

鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油储层伊利石成因

田建锋¹,高永利²,张蓬勃¹,王秀娟³,杨友运¹

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院,陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 石油工程学院,陕西 西安 710065;3. 中国石油 长庆油田 勘探开发研究院,陕西 西安 710021)

摘要:鄂尔多斯盆地合水地区长7油层组为典型的致密油储层,伊利石平均含量高达9.1%是其重要特征,也是控制储层性能的关键因素。扫描电镜、铸体薄片、能谱分析、X-衍射等分析表明,合水地区长7油层组发育浊流沉积的极细砂岩,孔隙类型以长石溶蚀孔为主,且发生溶蚀的长石均为钾长石;伊利石化学成分复杂,以分散杂乱片状为主,仅分布于残余粒间孔隙内,且岩石粒度越细伊利石含量越高;与相邻泥岩相比,粘土矿物相对含量相似,但砂岩中钾长石/斜长石比值小于泥岩。合水地区长7沉积时期火山活动强烈,具有早期蒙脱石形成的地质条件,同时伊利石产状具有蒙脱石化的特征,且镜下可见大量的杂基伊利石化,表明研究区伊利石主要由大量蒙脱石等杂基转化而来;而研究区最高古地温一般不超120℃,也无外来富钾热流体的加入,不具备其他成因伊利石大量生成的地质条件。

关键词:致密油;伊利石;储层特征;长7油层组;合水地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Genesis of illite in Chang 7 tight oil reservoir in Heshui area, Ordos Basin

Tian Jianfeng¹, Gao Yongli², Zhang Pengbo¹, Wang Xiujuan³, Yang Youyun¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: Chang 7 reservoir in Heshui area, Ordos Basin is a typical tight oil reservoir with high content of illite up to 9.1%, which is the key factor controlling the quality of reservoir. Analyses of the composition, distribution and occurrence of illite through SEM, EDS, cast thin section and X-diffraction show that the Chang 7 reservoir is very fine turbidity sandstones. The pervasive dissolution of K-feldspar yield lots of secondary pore which is the main pore type. The illites are complex in chemical composition and are mainly in scattered, chaotic sheet-like shape. They only occur in residue intergranular pores. And their content increases with the decreasing of grain size. In comparison with the adjacent shales, the relative content of clay mineral is similar, but the K-feldspar/plagioclase ratio is smaller. Volcanic activities were very intense during the deposition of Chang 7, which provides the favorable condition for smectite development at the early diagenetic stage. The smectites were transformed to illites subsequently. This process may be the main genesis of illite in Chang 7, as illitization of smectite is very common. In addition, the palaeo-geotemperature in the study area is generally lower than 120 °C and there are no external potassium-rich hot fluid input, making it impossible for the formation of illite of other genesis.

Key words: tight oil, illite, reservoir characteristics, Chang 7 oil reservoir, Heshui area, Ordos Basin

致密油是当今全球油气勘探开发的热点之一,在我国鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、四川盆地以及松辽盆地等主要盆地广泛分布^[1],资源潜力巨大,仅鄂尔多斯盆地晚三叠系延长组致密油资源量就高达 $35.5 \times 10^8 \sim 40.6 \times 10^8 \text{ t}^{[2]}$,其中长7是最主要的致密油储层,但是受前期认识程度和开采技术的局限,长7油层组一直作为中生界的生油层进行研究,对其储层特征

的研究较少。近年来,随着盆地勘探程度的不断提高,长7油藏不断获得突破,发现了多个含油富集区^[3],盆地西南部合水地区里17、里152、西233、里47、庄230等一批井压裂后,获高产工业油流(大于20 t/d),预示着巨大的勘探潜力。储层研究是致密油勘探开发的灵魂^[2],合水地区长7致密油储层中伊利石含量异常高,是控制长7致密油储层物性的主要因素。因此伊利石

收稿日期:2013-03-31;修订日期:2013-08-10。

第一作者简介:田建锋(1980—),男,博士,讲师,碎屑岩储层地质学。E-mail: tjf21991@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41202105);国家科技重大专项(2011ZX05044-02)。

的成因及其对储层物性的影响,成为合水地区长7致密油研究的重点之一。

1 储层基本特征

依据沉积旋回,自下而上长7油层组细分为长7³、长7²和长7¹3个小层^[3],合水地区长7油层组各小层厚度30~40 m,其中长7³主要为半深湖-深湖相夹凝灰质暗色泥岩和油页岩,油页岩厚度15~40 m;而长7²和长7¹发育大套浊积砂体,砂岩累计厚度20~50 m,与下部长7³油页岩紧密接触,形成了大面积的致密油。

563个铸体薄片和445个图像粒度分析结果表明,合水地区长7砂岩为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩(图1),粒度中值主要为3~4(Φ 值),属于极细砂岩,次棱角状,分选中等-差。填隙物包括伊利石、铁白云石、铁方解石、自生石英胶结和长石加大,局部地区还可见绿泥石胶结,填隙物总量10.0%~30.0%,平均含量13.7%,其中伊利石平均含量高达9.1%,占填隙物总量的66.0%,是西峰、姬塬、华庆等地区长8

储层中伊利石含量的2~4倍,铁边城长7储层中的伊利石也不到研究区的一半(表1)。

合水地区长7油层组2700多个实测物性数据表明,储层渗透率为 $0.05 \times 10^{-3} \sim 0.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $0.13 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;孔隙度7.0%~10.0%,平均8.8%。储层孔隙类型包括粒间孔、长石溶孔、岩屑溶孔以及少量的微孔、微裂缝,平均面孔率2.4%,其中长石溶蚀孔占绝对主导,平均1.32%,其次为粒间孔0.72%。

