

文章编号: 1000-0550(2009) 06-1027-06

碳酸盐岩中缝洞方解石成岩环境的矿物地球化学判别 ——以塔河油田的沙 79 井和沙 85 井为例¹

钱一雄^{1,2} 陈强路¹ 陈跃^{1,2} 罗月明¹

(1 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所 江苏无锡 214151;

2 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院西北勘探中心 乌鲁木齐 830011)

摘要 在塔里木盆地塔河油田 4 区沙 79 井、6 区沙 85 井奥陶系鹰山组岩芯的详细观察基础上,对裂隙、溶洞及巨型洞穴中的方解石晶体的晶胞参数、化学成分、碳、氧同位素、流体包裹体中的氢同位素等分析与研究表明,至少存在两种成岩环境:一是以大气淡水表生环境,方解石中晶胞参数(c) = 17.057 ~ 17.062 Å, Fe_2O_3 = 0.06% ~ 0.07%, $Sr = 53.3 \times 10^{-6} \sim 96.2 \times 10^{-6}$, $Ba = 19 \times 10^{-6} \sim 28 \times 10^{-6}$, $Mg/Ca (\times 10^3) = 1.94 \sim 5.14$, $Sr/Ba = 2.12 \sim 5.24$, $\delta^{18}O_{PDB}$ 较低 (-15‰ ~ -17‰)、较低 $\delta^{13}C_{PDB}$ (-4‰ ~ -2‰), 不含或较少含烃类, 流体包裹体中氢 $\delta D_{PDB} = -94.99\% \sim -109.54\%$ 为特征; 另一是地层混合水埋藏环境为主, 方解石中晶胞参数(c) = 17.064 ~ 17.065 Å (个别达 17.212 Å)、 Fe_2O_3 = 0.06% ~ 0.18%, $Sr = 111 \times 10^{-6} \sim 208 \times 10^{-6}$, $Ba = 215 \times 10^{-6} \sim 479 \times 10^{-6}$, $Mg/Ca (\times 10^3) = 1.53 \sim 1.76$, $Sr/Ba = 0.49 \sim 0.58$, 方解石 $\delta^{18}O_{PDB}$ 低 (-9.6‰ ~ -13.7‰)、流体包裹体中氢 $\delta D_{PDB} = -77.5\% \sim -88.2\%$ 为特征; 另外, 在巨型洞穴中方解石中组分的剧烈变化反映了洞穴充填发生于不同的水文地质—地球化学体系。

关键词 晶胞参数 碳、氧同位素 流体包裹体 元素分析 方解石 塔河油田

第一作者简介 钱一雄 男 1962 年出生 教授级高级工程师 盆地分析与地球化学 E-mail qyx9167@vip.sina.com

中图分类号 P595 文献标识码 A

方解石是碳酸盐岩成岩过程中充填胶结作用中最常见和最重要矿物之一。方解石晶体形貌、结构与化学成份可以反映其成岩流体中的成分、介质温度与压力(主要是 P_{CO_2})、pH 值、流动速度、水—岩体积比、溶液—固体或溶液—溶液相等界面表面特征等^[1-6]。本文通过裂隙、溶洞及巨型洞穴中的方解石晶体的晶胞参数、化学成分、碳、氧同位素、流体包裹体中的氢同位素等分析,揭示方解石在不同成岩介质环境下的地质与地球化学特征,深化对成岩作用过程的认识。

1 地质背景

沙 79 井、沙 85 井分别位于塔河油田 4 区的东南缘、6 区西北角(图 1),是两口扩边井。受海西期的构造削截—剥蚀作用影响,塔河 4、6 区缺失志留系、泥盆系和中上奥陶统地层,石炭系巴楚组泥岩直接覆盖于中下奥陶统地层上。一间房组(O_{2y})和鹰山组(O_{1-2y})是由褐灰色颗粒灰岩(包括亮晶颗粒灰岩)、微晶灰岩(包括含颗粒微晶灰岩)、(含)云灰岩、藻粘

