

惠州凹陷恩平组砂岩储层碳酸盐胶结物发育特征及成因分析

张月霞, 李小平, 王宇辰, 李敏, 蔡国富

(中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东深圳 518067)

摘要:珠一坳陷惠州凹陷古近系恩平组为陆相淡水沉积背景, 整体物性较好, 局部发育碳酸盐矿物, 导致储层致密胶结、物性变差。采用薄片鉴定、扫描电镜和地球化学分析等方法, 分析惠州凹陷古近系恩平组砂岩碳酸盐胶结物的宏观沉积特征、微观岩矿特征和成因。结果表明: 惠州凹陷恩平组砂岩中碳酸盐胶结物类型复杂多样, 包括方解石、白云石、铁方解石、铁白云石, 伴生石膏及硬石膏矿物; 基底式胶结充填颗粒之间的碳酸盐胶结物形成于同生期及早成岩阶段, 与沉积时期水介质条件有关, 部分早期碳酸盐胶结物在成岩过程中发生重结晶而呈连晶状分布, 或被晚期含铁方解石、含铁白云石交代; 充填于孔隙或胶结、交代颗粒产出的碳酸盐胶结物为中—晚成岩期产物, 形成与有机酸流体作用相关; 恩平组三、四段沉积时期, 基底式胶结碳酸盐矿物大多分布于由断裂活动引起的逆牵引古隆起附近; 恩平组一、二段沉积时期, 基底式胶结碳酸盐矿物分布于洼陷边缘及水下古隆起附近。孔隙式碳酸盐胶结物的分布与烃类运移及断裂体系有关。该结果明确不同期次碳酸盐胶结物特征、储层物性及非均质性特征, 为古近系优质储层预测提供指导。

关键词:碳酸盐胶结物; 发育特征; 成因; 砂岩储层; 流体环境; 恩平组; 惠州凹陷

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2025)04-0037-14

0 引言

碳酸盐胶结物为充填于碎屑颗粒之间、化学成因的自生碳酸盐矿物, 广泛分布于碎屑岩储层^[1], 具有赋存状态多变、形成期次多、成因复杂的特征。这类自生碳酸盐矿物可以在多种地球化学条件下形成, 化学性质活泼, 易发生溶解和再沉淀^[2]。多种流体作用可以为碳酸盐胶结物的沉淀提供物质来源。碳酸盐胶结物中的碳由大气水、湖水、海水、有机酸流体、热液流体及其他成岩流体带来^[3-4], 钙离子来自于碳酸盐岩屑的溶解、长石颗粒的溶解、黏土矿物的转化、铝硅酸盐的水化作用等过程^[3-7]。碳酸盐胶结物的形成受离子浓度、盐度、温度、压力和 pH 等因素的影响^[3]。碳酸盐胶结物对储层物性的影响具有不确定性: 一方面, 早期碳酸盐胶结物占据原生孔隙, 能提高岩石骨架颗粒抗压能力, 如果在成岩过程中发生溶解, 则为烃类充注提供储集空间, 有助于提高储层的储集性能; 另一方面, 碳酸盐胶结物的沉淀占据大量储集空间, 使储层致密化, 属于破坏型成岩作用^[8-13]。研究碎屑岩储层碳酸盐胶结物的产状分布、形成期次、成因模式及后期成岩演化过程, 有助于分析碎屑岩储层成岩作用与孔隙演化过程, 阐明碳酸盐胶结物成因机制及水岩作用过程, 对预测优质储层分布有重要意义^[14-15]。

珠江口盆地珠一坳陷惠州凹陷古近系砂岩埋深和储层物性差异大, 勘探成效与储层质量密切相关^[16]。整体上, 惠州凹陷古近系恩平组为陆相淡水沉积背景^[17-18], 局部发育碳酸盐矿物而导致储层致密胶结、物性变差。对碳酸盐胶结物的研究涉及准噶尔盆地、塔里木盆地和鄂尔多斯盆地等^[2-7, 13-15], 很少涉及珠一坳陷惠州凹陷。人们对惠州凹陷恩平组的沉积特征、源汇体系、沉积环境、烃源特征和成藏条件等方面研究较多^[19-28], 对储层岩矿特征、成岩作用、孔隙演化特征及砂岩中碳酸盐胶结物的研究较少。

笔者利用钻井井壁心资料, 采用薄片鉴定、扫描电镜等方法, 结合地球化学元素分析和碳、氧同位素分析, 研究惠州凹陷恩平组砂岩储层碳酸盐胶结物, 分析碳酸盐胶结物的形成期次及发育特征、成因, 明确研究区碳酸盐胶结物形成过程及对储层储集性能的影响, 为研究区优质储层预测提供参考。

收稿日期: 2024-09-20; 编辑: 刘丽丽

基金项目: 中海石油(中国)有限公司深圳分公司重大生产性科研项目(SCKY-2025-SZ-YJYKT-08)

作者简介: 张月霞(1992—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事储层岩矿方面的研究。

1 区域地质概况

惠州凹陷位于珠一坳陷东北部,由惠西、惠南、惠北、惠东和陆西半地堑,以及惠西低凸起、惠陆低凸起组成^[28],属于珠一坳陷勘探程度较高的重要富烃洼陷(见图1(a))。惠州凹陷自下而上发育侏罗系,白垩系,古近系文昌组、恩平组、珠海组,新近系珠江组、韩江组和粤海组,上覆万山组及第四系(见图1(c))^[19]。古近系发育两个完整的裂陷旋回,分别形成文昌组和恩平组^[24]。惠州凹陷文昌组沉积时期表现典型断陷湖盆沉积特征^[20];恩平组沉积时期处于盆地断拗转化期^[28],经历断陷湖盆扩张初期、湖盆扩张期及湖盆萎缩期。恩平组三、四段沉积时期属于断控继承性地貌,从弱分隔性水体到宽缓湖盆变换,受隆起区及洼陷局部物源影响^[15]。母岩为中生代花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩、安山岩及少量变质岩。恩平组一、二段沉积时期地貌更为平缓,水体连通湖盆广阔淤浅,受益外北部隆起区物源供源^[19,28]。北部隆起区及华南褶皱带的基岩以太古代—古生代的古老岩浆岩及变质岩为主^[29]。

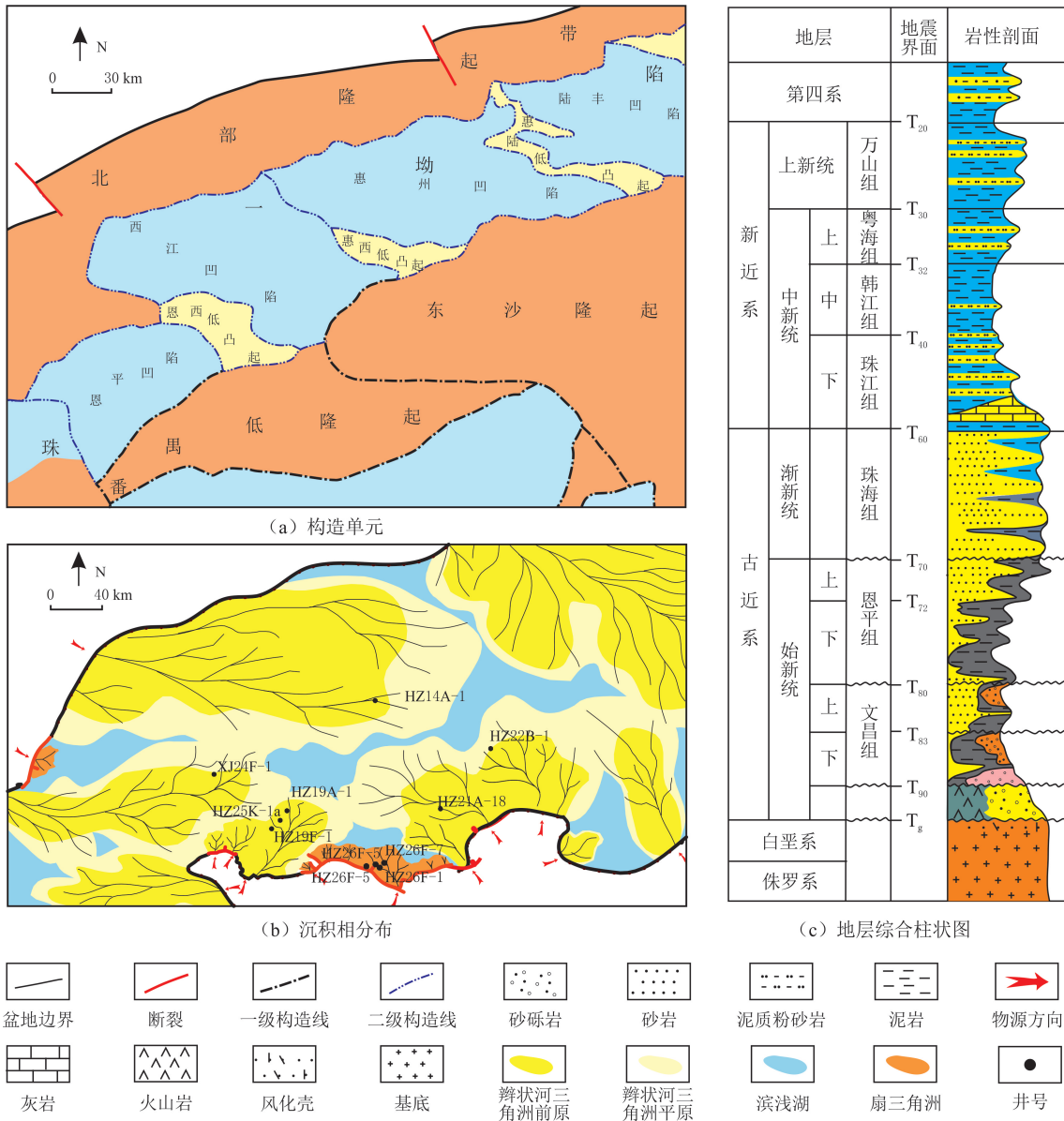


图1 研究区构造单元、沉积相分布图和地层综合柱状图(据文献[16,19]修改)

