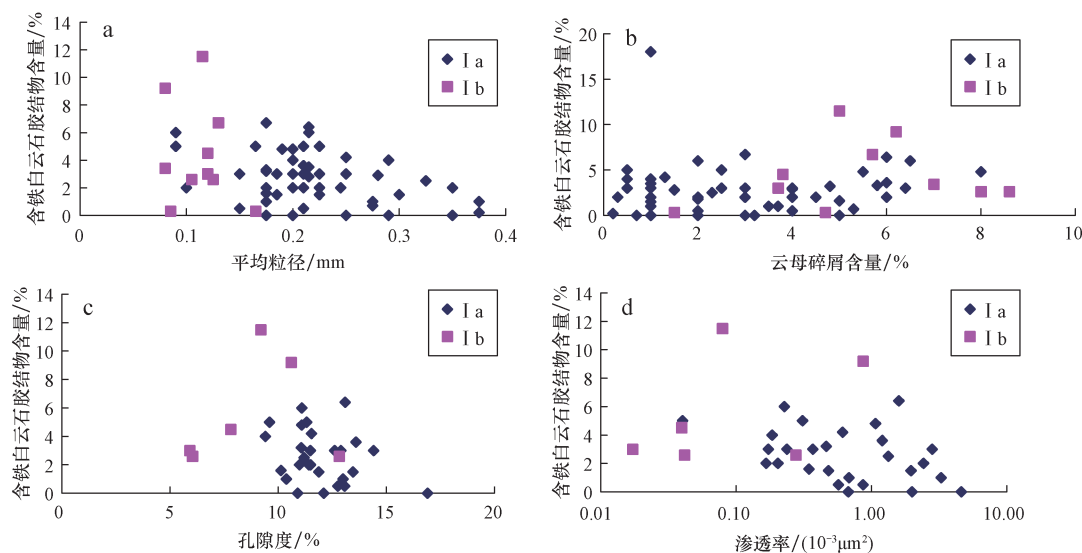


图7 镇原和环县地区含铁白云石含量与碎屑粒度、黑云母含量和储层质量的关系

Fig.7 The relationship between the reservoir quality and the ferron dolomite content, the size of detrital grains as well as the biotite content in Zhenyuan and Huanxian areas (Ia: the sand body at the bottom of underwater distributary channels facies; Ib: the sand body on top of underwater distributary channels facies)

- a. 平均粒径与含铁白云石胶结物关系; b. 云母碎屑含量与含铁白云石胶结物关系;
c. 储层孔隙度与含铁白云石胶结物关系; d. 储层渗透率与含铁白云石胶结物关系

Ia: 水道底部砂体; Ib: 水道顶部砂体

3 含铁白云石胶结对储层的影响

镇原和环县地区的储层现今孔隙度为6%~17%, 平均为11.5%, 平均渗透率为 $0.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。水下分流河道底部砂体(Ia)中, 沉积物粒度较粗, 粒径主要分布在0.2~0.4 mm。含铁白云石胶结物的含量一般小于3%, 孔隙度通常大于10%, 渗透率大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储层质量整体较好(图7)。

在水下分流河道顶部砂体中(Ib), 粒度较细(<0.2 mm), 富含黑云母碎屑(>3%), 黑云母碎屑在压实作用下易于形成假杂基。由于弱的抗压实能力, 碎屑白云石慢慢溶解, 自生的含铁白云石开始沉淀。含铁白云石胶结物的含量通常大于3%, 储层质量一般较差。孔隙度往往小于10%, 渗透率一般低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图7)。图7c和d的数据较为离散, 可能是因为孔隙度和渗透率受控于多种因素, 而含铁白云石胶结物仅是一种因素。

根据成岩作用对储层孔隙的改造可知, 较有利储层分布在粒度较粗、黑云母含量较低、抗压实较好、成熟度较高的水下分流河道中下部和河口坝中上部。这些砂岩的硅质胶结相对较弱、长石溶蚀相对较强、绿泥石包膜适量^[28-30]。在油气充注之前, 这些砂岩保留了较高的孔隙度; 在油气充注之时, 碳酸盐胶结物出现在

白云岩岩屑附近, 刚性骨架颗粒(如石英和长石等)之间仍保留较高的孔隙度。

4 结论

在鄂尔多斯盆地陇东地区长4+5段组致密砂岩中, 白云岩碎屑周边普遍发育含铁白云石胶结物, 其形成与白云岩碎屑的压溶和Fe质交代有关。成岩演化分析表明, 含铁白云石胶结物开始形成于早成岩晚期, 由于Fe离子的消耗, 未形成大规模的环边绿泥石胶结物, 进而未能有效抑制石英加大。黑云母等碎屑的蚀变可能是最主要的Fe质来源。

现今该套致密砂岩储层处于中成岩A期末。储层现今孔隙度为6%~17%, 平均为11.5%, 平均渗透率为 $0.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在水下分流河道底部砂体中, 含铁白云石胶结物的含量一般小于3%, 孔渗性整体较好; 在水下分流河道顶部砂体中, 含铁白云石胶结物的含量通常大于3%, 储层质量一般较差。需要注意的是, 有利储层预测必须充分考虑其他控制因素, 如硅质胶结等, 这里仅讨论了含铁白云石胶结物, 以引起读者的关注。

