珠江口盆地白云凹陷深层砂岩储层中碳酸 盐胶结作用及成因探讨

王代富^{1,3)},罗静兰¹⁾,陈淑慧²⁾,胡海燕⁴⁾,马永坤²⁾,李驰¹⁾,柳保军²⁾,陈亮²⁾

1) 西北大学大陆动力学国家重点实验室,西安,710069;

2) 中海石油(中国)有限公司深圳分公司研究院,广州,510240;

3) 页岩气评价与开采四川省重点实验室,成都,610091;4) 陕西国际商贸学院,陕西咸阳,712046

内容提要:通过各类薄片显微镜下鉴定与定量统计,阴极发光、扫描电镜、电子探针、碳、氧及锶同位素、流体包 裹体均一温度测试等分析,开展了白云凹陷深水区珠江组和珠海组砂岩储层中碳酸盐胶结物的类型与期次、地球 化学特征、成因机制研究。结果显示,存在三期碳酸盐胶结作用,早期主要为方解石,以高 Ca、低 Fe、低 Mg 为特 征。但珠江组早期碳酸盐胶结物的同位素组成(δ^{13} C_{PDB}:-2.43‰~0.29‰, δ^{18} O_{PDB}:-9.79‰~-3.08‰, 87 Sr/⁸⁶ Sr:0.7084~0.7109)与珠海组(δ^{13} C_{PDB}:-9.37‰~-8.13‰, δ^{18} O_{PDB}:-7.11‰~-7.09‰, 87 Sr/⁸⁶ Sr:0.7138~ 0.7142)有一定差异,前者是在浅埋藏阶段从碳酸盐过饱和碱性海水介质中沉淀出的产物;后者与碳酸盐过饱和的 碱性淡水有关。中期主要为铁方解石,以高 Ca、较高 Fe、低 Mg、碳和锶同位素组成变化范围较大(δ^{13} C_{PDB}: -20.88‰~-5.29‰, δ^{18} O_{PDB}:-11.1‰~-8.99‰, 87 Sr/⁸⁶ Sr:0.703~0.7151)为特征,其部分碳源与有机酸脱 羧作用产生的 CO₂有关,另一部分碳源(δ^{13} C_{PDB}:-5.38‰~-5.29‰)可能与深部物质有关。形成碳酸盐胶结物 所需的 Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺等离子来源于砂岩中长石等碎屑的溶蚀、黏土矿物的转化以及深部热液流体。晚期主要 为铁白云石(δ^{13} C_{PDB}:-2.83‰~-1.83‰, δ^{18} O_{PDB}:-9.45‰~-5.77‰, 87 Sr;0.7101~0.7162),以高 Fe、高 Mg、较低 Ca、碳同位素组成与同期海水基本一致为特征, 87 Sr/⁸⁶ Sr 值低于正常成岩演化形成的碳酸盐,该期碳酸盐 胶结物的形成与砂岩中生物碎屑以及先期碳酸盐胶结物的溶蚀再沉淀有关,部分可能受到深部热液流体的影响。

关键词:碳酸盐胶结物;类型与形成期次;成因机理;深水碎屑岩;白云凹陷;珠江口盆地

碳酸盐矿物是成岩作用过程中的重要产物,其 对储层物性有重要影响,一般以多期次沉淀、成因复 杂多样和分布普遍等为特点(Zhang Minqiang et al.,2007;Beavington-Penney et al.,2008;Brigaud et al.,2009)。碳酸盐胶结物形成机制的研究是目 前碎屑岩研究中的一个难点,前人通过碳酸盐胶结 物物质来源的研究认为,影响碳酸盐胶结物沉淀的 因素包括:长石、岩屑及碳酸盐岩屑等碎屑颗粒的溶 解(Wu Sujuan,2005,2006;Zhang Yingying,2012)、 黏土矿物的转化(Longstaff et al.,1981;Zhang Minqiang,2007;Yuan Zhen et al.,2011;Zhang Yingying,2012;Tan Xianfeng et al.,2015)、硅酸盐 矿物的水化作用(Xu Beimei et al.,1994;Zhang Yingying,2012)、有机酸的脱羧作用(Wang Qi et al.,2010;Yuan Zhen et al.,2011;Lan Yefang et al.,2016)、异常高压的影响等(Conybeare et al., 2000;Yang Zhi et al.,2010;Zhang Liqiang et al., 2011)。

白云凹陷深水区储层中碳酸盐胶结物比较发 育,包括方解石、铁方解石、白云石、铁白云石、菱铁 矿(罗静兰等,2015)[•]。前人对碳酸盐胶结物的形 成期次、成因等的研究较少,部分学者仅分析了珠海 组中碳酸盐胶结物的成因(Wang Qi et al.,2010)。 本文通过对白云凹陷深水区中新统珠江组、渐新统 珠海组储层砂岩中碳酸盐胶结物的类型与胶结期 次、赋存状态、地球化学特征、碳酸盐胶结物与其他 胶结物的关系等研究,结合构造与沉积背景,综合分 析砂岩储层中碳酸盐胶结物的物质来源及成因机 制。研究成果对深入理解碳酸盐胶结物的形成机 理,碳酸盐胶结物的分布及对储层质量的影响、预测

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41572128)和国家科技重大专项(编号 2016ZX05026003-005)资助成果。

收稿日期:2016-07-06;改回日期:2016-12-13;责任编辑:周健。

作者简介:王代富,男,1990年生。理学硕士,从事储层地质学研究。Email:wangdf126@163.com。通讯作者:罗静兰,女,1957年生。教授,从事碎屑岩储层沉积学与火山岩岩相学与储层地质学研究。Email:jlluo@nwu.edu.cn。

有利储集地带具有重要的理论意义与实际意义。

1 区域地质概况

白云凹陷隶属于珠江口盆地珠二坳陷,是珠江 口盆地内最大和最深的坳陷,整体呈 NEE 向展布 (图 1),水深 200~2600m,面积约 2.0×10⁴ km² (Lian Shiyong et al.,2007)。白云凹陷经历了新生 代断陷、热沉降坳陷及断块升降等构造演化阶段,相 应发育了陆相断陷湖盆沉积、大型断坳湖盆沉积、海 陆过渡相浅海三角洲沉积以及陆架陆坡海相深水沉 积(Liu Baojun et al.,2011)。渐新世珠海组沉积时 期处于盆地断一坳转换期,沉积了一套海陆过渡 相一浅海相地层;由于受 23.8 Ma 白云运动的影 响,中新世珠江组沉积时期陆架坡折带跃迁至白云 凹陷北坡,沉积环境转变为陆坡深水环境(Liu Baojun et al.,2011)。





2 样品与分析方法

测试样品采自白云凹陷珠江组、珠海组地层,主 要运用岩石薄片显微镜下观察与定量统计、阴极发 光、电子探针分析、流体包裹体均一温度测试、碳、氧 稳定同位素等方法。其中:

(1)电子探针元素分析。砂岩样品中碳酸盐胶 结物原位微区元素组成分析仪器为 JEOL JXA-8230电子探针显微分析仪,实验条件:加速电压为 15kV,电子束电流为10nA,电子束斑直径为2μm, 测试元素主要包括 Ca、Mg、Fe、Mn、Cr、Sr 等 12 种 元素,分析误差小于3%。 (2)包裹体均一温度测试。流体包裹体均一温 度测试在 Linkam-TH600 冷热台上进行,实验温度 为 20~25℃,湿度为 30%,测试精度为±1℃。

