

川西坳陷中段沙溪庙组砂岩中水-岩-烃作用特征

吕正祥¹, 杨相¹, 卿元华^{1,2}, 叶素娟³

(1. 成都理工大学 能源学院, 四川 成都 610059; 2. 中国石油 塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000;

3. 中国石化 西南油气田分公司, 四川 成都 610081)

摘要:通过显微岩石矿物学分析、扫描电镜与能谱分析、阴极发光分析等确定了伴随川西坳陷中侏罗统沙溪庙组砂岩孔隙流体演化形成的自生矿物类型与产出关系,利用包裹体温度分析、同位素地质温度分析等确定了主要自生矿物的形成时期,主要利用电子探针微区成分分析技术测定了不同阶段形成的自生矿物的化学组成,并运用同位素分析、地层水分析、粘土矿物X-射线衍射分析等技术进一步获得了孔隙流体的演化特征。沙溪庙组砂岩孔隙流体早期富镁、富铁、偏碱性,随着埋深的增加和烃类的进入等逐渐向偏酸性演化,在转化过程中形成了绿泥石、石英、方解石、高岭石等矿物。自生绿泥石消耗了镁离子和铁离子,钠长石的溶蚀提供了钠离子,烃类注入提供了酸性流体,导致孔隙流体最终演化为现今富钠、富钙、偏酸性的CaCl₂型地层水特征。溶蚀作用改善了储层的储集性,自生绿泥石孔隙衬垫保护了原生孔隙,有利于形成有利储层。

关键词:水-岩-烃作用;砂岩储层;沙溪庙组;中侏罗统;川西坳陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Water-rock-hydrocarbon interactions in the Middle Jurassic
Shaximiao Formation sandstones, Western SichuanLv Zhengxiang¹, Yang Xiang¹, Qing Yuanhua^{1,2}, YE Sujuan³

(1. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China; 3. Southwest Oilfield Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: Water-rock-hydrocarbon interactions in the Middle Jurassic Shaximiao Formation sandstones, Western Sichuan, were studied to determine the relationship between authigenic mineral types and hydrocarbon generation through analyses of petrographic data, and scanning electron microscopy and cathode luminescence results. Formation timing of major authigenic minerals was also determined with analyses of inclusion temperature and isotope geo-temperature. Electron microprobe was employed to measure the chemical compositions of the minerals of different forming ages. Isotope analyses and formation water analyses were combined with X-ray diffraction to describe the evolving features of pore fluids of the formation. The result shows that the pore fluid in the Shaximiao Formation was originally characterized by high contents of Mg²⁺ and Fe²⁺, and high pH value. As burial depth increased and hydrocarbon entered, the fluid gradually turned acid and formed minerals such as chlorite, quartz, calcite, kaolinite, and etc, during the process. With authigenic chlorite consuming Mg²⁺, and Fe²⁺, feldspar providing Na⁺ and the charging of hydrocarbon providing acidic fluids, the pore fluids finally turned into this CaCl₂ type low-pH formation water with high content of Na⁺ and Ca²⁺. It should be noted that there are two factors that were favorable for the formation of good reservoirs: dissolution improved storage capacity of reservoirs and authigenic chlorite formed pore rim and helped preserving primary pores during the diagenetic process.

Key words: water-rock-hydrocarbon interaction; sandstone reservoir; the Shaximiao Formation; the Middle Jurassic; western Sichuan depression

水-岩-烃作用研究是研究油气等烃类进入储层后,与孔隙流体相互作用,并进一步影响流体与储层岩石相互作用的特点。在过去的研究中,很少有将三者融为一体进行分析的,而是将重点放在研究流体与岩石的作用,即水-岩作用。水-岩作用是一个十分复

杂的地球化学过程,受构造演化、岩石矿物组成、沉积环境、流体运移及成岩环境中物理化学条件等多种因素控制,最关键的是矿物与孔隙流体之间的相互作用条件、方式及随之发生的迁移特点与沉淀位置等^[1-6]。油气地质研究领域针对水-岩相互作用的研究重点主

收稿日期:2015-04-13;修订日期:2015-07-01。

第一作者简介:吕正祥(1965—),男,博士、教授级高级工程师,油气地质。E-mail:417330439@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41172119)。

要是作用过程中的化学、物理机理及地质应用^[7-9],许多作者从岩石学、同位素和元素地球化学等方面做了研究^[10-12],也有大量学者利用水中的化学组成和稳定同位素研究其与储层、油气的关系^[13-16]。近年来有关水-岩反应理论得到了大量应用,特别是基于热力学平衡原理的矿物溶解和沉淀的实验研究、理论应用及模拟技术等已发展成为十分成熟的技术^[17-19]。

对于古流体与成岩作用关系的探讨,以前人们更多地是以地层水分析资料为基础,但现存的油田水已经过后期的各种改造,并不能代表古水体在各阶段的演化特性,特别是经历了较长埋藏时期、具有多期成藏特点的油气藏,其中的水-岩-烃相互作用更为复杂。储层中的自生矿物是水-岩相互作用的产物,它们不仅记录了水-岩作用中的化学环境变化特点,而且还能捕获到许多水-岩-烃相互作用的信息,如自生矿物中包裹体对烃类注入和孔隙流体性质的记录、自生矿物同位素对水-岩-烃作用的反映,等等。通过对自生矿物的矿物学、地球化学与地层水等特征的综合研究,将能更为客观地反演储层埋藏过程中所经历的水-岩-烃作用特点。

川西坳陷中段中侏罗统沙溪庙组(J_2s)现今埋深2 000~2 500 m,厚度5 00 m左右,储集砂体主要分布在该套地层中部,上覆地层依次为晚侏罗统遂宁组(J_3s),平均厚度约320 m;蓬莱镇组(J_3p),厚约1 285 m;白垩系(K),厚约300 m。川西坳陷中段中侏罗统沙溪庙组气藏为多期聚集次生气藏^[20],研究 J_2s 砂岩中的水-岩-烃相互作用特点,有助于分析有利储层形成机理、预测有利储层分布和成藏特征等。

1 砂岩岩石学特征

储层岩石学特征是决定水-岩-烃相互作用特点的关键要素。川西坳陷中段 J_2s 砂岩主要为细粒、中粒长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩,矿物成分中石英(Q)占总碎屑颗粒含量的34%~62%,长石(F)占17.5%~38%,岩屑(R)占14%~38%,主要为喷出岩和沉积岩岩屑,点计法统计平均组分为 $Q_{48.3}F_{26.4}R_{25.3}$;杂基以伊利石质、绿泥石质为主,含量为0.1%~21.5%,平均6.3%;胶结物含量为4.4%~28.7%,平均12.9%,成分主要是绿泥石和方解石,次为石英,高岭石极少量;岩石接触关系以接触式、接触式-孔隙式为主;分选中等-较好。