结灰岩、层孔虫—海绵礁灰岩、岩溶角砾岩以及与岩溶作用有关的地下暗河沉积的砂泥岩组成。

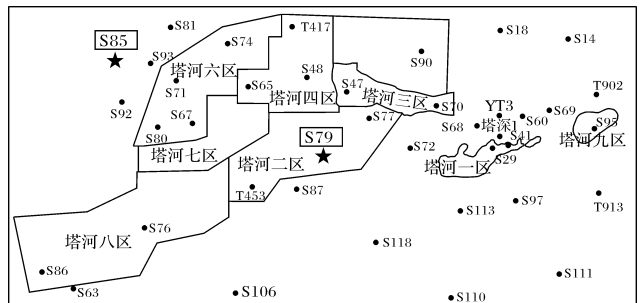


图 1 塔河油区位置简图

Fig 1 The schematic map of Tahe Oil Field

根据对沙 85 井和沙 79 井取芯段的详细观察,纵向上中下奥陶统鹰山组碳酸盐岩中可划分出地表岩溶带、渗滤带和潜流带。其中,沙 79 井渗滤带与潜流带分界位于是埋深 5 533.0 m 左右,潜流带附近中可见到与岩溶有关的地下暗河流水沉积(图 2),部分层段发育白云岩化、硅化、重结晶作用和沥青充填;沙

¹ 国家重点基础研究发展规划“973”项目(批准号: 2005CB422100)资助。

收稿日期: 2009-01-22 收修改稿日期: 2009-06-27

85井在埋藏深度 5 960 m 左右, 钻遇了进尺大于 6 m 的巨型溶洞, 在潜流带中充填了方解石巨晶, 它位于奥陶系碳酸盐岩风化壳顶面以下 191.5 m 处。

2 物相分析

溶洞及洞穴中方解石往往以短纤维状或长条方头晶体为主; 而放射状粗晶是渗流胶结物的特殊标志; 方解石的晶体习性主要受溶液中的 Mg/Ca 比值等因素制约; 其晶胞参数则受温度、压力、结晶介质条件等因素影响。

方解石 X 衍射物相分析表明(表 1): 在沙 79 井的二叠系玄武岩裂隙中的方解石晶体具有最低的 a 和最高的 c 值, 晶体形态为复三方偏三角面体的长条方头, 表明介质中的 Mg/Ca 比值较高; 紫红色 (S79-X-17/9) 方解石晶体则具有中低的 a 值和最低的 c 值, 晶体形态为较平的复三方偏三角面体的六边形假像及放射状集合体晶形。考虑到分析误差, 根据方解石晶胞参数(主要为 c 值)大致可划分出三组: 第一组是巨型洞穴中的方解石晶体 (S85-X-2/2 S85-X-3/3 S85-X-4/4) 和溶洞中的 S85-X-7/5, $a = 4.987 \sim 4.992$, $c = 17.057 \sim 17.062 \text{ \AA}$ 其 a , c 值大小及变化范

围位于中间; 第二组以溶洞 S85-X-1/1 和潜穴 S85-X-8/6 及重结晶 S79-X-16/8 为代表, $a = 4.992$, $c = 17.064 \sim 17.065 \text{ \AA}$ 其特征是 a 值相同、 c 值稍大; 第三组是裂隙中重结晶方解石, S85-X-9/7 S79-X-17/9 S79-X-22/10, $a = 4.985 \sim 4.987$, $c = 17.050 \sim 17.212 \text{ \AA}$ 其特征是 a 值、 c 值误差较大, 即使考虑误差, 大小变化也最大。据此推断, 第一组为相对低的 Mg/Ca (Mg^{2+} 含量低) 成岩介质中的产物; 第二组为相对高的 Mg/Ca (Mg^{2+} 含量高) 成岩介质中的产物; 第三组既可能是相对低的 Mg/Ca (S79-X-17/9), 也可能是相对高的 Mg/Ca (S85-X-9/7), 反映了重结晶作用的复杂性。另外, 在同一巨型晶穴中, 不同部位的方解石晶体中晶胞参数 a , c 变化反映了晶体生长时溶液中 Mg/Ca 变化。

3 地球化学分析

3.1 元素分析

对沙 85 井奥陶系碳酸盐岩中的裂隙、溶洞及巨型洞穴中的方解石晶体中进行了分选及等离子光谱分析, 结果表明(表 2.3): 方解石中 $FeO \geq 0.01\%$, $Fe_2O_3 \geq 0.06\%$, $MnO \leq 0.02\%$; 代表陆源碎屑组分之

