

文章编号: 1000-0550(2011)06-1138-07

酒东坳陷下白垩统砂岩中碳酸盐胶结物特征与储层物性^①

吕成福¹ 李小燕² 陈国俊¹ 鲁新川¹ 杜贵超^{1,3} 李超^{1,3} 李伟^{1,3} 陈吉^{1,3}

(1. 中国科学院油气资源研究重点实验室 兰州 730000;

2. 中国科学院资源环境科学信息中心/中国科学院国家科学图书馆兰州分馆 兰州 730000; 3. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 碳酸盐胶结物是酒东坳陷下白垩统砂岩内一种重要的自生矿物,其对深部储层储层质量有着重要影响。本文通过薄片观察、扫描电镜、能谱分析及碳氧同位素分析,认为碳酸盐胶结物主要为铁方解石、白云石和铁白云石,并且以后者为主,其分布具有不均一性且分带性明显。碳酸盐胶结物均为成岩作用后期产生,形成该矿物所需的物质主要来源于泥岩的黏土矿物转化和有机质热演化,还有一部分钙来源于斜长石的蚀变。碳酸盐胶结物的溶蚀溶解是深部低渗透储层中发育较为优质储层的重要原因,该溶蚀溶解必须存在流体运移的通道,另外,碳酸盐胶结物含量也对储层质量有所影响,当碳酸盐含量大于5%时,储层孔隙度随碳酸盐胶结物含量增加而降低,而当其含量小于5%时,储层孔隙度与碳酸盐胶结物含量之间没有明显对应关系。

关键词 酒泉盆地 营尔凹陷 碳酸盐胶结物 碳氧同位素 物质来源

第一作者简介 吕成福 男 1979年出生 博士 储层沉积学 E-mail: bailu2005@163.com

中图分类号 TE122.2 **文献标识码** A

0 引言

碳酸盐胶结物是碎屑岩储层中最为常见的胶结物类型之一,也是成岩过程中重要的自生矿物,其具有分布普遍性、形成多期性和成因多样性等特点^[1,2]。碳酸盐矿物的溶解度对温度、压力和PH值等成岩环境变化极为敏感,所以当地层流体性质发生变化势必会引起碳酸盐矿物的重新分布^[3]。碳酸盐胶结物对储层物性的影响主要有两个方面,一是占据着原生孔隙,对储层孔隙度破坏性较强,二是早期碳酸盐胶结物充填于孔隙中,增强储层抗压实能力并为后期溶蚀、溶解作用的发生提供了条件^[4]。所以与碳酸盐胶结物有关的岩石—流体相互作用对研究石油、天然气的储集性能具有重要意义,长期以前受到石油地质学家的高度重视,特别是地层深部储层的储集性能与碳酸盐胶结物的沉淀与溶解有着直接关系^[5-11]。

近年来酒东坳陷的油气勘探取得较大突破,勘探目的层为埋深在4 000~5 500 m之间的下沟组 and 赤金堡组碎屑岩,其孔隙度在10%左右,渗透率一般在 $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,属于低孔低渗和特低孔特低渗的地层深部储层,这使得该区油气勘探开发受到很大限制,因而深部低渗透储层中较为优质储层的成因机理

问题,已经成为该地区油气藏形成与分布的关键问题。本人(2010)通过对酒东坳陷白垩系储层特征的研究认为,储层储集空间主要为与碳酸盐胶结物溶蚀有关的粒间扩大溶蚀孔隙,而碳酸盐胶结物类型多样且分布和溶解都存在不均一性^[12],这给该地区储层流体—岩石相互作用及物性研究带来很大的难度。因此,本文从微观矿物学和地球化学的角度,深入研究储层砂岩中碳酸盐胶结物的特征、溶解与沉淀的反应机制及其对储层物性的影响,为准确判断酒东坳陷储层成岩演化过程及储层物性预测提供科学依据。

1 区域地质概况

酒东坳陷位于祁连山加里东褶皱带与阿拉善地块的过渡带西段,其与酒西坳陷、花海—金塔坳陷共同组成酒泉盆地^[13,14]。坳陷整体上呈北西西向展布,内部可划分为营尔凹陷、马营凹陷、酒泉凹陷、盐池凹陷和文殊山凸起、天泉寺凸起、清水低凸起和榆木山低凸起等8个二级构造单元(图1)。下白垩统发育有赤金堡组、下沟组和中沟组三套碎屑岩地层^[15]。早白垩世赤金堡沉积一套扇三角洲、半深湖为主的地层。早白垩世中期下沟组沉积超覆于赤金堡地层之上,沉积一套(扇)辫状河三角洲、滨浅湖碎屑岩和泥质白云岩地层。早白垩世晚期中沟组沉积

