

文章编号: 0253-9985(2009)04-0438-06

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

王清斌¹, 臧春艳², 赖维成¹, 王 波¹, 王雪莲¹, 赵小娇³[1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司 勘探开发研究院, 天津 300452 2 中海石油
能源发展股份有限公司 采油工程研究院, 天津 300452 3 中国地质大学 海洋学院, 北京 100083]

摘要: 碳酸盐胶结物是渤中坳陷古近系砂岩储层中最重要的胶结物。薄片分析表明, 中、深部储层中碳酸盐胶结物主要为菱铁矿、白云石、方解石、铁白云石、铁方解石。统计显示, 随着层位和深度加深, 碳酸盐含量逐渐增加, 含量突增段主要发生在东营组; 碳酸盐含量超过 10%, 对储层物性影响较大。由薄片分析及碳、氧同位素分析可知, 菱铁矿多以孔隙充填和颗粒环边方式产出, 主要形成于同生到早成岩早期; 方解石主要以粒状或呈连生胶结方式产出, 方解石相对含量与 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈明显的负相关关系, 说明大部分方解石形成较晚; 铁方解石主要以粒状产出, 以铁方解石为主的样品对应着较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 且沉淀温度高; 白云石主要以斑块状充填粒间孔隙, 其相对含量与 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈明显正相关性, 且沉淀温度较低、形成较早; 铁白云石主要以分散的粒状产出, 其相对含量与 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈明显的正相关关系, 且沉淀温度相对较低。

关键词: 碳、氧同位素; 碳酸盐胶结物; 碎屑岩储层; 古近系; 渤中坳陷

中图分类号: TE122.2 文献标识码: A

Distribution characteristics and origin of carbonate cements in the middle and deep clastic reservoirs of the Paleogene in the Bozhong Depression

Wang Qingbin¹, Zang Chunyan², Lai Weicheng¹, Wang Bo¹, Wang Xuelian¹, Zhao Xiaojiao³

(1 Exploration and Development Research Institute, CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300452, China;

2 Oilfield Engineering Research Institute, CNOOC Energy Development Company, Tianjin 300452, China;

3 School of Ocean Sciences, China University of Geosciences Beijing 100083, China)

Abstract Carbonate cements are the most important cements in the Paleogene sandstone reservoirs of the Bozhong depression. Analysis on thin sections shows that the main cements of the middle and deep clastic reservoirs are siderites, dolomites, calcites, ferrodolomites and ferrocalcites. According to the statistical data, carbonate content gradually rises with the increase of depth. A sharp increase of carbonate content occurs in the Paleogene Dongying Formation. When the carbonate content exceeds 10%, it will have a great impact on physical properties of reservoirs. Analysis on thin sections and isotopes reveals that the siderites mainly occur as pores fillings and particle rim cements and were mainly formed in the synsedimentary period or at the early stage of the early diagenesis. The calcites mainly occur as particles or poikilitic cements. The relative calcite content has negative correlation with $\delta^{18}\text{O}$ values, indicating that most of the calcites were formed late. The ferrocalcites mainly occur as particles. The ferrocalcite-dominant samples correlate with low $\delta^{18}\text{O}$ values and relatively high temperature of precipitation. The dolomites mainly occur as intergranular pore-filling particles in patches and its relative content has obvious positive correlation with $\delta^{18}\text{O}$ value. Its temperature of precipitation is relatively low and the time of forming is relatively early. The ferrodolomites mainly occur as dispersed particles and its relative content has obvious positive correlation with $\delta^{18}\text{O}$ value and its temperature of precipitation is relatively low.