(3)碳酸盐矿物的碳、氧稳定同位素检测。首 先,开展薄片显微镜下碳酸盐胶结作用期次、各期次 碳酸盐矿物类型、产状、形成序列等研究,然后对各 期次、各类型碳酸盐矿物进行电子探针成分分析、碳 酸盐胶结物中单个流体包裹体进行均一温度与激光 拉曼电子探针成分分析,根据分析所得的矿物学、化 学成分、形成温度与流体性质等,进一步厘定和明确 各类型碳酸盐胶结物特征及其形成期次。在此前提 下,分别选择各期、各类碳酸盐矿物含量较高的砂岩 样品破碎至 60 目后,经分级过筛和分级淘洗(水、手 工淘沙盘),将得到的比重较大部分经过磁选分离得 到无磁部分,再运用电磁选和重液分选方法对其中 的各类碳酸盐矿物进行分离。所使用的重液包括三 溴甲烷(2.89 g/cm³)、二碘甲烷(3.32 g/cm³)、四溴 乙烷(2.97 g/cm3)及二甲基甲酰胺(2.67 g/cm3) 等。最后将上述处理完的样品在实体镜下手工提纯 到 98%以上待同位素分析。将提纯后的各碳酸盐 胶结物研磨成约 200 目的粉末,与 100%磷酸在 70℃下反应并收集释放的 CO₂,在 MAT253 气体同 位素质谱仪上进行测试,分析结果采用 PDB 标准, 碳同位素测试误差为 0.002‰~0.014‰,氧同位素 测试误差为 0.004‰~0.02‰。

(4) 锶同位素检测。取 150mg 碳酸盐样品在聚 四氟乙烯溶样器中依次加入 1.5mL 的 HNO₃、 1.5mL 的 HF、50μL 的 HClO₄后,在 160℃烘干后 分别加入 1.5mL 的 HNO₃和 HF,置于烘箱(190± 5℃)48小时,完成样品的溶解。然后将溶样蒸干, 再依次加 1.0mL HNO₃,蒸干,加 0.5mL HNO₃,蒸 干,加两次 0.5mL HCl,蒸干,再加入 2.0mL 1.7mol/L 的 HCL,加盖超声 2 h 后置于电热板上 (100℃)过夜,然后离心取上部清液,用 AG50W-X8 树脂柱进行 Rb-Sr-REE 分离,收集富含 Sr 的溶液 进行分离纯化,然后采用 Nu Plasma II 多接收等离 子质谱仪进行测试,整个分析过程在超净实验室完 成,实验采用国际标样 NBS987 进行质量监控, NBS987 的⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 同位素测定为 0.710248,全流 程本底空白<20pg。

碳、氧同位素分析在中国科学院油气资源研究 重点实验室(兰州)完成,本研究其他分析测试均在 西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。 3 碳酸盐胶结物类型及特征

3.1 碳酸盐胶结物的类型及成岩演化序列

通过大量砂岩薄片的显微镜下观察、扫描电镜 分析,结合电子探针主量元素分析、矿物的阴极发光 特征综合分析表明,研究区砂岩中碳酸盐胶结物表 现出多期次、多类型胶结的特征。可以分为三期碳 酸盐胶结,分别为早期的方解石、菱铁矿,中期的铁 方解石和晚期的铁白云石。

(1)早期碳酸盐胶结物:珠江组早期碳酸盐主要 为方解石(图 2a~c),含量较高(0%~32%,平均 1.1%),并部分形成钙质砂岩(碳酸盐胶结物含量> 15%),其次为菱铁矿。根据方解石产出状态可分为 三类:第一类主要呈泥晶或微晶方解石充填于粒间; 第二类主要以生物碎屑形式充填在碎屑颗粒之间 (图 2a);第三类主要以粒间连晶式胶结为主,碎屑 颗粒呈漂浮状(图 2a)。菱铁矿呈棕褐色晶粒状充 填碎屑颗粒之间,含量总体较低(0%~21.6%,平均 0.8%),仅发育在局部层段。珠海组早期碳酸盐主 要为方解石,呈微晶或泥晶充填碎屑颗粒之间,少量 呈生物碎屑产出。在阴极发光下早期碳酸盐呈亮橙 色(图 2d)。早期碳酸盐充填在原生粒间孔中,形成



图 2 白云凹陷各期碳酸盐胶结物的显微照片与电子探针元素分布图谱

Fig. 2 Microphotos and element spectrograms from the electric probe show characteristics of the

different phase carbonate cements in Baiyun sag

(a)一早期方解石及生物碎屑,PY301,珠江组,(一);(b)、(c)一分别为早期方解石扫描电镜及能谱特征,LH162,珠江组;(d)一碳酸盐的阴极 发光特征,PY301,珠江组,早期方解石(Cc)及生物碎屑(Fos)发亮橙黄色光,晚期铁白云石(Ank)不发光,高岭石(Kao)发深蓝色光,长石(F) 发蓝白色光;(e)一中期铁方解石,LW32,珠海组,(一);(f)、(g)一分别为中期铁方解石背散射及能谱特征,PY201,珠海组;(h)一中期碳酸盐 胶结物的阴极发光照片,PY201,珠海组。铁方解石(Fcal)发暗橙色光;(i)一铁白云石交代中期铁方解石,LH231,珠海组,(一);(j)、(k)一分 别为晚期铁方解石背散射及能谱特征,PY303,珠江组;(l)一碳酸盐阴极发光照片,PY303,珠江组,其中早期微晶方解石(Cc)发亮橙黄色光, 部分泥晶方解石(Rc)及长石(Rf)被铁方解石交代,发暗橙黄色

(a)—Earlyphase calcite and bioclastic, PY301, Zhujiang Group, (-); (b), (c)—SEM and energy spectrum of earlyphase calcite, LH162, Zhujiang Group; (d)—cathodoluminescence of carbonate cements, PY301, Zhujiang Group. Earlyphase calcite(Cc) and bioclastic (Fos) characterized by bright orange luminescence, the ankerite (Ank) characterized by non-luminescent, kaolinite (Kao) characterized by deep blue luminescence, the feldspar (F) characterized by blue and white luminescence; (e)—metaphase ferrocalcite, LW32, Zhuhai Group, (-); (f), (g)—microphoto of ferrocalcite's back scattering and energy spectrum, PY201, Zhuhai Group; (h)—cathodoluminescence of metaphase ferrocalcite, PY201, Zhuhai Group, the ferrocalcite characterized by dark yellow; (i)—ferrocalcite was replaced by ankerite, LH231, Zhuhai Group, (-); (j), (k)—microphoto of ankerite's back scattering and energy spectrum, PY303, Zhujiang Group; (l)—cathodoluminescence of carbonate cements, PY303, Zhujiang Group, the microcrystalline calcite (Cc) characterized by bright orange luminescence, part of mudcrystal calcite (Rc) and feldspar (Rf) was replaced by ferrocalcite, dark yellow luminescence

(2)中期碳酸盐胶结物:珠江组与珠海组砂岩中 的中期碳酸盐胶结物主要为铁方解石(图 2e~g), 含量变化较大(0%~35%,平均 0.8%),呈孔隙式 胶结,充填于碎屑颗粒之间及次生溶孔中(图 2e), 并常见交代长石、岩屑颗粒,部分交代石英颗粒。少 量铁方解石有溶蚀现象,该期碳酸盐在阴极发光下 呈暗橙色(图 2h、1),总体显示其形成时间较晚。