2 伊利石产状、成分及分布规律

2.1 伊利石以分散杂乱片状为主,少量蜂窝状,孤立的丝缕状难见

伊利石晶体结构与白云母的基本相同,也属于2:1型结构单元层的二八面体型,与白云母不同的是层间K⁺的数量比白云母少,而且有水分子存在,因此伊利石也称为水白云母或水云母。伊利石单体常呈二向延长的(弯曲)片状(长宽比<3)和一向延长的板条状(长宽比3~50)及纤维状(长宽比>50)^[4]。片状伊利石集合体可表现为杂乱堆积、近平行排列或贴粒状和似蜂窝状等多种形式,纤维状伊利石集合体呈孔隙充填丝缕状(又称发丝状)和搭桥状产出。铸体薄片、扫描电镜和X-衍射分析均表明合水地区长7砂岩中普遍发育伊利石,但由于其晶体微小,偏光显微下观察不到单体形态,集合体表现为分散污浊状(图2a,b);扫描电镜下大多呈杂乱分散不规则弯曲片状(图3b,d),也可见少量蜂窝状伊利石(图3e),还可见部分云母颗粒局部或全部蚀变成近平行排列的片状伊利石(图3a),但极难见到单独产出的丝缕状伊利石(图3c),它们一般与各种片状伊利石伴生,分布在片状伊利石的边缘(图3b,c,e),总体含量相对较低。

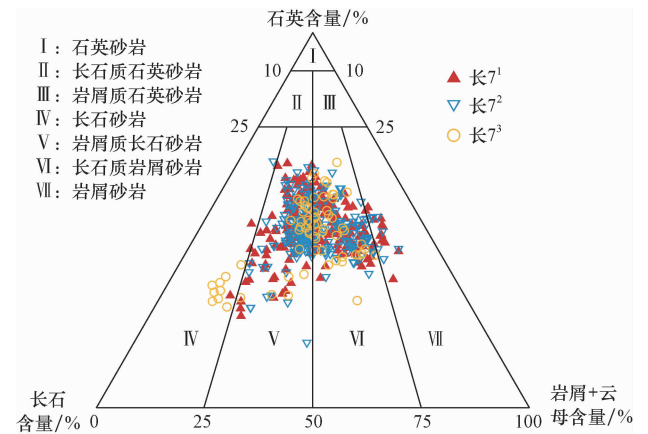


图1 合水地区长7砂岩三角分类

Fig.1 Ternary diagram for classification of Chang 7 sandstone in Heshui area

表1 合水地区长7及邻区长8填隙物含量对比

Table 1 Comparison of matrix contents between Chang 7 in Heshui area and Chang 8 in adjacent area

地区	层位	填隙物含量/%									样品数/ 个
		高岭石	伊利石	绿泥石	方解石	铁方解石	硅质	铁白云石	其他	合计	
铁边城	长7	3.7	4.2	0.3	4.0	0	0.2	0.5	0.1	14.1	75
姬塬	长8 ¹	1.0	3.2	1.2	0.1	5.1	1.6	0	0.5	12.7	78
华庆	长8 ¹	0.3	4.0	1.8	0.4	3.7	1.7	0.1	0.5	12.5	64
西峰	长8 ¹	0.9	1.4	3.6	0.9	0.8	1.9	0	0.4	9.9	147
	长7 ¹	0	8.7	0.4	0.3	1.1	1.2	1.9	0.3	13.9	130
	长7 ²	0	9.2	0.4	0.2	1.0	1.3	1.4	0.3	13.8	140
合水	长7 ³	0	9.2	0.3	0.1	0.8	1.2	1.3	0.4	13.3	31
	长8 ¹	0.3	2.7	2.9	0.2	2.1	1.6	0.1	0.9	10.7	181
	长8 ²	0.1	0.9	7.0	1.0	2.3	1.0	0	0.6	12.9	110

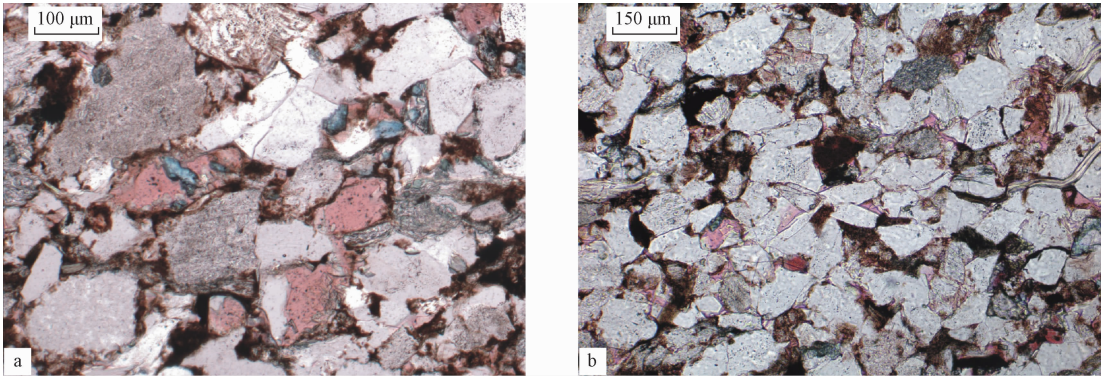


图 2 合水地区长 7 填隙物及孔隙分布特征

Fig. 2 Distributions of matrix and pores of Chang 7 sandstone in Heshui area

- a. 庄 185 井, 1 886 m, 长石溶蚀孔发育, 溶蚀孔内可见铁白云石充填, 粒间孔被污浊状伊利石充填;
b. 宁 66 井, 1 538. 12 m, 石英加大较发育, 粒间孔大多被污浊状伊利石充填

