https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.154



莺歌海盆地乐东区碳酸盐胶结物成因及地质意义

吴仕玖,范彩伟,招湛杰,代 龙,邓孝亮,钟 佳

中海石油(中国)有限公司湛江分公司,广东湛江,524057

摘 要:为探讨乐东区碳酸盐胶结物的分布规律、成因机制及其对储层质量的影响,应用铸体薄片、碳氧同位素、包裹体对碳 酸盐胶结物岩石学、地球化学等特征进行综合分析,研究结果表明,从斜坡带往凹陷中心,碳酸盐含量由18.0%降至5.0%;其 δ¹³C 值分布在-4.78‰~+1.03‰,δ¹⁸O 值分布在-10.99‰~-6.34‰,Z值分布在 111.27~123.59,古海水温度分布在 11.36~ 32.02℃,古盐度分布在3.24%~6.91%;碳酸盐胶结物的形成主要与碳酸盐岩或高钙质砂岩母岩的溶解再沉淀有关,其受控于 水介质温度、成岩温度与盐度,由斜坡带往凹陷中心,水介质温度降低、盐度增高,胶结变弱.低含量的早期(铁)方解石与高温 热流体溶解高含量早期(铁)方解产生的低或高含量的晚期(铁)白云石区均可发育中渗"甜点"储层.

关键词: 莺歌海盆地: 碳酸盐胶结物: 碳氧同位素: 古海水温度: 石油地质. **中图分类号**: P581 **文章编号:** 1000-2383(2019)08-2686-09

收稿日期:2019-02-05

Origin of Carbonate Cement in Reservoirs of Ledong Area, **Yinggehai Basin and Its Geological Significance**

Wu Shijiu, Fan Caiwei, Zhao Zhanjie, Dai Long, Deng Xiaoliang, Zhong Jia

Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., Zhanjiang 524057, China

Abstract: In order to explore the distribution law, formation mechanism and its effect on reservoir quality in Ledong District, a comprehensive study of petrology and geochemistry was carried out on the characteristics of cast thin sections, carbon and oxygen isotopes, and inclusions of carbonate cement. The results show that the carbonate cement content from the slope to the depression center has been reduced from 18.0% to 5.0%, and its δ^{13} C value is distributed in the range of $-4.78\% \sim +1.03\%$, the δ^{13} C value is distributed in the range of -10.99% to -6.34%, Z Values range from 111.27 to 123.59, ancient sea water temperature is distributed in the range of 11.36 °C to 32.02°C, ancient salinity is distributed in the range of 3.24% to 6.91%. It is found that the formation of carbonate cement is mainly related to the dissolution and precipitation of carbonate rock or high calcareous sandstone, which is controlled by the water medium temperature, the formation temperature and salinity. From the slope to the depression center, the water medium temperature is reduced, the salinity is increased, and the bond is weak. Low-content early (iron) calcite and high temperature hot fluid dissolved early (iron) calcite produced by low or high content of late (iron) dolomite areas can develop medium-permeability "sweet spot" reservoirs.

Key words: Yinggehai Basin; carbonate cement; carbon and oxygen isotopes; ancient seawater temperature; petroleum geology.

众所周知,碳酸盐胶结物作为碎屑岩储层中最 普遍、最重要的自生矿物之一(张敏强等,2007; 多、成因复杂与多样化等特征(Carlos et al.,2001;

Yang et al., 2009),具有分布范围广、形成的期次

引用格式:吴仕玖,范彩伟,招湛杰,等,2019.莺歌海盆地乐东区碳酸盐胶结物成因及地质意义.地球科学,44(8):2686-2694.

基金项目:"十三五"国家重大专项《莺琼盆地高温高压天然气富集规律与勘探开发关键技术(三期)》(No. 2016ZX05024-005);中海石油(中 国)有限公司自主立项项目《差异岩-场耦合的储盖层联控机制与有效储盖分布研究》(No. ZYKY-2018-ZJ-01).

作者简介:吴仕玖(1986—),男,工程师,硕士,主要从事沉积储层方面的研究。E-mail:wushj14@cnooc.com.cn,ORCID:0000-0002-0898-6981.

Yang et al., 2010),其胶结类型、赋存状态、含量多 少等对储层的物性影响较大(刘春燕等,2012:郭佳 等,2014;孙国强等,2014).相关研究表明,碳酸盐胶 结物的形成多对成岩作用起破坏性,在碳酸盐胶结 物含量丰富的地区,其沉淀的机理及成岩机制是岩 石学、沉积学及石油地质学等研究的重要内容之一 (Kantorowicz et al., 1987; 徐北煤和卢冰, 1994, 郭佳 等,2014).乐东区中新统储层是莺歌海盆地最重要 的勘探层系,其重力流水道一海底扇沉积砂体发 育,其地层埋深普遍大于3500m,碳酸盐胶结物广 泛发育,显著影响储层的物性,因此,明确碳酸盐胶 结物的类型、分布及其成因机制对认识本区储层具 有重要的意义,然而以往的工作却对此关注很少. 为此,本文拟通过矿物学、岩石学和地球化学等展 开综合研究,着重剖析莺歌海盆地乐东区中新统储 层碳酸盐胶结物的分布规律、成因机理及其对储层 质量的影响等,结果可为预测研究区优质储层分布 提供重要的参考.

