

东濮凹陷沙河街组碎屑岩成岩作用 与有机质演化的关系*

纪友亮 赵澄林 刘孟慧

(石油大学, 山东东营 257062)

东濮凹陷下第三系沙河街组储层在纵向上有三个高碳酸盐含量带和4个次生孔隙发育带。有机质演化产生的 CO_2 和有机酸造成浅部储层长石骨架颗粒和碳酸盐胶结物的溶解,产生第一个次生孔隙带;中、深部长石的溶蚀作用形成第2、第3个次生孔隙发育带;深部碳酸盐胶结物的溶蚀构成第4个次生孔隙发育带。

关键词 东濮凹陷 沙河街组 成岩作用 有机质演化 次生孔隙带

第一作者简介 纪友亮 男 32岁 教授 储层地质学及层序地层学

东濮凹陷下第三系沙河街组碎屑岩储层埋藏深度大,成岩作用强,多为低渗和致密储层,预测致密储层中的高孔渗发育带是深层天然气勘探的关键。深层次生孔隙发育带的形成主要受成岩作用的控制。影响成岩作用的因素众多,其中有机质的演化产物不仅是产生溶蚀作用和改善储层物性的主要因素,也是促使碳酸盐胶结物沉淀,充填储层储集空间降低孔渗性的因素。研究有机质演化与成岩作用的关系,有利于预测深层次生孔隙发育带。

1 成岩作用与储层孔隙的演化

压实作用对东濮凹陷沙河街组储层孔隙度的影响在浅部(3200m以上)明显^[1],而深部引起孔渗性降低的因素则主要是胶结作用。由于深部储层中碳酸盐胶结物占绝对优势,因此我们主要讨论碳酸盐胶结物对储层物性的影响。

1.1 碳酸盐胶结作用与孔隙度的关系

碳酸盐是东濮凹陷下第三系碎屑岩中的主要胶结物,其成分主要是方解石、含铁方解石、白云石和含铁白云石,少量铁方解石。

方解石胶结物分布较广,但含量不高,平均不超过2.6%,多呈斑点状充填颗粒的原生孔隙。主要出现在早成岩期A亚期^[1]。

含铁方解石胶结物分布普遍,平均含量大于5%,可达30%,常形成嵌晶式胶结(图版I-1)。主要出现在晚成岩期A₂亚期^[1]。

含铁白云石和白云石在砂岩中较常见,但其含量要低于含铁方解石。浅部含铁白云石多

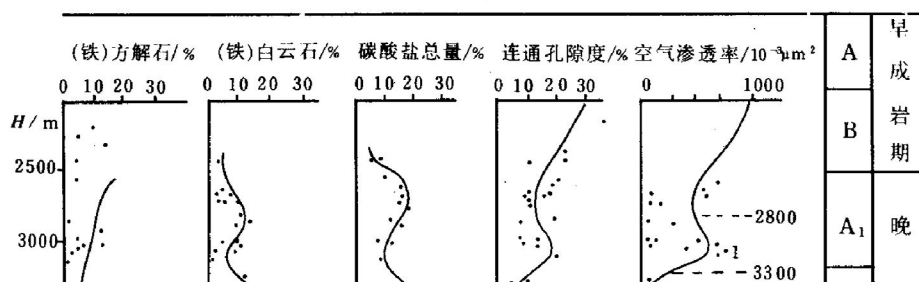
* 本文为“85”国家科技攻关项目阶段成果

收稿日期:1992-01-18 改回日期:1994-07-14

呈简单的充填孔隙式胶结，局部呈嵌晶式胶结（图版 I-2），但在深处多呈交代碎屑颗粒和其它胶结物的形式出现。主要出现在晚成岩期 B 亚期和 C 亚期^[1]。白云石晶体较小，但自形程度高，主要出现在晚成岩期 B 亚期，多呈简单的充填孔隙式胶结。出现于晚成岩期 C 亚期的白云石晶体多做为含铁白云石的核心。