收稿日期: 2009-05-05

第一作者简介: 王清斌(1975-),男,硕士,沉积与储层。

基金项目: 中海石油(中国)有限公司“十一五”重大基础研究项目(SC06TJ-TQL-004-HH02)。

Key words carbon and oxygen isotope; carbonate cement; elastic reservoir; Paleogene; Bozhong Depression

古近系是渤中坳陷重要的油气勘探目的层^[1-2]。碳酸盐胶结物是渤中坳陷古近系碎屑岩储层中常见的胶结物之一。古近系地层由于埋深大,碳酸盐胶结物较发育,对储层物性的影响显著。对碳酸盐胶结物分布规律及其成因的研究可为预测优质碎屑岩储层提供重要参考。

1 碳酸盐胶结物分布特征及对储层物性的影响

1.1 碳酸盐胶结物分布特征

薄片观察、阴极发光分析显示,渤中坳陷古近

系中、深层碳酸盐胶结物主要包括方解石、白云石、铁方解石、铁白云石、菱铁矿。不同层位岩心分析表明,碳酸盐含量随着深度的增加逐渐增加。明(化镇组)下段至沙(河街组)三段,除东(营组)二段)上(亚段)碳酸盐含量较低外,随着埋藏时间的增加,碳酸盐胶结物含量逐渐增加,其中沙三段碳酸盐胶结物平均含量超过 9%(表 1)。

薄片分析表明,碳酸盐胶结物中的(铁)白云石和(铁)方解石随深度的增加含量均逐渐增加。(铁)白云石、(铁)方解石含量突增段均发生在东营组,表现在平均含量及含碳酸盐样品比例两个方面(表 2 图 1)。不同类别的碳酸盐在不同层位的差异性,反映了原始沉积条件及后期成岩流体

表 1 渤中坳陷各层位砂岩储层碳酸盐含量统计

Table 1 Statistics of carbonate contents in the sandstone reservoirs of different formations in the Bozhong Depression							
层位	明下段	馆陶组	东二上	东二下	沙一段	沙二段	沙三段
碳酸盐含量, %	1.90	3.64	1.94	5.52	5.87	8.47	9.12
深度 /m	1 300~ 2 000	1 200~ 2 500	2 600~ 3 600	2 800~ 3 800	3 100~ 3 900	3 300~ 3 500	3 400~ 3 800
样品数 /个	45	115	64	220	33	55	61

表 2 渤中坳陷各类碳酸盐胶结物平均含量

Table 2 Average contents of different carbonate cements in the Bozhong Depression

层位	平均含量, %			样品总数 /个
	(铁)白云石	(铁)方解石	菱铁矿	
明下段	0.28	0.60	0.26	358
馆陶组	0.51	0.62	0.58	55
东一段	0.21	1.44	0.07	34
东二段	2.14	0.92	2.75	48
沙一、二段	1.87	3.56	0.27	139
沙三段	4.03	2.94	1.30	203

表 3 渤中坳陷碳酸盐含量对储层物性的影响

Table 3 Influences of carbonate contents on physical properties of reservoirs in the Bozhong Depression

碳酸盐胶结物含量, %		< 10	> 10
样品数 /个		288	58
孔隙度, %	平均值	17.07	11.56
	主分布区间 (样品比例, %)	10~ 20 (70.1)	10~ 20 (50.0)
	平均值	28.57	7.84
渗透率 /(10 ⁻³ μm ²)	主分布区间 (样品比例, %)	1~ 50 (58.0)	0.01~ 0.50 (70.7)

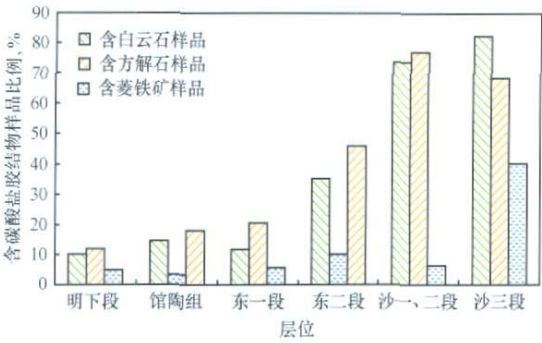


图 1 渤中拗陷各层位砂岩储层含碳酸盐胶结物样品比例统计

Fig. 1 Proportions of samples containing carbonate cements from different sandstone reservoirs of the Bozhong Depression

