

doi: 10.19509/j.cnki.dzkg.2018.0310

曹家鑫,何方方,朱蓉,等.梨树断陷营城组砂岩方解石胶结物碳、氧同位素特征[J].地质科技情报,2018,37(3):75-80.

梨树断陷营城组砂岩方解石胶结物碳、氧同位素特征

曹家鑫¹,何方方¹,朱蓉¹,楼章华¹,黄党委²

(1. 浙江大学海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 中国石油化工股份有限公司东北油气分公司勘探开发研究院, 长春 130062)

摘要:梨树断陷深层砂岩中广泛分布着方解石胶结物,方解石胶结作用对梨树断陷深部储层的致密化有着重要影响。以苏家屯—皮家地区砂岩储层中方解石胶结物为研究对象,结合岩相学特征,包裹体测试和碳、氧同位素分析,查明了方解石胶结物碳、氧同位素及其成因。研究表明,储层砂岩类型为岩屑质长石砂岩、长石质岩屑砂岩、长石砂岩。方解石胶结物碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-16\text{‰} \sim -0.4\text{‰}$,平均值为 -6.67‰ 。氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为 $-23.2\text{‰} \sim -13.2\text{‰}$,平均值为 -20.1‰ 。通过对碳、氧同位素数据计算分析,得到碳酸盐的相对古盐度值(Z)介于 83.48~117.61 之间,表明其形成时的古流体具有淡水的特征。方解石的形成温度为 $94.06 \sim 179.43^\circ\text{C}$ 。方解石胶结物碳氧同位素特征分析结果表明,其形成与有机酸脱羧作用有关,可能来源于有机碳。

关键词:梨树断陷;碳氧同位素;方解石胶结物

中图分类号: P588.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-7849(2018)03-0075-06

我国“两深一非”(深海、深层、非常规)领域油气资源丰富,正在成为我国油气业进一步发展的新增长点^[1]。常规油气藏向非常规油气藏的不断转变,推动了全球非常规油气勘探开发的不断发展,世界能源的供应格局也逐步改变^[2]。松辽盆地梨树断陷勘探已有多年的勘探历史^[3],其中浅层储层勘探程度较高,现已经逐渐转向深部低孔低渗储层。梨树断陷苏家屯—皮家地区营城组砂岩平均孔隙度为 8.2%,平均渗透率为 $0.24 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,总体上属于低孔、低渗储层^[4]。该区储层砂岩的致密化过程与油气成藏过程的先后关系对于勘探至关重要。研究区地处梨树断陷北部的上斜坡上,是主要的物源过路区,深湖一半深湖相泥质岩沉积厚度有限,主要发育滨浅湖与辫状河三角洲沉积体系^[5]。

储层砂岩中方解石胶结物对砂岩的致密化有重要的影响,因此利用岩石学和碳、氧同位素研究结果探讨方解石胶结物中碳的来源,计算形成温度、流体盐度等,可以为成岩流体演变研究提供证据。

1 方法技术

在对手标本和岩石薄片镜下鉴定资料的整理、统计分析的基础上,采集分析苏家屯—皮家地区砂岩样品,切制薄片 24 片,并观察其岩相学相关特征,

对研究区 13 口勘探井完井报告中储层砂岩骨架碎屑成分和胶结物类型进行了统计。在对研究区砂岩石学相关特征的系统研究基础上,对研究区储层砂岩中的流体包裹体和碳、氧同位素特征进行了测试分析。运用 Leica 透反射偏光—荧光显微镜与 LINKAN THMS600 型冷热台测温完成包裹体测试,测试依据为 EJ/T 1105-1999(矿物流体包裹体温度的测定);碳、氧稳定同位素由 MAT253 型同位素比值质谱仪测定。具体分析流程:用玛瑙研钵将适量含有碳酸盐胶结物的样品研磨至 0.071 mm (200 目),烤箱在 105°C 下烘烤样品 2 h,去除吸附水。在 75°C 下烘烤 Gasbench 在线制样设备的样品管,烘干后将约含有 0.2 mg 碳酸盐胶结物的样品放入样品管中并封盖。用高纯氮气将样品管中的空气排出。用酸泵酸针向样品管中加过量的 100% 磷酸。在 25°C 时磷酸与样品中的方解石反应产生 CO_2 气体,用高纯氮气将生成的 CO_2 气体带入 MAT253 质谱仪测试方解石的 C、O 同位素组成。每 5 个样品加入一个标准,用参考气对其比对测试,其精度分别优于 $\pm 0.1\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$ 。碳酸盐样品标样 GB04416,其 $\delta^{13}\text{C} = (1.61 \pm 0.03)\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = (-11.59 \pm 0.11)\text{‰}$;标样 GB04417,其 $\delta^{13}\text{C} = (-6.06 \pm 0.06)\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O} = (-24.12 \pm 0.19)\text{‰}$ 。所有测试均在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。

