

川西坳陷须四段砂岩碳酸盐胶结物形成机制 ——来自微量元素的证据

李文茂, 张天操, 钟玉梅, 杨永剑, 南红丽

中国石油化工股份有限公司西南分公司勘探开发研究院

摘要 通过铸体薄片观察、阴极发光与电子探针实验分析等手段,对川西坳陷上三叠统须家河组四段长石岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、岩屑砂岩的碳酸盐胶结物富集规律及元素含量变化进行了分析,发现不同类型砂岩均发育连晶方解石、晶粒结构方解石和白云石胶结物,但胶结物含量、阴极发光和微量元素组成等特征反映了胶结物离子来源具有差异性。连晶方解石阴极发光为亮黄色,Fe²⁺、Mn²⁺含量高,Sr²⁺含量低,具有大气淡水成因的元素组成特点,证实了其受到大气淡水淋滤作用的影响。微晶、粉晶、细晶、中晶方解石具有橘红色到橘黄色的阴极发光特征,长石溶孔充填方解石的阴极发光具有暗明多个世代特征,反映其Fe/Mn值由高到低的变化规律。中晶方解石与充填孔隙的方解石具有高Fe²⁺、Mn²⁺含量和低Mg²⁺含量的特征,认为这是由于长石及黏土矿物在埋藏成岩时期受到有机酸溶蚀的影响,成岩体系内高的Fe²⁺、Mn²⁺浓度,以及Fe²⁺、Mn²⁺在碳酸盐胶结物成岩过程中较高的分配系数决定了胶结物中元素的这种分布特征,因此晶粒碳酸盐胶结物离子应主要来源于埋藏期长石及黏土矿物的溶解。

关键词 砂岩;碳酸盐胶结物;微量元素;须家河组;川西坳陷

中图分类号:TE122.2⁺1

文献标识码:A

0 前言

川西坳陷上三叠统须家河组四段(简称须四段)是川西探区的重点勘探目标,近年来MY1井、MY2井获得了工业气流,预示着须四段具有较好的勘探潜力,但其油气成藏富集规律仍有待深化研究,尤其是储层致密化成因研究相对较弱。只有清晰地认识储层致密化过程,才能明确储层致密化与油气成藏的耦合配置关系,进而为川西坳陷天然气成藏机理和富集规律研究提供支撑。

川西坳陷须四段储层中的碳酸盐胶结物占胶结物总量的60%左右,对储层的质量有重要的影响:一方面早期胶结物具有阻碍压实从而保留储层原生孔隙的作用,另一方面晚期胶结物由于充填次生孔隙而造成储层致密化。对于碳酸盐胶结物的形成过程,张鼎等^[1]通过砂岩中碳酸盐胶结物的碳、氧同位素组成分析,得到基底式胶结的方解石形成温度多小于50℃,认为它是准同生至成岩早期阶段

的产物;通过包裹体分析,得到孔隙式半充填胶结的(含铁)方解石和(含铁)白云石内的包裹体均一温度为88.53~105.8℃(主体在100℃以上),认为它属后期(石英加大边之后)胶结而成。刘四兵等^[2]认为连晶方解石是在常温常压下,从过饱和的碱性湖水中直接沉淀而成,而充填于次生孔隙中的晶粒方解石则是在埋藏成岩阶段形成,长石溶蚀和黏土矿物转化释放的Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺是其重要的离子来源。

前人多从水-岩反应^[3]、地层水等角度研究了碳酸盐胶结物的形成机制,对于碳酸盐胶结物内部元素含量变化的探讨较少,而元素含量变化是其成岩环境、成岩机制变化的反映。研究区钙屑砂岩分布面积较广,储层物性是所有储层类型中较好的,而其胶结物中连晶方解石胶结物含量占比最大,所以连晶方解石的发育在一定程度上控制着储层发育的质量。本次研究从碳酸盐胶结物内部Ca、Mg、Fe、Mn、Sr等元素的含量变化来探讨其形成环境的改变,以期对碳酸盐胶结物的形成机制有更加深入的认识。

收稿日期:2020-12-18;改回日期:2021-10-28;网络出版日期:2022-04-06

本文受国家科技重大专项课题“川西致密碎屑岩储层致密化与成藏关系研究”(编号:2016ZX05002-004)资助

第一作者:李文茂,硕士,工程师,主要从事油气储层地质研究。通信地址:610081 四川省成都市高新区吉泰路688号 中国石化大厦;E-mail:575607058@qq.com

通信作者:张天操,高级工程师,主要从事页岩气地质研究。通信地址:610081 四川省成都市高新区吉泰路688号 中国石化大厦;E-mail:19172504@qq.com

1 概 况

研究区位于川西坳陷的中段(北至安县—绵阳一带,南至大邑—成都一带)(图1)。在印支Ⅲ幕构造运动后,四川盆地完成了从海相到陆相的转变,剧烈的造山运动导致了大量的陆源碎屑物质向川西坳陷迁移。须四段沉积时期,川西坳陷中段沉积体系由冲积扇、辫状河、三角洲及湖泊组

成,研究区主体位于三角洲相带内。须家河组砂岩储层岩石类型多样,成分成熟度和结构成熟度均较低,以岩屑砂岩为主,岩屑石英砂岩和长石岩屑砂岩次之^[4],其中富岩屑而贫长石是须四段的典型特征^[2]。在各种岩屑中,沉积岩岩屑最多,占23%,主要包括粉砂岩岩屑、泥岩岩屑及碳酸盐岩岩屑;变质岩岩屑约占10%;火山岩岩屑(以凝灰岩岩屑为主)约占2%。