的综合控制。(铁)白云石、(铁)方解石与深度的密切相关性,说明(铁)白云石、(铁)方解石主要是埋藏成岩期的产物。菱铁矿与深度相关性不明显,东二段和沙三段菱铁矿含量及含菱铁矿样品比例较高。

1.2 碳酸盐胶结物对储层物性的影响

碳酸盐胶结物对储层的影响具有双重性。在成岩早期,碳酸盐胶结可增强砂岩的抗压实能力,

使部分粒间孔隙得以保存;进入中成岩 A 期后,有机酸和 CO₂ 酸性流体溶蚀碳酸盐胶结物,使原生孔隙重新开启并形成次生孔隙^[3~6]。

对渤中拗陷深度大于 2 500 m 的碎屑岩统计表明,碳酸盐胶结物含量大于 10% 时,平均孔隙度和平均渗透率显著下降,孔隙度高值区间比例显著降低,渗透率主要分布区间降低了两个数量级(表 3)。在渤中拗陷中、深层,碳酸盐含量较高时对储层物性影响较明显。碳酸盐含量是中、深层重要的物性控制因素之一。

2 碳酸盐胶结物微观特征

通过茜素红和铁氰化钾混合溶液染色薄片、阴极发光、扫描电镜等手段,对碳酸盐胶结物的产出特征进行了观察和研究,查明了渤中拗陷古近系碎屑岩碳酸盐胶结物的微观特征。

2.1 (铁)方解石

薄片染色后方解石呈粉红色-红色,阴极发光下方解石呈黄色-橙色(图 2a)。方解石以粒状为主,部分样品为连生结构,常表现为对长石、岩屑

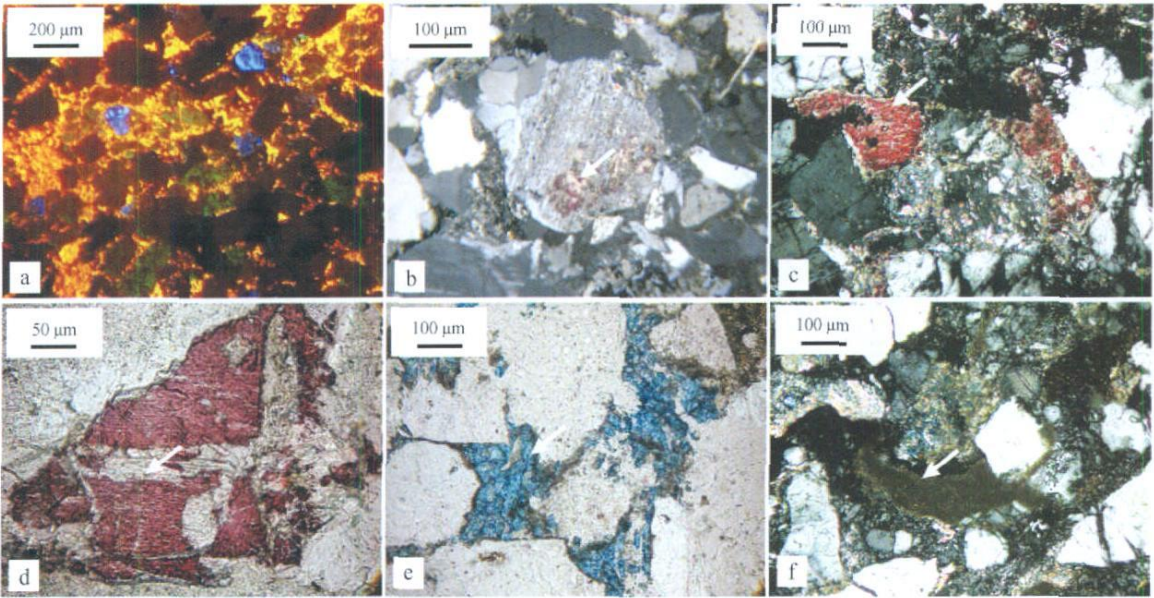


图 2 渤中拗陷砂岩储层中碳酸盐胶结物薄片显微照片

Fig. 2 Thin section photomicrographs of carbonate cements in sandstone reservoirs of the Bozhong Depression