Fig.1 Tectonic units, sedimentary facies and comprehensive stratigraphic histogram of study area(modified by references[16,19])

恩平组沉积时期,惠州凹陷各洼陷较深部位发育广泛的滨浅湖沉积^[25]。洼陷的斜坡部位发育河流三

角洲沉积体系,前三角洲与滨浅湖相泥岩交接处发育沼泽相(见图1(b))。恩平组岩性组合为灰白色砂岩、粉砂岩与浅灰色、灰黑色泥岩互层,夹较多煤线及薄煤层^[18,24]。惠州凹陷恩平组沉积时期为温湿气候^[22-23],灰色泥岩与砂岩频繁互层,表明沉积时期季节变化频繁^[25]。

2 样品采集及实验方法

选取惠州凹陷恩平组发育碳酸盐胶结物的11口钻井394个壁心及岩屑样品,完成4项测试项目。其中,薄片鉴定201个样品,扫描电镜45个样品,元素分析116个样品,碳、氧同位素分析32个样品。样品测试由同济大学海洋地质国家重点实验室、中海油实验中心深圳实验中心、胜利油田勘探开发研究院石油地质测试中心完成。

对茜素红和铁氰化钾混合液染色过的铸体薄片进行观察、鉴定与统计,在偏光显微镜下鉴定矿物类型、描述结构参数,观察成岩现象及特征。完成光性特征观察后,利用扫描电镜仪(SEM)做微区形貌观察。在分析碳酸盐胶结物的类型、体积分数、产状及形成期次后,对不同类型样品进行地球化学元素分析及碳酸盐的碳、氧同位素测试。利用磷酸法对碳酸盐矿物进行同位素测试分析,利用美国热电公司的多通道电感耦合等离子光谱仪(MC-ICP-MS)、稳定同位素质谱仪(DELTAPLUSXP)进行测定,测定的同位素比以PDB标准的千分率偏差给出,碳同位素重复测定误差小于0.2‰,氧同位素重复测定误差小于0.3‰,按照SY/T 5238—2019《有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法》测定。主量元素分析采用电感耦合等离子光谱仪(ICP-OES)进行测试,标准偏差(RSD)小于1%;微量和稀土元素分析采用电感耦合等离子体发射质谱仪(ICP-MS)进行测试,分析精度优于10%。

3 碳酸盐胶结物发育特征

惠州凹陷恩平组碎屑岩储层储集性差异较大,非均质性强,以特低—中孔、低—中渗储层为主^[16]。根据薄片鉴定结果,恩平组岩石类型以岩屑砂岩及长石岩屑砂岩为主(见图2(a)),其中,石英体积分数为6.0%~79.0%,平均为44.2%;长石体积分数为2.0%~39.0%,平均为17.0%;岩屑体积分数为1.5%~61.0%,平均为38.6%。岩屑类型以花岗岩、中基性火山岩岩屑为主,其次为变质岩和少量沉积岩岩屑,未见典型的碳酸盐岩岩屑。填隙物中泥质杂基的体积分数平均为3.2%,胶结物类型以碳酸盐、自生黏土矿物为主,含少量硬石膏(见图2(b))。其中,碳酸盐胶结物体积分数为0~47.0%,平均为3.2%;自生黏土平均体积分数约为2.4%。

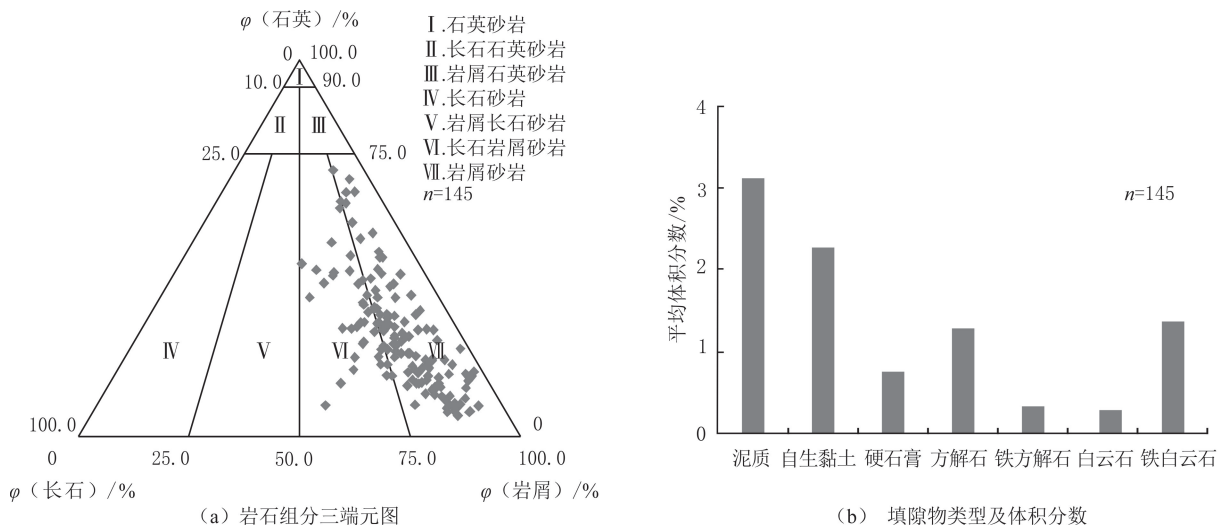


图2 惠州凹陷恩平组岩石组分三端元图、填隙物类型及体积分数

Fig. 2 Ternary diagram of rock composition types and volume fractions of interstitial materials of Enping Formation in the Huizhou Sag

3.1 赋存状态

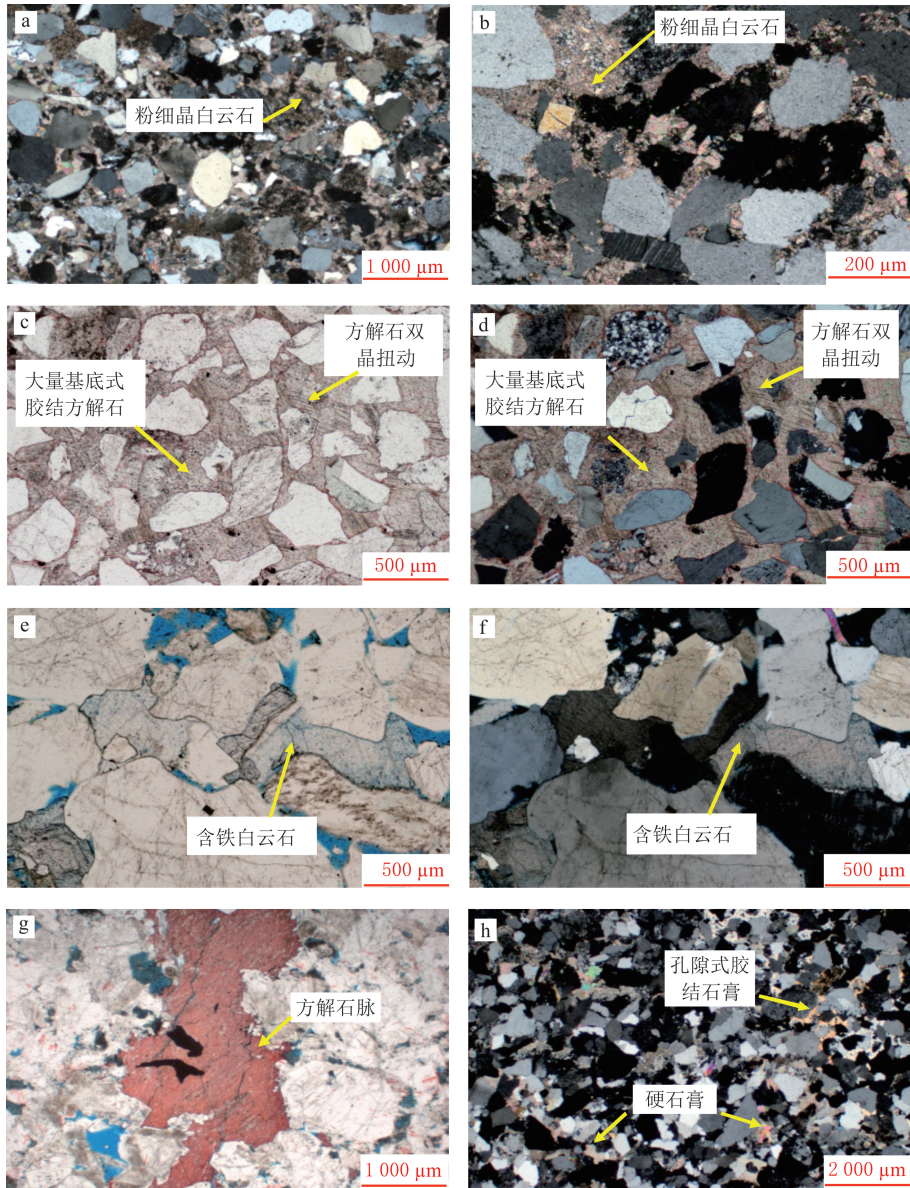
惠州凹陷恩平组碎屑岩中的碳酸盐胶结物在恩平组各段发育,多分布于恩平组一、二段,砂岩中含钙段厚度占恩平组砂岩厚度的 16%~45%。研究区碳酸盐胶结物类型多样,呈高级白干涉色,单偏光下可见方解石矿物被染为粉色、白云石不染色、含铁方解石被染为紫色、含铁白云石被染为蓝色。不同钻井单个样品中的碳酸盐胶结物类型及体积分数存在差异(见表 1)。