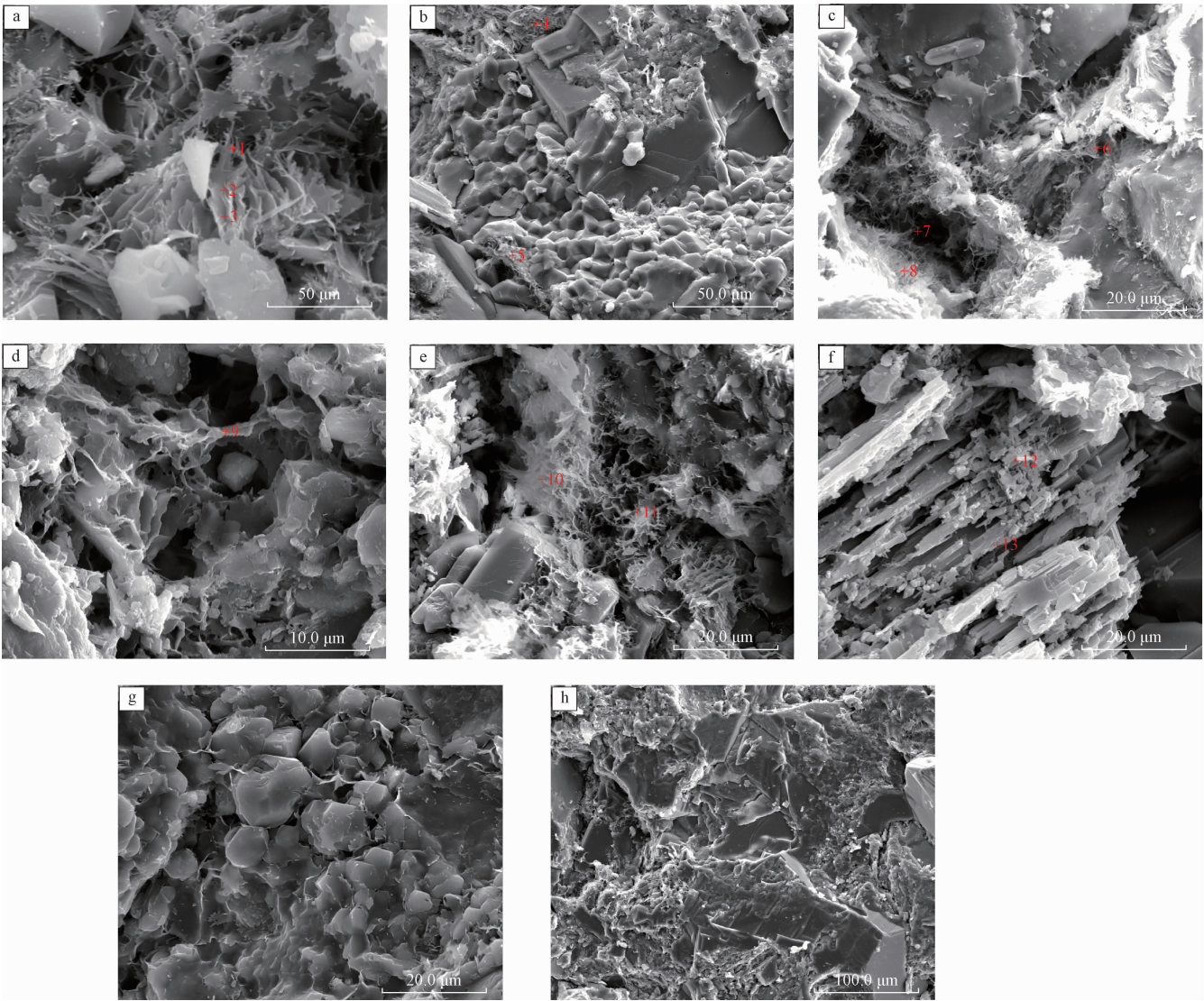


图 3 合水地区长 7 伊利石分布特征

Fig. 3 Scanning electron micrographs illustrating the texture and morphology of illite in Chang 7, Heshui area

- a. 云母伊利石化, 西 99 井, 1 726. 4 m; b. 分散片状伊利石, 里 17 井, 1 826. 5 m; c. 丝缕状伊利石, 里 17 井, 1 826. 5 m;
d. 片状伊利石, 宁 75 井, 1 592. 8 m; e. 杂乱片状似蜂窝状伊利石, 里 180 井, 2 048. 2 m; f. 钾长石溶蚀残余, 宁 53 井, 1 791. 8 m;
g. 杂基伊利石和自生石英, 庄 230 井, 1 744. 9 m; h. 杂基伊利石化, 宁 58 井, 1 465. 2 m

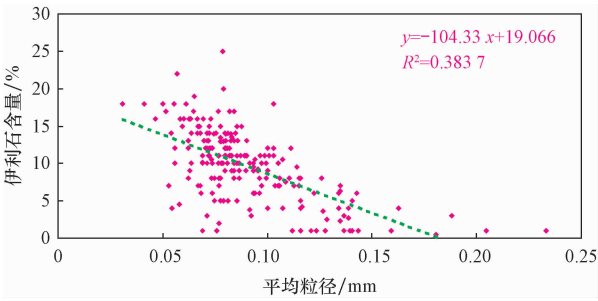


图 4 合水地区长 7 伊利石含量与平均粒径交会图

Fig. 4 Illite content vs. average grain size of Chang 7 in Heshui area

2.2 伊利石含量与岩石结构相关

通过对合水地区长 7 大量薄片和粒度分析资料的统计表明,伊利石含量与砂岩粒度具有明显的负相关关系(图 4),砂岩粒度越细,伊利石含量越高,表明沉积水动力是控制伊利石分布的重要因素。邻区(西峰、姬塬、华庆)长 8 和铁边城地区长 7 油层组主要为三角洲相细砂岩,而非浊流沉积的极细砂岩,可能是其伊利石含量相对少的主要原因。