1 区域地质背景

莺歌海盆地处南海北部大陆架边缘的西北部, 位于海南岛和中南半岛之间,其形成于新生代,平 均地温梯度高达4.5℃/100 m,是典型的高温盆地; 盆地内热流体活动非常普遍,沉积厚度达17 km左





Fig.1 Structure background and study area of Yinggehai Basin

右,其天然气资源十分丰富,是国内天然气的重点 探区之一(祖家琪,1994:张功成等,2014),该盆地由 河内凹陷、临高凸起、莺歌海凹陷、莺东斜坡、莺西 斜坡等五大构造单元构成,其中莺歌海凹陷为已证 实的有效勘探区,进一步可细分为中央底辟带和凹 陷斜坡带两大勘探区带(图1).莺歌海盆地整体上 经历了古近纪裂陷阶段、新近纪早期的裂后热沉降 阶段和新近纪中晚期裂后晚期的加速沉降阶段(郭 令智等,2001:朱光辉,2004),从始新世开始,从下 至上依次发育岭头组(E₂l),渐新世崖城组(E₃l)和 陵水组(E₃l),中新世三亚组(三亚组二段N₁s₂、三亚 组一段 N_{s_1} 、梅山组(梅山组二段 N_1m_2 、梅山组一段 N_1m_1)和黄流组(黄流组二段 N_1h_2 、黄流组一段 N_1h_1) 以及上新世莺歌海组及第四纪乐东组地层,其中黄 流组和梅山组为主要勘探目的层.中新统时期,莺 歌海盆地从斜坡到凹陷中心,主要发育三角洲、滨 浅海、重力流水道以及海底扇等沉积体,其物源主 要来自于海南岛.按照勘探区块,该盆地平面上可 划分为东方区、乐东区和昌南区等;乐东区主要分 布于莺歌海凹陷,其浅层的莺歌海组和乐东组已钻 遇 D2、D5两个气田,中深层的三亚组、梅山组和黄 流组也钻遇L1、D1、D3和D8等多个含气构造.

2 碳酸盐胶结物分布特征

研究区储层岩石类型以长石岩屑砂岩和岩屑 石英砂岩为主,其中,单晶石英含量平均为47.4%, 岩屑含量平均为18.0%,长石含量平均为9.1%.长 石骨架碎屑以钾长石为主,其次为斜长石;岩屑主 要为多晶石英(平均为10%),其次为变质岩岩屑和 花岗岩岩屑.砂岩的粒度以中、细粒为主,部分粗 粒,分选差一中/中一差为主,填隙物主要为碳酸盐 胶结物(平均含量为10.1%).

不同层位、区带岩(壁)心分析表明(表1),乐东 区中新统储层碳酸盐胶结主要包括菱铁矿、(铁)方 解石和(铁)白云石;菱铁矿含量较少,主要分布在 斜坡带(T3-1)和凹陷中心(D8-7);方解石局部含量 较高,主要分布在斜坡带(T4-1),次为凹陷中心 (D2-7);白云石含量整体较少,局部富集在凹陷斜 坡带(D2-1),次为凹陷中心(D2-7);铁方解石含量 整体较高,主要分布斜坡带和凹陷斜坡带;铁白云 石含量也整体较少,主要分布在凹陷斜坡带(D1-6) 和凹陷中心(D8-7).总的来看,从斜坡带往凹陷中 心、碳酸盐胶结物总含量呈逐渐降低的趋势.黄流

Table 1 Contents statistics of carbonate cements in Ledong area of Yinggehai Basin									
层位	井号	深度(m)	平均含量(%)						₩ 日 労 ¥b (太)
			菱铁矿	方解石	白云石	铁方解石	铁白云石	恢酸益总里(70)	件吅芯奴(干)
	Т3-1	3 238~3 320	2.0	5.6	0.2	4.0	0.0	11.8	15
	T4-1	$1\ 950{\sim}2\ 100$	0.0	18.4	0.0	1.4	0.0	19.8	13
N_1h_1	D2-1	3 710~3 790	0.1	0.0	0.0	4.0	0.0	4.1	12
	D2-7	3 720~3 910	1.1	3.5	4.3	0.0	0.0	8.9	13
	D8-7	3 700~3 900	4.4	0.0	0.0	0.0	1.1	5.5	15
	Т3-1	3 330~3 600	1.4	1.0	3.9	2.4	0.2	8.9	48
	T4-1	3 580~3 600	0.0	32.0	0.0	0.0	0.0	32.0	3
	L1-1	3 400~3 550	0.8	0.0	0.0	15.9	0.6	17.3	10
N_1h_2	D2-1	3 850~3 900	0.0	0.0	0.0	7.4	0.1	7.5	34
	D1-6	4 100~4 300	0.2	0.0	0.0	5.9	1.3	7.4	35
	D1-13	4 000~4 300	0.0	0.1	0.6	7.6	0.3	8.6	90
	D2-7	$4\ 000{\sim}4\ 050$	1.3	1.5	1.8	0.0	0.0	4.6	3
N_1m_1	D2-1	4 050~4 200	0.3	0.0	1.4	8.6	0.3	10.6	41

表1 莺歌海盆地乐东区碳酸盐胶结物含量统计

组一段在斜坡带其含量为11.8%~19.8%,凹陷斜坡带为4.1%,凹陷中心为5.5%~8.9%;黄流组二段在斜坡带其含量为8.9%~32.0%,凹陷斜坡带为7.4%~7.5%,凹陷中心为4.6%~8.6%.

根据胶结物的产状及碎屑颗粒的接触关系可 将研究区碳酸盐胶结划分为早、中、晚3期.早期碳 酸盐以(铁)方解石为主(图 2a, 2b),经染色呈 粉红一浅紫色,充填孔隙并交代矿物边缘,呈基底 式胶结,砂岩碎屑颗粒呈悬浮状,推测其是在成岩 较早期的弱压实阶段经饱和碱性海水析出而形成 的产物,含量普遍较高,主要分布在斜坡区;中期碳 酸盐胶结物主要为铁方解石和白云石(图2c,2d, 2e),铁方解石经染色呈紫色-深紫色,白云石不染 色,主要呈孔隙充填式胶结,部分颗粒呈线接触,推 测其形成在成岩中晚期,与深部热流体有关,D-1构 造局部铁方解石属于此类型.晚期碳酸盐主要为铁 白云石(图2f),经染色呈浅蓝色,主要呈粉、细晶状 零星充填,碳酸盐颗粒间无压实现象,产出较分散, 总体含量低(普遍低于5%),在深层和凹陷中心较 发育,推测其形成在成岩中晚期,与深部热流体 有关.