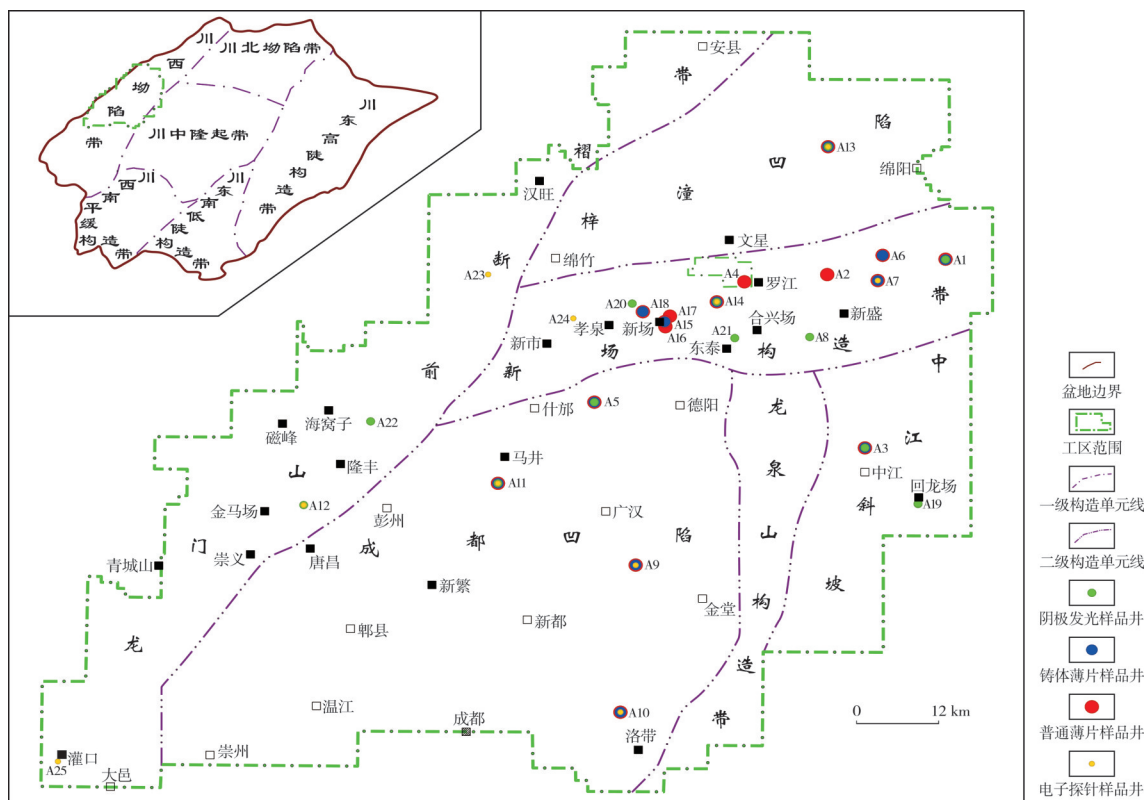


图1 研究区构造位置及采样点分布图

Fig. 1 Structural location of the study area and distribution of sampling points

全球性海平面升降也对须四段的沉积有所影响。大致自225 Ma以来,全球海平面持续下降,存在3次海平面上升一下降的短周期,这3次短周期可能对应了上三叠统马鞍山组、小塘子组—须二段、须三段—须四段和须五段3个旋回。在海平面(或受全球海平面下降影响的湖平面)下降过程中,一些近岸沉积环境中显然会出现不整合以及相应的大气水作用带,川西坳陷须四段早期沉积物可能受到了大气水淋滤的影响^[5]。

2 样品采集及分析测试

对研究区25口井的须四段砂岩取样(井位及数

据点分布见图1),分别做了普通薄片(16口井,7135块)、铸体薄片(12口井,210块)、阴极发光(12口井,22块)及电子探针(10口井,79块)等分析。首先利用普通薄片、铸体薄片观察区分出各类胶结物类型,结合阴极发光特征,初步判定各类方解石胶结物的Fe、Mn含量;再通过电子探针测试分析各类方解石胶结物的Fe、Mn含量相关关系;最后结合成岩环境中Fe、Mn含量特征,分析方解石胶结物的离子来源。

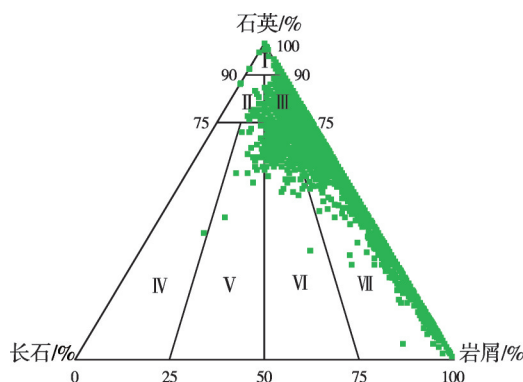
电子探针测试过程如下:首先按不同碳酸盐胶结物晶体形态选取了79个点位,将要打点区在镜下做好标记、照相记录,再把标记好的薄片裁剪后喷

炭,测试前将标记区锁定,镜下对比照片进行打点测试。电子探针测试元素为Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Cr、Mn、Fe、Sr、Ba等,仪器型号为EPMA-1600,检测条件:加速电压=15 kV,束流强度为 20×10^{-9} A,束斑直径为10 μm 。阴极发光分析使用Y-16阴极发光仪,环境条件:温度为20~25 $^{\circ}\text{C}$,湿度为30%~50%。

3 砂岩储层基本特征

通过对研究区须四段2 135块薄片观察结果的统计,须四段砂岩储层主要为长石岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、岩屑砂岩,其次为石英砂岩、长石石英砂岩和岩屑长石砂岩(图2)。长石岩屑砂岩的方解石胶结物含量平均为5.65%,孔隙度平均为6.71%,渗透率平均为 $0.238 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;岩屑石英砂岩的方解石胶结物含量平均为6.07%,孔隙度平均为5.81%,渗透率平均为 $0.138 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;岩屑砂岩的方解石胶结物含量平均为8.14%,孔隙度平均为4.88%,渗透率平均为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。可以看出,方解石胶结物的多少与储层物性有着密切的相关关系。根据统计,须四段砂岩碳酸盐胶结物占胶结物总量的60%左右,是影响储层质量的最重要的胶结物。各类砂岩储层中均发育微晶、粉晶、细晶、中晶方解石和连晶方解石

石胶结物(图3a,3b),并发育少量的白云石胶结物。其中,连晶方解石在胶结物总量中占比最大,在长石岩屑砂岩储层中含量为3.1%,在岩屑石英砂岩储层中含量为3.5%;其他胶结物占比由多至少依次为微晶方解石、长石溶孔充填方解石、细晶方解石、粉晶方解石。岩屑砂岩中连晶方解石含量为4.7%,细晶方解石含量为1.5%(图3c),微晶、粉晶方解石含量分别为1.2%、1.1%。连晶方解石与晶粒结构方解石在影响储层质量方面都具有非常重要的作用。



注: 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

图2 川西坳陷须四段砂岩储层碎屑组分三角图

Fig. 2 Triangular diagrams of detrital component of sandstone reservoir of the Xujiahe Member 4 in western Sichuan Depression

