

陆相碎屑岩中钙质胶结物沉淀机制及油气储集意义

——来自济阳拗陷孔店组和川西须家河组的对比研究

谭先锋^{1,2}, 蒋威¹, 吴康军^{1,2}, 王浩¹, 徐田堃¹, 陈苏军¹, 冉天¹

(1. 重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331; 2. 复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要:通过阴极发光、扫描电镜、包裹体测温、碳氧同位素和化学离子等实验对济阳拗陷孔店组和川西地区须家河组碎屑岩中的钙质胶结机理进行研究。结果表明:钙质胶结类型主要为碳酸盐、硬石膏和萤石胶结,其微观特征受胶结时间和环境等影响;钙质来源和控制沉淀的因素共同影响着钙质胶结机制,大气水淋滤作用、长石的溶蚀、压实—压溶作用、有机盐岩热化学作用和黏土矿物转化是钙质胶结物中钙质的主要来源,钙质胶结物的沉淀并不是受单一因素影响,而是由多种因素共同作用形成,温度压力、pH 值和化学离子的浓度等是控制钙质胶结物溶解沉淀的关键因素;钙质胶结通常分为早、中、晚 3 期,储层的物性受钙质胶结期次的影响,成岩早期钙质胶结物对储层具有建设性,成岩晚期钙质胶结物对储层具有破坏性。

关键词:钙质胶结物;钙质来源;沉淀机制;碎屑岩;油气储集;济阳拗陷;川西地区

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Sedimentation mechanism and petroleum significance of calcareous cements in continental clastic rocks:

Comparison between the Kongdian Formation in the Jiyang Depression
and the Xujiahe Formation in the western Sichuan Basin

Tan Xianfeng^{1,2}, Jiang Wei¹, Wu Kangjun^{1,2}, Wang Hao¹, Xu Tiankun¹, Chen Sujun¹, Ran Tian¹

(1. College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

2. Key Laboratory of Exploration and Development of Complex Oil and Gas Fields in Chongqing, Chongqing 401331, China)

Abstract: The mechanism of calcareous cementation in clastic rocks in the Kongdian Formation in the Jiyang Depression and the Xujiahe Formation in the western Sichuan Basin were studied by means of cathode luminescence, scanning electron microscopy, inclusion homogenization temperature measurement, isotope content of carbon and oxygen, and chemical ion. The calcareous cements mainly consist of carbonates, hard gypsum and fluorite. Their microscopic characteristics are influenced by cementation time and environment. Calcium sources and precipitation controlling factors affect the mechanism of calcareous cementation. The calcium sources for calcareous cements mainly include meteoric water eluviation, feldspar dissolution, compaction and dissolution, thermochemical action of organic salt rocks, and clay mineral transformation. The precipitation mechanism of calcareous cements is not influenced by a single factor, but by many factors such as temperature and pressure, pH value and the concentration of chemical ions. The time of calcareous cementation is divided into early, middle and late. The physical properties of reservoirs are influenced by the time of calcareous cementation. Calcareous cements during the early diagenetic stage are constructive to the reservoir, while those during the late diagenetic stage are destructive.

Keywords: calcareous cements; calcium source; precipitation mechanism; clastic rock; hydrocarbon accumulation; Jiyang Depression; western Sichuan Basin

钙质胶结物是碎屑岩成岩过程中形成的自生矿物,也是碎屑岩中广泛存在的造岩矿物^[1],其类

型主要分为碳酸盐类、硬石膏类和萤石类;胶结物的沉淀机制受多种因素共同控制,原始沉积条件和

收稿日期: 2015-11-23; 修订日期: 2016-03-10。

作者简介: 谭先锋 (1982—), 男, 博士, 副教授, 从事沉积地质与古环境方面研究。E-mail: xianfengtan8299@163.com。

通信作者: 蒋威 (1995—), 男, 从事碎屑岩成岩作用研究。E-mail: 529722086@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41202043)、中国石油科技创新基金项目 (2014D-5006-0108)、重庆市教委科学技术研究项目 (KJ1401316) 和重庆科技学院优秀人才支持计划 (201502) 资助。

后期成岩流体共同控制了碳酸盐胶结物的含量^[2]。钙质胶结物对储集层物性具有重要影响,不同时期的钙质胶结物对储集层物性具有不同的作用,前期使砂岩产生大量孔隙,后期导致砂岩失去大量孔隙^[3]。钙质胶结作为成岩胶结类型的一个大类,在碎屑岩的形成过程中具有不可忽视的地位,而胶结作用过程中发生的物理、化学变化过程和钙质来源与运移过程一直是广大学者争论的焦点,弄清钙质的来源、运移途径、沉淀的环境及其与油气储层的关系非常重要^[4-5]。济阳拗陷孔店组和川西地区须家河组砂岩中均发现了大量的钙质胶结物,其特征和成因具有相似性,本文在总结上述 2 个地区钙质胶结物特征的基础上,系统探讨了钙质胶结物的微观特征、成因机制及其与油气储集的关系。

1 钙质胶结物微观特征

1.1 碳酸盐胶结物微观特征

碳酸盐胶结物的阴极发光具有不同特征,方解石为亮黄色—橙红色,与其碳、氧同位素含量有关,具有较高的碳、氧同位素时,阴极发光呈桔红色亮光,反之显示少量的亮黄色;白云石为暗红色;铁方解石较方解石发光更弱,铁白云石不发光(图 1a)。

控制碳酸盐胶结物相互转换的因素为化学离子的浓度、埋藏深度和流体酸碱度。济阳拗陷孔店组及川西须家河组碳酸盐矿物的胶结作用分为 3 期,即早期、中期和晚期,不同的碳酸盐矿物形成于不同的成岩作用阶段。早期碳酸盐胶结物通常为方解石胶结(图 1b)或白云石胶结(图 1c),多呈基底式胶结和孔隙式胶结,胶结作用强烈,主要发生在准同生—早成岩期,由 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 过饱和的盐湖相或海相沉积环境通过化学沉积分异作用沉积形成,偶见铁白云石;在早期方解石胶结作用后可能出现白云石交代早期形成的方解石胶结物(图 1d),白云石分布比较复杂,部分白云石呈隐晶质或泥晶产出,这种白云石胶结为准同生白云岩作用的产物。中期为铁方解石胶结,由于碎屑岩受到强烈压实作用,碎屑颗粒之间呈缝合线接触(图 1e),又由于在此成岩期孔隙流体对胶结物进行了溶蚀,因此中期碳酸盐胶结物多呈分散状孔隙式胶结出现,成分多为铁方解石,是对早期方解石胶结物进行交代作用形成的。晚期为铁白云石胶结物(图 1f),与早期、中期碳酸盐胶结物不同,主要对储层物性起破坏性作用,并且强烈交代早期、中期碳酸盐胶结物,并充填粒间孔和各类溶蚀孔,常见分散