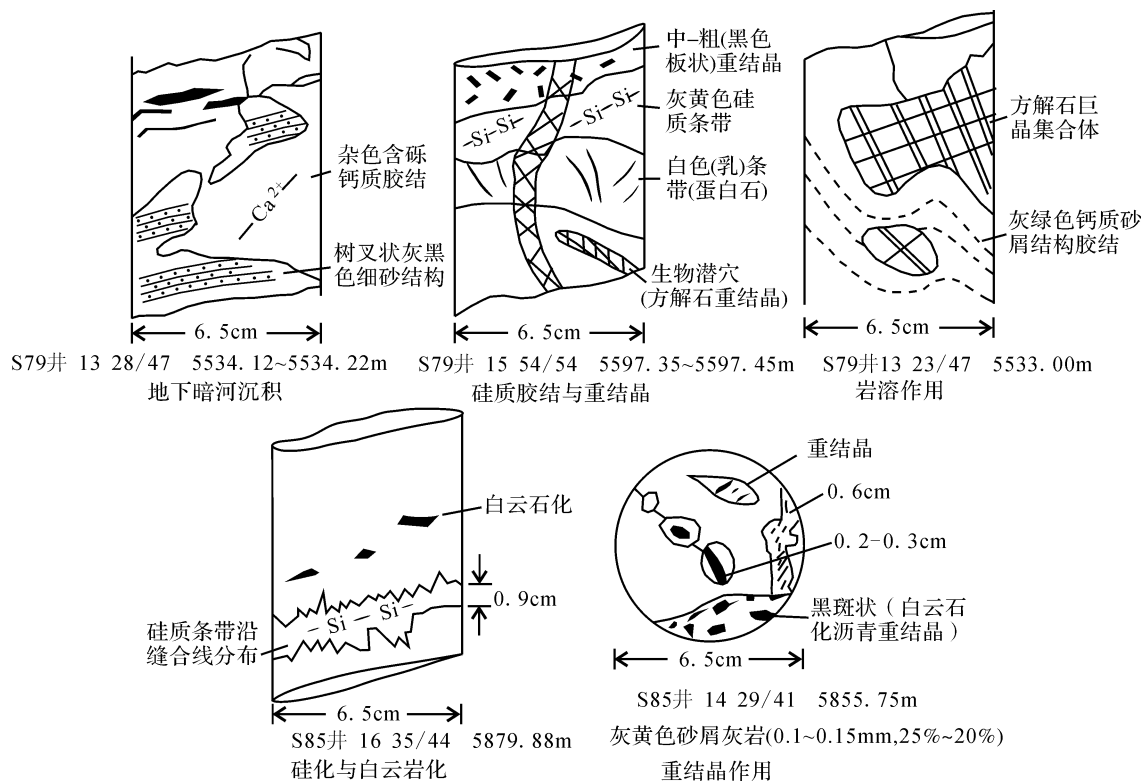


图 2 沙 79 井和沙 85 井的奥陶系的部分岩芯段素描

Fig 2 Schematics of core-section of Ordovician carbonate reservoirs in Wells S79 and S85

一的 Al_2O_3 在裂隙、溶洞及巨型晶洞中方解石含量相对较低、且基本相同; 反映其对微量组成影响相似。根据方解石组成可划分为两组: 一是为巨晶晶洞及裂隙方解石, $Fe_2O_3 = 0.06\% \sim 0.07\%$, $Sr = 53.3 \times 10^{-6} \sim 96.2 \times 10^{-6}$ 、 $Ba = 19 \times 10^{-6} \sim 28 \times 10^{-6}$, 相对较低, $Mg/Ca (\times 10^3) = 1.53 \sim 5.14$ $Sr/Ba = 2.12 \sim 5.24$ 其中, W-011 样品中的 MgO 、 Na_2O 相对较高, 可能代表了盐度较高, 类似于海水或浓缩的海水; 另一组为裂隙、溶洞的方解石, $Fe_2O_3 = 0.06\% \sim 0.18\%$, $Sr = 111 \times 10^{-6} \sim 208 \times 10^{-6}$ 、 $Ba = 215 \times 10^{-6} \sim 479 \times$

10^{-6} , 相对较高, $Mg/Ca (\times 10^3) = 1.54 \sim 1.76$ $Sr/Ba = 0.49 \sim 0.58$ 相对较低, 其中, W-005 样品中的 Na_2O 含量较高, 但 MgO 较低, 可能是早期成岩水; 总体为弱还原至弱氧化与混合水的产物^[7]。