(3)晚期碳酸盐胶结物:晚期碳酸盐胶结物分布 于粒间孔隙中,主要为铁白云石(图 2i~k),多呈半 自形一自形粒状结构产出。铁白云石表面比较洁 净,在碳酸盐胶结砂岩中含量较高(0%~44%,平均 1.9%),局部层位发育少量白云石。该期碳酸盐可 见部分交代长石、石英及岩屑等碎屑颗粒以及先期 形成的碳酸盐胶结物(图 2i),部分铁白云石遭受后 期溶蚀,因此铁白云石的形成时间要晚于铁方解石, 并在之后发生部分溶蚀。该期碳酸盐在阴极发光下 不发光(图 2d)。

根据罗静兰等(2015)[●]的研究,研究区碳酸盐 胶结物与其他胶结物的成岩序列为:早期碳酸盐(方 解石、菱铁矿)→机械压实→溶蚀作用 I→次生孔隙 形成→高岭石→自生石英+石英次生加大→溶蚀作 用 II→高岭石→中期碳酸盐(铁方解石)→晚期碳酸 盐(铁白云石)→溶蚀作用 III(铁白云石的溶蚀)。

3.2 碳酸盐胶结物的形成温度

由于样品数量有限以及碳酸盐胶结物中包裹体 数量较少,本研究仅在中期碳酸盐胶结物的样品中 测得一个流体包裹体均一温度数据,为133.5℃,这 与前人的埋藏热史恢复模拟温度一致(罗静兰等, 2015)[•]。据罗静兰等(2015)[•]对研究区多口井的埋 藏一成岩—烃类充注演化过程研究结果,早期碳酸 盐胶结物(方解石)主要形成于同生成岩阶段—早成 岩阶段 A 期,其形成温度在 20~60℃;中期碳酸盐 胶结物(铁方解石)主要形成于中成岩阶段 A 期,其 形成温度在 80~140℃;晚期方碳酸盐胶结物(铁白 云石)主要形成于中成岩阶段 A 期的晚期,其形成 温度在 120~150℃。

3.3 碳酸盐胶结物的化学成分特征

电子探针显微分析(EPMA)是研究碳酸盐成 分、形貌的重要方法(Zhao Yanyan et al., 2013; Mansour et al., 2014; Shimura al., 2014)。根据电 子探针主量元素分析结果可以得到碳酸盐中 CaCO₃、MgCO₃、FeCO₃、MnCO₃的百分含量,以及 Ca/Fe、Ca/Mg的值,从而判断碳酸盐矿物的类型 (Liu Chengdong et al., 2011)。①当主要成分为 CaCO₃, MgCO₃、FeCO₃、MnCO₃均小于1%时,该碳酸盐为方解石;②当主要成分为 CaCO₃, FeCO₃ > 1%, Ca/Fe>3.5时,该碳酸盐为铁方解石;③当主 要成分为 CaCO₃和 MgCO₃, Ca/Mg<3.6时,该碳酸盐为白云石;④当主要成分为 CaCO₃和 MgCO₃, FeCO₃ > 1%, FeCO₃>10%时,该碳酸盐为铁白云石。

由电子探针元素分析及能谱分析可知,砂岩中 的早期碳酸盐成分以高 Ca、低 Fe、Mg 为特征(如图 3a),其中 CaO: 51.9% ~ 61.5%,平均 55.4%; MgO: 0.7% ~ 1.0%,平均 0.7%; FeO: 0.2% ~ 0.5%,平均 0.24%。经计算转化为相应离子的碳 酸盐形式,该期碳酸盐组分主要为 CaCO₃(92.7% ~109.9%), MgCO₃、FeCO₃、MnCO₃均小于 1%, 显示该期碳酸盐胶结物为方解石。

中期碳酸盐成分以高 Ca、较高 Fe 为特征(如图 3a)。其中 CaO: 51.6% ~ 60.5%,平均 55.7%; FeO: 0.64% ~ 1.6%,平均 1.0%; MgO: 0.08% ~ 0.4%,平均 0.3%。经计算转化为相应离子的碳酸盐形式,该期碳酸盐组分主要为 CaCO₃(92.1% ~ 107.9%),其中 FeCO₃>1%,显示该期碳酸盐胶结物为铁方解石。

晚期碳酸盐成分以高 Fe、Mg,较低 Ca 为特征 (如图 3a)。其中 CaO: $30.0\% \sim 35.8\%$,平均 33.3%;FeO: $7.4\% \sim 14.4\%$,平均 11.3%; MgO: $8.8\% \sim 14.6\%$,平均 10.9%。经计算转化为相应 离子的碳酸盐形式,该期碳酸盐组分主要为 CaCO₃ ($53.5\% \sim 63.9\%$)和 MgCO₃($18.4\% \sim 30.7\%$),且 FeCO₃>10%($11.9\% \sim 23.3\%$),显示该期碳酸盐 胶结物为铁白云石。

将上述三期碳酸盐胶结物成分投在 MnO-FeO-MgO 三角图中,可以看出三期碳酸盐明显分为三个 区域(图 3b)。

4 碳酸盐胶结物的碳、氧及锶同位素 特征及成因探讨

4.1 早期碳酸盐胶结物

碳、氧及锶同位素分析是研究碎屑岩中碳酸盐 胶结物的物质来源、成因机制的重要手段与方法,而 被学者们广泛运用(Lv Chengfu et al.,2011; Tian Yaming et al.,2011; Wang Qi et al.,2008; Longstaffe et al.,2003; Huang Sijing et al.,2002)。

根据 Friedman(1977)提出的方解石温度计算 公式,依据研究区早期碳酸盐胶结物的 δ¹³ C_{PDB}





 $(-9.37\% \sim 0.29\%)$ 与 δ^{18} O_{PDB} $(-9.79\% \sim -3.08\%)$ 值(图 4a,表 1),计算了早期碳酸盐胶结物沉淀温度:

 $1000 \ln \alpha_{5 \# \pi^{-} \pi} = 2.78 \times 10^{6} \times T^{-2} - 2.89$ $\alpha_{5 \# \pi^{-} \pi} = (1 + (\delta^{18} O_{5 \# \pi} / 1000)) / (1 + (\delta^{18} O_{\pi k} / 1000))$

表 1 白云凹陷各期次碳酸盐胶结物的碳、氧及锶同位素特征 Table 1 The carbon, oxygen and strontium isotopic composition from the different phase carbonate

cements	in	Baiyun	sag
---------	----	--------	-----

编号	层位	$\delta^{13}C$	$\delta^{18}O$	⁸⁷ Sr/	古盐度	产状	
		(PDB,%)	(PDB,%)	⁸⁶ Sr	(Z)		
LW31	珠江组	-0.36	-5.77	0.7096	123.69	早期方解石(泥晶)	
LW41	珠江组	-1.86	-3.76	0.7085	121.62	早期方解石(泥晶)	
LW41	珠江组	-2.43	-3.08	0.7084	120.79	早期方解石(生屑)	
LH162	珠江组	0.29	-4.31	0.7085	125.75	早期方解石(生屑)	
LH281	珠江组	-0.46	-5.22	0.7097	123.76	早期方解石(生屑)	
PY301	珠江组	-1.12	-8.79	0.7104	120.63	早期菱铁矿	
PY301	珠江组	-1.52	-9.79	0.7109	119.31	早期方解石	
LH301	珠海组	-9.37	-7.09	0.7142	104.58	早期方解石(泥晶)	
LH301	珠海组	-8.13	-7.11	0.7138	107.11	早期方解石(泥晶)	
LW31	珠海组	-20.88	-8.99	0.7093	80.06	中期铁方解石	
LH281	珠海组	-5.29	-11.1	0.7151	110.94	中期铁方解石	
LH281	珠海组	-5.38	-10.96	0.7138	110.82	中期铁方解石	
PY301	珠江组	-1.83	-9.45	0.7101	118.85	晚期铁白云石	
PY301	珠江组	-2.83	-5.37	0.7162	118.83	晚期铁白云石	