状和晶粒状分布。

铁方解石和铁白云石形成于碱性流体中,由 Fe^{2+} 在强还原环境下进入 CaCO_3 和 MgCO_3 离子晶体的晶格中形成。但是 Amthor 等^[6]对荷兰北部赤底统砂岩储层的研究和 Taylor 等^[7]对犹他—科罗拉多白垩系砂岩中碳酸盐胶结物的研究表明,铁白云石胶结物并不都是形成于成岩晚期,也可以形成于低温浅埋藏环境的早成岩期。在碳酸盐胶结过程中还会出现菱铁矿胶结现象,但含量较低,也不是碳酸盐胶结物的主要类型。在济阳拗陷还存在大量方解石交代石英、长石颗粒现象(图 1g),因此碳酸盐胶结物在不同成岩期产出不同类型,并通过交代作用进行相互转换。在早成岩期碳酸盐胶结物的自形程度较高,晶粒较大,越到后期晶粒减小,自形程度降低,最终只能充填于剩余孔隙中。如图 1k,充填于粒间孔的方解石由于受压实作用,导致方解石边缘不规则状,自形程度低。

1.2 硬石膏胶结物微观特征

硬石膏胶结物是早期石膏胶结物在高温下脱水转化的产物,该反应是可逆的,其成因可以是沉积成因,也可以是成岩成因。沉积成因与干燥炎热的环境有关,由于海水或盐湖的水分蒸发, SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} 浓度过饱和而沉淀形成的石膏和硬石膏,多呈柱状或板状单晶,是在稳定环境下缓慢生成,也有呈团粒状集合体(图 1l)。成岩成因是由于埋深不断加深而形成的硬石膏,即当埋藏温度大于 $45 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时石膏脱水转化为硬石膏。硬石膏胶结主要表现为基底式强烈胶结作用(图 1h)和对其他物质的交代作用,如硬石膏交代石英颗粒(图 1i)、长石颗粒和碳酸盐颗粒。

济阳拗陷孔店组的硬石膏有 2 种胶结方式:(1)硬石膏与碎屑颗粒之间呈基底式胶结,不存在穿插和切割现象,这类硬石膏胶结现象主要发生在同生期—早成岩 A 期;(2)硬石膏充填于岩屑、长石等溶蚀孔隙中,或交代方解石胶结物,这类硬石膏胶结主要产生于酸性流体注入和长石溶解之后, Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 重新结合形成胶结物。硬石膏在成岩阶段的微观特征上,徐天光^[8]认为在盐湖沉积环境同生期成岩阶段,主要形成微晶石膏和粉晶石膏,早成岩 A 期主要形成粒状硬石膏、粉晶状硬石膏和花斑状硬石膏;早成岩 B 期主要形成片麻状硬石膏、自形板状硬石膏和斑块状硬石膏;晚成岩 A 期主要形成揉曲状硬石膏、花瓣状硬石膏和放射状硬石膏。

1.3 萤石胶结物微观特征

萤石是岩体埋藏时期的产物,因此萤石形成的

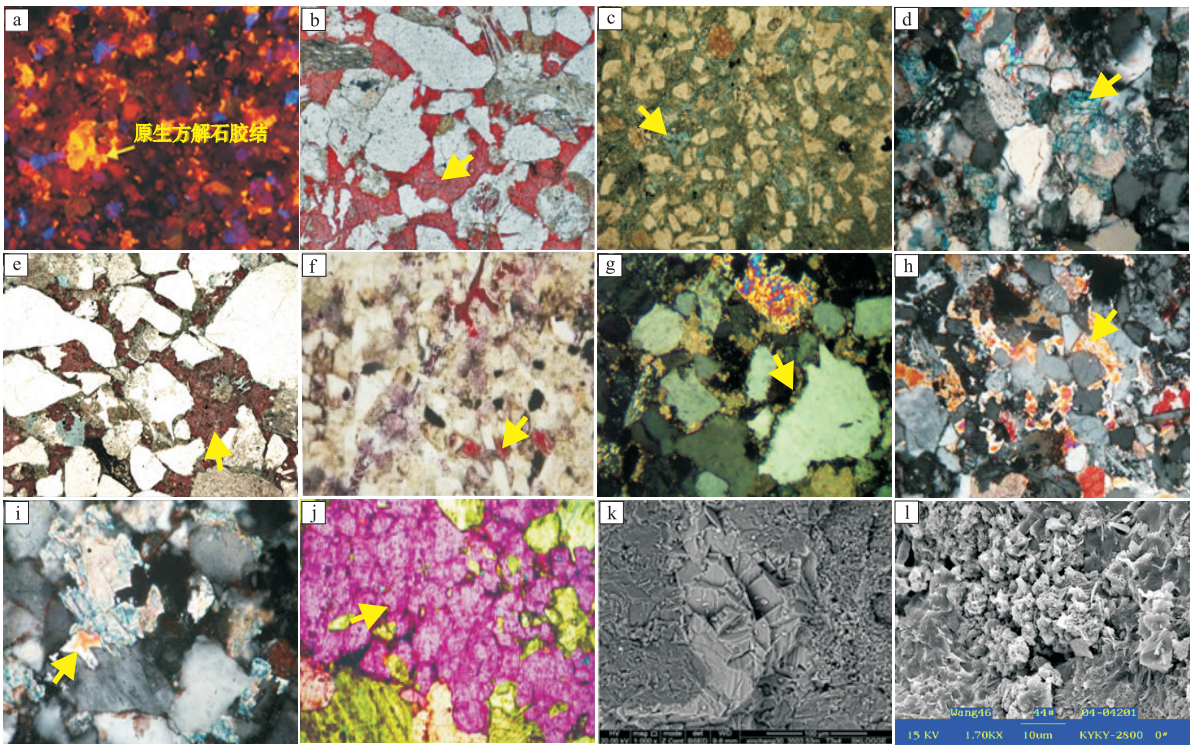


图1 济阳拗陷孔店组和川西须家河组钙质胶结物镜下特征

a.亮黄色方解石充填粒间孔隙(济阳拗陷孔店组),W100-8,1 793.55 m,10×10,阴极发光;b.方解石基底式胶结(四川盆地须四段),XC15井,3 636.57 m,10×10,单偏光;c.白云石基底式强烈胶结作用(济阳拗陷孔店组),XLS1,4 412 m,10×10,正交光;d.白云石交代方解石(济阳拗陷孔店组),新东风10,4 071.5 m,10×10,正交光;e.斑块状铁方解石胶结(济阳拗陷孔店组),Y921,2 468.54 m,10×10,正交光;f.晚期铁白云石胶结,黏土矿物充填(济阳拗陷孔店组),新东风10,K₁,4 079.5 m,4×10,单偏光;g.方解石交代长石(济阳拗陷孔店组),王46,3 788.79 m,10×10;h.硬石膏基底式胶结(济阳拗陷孔店组),新东风10,K₁,4 058 m,4×10;i.硬石膏交代石英颗粒(济阳拗陷孔店组),新东风10,K₁,4 058 m,10×10;j.溶洞内充填的萤石,正交偏光+λ,呈不规则粒状^[10];k.方解石充填孔隙(四川盆地须二段),新场30井,3 503.53 m,扫描电镜;l.孔隙中分布的团粒状石膏(济阳拗陷孔店组),王46井,4 406.85 m,扫描电镜