2.3 伊利石与自生石英具有明显的排斥性

合水地区长 7 砂岩储层中自生石英加大和自生石英雏晶均较发育,铸体薄片鉴定平均含量为 1.2%,由于砂岩粒度细、泥质含量高,铸体薄片鉴定的石英胶结物含量可能偏低,扫描电镜下石英胶结含量普遍大于 2%,主要为 2%~5%,且自生石英与伊利石具有明显的排斥性。从图 3b 可以看到,伊利石呈分散杂乱片状分布,其边缘可见少量丝缕状伊利石,伊利石发育的位置,石英加大不发育或自生石英雏晶不发育,且石英加

大和自生石英雏晶表面均无任何形式的伊利石出现。

2.4 伊利石仅分布于原生孔内

长石溶孔是合水地区长 7 储层最主要的孔隙类型,占总孔隙的 55%,但是铸体薄片和扫描电镜观察均发现,伊利石仅分布于原生粒间孔内,溶蚀孔中只有少量的铁白云石部分充填,未见任何形态的伊利石(图 2,图 3f)。

3 伊利石化学成分及相对含量

3.1 储层中伊利石成分复杂

研究区伊利石的产状可分为分散杂乱片状、云母蚀变片状和(片状边缘的)丝缕状 3 种类型,能谱测试表明,合水地区长 7 伊利石成分复杂,各种产状的水云母均含有一定量的 Fe 和 Mg 等杂质离子,其中 FeO 含量为 3.21%~7.49%,相对较高(FeO 含量过高样品是测试分析的误差,因纤维状伊利石晶间孔发育,能谱分析易受到样品下部成分影响),表明伊利石成分不纯(表 2)。不同产状的伊利石 Si/Al 比值具有明显差异性(表 2),分散杂乱片状伊利石的 Si/Al 为 2.59~2.67(图 3b 点 4~5),片状矿物未完全转化的 Si/Al 为 2.3~2.6(图 3a 点 1~3),似蜂窝状 Si/Al 为 1.92~2.18(图 3e 点 10~11),转化较彻底的 Si/Al 为 1.6~1.83(图 3d 点 9),丝缕状水云母 Si/Al 为 1.57~1.88(图 3c 点 6~8)。

3.2 砂岩和泥岩中粘土矿物相对含量相似

从砂岩和泥岩的 X-衍射全岩分析来看(图 5),除泥岩中含有较高的黄铁矿外,两者主要矿物种类相

表 2 合水地区长 7 油层组伊利石和钾长石扫描电镜能谱分析晶体化学成分

Table 2 Chemical composition of illite and K-feldspar by SEM-EDS in Chang 7, Heshui area

矿物类型	点号	矿物含量/%							
		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO
云母蚀变伊利石	1			21.34	65.52	7.84			5.29
	2		1.64	22.65	65.82	6.68			3.21
	3		1.26	24.36	65.75	5.74			2.88
	4		1.91	15.04	45.83	9.57	2.28		25.36
纤维状伊利石	5		1.76	21.72	68.35	4.90			3.27
	6		3.02	19.36	35.75	4.30	0.80		36.78
	7		1.47	23.98	57.96	6.24		2.86	7.49
	8		3.17	23.31	51.69	3.58	1.06	4.65	12.54
分散杂乱片状伊利石	9	1.57	1.94	27.48	59.12	4.83		1.05	4.02
	10		1.42	24.53	63.10	7.68			3.27
	11		2.15	27.15	61.42	5.39			3.89
钾长石	12			18.14	71.70	10.16			
	13			17.71	67.80	14.48			

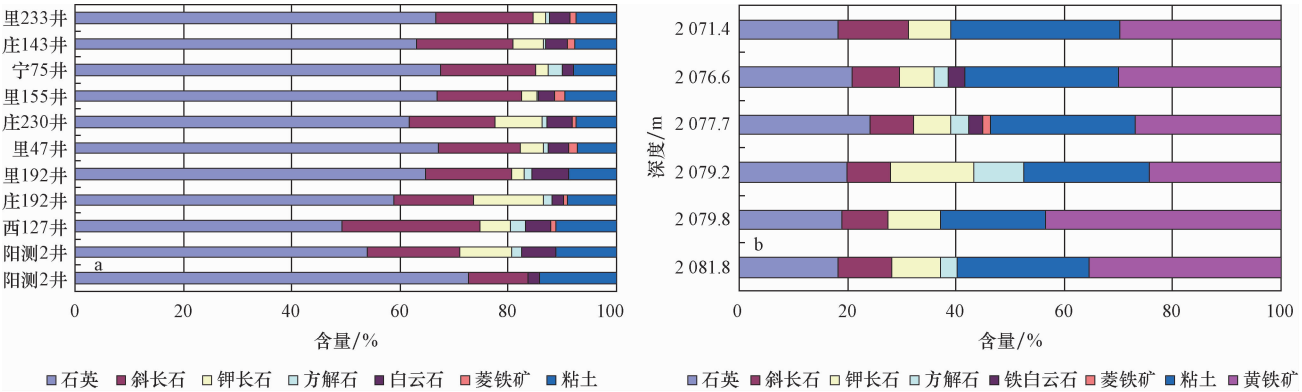


图5 合水地区长7砂岩和页岩X-衍射全岩分析结果

Fig.5 Mineralogy of the profile obtained through XRD of whole-rock for Chang 7 sandstone and shale in Heishui area
a. 砂岩;b. 里68井,长7页岩^[5]