Cicero A D^[4] 研究表明: 无机海相碳酸盐岩中方解石的 BaO 、 $Sr/Mg/Ca$ 与 Sr/Mg 正相关, 其相关系数与沉淀时介质中的 Sr/Mg 有关, 即使经历了大气水成岩改造, 也呈线性变化; 而第一组中方解石的 BaO 、 $Sr/Mg/Ca$ 与 MgO 、 Sr/Mg 的变化趋势呈负相关关系, 推测它是在非海相即大气水或地层混合水中形成的。

表 1 方解石 X 射线衍射物相分析

Table 1 Analytical data of X-ray diffraction of crystal cell of calcites

样号/序号	埋深 /m	产状	晶胞参数 a (Å)	误差 (Å)	晶胞参数 c (Å)	误差 (Å)	备注
S85-X-1/1	5796.90	溶洞	4.992	0.000	17.064	0.002	浅紫红色(方)
S85-X-2/2	5966.33	晶洞	4.992	0.001	17.059	0.006	> 6 m(白)
S85-X-3/3	5964.60	晶洞	4.988	0.000	17.057	0.003	> 6 m(白)
S85-X-4/4	5960.00	晶洞	4.992	0.001	17.062	0.004	> 6 m(白)
S85-X-7/5	5830.95	裂隙(5mm)	4.987	0.000	17.059	0.004	-
S85-X-8/6	5798.93	生物碎屑	4.992	0.000	17.064	0.003	充填
S85-X-9/7	5779.82	裂隙(重结晶)	4.987	0.002	17.212	0.025	-
S79-X-16/8	5586.31	重结晶	4.992	0.000	17.065	0.003	-
S79-X-17/9	5536.40	重结晶	4.985	0.000	17.050	0.002	紫红色
S79-X-22/10	4859.20	裂隙(不规则)	4.978	0.010	17.075	0.050	P1

分析单位与分析者: 中国地质大学(北京) X 光实验室 陈荣秀

表 2 S85 井充填物方解石部分化学成份* (常量为%, 微量为 10^{-6})

Table 2 Parts of chemical composition of paleo-caves and fractures-filling & vugs calcites in Well S85

样号	产状	埋深 /m	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	Na_2O	Sr	BaO	MnO	Zr	Ga
W-003	溶洞	5796.90	0.83	0.18	0.03	53.45	0.22	0.05	111.0	215.0	0.01	9.6	0.88
W-005	裂隙	5830.95	0.89	0.12	0.01	55.57	0.20	0.18	208.0	479.0	0.04	7.3	0.25
W-006	裂隙	5831.05	0.78	0.06	0.01	55.71	0.20	0.02	-	-	0.03	-	-
W-011	巨型晶洞	5964.60	0.83	0.06	0.01	55.85	0.67	0.12	53.3	28.0	0.03	15.4	0.00
W-012	巨型晶洞	5965.00	0.75	0.07	0.01	55.57	0.28	0.03	96.2	21.0	0.02	5.6	0.26
W-013	巨型晶洞	5966.33	0.61	0.06	0.01	55.15	0.25	0.06	93.4	19.9	0.02	24.1	2.10

由国土资源部新疆维吾尔自治区中心实验室完成, 采用 ICP 等离子光谱等方法

表 3 方解石中 Mg/Ca 、 Na/Ca 、 Sr/Ba 、 Sr/Ca 和 Sr/Mg 的比值

Table 3 Comparative ratios of Mg/Ca , Na/Ca , Sr/Ba , Sr/Ca and Sr/Mg of calcites in Well S85

样号	产状	$Mg/Ca (\times 10^3)$	$Na/Ca (\times 10^3)$	Sr/Ba	Sr/Ca	Sr/Mg	Cicero A D 2001 ^[9]
W-003	溶洞	1.764	0.496	0.5766	1.48E-08	3.03E-05	阿尔伯特盆地 Sr/Mg 比值: 中新世、古新世、泥盆
W-005	裂隙	1.5425	1.717	0.485	2.67E-07	0.0000624	
W-006	裂隙	1.5386	0.19				
W-011	巨型晶洞	5.1413	1.139	2.1259	6.82E-08	4.77E-06	纪、寒武纪方解石胶结物分别为 0.00821、0.0068
W-012	巨型晶洞	2.1594	0.286	5.116	1.24E-07	2.06E-05	
W-013	巨型晶洞	1.9428	0.577	5.2416	1.21E-07	2.24E-05	
	海水平均 ^[9]	0.46		3.00E-03			