3 碳酸盐胶结物碳氧同位素特征与 成因分析

对莺歌海盆地乐东区中新统储层的碳酸盐胶 结物进行碳、氧同位素分析.首先,选取含有碳酸盐 胶结物的全岩样品,并将样品粉碎至小于100目的 粉末,取适量放入试管中,加入过量的100%的磷 酸,在真空玻璃系统中抽去试管内的空气,再将磷 酸与样品混合,放入95℃的水浴锅中充分反应24 h,收集试管内的CO2气体.然后,利用德国Finnigan 公司生产的最新型稳定同位素比值质谱仪—— MAT 253进行同位素分析,所测同位素比值以 PDB标准的千分率偏差给出,氧碳同位素分析精 度为0.03%;测试在成都理工大学油气藏地质及开 发工程国家重点实验室完成.最后,统计薄片中碳 酸盐胶结物的含量,以此揭示其碳氧同位素的特征.

研究区碳、氧同位素组成列于表 2. 从表 2 来看, 样品中碳酸盐胶结物 δ¹³C 值分布范围为-4.78‰~ 1.03‰, 平均为-1.20‰; δ¹⁸O 值分布范围为 -10.99‰~-6.34‰,平均为-8.70‰.

相关研究表明,碳酸盐胶结物形成时的环境和 温度可由其氧、碳稳定同位素(δ¹⁸O和δ¹³C)组成特 征反映(孙国强等,2014.).碳酸盐胶结物的δ¹³C值 与其C来源有关,受有机碳影响则偏负值,与无机碳 有关则偏正值(蔡观强等,2009);碳酸盐胶结物的 δ¹⁸O值与其形成温度有关,温度高则偏负值,反之偏 正值.因此,从乐东区碳酸盐胶结物中碳氧同位素 对比(图3)看出,凹陷斜坡区受无机C来源更明显, 且形成温度较斜坡区高(这与莺歌海盆地的现今地 温分布特征相吻合),碳酸盐胶结物含量更低.同 时,从碳酸盐胶结物碳、氧同位素成岩模板投点(图 4)可看出,本区碳酸盐胶结物主要为成岩碳酸盐,



图2 莺歌海盆地乐东区储层典型显微照片

Fig.2 Typical micrographs of reservoir rocks in Ledong area of Yinggehai Basin

a. L4-1 井, N₁h₂, 2 567.0 m, 极细砂岩, 方解石呈基底式胶结, 含量为 34.5%,, 壁心(-); b. D1-5 井, N₁h₂, 3 994.5 m, 不等粒砂岩, 方解石 呈基底式胶结, 含量为 29%, 壁心(-); c. D2-1 井, N₁h₂, 3 895.0 m, 中砂岩, 铁方解石充填于粒间, 含量约为 11%, 壁心(-); d. D1-13 井, N₁h₂, 4 070.0 m, 中一粗砂岩, 铁方解石充填于粒间, 含量为 2%, 粒间孔发育, Φ =11.9%, K=25.3 mD, 壁心(-); e. D1-13 井, N₁h₂, 4 252.9 m, 中一粗砂岩, 溶蚀发育, 铁方解石 2%, 白云石 16%, Φ =14.5%, K=33.7 mD, 壁心(-); f. D1-6 井, N₁h₂, 4 310.5 m, 中一粗砂 岩, 溶蚀发育, 铁白云石 3%, Φ =12.2%, K=8.1 mD, 壁心(-)