表 1 惠州凹陷恩平组砂岩碳酸盐胶结物体积分数

井号	样品数	平均体积分数						碳酸盐最大 体积分数
		硬石膏	方解石	铁方解石	白云石	铁白云石	碳酸盐	
HZ14A-1 井	7	3.29	18.07	0	0	4.64	22.71	80.00
HZ19A-1 井	20	5.05	0	0	0	2.25	2.25	25.00
HZ21A-18 井	5	0	7.50	0	15.50	0.30	15.80	37.50
HZ22B-1 井	4	1.13	0	0	0	10.88	10.88	39.50
HZ25K-1a 井	6	0	5.00	10.08	0	4.75	19.83	35.00
HZ26F-1 井	5	0	5.20	0	0	0	5.20	22.00
HZ26F-3 井	2	0	0	0	0.75	15.00	15.75	30.00
HZ26F-5 井	10	0	1.06	0.05	0.60	5.45	7.05	47.00
HZ26F-7 井	6	0	2.60	0.45	1.42	0	4.47	15.00

根据薄片鉴定、扫描电镜资料,研究区的碳酸盐胶结形成于多个阶段,存在 4 期碳酸盐胶结物:Ⅰ期泥晶白云石胶结物,Ⅱ期基底式胶结的连晶方解石、白云石胶结物,Ⅲ期孔隙式胶结的方解石、铁方解石及铁白云石,Ⅳ期脉体中充填的亮晶方解石胶结物,可见孔隙式胶结充填于颗粒之间的石膏、硬石膏矿物(见图 3)。不同期次碳酸盐矿物的胶结类型、体积分数和产状存在一定差异。其中Ⅰ期、Ⅱ期碳酸盐胶结物形成于同生期到早成岩阶段,早期的碳酸盐胶结物以基底式胶结产出,矿物类型以方解石、白云石为主,在部分钻井局部发育,单个样品中碳酸盐体积分数较高,体积分数可达 40%(见图 3(a-d)、图 4(b-c))。部分样品可见泥晶白云石,晶体细小(见图 3(b)),说明白云石形成于同生期或准同生期。部分砂岩样品中可见亮晶方解石胶结物呈连晶状填充在骨架颗粒之间(见图 3(c-d))。发育Ⅰ期、Ⅱ期的样品中碎屑颗粒压实作用较弱,碳酸盐矿物围绕碎屑颗粒边缘分布,碎屑颗粒彼此不接触或呈点接触(见图 3(a-d))。部分方解石晶格发生扭曲错动,说明形成于同沉积时期,受机械压实作用影响而发生变形。成岩期形成的Ⅲ期碳酸盐矿物在单个样品中体积分数较低。骨架颗粒之间以线接触、凹凸一线接触为主,碳酸盐矿物常呈分散状充填于孔隙,或直接胶结骨架颗粒、交代碎屑颗粒边缘,说明碳酸盐胶结物形成时期较晚,砂岩经历明显压实作用(见图 3(e-f)、图 4(a,d))。矿物类型以方解石、铁方解石和铁白云石为主,部分早期形成的碳酸盐胶结物后期发生重结晶而呈连晶状分布,或被晚期含铁方解石交代。

研究区碳酸盐胶结物平面分布特征见图 5。由图 5 可知,Ⅰ期、Ⅱ期早期碳酸盐胶结物在西部、南部及北部物源沉积区发育,多位于隆起及局部构造高部位,在滨湖沉积水体较浅处偶发育;成岩期形成的Ⅲ期碳酸盐胶结物在各个构造位置发育,不同地区Ⅲ期碳酸盐胶结物矿物类型差异不大。其中,充填裂缝的Ⅳ期方解石脉体在个别样品可见,分布于断层附近。早期碳酸盐胶结物分布于辫状河三角洲平原亚相,在前缘亚相中不发育。纵向上,恩平组三、四段砂岩主要发育早期碳酸盐胶结物,且多发育于控沉积断层下降盘附近,如西南侧物源沉积区的 HZ19A-1、HZ25K-1a 井。恩平组一、二段砂岩既发育早期碳酸盐胶结物,也发育成岩中晚期碳酸盐胶结物,早期碳酸盐胶结物分布于隆起或洼陷边缘,如惠北半地堑的 HZ14A-1 及东南侧物源沉积区的 HZ27F-4、HZ22B-1 等井。此外,碳酸盐胶结物的类型、体积分数与粒度无明显相关关系,多数发育于早期碳酸盐胶结物的样品,几乎未见其他填隙物。



(a) 基底式胶结白云石, 粉晶白云石晶粒细小, 体积分数为37.50%, I期碳酸盐胶结物, HZ21A-18井, 3 668.99 m, 恩平组一、二段, 正交偏光; (b) 基底式-孔隙式胶结白云石, 粉晶白云石体积分数为8.50%, 局部可见泥晶白云石, I期碳酸盐胶结物, HZ26F-7井, 3 835.00 m, 恩平组一、二段, 正交偏光; (c-d) 基底式胶结的II期碳酸盐胶结物, 方解石体积分数为46.50%, HZ14A-1井, 4 148.00 m, 恩平组一、二段, 同一视域单偏光(见图(c))、正交偏光(见图(d)); (e-f) 孔隙式胶结的含铁白云石, 碎屑颗粒呈线接触, 含铁白云石体积分数约为7.00%, III期碳酸盐胶结物, HZ26F-5井, 3 291.00 m, 恩平组二段, 同一视域单偏光(见图(e))、正交偏光(见图(f)); (g) 方解石脉体, IV期碳酸盐胶结物, HZ25K-1井, 4 375.30 m, 单偏光; (h) 孔隙式胶结硬石膏, 体积分数约为7.00%, H14A-1井, 4 382.00 m, 恩平组一、二段, 正交偏光

图3 惠州凹陷恩平组碳酸盐胶结物微观照片

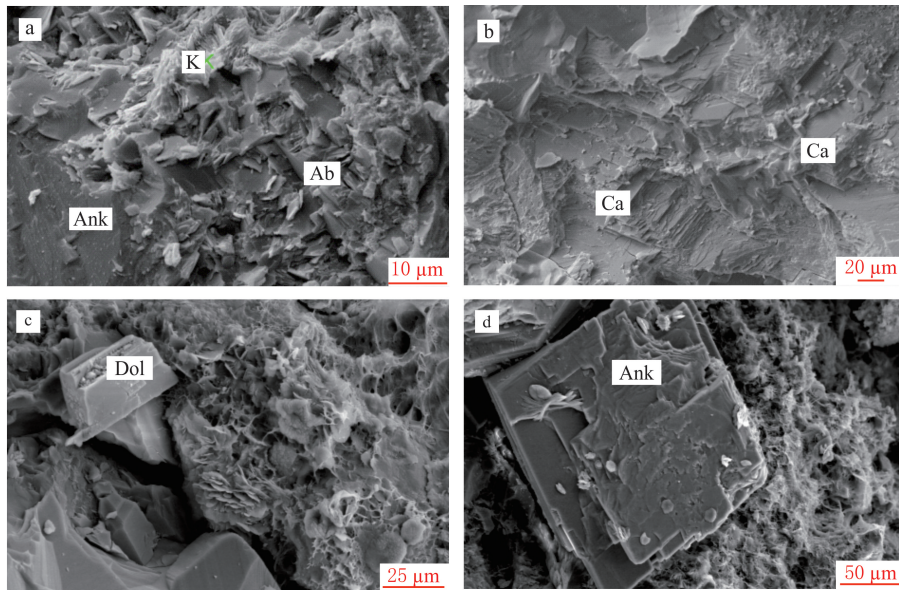
Fig. 3 Microscopic photographs of carbonate cements in the Enping Formation, Huizhou Sag

3.2 地球化学特征

为恢复早期钙质胶结物形成的沉积流体环境,分析不同类型含碳酸盐胶结物砂岩邻近的泥岩样品主量元素, SiO_2 体积分数大于60%, Al_2O_3 体积分数在10%~20%之间, FeO 、 K_2O 、 MgO 体积分数在1%~5%之间, MnO 、 Na_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 CaO 体积分数小于1%。