Fig.1 Microscopic characteristics of calcareous cements in the Kongdian Formation in the Jiyang Depression and the Xujiahe Formation in the western Sichuan Basin

环境和条件不同,其微观特征也会不一样。目前,许多学者认为晚二叠世的岩浆期后的热液作用是产生萤石的主要因素,并且在海西期存在相应的热液溶蚀期^[9]。萤石的形成环境为断裂构造,条件为热液作用时,萤石主要沿高角度构造断裂溶扩带呈充填脉状产出,也有充填于粒间孔隙中和溶蚀孔的现象(图1j)^[10],主要为半自形—他形晶或隐晶,无色透明或淡紫色为主。但是也有一些萤石是在沉积作用和表生作用下形成;沉积作用下形成的萤石通常呈层状产出;表生作用也就是指萤石在大气水淋滤条件下形成,规模一般较大,成分复杂,产状变化较大。

2 钙质胶结物沉淀机制讨论

2.1 钙质胶结物物质来源

近年来,钙质胶结物的物质来源引起大量学者的关注,钙质胶结过程中钙质的来源成为广大学者探讨的重要话题,是深入探讨其成因机制的首要因

素^[11]。研究表明,济阳拗陷孔店组和川西须家河组钙质来源主要为大气水淋滤作用、长石溶蚀、压实—压溶作用、有机盐岩热化学作用和黏土矿物的转化等5个方面。

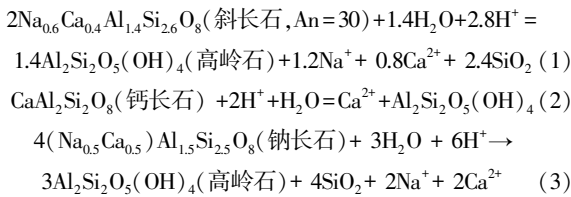
2.1.1 大气水淋滤作用

大气水淋滤作用通常发生于埋藏初期或地壳抬升期。(1)地表弱酸性流体在重力驱动下沿着渗透层和断层流动,溶解易溶矿物产生次生孔隙,对于改善不整合面附近的储层物性具有重要作用^[11];大气水向下渗透的过程中溶蚀的易溶矿物,既是钙质的重要来源,也是 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 等酸根离子的重要来源。(2)埋藏初期大气水和海水或盐湖共同作用影响钙质胶结物的沉淀,如刘四兵等^[12]对四川盆地须四段的研究表明,须四段的连晶方解石胶结物由于具有相对较重的碳、氧同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = 2.14\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} = -5.77\text{‰}$),说明其沉淀时间早,因为其氧同位素接近大气水—海水混合流体的特征($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} = -3\text{‰}$),所以须四段沉积时期的沉淀流体同时受到

了大气水和海水的影响,而大气水从地表流进地下的过程中溶解的 CO₂正好是碳的一种来源,这种来源的 CO₂碳同位素一般在-7‰左右,能让胶结物的碳同位素值正向偏移,因此连晶方解石具有相对较重的碳同位素与大气水作用有一定联系。因此大气水淋滤作用对钙质胶结物的钙质和碳质来源具有一定贡献。

2.1.2 长石的溶蚀

许多学者经过大量实地勘探和实验发现,钙质胶结物中的钙质一部分来自于长石的溶解。济阳拗陷孔店组和四川盆地须家河组有大量的长石砂岩,有机酸流体、热液流体和大气水淋滤等作用(图 2)均可导致长石的溶解^[13],长石在酸性环境中容易发生溶解,且溶解产物含 Ca²⁺,基本反应方程式如下:



反应式(1)(2)(3)表明,长石的溶蚀可以产生大量的 Ca²⁺,长石的溶蚀与高岭石等黏土矿物的转化密切相关,并且在一些黏土矿物相互转化的过程中也会产生 Ca²⁺。在陆相碎屑岩中长石的含量仅次于石英的颗粒组分,因此酸性流体对长石的溶蚀是钙质胶结物中钙质的重要来源,而形成的钙质胶结物对长石进行交代作用。济阳拗陷孔店组存在很多方解石交代长石的现象(图 1g)。长石的溶蚀作用通常发生在较为开放的水岩相互作用体系,存在外源有机 CO₂的输入,其来源于有机酸流体中,会导致胶结物中碳同位素的值偏轻,也会导致沉淀

流体中氧同位素明显增大,这有利于做数据处理时能明确该胶结物的形成环境^[12]。

2.1.3 压实—压溶作用

压实作用主要开始于成岩早期,可从浅埋藏成岩阶段到深埋藏成岩阶段,长石等刚性矿物在压实作用下发生机械破碎,增大了岩层密度,减少了储层的原生孔隙^[14]。四川盆地须家河组和济阳拗陷孔店组埋藏深度较大,压实压溶作用比较发育。虽然在抗压过程中有长石和自生矿物等刚性颗粒的破裂现象发生,但是碎屑岩中的骨架颗粒—胶结物有效增强了岩石的抗压能力。

压溶作用是指高压环境下产生的高温增大了矿物在流体中的溶解速率,通常和压实作用伴生出现。压实过程中有释放有机酸流体现象,有机酸在压实压溶作用产生的高温高压下发生热解脱胶并释放出 CO₂,这些 CO₂容易溶入黏土矿物经压实作用释放出的不同类型水中(层间水、结构水和吸附水),形成具有较强溶蚀能力的有机酸和碳酸液,对长石、易溶岩屑及早期碳酸盐胶结物进行严重溶蚀,同时压实压溶产生的高温高压会增大长石、碳酸盐矿物等的溶解度,从而产生钙质来源。但是压实压溶作用对钙质来源的贡献不大,钙质主要来源于破碎的长石和钙质矿物^[15]。

2.1.4 有机酸流体化学作用

钙质胶结物溶解的酸性来源一直是研究的热点问题。有机酸主要有 2 个方面的来源,一是黏土矿物的转化排水提供,二是泥岩有机质转化形成。

Heydari 等^[16]对泥岩有机质演化的研究表明,在 80~120 °C 下,烃源岩中的干酪根会脱去羧基及酚形成大量有机酸流体,在 120~160 °C 下,干酪根脱氧,羧基阴离子脱羧生成大量 CO₂,CO₂溶解于地