井名岩性 $\delta^{13}C_{PDB}(\%)$ $\delta^{18}O_{PDB}(\%)$ $\delta^{18}O_{RE}(\%)$ $t^{\circ}C$)ZT3-1含钙质砂岩 $-3.84 \sim -3.55$ $-8.61 \sim -8.23$ $-1.11 \sim -0.73$ $19.06 \sim 20.73$ $115.21 \sim 115.74$ (-3.70) (-8.44) (-0.94) (20.00) (115.52) $1.1-1$ $\kappa \beta$ $-4.78 \sim -0.79$ $-9.52 \sim -6.34$ $-2.02 \sim 1.16$ $11.36 \sim 24.90$ $114.35 \sim 120.93$ $1.1-1$ $\kappa \beta$ $-0.94 \sim 0.21$ $-8.65 \sim -7.71$ $-1.15 \sim -0.21$ $16.86 \sim 20.92$ $121.54 \sim 123.42$ $0.3-1$ $\kappa \beta \delta \delta \delta \beta \delta $							
T3-1含钙质砂岩 $-3.84 \sim -3.55$ $-8.61 \sim -8.23$ $-1.11 \sim -0.73$ $19.06 \sim 20.73$ $115.21 \sim 115.74$ (-3.70) (-8.44) (-0.94) (20.00) (115.52) $11-1$ $\kappa \beta$ $-4.78 \sim -0.79$ $-9.52 \sim -6.34$ $-2.02 \sim 1.16$ $11.36 \sim 24.90$ $114.35 \sim 120.93$ (-2.79) (-7.83) (-0.43) (18.13) (117.64) $D3-1$ $\kappa \delta \delta$	井名	岩性	$\delta^{13}C_{\rm PDB}(\%_0)$	$\delta^{18}O_{PDB}(\%_0)$	$\delta^{18}O_{ {\rm \hbox{\rm Kee}}}(\%_0)$	<i>t</i> (°C)	Ζ
1.3-1宮姆顶砂岩 (-3.70) (-8.44) (-0.94) (20.00) (115.52) L1-1灰岩 $-4.78 \sim -0.79$ $-9.52 \sim -6.34$ $-2.02 \sim 1.16$ $11.36 \sim 24.90$ $114.35 \sim 120.93$ L1-1灰岩 (-2.79) (-7.83) (-0.43) (18.13) (117.64) D3-1灰质粉砂岩 $-0.94 \sim 0.21$ $-8.65 \sim -7.71$ $-1.15 \sim -0.21$ $16.86 \sim 20.92$ $121.54 \sim 123.42$ D3-1灰质粉砂岩 (-0.37) (-8.18) (-0.70) (18.89) (122.48) D2-1含钙质砂岩 $-3.06 \sim 1.03$ $-10.99 \sim -7.62$ $-3.49 \sim -0.12$ $16.47 \sim 32.02$ $117.23 \sim 125.15$ D1-1含钙质砂岩 (-0.34) (-9.56) (-2.06) (25.24) (121.85) D1-1含钙质砂岩 $-0.55 \sim 0.50$ $-8.85 \sim -7.28$ $-1.35 \sim 0.22$ $15.10 \sim 21.83$ $121.77 \sim 124.41$ D1-6林岩 -0.87 -9.02 -1.52 22.50 121.03	T3-1	令征氏孙山	$-3.84 \sim -3.55$	$-8.61 \sim -8.23$	$-1.11 \sim -0.73$	$19.06 \sim 20.73$	$115.21 {\sim} 115.74$
L1-1灰岩 $-4.78 \sim -0.79$ (-2.79) $-9.52 \sim -6.34$ (-2.783) $-2.02 \sim 1.16$ $11.36 \sim 24.90$ $114.35 \sim 120.93$ (117.64)D3-1灰质粉砂岩 $-0.94 \sim 0.21$ (-0.37) $-8.65 \sim -7.71$ (-8.18) $-1.15 \sim -0.21$ $16.86 \sim 20.92$ $121.54 \sim 123.42$ (122.48)D2-1含钙质砂岩 $-3.06 \sim 1.03$ (-0.34) $-10.99 \sim -7.62$ (-9.56) $-3.49 \sim -0.12$ $16.47 \sim 32.02$ $117.23 \sim 125.15$ (121.85)D1-1含钙质砂岩 $-0.55 \sim 0.50$ (-0.33) $-8.85 \sim -7.28$ (-8.00) $-1.35 \sim 0.22$ $15.10 \sim 21.83$ $121.77 \sim 124.41$ (123.26)D1-6松岩 -0.87 (-0.87) -9.02 (-8.00) -1.52 22.50 121.03			(-3.70)	(-8.44)	(-0.94)	(20.00)	(115.52)
L1-1灰石 (-2.79) (-7.83) (-0.43) (18.13) (117.64) D3-1灰质粉砂岩 $-0.94 \sim 0.21$ $-8.65 \sim -7.71$ $-1.15 \sim -0.21$ $16.86 \sim 20.92$ $121.54 \sim 123.42$ D2-1含钙质砂岩 (-0.37) (-8.18) (-0.70) (18.89) (122.48) D2-1含钙质砂岩 $-3.06 \sim 1.03$ $-10.99 \sim -7.62$ $-3.49 \sim -0.12$ $16.47 \sim 32.02$ $117.23 \sim 125.15$ D1-1含钙质砂岩 (-0.34) (-9.56) (-2.06) (25.24) (121.85) D1-1含钙质砂岩 $-0.55 \sim 0.50$ $-8.85 \sim -7.28$ $-1.35 \sim 0.22$ $15.10 \sim 21.83$ $121.77 \sim 124.41$ D1-6砂岩 -0.87 -9.02 -1.52 22.50 121.03	L1-1	灰岩	$-4.78 \sim -0.79$	$-9.52 \sim -6.34$	$-2.02{\sim}1.16$	$11.36 \sim 24.90$	$114.35 \sim 120.93$
D3-1 灰质粉砂岩 $-0.94\sim0.21$ $-8.65\sim-7.71$ $-1.15\sim-0.21$ $16.86\sim20.92$ $121.54\sim123.42$ (-0.37) (-8.18) (-0.70) (18.89) (122.48) D2-1 含钙质砂岩 $-3.06\sim1.03$ $-10.99\sim-7.62$ $-3.49\sim-0.12$ $16.47\sim32.02$ $117.23\sim125.15$ (-0.34) (-9.56) (-2.06) (25.24) (121.85) D1-1含钙质砂岩 $-0.55\sim0.50$ $-8.85\sim-7.28$ $-1.35\sim0.22$ $15.10\sim21.83$ $121.77\sim124.41$ (-0.03) (-8.00) (-0.50) (18.13) (123.26) D1-6松岩 -0.87 -9.02 -1.52 22.50 121.03			(-2.79)	(-7.83)	(-0.43)	(18.13)	(117.64)
D3-1 灰质粉砂岩 (-0.37) (-8.18) (-0.70) (18.89) (122.48) D2-1 含钙质砂岩 $-3.06\sim1.03$ $-10.99\sim-7.62$ $-3.49\sim-0.12$ $16.47\sim32.02$ $117.23\sim125.15$ (-0.34) (-9.56) (-2.06) (25.24) (121.85) D1-1含钙质砂岩 $-0.55\sim0.50$ $-8.85\sim-7.28$ $-1.35\sim0.22$ $15.10\sim21.83$ $121.77\sim124.41$ (-0.03) (-8.00) (-0.50) (18.13) (123.26) D1-6松岩 -0.87 -9.02 -1.52 22.50 121.03	D3-1 🤅	左氏 奶 动 山	$-0.94{\sim}0.21$	$-8.65 \sim -7.71$	$-1.15 \sim -0.21$	$16.86 \sim 20.92$	$121.54{\sim}123.42$
D2-1 含钙质砂岩 $-3.06\sim1.03$ $-10.99\sim-7.62$ $-3.49\sim-0.12$ $16.47\sim32.02$ $117.23\sim125.15$ (-0.34) (-9.56) (-2.06) (25.24) (121.85) D1-1 含钙质砂岩 $-0.55\sim0.50$ $-8.85\sim-7.28$ $-1.35\sim0.22$ $15.10\sim21.83$ $121.77\sim124.41$ (-0.03) (-8.00) (-0.50) (18.13) (123.26) D1-6m.2 -0.87 -9.02 -1.52 22.50 121.03		灰灰初砂石	(-0.37)	(-8.18)	(-0.70)	(18.89)	(122.48)
D2-1 含钙质砂岩 (-0.34) (-9.56) (-2.06) (25.24) (121.85) D1-1 含钙质砂岩 $-0.55\sim0.50$ $-8.85\sim-7.28$ $-1.35\sim0.22$ $15.10\sim21.83$ $121.77\sim124.41$ (-0.03) (-8.00) (-0.50) (18.13) (123.26) D1-6軟岩 -0.87 -9.02 -1.52 22.50 121.03	D2-1 f	冬年氏动力	$-3.06{\sim}1.03$	$-10.99{\sim}-7.62$	$-3.49 {\sim} -0.12$	$16.47 {\sim} 32.02$	$117.23 \sim 125.15$
D1-1 含钙质砂岩 $-0.55\sim0.50$ $-8.85\sim-7.28$ $-1.35\sim0.22$ $15.10\sim21.83$ $121.77\sim124.41$ (-0.03) (-8.00) (-0.50) (18.13) (123.26) D1-6軟岩 -0.87 -9.02 -1.52 22.50 121.03		飞 钙灰砂石	(-0.34)	(-9.56)	(-2.06)	(25.24)	(121.85)
D1-6 m^2 (-0.03) (-8.00) (-0.50) (18.13) (123.26) D1-6 m^2 -0.87 -0.902 -1.52 22.50 121.03	D1-1	含钙质砂岩	$-0.55 \sim 0.50$	$-8.85 \sim -7.28$	$-1.35{\sim}0.22$	$15.10 \sim 21.83$	$121.77 {\sim} 124.41$
D1-6			(-0.03)	(-8.00)	(-0.50)	(18.13)	(123.26)
D10 收石 0.01 0.02 1.32 22.30 121.03	D1-6	砂岩	-0.87	-9.02	-1.52	22.50	121.03