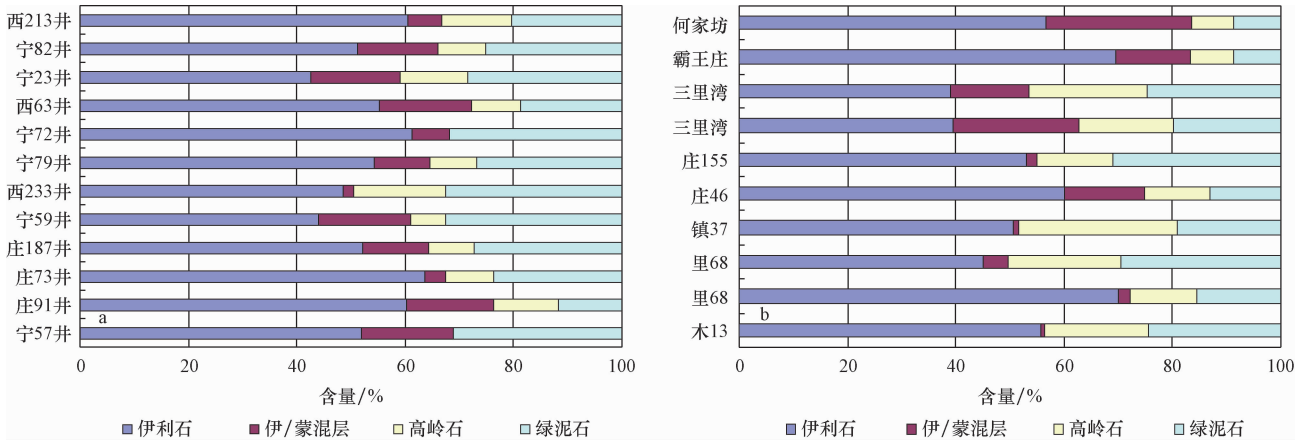


图6 合水地区长7砂岩和页岩X-衍射粘土矿物含量分析结果

Fig.6 Clay mineral composition profile of Chang 7 sand stone and shale by XRD in Heshui area
a. 砂岩;b. 里68井,长7页岩^[5]

同,但砂岩中斜长石含量远高于钾长石,斜长石与钾长石比值平均为 3.27,而泥岩中斜长石与钾长石含量相当,斜长石与钾长石比值平均为 1.02。但粘土矿物 X-衍射分析表明,砂泥岩中粘土矿物的相对含量无明显差异,均以伊利石为主,平均含量分别为 53.8% 和 53.9%,其次为绿泥石,分别为 25.9% 和 19.5% (图6)。

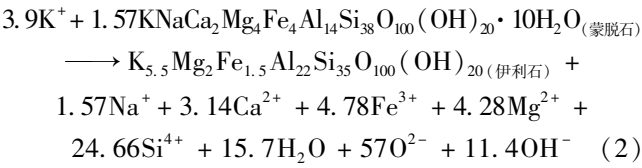
4 伊利石成因

4.1 伊利石常见成因类型及特征

伊利石按成因可分为原生和自生两种类型的伊利石,原生成因伊利石是与陆源碎屑颗粒一起沉积的伊利石,主要受沉积物源和构造条件控制,一般而言,物源以变质岩为主,泥岩或砂岩中的泥质往往富含伊利石,当物源富含火山碎屑岩和凝灰岩时,泥岩粘土往往富含蒙脱石^[5-6];在强烈的造山带,由于陆源区快速抬升、剥蚀,经历风化作用时间很短,粘土矿物组成往往

富含伊利石^[6]。
自生伊利石是成岩期形成的伊利石,是碎屑岩中最主要的类型,按物质来源可分为蒙脱石转化型、高岭石转化型和直接结晶型 3 种类型。
蒙脱石转化型:随着埋深和温度的升高,蒙脱石将发生脱水作用;当温度达到在 70 ~ 100 ℃ 时,蒙脱石将普遍发生伊利石化^[7]。该反应是碎屑岩中(特别是泥岩、页岩)最普遍的成岩过程。这些蒙脱石即可以是原生沉积的,也可以是早成岩阶段自生形成的,其转化过程可分为固态反应和溶解-沉淀反应两种机理^[8-10]。前者的特点是 2 : 1 的蒙皂石层在整个反应过程中始终保持完整,反应由 Al³⁺ 替换四面体中的 Si⁴⁺,再由 K⁺ 替换其他阳离子,按如下反应(1)进行:
$$4.5K^{+} + 8Al^{3+} + KNaCa_{2}Mg_{8}Fe_{4}Al_{14}Si_{38}O_{100}(OH)_{20} \cdot 10H_{2}O_{(蒙脱石)} \longrightarrow K_{5.5}Mg_{2}Fe_{1.5}Al_{22}Si_{35}O_{100}(OH)_{20(伊利石)} + Na^{+} + 2Ca^{2+} + 2.5Fe^{3+} + 2Mg^{2+} + 3Si^{4+} + 10H_{2}O$$

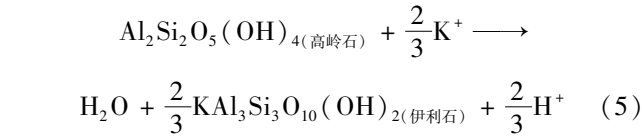
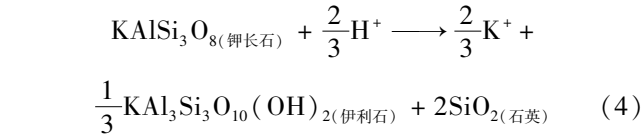
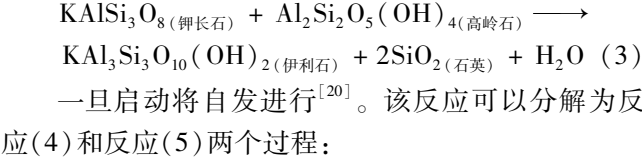
(1)
溶解-沉淀反应是通过溶解 2 : 1 的蒙皂石层,形成新的伊利石层,按如下反应(2)进行:



不管是那种反应机理,均需要大量 K^+ 供应,并释放出 Fe^{2+} , Mg^{2+} 和 Si^{4+} 等离子,在相对封闭体系内, K^+ 主要由钾长石的溶蚀提供,也可由富钾的蒙脱石自身提供^[11]。

通过对比 Salton Sea 地热田与 Gulf Coast 沉积物中蒙脱石伊利石化的差异,认为在开放环境下,蒙脱石通过溶蚀-沉淀形成伊利石,而在封闭环境下,蒙脱石以固态反应机理形成伊利石^[12]。从热力学角度来看,固态反应机理较溶解-沉淀反应机理更易发生^[13],具体的转化机理可以通过对比先存矿物与伊利石的产状确定。固态反应机理是一个交代过程,故形成的伊利石产状与先存蒙脱石相似,由原生蒙脱石转化形成的伊利石分布于粒间孔隙内,常呈它形分散片状,而由自生蒙脱石形成的伊利石则可呈蜂窝状;由于交代程度的非均质性,伊利石的成分常具有不均一性。溶蚀-沉淀反应机理形成的伊利石产状与先存蒙脱石相关性差,可呈自形-半自形的假六边形、板条状和纤维状,因属于开放环境下溶液结晶的产物,成分相对较均一。

高岭石伊利石化:该类伊利石在砂岩储层中最为常见,如北海 Ellon 油田 Brent 组砂岩^[14]、挪威 Haltenbanken 地区 Garn 组砂岩^[15]、鄂尔多斯盆太原组砂岩^[16]、四川盆地三叠系须家河组^[17]和沙特阿拉伯石炭系-二叠系 Unayzah 组砂岩^[18]等,且均在温度超过 120 ℃ 的地层中自生伊利石急剧增加^[14-20]。热力学计算表明,砂岩成岩阶段钾长石与高岭石反应生成伊利石的过程为一个负熵反应,按反应(3)进行:



即钾长石通过消耗 H^+ 发生溶解提供 K^+ ,而 K^+ 与高岭石反应又能够释放 H^+ ,产生的 H^+ 进一步溶解钾长石。早成岩阶段,砂岩处于开放环境之中,孔隙流体内的 K^+ 迁移能力强, K^+ 浓度难以达到伊利石结晶的 K^+/H^+ 比值范围。而在中成岩阶段至 120 ℃ 以前,

有机质成熟释放大量有机酸,导致孔隙流体呈酸性, H^+ 浓度过大而达不到伊利石结晶的 K^+/H^+ 比值范围,以形成高岭石为主;有机酸影响弱的地方形成的高岭石数量也有限,即使能够发生反应(4),形成的伊利石也很少,如果有其他成因的高岭石(如大气淡水淋滤),也难以形成大量的伊利石,因为只有温度超过 120 ℃ 后,伊利石的的结晶速率才明显加快^[21]。因此,温度低于 120 ℃ 的地层难见高岭石发生伊利石化,而当温度超过 120 ℃ 以后,伊利石的结晶速率明显增加,同时温度越高,孔隙流体逐渐转变为碱性,且达到伊利石结晶所需要的 K^+/H^+ 比值也在减小^[16-17,22],一旦达到伊利石结晶范围时,反应(3)将快速发生,直到高岭石和钾长石两者中一种产物基本耗尽为止^[16-18],故高岭石伊利石化的规模由先存高岭石和钾长石中物质的量较少的一种物质决定。

该类伊利石是在高岭石的基础上,通过钾长石溶蚀提供钾形成 1M 型伊利石^[23],其分布明显受先存高岭石分布控制,常呈纤维状和搭桥状分布于残余粒间孔隙和长石溶蚀孔隙内^[21]。因为 1M 伊利石有 (010)、(110)和(110)3 个生长方向,其中(010)面暴露有八面体配位的 OH^- ,易于与有机或无机功能团络合(如有机酸根),从而阻止(010)面的继续生长^[4,24],所以基本都呈纤维状产出;但在北海 Ellon 油田 Brent 组砂岩中伊利石的产状存在异常,该区的高岭石主要为大气淡水淋滤的产物^[14],在 3 205 m 处高岭石发生伊利石化形成纤维状伊利石,随着埋深的进一步增加,伊利石形态逐渐变为板条状和片状^[14],可能是深部无有机酸根离子络合影响的结果,其最终原因还有待进一步研究。高岭石化伊利石是快速结晶的产物,化学成分较均一。

直接结晶型:在埋藏深度较大、温度较高的条件,如果有外来富钾高温流体的加入,可导致伊利石直接结晶^[25-26]或蒙脱石与外来流体反应形成^[23]。伊利石的分布与地层埋藏史无直接关系,主要受外来流体的波及范围控制,由于外来流体和孔隙流体性质的不确定性,伊利石的产状也具有多样性,如德国北部的二叠系 Rotliegende 砂岩中的伊利石为包裹颗粒的片状和向孔隙伸展的板条状和纤维状^[26],巴西南部早古生代 Guaritas Allogroup 砂岩为颗粒包膜状和搭桥状^[25],而 Illinois 盆地下古生界砂岩为板条状和片状伊利石^[23]。该类型伊利石在世界范围内分布局限,不属于常见的自生伊利石类型。