参 考 文 献

- [1] Shanley K W, Cluff R M, Robinson J W. Factors controlling prolific

- gas production from low-permeability sandstone reservoirs: Implications for resource assessment, prospect development, and risk analysis [J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(8): 1083–1121.
- [2] Christophe M, Jamie S, Steve S. Unconventional gas: A review of regional and global resource estimates [J]. *Energy*, 2013, 55: 571–584.
- [3] Spencer C W. Geologic aspects of tight gas reservoirs in the Rocky Mountain region [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1985, 37(7): 1308–1314.
- [4] Law B E, Richard M, Pollastro, et al. Geologic characterization of low-permeability gas reservoirs in selected wells, Greater Green River Basin, Wyoming, Colorado, and Utah [J]. *AAPG Special Volumes*, 1986, 66: 253–269.
- [5] Paxton S T, Szabo J O, Ajdukiewicz J M, et al. Construction of an intergranular volume compaction curve for evaluating and predicting compaction and porosity loss in brittle-grain sandstone reservoirs [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(12): 2047–2067.
- [6] Ajdukiewicz J M, Lander R H. Sandstone reservoir quality prediction: The state of the art [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(8): 1083–1091.
- [7] Gould K, Pe-Piper G, Piper D J W. Relationship of diagenetic chlorite rims to depositional facies in Lower Cretaceous reservoir sandstones of the Scotian Basin [J]. *Sedimentology*, 2010, 57(2): 587–610.
- [8] Anjos S M C, De Ros L F, Silva C M A. Chlorite authigenesis and porosity preservation in the Upper Cretaceous marine sandstones of the Santos Basin, offshore eastern Brazil [J]. *International Association of Sedimentologists, Special Publication*, 2003, 34: 291–316.
- [9] Berger A, Gier S, Krois P. Porosity-preserving chlorite cements in shallow-marine volcanoclastic sandstones: Evidence from Cretaceous sandstones of the Sawan gas field, Pakistan [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(5): 595–615.
- [10] 朱筱敏. 沉积岩石学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
Zhu Xiaomin. *Sedimentary Petrography* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [11] Morad D, Paganoni M, Harthi A, et al. Origin and evolution of micro-porosity in packstones and grainstones in a Lower Cretaceous carbonate reservoir, united arab emirates [J]. *Geological Society London Special Publications*, 2016, 435.
- [12] 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.
- [13] Dutton S P. Calcite cement in Permian deep-water sandstones, Delaware Basin, West Texas: Origin, distribution, and effect on reservoir properties [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(6): 765–787.
- [14] Duan Y, Wang C Y, Zheng C Y, et al. Geochemical study of crude oils from the Xifeng oilfield of the Ordos Basin, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 31(4): 341–356.
- [15] Luo Xiaorong, Yu Jian, Zhang Liuping, et al. Numerical modeling of secondary migration and its applications to Chang-6 Member of Yanchang Formation (Upper Triassic), Longdong area, Ordos Basin, China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(2): 91–102.
- [16] Zeng Lianbo, Li Xiangyang. Fractures in sandstone reservoirs with ultra-low permeability: A case study of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(4): 461–477.
- [17] 付金华, 郭正权, 邓秀芹. 鄂尔多斯盆地西南地区上三叠统延长组沉积相及石油地质意义 [J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 34–44.
Fu Jinhua, Guo Zhengquan, Deng Xiuqin. Sedimentary facies of the Yanchang Formation of Upper Triassic and petroleum geological implication in southwestern Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(1): 34–44.
- [18] 杨华, 刘自亮, 朱筱敏, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘上三叠统延长组物源与沉积体系特征 [J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 10–18.
Yang Hua, Liu Ziliang, Zhu Xiaomin, et al. Provenance and depositional systems of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 10–18.
- [19] 杨华, 钟大康, 姚泾利, 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.
- [20] 刘自亮, 朱筱敏, 廖纪佳, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘上三叠统延长组层序地层学与砂体成因研究 [J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 1–9.
Liu Ziliang, Zhu Xiaomin, Liao Jijia, et al. Sequence stratigraphy and genesis of sand bodies of the Upper Triassic Yanchang Formation in the southwestern margin of Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 1–9.
- [21] 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.
- [22] 黄思静, 张萌, 朱世全, 等. 砂岩孔隙成因对孔隙度/渗透率关系的控制作用——以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组为例 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(6): 648–652.
Huang Sijing, Zhang Meng, Zhu Shiquan, et al. Control of origin of pores over relationship of porosity to permeability in sandstone reservoir: A case study from Yanchang sandstone of Triassic of eastern Gansu, Ordos Basin [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2004, 31(6): 648–652.
- [23] 郑荣才, 牛小兵, 梁晓伟, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬油田延长组原油性质与来源分析 [J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 142–145.
Zheng Rongcai, Niu Xiaobing, Liang Xiaowei, et al. Study on the property and origin of crude oil of Yanchang Formation in Jiyuan Oilfield, Ordos Basin [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(2): 142–145.