注:古盐度(Z)=2.048×(ð¹³C+50)+0.498×(ð¹⁸O+50),Z≥120 为海相,Z<120 为淡水相(据 Keith and Weber,1964)。

砂岩中胶结物的δ¹⁸O_{流体}是由沉积时孔隙流体

的性质决定的,由于珠海组、珠江组沉积期为海陆过 渡相或是海相(Liu Baojun et al.,2007)。早期碳酸 盐温度计算时,流体的 δ^{18} O(SMOW)取现今海水值 0‰(Guo Jia et al.,2014; Qiang Zitong,1998; Wu Sujuan,2006)。计算结果显示早期碳酸盐胶结物的 形成温度在 30.25~80.22℃之间,主体温度在 30.25~52.90℃(图 5),这与埋藏史恢复模拟得出 的早期方解石沉淀时的温度(20~60℃)(罗静兰等, 2015)[●]一致。因此,早期碳酸盐应形成于同生成岩 阶段—早成岩阶段 A 期。

根据 Keith(1964)提出的古盐度经验公式计算 的珠江组早期碳酸盐形成时的古盐度(Z)基本上大 于 120(119.31~125.75),其 δ^{13} C_{PDB} 为一2.43%~ 0.29%, δ^{18} O_{PDB} 为一9.79%~-3.08%(图 4a,表 1) 与同期海水的碳、氧同位素组成范围(δ^{13} C_{PDB}:-1% ~-2%, δ^{18} O_{PDB}:-8%~0%)(Veizer et al.,1999) 基本一致,而⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 值在 0.7084~0.7109(图 4b, 表 1),其中多个样品的锶同位素与同期海水一致或 接近(同期海水⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 为 0.7084,据 Veizer et al.,1999),这都反映珠江组早期碳酸盐胶结物的形 成与海相流体密切相关。白云运动使得白云地区发 生沉降,沉积环境也因此转变为陆坡深水海相环境, 因此,珠江组早期碳酸盐胶结物是在早期浅埋阶段 主要从碳酸盐过饱和碱性海水介质中沉淀出的 产物。

珠海组早期碳酸盐胶结物的 δ^{13} C_{PDB} 为 -9.37% ~ -8.13%, δ^{18} O_{PDB} 为 -7.11% ~ -7.09%,古盐度(Z)基本上小于 120(104.58~ 107.11)(图 4a,表 1),反映珠海组早期碳酸盐沉淀 与淡水流体密切相关。⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 值在 0.7138~



图 4 白云凹陷碳酸盐碳、氧同位素(a)及锶同位素(b)特征

Fig. 4 The carbon, oxygen (a) and strontium isotopic (b) composition diagram of the carbonate cements in Baiyun sag



- 图 5 白云凹陷早期方解石沉淀过程氧同位素分馏作用图
 (据 1000lnα_{calcite-water} = 2.78×10⁶×T⁻²-2.89 编制)
- Fig. 5 Plot of oxygen isotopic fractionation of the earlyphase calcite precipitation in Baiyun sag

(according to the $1000 \ln \alpha_{calcite-water} = 2.78 \times 10^{6} \times T^{-2} - 2.89$)

0.7142(图 4b,表 1),明显高于同期海水的锶同位素 比值,说明珠海组早期碳酸盐胶结物的形成受陆源 (铝)硅酸盐影响较大。前人研究认为,随着成岩作 用的进行,碳酸盐胶结物的形成会因为孔隙流体更 容易受到壳源锶的影响而使得其中的⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 值 偏大(Huang Sijing et al.,2002)。研究区珠海组砂 岩在同生成岩阶段就受到这么强的壳源锶的影响, 说明了该阶段碳酸盐沉淀时的流体受到与壳源锶直 接相关的陆源淡水的强烈混染。珠海组沉积期主要 为海陆过渡相到浅海陆架相沉积环境(Liu Baojun et al.,2007),当时气候干旱,河流的淡水补给减少 (Wang Qi et al.,2010)。因此推测,珠海组成岩早 期,砂岩的成岩孔隙流体明显受到来自陆源淡水的 影响,碳酸盐胶结物应是从碳酸盐过饱和的碱性淡 水介质中沉淀出的产物。

4.2 中期碳酸盐胶结物

中期铁方解石胶结物的 δ^{13} C_{PDB} 为 -20.88% ~ -5.29%, δ^{18} O_{PDB} 为 -11.1% ~ -8.99% (表 1,图 5),碳同位素组成范围较大,最低可达 -20.88%,这反映 - 部分中期碳酸盐胶结物在形成时有外来轻碳的加入。Wang Qi et al. (2010)所测该区碳酸盐胶结物的碳、氧同位素也有这样的特征 (δ^{13} C_{PDB}: -11.8% ~ -3.4%, δ^{18} O_{PDB}: -17.8% ~ -2.4%)。据前人研究,烃源岩中有机质发生热脱羧并释放出的二氧化碳的 δ^{13} C_{PDB} 在 -4% ~ -35% (Suess et al., 1989; Curtis et al., 1972),很容易与 孔隙流体中的 Ca²⁺、Fe²⁺离子相互结合形成碳酸盐 矿物。

珠江口盆地存在四套烃源岩,古新统一始新统 文昌组的湖相烃源岩、始新统---渐新统恩平组的煤 系烃源岩、珠海组海陆过渡相烃源岩及珠江组海相 烃源岩。其中文昌组的湖相烃源岩、恩平组的煤系 烃源岩已进入成熟、甚至高成熟演化阶段(Mi Lijun et al., 2006, 2007), 生成的有机酸可能已运移至珠 海组与珠江组储层内部。LW3-1-1 井珠海组烃源 岩的 Ro 值为 0.43% ~ 0.53% (Zhu Junzhang et al.,2008),表明珠海组烃源岩已达到生油窗的低成 熟阶段,是有机酸开始生成的鼎盛时期;珠江组烃源 岩应在低成熟和未成熟演化阶段(Zhu Junzhang et al.,2008)。这些烃源岩在演化过程中产生的大量 有机酸进入储层中,使砂岩中的长石、岩屑大量溶 蚀,为孔隙流体提供大量 Ca²⁺、Fe²⁺ 离子;另一方面 有机酸发生热解脱羧作用提供的 CO₂ 与长石、岩屑 大量溶蚀产生的 Ca²⁺、Fe²⁺离子相结合,沉淀出铁 方解石,并交代部分碎屑颗粒。此外,随着埋深的增 加,地层温压的升高,黏土矿物逐渐向伊利石转化,