收稿日期: 2016-12-16

编辑: 刘江霞

基金项目: 中国石油化工股份有限公司东北油气分公司科技处科研项目“梨树断陷保存条件研究”(G04KT-09-2S-07)

作者简介: 曹家鑫(1990—),男,现正攻读海洋科学专业硕士学位,主要从事石油地质研究工作。E-mail: caojiaxin@zju.edu.cn

通信作者: 朱蓉(1974—),女,副研究员,主要从事石油地质研究工作。E-mail: zhurong@zju.edu.cn

2 岩石学及方解石碳、氧同位素特征

2.1 岩石学特征

薄片鉴定和骨架碎屑成分镜下统计 24 件样品,并对该区相应井的完井报告资料中地层岩性特征进行了统计分析(图 1),结果表明该区主要为岩屑质长石砂岩、长石质岩屑砂岩、长石砂岩。砂岩成分成熟度中等至低,石英占 30%~54%,长石占 40%~60%,岩屑占 20%~35%。中度泥化、绢云母化。长石以斜长石为主,镜下可见其聚片双晶;钾长石次之。岩屑成分以喷出岩、凝灰岩、石英岩为主。岩石结构成熟度较差,碎屑颗粒外形呈圆一次棱角状,分选中等—差。胶结类型为基底式、孔隙—接触式,较致密。以泥质胶结、钙质胶结为主,也有硅质胶结,钙质胶结的胶结物以方解石为主。完井地质报告统计见表 1 和图 2,其中苏家屯—皮家地区的砂岩以方解石胶结为主(占 60%),泥质胶结次之;方解石除了作胶结物外,部分还交代了长石和岩屑。

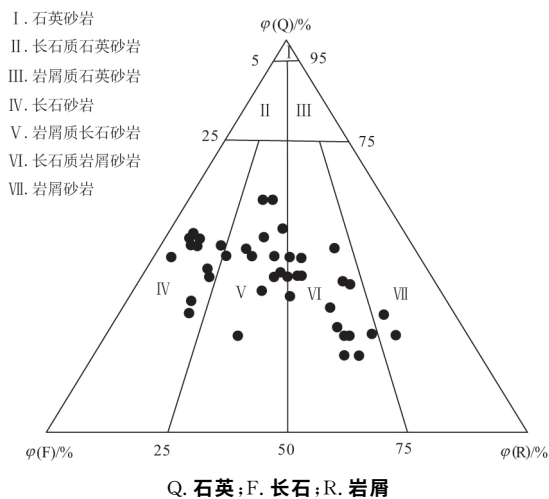


图 1 苏家屯—皮家地区砂岩碎屑组成

Fig. 1 Clastic constituents of sandstone in Sujiatun-Pijia area

表 1 研究区营城组砂岩胶结物统计

Table 1 Statistical table of cement of the Yingcheng Formation sandstone in the study area

井名	样品数	胶结物	资料来源
SN92	1	方解石	SN92 井完井报告
SN132	4	方解石	SN132 井完井报告
SN132	1	硅质、长石质	SN132 井完井报告
SN133	2	方解石	SN133 井完井报告
SN137	1	方解石、少量硅质	SN137 井完井报告
SN138	2	泥质	SN138 井完井报告
SN138	3	方解石	SN138 井完井报告
SN139	1	灰质、泥质	SN139 井完井报告
SW333	7	泥质,含灰质	SW333 井完井报告
SW333	3	亮晶方解石溶蚀交代	SW333 井完井报告
SW334	4	泥质	SW334 井完井报告
SW335	1	泥质	SW335 井完井报告
SW336	3	泥质,含灰质	SW336 井完井报告
苏 2	9	方解石,有交代碎屑现象	苏 2 井完井报告
苏 2	1	伊利石	苏 2 井完井报告
苏 4	2	泥质	苏 4 井完井报告
苏 4	5	方解石有交代碎屑现象	苏 4 井完井报告
苏 4	2	亮晶白云石交代	苏 4 井完井报告
苏 4	3	泥质,含灰质	苏 4 井完井报告