a 亮黄色方解石充填粒间孔隙, B1 井, 4 167 m, 阴极发光照片; b 方解石充填长石粒内溶蚀孔隙, C2D 井, 3 197.1 m, 染色薄片, 正交偏光照片; c 白云石呈孔隙衬里沿孔隙边缘分布, 铁方解石充填孔隙剩余空间, XX1 井, 3 357 m, 染色薄片, 正交偏光照片; d 白云石交代早期方解石, XX1 井, 3 357 m, 染色薄片, 单偏光照片; e 铁白云石以分散的颗粒状充填粒间孔隙, XX1 井, 3 699 m, 染色薄片, 单偏光照片; f 菱铁矿呈团块状充填粒间孔隙, XX1 井, 2 798 m, 染色薄片, 正交偏光照片

及粘土基质的交代, 还可见方解石占据骨架颗粒溶蚀孔(图 2b); 常见早期方解石被白云石、铁白云石、铁方解石交代。

从方解石的产出特征来看, 方解石胶结主要可分为两期。少部分方解石被白云石交代, 说明这部分方解石形成于白云石之前, 形成较早。充填孔隙的不规则粒状方解石, 主要占据压实后的残余孔隙, 形成较晚; 占据颗粒溶蚀孔的方解石, 形成于酸性水产生的溶蚀作用之后, 也形成较晚。铁方解石染色后主要呈现为蓝紫色, 多以粒状产出, 充填孔隙或交代晚期孔隙充填的方解石(图 2c)。

2.2 (铁)白云石

染色薄片白云石无色, 多数白云石晶粒以粉-泥晶为主, 晶粒集合体常呈斑块状致密胶结孔隙或以孔隙衬里的方式和环绕颗粒方式产出(图 2c), 常交代骨架颗粒、早期方解石, 交代强烈仅见骨架颗粒残余(图 2d)。

铁白云石染色后呈蓝色, 常交代白云石及骨架颗粒, 部分呈粉晶粒状不均匀分散于孔隙中(图 2e)。铁白云石主要是深埋藏时的产物^[7]。

2.3 菱铁矿

菱铁矿主要以假杂基形态充填原生粒间孔隙产出, 部分菱铁矿呈团块状, 晶粒以泥晶-粉晶为主, 常与有机质伴生, 整体颜色较暗(图 2f)。菱铁矿发育的位置, 颗粒主要以点接触为主, 反应了菱铁矿主要形成于砂岩原生孔隙发育的早成岩期^[7]。

3 碳酸盐碳、氧同位素特征

对渤中坳陷古近系东营组、沙河街组碎屑岩样品的碳酸盐胶结物进行了碳、氧同位素分析。先将样品粉碎至小于 100 目的粉末, 再加入 100% 的磷酸, 在常温下充分反应 24 h 收集 CO₂ 气体。首先, 利用稳定同位素质谱仪进行同位素分析, 同位素比值以 PDB 标准的千分率偏差给出, 氧、碳同位素分析精度为 0.02‰。接着, 通过薄片分析对样品碳酸盐胶结物含量进行分类统计, 揭示碳酸盐胶结物的碳、氧同位素特征。

3.1 碳、氧同位素值的变化

渤中坳陷古近系中、深部储层中的碳酸盐胶结物的碳、氧同位素值变化范围较大。碳同位素值位于 -4.7‰ ~ 9.2‰ 之间, 平均 3.4‰, 整体偏正; 氧同位素值位于 -17.4‰ ~ -9.1‰ 之间, 平均 -13.3‰, 整体偏负(表 4)。