①国家科技重大专项(2008ZX05000-025)、2011年中国科学院西部之光项目和甘肃省自然科学基金项目联合资助。

收稿日期: 2010-03-05; 收修改稿日期: 2011-04-25

时期, 酒东坳陷由断陷沉积转为坳陷沉积, 沉积地层以扇三角洲、滨浅湖相碎屑岩为主。早白垩世末的晚燕山运动, 坳陷整体抬升使中沟组大面积遭受剥蚀, 尤其坳陷南部剥蚀严重, 局部缺失中沟组沉积, 而晚白垩世时期, 坳陷内未接受任何沉积。下白垩统碎屑岩储层的类型主要为砂砾岩、粗砂岩、细砂岩和粉砂岩, 岩性主要为近源的岩屑长石砂岩、长石砂岩和长石岩屑砂岩, 其结构成熟度和成分成熟度都较低。

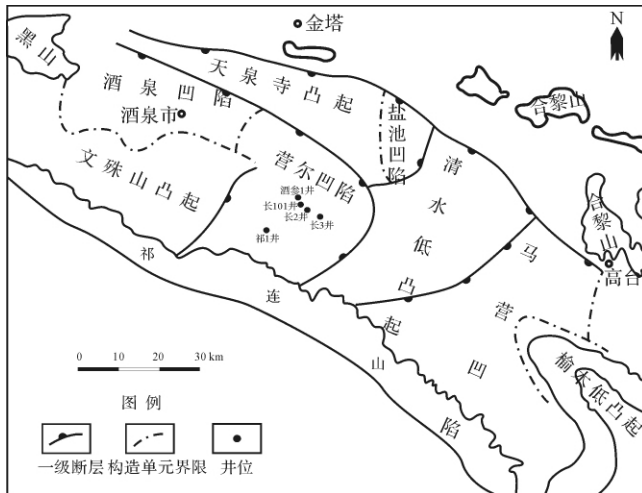


图1 酒东坳陷构造单元图

Fig. 1 The tectonic sketch map of Jiudong Sag

2 碳酸盐胶结物的分布及特征

2.1 碳酸盐胶结物分布

利用偏光显微镜和 X-衍射分析相结合的方法, 对研究区下白垩统 78 个砂岩样品的碳酸盐胶结物进行分析 (见表 1), 结果表明, 该地区碳酸盐胶结物总体含量较高, 各层位平均为 5.851%, 纵向上碳酸盐胶结物含量变化并不明显, 而横向上却有较大差别。笔者通过以往的研究认为, 碳酸盐胶结物横向上分布不均衡是由成岩环境所造成^[12, 16], 位于沉积中心周围的三角洲前缘水下分流河道砂体、河口坝砂体和滨浅湖滩坝砂体中碳酸盐胶结物含量较高, 原因是这类砂岩的分选较好、结构成熟度较高, 储层具有较好的孔隙度和连通性, 地层流体可以顺畅的在其内部流动并进行物质交换, 其中 C101 井区所发育的大量碳酸盐胶结物后期未经过明显的溶蚀改造, 平均含量高达 10.19%, Q1 井区和长 2 井区早期形成的碳酸盐胶结物后期部分被溶蚀。而位于凹陷边缘的 J1 井区碳酸盐胶结物最少, 平均含量只有 2.58%, 原因在于近源沉积所产生的大量黏土杂基抑制了碳酸盐胶结物

的发育, 致使碎屑颗粒的胶结方式以黏土胶结为主。

表 1 酒东坳陷砂岩储层自生碳酸盐胶结物含量统计

Table 1 Contents of carbonate cements in the sandstone reservoir from Jiudong Sag

层位	铁方解石	白云石	铁白云石	菱铁矿	碳酸盐矿物
	1%	1%	1%	1%	总量/1%
K ₁ g ₂	0.240	2.110	4.030	0.013	6.393
K ₁ g ₁	1.771	0.133	4.186	0.405	6.495
K ₁ c	0.014	0.614	5.343	0.086	6.057
平均值	0.675	0.953	4.520	0.168	6.315

2.2 碳酸盐胶结物类型及赋存状态

通过铁氰化钾和茜素红染色薄片的偏光显微镜观察和扫描电镜及能谱分析, 发现碳酸盐胶结物按成分主要分为铁方解石、铁白云石、白云石和菱铁矿 (表 1), 而早期方解石经过蚀变后含量极少, 整体上, 碳酸盐胶结物分布不均且分带性明显。

(1) 菱铁矿

菱铁矿胶结物主要以棕褐色晶粒状集合体充填于原生粒间孔隙, 部分菱铁矿呈团块状假杂基形态产出, 整体颜色较暗, 晶粒以泥晶—粉晶为主, 常与有机质伴生, 并见其交代碎屑颗粒现象 (图 2a)。菱铁矿在下沟组下段和赤金堡组上部局部储层中相对富集, 但整体含量较低, 平均含量只有 0.163%, 其对储层物性影响有限。菱铁矿胶结物发育层段的碎屑颗粒主要以点接触为主, 有时碎屑颗粒之间完全由菱铁矿胶结, 也可见其被晚期铁白云石所交代的现象, 这说明了菱铁矿主要形成于砂岩原生孔隙发育的早成岩期。