2 水-岩作用形成的自生矿物类型及其演化序列

砂岩埋藏过程中,由于温度、压力的变化及粘土矿

物的转化等,孔隙流体地球化学性质发生变化,形成了多种自生矿物,即水-岩作用的产物,它们是砂岩中发生的水-岩作用的直接反映。

2.1 水-岩作用产物

根据大量薄片的显微镜下岩石与矿物学分析、X-射线衍射分析、扫描电镜与能谱分析及电子探针分析等,获得了砂岩中发生水-岩作用后的产物(自生矿物)信息。

1) 绿泥石

J_2s 砂岩中见有两种自生绿泥石产出形式。一种是自生绿泥石衬垫,绿泥石成纤(片)状微晶,垂直孔隙边缘生长,常成一等厚的衬垫,厚度从小于0.01 mm至大于0.01 mm不等,最厚者可达0.02 mm,作为孔隙内缘的衬垫产出。另一种是充填孔隙的自生绿泥石,绿泥石生长于砂岩的各类粒间孔隙中,自形好,为束状的六方片。

2) 石英

石英含量普遍很小,一般为0.1%~1%,少数样品达到4%。自生石英主要以次生加大和孔隙充填两种形式出现,次生加大形式的自生石英与自生绿泥石衬垫有互为消长关系,衬垫十分发育的样品石英加大弱,而在衬垫不发育区常见加大边生长。另一种是分散状的孔隙充填自形微晶石英,主要以晶粒状生长于残余原生孔隙,另见极少量生长于次生溶孔中。

3) 高岭石

部分样品中可见粒间溶蚀扩大孔内有书页状高岭石晶体,含量一般仅为0.5%~1%,最高达2%。

4) 方解石

J_2s 砂岩中的自生方解石含量仅次于自生绿泥石,主要有两期:一是成岩早期形成的含量超过20%的连晶方解石;二是斑状充填孔隙或交代颗粒的方解石,含量在0.5%~7%。

2.2 水-岩作用产物共生序列

通过大量岩石薄片的显微分析、阴极发光分析和扫描电镜分析等,可以识别出 J_2s 砂岩中自生矿物形成的相对顺序。在此基础上,利用自生矿物中的包裹体分析、同位素分析等技术确定其形成时期,从而建立起各种水-岩作用产物的共生序列。

2.2.1 自生矿物产出相对顺序

通过岩石薄片显微观察和扫描电镜分析等,识别出 J_2s 砂岩中的自生矿物形成相对顺序为:①连晶方解石(早期)发育区颗粒以点-线接触为主,其发育区域自生绿泥石孔隙衬垫不发育,表明其为埋藏后最早沉淀物,明显早于绿泥石衬垫;②自生绿泥石孔隙衬垫形

成早于石英次生加大和孔隙充填绿泥石等,最明显的判别特征是在衬垫发育颗粒边缘,无石英加大发育,石英加大均发育于衬垫不发育带^[21],孔隙充填绿泥石明显生长于衬垫包围的孔隙中,即形成于衬垫之后;③斑状分布的方解石(晚期)主要分布在溶蚀孔隙中,少量分布在绿泥石衬垫包围的孔隙中,说明它或与后期溶蚀同时进行、或形成于其后,且形成于衬垫之后;④自生石英在储层中表现为石英颗粒加大、充填原生孔和充填溶孔3种形式,加大形成于自生绿泥石孔隙衬垫之后(图1)、孔隙充填绿泥石之前,充填原生孔石英形成于后期方解石之前、早期方解石之后,充填溶孔石英形成时间最晚。

综上所述, J_2s 砂岩中发生的自生矿物形成相对顺序可大致由早到晚归纳为:早期方解石—自生绿泥石孔隙衬垫、充填原生孔石英—石英加大—孔隙充填绿泥石、自生高岭石—晚期方解石、晚期充填石英。

2.2.2 水-岩作用发生时期确定

确定了砂岩中的自生矿物类型后,水-岩作用的发生时期是进一步分析砂岩埋藏过程中水-岩作用特点、特别是流体演化特征的关键。

1) 自生矿物形成温度

自生矿物形成温度是确定其形成地史时期的关键要素。目前,在确定自生矿物生长时间中常用的方法就是古地温分析法^[22-25]和同位素地质温度分析法^[26-27]。本次研究主要利用自生矿物中的实测包裹体温度数据和同位素数据确定形成温度。

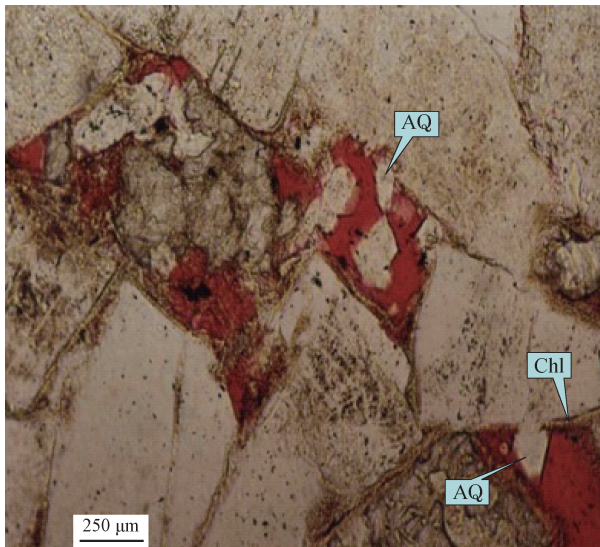


图1 川西坳陷中侏罗统沙溪庙组砂岩中的自生绿泥石(Chl)孔隙衬垫、原生孔隙和溶孔中充填的自生石英(AQ)
Fig.1 Authigenic chlorite(Chl) pore-rims, authigenic quartz(AQ) filling in primary pores and secondary pores in sandstone of the Shaximiao Formation in the Middle Jurassic of western Sichuan depression
(CX168井, J_2s ,埋深2 335.40 m,单偏光)

① 自生石英的形成温度

自生矿物中的包裹体均一化温度代表了该矿物的形成温度。研究中在自生石英中发现了两相包裹体,原生孔中充填的自生石英形成温度低于次生加大石英,前者形成温度为80℃左右,后者为91~105℃。

② 自生方解石的形成温度

两期方解石胶结物中两相包裹体不发育,未能取得包裹体均一温度。本次研究中主要选择发育方解石胶结物的砂岩进行激光同位素分析。激光同位素分析可以达到原位、微区(20~50 μm)和分析需求量少等特点,测定时可以在显微镜下对方解石是早期还是晚期进行准确判定。 J_2s 砂岩为干旱温暖环境中的沉积物^[28],因而早期成岩地层水的 $\delta^{18}O$ (SMOW)取值-8‰^[29];根据前人研究,晚期地层水的 $\delta^{18}O$ (SMOW)取值-4‰^[30]。然后,利用下列同位素地质温度计算公式求取测定方解石的形成古温度:

$$1000 \ln \alpha_{\text{方解石-水}} = 2.78 \times 10^6 T^{-2} - 2.89 \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{方解石-水}} = (1000 + \delta^{18}O_{\text{方解石}}) / (1000 + \delta^{18}O_{\text{水}}) \quad (2)$$