该过程可以提供大量的 Ca²⁺、Fe²⁺、Mg²⁺等离子 (Zhong Dakang et al.,2004),这为铁碳酸盐胶结物 的形成提供了丰富的物质基础。

前人研究发现,来自深部的热液流体具有较重 的氧同位素特征(Spencer,1987;Cui Huan et al., 2012;Jin Zhijun et al.,2013),其与原始幔源岩浆平 衡时 的 氧 同 位 素 组 成 与 原 始 幔 源 岩 浆 相 似, $\delta^{18}O_{SMOW}$ 在 5‰~7‰之间;大部分岩浆平衡时的氧 同位素 $\delta^{18}O_{SMOW}$:6‰~8‰;与花岗岩平衡的热液流 体的 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 在 5.5‰~12‰之间(Zheng Yongfei et al.,2000)。总之,深部热液流体的 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值— 般偏重,最高可达到 12‰(Friedman et al.,1977; Zheng Yongfei et al.,2000)。

根据前述研究区成岩演化序列研究、该期碳酸盐胶结物中的包裹体均一温度数据,以及罗静兰等(2015)对研究区的埋藏一成岩一烃类充注演化史,中期碳酸盐主要形成于中成岩阶段A期,其形成温度在80~140℃。根据氧同位素数据以及其形成的温度范围,在氧同位素分馏作用图(Friedman et al.,1977)中投点,得出中期碳酸盐形成时流体的 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 在0%~8%之间(图 6A),具有深部流体重氧同位素的特征。同时该期碳酸盐胶结物中的一部分 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为-5.38%~-5.29%,这与深部来源物质的碳同位素(幔源 $\delta^{13}C_{PDB}$ =-5±2%,据 Zheng Yongfei et al.,2000)一致,因此,该部分碳酸盐胶结物的沉淀可能与深部热液流体密切相关。

研究区珠江组和珠海组储层及相邻的地层中发 现多种典型的热液成因矿物,如片钠铝石、重晶石、 自生钠长石等(如图7)。其中,片钠铝石形成于含 钠和铝、碱性流体和高的 CO2 分压下,特别是有机酸 和 CO₂与斜长石等铝硅酸盐矿物反应后,溶液中富 集 Na⁺、K⁺、Al³⁺、Fe²⁺、Mg²⁺、Ca²⁺等离子,在形 成含铁的碳酸盐矿物之后,随着 CO₂的不断供给,最 后析出片钠铝石(Gao Yuqiao et al., 2006, 2007)。 重晶石是常见的热水沉积矿物,其形成多与海底高 温热液与海水混合作用有关,因此,重晶石的形成环 境一般与海底热液喷流或是深大断裂有密切关系 (Fang Weixuan et al., 2002)。自生钠长石也是典 型的热液成因矿物,主要见于埋深较大的储层中,其 结晶温度≥70℃,自生钠长石的出现,表明介质流体 为碱性环境,同时水岩反应较为强烈(Zhou Huaiyang,2001)。这些热液矿物的出现表明,研究 区地层流体中都可能有深部来源的物质参与。

另一方面,中期碳酸盐胶结物的⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 值可 以明显分为两类(图 4b,表1):一部分⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 值较 大(为 0.7138~0.7151),原因是随成岩作用的进 行,(铝)硅酸盐的溶蚀、转化等使得介质流体中具有 较高的⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 值,从而使生成的碳酸盐胶结物的 锶同位素因受壳源锶的影响而偏大。另一部分 ⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 值明显偏小(为 0.7093),异于正常成岩演 化形成的方解石的锶同位素组成,说明受到⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr值较低的流体的影响。根据研究区存在深部流





图 7 白云凹陷砂岩中常见的热液矿物 Fig. 7 The common hydrothermal mineral in the sandstone of Baiyun Sag

(a)一片钠铝石(Daw)充填碎屑颗粒之间,LW33,珠海组,(-); (b)一砂岩中的片钠铝石(Daw),BY61,韩江组,(-);(c)一自生钠 长石(Ab)充填粒间孔隙,LH271,珠江组,扫描电镜;(d)一砂岩中的 重晶石(Ba),KP111,恩平组,扫描电镜

(a)—The dawsonite (Daw) between clastic particles, LW33, Zhuhai Group, (-); (b)—the dawsonite in the sandstone, BY61, Hanjiang Group, (-); (c)—the authigenic albite (Ab) between clastic particles, LH271, Zhujiang Group, SEM; (d)—the barite in the sandstone, KP111, Enping Group, SEM

体的碳、氧同位素特征以及发现的典型热液自生矿物的事实,这些低锶同位素流体很可能来自深部(幔源⁸⁷Sr/⁸⁶Sr的平均值为 0.70350,据 Veizer et al., 1999),这与前述中期碳酸盐胶结物可能受到深部流体影响的推测不谋而合。

此外,珠江组与珠海组砂岩储层中的流体包裹 体均一温度测试结果(87.5~225℃)显示,含有大量 明显高于研究区正常地温梯度所能达到的最高古地 温(160~170℃)的温度数据,其中,珠江组砂岩中≥ 170℃者占总测点数的 12.3%,珠海组砂岩中≥ 170℃者占总测点数的占 25.4%(罗静兰等,2015)。 温度高于 170℃以上的流体包裹体可能为储层经历 某种构造热事件期间以热液流体包裹体形式被捕获 的地质记录。暗示珠江组与珠海组储层在成岩演化 过程中受到来自深部热液流体的影响。这也为部分 中期碳酸盐胶结物的形成可能与深部热液流体有密 切关系提供了有利佐证。

4.3 晚期碳酸盐胶结物

晚期铁白云石胶结物的δ¹³ C_{PDB} 为-2.83‰~
-1.83‰,δ¹⁸ O_{PDB} 为-9.45‰~-5.37‰(表1,图4),其与同期海水碳、氧同位素组成范围基本一致

(δ¹³C_{PDB}为-1‰~-2‰,δ¹⁸O_{PDB}在-8‰~0‰,据 Veizer et al.,1999)。显微镜观察发现,研究区砂岩 (特别是珠江组)中的生物碎屑发生大量溶蚀,先期 形成的碳酸盐胶结物也有溶蚀现象。因此,晚期碳 酸盐岩胶结物应与砂岩中生物碎屑以及先期碳酸盐 胶结物的溶蚀再沉淀有密切关系。

据埋藏一成岩一烃类充注演化过程分析,晚期 铁白云石形成于中成岩阶段 A 期的晚期,形成温度 在 120 ~ 150℃(罗静兰等,2015)[●],根据 Fisher (1986)提出的铁白云石温度计算公式:

 $1000 \ln \alpha_{\text{$\sharph} h = 5\pi^{-} \pi} = 2.78 \times 10^{6} \times T^{-2} + 0.11$ $\alpha_{\text{$\sharph} h = 5\pi^{-} \pi} = (1 + (\delta^{18} O_{\text{\sharph$} h = 5\pi^{-}}/1000))/(1 + (\delta^{18} O_{\text{\sharph$} h = 6\pi^{-}}/1000))$

据此绘制的氧同位素分馏作用图,反映出晚期 碳酸盐形成时流体的 δ^{18} O_{SMOW}可能在 $3\% \sim 9\%$ (图 6B),也具有深部流体重氧同位素的特征。而晚期 铁白云石的⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 值(0.7101~0.7162)中也含 有低于正常成岩演化形成的碳酸盐的⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr 值 (0.7101)(图 4b,表 1),这均反映出晚期碳酸盐胶结 物的形成也受到了深部热液流体的影响。