(2) 铁方解石

由于下白垩统储层埋深较大, 早期方解石胶结物大多都已经溶解或者蚀变, 所以不发育早期的方解石胶结物。铁方解石染色后主要呈现为深蓝色和蓝紫色, 这是该层段较为重要的一种碳酸盐胶结物类型, 在下沟组下段较为发育, 多以粒状分布于粒间残余孔隙内 (图 2b), 还可见铁方解石以交代石英、长石和硅质岩屑形式产出。从铁方解石的产出特征来看, 储层碎屑颗粒之间多呈线接触, 表明铁方解石形成时砂岩已遭受压实改造, 并且铁方解石经常交代石英次生加大边, 这说明铁方解石形成时期较晚, 而一部分铁方解石被白云石所交代, 形成白云石包裹的亮晶铁方解石残余, 表明这部分铁方解石胶结早于白云石形成之前。

(3) 白云石和铁白云石

染色薄片的显微镜观察白云石为无色,多数白云石晶粒以粉—亮晶为主,晶粒集合体常呈斑块状充填于孔隙,有时也以孔隙衬里的方式或者环绕颗粒方式产出(图2c),常见白云石交代铁方解石和石英、长石和硅质岩屑等骨架颗粒,交代强烈处仅见骨架颗粒残余。研究区储层白云石胶结物分布很广,但只在下沟组上段较为发育,随着埋藏深度的增加,位于下沟组下段和赤金堡组的白云石大多数已经蚀变为晚期铁白云石。

铁白云石染色后显微镜下呈蓝绿色,主要是砂岩储层深埋藏时的产物,通常交代石英、长石颗粒和早期、中期碳酸盐胶结物,部分呈亮晶和连晶状不均匀分散于粒间孔和早期溶蚀孔中(图2d),因此这类胶结物形成时期最晚。由于目前下沟组下段和赤金堡组储层埋深在4 000 m以下,早期、中期碳酸盐胶结物大多数已经转化为晚期铁白云石,所以铁白云石胶结物非常发育。

3 碳酸胶结物的碳、氧同位素特征及物质来源探讨

自生碳酸盐矿物的形成机制研究非常广泛,包括矿物的形成温度、压力、pH值和物质来源等方面,但是物质来源方面是研究碳酸胶结物形成的基本内容^[3,6,17]。鉴于研究区普遍发育铁方解石、白云石和铁白云石胶结物,因此本文根据上述矿物的碳氧同位素特征,对其形成矿物所需物质来源进行论述。

3.1 碳来源

碳酸盐胶结物中氧碳同位素组成可为判断其形成时的地球化学环境特征和物质来源等提供重要信息,进而有助于阐明成岩过程中流体—岩石相互作用、流体演化史和次生孔隙形成机理等基本地质问题。因此本文利用偏光显微镜选取没有碳酸盐岩屑且只发育单一碳酸盐胶结物的样品19个,其中含铁方解石样品5个,含白云石样品2个,含铁白云石样品12个,对所选样品进行碳、氧同位素测定(表2)。