表 2 莺歌海盆地乐东区碳氧同位素含量数据统计

Table 2 Average contents of different carbonate cements in Ledong area of Yinggehai Basin

其次为与有机酸脱羧作用和与生物气有关的碳酸 盐.综合分析认为成岩碳酸盐主要与碳酸盐岩或高 钙质砂岩母岩溶解再沉淀有关.海南岛西南部为碳 酸盐台地沉积,其可作为乐东区的物源,且莺东斜 坡梅山组地层中存在灰岩,其上部地层被抬升剥 蚀,地层中的灰岩经溶解后再沉淀,从而使得往斜 坡区方向储层受碳酸盐胶结作用影响程度增强.有 机酸脱羧作用往往伴随深部热流体活动,铁白云石 (轻碳部分)的碳源与深部热流体、烃源岩中有机酸 的脱羧作用有关.研究区深部热流体活动主要表现 在以下几个方面:(1)凹陷斜坡带在黄流期沉积前 密集发育近东西向的走滑破裂断层,其下部裂隙发 育,可沟通深部热流体向上运移;(2)本区包裹体均 一温度最高可达190℃;(3)在D2-1井黄流组一梅 山组地层中局部见有黄铁矿、金红石与方解石中的



Fig.3 Relationship between carbonate cement content and carbon and oxygen isotopes in Ledong area of Yinggehai Basin





Ca被Ba、Sr交代形成菱锶矿、毒重石等中一低温热 液矿物,且在D3-1井梅山组下部见黄铁矿与沥青共 生,上部见充填裂缝的重晶石等热液矿物,均说明 凹陷斜坡带等区域受热事件影响显著.

通过文献调研(张秀莲,1985; Kaufman and Knoll,1995; 罗顺社和汪凯明,2010),古盐度的计算 公式主要利用灰岩的氧、碳稳定同位素($\partial^{18}O_{PDB}$ 和 $\partial^{13}C_{PDB}$)值来进行(Keith and Weber, 1964),具体为:

 $Z=2.048(\delta^{13}C_{PDB}+50)+0.498(\delta^{18}O_{PDB}+50).(1)$

本文对古盐度标准值Z进行了计算(表2).研 究分析表明乐东区斜坡带Z值分布范围为114.35~ 120.93,平均小于120.00,形成于偏淡水环境;凹陷 斜坡带Z值分布范围为117.23~125.15,平均大于 120,形成于偏海水环境; 结合区带上碳酸盐胶结的分布与碳氧同位素 特征,可以认为本区碳酸盐胶结的形成与温度、盐 度有关,其分析于下文讨论.

由于本区高地温显著影响成岩作用,产生强烈的"年代效应"影响,致使样品中碳酸盐胶结物的 δ¹³C_{PDB}值和δ¹⁸O_{PDB}值因同位素交换而发生变化,从 而降低碳酸盐胶结物中的δ¹³C_{PDB}值和δ¹⁸O_{PDB}值指 示古温度的可靠性(Keith and Weber,1964;罗顺社 等,2015);因此,需要进行"年代效应"的校正.研究 区中新统碳酸盐胶结物δ¹⁸O_{PDB}平均值为-8.7‰,第 四纪海相石灰岩δ¹⁸ O_{PDB}平均值为-1.2‰,二者之 差为-7.5‰.我们用平均值δ¹⁸O = -7.5‰作为"年 代效应"的校正值(邵龙义,1994.),碳酸盐胶结物形 成时的古海水温度按如下公式进行计算(Craig, 1961):

 $t = 16.9 - 4.2(\delta^{\mathbb{B}}O_{c} - \delta^{\mathbb{B}}O_{w}) + 0.13(\delta^{\mathbb{B}}O_{c} - \delta^{\mathbb{B}}O_{w})^{2}, (2)$

 $\delta^{18}O_{c} - \delta^{18}O_{w} = \delta^{18}O_{CaCO3} - \delta^{18}O_{H2O} + 0.22. \quad (3)$

据此在实验室中采取以PDB为标准的碳酸盐 胶结物 δ¹⁸O 值(δ¹⁸O_{CaCO3})和以 SMOW 为标准的 δ¹⁸O 值(δ¹⁸O_{H20})计算温度时,需要对所测 δ¹⁸O_{CaCO3}进行校 正,并假定新近纪古大洋水的 δ¹⁸O 与现代大洋水的 δ¹⁸O 值相同,即取 δ¹⁸O_{H20}=0(罗顺社等,2015).因 此,本文在计算古海水温度时,实际用到的古温度 计算公式为:

 $t = 16.9 - 4.2(\delta^{18}O_{CaCO3\overline{KE}} + 0.22)$

$$+0.13(\delta^{18}O_{CaCO3\overline{KE}}+0.22)^2.$$
 (4)