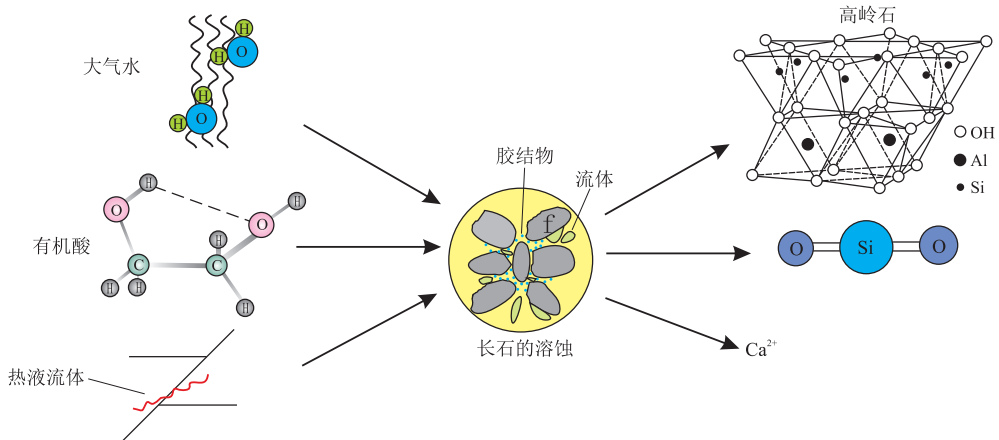


图 2 长石的溶解作用模式

Fig.2 Dissolution pattern of feldspar

层流体中使流体呈酸性,因为长石的溶解度受流体酸碱度的影响明显,也就是长石在酸性环境易于溶解,在碱性环境相对稳定,所以有机酸和酸性流体能够增大长石的溶解度。有机酸流体不仅能促进长石的溶解,还能促进碳酸盐矿物、碳酸盐岩等岩屑的溶解,是钙质来源的可靠途径。烃源岩在热演化过程中释放的有机酸、水、CO₂对钙质来源的影响是巨大的,对胶结物中碳同位素的影响也是巨大的。有机来源的CO₂具有相对最轻的碳同位素,可轻至-18‰~-33‰^[17]。通过碳同位素可以判断胶结物经历了哪些成岩作用,如果碳同位素偏轻,说明胶结物受有机酸流体影响明显,反之胶结物受有机酸流体影响较轻或不受有机酸流体影响。济阳拗陷孔店组组成岩过程中受到了多期次有机酸的影响,样品中δ¹³C值普遍偏低,最高也只有-23.71‰,说明该区域在成岩期胶结物主要受有机酸作用影响,导致δ¹³C值普遍较低(表1)。

2.1.5 其他作用因素

钙质胶结物钙质来源除以上主要4种以外,还有黏土矿物的转化和铝硅酸盐矿物的水化作用等。泥岩中蒙脱石向伊利石转化可释放Ca²⁺,主要表现为随着风化程度的加强,黏土矿物发生蒙脱石→无序伊/蒙混层→有序伊/蒙混层→伊利石的转化^[18-19]。济阳拗陷孔店组部分埋藏深度较大的地区伊/蒙层间比较高,但总体上伊/蒙层间比随埋藏

表1 济阳拗陷孔店组有机碳同位素特征
Table 1 Distribution of organic carbon isotopes of the Kongdian Formation in the Jiyang Depression

样号	样品号	深度/m	δ ¹³ C _{PDB} /‰
1	W100-7	1 792.45	-28.75
2	W100-9	1 895.95	-24.56
3	W100-16	1 805.25	-24.50
4	W100-19	1 809.85	-24.02
5	W100-21	1 818.90	-24.10
6	W100-22	1 819.90	-23.71
7	W100-26	1 858.10	-25.96
8	W100-35	1 903.20	-24.47
9	W100-40	2 020.97	-27.90
10	W100-52	2 178.60	-25.79
11	W100-59	2 201.10	-25.03
12	W100-61	2 206.80	-25.25
13	W100-69	2 220.00	-24.16
14	W100-74	2 266.80	-24.56

深度的增大而降低(表2),说明黏土矿物的热转化率随地温的增大而减小。然而,通常黏土矿物的热转化率会随地温增大而增大^[19],说明黏土矿物的热转化率有一个转折端,当地温小于这个转折端时热转化率会随之增大,当大于这个转折端时热转化率会逐渐减小。化学过程如下:

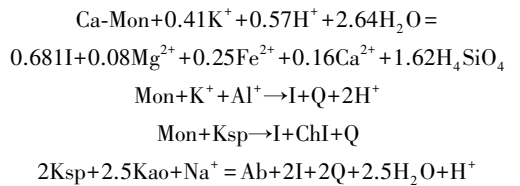


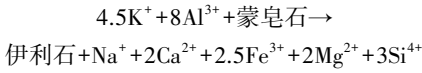
表2 济阳拗陷孔店组黏土矿物X衍射分析

Table 2 X-diffraction analysis of clay minerals of the Kongdian Formation in the Jiyang Depression

井号	层位	井深/m	岩石类型	黏土总量/%	黏土矿物相对含量/%				伊/蒙间层比/%
					伊/蒙间层	伊利石	高岭石	绿泥石	
HK1	孔店组	3 491.70	泥质粉砂岩	22	35	57	6	2	20
		4 013.16	含碳酸盐质泥质粉砂岩	8	17	24	12	47	10
		4 013.23	含硬石膏质粉砂岩	22	24	28	18	3	20
		4 013.28	含碳酸盐质含泥质粉砂岩	7	13	29	12	46	15
		5 103.85	极细粒长石砂岩	10	35	47	8	10	20
		5 104.65	极细粒长石砂岩	40	27	25	12	36	15
W46	孔店组	2 924.83	粉砂质极细粒长石砂岩	4	15	17	19	49	20
		2 997.10	极细粒岩屑长石砂岩	11	33	20	19	28	20
		3 787.69	中粒岩屑长石砂岩	5	24	20	15	41	20
		3 791.35	含灰质极细粒长石砂岩	7	44	32	11	13	20
		4 116.31	泥云质极细粒岩屑长石砂岩	47	23	68	3	6	20
		WX131	孔店组	2 254.96	泥质粉砂质极细粒岩屑长石砂岩	15	73	13	8
2 368.00	极细粒岩屑长石砂岩	4		62	22	8	8	20	
W100	孔店组	1 855.95	极细粒岩屑长石砂岩	8	69	14	9	8	60
		2 017.00	极细粒长石砂岩	4	48	34	9	9	50
		2 112.50	灰质极细粒岩屑长石砂岩	8	71	14	7	8	55
		2 177.25	细粒岩屑长石砂岩	11	52	22	13	13	50
		2 196.70	细粒岩屑长石砂岩	4	23	12	38	27	20
		2 262.00	细粒岩屑长石砂岩	7	64	14	16	6	55

上式中, Mon 为蒙脱石, I 为伊利石, Q 为石英, Ksp 为钾长石, Kao 为高岭石, Ab 为钠长石, ChI 为绿泥石。

蒙皂石或伊利石层含量相对较低的伊利石/蒙皂石混层向伊利石层含量相对较高的伊利石/蒙皂石混层及伊利石转化,也是向碳酸盐胶结物提供钙源的一种途径^[2],化学方程式如下:



铝硅酸盐矿物先发生水化作用,再发生绢云母化,水化作用使成岩作用早期的孔隙流体 pH 值由中性或中偏碱性向碱性转变,并提供各种金属离子 Fe²⁺、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 为钙质胶结物提供钙源。此外,另一种钙质来源是生物碎屑,也为钙质胶结物提供了钙离子^[2]。漆滨汶等^[18]还认为原生沉积水体或孔隙水中的 Ca²⁺ 也可是钙质胶结物的钙质来源。