菱铁矿作为胶结物主要出现在东濮凹陷西部缓坡带，多呈微晶状，晶形很好，分布于粒间孔隙和颗粒的接触线上。

上述碳酸盐胶结物在纵向上分带明显：2500 m 以上以方解石、含铁方解石为主；2500~2800 m 之间，碳酸盐沉淀量最大，以铁方解石为主，含量 20%~30%，形成嵌晶式胶结；2800~3200 m 之间，碳酸盐胶结物含量低，小于 12%，多为溶蚀残余状态的方解石和含铁方解石。3200 m 以下以白云石和铁白云石为主，含量高的部位亦可达 30%。从整体上看，碳酸盐在纵向上有三个高含量沉淀带，分别位于 2500~2800 m，3400~3500 m 和 4000~4100 m（图 1）。



胶结物含量高，但经溶蚀形成大量次生孔隙；三是长石骨架颗粒溶蚀严重，形成大量的次生粒间孔及粒内孔。

1.2 溶蚀作用形成四个孔隙发育带

溶蚀作用使沙河街组储层在纵向上形成 4 个次生孔隙发育带：第 1 个次生孔隙发育带位于 2800~3300 m 之间，分布普遍，与此带对应的碳酸盐含量较低（图 1）。在这个带内既有长石骨架颗粒的溶蚀，也有碳酸盐胶结物的溶蚀。第 2 个次生孔隙发育带位于 3400~3600 m 之间。第 3 个次生孔隙发育带位于 3800~4200 m 之间。在这两个次生孔隙发育带的分布范围内，碳酸盐含量很高（图 1），碳酸盐胶结物晶形完好，溶蚀作用微弱或根本没有受到溶蚀，主要是长石溶蚀形成的次生孔隙（图版 I-3），在扫描电镜及偏光显微镜下见到长石被溶蚀成窗格状、蜂巢状、残骸状，形成贴粒缝、粒内孔及超粒孔，最大直径达 0.07 mm，连通性好，孔

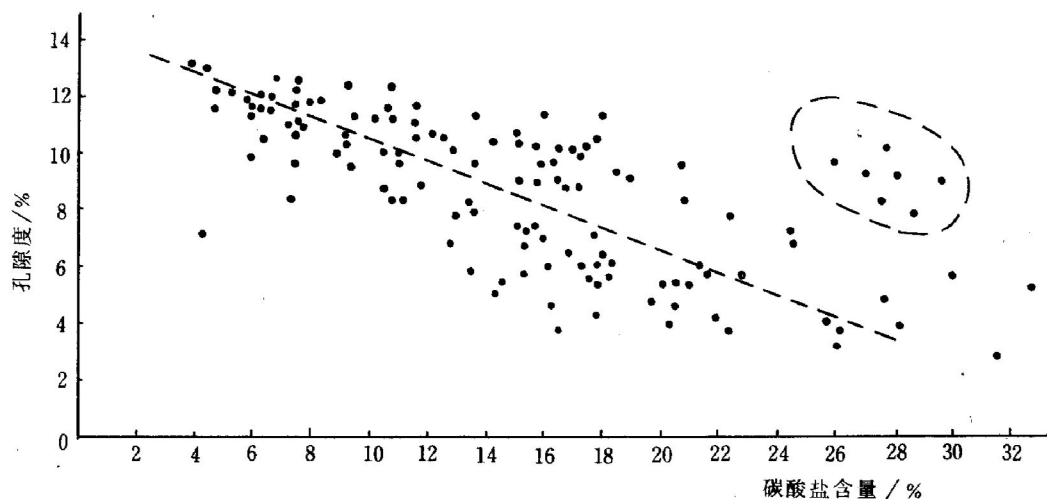


图2 碳酸盐胶结物含量与孔隙度的关系图

隙度高达25%，渗透率达 $500 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。第4个次生孔隙发育带分布在4500~4800 m之间，碳酸盐含量很低，并且再次见到碳酸盐胶结物的溶蚀和溶解残余。

2 有机质演化对成岩作用的影响及证据

2.1 有机质演化对成岩作用的影响

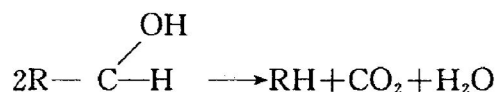
施密特等认为^[2]，在成熟A阶段，生油岩中的有机质向烃类转化过程中会释放出大量 CO_2 ，使孔隙流体成为酸性。Surdam和Crossey^[3]的实验研究结果表明，在油气大量生成时期（80~120℃），泥岩中干酪根在热作用下会脱去含氧官能团（羧基及酚等），形成大量的有机酸（如草酸、醋酸和酚等），这些有机酸易与 Al^{3+} 形成络合物，增加了 Al^{3+} 的活度，促进了铝硅酸盐的溶解，也促进了碳酸盐的溶解。同时有机酸对溶液的pH值有缓冲作用，可以把溶液的pH值控制在5~6之间。