对研究区中新统黄流组一梅山组碳酸盐胶结物进行碳、氧同位素分析,并计算出中新统黄流 组一梅山组碳酸盐胶结物形成时的古海水温度范

	Table 3	Test data of carbonate cement inclusion in Ledong area of Yinggehai Basin					
层位	井名	深度(m)	均一温度(℃)	冰点温度(℃)	盐度(%)	碳酸盐胶结物含量(%)	
N_1h_1	D2-1	3 762.50	146.90			12.00	
		3 892.32	150.70			20.00	
	D.2-1	3 873.80	161.65	-2.95	4.87	25.50	
$\mathrm{N}_1 h_2$	D2 1	3 906.00		-2.00	3.40	20.00	
		3 907.50	151.00	-4.35	6.94	16.00	
	ТЗ-1	3 484.29	145.30			12.00	
		4 117.50		-1.92	3.24	23.00	
		4 115.00		-4.34	6.91	8.00	
N	D.9-1	4 078.00		-2.95	4.87	11.00	
$1N_1m_1$	D2 1	4 068.30		-2.75	4.49	18.00	
		4 117.50	150.00	-1.92	3.24	23.00	
		4 161.50	156.00	-2.90	4.79	25.00	





Fig.5 Relationship between carbonate cement content and paleo-salt and paleotemperature in Ledong area of Yinggehai Basin

围为11.36~32.02 ℃(表2),与现今南海海水表层水 温(16~28 ℃)相似.

综上可知,研究区碳酸盐胶结物的形成主要受 控于水介质盐度和温度,由斜坡往凹陷斜坡区¹³C 偏重,¹⁸O偏负,斜坡区碳酸盐胶结形成偏淡水环境, 凹陷斜坡区碳酸盐胶结物形成于偏海水环境;因 此,在古构造低部位,水介质温度越低、盐度越高, 碳酸盐胶结(铁方解石)越弱.

通过建立黄流组一梅山组碳酸盐胶结物含量 与温度(古海水温度、碳酸盐成岩温度)、包裹体盐 度的关系模型(表3、图5),定量计算碳酸盐胶结物 的含量.计算结果表明,当古水介质温度约20℃附 近,古盐度在5.5%时,其含量约为15%;当古水介 质温度约15℃,古盐度在8%时,其含量约为10%.

4 碳酸盐胶结物对储层的影响

大多数学者认为碳酸盐胶结物对储层质量具 有明显的负面作用(Kantorowicz et al., 1987;徐北煤 和卢冰, 1994; Carlos et al., 2001; 胡宗全, 2003; 张

敏强等,2007;刘春燕等,2012),因为胶结物占据储 层孔隙空间,降低储层物性,这也得到了研究区碳 酸盐胶结物含量与孔隙度、渗透率基本呈负相关关 系的证实(图6),当碳酸盐胶结物含量(铁方解石) 大于10%时,渗透率小于0.1×10⁻³ µm². 而部分学 者则认为碳酸盐胶结物对储层质量的影响是双重 性的,一方面占据孔隙空间,减少孔隙,另一方面一 定程度抑制压实作用,保护孔隙(王岚等,2011;李 继岩等,2013).在早成岩阶段,碳酸盐胶结可一定程 度上增加砂岩对压实的抵抗能力,保存部分原生粒 间孔;进入中成岩阶段A期后,随着有机酸和二氧 化碳等酸性流体进入砂岩溶解早期沉淀的碳酸盐 胶结物,使原生粒间孔得以复活,并形成次生孔隙 (蒋恕和蔡东升,2007;张敏强等,2007;邹明亮和黄 思静,2008;孙宁亮等,2017;李弛等,2019).但仔细 观测可发现,当碳酸盐胶结物含量大于10%时,局 部高碳酸盐胶结物含量(约20%)还对应着较高的 物性,特别是渗透率.这说明对于储层孔隙演化来 说,碳酸盐胶结物的形成并非简单的减少孔隙,不 同成因、不同期次的碳酸盐胶结物对储层的影响作



Fig.6 Relationship between reservoir physical property and carbonate cement content in Ledong area of Yinggehai Basin

用是不相同的(魏巍等,2007).研究区早期(铁)方解 石形成后充填储层孔隙,使储层致密(图2a,2b),晚 期当携带有机酸和CO2的高温热流体进入储层,使 得大量长石、早期碳酸盐矿物溶解,形成"热液"型 次生溶蚀孔隙,并沉淀(铁)白云石,晚期铁白云石 局部充填于粒间孔,对储层物性影响较小.热流体 对碳酸盐胶结物的溶解机理推测为:研究区凹陷斜 坡带底辟断裂开启时,深部富CO。流体进入储层,导 致碳酸盐矿物溶解;通道闭合时,高温使碳酸盐矿 物沉淀.就本次工作来看,通过碳酸盐胶结物在孔 隙空间中的赋存状态及形成期次分析等认为低含 量的早期(铁)方解石以及由高温热流体导致高含 量早期(铁)方解溶解产生的低或高含量的晚期 (铁)白云石区均可发育中渗"甜点"储层(图 2d,2e, 2f).因此,不能一概而论碳酸盐胶结物与储层物性 的关系,需要先弄清其成因和形成期次,然后分析 对储层质量的影响,进而恢复储层孔隙演化史,从 而达到预测有利储层分布的目的.

5 结论

(1)莺歌海盆地乐东区碳酸盐胶结物主要有菱铁矿、(铁)方解石和(铁)白云石等,从斜坡带往凹陷中心黄流组碳酸盐胶结物总量由18.0%降至5.0%.

(2)莺歌海盆地乐东区碳酸盐胶结物碳同位素 值分布范围为-4.78‰~+1.03‰,氧同位素值分 布范围为-10.99‰~-6.34‰,古盐度Z值分布范 围为111.27~123.59,古海水温度分布范围为 11.36~32.02 ℃,古盐度分布范围为 3.24%~ 6.91%,斜坡带形成于偏淡水环境,凹陷斜坡带形成 于偏海水环境.