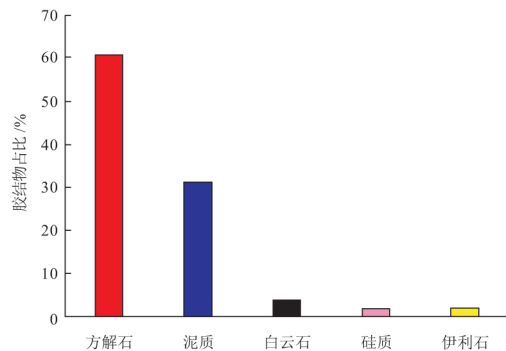


图 2 苏家屯—皮家地区砂岩胶结物类型及百分比

Fig. 2 Type and percentage of sandstone cements in Sujiatun-Pijia area

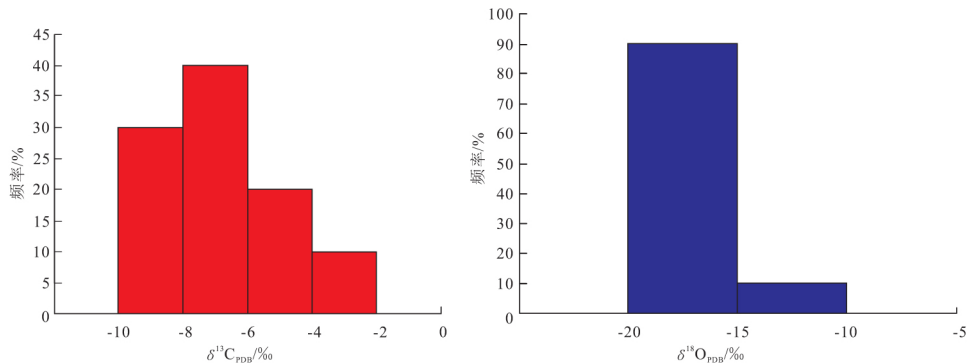


图 3 苏家屯—皮家地区营城组砂岩方解石胶结物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 频率分布

Fig. 3 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ frequency map of calcite cement of the Yingcheng Formation sandstone in Sujiatun-Pijia area

2.2 方解石碳、氧同位素特征

梨树断陷苏家屯—皮家地区营城组储层砂岩中方解石胶结物碳、氧同位素测试分析的结果见表2,其频率分布范围见图3,其中方解石碳同位素

$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-8.7\text{‰} \sim -3.9\text{‰}$, 平均值为 -6.7‰ 。

$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值为 $-23.2\text{‰} \sim -15.6\text{‰}$, 平均值为 -21.4‰ 。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $6.9\text{‰} \sim 14.8\text{‰}$, 平均值为 8.78‰ 。

表2 梨树断陷苏家屯—皮家营城组砂岩方解石胶结物 $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试分析及其 Z 值的计算结果

Table 2 Measured $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ and calculated Z values of calcite cement of the Yingcheng Formation sandstone in Sujiatun-Pijia area of Lishu Fault Depression

井号	深度 h/m	测试结果			计算结果		
		$^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	相对古盐度 $Z^{[6]}$	古温度 $T/^{\circ}\text{C}^{[7]}$	胶结环境
苏4	3 377.55	-7.8	-15.3	15.2	103.71	109.52	淡水渗流
SN139	1 915.20	-4.1	-15.6	14.8	111.13	112.57	淡水渗流
SN92	2 183.40	-7.0	-20.4	9.9	102.80	152.54	淡水渗流
SN92	2 239.91	-8.0	-21.3	8.9	100.31	161.30	淡水渗流
SW33x	2 433.50	-7.5	-21.9	8.3	101.03	166.65	淡水渗流
SN132	2 330.32	-6.0	-21.9	8.3	104.11	166.65	淡水渗流
SW333	2 996.90	-3.9	-22.0	8.3	108.36	166.65	淡水渗流
梨2	2 675.86	-7.9	-22.4	7.8	99.97	171.17	淡水渗流
SN137	2 565.00	-8.7	-22.7	7.4	98.18	174.82	淡水渗流
SN132	2 646.50	-5.5	-23.0	7.2	104.58	176.66	淡水渗流
SW30	2 918.21	-8.4	-23.2	6.9	98.54	179.43	淡水渗流