另外, W-011样品中 Mg/Ca $Na/Ca > W-012$ $W-013$ 的对应值; 而 Sr/Ca Sr/Mg 则相反, 反映晶体沉淀时的介质条件不同, 但不是连续变化, 可能是开放体系下的不同介质中产物, 或存在多期胶结与溶解作用, 即洞穴方解石沉淀物可能分属于不同期次、不同的水文地球化学体系。

3.2 碳、氧同位素分析

对沙 85 79井奥陶系碳酸盐岩中的裂隙、溶洞及巨型洞穴中方解石晶体的氧、碳同位素分析表明(表 4): S85井的巨型晶洞及裂隙中方解石 $\delta^{18}O_{PDB} = -13.7\text{‰} \sim -16.6\text{‰}$, $\delta^{13}C_{PDB} = -5.1\text{‰} \sim -1.7\text{‰}$; 裂隙、溶洞的方解石 $\delta^{18}O_{PDB} = -9.6\text{‰} \sim -8.3\text{‰}$, $\delta^{13}C_{PDB} = -0.8\text{‰} \sim -0.3\text{‰}$; 两者的 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值均比中下奥陶统碳酸盐岩全岩的平均值 ($\delta^{18}O_{PDB} = -6.0\text{‰}$)

低^[8], 但前者 $\delta^{18}O_{PDB}$ 和 $\delta^{13}C_{PDB}$ 均相对较低, 更具有大气淡水作用产物的特征。

3.3 流体包裹体特征

S85井的大型晶洞中流体包裹体(5 960 0~5 966 3 m)以气液两相盐水包裹体为主(图 3a), 有少量三相及烃类包裹体(图 3b), 包裹体个体相差悬殊, 最小为 3~5 μm ; 最大为 431 $\mu\text{m} \times 179 \mu\text{m}$ (图 3c), 在肉眼下即可观察, 反映存在较大的晶格缺陷和稳定的生长环境; 但常见大小为 20~60 μm , 气液比为 5%~10%; 在埋深 5 779.8~5 800.1 m(图 3b)烃类包裹体相对丰富, 一是浅灰黑色, 发蓝白色荧光, 二是浅黄色。近 300个盐水包裹体均一测温表明(图 4): 主要区间为 $\leq 60^\circ\text{C}$ 、60~90 $^\circ\text{C}$ 、90~120 $^\circ\text{C}$ 、120~150 $^\circ\text{C}$ 、150~180 $^\circ\text{C}$ 、180~210 $^\circ\text{C}$ 、 $\geq 210 \sim 300^\circ\text{C}$, 主峰值为 135 $^\circ\text{C}$ 。

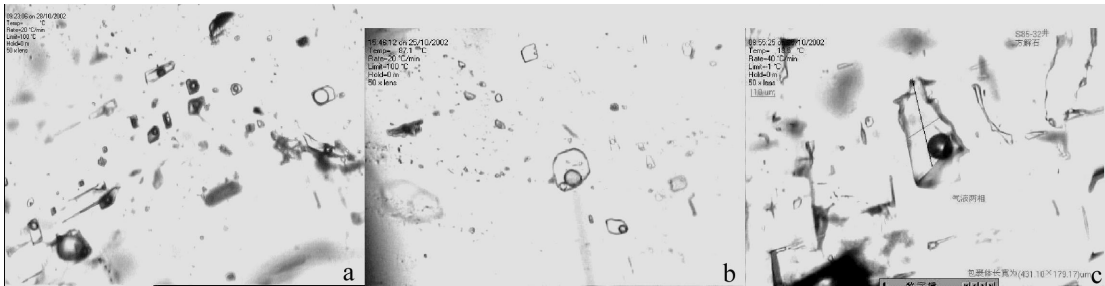


图 3 a 埋深 5 962 m, $\times 25$ 两相(气-液)包裹体; b 埋深 5 779.8 m, $\times 25$ 三相(气-液-固)包裹体及烃类包裹体; c 埋深 5 964 m, $\times 25$ 两相包裹体(最大为 431 $\mu\text{m} \times 179 \mu\text{m}$)

Fig 3 Photographs showing of inclusion of WL+V (a), WL+V+CR and hydrocarbon-bearing (b) and the biggest WL+V inclusion (c) in Well S85