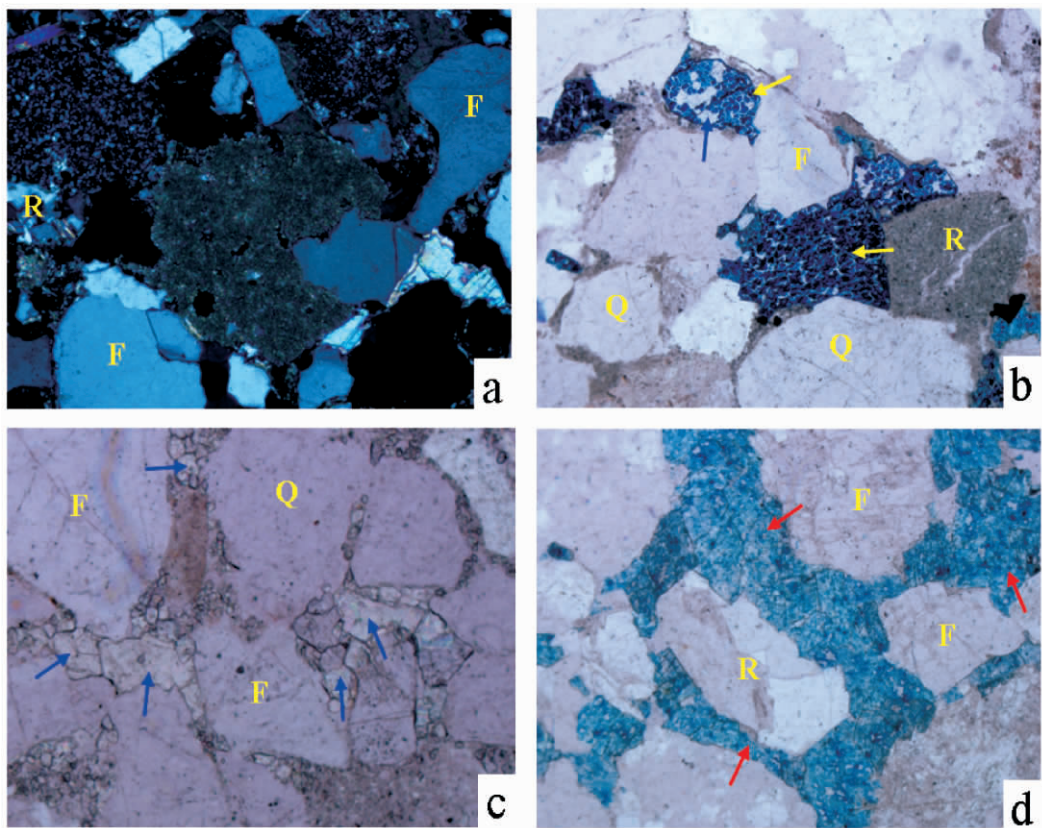


图2 下白垩统储层中碳酸盐胶结物特征

a. 褐棕色晶粒状菱铁矿交代岩屑, C2井 4139.51m K_1g_1 , $\times 100(+)$; b. 粒间充填铁方解石(黄色箭头所指), 见少量白云石(绿色箭头所指)交代铁方解石, Q1井 5068.4m K_1g_1 , $\times 50(-)$, 茜素红染色; c. 粉—亮晶白云石(绿色箭头所指)充填孔隙, 并交代石英、长石颗粒, Q1井 4257.8m K_1g_2 , $\times 100(-)$, 茜素红染色; d. 亮晶—连晶铁白云石(红色箭头所指)充填粒间孔隙并胶结碎屑颗粒, 形成致密的钙质砂岩层, C101井 3941.5m K_1g_1 , $\times 100(-)$, 茜素红染色。

Fig. 2 Characteristics of carbonate cements in the Lower Cretaceous reservoir

表2 酒东坳陷自生碳酸盐胶结物的碳氧同位素和形成温度

Table 2 The value of carbon and oxygen isotopes and formation temperature of carbonate cements

样品位置	深度/m	层位	$\delta^{13}\text{C}/\text{PDB}\%$	$\delta^{18}\text{O}/\text{PDB}\%$	类型	Z 值	形成温度/ $^{\circ}\text{C}$
C101 井	3941.5	K_1g_2	-1.9	-13.3	铁白云石	116.79	94.65
C101 井	3937.3	K_1g_2	-1.9	-13.6	铁白云石	116.64	99.02
Q1 井	4257.8	K_1g_2	-2.4	-15	白云石	114.91	121.10
Q1 井	4547.5	K_1g_2	-0.9	-13.3	白云石	118.83	94.65
C2 井	4141.7	K_1g_1	-3.8	-13.8	铁白云石	112.65	102.01
C2 井	4135.9	K_1g_1	-5.1	-17.1	铁白云石	108.34	159.36
C2 井	3939.2	K_1g_1	-0.4	-13.7	铁白云石	119.66	100.51
C2 井	4343.3	K_1g_1	-4.8	-12.7	铁方解石	111.15	86.28
C2 井	4139.5	K_1g_1	-3.5	-15.6	铁方解石	112.36	131.40
C2 井	4135.7	K_1g_1	-4.3	-15	铁方解石	111.02	121.10
C2 井	3945.4	K_1g_1	-0.4	-12.9	铁方解石	120.06	89.01
C3 井	4674.9	K_1g_1	-3.4	-13	铁白云石	113.86	90.40
JC1 井	3970.3	K_1g_1	-2.6	-11.9	铁白云石	116.05	75.90
Q1 井	4730.6	K_1g_1	-2.3	-14.5	铁白云石	115.37	112.90
Q1 井	5068.4	K_1g_1	-5.9	-15.2	铁方解石	107.65	124.48
C101 井	4192.7	K_1c	-1.5	-15.3	铁白云石	116.61	126.19
C2 井	4600.3	K_1c	0.6	-10.8	铁白云石	123.15	63.10
C3 井	4913.9	K_1c	-1.4	-16.1	铁白云石	116.42	140.37
C3 井	4851.4	K_1c	-2	-15.1	铁白云石	115.68	122.78

同时根据 Keith 和 Weber(1964) 提出了碳酸岩古盐度恢复公式,即: $Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50)$, 式中 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均为 PDB 标准,利用该公式进行该地区碳酸盐胶结物形成时期古盐度恢复。计算结果(表2)表明,该地区碳酸盐胶结物形成的古水介质基本属于矿化度较高的大陆淡水。