式中: $\alpha_{\text{方解石-水}}$ 为方解石-水体系中的同位素分馏系数,‰(SMOW); $\delta^{18}O_{\text{方解石}}$ 为方解石的氧同位素值,‰(SMOW); $\delta^{18}O_{\text{水}}$ 为地层水的氧同位素值,‰(SMOW), T 为绝对温度,K。

根据分析结果(表1),碳同位素值($\delta^{13}C$,PDB)分布范围为-5.49‰~-12.62‰,平均值为-8.7‰;氧同位素值($\delta^{18}O$,PDB)分布范围为-15.39‰~-16.84‰。早期方解石的形成温度较低,处于55.3~59.4℃;晚期方解石形成温度区间为86~97℃,形成温度明显偏高(表1)。

2) 水-岩作用发生时期

利用上述分析获得的各自生矿物的形成温度,结合前人在该地区建立的古地温梯度(31.7℃/km)、古地表温度(20℃)、各地层沉积厚度及构造运动时期等^[31-32],确定出自生矿物和溶蚀作用的形成时期,即水-岩作用的发生时期。

表1 川西坳陷中侏罗统沙溪庙组砂岩中方解石激光同位素测定结果

Table 1 Isotopic compositions of calcite cements from the Shaximiao Formation in the Middle Jurassic of western Sichuan depression

样品号	测定方解石	$\delta^{13}C$ (PDB)/ ‰	$\delta^{18}O$ (PDB)/ ‰	温度/℃
370-11	早期	-9.96	-15.45	55.6
168-58	早期	-8.08	-15.39	55.2
168-68	早期	-9.17	-16.02	59.4
168-11	晚期	-7.55	-16.84	97.0
168-39	晚期	-7.63	-16.34	92.4
168-97	晚期	-12.62	-16.19	91.1
168-118	晚期	-9.10	-15.60	86.0
167-3	晚期	-5.49	-16.06	90.0

早期方解石形成的平均古温度为 57.0℃。根据古地温梯度(31.7℃/km)和古地表温度(20℃),计算出其形成时上覆地层厚度为 1 167 m;再根据上覆地层厚度特征,即可得出其形成于晚侏罗世早期,是最早的水-岩作用产物。同理可知,晚期方解石形成时的古埋深约为 2 250 m,即相当于晚侏罗世晚期;早期石英(充填原生孔隙)形成时的古埋深在 2 000 m 左右,略早于晚期方解石;晚期自生石英(石英加大)形成时的古埋深在 2 700 m 左右,形成于白垩纪时期。对于未能获得温度数据的衬垫绿泥石、充填孔隙绿泥石及高岭石等,可以根据其与两期方解石、两期石英的显微赋存关系推断其形成时期:衬垫绿泥石明显形成于加大石英之前,早期方解石之后;孔隙充填绿泥石形成于石英加大之后,晚期方解石之前;高岭石基本与晚期方解石形成时期相当。

从溶蚀孔的产状可见溶蚀作用至少有两期,自生绿泥石衬垫所包围的孔隙包括了残余粒间孔,也包括了成岩早期经历过一定溶蚀的粒间溶蚀扩大孔。可以证明,在自生绿泥石衬垫形成之前曾经有一期溶蚀作用,主要是在粒间孔的基础上溶蚀扩大(图 2),该期溶蚀发生在同生期晚期。第二期溶蚀作用是在自生绿泥石衬垫和石英加大等形成之后,主要是碎屑颗粒的粒内溶孔以及超大孔的形成。

2.2.3 水-岩作用产物共生关系

根据沙溪庙组砂岩中形成的自生矿物的赋存关系、形成时期及溶蚀作用的发生时期等,将砂岩中发生的主要水-岩作用类型及其共生关系总结如下图(图 3)。这一共生序列反映了砂岩埋藏过程中发生的水-岩作用特征。

3 流体演化特征

明确了水-岩作用形成的自生矿物类型、形成时

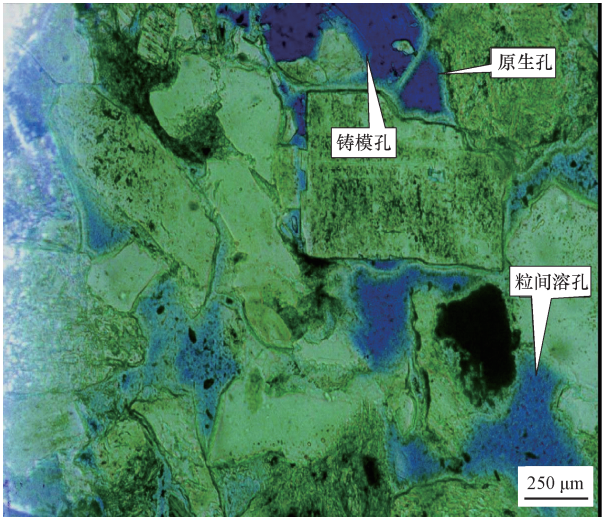


图 2 川西坳陷中侏罗统沙溪庙组砂岩中的孔隙类型
Fig. 2 Pore types in sandstone from the Shaximiao Formation in the Middle Jurassic of western Sichuan depression
(X807 井,埋深 2 264 m,J₂s,单偏光)

期及共生关系后,根据自生矿物微区电子探针成分分析、泥岩演化和地层水化学特征等进一步分析水-岩作用过程中的流体演化特征。

3.1 泥岩粘土矿物演化反映的流体演化特征

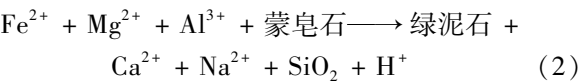
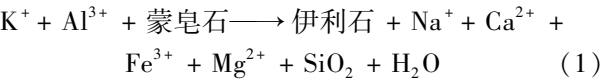
长期以来,粘土矿物的演化特征一直在储层成岩作用研究中发挥了重要作用。其原因主要是泥岩在埋藏过程中,随着埋藏深度的增加和地温的升高,泥岩转化并脱水,由此释放出的各种离子和排出的流体将有助于多种水-岩作用的发生;同时,由于泥岩中粘土矿物转化的不可逆性和转化所需的必要条件,以及泥岩中有机质的演化特征等,有助于分析储层成岩作用的环境条件^[33-35]。研究中通过对区内 CX168 井泥岩进行系统采样,即由近地表的 96 m 处开始,按照每 100 m 左右取一个样的原则,至 2 600 m 的中侏罗统底部,共采样 30 个进行 X-射线衍射分析。据泥岩粘土矿物

成岩阶段	同生期	早成岩		晚成岩	
		A	B	A	B-C
云母、长石等水化					
机械压实					
衬垫状自生绿泥石					
孔隙充填状自生绿泥石					
自生石英					
自生方解石					
溶蚀作用					
自生高岭石					
成岩温度/℃					
		55	80	105	