古水介质盐度条件下形成沉积物元素分配差异,利用 Sr/Ba 、 $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 、 K/Na 等无机化学元素指

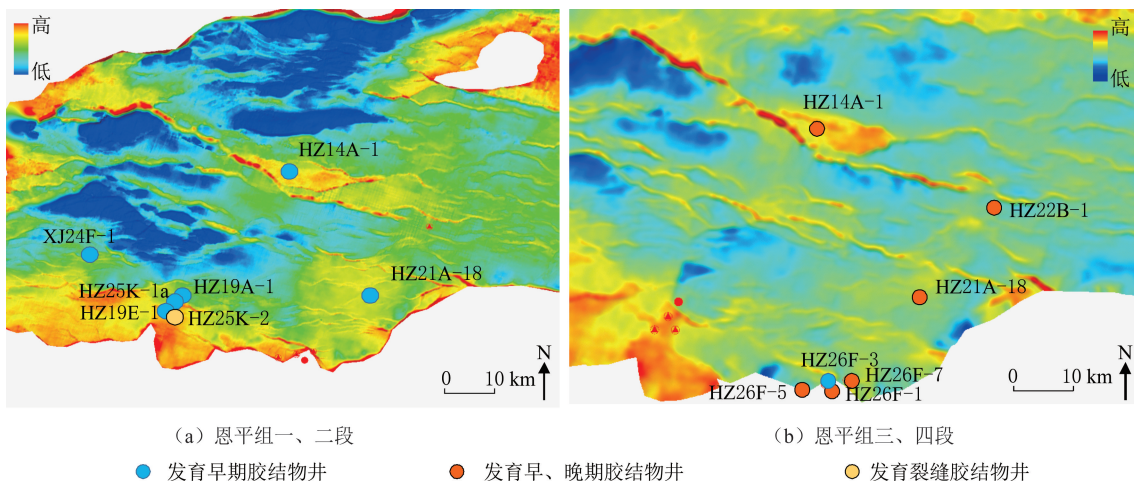
标判定古盐度。从淡水沉积到海水沉积,随盐度升高,Ca 元素体积分数增加,Fe 元素体积分数减少,利用 $Ca/(Ca+Fe)$ 指标可以反映沉积水体的盐度。当 $Ca/(Ca+Fe) > 0.8$ 时,指示为咸水沉积环境,当 $Ca/(Ca+Fe)$ 在 $0.4 \sim 0.8$ 之间时,指示为半咸水沉积环境;当 $Ca/(Ca+Fe) < 0.4$ 时,指示为淡水—微咸水沉积环境^[11,27]。根据惠州凹陷恩平组古水介质特征(见图 6),研究区测试样品 $Sr/Ba < 0.6$,指示整体为陆相淡水湖盆沉积背景^[27],部分样品 $Ca/(Ca+Fe)$ 介于 $0.4 \sim 0.8$,属于半咸水沉积环境,个别样品 $Ca/(Ca+Fe)$ 大于 0.8 ,反映咸水的沉积水介质条件。 K/Na 可以表现水体的盐度变化趋势,一般认为值越大,反映介质盐度越高。研究区测试样品 K/Na 与 $Ca/(Ca+Fe)$ 指标变化趋势一致,整体显示为淡水介质特征,部分样品反映微咸水的特征。无机化学元素指标反映的古盐度与碳酸盐胶结物的体积分数有一定相关关系,沉积时期水介质的盐度高,形成碳酸盐胶结物的体积分数高(见图 7)。



(a) HZ26F-5井, 3 363.00 m, 块状铁白云石发育, 可见钠长石及蠕虫状高岭石; (b) HZ14A-1井, 4 613.50 m, 可见块状方解石呈连晶状产出; (c) HZ22B-1井, 3 880.50 m, 可见白云石, 与黏土矿物伴生; (d) HZ22B-1井, 3 882.00 m, 可见自形铁白云石胶结物; K. 高岭石; Ab. 钠长石; Ank. 铁白云石; Ca. 方解石; Dol. 白云石

图 4 惠州凹陷恩平组碳酸盐胶结物扫描电镜照片

Fig. 4 SEM images of carbonate cements in the Enping Formation, Huizhou Sag



(a) 恩平组一、二段

(b) 恩平组三、四段

● 发育早期胶结物井

● 发育早、晚期胶结物井

● 发育裂缝胶结物井

图 5 惠州凹陷恩平组地貌与碳酸盐胶结物分布特征

Fig. 5 Geomorphological and carbonate cement distribution characteristics of Enping Formation in the Huizhou Sag

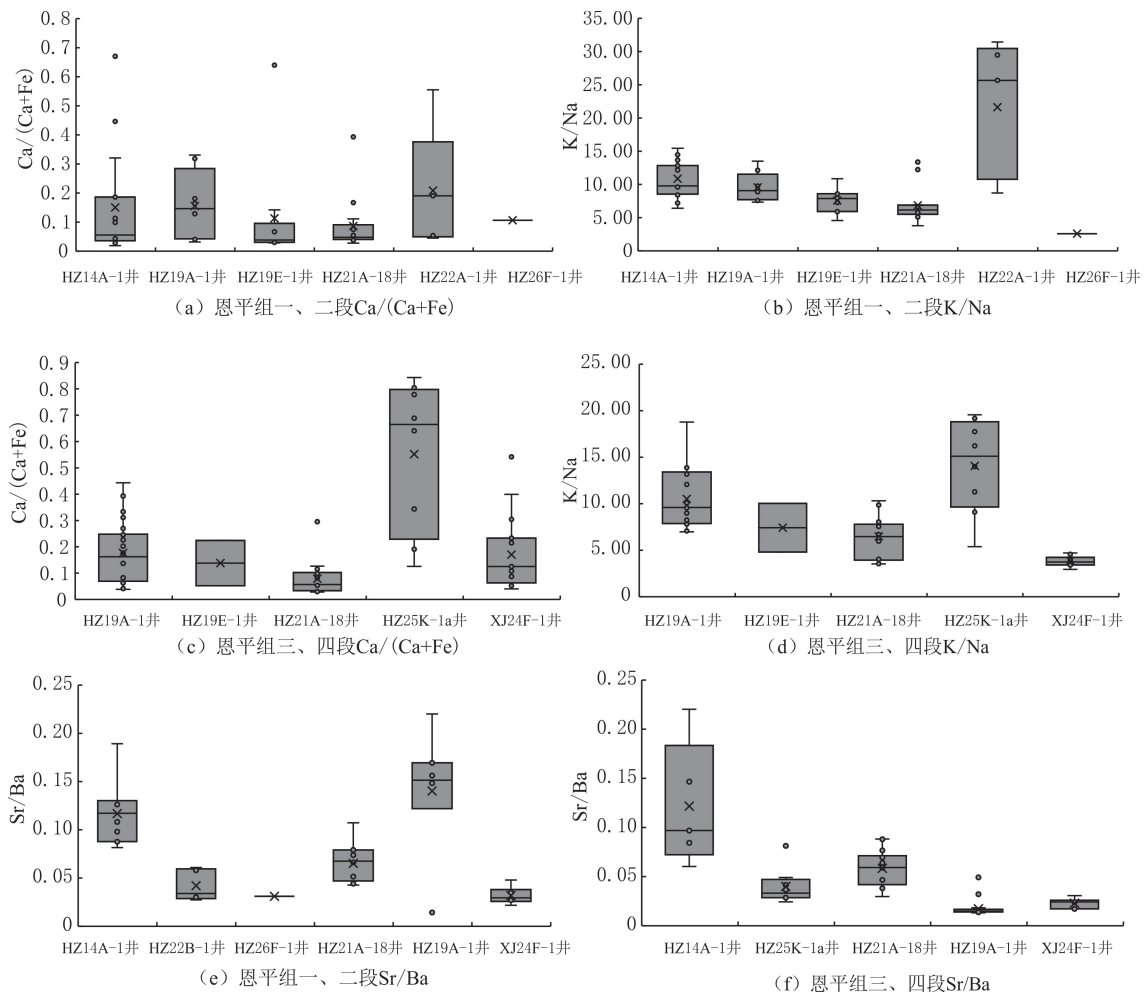


图6 惠州凹陷恩平组古水介质特征

Fig. 6 Sedimentary paleosalinity of Enping Formation in the Huizhou Sag

$\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Fe})$ 、 K/Na 和测试样品元素特征反映明显的淡水特征,说明沉积时期湖盆水体介质整体为淡水环境;少部分样品元素特征反映沉积时期水体较咸。在局部咸化的环境下,水体中离子浓度过饱和而沉淀,发育基底式胶结的早期碳酸盐矿物,伴生硬石膏矿物。惠州凹陷内部盐度略有区别,其中 HZ25N、HZ14A-1 和 HZ22A 井沉积时期水体盐度最大,具有形成早期碳酸盐胶结物的沉积流体条件,其他井和井之间整体盐度差异不大。

3.3 同位素特征

碳、氧同位素是分析碳酸盐成因、判别流体类型和来源的重要指标^[11-12]。碳同位素组成能够提供成岩流体中碳的来源信息,氧同位素组成主要反映胶结物结晶时的温度和流体成分^[14,30-34]。