碳、氧同位素值整体表现为较好的正相关性(图 3), 说明一些轻碳含量高的碳酸盐是在较晚的成岩阶段形成的, 而一些 δ¹³C 值较高的碳酸盐则是在较早的成岩阶段形成的^[10~12]。将测试分析数据结果投点碳酸盐成因分析图^[12]上, 多数投在了与生物成因气有关的碳酸盐范围内, 部分投在了与有机酸脱羧作用有关的碳酸盐范围内, 没有数据点投在与硫酸盐还原作用有关的碳酸盐范围内(图 4)。这说明, 在渤中坳陷古近系东营组、沙一段、沙二段、沙三段沉积时期, 湖水硫酸盐含量低, 早期成岩作用以甲烷化作用为主。甲烷以

表 4 渤中坳陷 X21 井古近系砂岩储层碳酸盐胶结物分析

Table 4 Analysis on carbonate cements in the Paleogene sandstone reservoirs of the Bozhong Depression

层位	深度 /m	δ ¹³ C (PDB), ‰	δ ¹⁸ O (PDB), ‰	碳酸盐胶结物含量, %					温度 /℃	产出方式
				菱铁矿	方解石	铁方解石	白云石	铁白云石		
E ₃ d ^{2(上)}	2 788	- 4.7	- 17.4	8	32	2	4	0	127	粒状结构
E ₃ s ¹	3 288	9.2	- 13.8	少量	3	0	4	4	98	粉晶环边
E ₃ s ¹	3 320.5	7.6	- 12.0	少量	少量	2	6	7	84	粒状结构
E ₃ s ²	3 356	2.5	- 12.5	少量	1	2	5	2	88	粒状结构
E ₃ s ²	3 357	1.9	- 14.4	少量	13	3	4	1	103	粒状结构
E ₃ s ²	3 393	- 3.5	- 14.9	少量	35	1	3	1	107	连生结构
E ₃ s ³	3 699	3.2	- 15.2	少量	0	4	0	3	109	粒状结构
E ₃ s ³	3 753	6.2	- 9.1	少量	0	2	2	4	64	粒状结构
E ₃ s ³	3 764	1.8	- 15.2	3	3	0	0	0	109	粒状结构

注: 1) 计算温度时流体的 δ¹⁸O(SNOW) 值取现今海水值 (0, SNOW), 按 Urey (1965) 的温度计算公式计算^[8 9]。
2) E₃d^{2(上)} 为渐新统东营组二段上亚段; E₃s¹, E₃s², E₃s³ 分别为渐新统沙河街组一段、二段、三段。

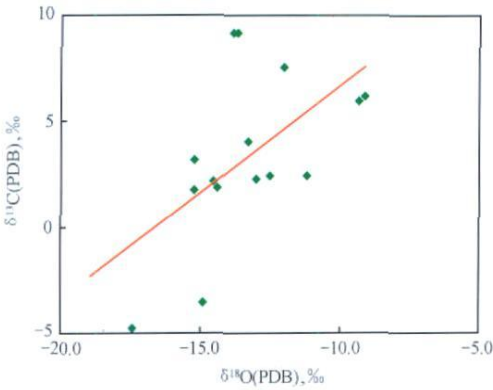


图 3 碳酸盐胶结物的碳、氧同位素相关性

Fig. 3 Correlation between carbon isotope and oxygen isotope in carbonate cements

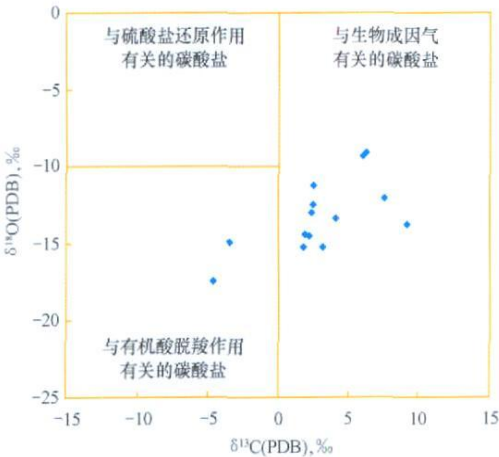


图 4 碳酸盐胶结物碳、氧同位素值投点图

Fig. 4 Crossplot of carbon and oxygen isotopes in carbonate cements

富¹²C为特征, 导致流体中¹³C富集, 使 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正^[10~12]。而投在有机酸脱羧作用相关碳酸盐范围内的两个样品都以高含量方解石为特征, 同时对应对着较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 沉淀温度也较高, 反映了这类方解石胶结作用发生的深度较深, 是成岩中-晚