4.2 合水地区长7伊利石成因类型

合水地区伊利石平均含量高达 9.1%,以分散片状为主,仅分布于粒间孔隙内,含量高低受岩石结构控

制,化学成分复杂,这些特征与蒙脱石转化生成的伊利石特征相对应;同时浊流沉积砂岩杂基含量一般较高,且可见大量杂基伊利石化(图3g,h),表明合水地区长7伊利石主要为大量蒙脱石等杂基转化的产物。砂岩泥岩成分对比表明,砂岩中钾长石溶蚀更为普遍,钾长石溶蚀为蒙脱石伊利石化提供 K^+ ,如果该过程按照反应(4)进行,势必将在溶蚀孔中可见一定量的伊利石,但研究区溶蚀孔中无任何产状的伊利石,这是因为蒙脱石伊利石化所需 K^+ 和 Al^{+3} 离子浓度比结晶形成纤维状伊利石要低的多^[11,27],钾长石溶蚀时达到了蒙脱石伊利石化的条件,但未达到从孔隙流体中结晶出伊利石的条件。而伊利石与自生石英的相斥现象,与沙特阿拉伯的Unayzah砂岩相似^[19],是相互竞争结晶基底的结果,其中石英与伊利石为同一时期的产物。除上述伊利石的分布、产状和成分特征外,还有如下证据:

- 1) 研究区砂岩岩屑含量高,主要为千枚岩(3.6%)、石英片岩(2.3%)和喷发岩(2.2%),且沉积时期火山活动频繁^[28],表明物源区具有丰富的火山碎屑岩和凝灰岩,为形成早期蒙脱石提供了物质基础。
- 2) 研究区长石溶蚀发育,但溶蚀孔中未见伊利石,且12个样品的能谱分析表明,发生溶蚀的是热力学上相对稳定的钾长石而不是更易溶蚀的斜长石,导致砂岩中斜长石与钾长石的比例明显高于泥岩中斜长石与钾长石的比例,这种反常现象的出现,说明钾长石溶蚀时期存在钾的大量消耗,先存蒙脱石的伊利石化可以导致该反应的有效进行^[16-17]。
- 3) 不具备高岭石大量伊利石化的条件:高岭石伊利石化大量发生的温度一般超过120℃,合水长7地层温度一般不超过120℃^[29],且地层中高岭石难见,更未见到高岭石的伊利石化,其下部长8地层中高岭石较常见^[30-31],其边缘发生部分伊利石化,形成丝缕状伊利石,但高岭石和钾长石含量普遍较高,充分说明合水长7不具备高岭石转化形成大量伊利石的条件。
- 4) 不具备直接结晶型伊利石形成的条件,鄂尔多斯盆地构造稳定,尚无证据表明长7油层组内部有过富钾热流体的充注;即使有过富钾流体的作用,伊利石也将分布于利于外来流体活动的大套相对优质储集砂层中,而粒度细、物性差的长7砂岩中难以发育。因此,也不存在直接结晶形成大量伊利石的地质条件。

5 结论

1) 合水地区长7致密油储层为极细砂岩,伊利石平均含量高达9.1%,以钾长石溶蚀孔为主,其次为残余粒间孔。

2) 伊利石主要为杂乱分散片状,少量丝缕状和搭桥状。砂岩粒度越细,伊利石含量越高,且仅分布于粒

间孔隙内。

3) 研究区砂、泥岩主要粘土矿物相对含量相似,但砂岩中斜长石/钾长石比高于泥岩。伊利石成分复杂,是先存蒙脱石伊利石化的产物,所需钾由钾长石溶蚀提供,该过程促进了长石溶蚀孔的发育。

4) 长7沉积时期盆地周缘强烈的火山活动提供了充足的火山物质,受浊流沉积环境的影响,在合水地区部分火山物质以杂基的形式与极细砂岩一起沉积,在早成岩A期转化成蒙脱石,并最终在早成岩B期和中成岩A期,蒙脱石转化成伊利石。

参 考 文 献

- [1] 贾承造,邹才能,李建忠,等.中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J].石油学报,2012,33(3):343-350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 343-350.
- [2] 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):173-186.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations; taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-186.
- [3] 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.
- [4] Güven Necip. Mica structure and fibrous growth of illite[J]. Clays and Clay Minerals, 2001, 49(3): 189-196.
- [5] 王社教,李登华,李建忠,等.鄂尔多斯盆地页岩气勘探潜力分析[J].天然气工业,2011,31(12):40-46.
Wang Shejiao, Li Denghua, Li Jianzhong, et al. Exploration potential of shale gas in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 40-46.
- [6] 徐同台,王行信,张有瑜,等.中国含油气盆地粘土矿物[M].北京:石油工业出版社,2003,316-336.
Xu Tongtai, Wang Hangxin, Zhang Youyu, et al. Clay minerals of petroliferous basins in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 316-336.
- [7] 张峭楠,丁晓琪,万友利,等.致密碎屑岩中粘土矿物的形成机理与分布规律[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(3):174-182.
Zhang Shaonan, Ding Xiaoqi, Wan Youli, et al. Formation mechanism and distribution of clay minerals of deeply tight siliciclastic reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(3): 174-182.
- [8] Awwiller D N. Illite/smectite formation and potassium mass transfer during burial diagenesis of mudrocks: a study from the Texas Gulf Coast Paleocene-Eocene[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1993, 63(3): 501-512.
- [9] 郭金华,余素玉,许仕策,等.蒙脱石伊利石化反应机理和框架性