(3)莺歌海盆地乐东区碳酸盐胶结物主要来源

于成岩碳酸盐岩,其形成主要与碳酸盐岩或高钙质 砂岩母岩的溶解再沉淀有关,其受控于古海水温 度、成岩温度与盐度;由斜坡带往凹陷中心,古海水 温度降低、盐度增高,碳酸盐胶结变弱.

(3)莺歌海盆地乐东区碳酸盐胶结物对储层质 量具有明显的负相关性,当碳酸盐胶结物含量大于 10%时,储层物性迅速降低;但低含量的早期(铁) 方解石以及由高温热流体溶解高含量早期(铁)方 解产生的低或高含量的晚期(铁)白云石区均可发 育中渗"甜点"储层.

References

- Cai, G.Q., Guo, F., Liu, X.T., et al., 2009. Carbon and Oxygen Isotope Characteristics and Palaeoenvironmental Implications of Lacustrine Carbonate Rocks from the Shahejie Formation in the Dongying Sag. *Earth and Environment*, 37(4):347-354(in Chinese with English abstract).
- Carlos, R., Rafaela, M., 2001. Facies-Related Diagenesis and Multiphase Siderite Cementation and Dissolution in the Reservoir Sandstones of the Khatatba Formation, Egypt's Western Desert. SEPM Journal of Sedimentary Research, 71(3): 459 – 472. https://doi.org/10.1306/ d4268d38-2b26-11d7-8648000102c1865d
- Craig, H., 1961. Standard for Reporting Concentrations of Deuterium and Oxygen-18 in Natural Waters. Science, 133(3467): 1833 – 1834. https://doi.org/10.1126/science.133.3467.1833
- Guo, J., Zeng, J.H., Song, G.Q., et al., 2014. Characteristics and Origin of Carbonate Cements of Shahejie Formation of Central Uplift Belt in Dongying Depression. *Earth Science*, 38(5):565-576(in Chinese with English abstract).
- Guo, L.Z., Zhong, Z.H., Wang, L.S., et al., 2001. Regional

Tectonic Evolution Around Yinggehai Basin of South China Sea. *Geological Journal of China Universities*, 7 (1):1-12(in Chinese with English abstract).

- Hu, Z.Q., 2003. Calcite Cements in Upper Palaeozoic Sand Reservoir of Ordos Basin. Acta Pet. Sinica, 23(4):40-43 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, N., Cai, D.S., 2007. Diagenesis of Liaozhong Sag in Liaohe Depression and Pore Evolution in Its Middle – Deep Strata. *Oil & Gas Geology*, 28(3):362-369(in Chinese with English abstract).
- Kantorowicz, J. D., Bryant, I. D., Dawans, J. M., 1987. Controls on the Geometry and Distribution of Carbonate Cements in Jurassic Sandstones: Bridport Sands, Southern England and Viking Group, Troll Field, Norway. *Geological Society, London, Special Publications*, 36(1): 103 – 118. https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1987.036.01.09
- Kaufman, A., Knoll, A., 1995. Neoproterozoic Variations in the C-Isotopic Composition of Seawater: Stratigraphic and Biogeochemical Implications. *Precambrian Research*, 73(1/2/3/4): 27 – 49. https://doi.org/10.1016/ 0301-9268(94)00070-8
- Keith, M. L., Weber, J. N., 1964. Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Selected Limestones and Fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10/11): 1787 – 1816. https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90022-5
- Li, C., Luo, J.L., Hu, H.Y., et al., 2019. Thermodynamic Impact on Deepwater Sandstone Diagenetic Evolution of Zhuhai Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 41(2): 572 – 587(in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Song, G.Q., Gao, Y.J., et al., 2013. Recovery of the Palaeosedementary in Eocene Red Formations and Its Geological Significances for Dongying Sag. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 32(2): 43-48(in Chinese with English abstract).
- Liu, C. Y., Zheng, H. R., Hu, Z. Q., et al., 2012. Characteristics of Carbonate Cementation in Clastic Rocks from the Chang 6 Sandbody of Yanchang Formation, Southern Ordos Basin. Science China Earth Sciences, 55(1): 58-66(in Chinese with English abstract).
- Luo, S. S., Lv, Q. Q., Xi, M. L., et al., 2015. Types, Carbon/Oxygen Isotope Characteristics and Depositional Environments of the Lower Ordovician Centuries in Jiuxi and Yuanguping of North Hunan Province, China. *Oil & Gas Geology*, 36(5): 745 – 755(in Chinese with English abstract).
- Luo, S.S., Wang, K.M., 2010. Carbon and Oxygen Isotope Composition of Carbonate Rock from the Mesoprotero-

zoic Gaoyuzhuang, in the Kuancheng Area, Hebei Province. *Acta Geologica Sinica*, 84(4):492-499(in Chinese with English abstract).