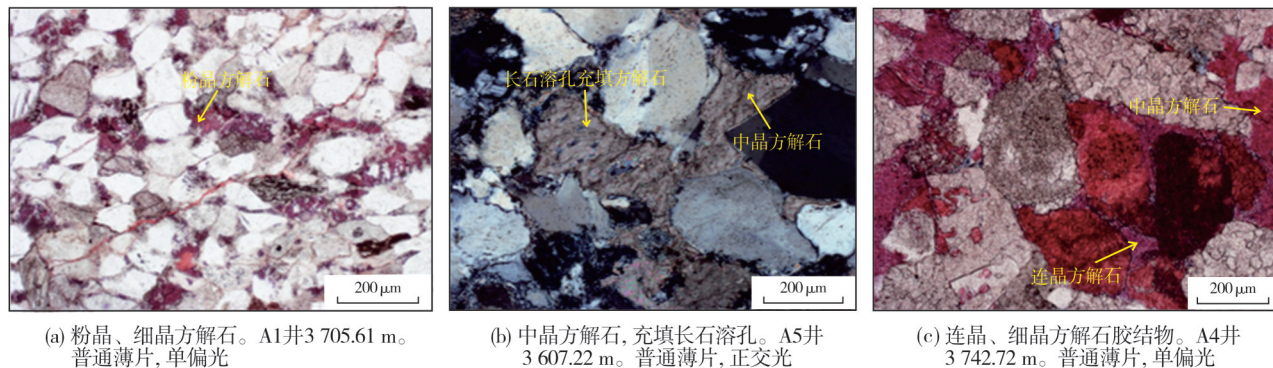


图3 川西坳陷须四段砂岩方解石胶结物镜下特征

Fig. 3 Microscopic characteristics of calcite cements in sandstone of the Xujiahe Member 4 in western Sichuan Depression

4 碳酸盐胶结物阴极发光特征

根据薄片观察和阴极发光分析,不同形态碳酸盐胶结物阴极发光特征与其个体形态有关,而与其属于何种岩石类型没有关联,所以仅就不同形态的方解石阴极发光特征进行分析。连晶方解石胶结物在镜下具有大面积统一消光特征,此类方解石胶结物发亮黄色光,具有比晶粒结构方解

石胶结物更强的阴极发光^[6](图4a,4b);微晶、粉晶方解石胶结物呈他形分散状分布于颗粒之间,阴极发光具暗黄色特征(图4c,4d);细晶方解石呈半自形—自形分散于颗粒间,阴极发光具橘黄色特征(图4e,4f);长石溶孔充填方解石占据长石溶蚀空间,具有暗黄色—橘黄色的阴极发光,显示出2个世代的特征(图4g,4h)。偶见自形白云石发橘红色光。总体上,连晶方解石阴极发光颜色最亮,

粒状方解石晶径越大,阴极发光表现为逐步由橘红色到橘黄色的转变,长石溶孔充填方解石具有世代特征。

以上样品均在同样的仪器和环境下检测完成,故阴极发光特征反映了样品 Fe、Mn 元素含量的相对变化。通常认为, Mn 为阴极发光的激发剂, Fe 为猝灭剂,在 Mn 含量 $>40 \mu\text{g/g}$ 、Fe 含量 $<5 \times 10^3 \mu\text{g/g}$

时,碳酸盐矿物的阴极发光受 Fe/Mn 值的显著控制^[6]。从上述阴极发光特征来看,连晶方解石最亮,应具有较低 Fe/Mn 值的特征;微晶、粉晶、细晶、中晶方解石阴极发光从暗到强的变化特征表现出 Fe/Mn 值从高到低的转变,而长石溶孔内的胶结物阴极发光的暗强变换也表现出 Fe/Mn 值高低的变化,反映出成岩环境发生改变。

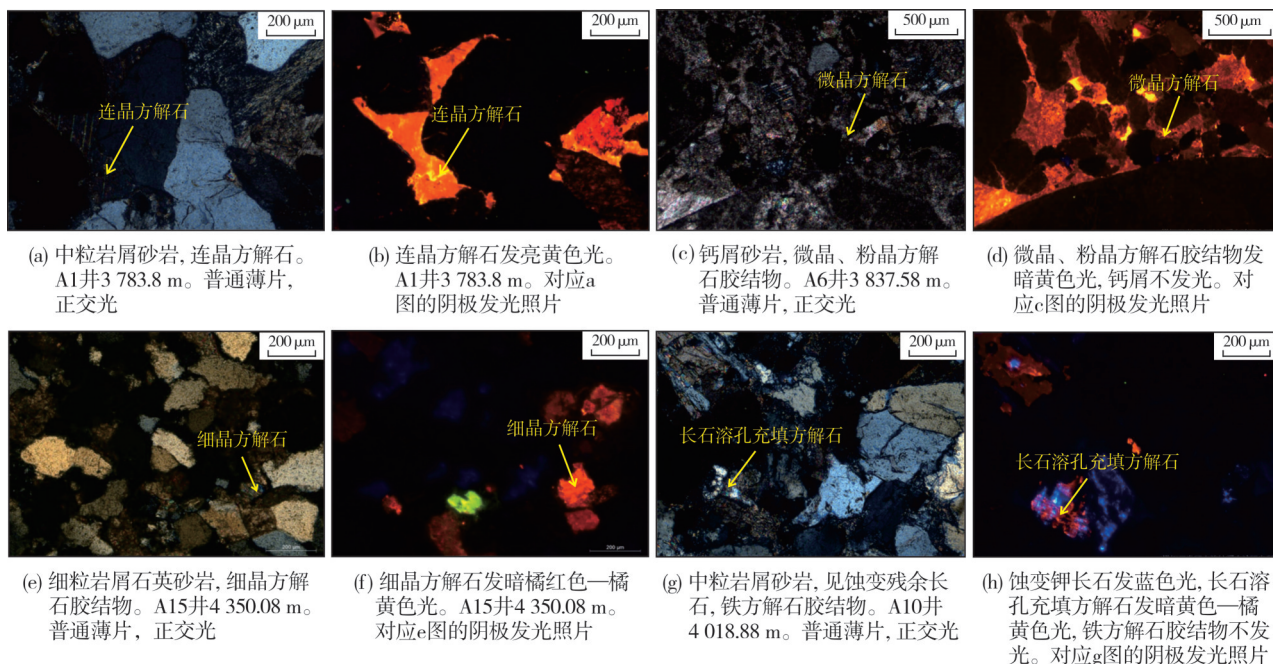


图4 川西坳陷须四段砂岩方解石胶结物镜下照片及阴极发光照片

Fig. 4 Microphotos and cathodoluminescence of calcite cements in sandstone of the Xujiahe Member 4 in western Sichuan Depression

5 碳酸盐胶结物微量元素组成特征

选取不同晶体形态碳酸盐胶结物的 79 个点做电子探针分析,其中连晶方解石 16 个,微粉晶方解石 5 个,细晶方解石 15 个,中晶方解石 11 个,长石溶孔充填方解石 10 个,钙屑颗粒 1 个,白云石 21 个。部分样品点位的常量及微量元素分析数据见表 1。