惠州凹陷恩平组碳酸盐胶结物碳、氧同位素特征见图 8。由图 8(a-b)可以看出,碳酸盐胶结物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 介于 -19.00% ~ -5.60% ,平均为 -11.65% ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 介于 -18.60% ~ -7.60% ,平均为 -11.20% 。研究区各井段砂岩样品碳酸盐胶结物的碳、氧同位素数据无明显相关关系,说明碳同位素反映的物质来源与氧同位素反映的温度特征没有明显关系,碳酸盐胶结物没有经历显著的成岩蚀变^[35-36],能够代表碳酸盐胶结物原始的碳、氧同位素组成。测试样品的碳酸盐矿物碳、氧同位素纵向上无明显分带特征,氧同位素随埋深增加而略负偏,指示碳酸盐胶结物受到后期成岩流体作用,数据特征略有改变,基本保持原始特征。

将碳、氧同位素数据按照矿物类型投到碳酸盐成因判别图版(见图 8(c))^[37-39],一部分样品同位素数据落在早期成岩成因的碳酸盐区间;另一部分样品落在有机酸脱羧基作用相关的碳酸盐界定范围,指示研

究区碳酸盐成因较复杂,与同沉积时期的沉积水体及成岩阶段的含烃流体有关。

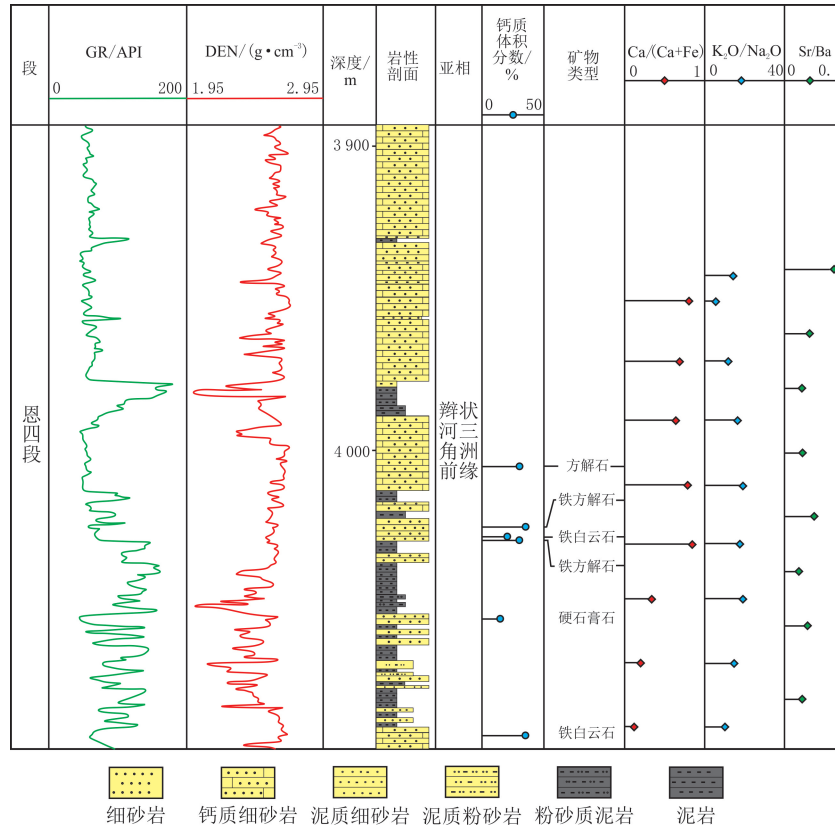
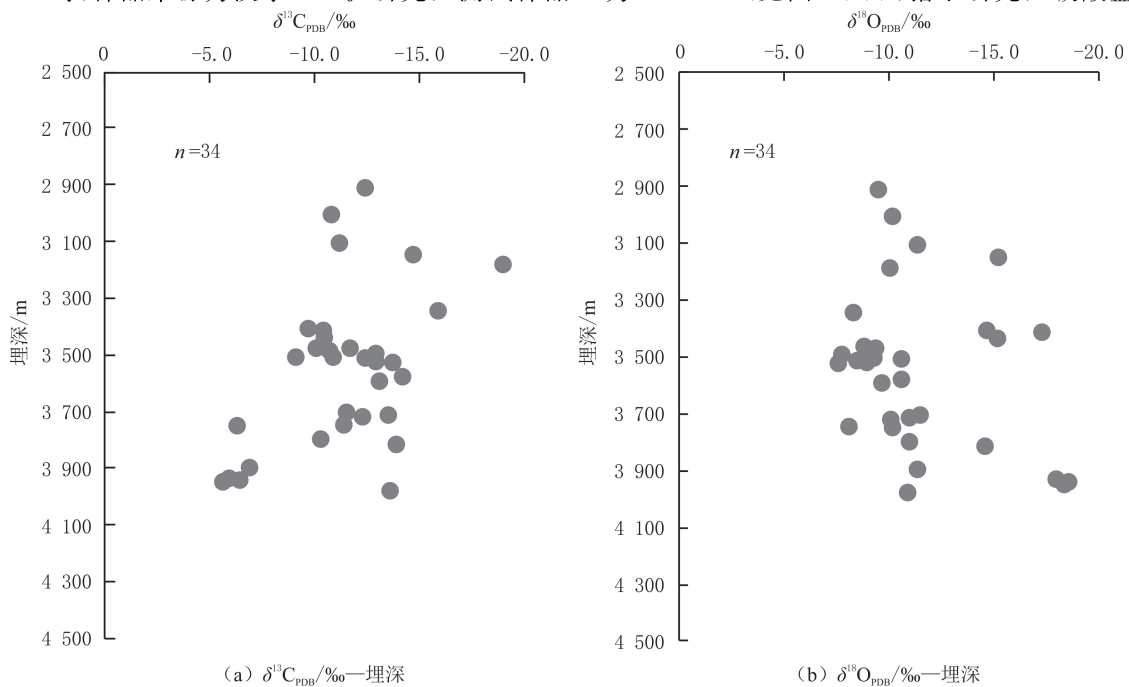


图 7 研究区 HZ25K-1a 井古水介质盐度与碳酸盐体积分数关系
Fig. 7 Relationship between paleosalinity and carbonate volume fraction in well HZ25K-1a in the study area

根据 KEITH M L 等^[12]提出的利用 $\delta^{13}C_{PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{PDB}$ 区分咸水和淡水石灰岩的经验公式 ($Z = 2.048 \times (\delta^{13}C_{PDB} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}O_{PDB} + 50)$), 分析碳酸盐胶结物, 当 Z 大于 120 时, 样品来源为海相; 当 Z 小于 120 时, 样品来源为淡水^[4, 12]。研究区测试样品 Z 为 83~109 (见图 9(a)), 指示研究区碳酸盐胶结



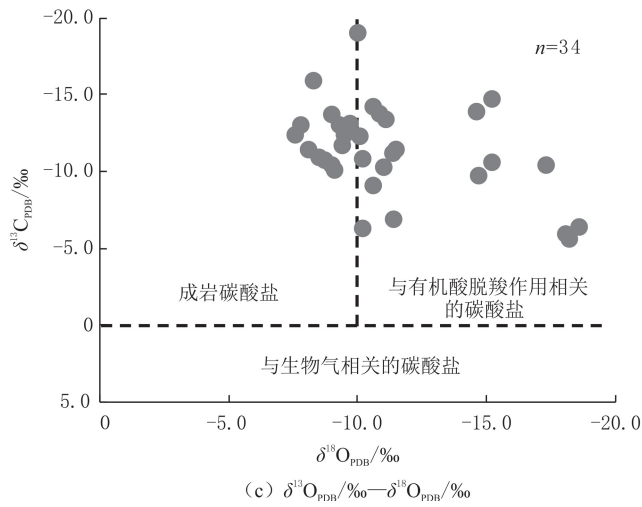


图 8 惠州凹陷恩平组碳酸盐胶结物碳、氧同位素特征

Fig. 8 Characteristics of carbon and oxygen isotopes in carbonate cement of Enping Formation in the Huizhou Sag

物形成时孔隙流体环境属于盐度较低的淡水环境,或孔隙流体与沉积时期保留下来的陆相淡水有关。碳、氧同位素反映的淡水特征与利用元素恢复的古水介质特征一致。

氧同位素组成越轻,指示胶结物形成的温度越高。根据测温计算公式^[28],碳酸盐胶结物形成温度为 40~120 °C(见图 9(b))。指示研究区碳酸盐胶结物形成的过程持续较长时间,部分样品中碳酸盐胶结物形成较早,处于早成岩阶段;部分样品温度大于 100 °C,说明碳酸盐胶结物形成时间较晚,多呈点状分布在骨架颗粒之间,形成于深埋中成岩阶段。惠州凹陷恩平组泥岩中镜质体反射率(R_o)为 0.7%~1.2%^[40],进入中成岩 A2 阶段生油高峰期,同时砂岩中出现胶结作用,析出有机质成因相关的含铁碳酸盐。