3 讨论

3.1 碳来源

不同成岩环境下形成的碳酸盐胶结物具有不一样的碳、氧同位素组成,碳同位素可以用来反映包括细菌硫酸盐还原、发酵、碳酸盐矿物溶解、甲烷氧化、甲烷产生和有机质脱羧基等碳的来源^[8-11]。笔者采用王大锐^[12]编制的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 图解来确定方解石胶结物的碳来源^[13]。在图4中,Ⅰ区为埋藏较浅时与硫酸盐还原作用有关的碳酸盐,Ⅱ区为与甲烷细菌活动生成生物气有关的碳酸盐;Ⅲ区为与有机酸脱羧作用有关的碳酸盐。本次分析测试的数据中,方解石胶结物的碳氧同位素分析数据落于Ⅲ区,

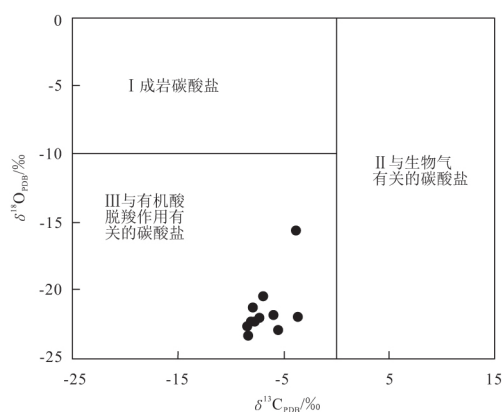


图4 苏家屯—皮家地区砂岩方解石胶结物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 散点图(底图据文献^[12])

Fig. 4 Scatter diagram of $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ of calcite cement of sandstone in Sujiatun-Pijia area

说明方解石胶结物的碳来源与有机酸脱羧作用有关。根据碳、氧同位素的特征^[14-15]判定苏家屯—皮家地区的砂岩成岩环境如图5,样品数据均落在Ⅲ区,说明其成岩过程受有机质氧化分解作用影响,在一定程度上说明这些砂岩碳酸盐胶结物形成过程中受到了较为强烈的有机质影响,碳酸盐胶结物的沉淀多与相对更深部位含有机酸的孔隙流体侵入有关。根据有机酸的演化过程推断,在研究区深部,由于强烈的热催化作用,致使有机酸发生分解而不断释放 CO_2 : $\text{RCOOH} \rightarrow \text{RH} + \text{CO}_2$; 释放出的 CO_2 不断溶解到地层水中,为碳酸盐矿物的形成提供

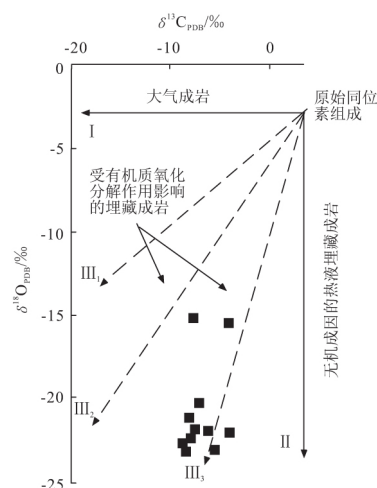


图5 苏家屯—皮家地区砂岩方解石胶结物的碳、氧同位素组成分布

Fig. 5 Diagram of $\delta^{13}\text{C} - \delta^{18}\text{O}$ of calcite cement of sandstone in Sujiatun-Pijia area

“碳”源, $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3$; 并且使地层水 pH 值降低, $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$; 研究区域的砂岩类型主要为岩屑质长石砂岩、长石质岩屑砂岩、长石砂岩。在有机酸和地层水中 H^+ 的作用下不断溶蚀, 为碳酸盐胶结物提供 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等离子, 为碳酸盐胶结物的形成提供了有力的物质基础; 在含有有机酸地层水的运移过程中, 因为溶蚀作用不断消耗地层水中的 H^+ , 到达一定的阶段就会促使 $2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{CO}_2$ 向右进行, 产生碳酸盐矿物沉淀。与有机酸脱羧作用有关的方解石均以结晶颗粒粗大并交代其他矿物或碎屑