图 3 川西坳陷中侏罗统沙溪庙组砂岩自生矿物共生序列

Fig. 3 Authigenic mineral paragenetic sequence in the Shaximiao Formation in the Middle Jurassic of western Sichuan depression

随深度变化特点可见,除了埋深小于 550 m 的样品中存在 17%~40% 的混层粘土外,其余样品中均未见混层粘土。粘土矿物中的 75% 以上是伊利石,其余为绿泥石,即泥岩已经经历了晚成岩期的 B 至 C 阶段,主要由蒙脱石向伊利石转化,部分转化为绿泥石。在转化过程中,不仅为砂岩提供了较多的孔隙流体,而且释放出的镁离子、铁离子和硅离子等也增加了孔隙流体中这些离子的浓度。铁离子和镁离子为形成绿泥石提供了离子源,形成了较为发育的自生绿泥石;硅离子也为自生石英提供了离子源。如下面反应式(1)所示,蒙皂石在富钾环境中向伊利石转化,在此过程中向孔隙流体释放出钠、钙、镁、铁等离子,并形成自生石英^[36]。而从反应式(2)可以看出,在富铁、富镁环境中蒙皂石向绿泥石转化,释放出钙、钠离子,形成石英。



3.2 自生矿物共生序列反映的流体演化特征

在采用微区电子探针测试时,能否准确测定研究对象的成分,关键在于样品的微区精确定位,避免不同时期自生矿物混淆。为此利用岩石薄片在显微镜下作细致圈定,一般所圈范围仅有 2~3 个矿物颗粒(颗粒

大小约 0.1 mm),有的甚至只有所测定的一个矿物晶体,保证了测试对象的准确定位,由此得到的化学成分特征,有助于分析孔隙流体的演化。

1) 自生石英

研究区内各种石英成分表现出下列变化特征:碎屑石英颗粒和原生孔中充填的自生石英的氧化钠含量高,加大边和溶孔中充填的自生石英基本不含氧化钠;原生孔中充填的自生石英、次生加大石英的二氧化硅含量最低,溶孔中含量最高;加大边由内(靠近碎屑石英一侧)向外(远离碎屑石英一侧)氧化钠含量逐渐减少;颗粒、原生孔中自生石英含钙,溶孔中自生石英基本不含钙;早期石英加大边和原生孔中充填石英普遍含二氧化钛;碎屑颗粒和加大石英中氧化亚铁含量较高,溶孔中和原生孔中充填石英基本不含氧化亚铁或含量较低;加大边由内向外氧化锰含量逐渐升高(表 2)。

以上特征反映出成岩流体在早期由于钠长石的水化及浅埋藏时期蒙脱石、混层粘土矿物的转化等释放出钠离子,岩石中碳酸盐岩碎屑的淋滤产生钙离子等,使得早期石英加大中这些离子的含量相对较高。二氧化钛能反映地表风化强度,相对较早形成的石英中含二氧化钛,说明部分石英形成较早,也可能是在埋藏早期储层与地表大气淡水仍有一定的连通性。次生溶孔中充填石英基本不含钙离子,说明埋藏晚期方解石基本未发生溶蚀作用,这与镜下观察到的现象是吻合的。

表 2 川西坳陷中侏罗统沙溪庙组砂岩中自生石英微区电子探针成分分析结果
Table 2 Components analyses of authigenic quartz by electron microprobe on samples from the Shaximiao Formation in the Middle Jurassic of western Sichuan depression

样品号	矿物及产状	成分含量/%						
		Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	MnO	FeO
370-A	石英(晚期溶孔充填)	0.061	0.094	98.523	0.054	0.046	0.894	0
168-C	石英(晚期溶孔充填)	0	0.006	99.906	0.077	0.011	0	0
168-C	石英(晚期溶孔充填)	0	0.016	99.464	0	0	0.311	0.009
168-C	石英(溶孔充填)	0	0.065	99.751	0	0	0.050	0.055
168-B	石英(粒内溶孔充填)	0.033	0.084	99.630	0	0	0.028	0.136
168-B	石英(粒内溶孔充填)	0	0.157	99.606	0	0	0	0.209
168-B	石英(原生孔充填)	0.116	0.176	99.607	0	0	0.040	0
168-C	石英(原生孔充填)	0.020	0.440	99.080	0.099	0.070	0	0.291
370-A	石英(加大)	0	0.084	99.391	0.041	0.052	0.021	0.073
370-A	石英(加大)	0.128	0.185	98.480	0.206	0.192	0.477	0.332
370-A	石英(加大)	0	0.154	99.636	0	0.066	0	0.144
168-C	石英(加大)	0	0.062	99.448	0	0.064	0.030	0.281
168-C	石英(加大)	0	0.086	99.580	0	0	0.063	0.182
370-A	石英(加大)	0.059	0.136	99.682	0.023	0	0.035	0.001
370-A	石英(加大内侧)	0.258	0.006	98.744	0.090	0.044	0	0.566
370-A	石英(加大中部)	0.182	0	99.444	0.034	0	0.340	0
370-A	石英(加大外侧)	0.025	0	98.984	0.064	0	0.549	0.378
370-A	碎屑石英	0.204	0.468	98.492	0.015	0.083	0.048	0.662
370-A	碎屑石英	0.129	0.490	98.664	0.047	0.060	0.002	0.534
370-A	碎屑石英	0.004	0	99.708	0	0	0.126	0.079

溶孔自生石英中铁离子含量明显减少是由于在成岩过程中,大量的铁离子在形成绿泥石时已消耗。

2) 自生绿泥石

研究区内自生绿泥石主要包括 3 种:残余衬垫、衬垫和孔隙充填。各种自生绿泥石的主要成分差异如下(表 3):残余衬垫的 Na₂O 含量最高,衬垫次之,孔隙充填最低;MgO 含量一般以残余衬垫最高,衬垫次之,孔隙充填最低;Al₂O₃ 和 SiO₂ 含量在孔隙充填中最低;K₂O 一般出现在残余衬垫中,其他含量很少或无;FeO 以孔隙充填绿泥石中含量最高。

Na₂O、MgO、Al₂O₃、SiO₂ 和 K₂O 在衬垫绿泥石中含量较高、在孔隙充填绿泥石中含量较少,说明前者形成较早。由于它不断消耗掉长石、云母水化释放出的上述离子,同时早期的石英加大也消耗掉了一定的 SiO₂,因此其后生成的孔隙充填状绿泥石中上述离子含量明显减少。

3) 自生方解石

研究区内方解石全部为普通方解石。自早期的微晶、细晶方解石到早期的连晶方解石,SrO 含量表现为逐渐增高。早期与晚期方解石比较,晚期 Na₂O 和 CaO 含量相对更高(表 4)。

晚期方解石由于形成于钠长石溶解以后,钠长石溶蚀释放出的钠离子易于赋存在方解石胶结物中。溶解的锶是岩石遭受淡水淋滤的结果,本区早期方解石胶结物中,从微晶—细晶—连晶中的 SrO 含量的增加,可能是岩石遭受淋滤程度增强所致;晚期方解石形成于埋藏较深条件下,此时没有淋滤作用发生的条件,其中 SrO 含量的增加可能与更深部的外来流体进入有关,该钻井含气性好,表明有较充分的下部气源注入。