- 行为模式[J]. 地质科学, 1999, 34(4): 498–505.
- Wu Jinha, Yu Suyu, Xu Shice, et al. Smectite illitization reaction mechanism and framework model of its behaviours[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(4): 498–505.
- [10] Stoker Trevor M, Harris Nicholas B, Elliott W, et al. Diagenesis of a tight gas sand reservoir: Upper Cretaceous Mesaverde Group, Piceance Basin, Colorado[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 40(1): 48–68.
- [11] Niu B, Ishida H. Different rates of smectite illitization in mudstones and sandstones from the Niigata Basin, Japan[J]. *Clay Minerals*, 2000, 35(1): 163–173.
- [12] Yau Y C, Peacor D R, McDowell S. Smectite-to-Illite Reactions in Salton Sea Shales: a transmission and analytical electron microscopy study[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1987, 57(2): 335–342.
- [13] Cuadros J. Clay crystal-chemical adaptability and transformation Mechanisms[J]. *Clay Minerals*, 2012, 47(2): 147–164.
- [14] Hassouta L, Buatier M D, Potdevin J L, et al. Clay diagenesis in the sandstone reservoir of the Ellon field (Alwyn, North Sea)[J]. *Clay and Clay Minerals*, 1999, 47(3): 269–285.
- [15] Chuhan Fawad A, Bjørlykke K, Lowrey C J. Closed-system burial diagenesis in reservoir sandstones: examples from the Garn formation at Haltenbanken area, offshore Mid-Norway[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(1): 15–26.
- [16] 黄思静, 孙伟, 黄培培, 等. 鄂尔多斯盆地东部太原组碎屑岩中自生伊利石形成机制及其对储层形成的影响[J]. *矿物岩石*, 2009, 29(4): 25–32.
- Huang Sijing, Sun Wei, Huang Peipei, et al. The origin of authigenic illite and its effects on reservoir quality: a case study from Taiyuan sandstone, Eastern Ordos Basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2009, 29(4): 25–32.
- [17] 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究[J]. *地球化学*, 2009, 38(5): 498–506.
- Huang Sijing, Huang Keke, Feng Wenli, et al. Mass exchanges among feldspar, kaolinite and illite and their influences on secondary porosity formation in clastic diagenesis—a case study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiache Formation, Western Sichuan Depression[J]. *Geochimica*, 2009, 38(5): 498–506.
- [18] Franks S G, Zwingmann H. Origin and timing of late diagenetic illite in the Permian-Carboniferous Unayzah sandstone reservoirs of Saudi Arabia[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(8): 1133–1159.
- [19] 孟万斌, 吕正祥, 冯明石, 等. 致密砂岩自生伊利石的成因及其对相对优质储层发育的影响[J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 783–790.
- Meng Wanbin, Lü Zhengxiang, Feng Mingshi, et al. The origin of authigenic illite in tight sandstones and its effect on the formation of relatively high-quality reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 783–790.
- [20] 魏文文, 黄思静, 郇金来. 伊利石形成相关反应的热力学计算及其对砂岩成岩作用研究的意义[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(1): 20–25.
- Wei Wenwen, Huang Sijing, Huan Jinlai. Thermodynamic calculation of illite formation and its significance on research of sandstone diagenesis[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(1): 20–25.
- [21] Lander R H, Bonnell L M. A model for fibrous illite nucleation and growth in sandstones[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(8): 1161–1187.
- [22] Berger G J, Lachapagne C, Velde B, et al. Kinetic constraints on illitization reactions and the effects of organic diagenesis in sandstone/shale sequences[J]. *Applied Geochemistry*, 1997, 12(1): 23–35.
- [23] Grathoff G H, Moore D M, Hay R L, et al. Origin of illite in the lower Paleozoic of the Illinois basin: evidence for brine migration[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113(8): 1092–1104.
- [24] Small J S, Hamilton D L, Habesch S. Experimental simulation of clay precipitation within reservoir sandstones: mechanism of illite formation and controls on morphology[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1992, 62(3): 520–529.
- [25] Anderson J M, Ana M M, Horst Z, et al. Illite authigenesis in sandstones of the Guaritas Allogroup (Early Paleozoic): implications for the depositional age, stratigraphy and evolution of the Camaquã Basin (Southern Brazil)[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2010, 29(2): 400–411.
- [26] Clauer N, Liewig N, Zwingmann H. Time-constrained illitization in gas-bearing Rotliegende (Permian) sandstones from northern Germany by illite potassium-argon dating[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(3): 519–543.
- [27] Huang W L, Longo J M, Pevear D R. An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1993, 41(2): 162–177.
- [28] 邓秀芹, 蔺昉晓, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积演化及其与早印支运动关系的探讨[J]. *古地理学报*, 2008, 10(2): 159–166.
- Deng Xiuqin, Lin Fangxiao, Liu Xianyang, et al. Discussion on relationship between sedimentary evolution of the Triassic Yanchang Formation and the Early Indosinian Movement in Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(2): 159–166.
- [29] 郭彦如, 刘俊峰, 杨华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组低渗透致密岩性油藏成藏机理[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(4): 417–425.
- Guo Yanru, Liu Junbang, Yang Hua, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of low permeable tight lithologic oil reservoirs in the Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 417–425.
- [30] 樊婷婷, 柳益群, 黄进腊, 等. 合水地区长8储层成岩作用及对储层物性的影响[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(3): 481–487.
- Fan Tingting, Liu Yiqun, Huang Jinla, et al. The diagenesis of Chang 8 reservoir sandstone and its effect on reservoir quality in the Heshui region[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2010, 40(3): 481–487.
- [31] 王金鹏, 彭仕宓, 赵艳杰, 等. 鄂尔多斯盆地合水地区长6–8段储层成岩作用及孔隙演化[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2008, 30(2): 170–174.
- Wang Jinpeng, Peng Shimi, Zhao Yanjie, et al. Diagenesis and porosity evolution of Chang6–8 reservoir in the Heshui region[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(2): 170–174.