- [24] 王琪, 嵇喜准, 陈国俊, 等. 鄂尔多斯盆地盐池—姬源地区三叠系长4+5砂岩成岩演化特征与优质储层分布[J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 397–404.
- Wang Qi, Zhuo Xizhun, Chen Guojun, et al. Characteristics of diagenetic Evolution of Chang 4 + 5 sandstones (Upper Triassic) in Yanchi-Jiyuan Area Ordos Basin and Distribution of High-Quality Reservoir[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 397–404.
- [25] Ehrenberg S N. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain-coating chlorite: Examples from the Norwegian continental shelf[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77: 1260–1286.
- [26] Bloch S, Lander R H, Bonnell L. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(2): 301–328.
- [27] 柳广弟, 杨伟伟, 冯渊, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组原油地球化学特征及成因类型划分[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 108–115.
- Liu Guangdi, Yang Weiwei, Feng Yuan, et al. Geochemical characteristics and genetic types of crude oil from Yanchang Formation in Longdong Area, Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 108–115.
- [28] Zhu Shifa, Wang Xiaoxu, Qin Yi, et al. Occurrence and origin of pore-lining chlorite and its effectiveness on preserving porosity in sandstone of the middle Yanchang Formation in the southwest Ordos Basin[J]. Applied Clay Science, 2017 (148): 25–38.
- [29] 高辉, 朱耿博, 王汝懿, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩储层微观孔喉特征差异及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 302–312.
- Gao Hui, Zhugeng Bolun, Wang Xuanyi, et al. Differences and origin of micro pore throat characteristics for tight sandstone reservoir of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 302–312.
- [30] 邱隆伟, 穆相骥, 李浩, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区二叠系下石盒子组岩屑发育特征及其对储层物性的影响[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 24–33.
- Qiu Longwei, Mu Xiangji, Li Hao, et al. Characteristics of detritus development in the Permian Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area and its influence on reservoir physical properties[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 24–33.

(编辑 张亚雄)

(上接第998页)

- [20] 陈伟, 吴智平, 侯峰, 等. 断裂带内部结构特征及其与油气运聚关系[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 774–780.
- Chen Wei, Wu Zhiping, Hou Feng, et al. Internal structures of fault zones and their relationship with hydrocarbon migration and accumulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 774–780.
- [21] Schueller S, Braathen A, Fossen H, et al. Spatial distribution of deformation bands in damage zones of extensional faults in porous sandstones: Statistical analysis of field data[J]. Journal of Structural Geology, 2013, 52(1): 148–162.
- [22] 周文, 李秀华, 金文辉, 等. 塔河奥陶系油藏断裂对古岩溶的控制作用[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2339–2348.
- Zhou Wen, Li Xiuhua, Jin Wenhui, et al. The control action of fault to paleokarst in view of Ordovician reservoir in Tahe area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2339–2348.
- [23] 钱一雄, Conxita Taberner, 邹森林, 等. 碳酸盐岩表生岩溶与埋藏溶蚀比较——以塔北和塔中地区为例[J]. 海相油气地质, 2007, 12(2): 1–7.
- Qian Yixiong, Conxita Taberner, Zou Senlin, et al. Diagenesis comparison between Epigenic karstification and burial dissolution in carbonate reservoirs: an instance of Ordovician carbonate reservoirs in Tabei and Tazhong regions, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2007, 12(2): 1–7.
- [24] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347–355.
- Lu Xinbian, Hu Wenge, Wang Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347–355.
- [25] Meshri I D. On the reactivity of carbonic and organic acids and generation of secondary porosity[J]. Special Publications of Sepm, 1986.
- [26] 远光辉, 操应长, 葱克来, 等. 东营凹陷北带古近系碎屑岩储层长石溶蚀作用及其物性响应[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 853–866.
- Yuan Guanghui, Cao Yingchang, Xi Kelai, et al. Feldspar dissolution and its impact on physical properties of Paleogene clastic reservoirs in the northern slope zone of the Dongyingsag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 853–866.
- [27] Twiss R J, Moores E M. Structural geology[M]. Macmillan, 1992.
- [28] Pollard D D, Fletcher R C. Fundamentals of Structural Geology[J]. Fundamentals of Structural Geology, 2005: 512.
- [29] 蒋有录, 刘华. 断裂沥青带及其油气地质意义[J]. 石油学报, 2010, 31(1): 36–41.
- Jiang Youlu, Liu Hua. Fault asphalt zone and its significance in petroleum geology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 36–41.
- [30] De Jossineau G, Aydin A. The evolution of the damage zone with fault growth in sandstone and its multiscale characteristics[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007, 112(B12).
- [31] Cowie P A, Scholz C H. Growth of faults by accumulation of seismic slip[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1992, 97(B7): 11085–11095.
- [32] Kim Y S, Sanderson D J. The relationship between displacement and length of faults: a review[J]. Earth Science Reviews, 2005, 68(3): 317–334.

(编辑 董立)