4) 自生高岭石

研究区内自生高岭石主要分布在粒间溶蚀扩大孔

表 3 川西坳陷中侏罗统沙溪庙组砂岩中自生绿泥石微区电子探针成分分析结果
Table 3 Components analyses of authigenic chlorite by electron microprobe on samples from the Shaximiao Formation in the Middle Jurassic of western Sichuan depression

样品号	矿物及产状	成分含量/%				
		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O
370-A	绿泥石(衬垫)	0.400	12.669	25.936	30.906	0.075
370-A	绿泥石(衬垫)	0.238	8.860	23.248	39.008	0.152
370-A	绿泥石(衬垫)	0.265	12.139	30.344	32.085	0
168-B	绿泥石(衬垫)	0.206	13.790	30.606	35.080	0
370-A	绿泥石(残余衬垫)	0.691	13.945	30.179	37.880	0.132
370-A	绿泥石(残余衬垫)	0.444	11.508	29.399	31.268	0.031
168-B	绿泥石(残余衬垫)	2.689	11.384	24.932	31.348	0.096
168-C	绿泥石(残余衬垫)	0.462	8.255	23.917	31.226	0.463
168-C	绿泥石(残余衬垫)	0.502	10.326	26.693	31.855	0.856
168-B	绿泥石(充填)	0.751	13.653	29.544	38.145	0
370-A	绿泥石(充填)	0.218	12.087	28.144	30.550	0
370-A	绿泥石(充填)	0.092	10.377	18.609	26.972	0
370-A	绿泥石(充填)	0.044	7.386	18.419	23.756	0.060
370-A	绿泥石(充填)	0.163	13.521	19.930	35.410	0
370-A	绿泥石(充填)	0.179	13.706	19.633	31.533	0.247

表 4 川西坳陷中侏罗统沙溪庙组砂岩中自生方解石微区电子探针成分分析结果
Table 4 Components analyses of authigenic calcite by electron microprobe on samples from the Shaximiao Formation in the Middle Jurassic of western Sichuan depression

样品号	矿物及产状	成分含量/%				
		Na ₂ O	MgO	SrO	K ₂ O	CaO
370-A	微晶方解石(早期)	0	0.365	0	0	53.642
370-A	微晶方解石(早期)	0	0.225	0.003	0.025	53.995
370-A	细晶方解石(早期)	0.067	0.279	0.021	0.009	54.760
370-A	细晶方解石(早期)	0	0.571	0.013	0	52.522
370-A	连晶方解石(早期)	0	0.179	0.136	0.016	53.223
370-A	连晶方解石(早期)	0	0.198	0.298	0.016	53.578
168-C	连晶方解石(早期)	0	0.040	0	0	54.050
168-C	晚期方解石	0.046	0.043	0.183	0	54.926
168-C	晚期方解石	0.042	0.031	0.149	0.037	55.939

中。与标准高岭石比较,该层位高岭石的 CaO 含量偏低。原因主要在于本区高岭石形成较晚,在该过程中由于方解石未发生溶蚀,溶蚀矿物主要为钠长石,因此缺乏钙离子源。此外,高岭石充填于溶蚀扩大孔中也说明高岭石是在酸性条件下长石溶蚀的产物,且高岭石的稳定存在说明岩石在晚期溶蚀作用之后一直处于酸性孔隙水环境中。

5) 溶蚀矿物

据溶蚀矿物晶体特征分析、结合被溶矿物残余的电子探针微成分分析数据,表明研究区内溶蚀矿物主要是钠长石,另有少量的钾长石,很少见到方解石和石英溶蚀现象。关于碳酸盐矿物的稳定性,通常是根据 pH 值及水溶液中 Ca^{2+} , H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} 和 CO_2 的含量来进行评价。这种评价实际上导致了这样一种片面的观点:碱度仅取决于水溶液中的碳酸盐组分而不涉及到有机酸阴离子,因此认为地下碳酸盐的稳定性只受 p_{CO_2} (二氧化碳气压力) 的控制。20 世纪 80 年代,人们认识到了有机酸阴离子对碱度的控制,并显著影响着碳酸盐的稳定性^[37]。本区储层中长石普遍溶蚀而方解石未溶的现象说明溶蚀流体主要为有机酸,而不是碳酸^[38]。

3.3 现今地层水的地球化学特征

据国家科技重大专项研究成果^①,现今川西地区侏罗系地层水矿化度基本在 40 g/L 以下。研究区侏罗系地层水中的阳离子主要有 K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} 和 Fe^{3+} , 阴离子主要有 Cl^- , SO_4^{2-} 和 HCO_3^- , 各离子组分含量差异大。阳离子中 Na^+ 离子占绝对优势,阴离子中 Cl^- 离子占绝对优势,两者在总的离子成分中占总含量的 90% 以上(图 4)。在阳离子中,除 Na^+ 离子外, Ca^{2+} 离子是另一个重要的阳离子,尤其是在中侏罗统地层中 Ca^{2+} 离子含量明显相对较高(图 4); 而阴离子中,以 Cl^- 离子含量占绝对优势,平均值在 16 g/L 以上。从其地层水类型看,侏罗系地层水以 CaCl_2 型为主,显示其保存条件相对较好。

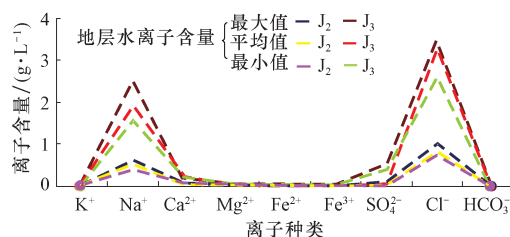


图 4 川西坳陷侏罗系地层水离子组合特征

Fig. 4 Ion composition features of the Jurassic formation water in the western Sichuan depression

3.4 J_{2s} 砂岩孔隙流体的总体演化特征

综合以上成果,可将川西坳陷中侏罗统沙溪庙组 (J_{2s}) 砂岩孔隙流体变化特征总结如下:①砂岩在沉积埋藏早期,孔隙水最初是偏碱性的,富含镁离子的云母、钠长石和火成岩岩屑等发生水化,水化后释放出镁离子和钠离子;川西坳陷中段沙溪庙组为典型的氧化条件下形成的红色地层,因此富含铁离子。在这种富镁、铁又偏碱性的条件下,早期很容易生成绿泥石,主要以孔隙衬垫形式出现;同时随着沉积水逐渐向孔隙水(地层水)转变和储层中碳酸盐岩岩屑的淋滤,流体中的钙离子过饱和,从而形成方解石沉淀。②之后,由于埋藏深度的增加和地温的升高,粘土矿物中的蒙皂石及伊-蒙混层等向伊利石(部分为绿泥石)转化释放出硅、钾离子及 H_4SiO_4 等,并且释放出的 H^+ 离子越来越多,使水介质条件由之前的偏碱性向酸性条件转化,为钠长石和火成岩岩屑中的长石斑晶等易溶组分溶蚀提供了酸性条件,为早期石英形成提供了物质条件。③在此之后,断裂和裂缝系统为 J_{2s} 砂岩孔隙流体注入了外部来源,将上三叠统的有机酸和烃类运移到了储层中,孔隙流体变得更为酸性,因此发生了广泛的溶蚀作用,并形成了高岭石和石英等产物。部分区域的钙离子进一步富集、过饱和,形成了晚期方解石胶结物。