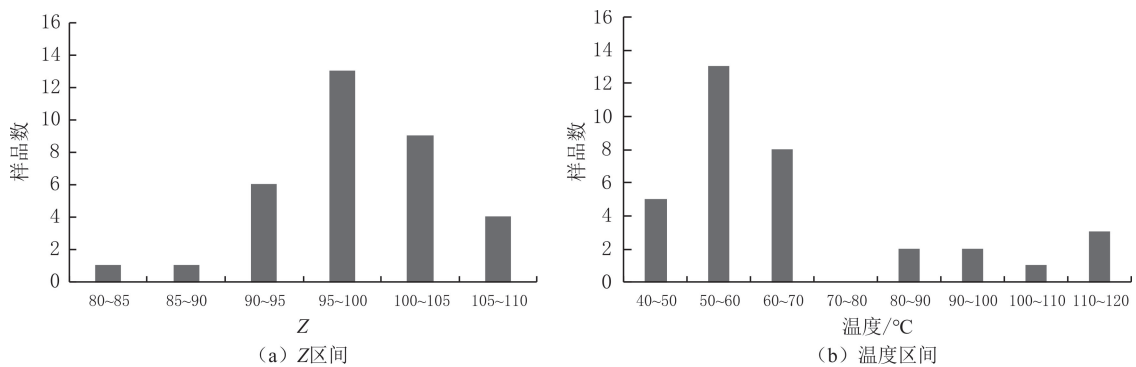


图 9 惠州凹陷恩平组碳酸盐胶结物 Z 及温度分布特征

Fig. 9 Characteristics of Z and thermal distribution in carbonate cements of Enping Formation in the Huizhou Sag

对研究区的石膏矿物进行硫同位素测试, $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 较高,为 22.72‰~31.71‰(平均为 28.53‰, $n=4$),远离幔源岩浆硫的分布范围($\delta^{34}S_{V-CDT} \approx 0$)^[41],与海水或河水影响下的湖泊环境沉积的石膏范围接近($\delta^{34}S_{V-CDT}$ 为 9.00‰~31.60‰)^[41-42],说明石膏的成因与早期碳酸盐胶结物具有相关关系,与沉积时期水体介质的条件有关。

4 碳酸盐胶结物成因分析

4.1 物质来源

惠州凹陷恩平组砂岩碳酸盐胶结物中的钙离子既可来自于早期沉积水体,也可来自于成岩期孔隙流体,以早成岩阶段为主。研究区母岩以花岗岩为主,同时受安山岩及花岗闪长岩物源影响,陆源碎屑物质

中的斜长石发生溶蚀产生 Ca^{2+} , 为碳酸盐胶结物的形成提供钙质来源。长石溶蚀形成的黏土矿物, 在后期成岩过程中进一步相互转化而释放 Ca^{2+} 。珠一坳陷在恩平组沉积晚期到珠海组沉积时期, 由陆相逐渐向海相沉积环境过渡。恩平组沉积晚期, 珠一坳陷海水间歇入侵, 海水作用为碳酸盐胶结物的生成提供钙质来源。埋藏初期, 惠州凹陷恩平组砂岩未完全固结, 地表海水沿断层及渗透层下渗, 沿途溶解易溶矿物, 携带 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 及 SO_4^{2-} 等, 与早期沉积水体环境共同作用提供钙质来源。碳酸盐在低温条件下更易发生溶解, 在中—深埋环境中较高的温度、较低的水/岩比条件下, 碳酸盐矿物比长石等铝硅酸盐矿物更难溶解^[40], 早期形成的碳酸盐难以在后期成岩过程中溶解并提供物质来源。在成岩演化过程中, 铝硅酸盐矿物水化作用、长石溶解作用、易溶岩屑溶解、黏土矿物转化和有机酸流体作用等过程, 可提供 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 等金属离子, 为碳酸盐胶结物形成提供阳离子。

利用碳同位素判断碳的物质来源, 惠州凹陷恩平组砂岩碳酸盐胶结物的碳同位素较始新世湖相灰岩的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ($-10.8\text{‰} \sim -1.29\text{‰}$)^[33] 偏负, 说明碳酸盐胶结物的形成过程中有外来轻碳的加入。成岩过程中, 有机酸脱羧作用形成的碳同位素较轻, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 在 -20.00‰ ^[21,43] 以下, 具有明显负偏的特征。根据氧同位素来源判断形成碳酸盐胶结物的流体来源, 碳酸盐胶结物的形成既与早成岩阶段的低温流体有关, 也与成岩晚期相对高温的孔隙流体有关。

4.2 富集条件

珠一坳陷古近系恩平组沉积时期为温湿气候^[22], 发育宽缓到广浅湖盆, 惠州凹陷整体水深较浅, 发育河湖、沼泽和浅水三角洲沉积。在洼陷边缘、古隆起附近或其他构造相对高部位处, 较浅的水体环境易受季节变换影响, 湖平面反复上升、下降, 间歇性暴露和淹没交互, 相对蒸发量大, 导致局部水体咸化。早期胶结物发育于辫状河三角洲平原亚相及扇三角洲相(见图 10)。早期沉积物中颗粒分布松散, 孔隙度高, 与下伏地层中浓缩的孔隙流体接触, 浓缩的孔隙流体沿毛细管上升, 相对富 Ca^{2+} 的流体向上抽汲, 在砂体顶部形成 Ca^{2+} 过饱和的碱性水体环境, 早期碳酸盐胶结物沉淀析出。局部物源及海水作用带来的金属阳离子使水体局部微咸化, 淡水—微咸水的古水介质条件促进含钙矿物的析出。同生—早成岩阶段, 砂岩内部剩余孔隙水继承沉积时期的水介质条件, 钙质矿物持续析出, 形成致密的钙质砂岩。

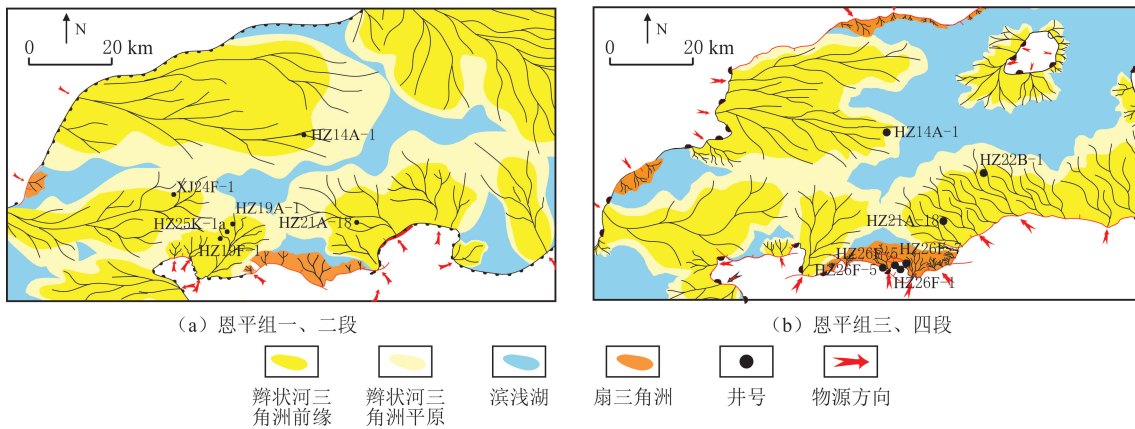


图 10 惠州凹陷恩平组沉积相与早期胶结物分布

Fig. 10 The distribution of sedimentary facies and early cements of Enping Formation in the Huizhou Sag

受构造、气候和地貌等叠加作用影响, 在整体为淡水环境的水介质条件下, 恩平组沉积时期的惠州凹陷局部表现为 Ca^{2+} 过饱和的偏碱性微咸水环境, 控制早期钙质碳酸盐矿物的富集。成岩过程中, 碳酸盐胶结物的析出与成岩流体环境关系密切。烃类有机质演化形成有机酸, 后期脱羧基形成含 CO_2 流体, 由靠近烃源的高势区向低势区运移。断层或其他优势运移路径附近酸性强, 多表现为溶蚀区, 烃类运移的远端酸性较小且富含沿途携带的金属阳离子, 形成碳酸盐胶结物。有机碳加入在相对高温条件下沉淀的自生碳酸盐矿物。有部分钻井分布于断层附近, 裂缝发育, 流体活动活跃, 形成充填裂缝的后期亮晶方解石脉体。

4.3 形成过程

在陆相淡水的沉积背景下, 惠州凹陷恩平组洼陷边缘及隆起附近的局部构造高部位水体较浅, 易发生

季节性、间歇性的偶尔暴露,造成局部水体发生咸化,通常含钙盐类在湖泊水体中溶解度不大,碳酸钙从过饱和的碱性水体中直接析出,形成早期碳酸盐胶结物。早期碳酸盐胶结物原始沉积的最初 C、O 来源与沉积时水体有关。碳酸盐胶结物多以基底式胶结产状产出,化学元素指标指示淡水—微咸水沉积环境,碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 指示早期成岩成因和形成碳酸盐胶结物的孔隙水介质为淡水来源。碳酸盐矿物胶结物类型与流体中不同类型的离子浓度有关,当 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 较大时形成白云石;反之,形成方解石。

在沉积水介质为偏碱性的微咸水环境下,随砂岩埋藏深度增大,地层温度升高,如果孔隙流体中存在早期沉积水体中的硫酸根和钙离子,温度的升高有利于硫酸根和钙离子在埋藏早期过饱和而形成石膏矿物。镜下可见石膏类矿物形成于岩石颗粒点—线接触和点接触,属于浅埋藏形成的自生矿物。在成岩演化过程中,部分石膏矿物脱水转化而形成硬石膏矿物。随成岩演化进一步加强,部分早期形成的碳酸盐后期发生重结晶而呈连晶状分布,或被晚期含铁方解石交代,碳酸盐形成的温度超过 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