为标志^[16], 据表 1 可知, 研究区也符合这一特征。根据宋士顺等^[16]的研究, 在热催化作用下有机酸脱羧并释放出烃类和 CO_2 , CO_2 溶解于地层水中, 为碳酸盐矿物的形成提供了“碳”来源; 随着反应的进行, 由酸性流体转为碱性流体, 开始了包括方解石胶结物在内的碳酸盐矿物的沉淀过程。

已有的研究^[17-19]表明, 梨树断陷在 110~95 Ma 和 65~0 Ma 期间分别有 2 次明显的地层压力下降过程, 压力的下降同样利于方解石溶解度降低而产生沉淀。根据现今苏家屯—皮家地区的试油报告, 地层水 pH 值均大于 7 (表 3), 流体性质为碱性, 致使方解石溶解度降低。

表 3 苏家屯—皮家地区现今地层水特征

Table 3 Characteristics of formation water in Sujiatun-Pijia area

序	检测编号	来样号	$\rho(\text{Cl}^-)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{HCO}_3^-)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH 值
1	1500444	SW33-2	775.48	740.83	488.72	7.8
2	1500445	SW33-14	894.36	118.53	768.52	7.7
3	1500446	SW33-14	875.71	115.24	775.59	7.6
4	1500447	SW33-10	36 539.54	19.76	142.12	7.1

苏家屯—皮家地区主要的烃源岩为沙河子组和营城组黑色泥岩, 营城组储层与黑色泥岩互层紧密接触, 烃源岩产生的有机酸更易影响储层, 进一步推测营城组砂岩方解石胶结物中的碳来源于有机碳 (图 6)。

3.2 方解石形成时孔隙流体的相对盐度

原则上, 碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 $\delta^{18}\text{O}$ 值可以作为研究沉积环境的标志^[20-23], 同样也适用于研究成岩流体^[6, 24-26]。碳酸盐岩中碳、氧同位素值与水介质盐度的关系为盐度越高其 δ 值越高。若碳酸盐矿

物相是方解石, 其稳定同位素的组成就取决于水体的盐度与温度。因此可用稳定同位素在碳酸盐矿物中的分布关系去推析古环境中水介质的性质。依据研究层位中方解石胶结物的碳、氧同位素组成特征, Keith 等^[27]推导出计算古盐度指数值的公式:

$$Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50)$$

据此可推算出地层中方解石生长时流体 (水介质) 的 Z 值, 如在 120 这个临界值上、下摆动 (一般 $Z > 120$ 为海相碳酸盐, $Z < 120$ 为淡水碳酸盐), 说明碳酸盐矿物相的方解石胶结是在一种有淡水不断混合的流体环境中形成。梨树断陷苏家屯—皮家地区营城组砂岩中方解石胶结物的 Z 值分布范围 (表 2) 为 98.18~111.13, 这说明地层中方解石胶结物形成的古流体均为矿化度较高的淡水。根据碳酸盐岩内各种成岩水源的碳氧同位素组成特征^[13], 其胶结环境属于淡水渗流环境。

3.3 方解石形成时温度

水介质的温度对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响远超过盐度对 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影响, 而 $\delta^{13}\text{C}$ 值受温度变化的影响很小。所以, 在盐度恒定时, $\delta^{18}\text{O}$ 值可作为测定古温度的可靠标志。当碳酸盐与水介质处于平衡状态时, $\delta^{18}\text{O}$ 值随温度的升高而下降^[20]。

$\delta^{18}\text{O}$ 与成岩强度之间的定性关系为成岩强度越大, $\delta^{18}\text{O}$ 值越低。依据梨树断陷地层方解石胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 根据 H. C. Urey 提出的, 且由 Epstein 等^[7]加以具体化, Shackleton 等^[28]又进一步修改得出的最终经验公式:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 16.9 - 4.38 \times (\delta\text{C} - \delta\text{W}) +$$