Surdam和Crossey又指出^[3]，温度在120~160℃之间，虽然有机酸开始脱羧变成烃类和 CO_2 ，浓度逐渐降低，但仍保持一定的丰度，除对铝硅酸盐有溶蚀作用外，对溶液的pH值仍有一定的缓冲作用，由于有机酸对pH值缓冲作用的存在，有机质演化产生的 CO_2 浓度的提高，不会使pH继续降低，尽管此阶段 CO_2 大量生成，但成岩溶液的pH值仍为5~6。相反， CO_2 浓度的提高使碳酸盐被溶解的反应向相反的方向进行，即向生成碳酸盐的方向移动：



因此这个阶段是长石被溶解和碳酸盐胶结物沉淀共存的阶段，此阶段不仅产生次生孔隙，同时也有相当数量的碳酸盐矿物沉淀。

Surdam和Crossey还指出^[3]，当温度大于160℃时，有机质演化所产生的有机酸已全部分解产生 CO_2 和烃：



此时，成岩溶液中的有机酸已不存在，溶液中的pH值完全由 CO_2 控制，此阶段有机质

演化和有机酸分解产生的 CO_2 浓度的提高使溶液的 pH 值继续降低至 2，这种酸性溶液主要造成碳酸盐矿物的溶蚀，形成深层次生孔隙发育带。

濮深 12 井干酪根样品有机酸测试分析表明，有机酸的种类较多，有单元酸如甲酸、乙酸、丙酸、戊酸和丁酸；还有双元酸和丙二酸、丁二酸、戊二酸，己二酸。其中甲酸含量 $0.39 \sim 6.31 \text{ mg/g}$ ，乙酸 $0.34 \sim 3.65 \text{ mg/g}$ ，丙酸 $0.56 \sim 8.63 \text{ mg/g}$ ，丁酸 $0.22 \sim 0.44 \text{ mg/g}$ ，丙二酸 $0.23 \sim 0.69 \text{ mg/g}$ ，丁二酸 $0.22 \sim 0.58 \text{ mg/g}$ ，戊二酸 $0.26 \sim 2.96 \text{ mg/g}$ ，己二酸 $0.20 \sim 1.10 \text{ mg/g}$ 。总酸浓度最高达 24.36 mg/g ，足以对储层产生明显的溶蚀作用。

总单元酸的生成高峰为 3000 m ， 3000 m 以下开始脱羧含量减少（图 3）。双元酸的生成高峰为 3500 m ，在 3500 m 以下开始脱羧，含量急剧降低（图 4）。干酪根在纵向上总的演化特征是， 1200 m 以下有机质开始分解产生有机酸，在 $2500 \sim 2800 \text{ m}$ 深度范围内，由于有机质演化程度的提高和细菌的破坏作用，有机酸开始大量生成，但有机酸浓度还不足以使孔隙水变为酸性。因此，油田水的 $\text{pH} > 7$ （表 1，图 5）为碳酸盐沉淀的化学环境，形成第一个高碳酸盐含量带。