5 结论

(1)碳酸盐胶结物可以分为三期。早期碳酸盐 胶结物主要为方解石,其次为少量菱铁矿;中期碳酸 盐胶结物主要为铁方解石;晚期碳酸盐胶结物主要 为铁白云石。

(2)珠江组、珠海组早期碳酸盐胶结物的成因存 在差异。珠江组早期碳酸盐是在陆坡深水环境中, 在早期浅埋藏阶段从碳酸盐过饱和碱性海水介质中 沉淀出的产物;珠海组早期碳酸盐胶结物是在海陆 过渡相—浅海相环境下受陆相淡水的强烈影响,从 碳酸盐过饱和的碱性淡水介质中沉淀出的产物。

(3)中期碳酸盐胶结物的一部分与烃源岩演化 过程中有机酸脱羧作用产生的 CO₂ 有关,另一部分 碳源可能来自深部物质。砂岩中长石、岩屑等碎屑 颗粒的溶蚀、黏土矿物的转化以及深部热液流体均 为碳酸盐胶结物的形成提供了大量的 Ca²⁺、Mg²⁺、 Fe²⁺等离子。

(4)晚期碳酸盐胶结物的形成与砂岩中的生物 碎屑以及先期碳酸盐胶结物的溶蚀再沉淀作用有 关,部分受到深部热液流体的影响。

注 释

岩作用综合研究(内部报告).西北大学.

References

- Beavington-Penney S J, Nadin P, Wright V P, Clarke E, McQuilken J, Bailey H W. 2008. Reservoir quality variation on an Eocene carbonate ramp. El Garia Formation, offshore Tunisia: Structural control of burial corrosion and dolomitisation. Sedimentary Geology, 209(1~4): 42~57.
- Brigaud B, Durlet C, Deconinck J, Vincent B, Thierry J, Trouiller A. 2009. The origin and timing of multiphase cementation in carbonates: Impact of regional scale geodynamic events on the Middle Jurassic Limestones diagenesis (Paris Basin, France). Sedimentary Geology, 222(3~4): 161~180.
- Conybeare D M, Shaw H F. 2000. Fracturing, overpressure release and carbonate cementation in the Everest Complex, North Sea. Clay Minerals, 35(1): 135~149.
- Cui Huan, Guan Ping, Jian Xing. 2012. Magmatic hydrothermal fluids-formation water compound system and diagenetic response of carbonate reservoir rocks in northern Tarim Basin. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 48(3): 433~443(in Chinese with English abstract).
- Curtis C D, Oertel G, Petrowski C. 1972. Stable carbon isotope ratios within carbonate concretions: a clue to place and time of formation. Nature, 235: 98~100.
- Fang Weixuan, Hu Ruizhong, Su Wenchao, Qi Liang, Xiao Jiafei, Jiang Guohao. 2002. Geochemical characteristics of Dahebian— Gongxi superlarge barite deposits and analysis on its background of tectonic geology, China. Acta Petorlogica Sinica, 18(2):247 ~256(in Chinese with English abstract).
- Fisher S R, Land L S. 1986. Diagenetic history of the Eocene Wilcox sandstones and associated Formation waters, south-Central Texas, Geochim. Cosmochim. Acta, 60: 551~562.
- Friedman I, O' Neil J R. 1977. Compilation of stable isotopic fractionation factors of geochemical interest. In: Fleischer, M. (Ed.), Data of Geochemistry. U. S. Geological Survey Professional Paper, 440KK:12.
- Gao Yuqiao, Liu Li, Zhang Fusong, Zhang Yanjie. 2007. C-O isotope composition of dawsonite and its implication on the fluid origin in Wuerxun sag, Hailaer Basin, China. Acta Petrologica Sinica, 23(4):831~838(in Chinese with English abstract).
- Gao Yuqiao, Liu Li. 2006. Carbon-oxygen isotopic characteristics of authigenic dawsonite and its genetic significance. Geological Journal of China Universities, 12(4):522~529(in Chinese with English abstract).
- Guo Jia, Zeng Jianhui, Song Guoqi, Zhang Yongwang, Wang Xuejun, Meng Wei. 2014. Characteristics and origin of carbonate cements of Shahejie Formation of central uplift belt in Dongying depression. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 39 (5): 565 ~ 576 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Shi He, Zhang Meng, Shen Licheng, Wu Wenhui. 2002. Application of strontium isotope stratigraphy to

diagenesis research. Acta Sedimentologica Sinica, 20(3):359~ 366(in Chinese with English abstract).

- Jin Zhijun, Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Hu Wenxuan. 2013. Hydrothermal activites and influences on migration of oil and gas in Tarim Basin. Acta Petrologica Sinica, 29(3): 1048~ 1058(in Chinese with English abstract).
- 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.
- Lan Yefang, Huang Sijing, Ma Yongkun, Zhou Xiaokang, Wei Zhe. 2016. Genesis of negative carbon and oxygen isotopic composition of carbonate rocks in lower miocene Zhujiang Formation, Pearl River Mouth Basin. Geological Review, 62 (4):915~928(in Chinese with English abstract).
- Lian Shiyong, He Min, Pang Xiong, Shen Jun, Liu Baojun, Wu Xiangjie. 2007. Research on Eocene structure of Baiyun Sag in deep-water area of Pearl River Mouth Basin. Acta Petrolei Sinica, 28(3):13~16(in Chinese with English abstract).
- Liu Baojun, Pang Xiong, Yan Chengzhi, Liu Jun, Lian Shiyong, He Min, Shen Jun. 2011. Evolution of the Oligocene-Miocene shelf slope-break zone in the Baiyun deep-water area of the Pearl River Mouth Basin and its significance in oil-gas exploration. Acta Petrolei Sinica, 32(2): 234~242(in Chinese with English abstract).
- Liu Baojun, Shen Jun, Pang Xiong, He Min, Lian Shiyong, Qu Liang. 2007. Characteristics of continental delta deposits in Zhuhai Formation of Baiyun Depression in Pearl River Mouth Basin. Acta Petrolei Sinica, 28(2):49 ~ 56 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chengdong, Zhang Shoupeng, Liu Ting, Yan Zhaobin, Guo Guolin, Liang Liang. 2011. Chemical composition and isotopic characteristics of the carbonate cements in sandstone reservoir layer of Dongying sinking. Procedia Earth and Planetary Science, 2: 284~290.
- Longstaff F J. 1981. Clays and the resource geology. Calgary: Mineral Assoc, Canada.
- Longstaffe F J, Calvo R, Ayalon A, Donaldson A. 2003. Stable isotope evidence for multiple fluid regimes during carbonate cementation of the Upper Tertiary Hazeva Formation, Dead Sea Graben, southern Israel. Journal of Geochemical Exploration, 80(2~3): 151~170.
- Lü Chengfu, Li Xiaoyan, Chen Guojun, Lu Xinchuan, Du Guichao, Li Chao. Characteristics of carbonate cements and reservoir quality of the Lower Cretaceous sandstone in Jiudong sag. Acta Sedimentologica Sinica, 29(6):1138~1144 (in Chinese with English abstract).
- Mansour A S, Rifai R I, Shaaban M N. 2014. Geochemical constraint on the origin of the multi-mineralogic carbonate cements in the subsurface Middle Jurassic sandstones. Central Sinai, Egypt. Journal of Geochemical Exploration, 143: 163 ~173.
- Mi Lijun, Liu Zheng, Zhang Gongcheng, Shen Huailei, Chang Mai,

Guo Rui. 2007. Early forecast and evaluation study on chief source rock in Baiyun depression. Acta Sedimentologica Sinica, $25(1):139 \sim 146$ (in Chinese with English abstract).