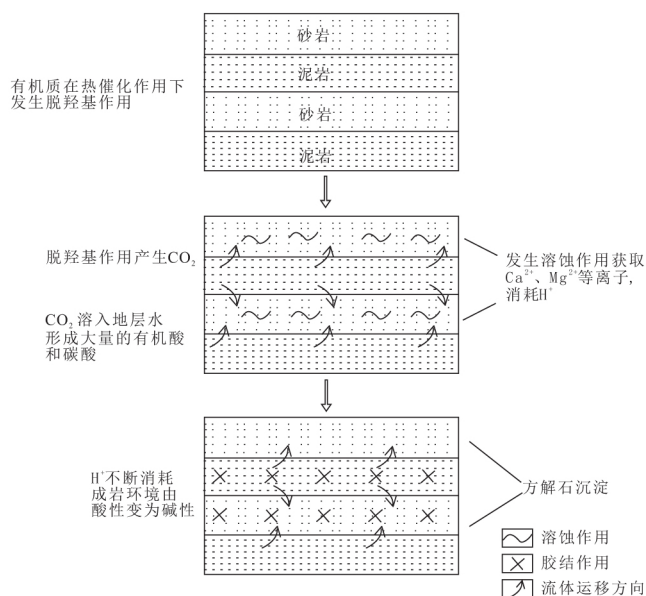


图 6 研究区方解石沉淀模式图

Fig. 6 Mode chart for calcite precipitation in the study area

$$0.10 \times (\delta C - \delta W)^2$$

式中: $\delta C = 10.25 + 1.01025 \times \delta CaCO_3$, $\delta W = 41.2$ (设 $\delta H_2O = 0$), 其中 δW 和 δH_2O 是指样品形成时与海水平衡状态下 CO_2 和 H_2O 的 $\delta^{18}O$ 值。

通过该经验公式利用 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 可推算出研究区的古水温(表2), 研究区砂岩中方解石胶结物形成时的温度(表4)。由表4可知, 研究区砂岩方解石胶结物形成时的温度为 $109.52 \sim 179.43^\circ C$, 平均值为 $158^\circ C$; 区营城组油气包裹体均一温度分布在 $72 \sim 162^\circ C$ 之间, 平均值为 $103.708^\circ C$ 。

表4 苏家屯—皮家地区油气包裹体均一温度与方解石胶结物同位素平衡温度

Table 4 Comparisons of isotope equilibrium temperature and homogenization temperature of inclusions of calcite cement in Sujiatun-Pijia area

井位	井深 h/m	数量	均一温度			方解石胶结物 形成温度/ $^{\circ}C$
			最大值	最小值	平均值	
			$T_h/^{\circ}C$			
SN132	2 330.32	28	142	72	102.00	166.65
SN132	2 646.50	11	117	87	103.00	176.66
SN137	2 565.00	10	138	84	110.00	174.82
SN139	1 915.20	16	105	79	90.25	112.57
SN92	2 183.40	20	140	79	102.30	152.54
SN92	2 239.91	15	112	79	98.40	161.30
SW30	2 918.21	25	162	102	112.52	179.43
SW333	2 996.90	15	140	100	113.40	166.65
SW33X	2 433.50	21	105	88	96.00	166.65
梨 2	2 675.86	10	144	94	115.60	171.17
苏 4	3 377.55	0	/	/	/	109.52

由图7可以看出方解石胶结物形成温度大部分高于油气包裹体均一温度, 将方解石胶结物的形成温度结合梨树地区井埋藏史图^[29]及热史特征^[30]可知, 方解石胶结物形成时间略晚于油气包裹体形成时间。结合图7可以推测出在油气充注时和油气充注之后形成了大量的方解石胶结物, 故而易降低储层孔隙率, 使储层致密化, 不利油气储存。

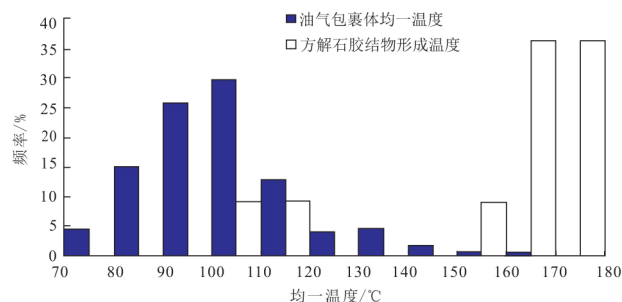


图7 苏家屯—皮家地区砂岩方解石胶结物中同位素平衡温度及其包裹体的均一温度分布

Fig.7 Distribution of isotope equilibrium temperature and homogenization temperature of inclusions of calcite cement in Sujiatun-Pijia area