碳酸盐胶结物的形成温度计算公式采用 Fritz 和 Smith(1972年)提出的较为成熟的计算公式:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 31.9 - 5.55(\delta^{18}\text{O} - \delta^{18}\text{O}_w) + 0.7(\delta^{18}\text{O} - \delta^{18}\text{O}_w)^2$$

式中: $\delta^{18}\text{O}$ —碳酸盐氧同位素值,‰; $\delta^{18}\text{O}_w$ —水介质氧同位素值,‰。由于大陆淡水的氧同位素组成在 $-20\text{‰} \sim -6\text{‰}$,所以基于上述碳酸盐胶结物形成时古盐度的探讨,本次计算碳酸盐胶结物形成温度时水介质 $\delta^{18}\text{O}$ 取值为 -7‰ ,计算结果见表2。

研究区自生铁方解石、白云石和铁白云石的碳、氧同位素值比较稳定,碳同位素分布区间为 $-5.9\text{‰} \sim 0.6\text{‰}$,平均值 -2.52‰ ,其氧同位素组成为 $-17.1\text{‰} \sim -10.8\text{‰}$,平均值 -14.1‰ 。一般湖相原生碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-2\text{‰} \sim 6\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 大多在 $-15\text{‰} \sim 5\text{‰}$ 之间^[18],这说明该地区储层在成岩过程中一定有外来轻碳源的加入,而在储层没有经过淡水淋滤和地幔热流体改造的情况下,碳的来源必定与有

机酸脱羧作用有关,因为干酪根降解过程中所形成有机酸的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -20‰ ^[19]。根据氧同位素推算的碳酸盐形成温度来看,各种矿物的形成温度都比较宽泛,区间在 $63.1 \sim 159.36^{\circ}\text{C}$,这表明各种碳酸盐胶结物的形成时间具有较强的持续性,另外,该温度也与干酪根热解排酸过程相吻合。研究区实测到的镜质体反射率均已大于1%,泥质岩中有机质在成岩热演化过程中,通过有机酸脱羧基形成 CO_2 溶于水则形成碳酸,而且在有机质演化剖面上, CO_2 含量是随着埋藏深度(温度)的增加而升高的,这些来源于有机质且碳同位素轻的 CO_2 溶于水后,可以蚀变早期碳酸盐矿物并改变其碳同位素组成。

3.2 钙镁来源

泥岩在成岩演化过程中会释放出大量的层间水、吸附水和结构水,同时伴随着黏土矿物的转化,而蒙皂石或伊/蒙混层向伊利石转化的过程中,可以产生大量的 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Mg^{2+} 离子。下沟组和赤金堡组储层周围泥岩的黏土矿物总量一般在20%以上,其中主要为伊利石,这说明黏土矿物经历的较为强烈的成岩转化。另外,泥岩中有机质通常以化学键或吸附的形式与黏土矿物组成有机黏土复合体,吸附一定量的 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Mg^{2+} 等金属阳离子,有机质在成熟过程中会释放出有机酸、 CO_2 和烃类,同时也会释放出上述金属阳离子^[20]。目前研究区泥岩中有机质演

化处于成熟和过成熟阶段,必定会有一些阳离子随着有机质热演化生烃而释放出来。上述这些金属阳离子随着地层水向高孔隙度的砂岩储层运移时, Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Mg^{2+} 离子也随之进入砂岩储层内部,当 CO_2 分压降低时,这些离子很容易结合到方解石或白云石的晶格中去,碳酸盐的形成温度时间(63.1 ~ 159.36°C)也与泥岩热演化的时间相匹配。可见,黏土矿物转化和有机质热演化不仅为该地区储层提供了大量的碳来源,同时也是碳酸盐胶结物重要的金属阳离子来源。这是碎屑岩储层内普遍发育铁方解石和铁白云石的重要原因。

另外,斜长石中的钙长石在酸性条件下溶解而形成高岭石和 Ca^{2+} ,这一过程可以提供一定量的钙离子。研究区内的斜长石含量达到 18.7%,在偏光显微镜下观测其溶蚀溶解现象非常普遍,并且下沟组下段和赤金堡组比下沟组上段和中沟组储层内的高岭石含量明显升高^[15],深部储层内原生高岭石已经转化为伊利石,高岭石含量的增加得益于斜长石在酸性条件下的蚀变,同时释放出 Ca^{2+} ,因此这一过程可以提供丰富的钙离子来源。

4 碳酸盐胶结物对储层物性的影响

营尔凹陷下沟组和赤金堡组碎屑岩储层以特低孔特低渗为特征,这是在强烈压实作用下黏土和碳酸盐胶结所形成的,但是酸性流体的溶蚀作用也在局部形成一些物性较好的储层^[12]。碳酸盐胶结物的化学性质活泼,对孔隙流体的酸碱性异常敏感,容易发生溶解和沉淀^[25],有时在成岩过程中溶解和沉淀可以反复进行,这种特性也就决定了碳酸盐胶结物对储层物性的影响具有双重性,既有有利的一面,也有不利的一面,这就给碳酸盐胶结物研究增加了难度。