2.2 钙质胶结物沉淀的控制因素及反应机理

2.2.1 不同温度压力条件下的沉淀作用

温度、压力对钙质胶结物溶解—沉淀的影响一直是学者们探讨的热点。一般情况下,温度与压力呈正比例关系,并且温度压力不断增大,钙质胶结物的溶解度也不断增大。但曹中宏等^[20]和范明等^[21]的实验研究表明,当温度升高达到一定值后方解石的溶解度也会达到最大值,当温度继续升高而方解石的溶解度却逐渐降低,这也是碳酸盐胶结物能够在高温下沉淀的重要原因。

根据碳酸盐胶结物的包裹体均一温度推测其形成时期的地质条件。如图 3 所示,济阳坳陷孔店组的碳酸盐胶结物的包裹体均一温度范围大,为 62.7 ~ 178.8 °C,平均 145.3 °C 左右,原生连生方解石的包裹体均一温度是 62.7 °C,沉淀于早成岩—准同生期,裂缝充填方解石的包裹体均一温度很高,说明其沉淀于晚成岩末期,其形态为脉状,更说

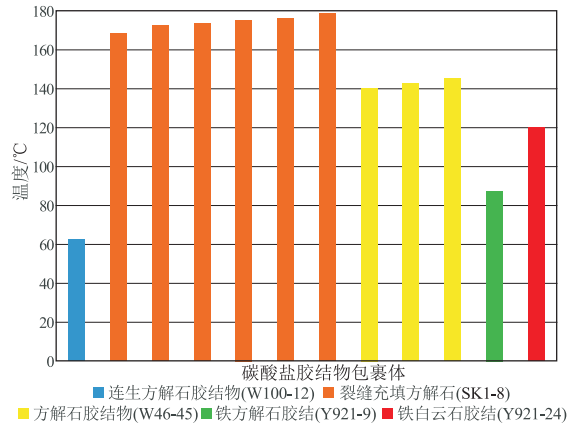


图 3 济阳坳陷孔店组碳酸盐胶结物包裹体均一温度分布
Fig.3 Distribution histograms of inclusion homogenization temperature of carbonate cements in the Kongdian Formation in the Jiyang Depression

明了这点。根据方解石、铁方解石和铁白云石胶结物的包裹体均一温度,可知它们沉淀于成岩中期或晚成岩早期。在图 3 中可以看出,同一个碳酸盐胶结物有多个包裹体温度,但是包裹体温度差距并不大,是因为碳酸盐胶结物是在一定温度范围内沉淀,而不是在特定温度下沉淀形成。硬石膏与萤石的溶解度与温度呈正比例关系,硬石膏是因为温度升高石膏脱水而形成,萤石则多数是在热液流体中生成,所以硬石膏和萤石遇高温溶解度一定增大,然后随流体运移到低温低压区沉淀。

氧同位素也可以用于准确判别胶结物的形成条件。地质历史中,海相碳酸盐岩 δ¹⁸O 值具有随地质年代变老而明显降低的“同位素年代效应”^[22]。氧同位素含量越轻,胶结物沉淀时的温度越高,反之越低。川西地区须四段中亚段碳酸盐胶结物主要以充填原生孔形式存在,以中—细晶方解石、粉—细晶白云石为主,其中方解石胶结物沉淀温度在 33.37~47.59 °C,白云石胶结物沉淀温度在 64.44~71.42 °C (表 3),具有较低的沉淀温度,为早

表 3 四川盆地须家河组碳酸盐胶结物碳、氧同位素及沉淀温度

Table3 C, O isotopes and precipitation temperatures of carbonate cements in the Xujiahe Formation, Sichuan Basin

井号	深度/m	胶结物产状	矿物类型	岩石名称	δ ¹³ C _{PDB} /‰	δ ¹⁸ O _{PDB} /‰	温度/°C
CF563	3 744.21	充填原生孔	白云石	中粒钙屑砂岩	2.11	-5.64	69.19
FG21	3 767.45	充填原生孔	白云石	中粒钙屑砂岩	2.01	-5.56	68.69
FG21	3 775.60	充填原生孔	白云石	中粒钙屑砂岩	1.53	-5.99	71.42
FG21	3 775.60	充填原生孔	白云石	中粒钙屑砂岩	2.22	-4.87	64.44
FG21	3 776.70	充填原生孔	白云石	中粒钙屑砂岩	2.13	-5.45	68.00
CF563	3 778.17	充填原生孔	方解石	中粒钙屑砂岩	2.31	-7.30	47.59
CF563	3 744.21	充填原生孔	连晶方解石	中粒钙屑砂岩	2.46	-5.51	37.41
FG21	3 772.23	充填原生孔	连晶方解石	中粒钙屑砂岩	2.15	-6.03	40.26
FG21	3 776.70	充填原生孔	连晶方解石	中粒钙屑砂岩	2.55	-4.75	33.37

期碳酸盐胶结作用所形成。另外,济阳拗陷孔店组的早期连生方解石氧同位素含量为 -16.23% ,沉淀温度也较低,成岩期最高的氧同位素含量为 -16.97% ,沉淀温度较高,这说明成岩期钙质胶结物主要受热液流体的影响。2个盆地对比表明,方解石胶结物在不同成岩期均可出现,受温度和压力影响较大。包裹体测温 and 氧同位素含量2种实验手段对硬石膏和萤石也具有较好的测试效果。

除上述情况外,由于地质环境和地壳构造运动区域性差异,存在异常高压区和异常低压区。在异常高压区存在碳酸盐差异胶结(细粒聚集效应),即优先在粒度较细的砂岩中沉淀,因此粒度较细的砂岩物性差,而粒度较粗的砂岩物性则较好,所以储层质量有好有坏^[23];并且压力过高还会影响流体渗透,从而抑制黏土矿物的转化,抑制长石溶解作用的发生,引起 Ca^{2+} 的来源减少,从而减弱胶结作用的发生^[24],而异常低压区正好与之相反。

2.2.2 成岩流体 pH 值对沉淀作用的影响

pH 值对钙质胶结物溶解—沉淀的影响也很重要,常常受有机酸流体的影响。pH 值对碳酸盐胶结物的影响较大,碳酸盐胶结物的物性较脆,化学性质活泼呈弱碱性,对孔隙流体的酸碱性异常敏感,在酸性环境下氧化性较强,易溶解,在碱性环境下还原性较强,易沉淀,并且 pH 值越大,碳酸盐胶结物的溶解度越大,反之越小,因而是成岩环境酸碱度变化的良好矿物指示剂^[2]。如孔店组砂泥岩互层旋回出现频繁,当埋藏达到一定深度后有机质生烃和泥岩压实共同作用产生有机酸,离解产生富含 H^+ 的流体,流体随泥岩压实排水充注进入砂体,碳酸盐矿物等易溶矿物在富含 H^+ 的流体中溶解^[25]。而硬石膏胶结物却正好与碳酸盐胶结物相反,硬石膏胶结物本身呈中性偏弱酸性,在碱性环境下溶解,在中性或碱性向酸性转化的环境下沉淀,并且 pH 值越大硬石膏胶结物的溶解度越小,反之越大。萤石胶结物与碳酸盐胶结物一样,在酸性环境下溶解,在碱性环境下沉淀,并且酸性越强溶解越快,此外, CO_2 对萤石的溶解作用较明显,如果是在烃源岩附近,萤石将很难沉淀^[26]。