4 烃类作用证据

川西坳陷中段 J_{2s} 储层中富集较多的天然气。由于天然气为气体,难以观察到类似油在储层中运移聚集留下的沥青、油迹、荧光等特征^[39]。研究中主要通过自生矿物中的包裹体气体成分分析及自生矿物的同位素分析等,寻找烃类在砂岩中与岩石、孔隙流体相互作用的痕迹。

4.1 自生矿物中的烃类成分特征

激光拉曼分子微探针 (LRN) 能将激光聚焦在 $1 \mu\text{m}^2$ 的极小区域,进行分子成分和结构的微区分析,特别为含有有机质包裹体和烃类有机包裹体的成分鉴定提供了简单、可靠的测试手段。在包裹体成分中,可以选择几种参数来分析储层中烃类的注入史:一是甲烷基本浓度 $\text{CH}_4/(\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$,该值的大小可反应成熟度的高低;二是烷烃/总有机组分比值 $(\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8)/(\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_4\text{H}_6 + \text{C}_6\text{H}_6)$,该值高则油气演化程度高,反之则演化程度低,若同一样品中含不同比值的包裹体均发育,则

① 吕正祥,叶素娟,张世华,等. 四川盆地碎屑岩沉积相与储层成岩作用研究. 中国石化西南油气分公司,2010.

说明存在多期油气混合^[40]。选择 J₂s 储层自生矿物中的有机包裹体进行激光拉曼分子微探针分析,结果表明(表 5):本区 J₂s 储层烃类包裹体的甲烷基本浓度变化范围较大,最小为 0.022,最大达到 0.399,大的跨度说明储层中有多种成熟度的烃类聚集;烷烃/总有机组分比值分布范围为 0.407~1,同样表明储层中聚集过演化程度不同的烃类。两者均表明有多期烃类的充注。

4.2 自生矿物的同位素特征

川西坳陷中段 J₂s 储层不具备生烃能力,地层中缺乏形成有机酸的地质条件,但在砂岩自生方解石的激光同位素分析结果中却明显表现出具有有机酸作用的特点。中侏罗统砂岩中自生方解石的碳、氧同位素值明显较上侏罗统砂岩中自生方解石偏负,表明埋深更深的中侏罗统有有机碳的参与;对比含气性级别不同的砂岩可见,中侏罗统中砂岩含气性与碳酸盐胶结物碳、氧同位素关系明显,砂岩含气性越好,碳酸盐胶结物的碳、氧同位素值越低(图 5),推测是由于受来自烃源岩的高有机酸、高温流体的影响越大所致。J₂s 气源来自于更深部的上三叠统煤系地层,自生方解石中表现出的碳、氧同位素特征说明在烃类运移进入砂岩的同时,也有深部有机酸进入了砂岩孔隙流体中,并影响了孔隙流体性质,进一步造成了砂岩中溶蚀作用的发生。

4.3 溶蚀作用反映的烃类作用信息

川西坳陷中侏罗统沙溪庙组(J₂s)中广泛发育晚

表 5 川西坳陷中侏罗统沙溪庙组砂岩中自生矿物液相包裹体成分分析结果

Table 5 Components analyses of authigenic mineral fluid inclusions from the Shaximiao Formation in the Middle Jurassic of western Sichuan depression

样品号	砂体	包裹体赋存状态	甲烷基本浓度	烷烃/总有机组分
1	J ₂ ²⁽¹⁾	次生石英	0.048	0.467
2	J ₂ ²⁽¹⁾	次生石英	0.085	0.407
3	J ₂ ²⁽¹⁾	次生石英	0.160	0.642
4	J ₂ ²⁽¹⁾	次生石英	0.217	0.618
5	J ₂ ²⁽²⁾	次生石英	0.106	1.000
6	J ₂ ²⁽²⁾	石英填充	0.136	0.407
7	J ₂ ²⁽²⁾	次生石英	0.232	0.673
8	J ₂ ²⁽²⁾	石英填充	0.190	0.545
9	J ₂ ²⁽²⁾	次生石英	0.172	1.000
10	J ₂ ²⁽²⁾	次生石英	0.207	0.459
11	J ₂ ²⁽⁴⁾	石英加大	0.022	0.838
12	J ₂ ²⁽⁴⁾	次生石英	0.226	0.782
13	J ₂ ²⁽⁴⁾	次生石英	0.399	0.631
14	J ₂ ²⁽⁴⁾	次生石英	0.119	1.000

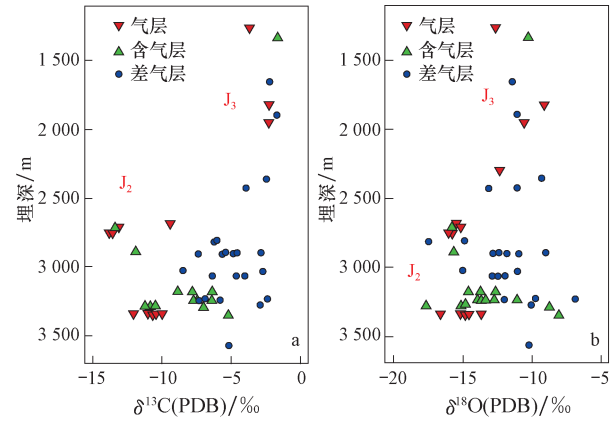
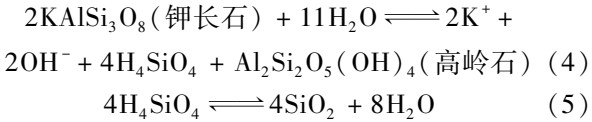
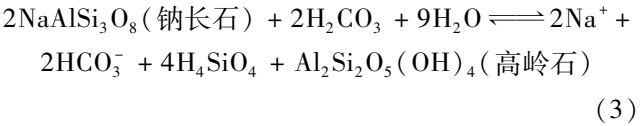


图 5 川西坳陷中、上侏罗统砂岩中自生方解石碳同位素 a) 和氧同位素 b) 分布特征

Fig. 5 Oxygen and carbon isotopes distribution of authigenic calcite in the Middle and Upper Jurassic sandstone in western Sichuan depression