以每种晶型为组别做了 MnO 与 FeO 含量之间, CaO 与 FeO、MnO、MgO、SrO 含量之间的交会图,各种氧化物含量之间表现为不同的相关关系,显示出随着水-岩反应的进行各元素含量发生的变化^[7]。

FeO 与 MnO 含量交会图显示两者呈正相关关系(图 5),反映出 3 个显著特点:①随着晶型增大,二者含量均增加。②数据点可划分为 2 个分布区域:连晶方解石、中晶方解石及长石溶孔充填方解石大多位于右上方区域;微晶、粉晶、细晶方解石及白云

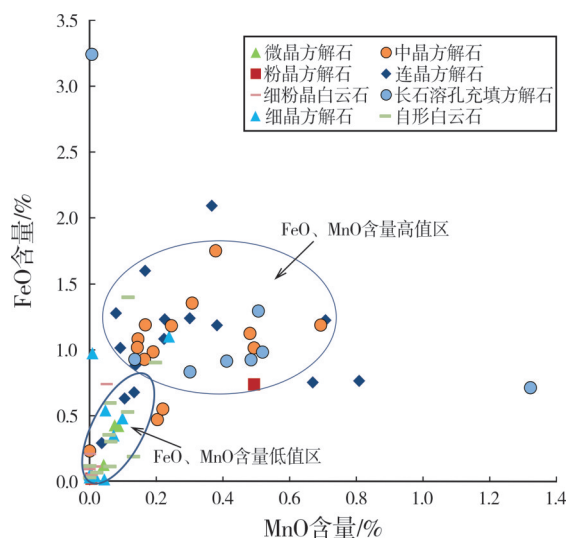


图5 川西坳陷须四段砂岩碳酸盐胶结物 FeO 与 MnO 含量相关关系

Fig. 5 Correlation of FeO and MnO contents of carbonate cements in sandstone of the Xujiahe Member 4 in western Sichuan Depression

表1 川西坳陷须四段砂岩碳酸盐胶结物特征及微量元素组成

Table 1 Characteristics and trace element composition of carbonate cements in sandstone of the Xujiahe Member 4 in western Sichuan Depression

点号	井名	深度/m	岩石类型	晶体形态	胶结物		微量元素化合物含量/%													
					含量/%		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	SrO	BaO	CO ₂	合计
1	A7	3 786.32	长石岩屑砂岩	连晶方解石	3.5	0	0.35	0	0	0	56.45	0	0	0.81	0.76	0.09	0	41.54	100	
2	A7	3 786.32	长石岩屑砂岩	细晶方解石	0.5	0.02	0.27	0	0	0	55.04	0	0	0.04	0.02	0	0	44.60	100	
3	A7	3 786.32	长石岩屑砂岩	连晶方解石	3.5	0.01	0.23	0	0	0	53.41	0	0	0.67	0.75	0.05	0	44.88	100	
4	A7	4 086.09	长石岩屑砂岩	自形白云石	0.5	0	21.01	0	0	0.01	30.61	0	0	0.11	0.53	0	0	47.74	100	
5	A7	4 091.03	长石岩屑砂岩	长石溶孔充填方解石	1.0	0	0.18	0.01	0.01	0	55.84	0.02	0.05	1.32	0.71			58.15		
6	A25	3 876.08	岩屑石英砂岩	长石溶孔充填方解石	1.5	0.02	0.31	0	0	0.79	52.06	0	0	0.52	0.98	0.30	0.04	44.99	100	
7	A25	3 876.08	岩屑石英砂岩	中晶方解石	0.5	0	0.36	0	0	0	53.12	0	0	0.69	1.19	0.92	0.06	43.67	100	
8	A25	3 876.08	岩屑石英砂岩	长石溶孔充填方解石	1.5	0.54	2.28	0	0	7.05	0.24	0	0	0.01	3.24	0	0.06	0	100	
9	A11	4 587.81	岩屑砂岩	长石溶孔充填方解石	0.5	0.01	0.11	0.04	0.20	0.10	54.56	0	0.05	0.30	0.83			56.20		
10	A12	3 269.49	岩屑砂岩	连晶方解石	2.5	0	0.36	0	0.04	0	56.50	0	0.09	0.22	1.08			58.29		
11	A12	3 269.49	岩屑砂岩	粉晶方解石	0.5	0.03	0.16	0	0.01	0	55.11	0	0.11	0.49	0.74			56.63		
12	A12	3 274.75	岩屑砂岩	中晶方解石	1.0	0	0.72	0	0.01	0.01	55.21	0	0.03	0.38	1.75			58.10		
13	A13	3 804.70	岩屑砂岩	微粉晶白云石	0.5	0	0	0	22.97	0.03	0.24	0	0.50	0.07	31.40			55.21		
14	A13	3 919.32	岩屑砂岩	连晶方解石	4.0	0	0	0	0	0	57.11	0.01	0.03	0.13	0.68			57.96		
15	A14	3 734.56	岩屑砂岩	细晶方解石	1.5	0	0	0	0	0	57.48	0	0.02	0.07	0.35			57.93		
16	A14	3 734.56	岩屑砂岩	连晶方解石	3.0	0	0	0	0	0	55.46	0	0	0.17	1.60			57.23		
17	A23	3 106.76	岩屑砂岩	连晶方解石	4.0	0.01	0.18	0	0.01	0	54.56	0	0.02	0.23	1.23			56.23		
18	A23	3 108.53	岩屑砂岩	中晶方解石	1.5	0	0.29	0.02	0.01	0	55.29	0.01	0	0.17	1.19			56.97		
19	A24	3 348.25	岩屑砂岩	连晶方解石	4.0	0.01	0.19	0	0	0.01	55.67	0	0.09	1.01	0.10	0	42.92	100		
20	A24	3 348.25	岩屑砂岩	细晶白云石	0.5	0.01	20.79	0	0	0	29.92	0	0	0.01	0.05	0	0.02	49.20	100	
21	A24	3 348.25	岩屑砂岩	钙质岩屑	30.0	0.04	14.81	0	0	0.06	31.41	0	0	0.55	6.19	0	0	46.95	100	
22	A24	3 351.41	岩屑砂岩	中晶方解石	1.5	0	0.24	0	0	0	55.20	0	0	0	0.23	0.11	0	44.22	100	
23	A24	3 351.41	岩屑砂岩	中晶方解石	1.5	0	0.20	0	0	0	55.82	0	0	0.19	0.98	0.07	0	42.73	100	
24	A26	3 880.47	岩屑砂岩	连晶方解石	4.0	0	0.21	0	0	0.01	53.37	0	0	0.38	1.19	0.26	0	44.58	100	
25	A26	3 880.47	岩屑砂岩	连晶方解石	4.5	0.62	0.20	0	0	0.51	53.86	0	0	0.30	1.24	0.10	0	43.17	100	
26	A28	3 879.05	岩屑砂岩	细晶方解石	4.0	0	0.22	0	0	0.01	56.30	0	0	0.05	0.54	0.04	0	42.85	100	
27	A28	3 879.05	岩屑砂岩	长石溶孔充填方解石	1.5	0	0.24	0	0	0.02	55.11	0	0	0.43	1.24	0.50	0.04	42.44	100	
28	A28	3 879.05	岩屑砂岩	微晶方解石	1.0	0	0.68	0	0	0	54.25	0	0	0.08	0.43	0.01	0.02	44.54	100	
29	A28	3 879.05	岩屑砂岩	细晶方解石	1.0	0.03	0.52	0	0	0.03	54.26	0	0	0.01	0.97	0.03	0	44.17	100	
30	A7	3 787.30	长石砂岩	连晶方解石	3.0	0	0.42	0.01	0	0.05	54.36	0	0.07	0.71	1.22			56.84		