成岩期形成的碳酸盐胶结物常充填于孔隙,矿物类型以方解石、铁方解石为主,可见少量铁白云石,碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 落于与有机酸脱羧基作用相关的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 区间。部分样品温度超过 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$,碳酸盐胶结物形成时间较晚,处于深埋阶段,是有机质生排烃的主要时期。有机酸在热催化作用下脱羧产生烃类和 CO_2 , CO_2 可与烃类一道运移进入储层。随黏土矿物的热演化,不同的矿物离子进行分异。当地层温度、压力及流体的 pH 等物理化学条件发生改变,离子过饱和并以不同的碳酸盐胶结物形式沉淀下来。有机流体的影响使储层碳酸盐胶结物的碳同位素数据表现负偏特征,砂岩中的碳酸盐矿物的碳同位素数据越负偏,有机碳的参与程度越大,有机流体与砂岩相互作用不均一,导致样品的碳同位素数据分布离散。

5 结论

(1)惠州凹陷恩平组沉积时期气候暖湿,发育浅水辫状河沉积,部分砂岩段发育碳酸盐胶结物,矿物类型为方解石、白云石、铁方解石及铁白云石等,对储层孔渗主要起破坏作用。碳酸盐胶结物主要以基底式及孔隙式产状产出。

(2)惠州凹陷恩平组砂岩中基底式胶结的碳酸盐矿物为淡水背景下的局部咸化成因,矿物类型以方解石、白云石为主。部分发育早期碳酸盐胶结物的砂岩样品中可见浅埋藏期形成的石膏类矿物。有部分早期碳酸盐胶结物在成岩过程中发生重结晶而呈连晶状分布,或被晚期含铁方解石交代。充填于孔隙或胶结、交代颗粒产出的碳酸盐胶结物为中—晚成岩期产物,矿物类型以方解石、铁方解石、铁白云石为主,胶结物的形成与有机酸脱羧作用相关。

(3)恩平组三、四段沉积时期,基底式胶结的碳酸盐矿物大多分布于断裂活动引起的逆牵引古隆起附近;恩平组一、二段沉积时期,基底式胶结的碳酸盐矿物分布于洼陷边缘及水下古隆起附近。孔隙式碳酸盐胶结物的分布与烃类运移及断裂体系有关。裂缝中的碳酸盐脉体与断层活动有关。

参考文献(References):

- [1] CARLOS R, RAFAELA M, KARL R. Facies-related diagenesis and multiphase siderite cementation and dissolution in the reservoir sand-stones of the Khatatba Formation, Egypt western desert[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001,71(3):459-472.
- [2] 王思琦,鲜本忠,万锦峰,等.南堡凹陷滩海地区东营组和沙河街组一段储层特征及其成因机制[J]. *东北石油大学学报*, 2015,39(4):54-62.
WANG Siqi, XIAN Benzong, WAN Jinpeng, et al. Reservoir characteristics and controlling factors in the offshore areas, the Eocene period of the Nanpu Sag[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2015,39(4):54-62.
- [3] 谭先锋,蒋威,吴康军,等.陆相碎屑岩中钙质胶结物沉淀机制及油气储集意义:来自济阳拗陷孔店组和川西须家河组的对比研究[J]. *石油实验地质*, 2016,38(3):293-302.
TAN Xianfeng, JIANG Wei, WU Kangjun, et al. Sedimentation mechanism and petroleum significance of calcareous cements in continental clastic rocks: comparison between the Kongdian Formation in the Jiyang Depression and the Xujiahe Formation in the Western Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016,38(3):293-302.
- [4] 陈秀艳,王剑,张立平,等.塔里木盆地哈拉哈塘地区石炭系东河砂岩段碳酸盐胶结物沉积特征及其成因[J]. *吉林大学学报(地球科学)*

- 版), 2020, 50(2): 509-517.
- CHEN Xiuyan, WANG Jian, ZHANG Liping, et al. Sedimentary characteristics and genesis of carbonate cements in Carboniferous Donghe Sandstone Member, Hanilcatam Area of Tarim Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2020, 50(2): 509-517.
- [5] 徐北煤, 卢冰. 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[J]. 沉积学报, 1994, 12(3): 56-63.
- XU Beimei, LU Bing. The study of diagenetic carbonate in siliciclastic rock and its control on the reservoir[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(3): 56-63.
- [6] 王琪, 郝乐伟, 陈国俊, 等. 白云凹陷珠海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 553-565.
- WANG Qi, HAO Lewei, CHEN Guojun, et al. Forming mechanism of carbonate cements in siliciclastic sandstone of Zhuhai Formation in Baiyun Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 553-565.
- [7] 田亚铭, 施泽进, 李庭艳, 等. 姬塬地区长 8 油层组碳酸盐胶结物特征与成因[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2011, 26(3): 26-30.
- TIAN Yaming, SHI Zejin, LI Tingyan, et al. Characteristics and origin of the carbonate cements of Chang 8 Member in Jiyuan Area, Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2011, 26(3): 26-30.
- [8] 常思远, 陈冬霞, 汪成, 等. 深层储层原生孔隙成岩作用保存机制及模式: 以珠江口盆地惠州凹陷南部恩平组 and 文昌组为例[J]. 东北石油大学学报, 2022, 46(2): 72-85.
- CHANG Siyuan, CHEN Dongxia, WANG Cheng, et al. Preservation mechanism and model of primary pore diagenesis in deep reservoirs: taking the Enping Formation and Wenchang Formation in the south of Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin as examples[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022, 46(2): 72-85.
- [9] 王翔, 高吉宏, 庞玉东, 等. 鄂尔多斯盆地 M34 区块侏罗系延 10 段砂质辫状河储层特征及控制因素[J]. 东北石油大学学报, 2024, 48(3): 23-39.
- WANG Xiang, GAO Jihong, PANG Yudong, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of Jurassic Yan 10 Member sandy braided river of M34 Block, Ordos Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2024, 48(3): 23-39.
- [10] 钟玉婷, 董艳蕾, 李顺利, 等. 珠三拗陷珠海组海陆过渡相沉积特征及储层控制因素[J]. 东北石油大学学报, 2023, 47(4): 39-56.
- ZHONG Yuting, DONG Yanlei, LI Shunli, et al. Sedimentary characteristic and reservoir controlling factors of sea-land transition in Zhuhai Formation, Zhu-3 Depression[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2023, 47(4): 39-56.
- [11] MARCO A S, RONALD C S. Diagenetic heterogeneity and reservoir quality: fluvial, deltatic and turbiditic sandstone reservoirs, potigular and reconcavo rift basins, Brazil[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77: 1142-1156.
- [12] KEITH M L, WEBER J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1964, 28(10/11): 1787-1816.
- [13] 姚泾利, 王琪, 张瑞, 等. 鄂尔多斯盆地中部延长组砂岩中碳酸盐胶结物成因与分布规律研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 943-950.
- YAO Jingli, WANG Qi, ZHANG Rui, et al. Origin and spatial distribution of carbonate cements in Yanchang Fm. (Triassic) sandstones within the lacustrine center of Ordos Basin, NW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 943-950.
- [14] 孙福宁, 胡文瑄, 胡忠亚, 等. 断裂—层序双控机制下的热液活动及成储效应: 以塔里木盆地塔河、玉北地区下奥陶统为例[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 558-575.
- SUN Funing, HU Wenxuan, HU Zhongya, et al. Impact of hydrothermal activities on reservoir formation controlled by both faults and sequences boundaries: a case study from the Lower Ordovician in Tahe and Yubei Areas, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 558-575.
- [15] 崔景伟, 朱如凯. 致密砂岩层内强钙质胶结物成因机制及其意义: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 油层组为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(4): 957-967.
- CUI Jingwei, ZHU Rukai. Mechanism of strong calcium cementation in tight sandstone and its significance: a case study on Triassic Chang 7 oil formation of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2020, 50(4): 957-967.
- [16] 张月霞, 丁琳, 周凤娟, 等. 珠江口盆地珠一拗陷古近系砂岩储层渗透率和埋深下限研究[J]. 海相油气地质, 2023, 28(3): 311-322.
- ZHANG Yuexia, DING Lin, ZHOU Fengjuan, et al. Study on the lower limits of permeability and buried depth of Paleogene sandstone reservoirs in the Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2023, 28(3): 311-322.
- [17] 王绪诚, 杜家元, 张琴, 等. 惠西南地区古近系转换带型源-汇系统研究及其勘探意义[J]. 中国海上油气, 2020, 32(5): 44-53.
- WANG Xucheng, DU Jiayuan, ZHANG Qin, et al. Study of source-sink system of transfer zone type of Palaeogene in southwestern area of the Huizhou Sag and its exploration significance[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(5): 44-53.
- [18] 龙更生, 施和生, 郑荣才, 等. 珠江口盆地惠州凹陷深部古近系储层特征及发育控制因素[J]. 海相油气地质, 2011, 16(3): 71-78.
- LONG Gengsheng, SHI Hesheng, ZHENG Rongcai, et al. Characteristics and development controlling factors of Paleogene deep