- Mi Lijun, Zhang Gongcheng, Fu Ning, He Qing, Ma Liwu. 2006. An analysis of hydrocarbon source and accumulation in Panyu low-uplift and north slope of Baiyun sag, Pearl River Mouth basin. China Offshore Oil & Gas, 18(3): 161~168(in Chinese with English abstract).
- Qiang Zitong, 1998. Carbonate Reservoir Geology. Dongying: Petroleum University Publishing House (in Chinese).
- Shimura T, Kon Y, Sawaki Y, Hirata T, Han J, Shu D G, Komiya T. 2014. In-situ analyses of phosphorus contents of carbonate minerals: Reconstruction of phosphorus contents of seawater from the Ediacaran to Early Cambrian. Gondwana Research, 25 (3): 1090~1107.
- Spencer R J. 1987. Origin of Ca-Cl brines in Devonian formations, western Canada sedimentary basin. Applied Geochemistry, 2 (4): 373~384.
- Suess E, Whiticar J M. 1989. Methane-derived CO₂ in pore fluids expelled from the Oregon subduction zone. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 71: 119~136.
- Tan Xianfeng, Huang Jianhong, Li Jie, Gao Hongcan, Kuang Hao, Jiang Wei. 2015. 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. Geological Review, 61 (5):1107~1120(in Chinese with English abstract).
- Tian Yaming, Shi Zejin, Song Jianghai, Wu Xiaoming, Gao Xiang, Hong Chengyun. 2011. Characteristics of carbonate cements of Member 8 of Yanchang Formation in the Yichuan-Xunyi area, Ordos Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 38(4):378~384 (in Chinese with English abstract).
- Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F F, Carden G A F, Diener A, Ebneth S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha OG, Strauss H. 1999. ⁸⁷Sr/⁸⁶ Sr, δ¹³C and δ¹⁸O evolution of Phanerozoic seawater. Chemical Geology, 161(1~3): 59~88.
- Wang Darui. 2000. Stable Isotope Geochemistry of Oil and Gas. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Wang Qi, He Leiwei, Chen Guojun, Zhang Gongcheng, Zhang Rui, Ma Xiaofeng, Wang Huan. 2010. Forming mechanism of carbonate cements in siliciclastic sandstone of Zhuhai Formation in Baiyun Sag. Acta Petrolei Sinica, 31(4): 553 ~ 558 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qi, Zhuo Xizhun, Chen Guojun, Li Xiaoyan. 2008. Carbon and oxygen isotopic composition of carbonate cements of different phases in terrigenous siliciclastic reservoirs and significance for their origin: A case study from sandstones of the Triassic Yanchang Formation, southwestern Ordos Basin, China. Chinese Journal of Geochemistry, 27(3): 249~256.
- Wu Sujuan. 2006. Carbonate cements and their formation

mechanism in Palaeogene sandstones of Lishui sag. Master Degree Thesis. Chengdu: University of Technology(in Chinese with English summary).

- Xu Beimei, Lu Bin. 1994. The Study of Diagenetic carbonate in siliciciastic rock and it's control on the reservoir. Acta Sedimentologica Sinica, 12(3): 56~66(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhi, Zou Caineng, He Sheng, He Zhiliang, Wu Henzhi, Cao Feng. 2010. Formation mechanism of carbonate cemented zones adjacent to the top overpressured surface in the central Junggar Basin, NW China. Sci China Earth Sci, 40(4): 439~451(in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhen, Li Wenhou. 2011. Origin of Calcite cement in the sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in southeast of Ordos basin. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 41(S1): 17 ~ 23(in Chinese with English abstract).
- Zhang Liqiang, Luo Xiaorong. 2011. Distribution and characteristics of carbonate cements in overpressure zone of Junggar Basin. Petroleum Geology & Experiment, 33(4):388~401(in Chinese with English abstract).
- Zhang Minqiang, Huang Sijing, Wu Zhixuan, Wu Sujuan, Hu Zuowei. 2007. Carbonate cements and their formation mechanism in Palaeogene sandstones of Lishui sag, East China Sea basin. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 34(3):259~266(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yingying. 2012. The formation mechanism of carbonate cement in the sandstone of Yanchang 6₃ formation in Huaqing area and its effects on reservoir quality. Master Degree Thesis. Chengdu: University of Technology (in Chinese with English summary).
- Zhao Yanyan, Zheng Yongfei. 2013. Geochemical constraints on the origin of post-depositional fluids in sedimentary carbonates of the Ediacaran system in South China. Precambrian Research, 224: 341~363.
- Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. 2000. Stable Isotope Geochemistry. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhang Qin. 2004. Variation characteristics of sandstone reservoirs when sandstone and mudstone are interbedded at different buried depths. Acta Geologica Sinica, 78(6): 863 ~ 871 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Huaiyang, Ye Ying, Shen Zhongyue, Ni Jianyu, Pan Jianming. 2001. Thermal-water minerals found in the surface sediments of east pacific and its significance. Marine Sciences, 25(12): 27~30(in Chinese with English abstract).
- Zhu Junzhang, Shi Hesheng, Pang Xiong, He Min, Yang Shaokun, Li Zhaowei. 2008. Zhuhai Formation source rock evaluation and reservoired hydrocarbon source analysis in the deepwater area of Baiyun sag, Pearl River Mouth basin. China Offshore Oil & Gas, 20(4): 223~227(in Chinese with English abstract).

参考文献

- 崔欢,关平,简星. 2012. 塔北西部岩浆热液-地层水流体系统及碳酸 盐岩储层的成岩作用响应. 北京大学学报(自然科学版),48 (3):433~443.
- 方维萱,胡瑞忠,苏文超,漆亮,肖加飞,蒋国豪. 2002. 大河边-新晃 超大型重晶石矿床地球化学特征及形成的地质背景. 岩石学 报,18(2):247~256.
- 高玉巧,刘立,张福松,张延洁.2007.海拉尔盆地乌尔逊凹陷片钠 铝石的碳氧同位素组成及流体来源探讨.岩石学报,23(4): 831~838.
- 高玉巧,刘立. 2006. 自生片钠铝石的碳氧同位素特征及其成因意 义. 高校地质学报,12(4):522~529.
- 郭佳,曾溅辉,宋国奇,张永旺,王学军,孟伟. 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(中国地质大学学报),39(5):565~576.
- 黄思静,石和,张萌,沈丽成,武文慧. 2002. 锶同位素地层学在碎屑 岩成岩研究中的应用. 沉积学报,20(3):359~366.
- 金之钧,朱东亚,孟庆强,胡文瑄. 2013. 塔里木盆地热液流体活动 及其对油气运移的影响. 岩石学报, 29(3): 1048~1058.
- 兰叶芳,黄思静,马永坤,周小康,卫哲. 2016. 珠江口盆地珠江组碳 酸盐岩碳同位素组成负偏的成因意义. 地质论评, 62(4):915 ~928.
- 连世勇,何敏,庞雄,申俊,柳保军,吴湘杰. 2007. 珠江口盆地深水 区白云凹陷始新世洼陷结构研究. 石油学报,28(3):13~16.
- 柳保军,庞雄,颜承志,刘军,连世勇,何敏,申俊. 2011. 珠江口盆地 白云深水区渐新世-中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义. 石油学报,32(2):234~242.
- 柳保军,申俊,庞雄,何敏,连世勇,屈亮. 2007. 珠江口盆地白云凹 陷珠海组浅海三角洲沉积特征. 石油学报, 28(2): 49~56.
- 吕成福,李小燕,陈国俊,鲁新川,杜贵超,李超. 2011. 酒东坳陷下 白垩统砂岩中碳酸盐胶结物特征与储层物性. 沉积学报, 29 (6):1138~1144.
- 米立军,刘震,张功成,沈怀磊,常迈,郭瑞.2007. 南海北部深水区 白云凹陷古近系烃源岩的早期预测. 沉积学报,25(1):139 ~146.
- 米立军,张功成,傅宁,贺清,马立武. 2006. 珠江口盆地白云凹陷北 坡-番禺低隆起油气来源及成藏分析. 中国海上油气,18(3):