石胶结物大多位于左下方区域。前者FeO与MnO含量显著大于后者(图6a—6c),原因可能是连晶方解石受到大气淡水淋滤作用导致 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量较高,中晶方解石及长石溶孔充填方解石生成于埋藏成岩较晚时期,成岩体系内 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量高于埋藏成岩早期的微晶、粉晶、细晶方解石和白云石。

③当晶体达到中晶级别及连晶方解石晶体增大到一定程度时,晶体结晶速度减慢,晶体内部随着 Mn^{2+} 含量的相对增高, Fe^{2+} 含量并不呈明显增高的趋势,这与Mn元素在方解石晶体中的分配系数增大有关。

随着埋藏期温度的升高,成岩体系内水-岩反

应程度增强,大量的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 取代 Ca^{2+} 而进入方解石晶格,导致CaO与FeO、CaO与MnO均呈负相关关系,且晶型越大, Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量越高(图7a, 7b)。CaO与MgO呈负相关关系(图7c),可能与方解石的白云石化作用及绿泥石的生成消耗了 Mg^{2+} 有关。 Sr^{2+} 半径与 Ca^{2+} 半径相近(Sr^{2+} 半径0.113 nm, Ca^{2+} 半径0.099 nm), Sr^{2+} 往往通过类质同象置换碳酸盐矿物中的 Ca^{2+} 而富集^[8-9]。因为连晶方解石遭受到低 Sr^{2+} 含量的大气淡水淋滤影响^[10-11],且 Sr^{2+} 在 CaCO_3 中的分配系数变化较小,故CaO与SrO含量的相关关系不明显(图7d)。

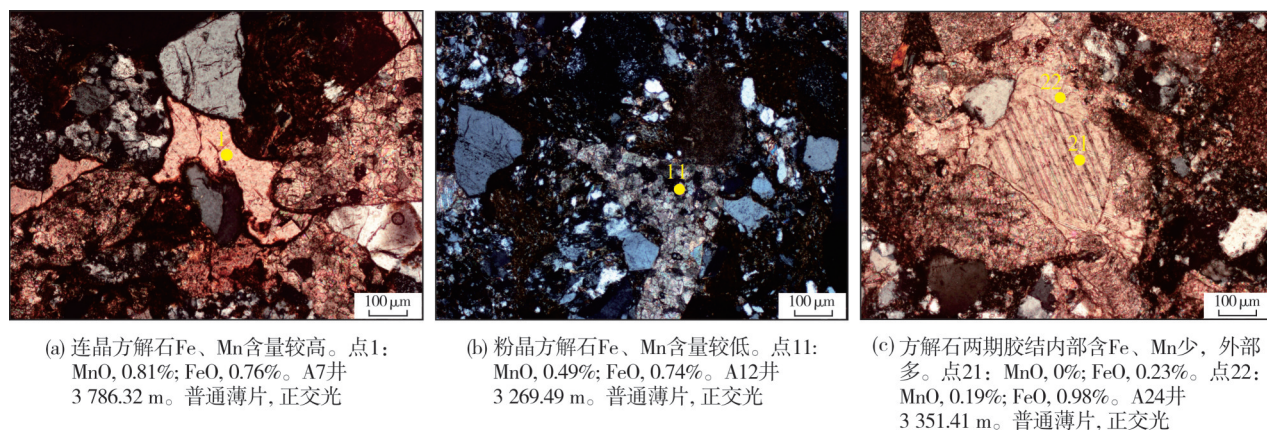


图6 川西坳陷须四段砂岩方解石胶结物FeO、MnO含量特征

Fig. 6 Characteristics of FeO and MnO contents of calcite cements of the Xujiahe Member 4 in western Sichuan Depression

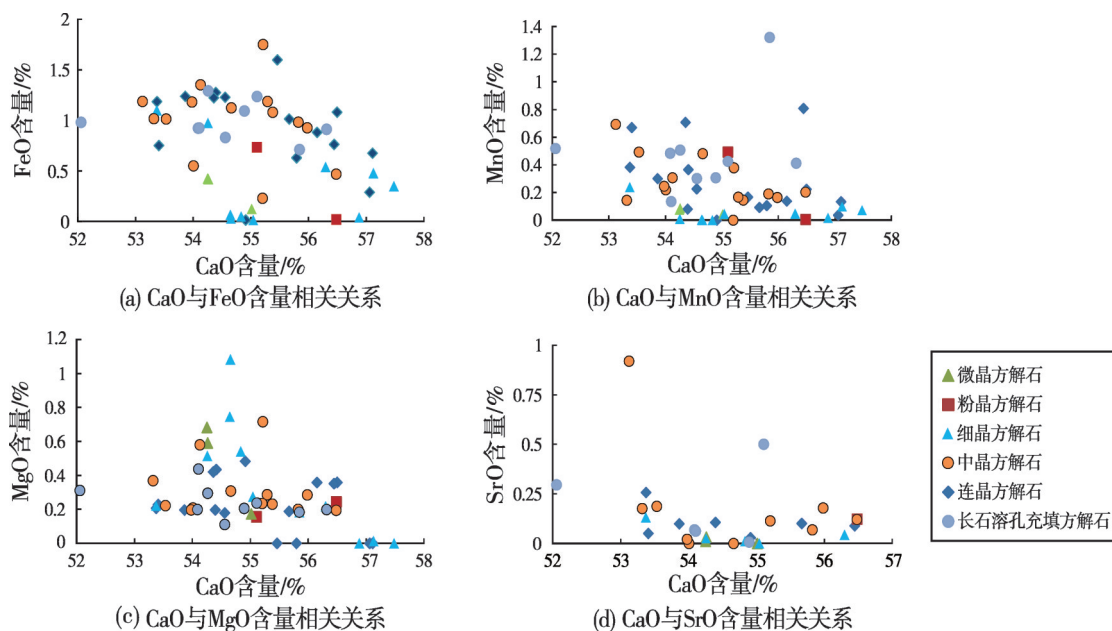


图7 川西坳陷须四段砂岩碳酸盐胶结物CaO与FeO、MnO、MgO、SrO含量的相关关系

Fig. 7 Correlations of contents of CaO and FeO, MnO, MgO and SrO of carbonate cements in sandstone of the Xujiahe Member 4 in western Sichuan Depression