- reservoirs in Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2011,16(3):71-78.
- [19] 刘培,彭光荣,熊万林,等. 珠江口盆地惠州凹陷惠东新区恩平组烃源岩生烃特征及成藏贡献[J]. *中国海上油气*, 2024,36(1):49-60.
LIU Pei, PENG Guangrong, XIONG Wanlin, et al. Hydrocarbon generation characteristics and reservoir forming contribution of Enping Formation source rocks in Huidong New Area, Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2024, 36(1):49-60.
- [20] 曾智伟. 南海北部珠江口盆地古近纪—汇系统耦合研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉), 2020:113-136.
ZENG Zhiwei. Source-to-sink(S2S) system analysis of the Paleogene in the Pearl River Mouth Basin, Northern South China Sea[D]. Wuhan: China University of Geoscience(Wuhan), 2020:113-136.
- [21] 刘振宇. 惠州凹陷恩平组烃源岩发育与沉积相关关系[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020:31-42.
LIU Zhenyu. Relationship between source rocks and sedimentary facies of Enping Formation in Huizhou Sag[D]. Beijing: China University of Geoscience(Beijing), 2020:31-42.
- [22] 周凤娟,丁琳,李晓艳,等. 珠一坳陷文昌组锆石定年物源示踪及其对储层的影响[J]. *非常规油气*, 2023,10(3):46-54.
ZHOU Fengjuan, DING Lin, LI Xiaoyan, et al. Provenance tracing of zircon dating from Wenchang Formation in Zhu I Depression and its influence on reservoir[J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023,10(3):46-54.
- [23] 吴国璋,覃军干,茅绍智. 南海深海相渐新统孢粉记录[J]. *科学通报*, 2003,48(17):1868-1871.
WU Guoxuan, QIN Jungan, MAO Shaozhi. Deep-sea pollen records of Oligocene in South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003,48(17):1868-1871.
- [24] 米立军. 珠江口盆地油气储层[M]. 北京:科学出版社, 2021:5-7.
MI Lijun. Reservoirs of oil and gas in Pearl River Mouth Basin[M]. Beijing: Science Press, 2021:5-7.
- [25] 郭巧珍,陈峰,杨香华,等. 珠江口盆地惠州凹陷恩平组浅水辫状河三角洲沉积例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013,33(1):25-32.
GUO Qiaozhen, CHEN Feng, YANG Xianghua, et al. Shallow braided deltaic system in Enping Formation of Huizhou Depression, Pearl River Mouth[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013,33(1):25-32.
- [26] 高阳东,林鹤鸣,汪旭东,等. 幕式裂陷控注背景下的烃源岩分布及岩浆改造:以珠一坳陷番禺4洼为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021,41(4):151-160.
GAO Yangdong, LIN Heming, WANG Xudong, et al. Source rock distribution pattern in an episodic rifting sag and later stage magmatic reformation: a case from Panyu 4 Sag, Zhu I Depression[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021,41(4):151-160.
- [27] 谢世文,王宇辰,舒誉,等. 珠一坳陷湖盆古环境恢复与优质烃源岩发育模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022,42(1):159-169.
XIE Shiwen, WANG Yuchen, SHU Yu, et al. Environmental reconstruction for the paleo-lake of Zhu I Depression and the depositional model for high-quality source rocks[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022,42(1):159-169.
- [28] 丁琳,舒誉,蓝倩,等. 惠州凹陷古近系恩平组层序地层划分及展布特征[J]. *中国海上油气*, 2008,20(6):159-169.
DING Lin, SHU Yu, LAN Qian, et al. Sequence stratigraphy and distribution of Palaeogene Enping Formation in Huizhou Depression[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2008,20(6):159-169.
- [29] 杨超群,贺同兴,翁世劫,等. 广东省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1988:603-606.
YANG Chaoqun, HE Tongxing, WENG Shijie, et al. Regional geology of Guangdong Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:603-606.
- [30] 韩俊,尤东华,钱一雄,等. 微区原位碳氧同位素分析技术对碳酸盐岩成岩流体性质的约束[J]. *石油实验地质*, 2023,45(1):135-144.
HAN Jun, YOU Donghua, QIAN Yixiong, et al. Constraints on carbonate diagenetic fluid properties by microzone in situ analysis of carbon and oxygen isotopes: a case study of Cambrian-Ordovician, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023,45(1):135-144.
- [31] SCHOBEN M, ULLMANN C V, LEDA L, et al. Discerning primary versus diagenetic signals in carbonate carbon and oxygen isotope records: an example from the Permian-Triassic boundary of Iran[J]. *Chemical Geology*, 2016,422:94-107.
- [32] WU H, HU W, TANG Y, et al. The impact of organic fluids on the carbon isotopic compositions of carbonate-rich reservoirs: case study of the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017,85:136-150.
- [33] CHEN J, LI G, YANG J, et al. Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: implications for the provenances of Asian dust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007,71(15):3904-3914.
- [34] 梁俊红,孙宝亮,尹国英. 中国湖相碳酸盐岩碳氧同位素时空特征及其古湖泊学意义[J]. *地质找矿论丛*, 2022,37(4):469-483.
LIANG Junhong, SUN Baoliang, YIN Guoying. Temporal and spatial characteristics of C-O isotopes of lacustrine carbonate in China and the paleolimnological significance[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2022,37(4):469-483.
- [35] 吕成福,李晓燕,陈国俊,等. 酒东坳陷下白垩统砂岩中碳酸盐胶结物特征与储层物性[J]. *沉积学报*, 2011,29(6):1138-1143.
LYU Chengfu, LI Xiaoyan, CHEN Guojun, et al. Characteristics of carbonate cements and reservoir quality of the Lower Cretaceous

- sandstone in Jiudong Sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011,29(6):1138-1143.
- [36] 罗顺社,吕奇奇,席明利,等.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[J].*石油与天然气地质*,2015,36(5):745-755.
LUO Shunshu, LYU Qiqi, XI Mingli, et al. Types, carbon/oxygen isotope characteristics and depositional environments of the Lower Ordovician contourites in Jiuxi and Yuanguping of North Hunan Province, China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015,36(5):745-755.
- [37] 佟恺林,周安富,罗强,等.四川盆地泸州中部地区龙马溪组构造裂缝期次及演化模式[J].*东北石油大学学报*,2024,48(5):17-26.
TONG Kailin, ZHOU Anfu, LUO Qiang, et al. Tectonic fracture stages and evolution model of Longmaxi Formation in Central Luzhou Area, Sichuan Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(5):17-26.
- [38] 王大锐.油气稳定同位素地球化学[M].北京:地质出版社,2000:116.
WANG Darui. Stable isotope geochemistry of oil and gas[M]. Beijing: Geological Press, 2000:116.
- [39] 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):31-33.
GUO Hongli, WANG Darui. Stable isotopic composition and origin analysis of the carbonate cements within sandstone reservoirs of Tarim oil-gas bearing area[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999,26(3):31-33.
- [40] 袁才,彭光荣,温华华,等.珠江口盆地惠州凹陷恩平组源岩特征及勘探潜力[J].*海洋地质与第四纪地质*,2017,37(2):149-159.
YUAN Cai, PENG Guangrong, WEN Huahua, et al. A new source rock in Huizhou Sag of Pearl River Mouth Basin and its exploration potential[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2017,37(2):149-159.
- [41] 谢丽丽,孟凡巍,卓勤功,等.山东大汶口盆地石盐地球化学特征及其成因[J].*盐湖研究*,2023,31(3):59-68.
XIE Lili, MENG Fanwei, ZHUO Qingong, et al. Geochemical characteristics of evaporites from halite deposits in Dawenkou Basin, Shandong Province[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2023,31(3):59-68.
- [42] 李延河,段超,范昌福,等.膏盐层在内生金属矿床成矿中的作用研究[J].*矿产勘查*,2024,15(8):1391-1408.
LI Yanhe, DUAN Chao, FAN Changfu, et al. The role of evaporite layers in the mineralization of endogenous metal deposits[J]. *Mineral Exploration*, 2024,15(8):1391-1408.

.....

(上接第24页)

- [39] 李文鏢,卢双舫,李俊乾,等.南方海相页岩物质组成与孔隙微观结构耦合关系[J].*天然气地球科学*,2019,30(1):27-38.
LI Wenbiao, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. The coupling relationship between material composition and pore microstructure of Southern China marine shale[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019,30(1):27-38.
- [40] LOUCKS R G, REED R M. Scanning-electron-microscope petrographic evidence for distinguishing organic matter pores associated with depositional organic matter versus migrated organic matter in mudrocks[J]. *Gulf Coast Association of Geological Societies Journal*, 2014,3:51-60.
- [41] SHAO D Y, ZHANG T W, KO L T, et al. Experimental investigation of oil generation, retention, and expulsion within type II kerogen-dominated marine shales: insights from gold-tube nonhydrous pyrolysis of Barnett and Woodford shales using miniature core plugs[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020,217:103337.
- [42] 王濡岳,胡宗全,龙胜祥,等.四川盆地上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组页岩储层特征与演化机制[J].*石油与天然气地质*,2022,43(2):353-364.
WANG Ruyue, HU Zongquan, LONG Shengxiang, et al. Reservoir characteristics and evolution mechanisms of the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022,43(2):353-364.