期溶蚀,溶蚀孔隙对砂岩孔隙度的贡献超过 50%。溶蚀作用期次分析表明,对现今孔隙贡献较大的溶蚀孔主要是由晚期溶蚀提供的。该溶蚀作用发生时期砂岩埋藏深度较大,此时也不发育断至地表的断层,缺乏大气淡水的溶蚀作用,J₂s 本身也不具备大量产出酸性流体的能力,要形成广泛发育的溶蚀作用,酸性流体最有可能来自于下伏烃源岩层中的有机酸^[41],前述同位素特征即反映了此种来源的可能性。此外,从烃类包裹体信息中也能得到来自于下部地层的一些信息,如烃类包裹体成分中显示有多种成熟度的烃类注入,特别是一些低成熟度烃类的注入。烃源岩层中低成熟度烃类运移进入 J₂s 储层的同时,正是有机酸生成的相对高峰期,伴随着这些烃类的运移,也存在有机酸的同时运移,运移进入储层中的有机酸使得长石等发生溶蚀作用。反应方程式如下:



从上述反应式可见,溶蚀后将形成自生石英和高岭石等自生矿物。J₂s 砂岩粒间溶蚀扩大孔中充填的自生高岭石及晚期自生石英晶体即是上述反应的物质表现。

5 结论

川西坳陷中段中侏罗统沙溪庙组(J₂s)砂岩在埋藏过程中发生了较为复杂的水-岩-烃相互作用,砂岩中形成的绿泥石、方解石和石英等自生矿物。砂岩

中发生的溶蚀作用,以及现今地层水特征等不仅反映了砂岩中发育的水-岩作用特点,也记录了烃类与水、岩作用的信息。 J_2s 砂岩孔隙水在埋藏早期由于长石、云母和岩屑等的淋滤、蚀变、水化等,为富铁、镁、钙离子等的偏碱性的溶液,在部分碳酸盐岩岩屑含量高的岩石中,钙离子过饱和易于形成早期连晶方解石沉淀。随着早期孔隙衬垫绿泥石的形成,铁、镁离子被大量消耗并形成原生孔充填自生石英。伴随埋深的变化和粘土矿物的转化,孔隙流体向酸性、贫铁、贫镁离子转化,并进一步形成自生石英加大。后期由于烃类运移进入砂岩,烃类进入不仅聚集了烃类气体,也带来了大量的酸性流体,酸性流体对砂岩进行了溶蚀作用,形成了较发育的次生溶孔和高岭石、方解石与石英等副产物,也释放出较多的钠离子,最终演变为现今的富钠、富钙、偏酸性的 $CaCl_2$ 型地层水。早期衬垫绿泥石较发育、现今地层水中钠离子含量高的砂岩储集性较好。

参 考 文 献

- [1] Zuddas P. Water-rock interaction processes seen through thermodynamics[J]. *Elements*, 2010, 6(5): 305-308.
- [2] 刘建清,赖兴运,于炳松,等. 地层水条件下碳酸盐矿物热力学平衡条件及其在克拉2气田的应用[J]. *沉积学报*, 2006, 24(5): 636-640.
Liu Jianqing, Lai Xingyun, Yu Bingsong, et al. The thermodynamics equilibrium condition of carbonate minerals in strata environment and its application in Kela 2 gas field, Kuqa Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(5): 636-640.
- [3] Barclay S A, Worden R H. Geochemical modelling of diagenetic reactions in a sub-arkosic sandstone[J]. *Clay Minerals*, 2000, 35(1): 57-67.
- [4] Gallo Y L, Bildstein O, Brosse E. Coupled reaction-flow modeling of diagenetic changes in reservoir permeability, porosity and mineral compositions[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 209(1): 366-388.
- [5] Harlavan Y, Erel Y. The release of Pb and REE from granitoids by the dissolution of accessory phases[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(5): 837-848.
- [6] Fein J B. Experimental and field constraints on the role of silica-organic complexation and silica-microbial interactions during sediment diagenesis[C] // Worden R H, Sadoon M. Quartz cementation in sandstones. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2000: 119-128.
- [7] Patrice de C, Dirk K, Graham C, et al. Groundwater in the Broken Hill region, Australia: recognising interaction with bedrock and mineralisation using S, Sr and Pb isotopes[J]. *Applied Geochemistry*, 2005, 20(4): 767-787.
- [8] Kraishan G M, Rezaee M R, Worden R H. Significance of trace element composition of quartz cement as a key to reveal the origin of silica in sandstones: an example from the Cretaceous of the Barrow Sub-basin, Western Australia[C] // Worden R H, Sadoon M. Quartz cementation in sandstones. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2000: 317-332.
- [9] 陈传平,固旭,周苏闽,等. 不同有机酸对矿物溶解的动力学实验研究[J]. *地质学报*, 2008, 82(7): 1007-1012.
- Chen Chuanping, Gu Xu, Zhou Sumin, et al. Experimental research on dissolution dynamics of main minerals in several aqueous organic acid solutions[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(7): 1007-1012.
- [10] 黄思静,杨俊杰,张文正,等. 不同温度条件下乙酸对长石溶蚀过程的实验研究[J]. *沉积学报*, 1995, 13(1): 7-16.
Huang Sijing, Yang Junjie, Zhang Wenzheng, et al. Experimental study of feldspar dissolution by acetic acid at different burial temperatures[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(1): 7-16.
- [11] 杨俊杰,黄月明,张文正,等. 乙酸对长石砂岩溶蚀作用的实验模拟[J]. *石油勘探与开发*, 1995, 22(4): 82-86.
Yang Junjie, Huang Yueming, Zhang Wenzheng, et al. Experimental approach of dissolution of feldspar sand stone by acetic acid[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1995, 22(4): 82-86.
- [12] Ding X Q, Han M M, Zhang S N. The role of provenance in the diagenesis of siliciclastic reservoirs in the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 2013, 10(2): 149-160.
- [13] Ayers W B, Kaiser W R, Laubach S A, et al. Geologic and hydrologic controls on the occurrence and producibility of coalbed methane, Fruitland Formation, San Juan Basin[C] // Gas Research Institute. Topical Report, GRI-91/0072. Chicago: Gas Research Institute. 1991: 47-68.
- [14] Rice C A. Production waters associated with the Ferro coaled methane fields, central Utah: chemical and isotopic composition and volumes[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2003, 56(1-2): 141-169.
- [15] 沈忠民,宫亚军,吕正祥,等. 川西坳陷新场地区上三叠统须家河组地层水成因探讨[J]. *地质论评*, 2010, 56(1): 82-87.
Shen Zhongming, Gong Yajun, Lv Zhengxiang, et al. A discussion on genesis of the Upper Triassic Xujiahe Formation water in Xinchang area, western Sichuan Depression[J]. *Geological Review*, 2010, 56(1): 82-87.
- [16] 宫亚军,沈忠民,吕正祥,等. 川西坳陷新场地区须家河组地层水的地球化学特征研究[J]. *四川地质学报*, 2010, 30(1): 72-74.
Gong Yajun, Shen Zhongming, Lv Zhengxiang, et al. Geochemical characteristics of formation water in the Xujiahe Formation in the Xinchang area, West Sichuan Depression[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2010, 30(1): 72-74.
- [17] 黄洁,朱如凯,侯读杰,等. 深部碎屑岩储层次生孔隙发育机理研究进展[J]. *地质科技情报*, 2007, 26(6): 76-82.
Huang Jie, Zhu Rukai, Hou Dujie, et al. The new advances of secondary porosity genesis mechanism in deep clastic reservoir[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(6): 76-82.
- [18] Conliffe J, Blamey N F, Feely M, et al. Hydrocarbon migration in the Porcu Pine Basin, offshore Ireland: evidence from fluid inclusion studies[J]. *Petroleum Geoscience*, 2010, 16(6): 67-76.
- [19] Oelkers E H. General kinetic description of multioxide silicate mineral and glass dissolution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(21): 3703-3719.
- [20] 唐宇,吕正祥,叶素娟,等. 成都凹陷上侏罗统蓬莱镇组天然气运移特征与富集主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(3): 281-287.
Tang Yu, Lv Zhengxiang, Ye Sujuan, et al. Characteristics and controlling factors of natural gas migration and accumulation in the Upper