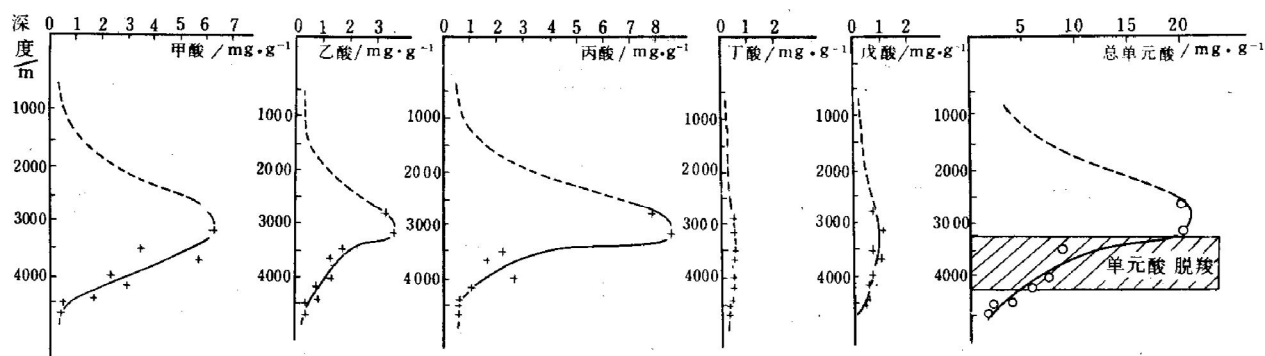


图 3 濮深 12 井单元酸的纵向演化剖面

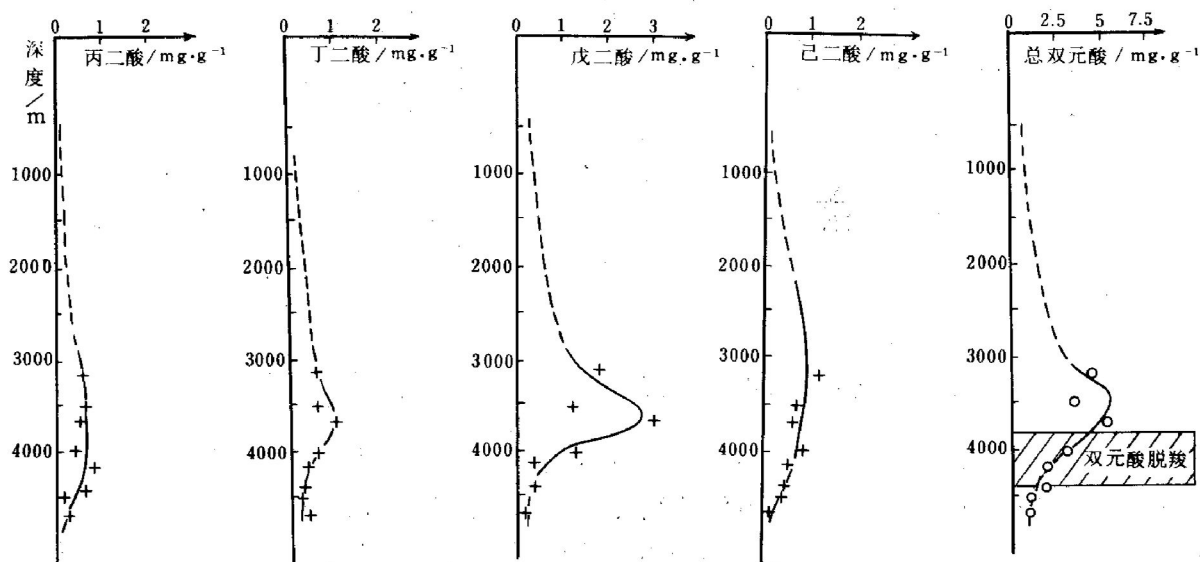


图 4 濮深 12 井双元酸的纵向演化剖面

表1 沙三段油田水的分析化验资料

层位	井段/m	pH 值	总矿化度/ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	水型	资料来源
E_{s2}	2107.3~2119.2	7.1	6.3571		濮深12井
	2405.1~2425.1	7.3	5.8634		濮深12井
	2931.0~2952.0	7.0	6.4327		濮深12井
E_{1s3}	3405.6~3410.0	5.2	9.8696	CaCl_2	桥16井
	3698.8~3769.4	4.7	5.0793	CaCl_2	桥14井
	3964.0~3966.5	7.1	9.9838	CaCl_2	桥28井
E_{1s4}	4059.6~4163.0	6.3	8.5885	CaCl_2	桥24井
	4133.9~4171.2	5.2	6.9195	CaCl_2	桥31井
E_{1s3}	3620~3650	6	668	NaHCO_3	白8井
	3742~3746	5.4	8.9987	CaCl_2	白7井
E_{1s4}	3913.4~3906.2	5.0	5468	CaCl_2	白9井
	3971.6~4164.4	5.9	13.1347	CaCl_2	白12井