研究区碳酸盐胶结物分布在沉积中心周围的三角洲前缘水下分流河道砂体、河口坝砂体和滨浅湖滩坝砂体中,从碳酸盐胶结物类型和形成温度的分析中,可以看出研究区储层内早期碳酸盐胶结物基本都已发生溶蚀-再沉淀,而现存的碳酸盐为后期形成。在埋藏初期所形成的早期碳酸盐胶结物增强砂岩的抗压实能力,使砂岩保持较高的粒间体积,并且这种碳酸盐胶结物对成岩环境又极为敏感,为后期溶蚀产生次生孔隙提供足够的空间和重要的物质基础。祁1井、长3井和长4井等井区储层距离沉积中心较近,砂岩内碳酸盐胶结物的溶蚀溶解现象非常普遍,产生了大量的次生溶蚀孔隙,储层物性明显改善,如

祁1井下沟组下段储层平均孔隙度高达 16.62%,平均渗透率为 $88.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。而距离沉积中心较远的长101井赤金堡组储层,大量的亮晶、连晶铁白云石胶结物充填于孔隙内部,后期的地层流体并没有对其进行有效溶解,致使储层物性很差,平均孔隙度只有 6.26%,平均渗透率仅为 $1.98 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在纵向上,该溶蚀溶解现象发生在与湖相泥岩接触的薄层砂岩或不整合附近砂岩。可见碳酸盐胶结物溶解的一个必要条件是储层内部发育流体运移的通道,如果酸性流体无法进入碳酸盐胶结的储层内部,那么就不能改变碳酸盐矿物的化学平衡,流体无法与其进行有效的物质交换。在这种情况下,碳酸盐胶结物几乎完全占据储集空间,对于储层物性来说具有较大的破坏性。

本地区主要发育孔隙式胶结的碳酸盐,连晶方式胶结很少,因而不能对渗透率产生很大影响,从图3中也可以看出,储层渗透率随碳酸盐胶结物含量的增加一直保持稳定。当碳酸盐含量小于大约5%时,储层孔隙度随着碳酸盐胶结物含量的增加没有明显变化,但是当碳酸盐含量大于大约5%时,储层孔隙度随碳酸盐胶结物含量增加而明显降低(图4)。储层在两种情况下碳酸盐胶结物含量较少,一种是储层为黏土矿物胶结从而缺乏碳酸盐胶结物,这种储层的孔隙度必然低,如酒参1井下沟组下段储层内发育大量的黏土杂基并且主要为黏土矿物胶结,致使碳酸盐胶

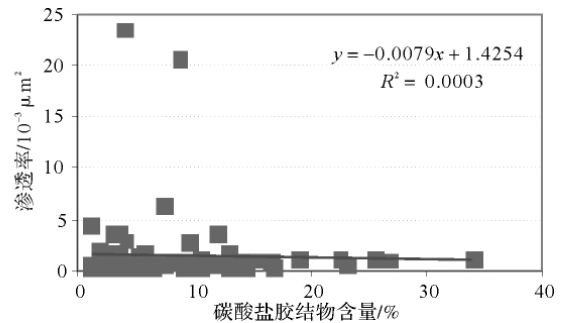


图3 碳酸盐胶结物含量与渗透率关系图

Fig. 3 The relationship between the contents of carbonate cements and permeability

结物只是零星出现;另一种是储层内碳酸盐胶结物已经部分被溶解,这种储层的孔隙度较高,如上述的祁1井下沟组下段储层。碳酸盐胶结物含量较低的复杂性,导致碳酸盐含量与孔隙度的相关性不强,而当碳酸盐胶结物含量较高且黏土矿物含量很低的储层,碳酸盐胶结物含量与储层孔隙度具有负相关性,因为

当碎屑岩粒间体积一定的情况下,碳酸盐会损失粒间体积而减少孔隙度,因而碳酸盐胶结物含量越高储层孔隙度越小。可见,对于深部低渗透储层,碳酸盐胶结物溶解所形成的次生孔隙对改善砂岩储层质量起着关键作用。

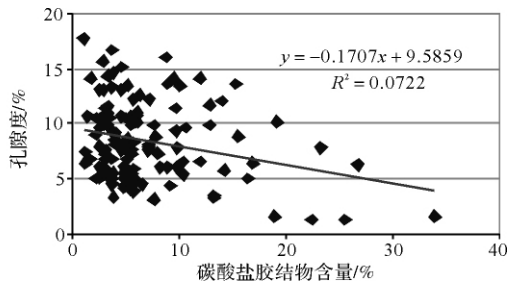


图4 碳酸盐矿物含量与孔隙度关系图

Fig. 4 The relationship between the contents of carbonate cements and porosity

5 结论

(1) 酒东坳陷营尔凹陷下白垩统砂岩储层中碳酸盐胶结是一种含量高并对物性影响最大的胶结物,碳酸盐矿物按成份可以分为铁方解石、白云石和铁白云石,并且以后者为主,在局部地区还有少量的菱铁矿自生矿物。其主要分布于沉积中心周围的三角洲前缘水下分流河道砂体、河口坝砂体和滨浅湖滩坝砂体中,具有分带性的特点。