6 讨论

6.1 大气淡水淋滤作用对碳酸盐微量元素组成的影响

受晚印支期构造事件的影响,四川盆地西部隆升遭受剥蚀,形成了侏罗系与下伏地层的明显不整合接触。须四段沉积可能经历了大规模的大气水淋滤作用,其溶解作用可以发生在处于埋藏成岩作用较早阶段的须四段,也可以发生在在不整合面之下的地层中。前人研究认为,全球性海平面下降短周期旋回对应须四段—须五段旋回,在海平面(或受全球海平面下降影响的湖平面)下降过程中,一些近岸沉积环境中显然会出现不整合以及相应的大气水作用带^[4],因此须四段沉积早期可能会出现相应的不整合和大气水作用带。

刘四兵等^[2]研究认为须四段连晶方解石胶结物具有相对较重的碳、氧同位素组成,沉淀时间早,是在常温常压下直接从过饱和的碱性湖水介质中析出的产物。结合连晶方解石亮黄色光的阴极发光特征、基底式胶结的产状以及 Sr^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 的含量特征,认为连晶方解石胶结物为成岩早期形成^[12],受到了大气淡水淋滤影响。

大气水通常具有低的 Sr^{2+} 含量和高的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量的特征。海水中的情况与大气水相反,具有高的 Sr^{2+} 含量和低的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量, Sr^{2+} 在海水中的含

量为淡水中的90倍^[10],而 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 的含量分别仅为淡水中的1/50和1/197。同时, Sr^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 在 CaCO_3 胶结物中的分配系数也有很大区别,分别为0.05~0.27、1~20、5.4~700。

一种元素在矿物中的含量主要决定于该元素在溶液中的浓度及动力学效应^[13]。 CaCO_3 直接从溶液中沉淀与结晶的过程(连晶方解石形成)是一个非常快速的过程(其时间与成岩过程中发生的矿物新生变形和重结晶等过程相比,可以忽略不计),因此 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Sr^{2+} (尤其是分配系数变化很大的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+})在碳酸盐胶结物中的分配系数很低。而本次研究表明,连晶方解石在 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 分配系数低的情况下,具有比埋藏早期的微晶、粉晶、细晶方解石及白云石胶结物更高的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量(图5,图8a, 8b),并且连晶方解石在阴极发光下为亮黄色,微晶、粉晶、细晶方解石在阴极发光下为橘红色、暗黄色,这也证实连晶方解石具有较高的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量。其主要原因在于,连晶方解石胶结物可能暴露于大气淡水中,并与大气水交换微量元素而达到与之相平衡,从而使得连晶方解石胶结物具有了大气淡水的元素组成特征。

与埋藏期形成的不同碳酸盐胶结物 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量显著差异不同, Sr^{2+} 在以上3类碳酸盐胶结物中的含量差异相对较小(图8c),这可能是由于 Sr^{2+} 在 CaCO_3 中的分配系数变化小(仅为0.05~0.27)有关。

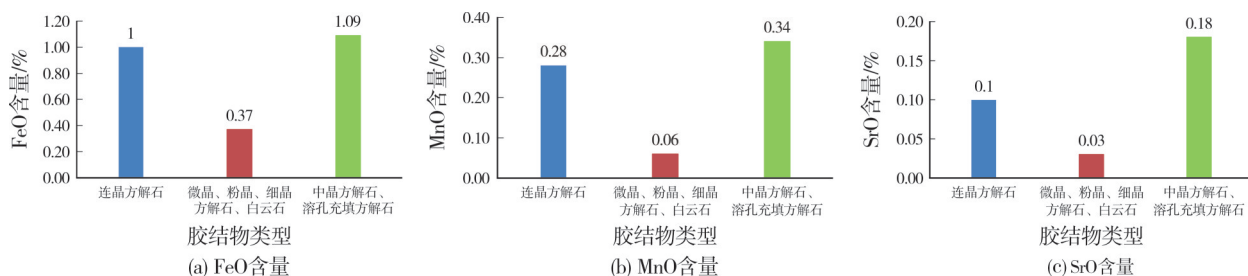


图8 川西坳陷须四段砂岩不同碳酸盐胶结物中FeO、MnO、SrO的含量

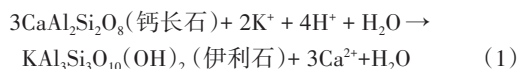
Fig. 8 Contents of FeO, MnO and SrO of different kinds of carbonate cements in sandstone of the Xujiahe Member 4 in western Sichuan Depression

6.2 埋藏期水-岩作用对碳酸盐微量元素组成的影响

碳酸盐成岩环境及元素化学动力学效应对元素在矿物中的富集有重要影响。研究区须家河组大部分碳酸盐胶结物的沉淀与有机质成熟产生的

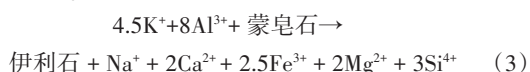
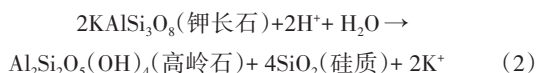
酸性流体对储层的溶蚀有关。随着埋藏深度增大,地层温度逐渐升高,烃源岩进入生烃门限后,大量的有机酸和 CO_2 排出进入相邻的储层中,进而使储层中的长石、岩屑及易溶的黏土矿物溶蚀而生成碳酸盐胶结物沉淀。钙长石的溶解是碎屑岩碳酸盐胶结物钙离子的重要内部来源之一^[14],为方解石的

形成提供了 Ca^{2+} , 反应过程如下:



该反应在 60~70 °C 就已经开始, 最理想的温度为 80~120 °C。

研究区须四段为富岩屑砂岩地层, 岩屑中以变质岩岩屑为主, 而且有少量的火山岩岩屑, 须四段砂泥比为 1:1 左右^[15], 因此须四段存在大量的黏土矿物, 富含 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子。在地层中存在足够量的初始蒙皂石的情况下, 如果砂岩中存在一定数量的同期火山物质作为填隙物, 或出现砂岩与相邻泥岩层(古老地层中的蒙皂石相对较少, 而同期火山物质中蒙皂石较多)有流体交换的情况, 下面两个彼此依赖的伴生反应会在含钾长石的砂岩地层中发生:



反应式(3)是一个低耗能的自发反应, 只要地层中有蒙皂石, 该反应就会持续发生^[16]。该反应的发生温度为 60 °C 左右, 在 120~140 °C 基本停止^[16]。刘四兵等^[2]研究认为, 此温度范围正是晶粒方解石胶结物形成的温度范围。

可见随着温度的升高, 长石及黏土矿物的溶蚀使储层中碳酸盐胶结物逐渐生成, 同时释放到成岩体系内的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Mg^{2+} 也逐渐增多。前已述及, 较之直接从溶液中沉淀结晶, CaCO_3 胶结物的成岩过程是一个极其缓慢的过程, Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Mg^{2+} (尤其是分配系数变化很大的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+}) 在 CaCO_3 中分配系数较高, 大量的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 等离子在成岩过程中进入碳酸盐晶格中。随着水-岩反应的推进, 方解石胶结物中在埋藏晚期形成的中晶胶结物的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量高于埋藏早期的微晶、粉晶胶结物(图 8a, 8b), 晶体外部 Fe^{2+} -水-岩反应时间增长, 胶结物沉淀速率减小, Mn^{2+} 在矿物中的分配系数相对于 Fe^{2+} 增大, 这导致当晶体达到中晶级别及连晶方解石晶体增长到一定程度时, 胶结物内随着 Mn^{2+} 含量增高, Fe^{2+} 并不呈增高的趋势(图 5)。

须四段成岩期发育一定量的绿泥石胶结物, 以孔隙衬垫及充填于次生孔隙等形式生成^[17]。绿泥

石薄膜形成的门槛温度是 90 °C 到 120 °C, 即为研究区碳酸盐胶结物大量形成的时期, 绿泥石的形成消耗了 Mg^{2+} , 使方解石胶结物中 Mg^{2+} 含量减少, 白云石化作用也使 Mg^{2+} 含量减少^[18](图 7c)。

7 结 论

(1) 通过薄片鉴定与统计分析, 根据岩石颗粒组分特征可将川西坳陷上三叠统须家河组四段砂岩储层分为 3 个大类: 长石岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、岩屑砂岩, 其中长石岩屑砂岩储层质量最好。碳酸盐胶结物是影响储层质量的重要因素。连晶方解石与晶粒结构方解石胶结物在影响储层质量方面都具有非常重要的作用。

(2) 阴极发光和微量元素组成特征反映连晶方解石与晶粒结构方解石离子来源方式存在差异: 连晶方解石具有亮黄色的阴极发光特征, 具高 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量, 低 Sr^{2+} 含量, 与钙屑颗粒的元素组成相似, 具有大气淡水成因的元素组成特点, 证实了其形成受到大气淡水淋滤作用的影响。

(3) 微晶、粉晶、细晶、中晶方解石具有橘红色到橘黄色的阴极发光特征, 长石溶孔充填方解石阴极发光具有明暗相间多个世代特征, 反映了其 Fe/Mn 值的变化规律。其中, 晶型较大的中晶方解石与孔隙充填方解石具高 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量和低 Mg^{2+} 含量的特征。通过分析认为长石及黏土矿物在埋藏成岩作用时期受到有机酸溶蚀, 导致成岩体系内高的 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 浓度, 及 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 在方解石胶结物成岩过程中较高的分配系数决定了胶结物中元素的这种分布特征, 因此晶粒碳酸盐胶结物离子主要来源于埋藏期长石及黏土矿物的溶解。

参 考 文 献

- [1] 张鼎, 田作基, 吴胜华, 等. 川西须家河组储层成岩演化[J]. 岩石学报, 2008, 24(9): 2179-2184.
ZHANG Nai, TIAN Zuoji, WU Shenghua, et al. Study Xujiache reservoir diagenetic process, Sichuan Basin[J]. Acta petrologica sinica, 24(9): 2179-2184.
- [2] 刘四兵, 黄思静, 沈忠民, 等. 砂岩中碳酸盐胶结物成岩流体演化和水岩作用模式: 以川西孝泉-丰谷地区上三叠统须四段致密砂岩为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(7): 1403-1417.
LIU Sibing, HUANG Sijing, SHEN Zhongmin, et al. Diagenetic fluid evolution and water-rock interaction model of carbonate cements in sandstone: an example from the reservoir sandstone