期胶结作用的产物。

3.2 碳酸盐胶结物成因与 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的联系

$\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的值主要反映了各类不同的碳酸盐矿物对测量值的综合影响, 而这一影响在许多研究中并没有被详细讨论过。实际上, 试验得到的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的值是不同类型碳酸盐矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的加权平均值, 而各类不同碳酸盐矿物含量占全部酸可溶物的比例 (相对含量) 反映了这类碳酸盐胶结物的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值对试验测量值的贡献。通过这类碳酸盐胶结物的相对含量与 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的相关性分析, 就可以建立碳酸盐胶结物的成因与 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的联系。

3.2.1 方解石和铁方解石

方解石胶结物占碳酸盐胶结物的比例与 $\delta^{18}\text{O}$ 值为明显的负相关关系 (图 5a), 这反映了多数方解石胶结物主要形成于温度较高的环境下; 方解石占优势的样品, 计算所得的温度都较高 (109~127℃), 这与方解石相对含量与 $\delta^{18}\text{O}$ 值的相关性也是吻合的。方解石胶结物相对含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现为负相关关系 (图 5b), 说明方解石相对含量越高, 其轻碳越富集, 而有机酸脱羧作用是埋藏条件下形成轻碳富集碳酸盐的重要机制之一^[12]。方解石连生胶结的两个样品都投在与有机酸脱羧作用有关的碳酸盐区 (图 4), 说明其成因与有机酸脱羧作用有关, 沉淀温度较高, 形成较晚。综上, 方解石主要是成岩中-晚期的产物。

铁方解石含量较低, 与方解石共存时往往方解石比例较高, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值更多地反应了方解石的影响。分析表明, 铁方解石相对含量与 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的相关性都较差。铁方解石占优势的样品有一个, 计算的沉淀温度较高, 形成较晚。

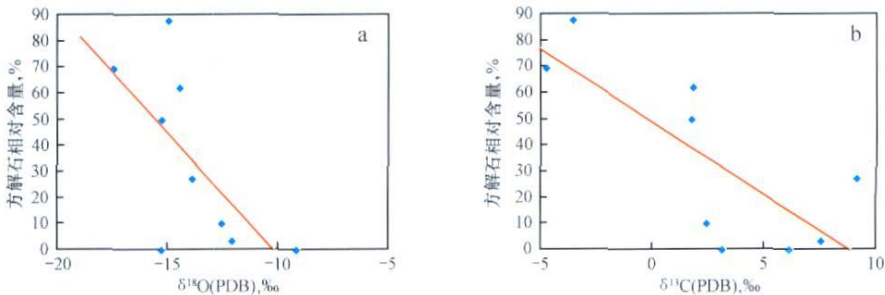


图 5 方解石相对含量与 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的相关性

Fig. 5 Correlation between relative content of calcite and $\delta^{18}\text{O}/\delta^{13}\text{C}$ values

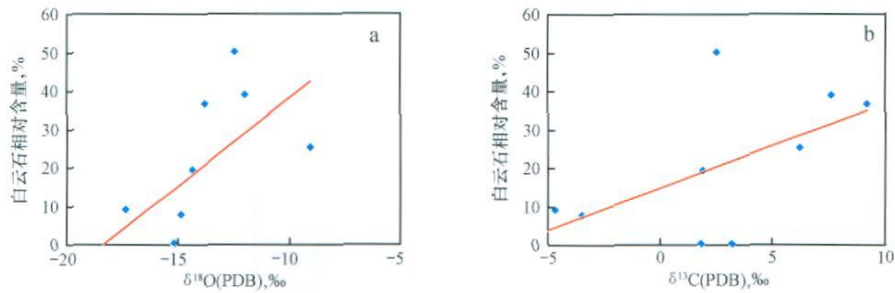


图 6 白云石相对含量与 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的相关性

Fig. 6 Correlation between relative content of dolomite and $\delta^{18}\text{O}$ / $\delta^{13}\text{C}$ values