(2) 根据碳酸盐矿物的碳氧同位素分析可知,各种类型碳酸盐胶结物的形成时间具有较强的持续性,形成温度与干酪根热解过程相吻合,并且碳酸盐胶结物均为成岩作用后期产物。形成碳酸盐矿物所需的碳、钙、镁和铁主要来源于泥岩的黏土矿物转化和有机质热演化,另外,有一部分钙来源于斜长石的蚀变。

(3) 距离坳陷沉积中心较近的砂岩储层中碳酸盐胶结物的溶蚀溶解现象非常普遍,产生了大量的次生溶蚀孔隙,储层物性明显改善,而距离沉积中心较远的砂岩储层中碳酸盐胶结物大量存在,致使储层物性很差。可见,碳酸盐胶结物的溶蚀溶解是深部低渗透储层存在较为优质储层的重要原因,该溶蚀溶解必须存在流体运移的通道。碳酸盐胶结物含量也对储层质量有所影响,当碳酸盐含量大于5%时,储层孔隙度随碳酸盐胶结物含量的增加而降低,而当其含量较少时,储层孔隙度与碳酸盐胶结物含量之间没有明显对应关系。

参考文献(References)

- 1 Carlos R, Rafaela M, Karl R, *et al.* Facies-related diagenesis and multiphase siderite cementation and dissolution in the reservoir sandstones of the Khatatba Formation, Egypt western desert [J]. *Journal of Sedimentary Research* 2001, 71(3): 459-472
- 2 H. Mansurbega, S. Morad, A. Salem, *et al.* Diagenesis and reservoir quality evolution of palaeocene deep-water, marine sandstones, the Shetland-Faroes basin, British continental shelf [J]. *Marine and Petroleum Geology* 2008, 25(6): 514-543
- 3 杨智, 邹才能, 何生, 等. 准噶尔盆地腹部超压顶面附近碳酸盐胶结带的成因机理 [J]. *中国科学: D 辑*, 2010, 40(4): 439-451 [Yang Zhi, Zou Caineng, He Sheng, *et al.* Formation mechanism of carbonate cemented zones adjacent to the top overpressured surface in the central Junggar Basin, NW China [J]. *Science in China: Series D* 2010, 53: 529-540]
- 4 吕成福, 陈国俊, 张功成, 等. 珠江口盆地白云凹陷珠海组碎屑岩储层特征及成因机制 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2011, 42(9): 2763-2773 [Lü Chengfu, Chen Guojun, Zhang Gongcheng *et al.* Reservoir characteristics of detrital sandstones in Zhuhai Formation of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology* 2011, 42(9): 2763-2773]
- 5 Hao Fang, Sun Yongchuan, Li Sitian. Overpressure retardation of organic matter maturation and hydrocarbon generation: a case study from the Yinggehai and Qiongdongnan Basins, offshore South China Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(4): 551-562
- 6 Lynch F L, Land L S. Diagenesis of calcite cementation Frio Formation sandstones and its relationship to formation water chemistry [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(3): 439-446
- 7 Talor, T R. The influence of calcite dissolution on reservoir Porosity in Miocene sandstones, picaroon field, offshore Texas Gulf coast [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1990, 60(3): 322-334
- 8 于炳松, 赖兴运. 克拉2气田储集岩中方解石胶结物的溶解及其对次生孔隙的贡献 [J]. *矿物岩石*, 2006, 26(2): 76-79 [Yu Bingsong, Lai Xingyun. Dissolution of calcite cement and its contribution to the secondary pores of reservoir in the Kela 2 gas field in the Tarim Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology* 2006, 26(2): 76-79]
- 9 钟大康, 朱筱敏, 李树静, 等. 早期碳酸盐胶结作用对砂岩孔隙演化的影响—以塔里木盆地满加尔凹陷志留系砂岩为例 [J]. *沉积学报*, 2007, 25(6): 885-890 [Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Li Shujing, *et al.* Influence of early carbonate cementation on the evolution of sandstones: a case study from Silurian sandstones of Manjiaer Depression, Tarmi Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(6): 885-890]
- 10 陈国俊, 杜贵超, 张功成, 等. 珠江口盆地番禺低隆起第三系储层成岩作用及物性影响因素分析 [J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(6): 854-861 [Chen Guojun, Du Guichao, Zhang Gongcheng, *et al.* Diagenesis and main factors controlling the Tertiary reservoir properties of the Panyu Lowuplift reservoirs, Pearl River Mouth Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(6): 854-861]
- 11 王琪, 糕喜准, 陈国俊, 等. 延长组砂岩中碳酸盐胶结物氧碳同位