4 结 论

(1) 苏家屯—皮家地区的岩石类型为岩屑质长石砂岩、长石质岩屑砂岩和长石砂岩。

(2) 苏家屯—皮家地区的砂岩方解石碳同位素 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为 $-8.7\text{‰} \sim -3.9\text{‰}$, 平均值为 -6.7‰ 。 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值为 $-23.2\text{‰} \sim -15.6\text{‰}$, 平均值为 -21.4‰ 。 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值为 $6.9\text{‰} \sim 14.8\text{‰}$, 平均值为 8.78‰ , 推测出方解石的形成与有机酸的脱羧作用有密切联系, 暗示着方解石中的碳来源于有机碳。

(3) 根据苏家屯—皮家地区砂岩中碳、氧同位素数据, 计算出的方解石胶结物的 Z 值范围是 $98.18 \sim 111.13$; 根据碳、氧同位素组成特征, 表明形成时古流体具有淡水特征。

(4) 根据苏家屯—皮家地区砂岩中碳、氧同位素数据, 计算出方解石胶结物的形成温度范围是 $109.52 \sim 179.43^\circ C$, 平均值为 $158^\circ C$, 营城组油气包裹体均一温度分布在 $72 \sim 162^\circ C$ 之间, 平均值为 $103.708^\circ C$, 暗示方解石胶结物在油气充注之后或同时形成。

参考文献:

- [1] 常毓文, 梁涛, 赵喆, 等. 全球油气供需新格局及勘探开发新趋势[J]. 国际石油经济, 2014(3): 54-64.
- [2] Cheng K, Wu W, Hilditch S A, et al. Assessment of the distribution of technically recoverable resources in north American basins[C]// Anon. Canadian Unconventional Resources and international Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2010: 245-247.
- [3] 陈贤良, 纪友亮, 樊太亮, 等. 梨树断陷七棵树地区层序地层与隐蔽油气藏[J]. 地质科技情报, 2014, 33(2): 123-129.
- [4] 李阔, 赵新宇, 陈宏博. 梨树断陷苏家屯地区成藏条件及主控因素分析[J]. 石油地质与工程, 2015, 29(2): 29-32.
- [5] 杨特波, 王宏语, 樊太亮, 等. 梨树断陷苏家屯地区营城组沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 349-356.
- [6] Sanyal P, Bhattacharya S K, Prasad M. Chemical diagenesis of Siwalik sandstone: Isotopic and mineralogical proxies from Surai Khola section, Nepal[J]. Sediment Geology, 2005, 180(1): 57-74.
- [7] Epstein S, Buchsbaum R, Lowenstam H A, et al. Revised carbonate-water isotopic temperature scale[J]. Bulletin of Geology Society of America, 1953, 64(11): 1351-1326.
- [8] 汤超, 司马献章, 朱强, 等. 东胜地区直罗组含铀砂岩中方解石的碳氧同位素组成及铀成矿意义[J]. 高校地质学报, 2016, 22(4): 698-706.
- [9] Morad S, Al-Aasm I S, Ramseyer R, et al. Diagenesis of carbonate cements in Permo-Triassic sandstones from the Iberian Range, Spain: Evidence from chemical composition and stable isotopes[J]. Sediment Geology, 1990, 67(3/4): 281-295.
- [10] Macaulay C I, Haszeline R S, Fallick A E. Distribution chemistry isotopic composition and origin of diagenetic carbonates: Magnus Sandstone, North Sea[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1993, 63(1): 33-43.