3.2.2 白云石和铁白云石

与方解石不同,白云石胶结物占碳酸盐胶结物的比例与 $\delta^{18}\text{O}$ 值为明显的正相关关系(图 6a),这反映了白云石主要形成于温度相对较低的环境下;白云石占优势的样品,计算得到的温度都相对较低,由于受其他高温沉淀的碳酸盐矿物的影响,白云石形成的实际温度应低于这一温度,因此白云石胶结物应为早成岩期的产物。白云石胶结物的相对含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值为明显的正相关关系(图 6b),白云石相对含量较高的样品,对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较高,说明其形成于 C^{13} 相对富集的环境中;结合成因投点,白云石相对含量较高的样品全部投在与生物成因气相关的碳酸盐区,说明白云石主要产生在成岩早期生物发酵作用产生的 C^{13} 相对富集的环境中^[10~12]。

铁白云石相对含量与 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值的相关性规律与白云石一致,即与 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈明显的负相关关系,与 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈明显的正相关关系。理论上,铁白云石形成的温度要高于白云石,铁白云石占优势样品的计算温度低于铁方解石占优势的样品。因此,铁白云石形成时间晚于白云石,早于铁方解石。

4 结论

- 1) 渤中坳陷古近系碳酸盐胶结物主要矿物类型有方解石、铁方解石、白云石、铁白云石、菱铁矿,其中最主要的是方解石和白云石。碳酸盐含量超过 10% 时对储层物性影响较大。
- 2) 方解石呈粒状和连生结构产出。古近系碎屑岩中的方解石胶结物沉淀温度高,主要为成岩中-晚期碳酸盐,与有机酸脱羧 C^{12} 富集作用有关。铁方解石常交代骨架颗粒、方解石、白云石及

- 充填颗粒溶蚀孔。以铁方解石为主的样品沉淀温度高,形成较晚。
- 3) 白云石主要以不规则的颗粒环边、孔隙衬里、孔隙充填方式产出;古近系碎屑岩中的白云石胶结物沉淀温度较低,与生物发酵 C^{13} 富集作用有关。铁白云石常交代白云石,形成相对较晚。
 - 4) 菱铁矿主要以颗粒环边状、假杂基形态充填原生粒间孔隙产出,形成在早成岩期。

参 考 文 献

- 1 翟光明. 中国石油地质志(卷十六) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002. 90~105
- 2 邓宏文, 王红亮. 古地貌对陆相裂谷盆地层序充填特征的控制——以渤中凹陷西斜坡区下第三系为例 [J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(4): 294~295
- 3 张敏强, 黄思静, 吴志轩, 等. 东海盆地丽水凹陷古近系储层砂岩中碳酸盐胶结物及形成机制 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2007, 34(3): 259~266
- 4 邹明亮, 黄思静. 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
- 5 蒋恕, 蔡东升. 辽河坳陷辽中凹陷成岩作用与中深层孔隙演化 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(3): 362~369
- 6 张琴, 钟大康. 东营凹陷下第三系碎屑岩储层孔隙演化与次生孔隙成因 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 281~283
- 7 刘宝珺, 张锦泉. 沉积成岩作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1992. 65~79
- 8 强子同. 碳酸盐岩储层地质学 [M]. 山东东营: 中国石油大学出版社, 2007. 107~122
- 9 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用 [M]. 陕西西安: 陕西科学技术出版社, 1985. 102~130
- 10 汪品先, 刘传联. 含油气盆地古湖泊学研究方法 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 96~123
- 11 刘传联. 东营凹陷沙河街组湖相碳酸盐岩碳氧同位素组分及其古湖泊学意义 [J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 110~114
- 12 郭宏莉, 王大锐. 塔里木油气区砂岩储集层碳酸盐胶结物的同位素组成与成因分析 [J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(3): 31~32