- 素组成特征[J]. 天然气工业, 2007, 27(10): 28-31 [Wang Qi, Zhuo Xihun, Chen Guojun, *et al.* Characteristics of carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate cements in Triassic Yanchang sandstone in Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(10): 28-32]
- 12 吕成福, 陈国俊, 杜贵超, 等. 酒东坳陷营尔凹陷下白垩统储层孔隙特征及其影响因素研究[J]. 沉积学报, 2010, 28(3): 556-562 [Lü Chengfu, Chen Guojun, Du Guichao, *et al.* Characteristics of Pore evolution and its controlling factors of Lower Cretaceous reservoir in Ying'er Depression, Jiudong Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2010, 28(3): 556-562]
- 13 王崇孝, 马国福, 周在华. 酒泉盆地中-新生代构造演化及沉积充填特征[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 33-36 [Wang Chongxiao, Ma Guofu, Zhou Zaihua. Structure evolution and sedimentary filling of Jiuquan Basin in Mesozoic-Cenozoic Period, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development* 2005, 32(1): 33-36]
- 14 潘良云, 谢结来, 李明杰, 等. 酒泉盆地白垩纪-新生代区域构造演化与油气勘探[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 62-69 [Pan Lianyun, Xie Jielai, Li Minjie, *et al.* Cretaceous-Cenozoic regional tectonic evolution in Jiuquan basin and petroleum exploration [J]. *Oil & Gas Geology* 2006, 27(1): 62-69]
- 15 冉波, 王成善, 朱利东, 等. 酒泉盆地早白垩世沉积相特征与构造样式浅析[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(2): 189-192 [Ran Bo, Wang Chengshan, Zhu Lidong *et al.* Primary research of early Cretaceous sedimentary facies characteristics and structural style for the Jiuquan Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia* 2006, 30(2): 189-192]
- 16 吕成福, 秦长文, 陈国俊, 等. 酒泉盆地酒东坳陷下白垩统低孔渗透层成岩作用研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 939-946 [Lü Chengfu, Qin Changwen, Chen Guojun. Diagenesis of lower Cretaceous reservoir sandstones from Jiudong Depression in Jiuquan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience* 2010, 21(6): 939-946]
- 17 孙致学, 孙治雷, 鲁洪江, 等. 砂岩储集层中碳酸盐胶结物特征—以鄂尔多斯盆地中南部延长组为例因[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5): 543-551 [Sun Zhixue, Sun Zhilei, Lu Hongjiang *et al.* Characteristics of carbonate cements in sandstone reservoirs: A case from Yanchang Formation, middle and southern Ordos Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(5): 543-551]
- 18 Kelts K, Talbot M R. Lacustrine carbonates as geochemical archives of environmental change and biotic/abiotic interactions. In: Tilzer M M, Ser-ruya C, eds. *Ecological structure and Function in Large Lakes-Madison*, Wis [M]. Science Technology, 1990. 290-317
- 19 Irwin H, Curtis C. Isotopic evidence for source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments [J]. *Nature* 1977, 269: 209-213
- 20 Leo Lynch F, Land L S. Diagenesis of calcite cement in Frio Formation sandstones and its relationship to formation water chemistry [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(3): 439-466

Characteristics of Carbonate Cements and Reservoir Quality of the Lower Cretaceous Sandstone in Jiudong Sag

LÜ Cheng-fu¹ LI Xiao-yan² CHEN Guo-jun¹ LU Xin-chuan¹
DU Gui-chao^{1,3} LI Chao^{1,3} LI Wei^{1,3} CHEN Ji^{1,3}

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;

2. The Lanzhou Branch of National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;

3. Graduate University in of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The deep burial sandstone reservoir quality is seriously affected by the carbonate cements which is an essential autogenic mineral in the Lower Crataceous formation in Jiudong sag. The thin sections and scanning electron microscope are analyzed, the energy spectroscopy, carbon and oxygen isotopes of carbonate cements are tested. The study results indicate that the carbonate cements of Lower Crataceous sandstone from the Jiudong sag are mainly ferrous dolomite, ferrous calcite and dolomite with heterogeneous distribution and apparent zonation. They were formed in the late stage of diagenesis and the source are mainly derived from clay minerals transformation, thermal evolution of organic matter in the mudstone and the part of the calcium from the alteration of plagioclase. The key reason for development of the high-quality reservoir in the deep burial low-permeability reservoirs is the dissolution of carbonate cements. In addition, the content of carbonate cement also have an impact on reservoir quality, if the content is greater than 5%, with the increase of the content of carbonate cements the porosity decreases, while it's less than 5%, there is no obvious correlation between porosity and carbonate cement content.

Key words Jiuquan Basin; Ying'er Depression; carbonate cements; carbon and oxygen isotopes; material source