- [11] Mostafa F, Harrison T M, Grove M. In situ stable isotopic evidence for protracted and complex carbonate cementation in a petroleum reservoir, North Coles Levee, San Joaquin Basin, California, USA[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(3): 444-458.
- [12] 王大锐. 油气稳定同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [13] 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.
- [14] Yang Zhi, Zou Caineng, He Sheng, et al. Formation mechanism of carbonate cemented zones adjacent to the top overpressured surface in the central Junggar Basin, NW China [J]. Science China: Earth Sciences, 2010, 53(4): 529-540.
- [15] 杨智. 准噶尔盆地腹部超压顶面附近油气成藏研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2009.
- [16] 宋士顺, 马锋, 刘立, 等. 大庆长垣扶余油层砂岩中方解石胶结物的碳、氧同位素特征及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 255-261.
- [17] 解习农, 李思田, 刘晓峰. 异常压力盆地流体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2006.
- [18] He S, Middleton M, Tang Z H. Characteristics and origin of underpressure system in the Shiwo fault depression, southeast Songliao basin, China [J]. Basin Research, 2000, 12(2): 147-158.
- [19] 解习农, 焦赳赳, 熊海河. 松辽盆地十屋断陷异常低压体系及其成因机制[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2003, 28(1): 61-66.
- [20] 张秀莲. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 17-28.
- [21] 张庆玉, 秦凤蕊, 陈永权, 等. 塔里木盆地麦盖提斜坡群古三维区奥陶系碳酸盐岩古岩溶储层特征[J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 186-192.
- [22] 张庆玉, 梁彬, 曹建文, 等. 塔里木盆地轮古 7 井区以东奥陶系古岩溶储层碳氧同位素地球化学特征研究[J]. 地质科技情报, 2015, 34(2): 52-56.
- [23] 毛玲玲, 伊海生, 季长军, 等. 柴达木盆地新生代湖相碳酸盐岩岩石学及碳氧同位素特征[J]. 地质科技情报, 2014, 33(1): 41-48.
- [24] 董福湘, 刘立, 马艳萍. 大港滩海地区沙一段下部砂岩储层中方解石胶结物碳氧同位素研究[J]. 石油实验地质, 2004, 26(6): 590-593.
- [25] 叶瑛, 沈忠悦, 彭晓彤, 等. 塔里木盆地第三系储层砂岩自生碳酸盐碳氧同位素组成及流体来源讨论[J]. 浙江大学学报: 理学版, 2001, 27(3): 321-326.
- [26] 刘四兵, 黄思静, 沈忠民, 等. 砂岩中碳酸盐胶结物成岩流体演化和水岩作用模式: 以川西孝泉—丰谷地区上三叠统须四段致密砂岩为例[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(7): 1403-1417.
- [27] Keith M H, Weber J N. Isotopic composition and environmental classification of selected limestones and fossils [J]. Geochim. Cosmochim. Acta., 1964, 28(2): 1787-1816.
- [28] Shackleton N J. Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and the benthonic foraminifera genus *Uvigerina*: Isotopic changes in the ocean during the last glacial[J]. Colloques Internationaux Centre National De La Recherche Scientifique, 1974, 219(302): 203-209.
- [29] 周卓明, 宋振响, 湛小红. 梨树断陷油气藏分布特征与成藏模式[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(增刊 2): 131-140.
- [30] 何生, 陶一川, 姜鹏. 利用多种古地温计研究松辽盆地东南隆起区的地热史[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1995, 20(3): 328-334.

Features of Carbon-Oxygen Isotopes in Calcite Cement from Yingcheng Formation Sandstone in Sujiatun-Pijia Area of Lishu Fault Depression

Cao Jiaxin¹, He Fangfang¹, Zhu Rong¹, Lou Zhanghua¹, Huang Dangwei²

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan Zhejiang 316021, China; 2. Exploration and Development Research Institute of the Northeast Oil and Gas Branch, SINOPEC Group, Changchun 130062, China)

Abstract: Calcite is one the most widely spread cements in deep sandstone reservoirs in Sujiatun-Pijia area. It has also been regarded as the main factor for facilitating the formation of tight reservoirs in deep layer of the Lishu Fault Depression. Fluid inclusion and carbon /oxygen isotope analyses were conducted on the calcite from cored wells penetrating the layer to identify its isotope composition and genesis. The results show that the reservoirs are mainly composed of feldspar lithic, lithic feldspar sandstone and feldspathic sandstone. The cement has its $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ value ranging between -16‰ and -0.4‰ and the $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ value varying from -23.2‰ to -13.2‰ with an average value of -20.1‰ . Calculation shows that the paleosalinity Z is between 83.48 and 117.61, indicating a fresh water environment for the formation of carbonate. The temperature for the calcite formation is between 94.06°C and 179.43°C based on converted temperature of isotopes and homogenization temperature of fluid inclusions. Isotope diagrams reveal that the formation of the calcite cement is probably connected with organic acid decarboxylation, inferring an “organic carbon” origin for the carbon in the cement.

Key words: Lishu Fault Depression; carbon and oxygen isotopes; calcite cement