 $161 \sim 168.$

- 强子同. 1998. 碳酸盐岩储层地质学. 东营:石油大学出版社
- 谭先锋,黄建红,李洁,高红灿,况昊,蒋威. 2015. 深部埋藏条件下 砂岩中碳酸盐胶结物的成因及储层改造——以济阳坳陷始新 统孔店组为例. 地质论评,61(5):1107~1120.
- 田亚铭,施泽进,宋江海,吴晓明,高翔,洪成云. 2011. 鄂尔多斯盆 地宜川-旬邑地区长8储集层碳酸盐胶结物特征. 成都理工大 学学报(自然科学版), 38(4): 378~384.
- 王大锐. 2000. 油气稳定同位素地球化学.北京:石油工业出版社
- 王琪,郝乐伟,陈国俊,张功成,张瑞,马晓峰,王欢. 2010. 白云凹陷 珠海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理. 石油学报, 31(4): 553~558.
- 吴素娟. 2006. 丽水凹陷古近系储层砂岩中的碳酸盐胶结物及成因 研究. 成都: 成都理工大学硕士学位论文.
- 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.
- 杨智,邹才能,何生,何治亮,武恒志,曹锋. 2010. 准噶尔盆地腹部 超压顶面附近碳酸盐胶结带的成因机理. 中国科学:地球科学, 40(4):439~451.
- 袁珍,李文厚.2011.鄂尔多斯盆地东南缘上三叠统延长组砂岩方 解石胶结物成因.吉林大学学报(地球科学版),41(S1):17 ~23.
- 张立强,罗晓容. 2011. 准噶尔盆地高压带碳酸盐胶结层的分布及 特征. 石油实验地质, 33(4): 388~401.
- 张敏强,黄思静,吴志轩,吴素娟,胡作维. 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.
- 张莹莹. 2012. 华庆地区长 6₃小层储层砂岩中碳酸盐胶结物形成机 制及其对储层质量的影响.成都:成都理工大学硕士学位论文.
- 郑永飞,陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学. 北京:科学出版社.
- 钟大康,朱筱敏,张琴. 2004. 不同埋深条件下砂泥岩互层中砂岩储 层物性变化规律. 地质学报, 78(6): 863~871.
- 周怀阳,叶瑛,沈忠悦,倪建宇,潘建明. 2001. 东太平洋表层沉积物 中热水矿物组合的发现及其意义. 海洋科学, 25(12): 27~30.
- 朱俊章,施和生,庞雄,何敏,杨少坤,李昭伟. 2008. 珠江口盆地白 云凹陷深水区珠海组烃源岩评价及储层烃来源分析.中国海上 油气,20(4):223~227.

Carbonate Cementation and Origin Analysis of Deep Sandstone Reservoirs in the Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin

WANG Daifu^{1, 3)}, LUO Jinglan¹⁾, CHEN Shuhui²⁾, HU Haiyan⁴⁾,

MA Yongkun²⁾, LI Chi¹⁾, LIU Baojun²⁾, CHEN Liang²⁾

1) State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, 710069;

2) Research Institute, Shenzhen Branch of China National Offshore Oil Corporation Limited, Guangzhou, 510240;

3) Sichuan Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploitation, Chengdu, 610091;

4) Shaanxi Institute of International Trade & Commerce, Shaanxi, Xianyang, 712046

Abstract

This study preformed the analysis of phases, types, geochemical characteristics and genetic mechanism of carbonate cements from the sandstone reservoirs in the deep water area of Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, South China Sea, based on identification and quantitative statistics of thin sections under microscope, analysis of cathodoluminescence and scanning electron microscopy, electron microprobe, measurement of carbon, oxygen and strontium isotope and homogenization temperature of authigenic fluid inclusions. The sandstone reservoirs consist of the Miocene Zhujiang Group and the Oligocene Zhuhai Group. Research result shows that three phases of the carbonate cementation occurred both in the Zhujiang and Zhuhai sandstones. The early carbonate cement of the Zhujiang Formation consists mainly of calcite and is characterized by high Ca and low Fe and Mg. Its isotopoic compositions $(\delta^{13}C_{PDB} = -2.43\% \sim 0.29\%, \delta^{18}O_{PDB} = -9.79\% \sim -3.08\%, 87Sr/86Sr = 0.7084 \sim 0.7109)$ show some differences from that $(\delta^{13} C_{PDB} = -9.37\% \sim -8.13\%, \delta^{18} O_{PDB} = -7.11\% \sim -7.09\%, s^{87} Sr/s^{86} Sr = 0.7138 \sim -7.09\%$ 0.7142) of the Zhuhai Formation, with the former resulting from precipitation of the carbonate supersaturated alkaline sea water in the shallow burial stage, and the latter related to the carbonate supersaturated alkaline fresh water. The interim carbonate is mainly ferrocalcite with characteristic of higher Ca, high Fe, and low Mg, and wide ranges of C and Sr isotope(δ^{13} C_{PDB}: -20.88% ~-5.29%, δ¹⁸O_{PDB}: -11. 1‰~-8. 99‰, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr: 0. 7093~0. 7151). Chemical and geochemical features show that part of carbon was from CO₂ released by decarboxylation of organic acid, and the other part (δ^{13} C_{PDE}: $-5.38\%_{00}$ ~ $-5.29\%_{0}$) may be related to the substances from the deep crust. Ca²⁺, Mg²⁺, and Fe²⁺ ions necessary for the interim carbonate cements were derived from dissolution of feldspars and other detrital minerals in sediments, transformation of clay minerals, and deep thermal fluids. The late carbonate cements consisting mainly of ankerite (δ^{13} C_{PDB}: -2. 83% ~-1. 83% , δ^{18} O_{PDB}: -9. 45% ~-5. 77% , ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr:0.7101~0.7162) are characterized by higher Fe and Mg contents, and relatively low Ca content, which are basically consistent with that of homochronous seawater. But their ⁸⁷ Sr/⁸⁶ Sr values are lower than that formed in a normal diagenetic evolution. It can be inferred that the formation of the late carbonate cements may be related to the dissolution and reprecipitation of the early carbonate cements and the bioclastic limestones, and likely affected by the deep hydrothermal fluids.

Key words: carbonate cements; types and cementation phases; genetic mechanism; deep-water silisiclastic rock; Baiyun sag; Pearl River Mouth basin