成岩过程中流体 pH 值与离子浓度是分不开的,即是相互影响的。据关平等^[27]对成岩作用的热力学研究得知, $c[\text{HCO}_3^-]$ 、 $c[\text{SO}_4^{2-}]$ 和 $c[\text{Ca}^{2+}]$ 都会引起流体酸碱度的变化,从而影响各类钙质胶结物沉淀:(1) $c[\text{HCO}_3^-]$ 增大引起 pH 值增大,使得方解石与白云石发生沉淀和硬石膏发生溶解,也就是方解石或白云石交代硬石膏,当 pH 值在 5~6 之间

时,白云石与硬石膏共存,此时碳酸氢根浓度为 $0.01\sim 0.001\text{ mol/L}$ 之间。(2) $c[\text{SO}_4^{2-}]$ 增大有利于硬石膏沉淀,在硬石膏未沉淀时, $c[\text{SO}_4^{2-}]$ 对方解石和白云石没有任何影响,在硬石膏开始沉淀时由于消耗 Ca^{2+} 使得方解石和白云石开始沉淀,开始沉淀的条件为 $c[\text{SO}_4^{2-}]>10^{-3.16}$, $\text{pH}<4.6$,而硬石膏与白云石共存时 pH 值在 5~6 之间,所以 pH 不低于 5,即硬石膏交代白云石时, $c[\text{SO}_4^{2-}]$ 应当大于 0.01。事实上,显微镜下研究表明,济阳拗陷孔店组的硬石膏和方解石、白云石存在交代现象,硬石膏交代方解石现象也比较普遍,说明成岩演化过程中存在多种流体性质的改造。(3) $c[\text{Ca}^{2+}]$ 引起 pH 变化从而影响钙质胶结物沉淀条件,因 $c[\text{Ca}^{2+}]/c[\text{Mg}^{2+}]$ 值不同导致钙质胶结物沉淀条件也不同,当 $c[\text{Ca}^{2+}]/c[\text{Mg}^{2+}]=1$ 时,硬石膏只有在 $c[\text{Ca}^{2+}]>10^{-2.16}$, $\text{pH}<5.8$ 的条件下才会发生沉淀;当 $c[\text{Ca}^{2+}]/c[\text{Mg}^{2+}]=5$ 时, $c[\text{Mg}^{2+}]$ 降低会导致白云石发生溶解,使得白云石的稳定区域大大减少,其他影响与 $c[\text{Ca}^{2+}]/c[\text{Mg}^{2+}]=1$ 时相同。

2.2.3 化学离子浓度的影响

在早期成岩过程中,自生矿物的沉淀就是由于化学离子浓度过饱和,这就是早期的化学沉积分异作用。例如济阳拗陷盆地边缘王 100 井出现大量方解石胶结,盆地中央出现大量硬石膏胶结,均属于早成岩期沉积物的化学沉积分异作用。早期硬石膏胶结物就是由于环境炎热干燥引起盐湖水分大量蒸发从而增大 SO_4^{2-} 浓度,导致硬石膏的沉淀。在成岩中期或晚期,地层流体中阴离子(HCO_3^- , SO_4^{2-})和阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的浓度对钙质胶结物的沉淀也有着重要影响。当地层流体的酸碱度没有达到方解石、白云石等钙质胶结物沉淀的标准时,如果 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的浓度达到 10^{-2} mol/L , $\text{pH}=6$,方解石和白云石仍然可以发生沉淀, SO_4^{2-} 浓度增加有利于硬石膏胶结沉淀和方解石溶解, HCO_3^- 浓度增加有利于方解石、白云石沉淀和硬石膏溶解^[27]。齐亚林等^[28]对鄂尔多斯盆地延长组的研究结果表明,碳酸盐胶结物的溶蚀和沉淀受流体中 HCO_3^- 浓度的影响,当 HCO_3^- 浓度小于 2.787 mol/L 时,铁方解石含量随 HCO_3^- 浓度增加而增加,当 HCO_3^- 浓度大于 2.787 mol/L 时,铁方解石含量随 HCO_3^- 浓度增加而减少;铁白云石具有类似的特征,大于 0.182 mol/L 时铁白云石含量随 HCO_3^- 浓度增加而减少。因此化学离子浓度对钙质胶结物沉淀有着不可忽视的影响。

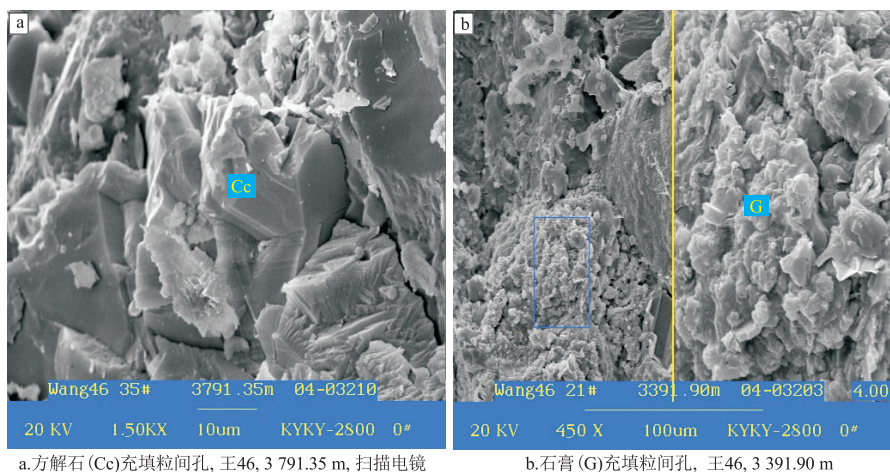


图 4 济阳拗陷孔店组钙质胶结物充填孔隙

Fig.4 Calcareous cements filling pores in the Kongdian Formation, Jiyang Depression

2.2.4 其他因素的影响

控制钙质胶结物沉淀的因素有很多,除以上 3 种主要因素外,还有油气的充注等次级因素。油气充注可以抑制或阻止成岩的进行,因为当油气充注后驱走了层间的水介质,成岩矿物之间失去了物质转移,从而抑制了胶结作用的进行^[25],所以钙质胶结物的沉淀作用也受油气充注的影响。

3 钙质胶结物的油气储层意义

通过对 2 个地区钙质胶结物的储层特征观察分析,钙质胶结物对储层具有重要影响。胶结作用是自生矿物沉淀充填粒间孔和溶蚀孔的过程(图 4),总体上看是对储层形成的一种破坏性作用。局部上看,如图 5 所示,钙质胶结物对储层的影响具有双重性,成岩早期原生沉淀的钙质胶结物占据了粒间孔,降低了储层孔隙率,但是有利于储层抵抗机械压实作用^[29]。由于钙质胶结物充填孔隙阻止了压实作用的进一步影响,使剩余孔隙得以保存,而钙质胶结物中的方解石、硬石膏等易溶组分又为成岩中期次生孔隙的形成奠定了物质基础,成岩流体溶解部分易溶矿物和钙质胶结物,提高了孔隙率,属于建设性成岩作用。成岩晚期钙质胶结物