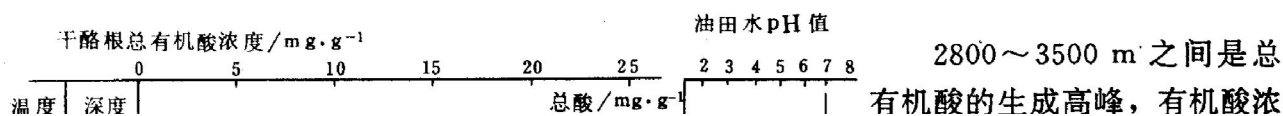


图5 濮深12井干酪根总酸纵向演化剖面

机酸的浓度仍很高,在3500~4300 m之间双元酸也开始大量脱羧产生烃类和 CO_2 ,使 CO_2 浓度高于前一阶段的浓度。

总之,在3500~4300 m范围内,总有机酸的浓度开始逐渐降低并趋于消失,但仍有一定的丰度,络合物携带金属阳离子的能力仍然很强,仍促进长石颗粒的溶解,继续产生次生孔隙。此外,有机酸对溶液的pH值仍有缓冲作用,使地层水保持弱酸性(pH值 $\approx 5\sim 6$) (表1,图5)。由于有机酸对溶液pH值的缓冲作用,此阶段 CO_2 浓度的提高无法使pH值继续降低^[4],反而促进了碳酸盐矿物特别是铁白云石的沉淀。3400~3600 m与3800~4200 m这两个次生孔隙发育带内,只见长石溶蚀,而铁白云石含量仍很高,且多自形,就是这种原因造成的。而3600~3800 m之间储层的颗粒主要是石英,石英含量90%,长石含量低,石英在酸性

环境下，易形成次生加大边。这种 SiO_2 胶结物和碳酸盐胶结物同时沉淀降低了孔隙度。由于该段储层长石颗粒含量低，长石的溶蚀作用对孔隙度的贡献不大。

在 4300 m 以下，由于有机酸几乎完全分解产生烃类和 CO_2 ，其浓度大大降低（图 5），则地层水的 pH 值完全受 CO_2 控制， CO_2 浓度的提高，使地层水的 pH 值可以降到 3，这种强的酸性地层流体对碳酸盐胶结物及长石颗粒产生溶解形成第 4 个次生孔隙发育带，这个次生孔隙带中长石的溶蚀作用小，而碳酸盐胶结物的溶蚀量大，形成低碳酸盐含量带。

2.2 有机-无机反应的碳同位素证据

濮深 12	3669.0	$E_1s_3^4$	FeD	-6.31
濮深 12	3673.0	$E_1s_3^4$	FeD	-10.63
濮深 12	4038.31	$E_1s_3^4$	FeD	-4.34
濮深 12	4187.67	$E_1s_3^4$	FeD	-4.99

3 结 论

（1）东濮凹陷沙河街组碳酸盐胶结作用，是深部储层储集空间降低的主要因素，但碳酸盐胶结物的充填却起到了抗压实效应，使原生孔隙的结构格架得以保存，为深部溶蚀产生孔隙发育带起到潜在的建设作用

DIAGENESIS OF CLASTIC ROCKS IN SHAHEJIE FORMATION, DONGPU DEPRESSION AND ITS RELATION TO ORGANIC MATTER EVOLUTION

Ji Youliang Zhao Chenglin Liu Menghui

(University of Petroleum, Dongying, Shandong)

Abstract

Three high carbonate belts and four secondary pore belts developed vertically in the reservoir rocks of the Eocene Shahejie Formation in Dongpu Depression. CO_2 and organic acid generated from organic matter evolution dissolved feldspar grains and carbonate cements in shallow beds and formed the first secondary pore belt; the dissolution of feldspar grains in median depth resulted in the second and third secondary pore belts; the dissolution of carbonate cement in deep beds formed the fourth secondary pore belt.

图版 I 说明

1. 长石质石英细砂岩, 含铁方解石呈嵌晶式胶结。马 27 井, 3722.41m, 单偏光, $\times 200$ 。
2. 岩屑质石英砂岩, 含铁白云石呈嵌晶式胶结。白 14 井, 3028.61m, 单偏光, $\times 40$ 。
3. 长石砂岩, 部分长石颗粒被溶解成窗格状。白 10 井, 3027.30 m, 单偏光, $\times 200$ 。
4. 钾长石的粒内溶孔 (下图为上图的局部放大)。白 24 井, 3078 m, 上: $\times 300$, 下: $\times 1980$ 。