- of the Fourth Member of the Xujiahe Formation of the Xiaoquan-Fenggu area, Sichuan Province, China[J]. Science China: earth sciences, 2014, 57: 1077-1092.
- [3] BIRKLE P, ROSILLO ARAGÓN J J, PORTUGAL E, et al. Evolution and origin of deep reservoir water at the Activo Luna oil field, Gulf of Mexico, Mexico [J]. AAPG bulletin, 2002, 86 (3): 457-484.
- [4] 李嵘, 吕正祥, 叶素娟. 川西坳陷须家河组致密砂岩成岩作用特征及其对储层的影响[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2011, 38(2): 147-155.
- LI Rong, LÜ Zhengxiang, YE Sujuan. Impact of diagenesis on reservoir-quality evolution in the Upper Triassic Xujiahe tight sandstones, west Sichuan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (science & technology edition), 2011, 38 (2): 147-155.
- [5] 黄思静, 毛晓冬, 张萌, 等. 孝泉—新场—合兴场地区须家河组储层砂岩成岩作用机理研究[R]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- HUANG Sijing, MAO Xiaodong, ZHANG Meng, et al. Study on diagenesis mechanism of reservoir sandstone of Xujiahe Formation in Xiaoquan-Xinchang-Hexingchang area [R]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.
- [6] 兰叶芳, 黄思静, 黄可可, 等. 珠江口盆地珠江组碳酸盐岩阴极发光特征及成岩阶段划分[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(1): 34-42.
- LAN Yefang, HUANG Sijing, HUANG Keke, et al. Cathodoluminescence features and diagenetic stage division of carbonates in the Zhujiang Formation, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum geology and recovery efficiency, 2017, 24(1): 34-42.
- [7] 肖凯, 时志强, 吴冰, 等. 川东南地区林1井震旦系灯影组电子探针分析: 热液白云岩化过程中的元素变化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(2): 289-298.
- XIAO Kai, SHI Zhiqiang, WU Bing, et al. Electron microprobe analysis of the Permian Sinian Dengying Formation in Well Lin-1, southeastern Sichuan: element concentration changing during the hydrothermal dolomitization [J]. Bulletin of mineralogy, petrology and geochemistry, 2017, 36(2): 289-298.
- [8] 张玉光, 吉学平, 李志恒, 等. 云南昭通中新世晚期生物地层化学元素的组合特征及古埋藏环境分析[J]. 地球科学前沿, 2014, 4: 389-396.
- ZHANG Yuguang, JI Xueping, LI Zhiheng, et al. The Characteristics of the biostratigraphic chemical elemental combinations and taphonomic environmental analyses of the latest Miocene deposits in Zhaotong, Yunnan [J]. Advances in geosciences, 2014, 4: 389-396.
- [9] 倪善芹, 侯泉林, 王安建, 等. 碳酸盐岩中锶元素地球化学特征及其指示意义: 以北京下古生界碳酸盐岩为例[J]. 地质学报, 2010, 84(10): 1510-1516.
- NI Shanqin, HOU Quanlin, WANG Anjian, et al. Geochemical characteristics of carbonate rocks and its geological implications: taking the Lower Palaeozoic carbonate rock of Beijing area as an example [J]. Acta geologica sinica, 2010, 84 (10): 1510-1516.
- [10] 沈忠民, 宫亚军, 刘四兵, 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): 82-88.
- SHEN Zhongmin, GONG Yajun, LIU Sibing, 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): 82-88.
- [11] 刘丽红, 黄思静, 王春连, 等. 碳酸盐岩中方解石胶结物的阴极发光环带与微量元素构成的关系: 以塔河油田奥陶系碳酸盐岩为例[J]. 海相油气地质, 2010, 15(1): 55-60.
- LIU Lihong, HUANG Sijing, WANG Chunlian, et al. Cathodoluminescence zonal texture of calcite cement in carbonate rock and its relationship with trace element composition: a case of Ordovician carbonate rock of Tahe Oilfield, Tarim Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2010, 15(1): 55-60.
- [12] 徐樟有, 吴胜和, 张小青, 等. 川西坳陷新场气田上三叠统须家河组须四段和须二段储集层成岩-储集相及其成岩演化序列[J]. 古地学报, 2008, 10(5): 447-458.
- XU Zhangyou, WU Shenghe, ZHANG Xiaoqing, et al. Diagenetic-reservoir facies and their evolutionary sequences of the Members 4 and 2 of Upper Triassic Xujiahe Formation in Xinchang Gasfield, western Sichuan Depression [J]. Journal of palaeogeography, 2008, 10(5): 447-458.
- [13] 黄思静. 海相碳酸盐矿物的阴极发光性与其成岩蚀变的关系[J]. 岩相古地理, 1990, 4: 9-15.
- HUANG Sijing. Cathodoluminescence and diagenetic alteration of marine carbonate minerals [J]. Sedimentary facies and palaeogeography, 1990, 4: 9-15.
- [14] 张青青, 刘可禹, 刘太勋, 等. 碎屑岩储层碳酸盐胶结物成因研究进展[J]. 海相油气地质, 2021, 26(3): 231-244.
- ZHANG Qingqing, LIU Keyu, LIU Taixun, et al. Research status of the genesis of carbonate cementation in clastic reservoirs [J]. Marine origin petroleum geology, 2021, 26(3): 231-244.
- [15] 刘四兵, 沈忠民, 刘昊年, 等. 川西坳陷中段上三叠统须家河组水岩相互作用机制[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 47-58.
- LIU Sibing, SHEN Zhongmin, LIU Haonian, et al. Mechanism of water-rock interaction of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the middle part of western Sichuan Depression [J]. Acta petrolei sinica, 2013, 34(1): 47-58.
- [16] 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坳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 Xujiahe

- Formation, western Sichuan Depression [J]. *Geochimica*, 2009, 38(5): 498–506.
- [17] 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.
- LÜ 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.
- [18] 孙治雷, 黄思静, 张玉修, 等. 四川盆地须家河组砂岩储层中自生绿泥石的来源与成岩演化[J]. *沉积学报*, 2008, 26(3): 459–468.
- SUN Zhilei, HUANG Sijing, ZHANG Yuxiu, et al. Origin and diagenesis of authigenic chlorite within the sandstone reservoirs of Xujiahe Formation, Sichuan Basin, China [J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2008, 26(3): 459–468.

编辑: 黄革萍

Formation mechanism of carbonate cements in sandstone of the Xujiahe Member 4 in western Sichuan Depression: evidence from trace elements

LI Wenmao, ZHANG Tiancao, ZHONG Yumei, YANG Yongjian, NAN Hongli

Abstract: According to the characteristics of rock particle composition, the sandstone reservoir of the Xujiahe Member 4 of Upper Triassic in western Sichuan Depression can be divided into three categories: feldspar lithic sandstone, lithic quartz sandstone and lithic sandstone, of which the quality of feldspathic lithic sandstone reservoir is the best. By means of cast thin section observation, cathodoluminescence and electron microprobe analysis, it is considered that carbonate cement is an important factor affecting reservoir quality and continuous calcite and calcite cement with grain structure play a very important role in affecting reservoir quality. The enrichment law and trace element content change of carbonate cements are analyzed. It is found that different types of sandstone develop crystal stock calcite, crystalline calcite and dolomite cements, and the characteristics of cement content, cathodoluminescence and trace element composition reflect the differences of their sources. The cathodoluminescence of crystal stock calcite is bright yellow, with high Fe^{2+} , Mn^{2+} contents, and low Sr^{2+} content. It has the characteristics of trace element composition caused by atmospheric fresh water, which confirms that it is affected by the leaching of atmospheric fresh water. Microcrystalline, very fine crystalline, fine crystalline and medium crystalline calcite has the cathodoluminescence of orange red to orange yellow, and the calcite filling in feldspar dissolved pore has the cathodoluminescence of dark and bright for multiple generations, reflecting the variation of Fe/Mn value from high to low. The middle crystalline calcite and calcite filling in feldspar dissolved pore are characterized by high Fe^{2+} , Mn^{2+} contents and low Mg^{2+} content. It is considered that because feldspar and clay minerals are affected by organic acid dissolution during burial diagenesis, the resulting high Fe^{2+} and Mn^{2+} concentrations in diagenetic system, and the high distribution coefficient of Mn^{2+} and Fe^{2+} in the diagenetic process of carbonate cement determine the distribution characteristics of trace element in the cements. Therefore, ions forming crystalline carbonate cement mainly comes from the dissolution of feldspar and clay minerals during burial.

Key words: sandstone; carbonate cement; trace elements; Xujiahe Formation; western Sichuan Depression

LI Wenmao, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in oil and gas reservoir geology. Add: Sinopec Building, No. 668 Jitai Rd., Gaoxin District, Chengdu, Sichuan 610081, China

ZHANG Tiancao, Corresponding author: Senior Engineer, mainly engaged in shale gas geology. Add: Sinopec Building, No. 668 Jitai Rd., Gaoxin District, Chengdu, Sichuan 610081, China