的沉淀又不利于储层的发育,占据了砂岩储层的粒间孔和溶蚀孔,属于破坏性成岩作用,但是占据的次生孔隙体积小于中期形成的次生孔隙体积。成岩晚期,若 pH 值增大,硬石膏有可能转化为碳酸盐胶结物沉淀,对储层造成伤害^[30]。

钙质胶结过程中引发地层流体对长石、易溶岩屑等可溶物质的溶蚀,也是对储层发育比较有利的一面。2 个地区研究表明,有机酸流体对砂岩次生孔隙的演化具有重要作用,烃源岩生油过程中形成大量有机酸并进入储层,改变了储层介质的酸碱度,对长石、易溶岩屑和胶结物等矿物进行剧烈溶蚀,从而改变储层物性,提升储层孔隙率^[27];另一方面,硫酸盐热化学还原反应(TSR)溶蚀机制,对长石、碳酸盐和硫酸盐等矿物的溶解也有重要的促进作用,形成次生孔隙,TSR 溶蚀机制产生的溶解作用可使储层孔隙度增加 5%~10%^[10,31],属于建设性成岩作用。成岩过程中如果遇到超高压环境,则会抑制有机酸流体的生成,流体无法渗流和进行物质交换,钙质胶结物占据储集空间,对储层物性具有极大的破坏性^[24]。但是超高压环境对储层也是有一定好处的,超高压环境对压实具明显抑制作用,对原生孔隙保存有利,地层压力每超过静水压力 4 MPa,可保存原生孔隙约 1.1%^[23]。

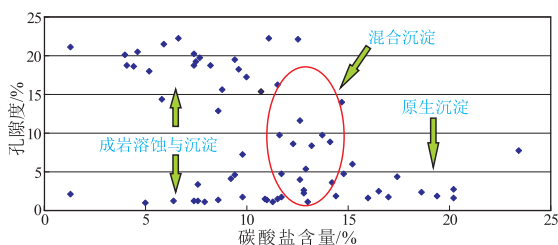


图 5 济阳拗陷孔店组碳酸盐胶结物与孔隙度关系

Fig.5 Relationship between carbonate cements and porosity of the Kongdian Formation, Jiyang Depression

4 结论

(1) 钙质胶结物的种类很多,其中主要为碳酸盐、硬石膏和萤石胶结物 3 类,胶结时间有早期、中期和晚期之分,并且胶结时间不同还会导致胶结物的种类不同。

(2) 钙质胶结物的沉淀机制受钙质来源和沉淀的控制因素共同影响。钙质胶结物中钙质来源

也有很多途径,其中最主要的来源是大气水淋滤作用、长石的溶蚀、压实—压溶作用、有机盐岩热化学作用和黏土矿物的转化,其他钙质来源较少,不会对储层产生很大的影响。影响钙质胶结物沉淀的因素很多,主要是温度、压力、pH值和化学离子浓度等因素。钙质胶结物的形成是一个复杂多变的物理化学变化过程,由多种因素共同控制形成。

(3) 钙质胶结物的沉淀机制对油气储层的影响因胶结时期不同而不同。总体而言,胶结作用对储层形成是一种破坏性作用;但是就局部而言,成岩早期钙质胶结物对储层具有建设性,成岩晚期钙质胶结物对储层具有破坏性。在成岩过程中,大气水淋滤、热液流体和有机酸等钙质来源的途径由于溶解了大量易溶矿物,对储层发育也具有建设性作用。

参考文献:

- [1] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社,2008:46-49.
Zhu Xiaomin. Sedimentary petrology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008:46-49.
- [2] 王琪,郝乐伟,陈国俊,等. 白云凹陷珠海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理[J]. 石油学报,2010,31(4):553-558.
Wang Qi, Hao Lewei, Chen Guojun, et al. Forming mechanism of carbonate cements in siliciclastic sandstone of Zhuhai Formation in Baiyun Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4):553-558.
- [3] 邹明亮,黄思静,胡作维,等. 西湖凹陷平湖组砂岩中碳酸盐胶结物形成机制及其对储层质量的影响[J]. 岩性油气藏,2008,20(1):47-52.
Zou Mingliang, Huang Sijing, Hu Zuwei, et al. The origin of carbonate cements and the influence on reservoir quality of Pinghu Formation in Xihu Sag, East China Sea[J]. Lithologic Reservoir, 2008, 20(1):47-52.
- [4] 王清斌,臧春艳,赖维成,等. 渤中坳陷古近系中、深部碎屑岩储层碳酸盐胶结物分布特征及成因机制[J]. 石油与天然气地质,2009,30(4):438-443.
Wang Qingbin, Zang Chunyan, Lai Weicheng, et al. Distribution characteristics and origin of carbonate cements in the middle and deep clastic reservoirs of the Paleogene in the Bozhong Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4):438-443.
- [5] Kantorowicz J D, Bryant I D, Dawans J M. Controls on the geometry and distribution of carbonate cements in Jurassic sandstones: Bridport Sands, southern England and Viking Group, Troll Field, Norway[C]// Diagenesis of Sedimentary Sequences: Special Publications 36. London: Geological Society of London, 1987:103-118.
- [6] Amthor J E, Okkerman J. Influence of early diagenesis on reservoir quality of Rotliegende sandstones, northern Netherlands[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(12):2246-2265.
- [7] Taylor K G, Gawthorpe R L, Curtis C D, et al. Carbonate cementation in a sequence stratigraphic framework: Upper Cretaceous sandstones, Book Cliffs, Utah—Colorado[J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70(2):360-372.
- [8] 徐天光,顾家裕,薛叔浩. 盐湖沉积硬石膏特征及其在油气勘探中的应用[J]. 石油勘探与开发,1997,24(5):54-57.
Xu Tianguang, Gu Jiayu, Xue Shuhao, et al. Characteristics of hard gypsum of Saline Lake sedimentary and its application in petroleum exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(5):54-57.
- [9] 鲍云杰,王恕一,蒋小琼,等. 建南气田飞三段储层成岩作用研究[J]. 石油实验地质,2011,33(6):564-568.
Bao Yunjie, Wang Shuyi, Jiang Xiaoqiong, et al. Reservoir diagenesis of 3rd member of Feixianguan Formation, Jiannan Gas Field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(6):564-568.
- [10] 饶红娟,罗平,阳正熙,等. 塔里木盆地西克尔萤石地球化学特征及成因讨论[J]. 沉积学报,2010,28(4):821-831.
Rao Hongjuan, Luo Ping, Yang Zhengxi, et al. Geochemistry of fluorite and its genesis in Sickl area, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(4):821-831.
- [11] 张云峰,冯亚琴. 古大气水淋滤对贝中次凹南屯组一段储层物性的影响[J]. 科学技术与工程,2011,11(10):2162-2164.
Zhang Yunfeng, Feng Yaqin. The effects of ancient meteoric water eluviation on Member One of Nantun Formation reservoir physical properties in Beizhong sub-depression[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(10):2162-2164.
- [12] 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(5):1077-1092.
- [13] 薛伟伟,谭先锋,李泽民,等. 碎屑岩中长石的溶解机制及其对成岩作用的贡献[J]. 复杂油气藏,2015,8(1):1-6.
Xue Weiwei, Tan Xianfeng, Li Zemin, et al. Dissolution mechanism of feldspar in the clastic rocks and its contribution to diagenesis[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2015, 8(1):1-6.
- [14] 张兴良,田景春,王峰,等. 致密砂岩储层成岩作用特征与孔隙演化定量评价:以鄂尔多斯盆地高桥地区二叠系下石盒子组盒8段为例[J]. 石油与天然气地质,2014,35(2):212-217.
Zhang Xingliang, Tian Jingchun, Wang Feng, et al. Diagenetic characteristics and quantitative porosity estimation of tight sandstone reservoirs: A case from the 8th Member of Permian Xiashihezi Formation in the Gaoqiao region, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2):212-217.
- [15] 黄思静,黄培培,王庆东,等. 胶结作用在深埋藏砂岩孔隙保存中的意义[J]. 岩性油气藏,2007,19(3):9-13.
Huang Sijing, Huang Peipei, Wang Qingdong, et al. The significance of cementation in porosity preservation in deep-buried sandstones[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3):9-13.
- [16] Heydari E, Wade W J. Massive recrystallization of low Mg calcite at high temperatures in hydrocarbon source rocks: Implications for organic acids as factors in diagenesis[J]. AAPG Bulletin,