- Jurassic Penglaizhen Formation of Chengdu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 281–287.
- [21] 吕正祥, 刘四兵. 川西须家河组超致密砂岩成岩作用与相对优质储层形成机制[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2373–2383.
- Lv Zhengxiang, Liu Sibing. Ultra-tight sandstone diagenesis and mechanism for the formation of relatively high-quality reservoir of Xujiahe Group in western Sichuan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2373–2383.
- [22] 卢焕章, 郭迪江. 流体包裹体研究的进展和方向[J]. 地质论评, 2000, 46(4): 385–392.
- Lu Huanzhang, Guo Dijiang. Progress and trends of researches on fluid inclusions[J]. Geological Review, 2000, 46(4): 385–392.
- [23] Marfil R, Rossi C, Lozano R P, et al. Quartz cementation in Cretaceous and Jurassic reservoir sandstones from the Salam oil field, Western Desert, Egypt: constraints on temperature and timing of formation from fluid inclusions [C] // Worden R H, Sadoon M. Quartz cementation in sandstones. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2000: 163–182.
- [24] 刘德良, 陶士振, 张宝民. 包裹体在确定成藏年代中的应用及应注意的问题[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(1): 16–19.
- Liu Deliang, Tao Shizhen, Zhang Baomin. Application and questions about ascertaining oil-gas pools age with inclusion[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(1): 16–19.
- [25] 潘立银, 倪培, 欧光习, 等. 油气包裹体在油气地质研究中的应用——概念、分类、形成机制及研究意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(1): 20–28.
- Pan Liyin, Ni Pei, Ou Guangxi, et al. Application of organic inclusion study in petroleum geology conception, classification, formation mechanism and significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(1): 20–28.
- [26] 欧光习, 李林强, 孙玉梅. 沉积盆地流体包裹体研究的理论与实践[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(1): 1–11.
- Ou Guangxi, Li Linqiang, Sun Yumei. Theory and application of the fluid inclusion research on the sedimentary basins[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(1): 1–11.
- [27] Crossey L J, Surdam R C, Lahann R. Application of organic/inorganic diagenesis to porosity prediction [C] // Gautier D L. Roles of organic matter in sediment diagenesis. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1986: 147–155.
- [28] 王大洋, 王峻. 川西前陆盆地中侏罗统沙溪庙组沉积相及平面展布特征研究[J]. 四川地质学报, 2010, 30(3): 255–259.
- Wang Dayang, Wang Jun. Sedimentary facies and its distribution of the Middle Jurassic Shaximiao Formation in the west sichuan foreland basin[J]. Acta Geologica Sichuan, 2010, 30(3): 255–259.
- [29] 张琳, 陈宗宇, 聂振龙, 等. 我国不同时间尺度的大气降水氧同位素与气温的相关性分析[J]. 核技术, 2008, 31(9): 715–720.
- Zhang Lin, Chen Zongyu, Nie Zhenlong, et al. Correlation between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and surface air temperature on different time-scale in China[J]. Nuclear Techniques, 2008, 31(9): 715–720.
- [30] 李伟, 赵克斌, 刘崇禧. 含油气盆地水文地质研究[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 179–183.
- Li Wei, Zhao Kebin, Liu Chongxi. Hydrogeological study of oil bearing basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008: 179–183.
- [31] 杨克明. 川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 786–793.
- Yang Keming. Gas reservoiring mode in Xujiahe Formation of Western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 786–793.
- [32] 杨克明, 朱宏权, 叶军, 等. 川西致密砂岩气藏地质特征[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 3–97.
- Yang Keming, Zhu Hongquan, Ye Jun, et al. Geological characteristics of tight sandstone gas reservoir in West Sichuan[M]. Beijing: Science Press, 2012: 3–97.
- [33] Pay M D, Astin T R, Parker A. Clay mineral distribution in the Devonian-Carboniferous sandstones of the Clair field, west of Shetland, and its significance for reservoir quality[J]. Clay Minerals, 2000, 35(1): 151–162.
- [34] Jeans C V. Clay diagenesis, overpressure and reservoir quality: an introduction[J]. Clay Minerals, 1994, 29(4): 415–424.
- [35] Nadenu P H. The sleipner effect: a subtle relationship between the distribution of diagenetic clay, reservoir porosity, permeability, and water saturation[J]. Clay Minerals, 2000, 35(1): 185–200.
- [36] 田建锋, 高永利, 张蓬勃, 等. 鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油储层伊利石成因[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 700–707.
- Tian Jianfeng, Gao Yongli, Zhang Pengbo, et al. Genesis of illite in Chang 7 tight oil reservoir in Heshui area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 700–707.
- [37] Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic and sandstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1–23.
- [38] Surdam R C, Crossey L J. Organic – inorganic reactions during progressive burial: key to porosity/permeability enhancement and preservation[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1985, 315(1531): 135–156.
- [39] 金晓辉, 闫相宾, 孙冬胜, 等. 长岭断陷深层储层包裹体特征与油气成藏过程[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 609–613.
- Jin Xiaohui, Yan Xiangbin, Sun Dongsheng, et al. Fluid inclusion characteristics and hydrocarbon accumulation process of deep reservoirs in Changling rift, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 609–613.
- [40] 吕正祥. 包裹体信息在川西远源气藏研究中的应用[J]. 沉积与特提斯地质, 2003, 23(3): 106–109.
- Lv Zhengxiang. Applications of inclusion information to the distal gas pools in Western Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2003, 23(3): 106–109.
- [41] 孟万斌, 吕正祥, 刘家铎, 等. 川西中侏罗统致密砂岩次生孔隙成因分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2371–2380.
- Meng Wanbin, Lv Zhengxiang, Liu Jiaduo, et al. Genesis of secondary porosity in Middle Jurassic tight sandstone in Western Sichuan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2371–2380.

(编辑 李 军)