- Shao, L.Y., 1994. The Relation of the Oxygen and Carbon Isotope in the Carbonate Rocks to the Paleotemperature Et. *Journal of China University of Mining & Tecchnology*, 23(1):39-45(in Chinese with English abstract).
- Sun, G.Q., Wang, H.F., Zou, K.Z., et al., 2014. Characteristics and Significance of Carbon and Oxygen Isotopic Compositions of Carbonate Cements in Jiulongshan Region, North Edge of Qaidam Basin. *Natural Gas Geosci*ence, 25(9): 1358 – 1365(in Chinese with English abstract).
- Sun, N.L., Zhong, J.H., Liu, S.G., et al., 2017. Diagenesis and Physical Property Evolution of Gravity Flow Tight Reservoir of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin. *Earth Science*, 42(10):1802 – 1816(in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Zou, C.N., Lin, T., et al., 2011. Sedimentary Environment and Diagenesis Facies of Chang 6 Yanchang Formation in Baibao-Huachi, Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 22(5):796-806(in Chinese with English abstract).
- Wei, W., Zhu, X.M., Guo, D.B., et al., 2007. Carbonate Cements in Lower Cretaceous Bayingebi Sandstone Reservoirs in Chagan Sag, Yin-E Basin: Formation Phases and Formation Mechanisms. *Geochimica*, 44(6): 590 – 599 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B.M., Lu, B., 1994. The Study of Diagenetic Carbonate in Siliciclasti Crock and Its Control on the Reservoir. Acta Sedimentol Sinica, 12(3): 56 - 66 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., He, S., Wang, F. R., et al., 2009. Carbonate Cementation - Dissolution in Deep - Seated Sandstones near the Overpressure Top in Central Junggar Basin, Xinjiang, NW China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 28(1): 86-96. https://doi.org/10.1007/s11631-009-0086-x
- Yang, Z., Zou, C. N., He, S., et al., 2010. Formation Mechanism of Carbonate Cemented Zones Adjacent to the Top Overpressured Surface in the Central Junggar Basin, NW China. Science China Earth Sciences, 53(4): 529-540. https://doi.org/10.1007/s11430-010-0037-8
- Zhang, G.C., Chen, G.J., Zhang, H.H., et al., 2014. Regular Distribution of Inside-Oil Fields and Outside-Gas Fields Controlled by Source Rocks and Heat in China Offshore Basins. Acta Sedimentol Sinica, 19(5):1-22(in Chinese with English abstract).
- Zhang, M.Q., Huang, S.J., Wu, Z.X., et al., 2007. Carbonate Cements and Their Formation Mechanism in Palaeo-

gene Sandstones of Lishui Sag, East China Sea Basin. *Chengdu Univ. Tech. (Sci. Tech. Ed.*), 34(3):259-266 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, X.L., 1985. Relatinship between Carbon and Oxygen Stable Isotopein Carbonate Rocks and Paleosalinity and Paleotemperature of Seawater. Acta Sedimentologica Sinica, 3(4):17-29(in Chinese with English abstract).
- Zhu, G.H., 2004. Gas Accumulation Mechanism and Exploration Potential in Yinggehai Basin. *China offshore Oil*, 16 (3):145-150(in Chinese with English abstract).
- Zou, M.L., Huang, S.J., 2008. The Origin of Carbonate Cements and the Influence on Reservoir Quality of Pinghu Formation in Xihu Sag, East China Sea. *Lithologic Reservoirs*, 20(1):47-52(in Chinese with English abstract).
- Zu, J.Q., 1994. Natural Gas Explorative Prospects in Yinggehai Basin of Nanhai. *Natural Gas Industry*, 14(2):14-20 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡观强,郭锋,刘显太,等,2009.东营凹陷沙河街组沉积岩碳氧 同位素组成的古环境记录.地球与环境,37(4);347-354.
- 郭佳,曾溅辉,宋国奇,等,2014.东营凹陷中央隆起带沙河街 组碳酸盐胶结物发育特征及其形成机制.地球科学,39 (5):565-576.
- 郭令智,钟志洪,王良书,等,2001.莺歌海盆地周边区域构造 演化.高校地质学报,7(1):1-12.
- 胡宗全,2003.鄂尔多斯盆地上古生界砂岩储层方解石胶结 物特征.石油学报,23(4):40-43.
- 蒋恕,蔡东升,2007.辽河坳陷辽中凹陷成岩作用与中深层孔 隙演化.石油与天然气地质,28(3):362-369.
- 李弛,罗静兰,胡海燕,等,2019.热动力条件对白云凹陷深水 区珠海组砂岩成岩演化过程的影响.地球科学,41(2): 572-587.
- 李继岩,宋国奇,高永进,等,2013.东营凹陷始新统红层古沉 积环境恢复及其地质意义.大庆石油地质与开发,32 (2):43-48.
- 刘春燕,郑和荣,胡宗全,等,2012.碎屑岩中的碳酸盐胶结特

征:以鄂尔多斯盆地南部富县地区延长组长。砂体为例. 中国科学D辑:地球科学,42(11):1681-1689.

- 罗顺社,吕奇奇,席明利,等,2015.湘北九溪、沅古坪下奥陶 统等深岩类型、碳氧同位素特征及沉积环境.石油与天 然气地质,36(5):745-755.
- 罗顺社,汪凯明,2010.河北宽城地区中元古代高于庄组碳酸 盐岩碳氧同位素特征.地质学报,84(4):492-499.
- 邵龙义,1994.碳酸盐岩氧、碳同位素与古温度等的关系.中 国矿业大学学报,23(1):39-45.
- 孙国强,王海峰,邹开真,等,2014.柴北缘九龙山地区侏罗系 砂岩中碳酸盐胶结物特征及意义.天然气地球科学,25 (9):1358-1365.
- 孙宁亮,钟建华,刘绍光,等,2017.鄂尔多斯盆地南部延长组 重力流致密储层成岩作用及物性演化.地球科学,42 (10):1802-1816.
- 王岚,邹才能,林潼,等,2011.鄂尔多斯盆地白豹一华池地区 延长组长。油层组沉积环境及成岩相分析.天然气地球 科学,22(5):796-806.
- 魏巍,朱筱敏,国殿斌,等,2007.查干凹陷下白垩统砂岩储层 碳酸盐胶结物成岩期次及形成机理.地球化学,44(6): 590-599.
- 徐北煤, 卢冰, 1994. 硅质碎屑岩中碳酸盐胶结物及其对储层 的控制作用的研究. 沉积学报, 12(3):56-66.
- 张功成,陈国俊,张厚和,等,2014."源热共控"中国近海盆地 油气田"内油外气"有序分布.沉积学报,19(5):1-22.
- 张敏强,黄思静,吴志轩,等,2007.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.成都理工大学学 报(自然科学版),34(3):259-266.
- 张秀莲,1985.碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水 温的关系.沉积学报,3(4):17-29.
- 朱光辉,2004.莺歌海盆地天然气成藏动力学机制及勘探前 景展望.中国海上油气,16(3):145-150.
- 邹明亮,黄思静,2008.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.岩性油气藏,20(1): 47-52.
- 祖家琪,1994.南海莺歌海盆地天然气勘探前景.天然气工 业,14(2):14-20.