- 2002, 86(7): 1285-1303.
- [17] Mack G H, Cole D R, Giordano T H, et al. Palaeoclimate controls on stable oxygen and carbon isotopes in the caliche of the Abo Formation (Permian), south-central New Mexico, USA [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1991, 61(4): 458-472.
- [18] 漆滨汶, 林春明, 邱桂强, 等. 东营凹陷古近系沙河街组砂岩透镜体钙质结壳形成机理及其对油气成藏的影响 [J]. *古地理学报*, 2006, 8(4): 519-530.
- Qi Binwen, Lin Chunming, Qiu Guiqiang, et al. Formation mechanism of calcareous incrustation in lenticular sandbody of the Shahejie Formation of Paleogene and its influence on hydrocarbon accumulation in Dongying Sag [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2006, 8(4): 519-530.
- [19] 周国清. 粘土矿物的热模拟研究 [J]. *石油实验地质*, 1995, 17(3): 286-292.
- Zhou Guoqing. Thermal simulation study on clay minerals [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 1995, 17(3): 286-292.
- [20] 曹中宏, 刘国勇, 张红臣, 等. 南堡凹陷及周边凸起区古生界碳酸盐岩溶解特性的试验研究 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 38(1): 8-13.
- Cao Zhonghong, Liu Guoyong, Zhang Hongchen, et al. Experimental research of carbonate rocks dissolution characteristics in Paleozoic group of Nanpu sag and surrounding bulge areas [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2014, 38(1): 8-13.
- [21] 范明, 胡凯, 蒋小琼, 等. 酸性流体对碳酸盐岩储层的改造作用 [J]. *地球化学*, 2009, 38(1): 20-25.
- Fan Ming, Hu Kai, Jiang Xiaoqiong, et al. Effect of acid fluid on carbonate reservoir reconstruction [J]. *Geochimica*, 2009, 38(1): 20-25.
- [22] Veizer J, Hoefs J. The nature of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ secular trends in sedimentary carbonate rocks [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1976, 40(11): 1387-1395.
- [23] 石良, 金振奎, 闫伟, 等. 异常高压对储集层压实和胶结作用的影响; 以渤海湾盆地渤中凹陷西北次凹为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2015, 24(3): 310-318.
- Shi Liang, Jin Zhenkui, Yan Wei, et al. Influence of overpressure on reservoir compaction and cementation: A case from northwestern subsag, Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 24(3): 310-318.
- [24] 蒯克来, 操应长, 金杰华, 等. 冀中坳陷霸县凹陷古近系中深层古地层压力演化及对储层成岩作用的影响 [J]. *石油学报*, 2014, 35(5): 867-878.
- Xi Kelai, Cao Yingchang, Jin Jiehua, et al. Paleopressure evolution and its effects on diagenesis of reservoirs in middle-deep Paleogene strata in Baxian Sag, Jizhong Depression [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 35(5): 867-878.
- [25] Meshri I D. On the reactivity of carbonic and organic acids and generation of secondary porosity [M] // Gautier D L. Roles of organic matter in sediment diagenesis. [s.l.]: SEPM Special Publication, 1986, 38: 123-128.
- [26] 王玉荣, 韩文彬. 水-岩地球化学实验与浙江武义萤石矿成矿模式的建立 [J]. *中国岩溶*, 1988(S2): 140-147.
- Wang Yurong, Han Wenbin. Water-rock geochemical experiment and the establishment of Wuyi Zhejiang fluorite ore forming model [J]. *Carsologica Sinica*, 1988(S2): 140-147.
- [27] 关平, 张文涛, 吴雪松, 等. 江汉盆地白垩系渔洋组砂岩的成岩作用及其热力学分析 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2144-2150.
- Guan Ping, Zhang Wentao, Wu Xuesong, et al. Diagenesis of the Cretaceous sandstone in Yuyang Formation of Jianghan Basin and its thermodynamic analyses [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2144-2150.
- [28] 齐亚林, 尹鹏, 张东阳, 等. 鄂尔多斯盆地延长组储层胶结物形成机理及地质意义 [J]. *岩性油气藏*, 2014, 26(2): 102-107.
- Qi Yalin, Yin Peng, Zhang Dongyang, et al. Formation mechanism of reservoir cement of Yanchang Formation in Ordos Basin and its geological significance [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2014, 26(2): 102-107.
- [29] 谭先锋, 黄建红, 李洁, 等. 深部埋藏条件下砂岩中碳酸盐胶结物的成因及储层改造; 以济阳坳陷古近系孔店组为例 [J]. *地质论评*, 2015, 61(5): 1107-1120.
- Tan Xianfeng, Huang Jianhong, Li Jie, et al. Origin of carbonate cements and the transformation of the reservoir in sandstone under the deep burial condition: A case study on Eocene Kongdian Formation in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Geological Review*, 2015, 61(5): 1107-1120.
- [30] 冉福强. 总口地区储集层中硬石膏分布规律及其储层伤害机理 [J]. *石油天然气学报*, 2012, 34(11): 208-210.
- Ran Fuqiang. Distribution and damage mechanism of the hard gypsum in the reservoir of the total area [J]. *Journal of Petroleum and Natural Gas*, 2012, 34(11): 208-210.
- [31] 王勇, 钟建华, 马锋, 等. 济阳坳陷陡坡带深层砂砾岩体次生孔隙成因机制探讨 [J]. *地质学报*, 2008, 82(8): 1152-1159.
- Wang Yong, Zhong Jianhua, Ma Feng, et al. The mechanism of secondary porosity in the deep-seated gravel reservoirs on the steep slope belt, Jiyang Depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(8): 1152-1159.

(编辑 徐文明)