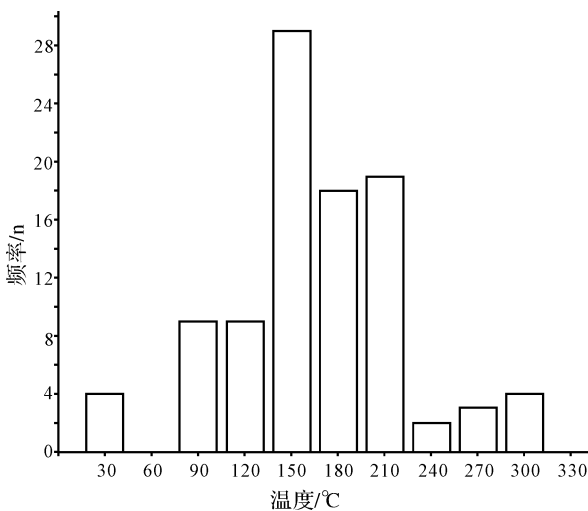


图 4 沙 85 井裂隙-溶洞及洞穴中巨晶方解石中盐水包裹体均一测温频率图

Fig 4 Histograms of homogenization temperatures for aqueous inclusions of fractures-filling & vugs and paleo-caves calcites in Well S85

3.4 流体包裹体中氢同位素

从镜下观察获知: 无论是裂隙、溶洞还是巨型洞穴中的方解石晶体, 其中的流体包裹体虽呈多组分布, 但以一组分布为主导; 因此, 采用爆裂法萃取包裹体中盐水溶液基本可以代表结晶捕获流体的总体或平均组分。利用锌法制氢和同位素质谱分析结果表明: S85井巨型晶洞中的方解石流体包裹体中的 $\delta D_{SMOW} < -60\text{‰}$ (表 4), 即低于 -95‰ (PDB); 而对裂隙、溶洞中的方解石流体包裹体中的 $\delta D_{SMOW} = -60\text{‰} \sim -49\text{‰}$, 折算为 $\delta D_{PDB} = -88.2\text{‰} \sim -77.53\text{‰}$; 反映了两者成岩环境的差异。

塔河奥陶系地层水中 $\delta D/\text{‰} = -58.0 \sim -60.0$, $\delta^{18}O/\text{‰} = -4.5 \sim -6.5$; S85井裂隙、溶洞中的方解石流体包裹体中的 $\delta D(\text{‰})$ 与此十分接近, 表明它们可能有一定的成因联系(图 5)^[9]。

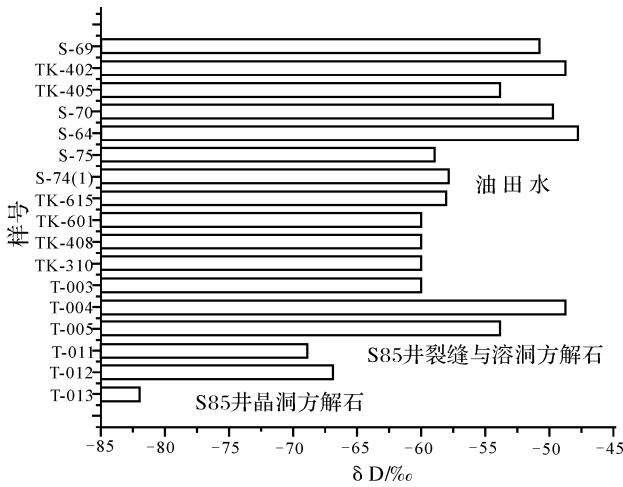


图 5 S85井方解石流体包裹体氢同位素与油田水的同位素值对比

Fig 5 Correlation of δD (‰) of fluid inclusions of calcites of Well S85 with that of the formation water

表 4 沙 85井方解石碳、氧同位素及流体包裹体中 δD (‰, PDB)和假设大气水条件下计算的 $\delta^{18}O$ (‰, PDB)对比

Table 4 Analytical data of $\delta^{18}O$, $\delta^{13}C$ of calcites and hydrogen isotope of inclusion of calcites in Well S85 and contrast between the estimated values based on evolution of hypergen fresh water condition and the measured values of $\delta^{18}O$ of calcites

样号	埋深/m	$\delta^{18}O_{SMOW}$	换算 $\delta^{18}O$	实测 $\delta^{13}C$	实测 δD	估算 $\delta^{18}O$	$\Delta\delta$
T-13	5966 33	- 82	- 15. 3	- 2. 2	- 109. 54	- 14. 94	- 0. 36
T-12	5965 00	- 67	- 14. 9	- 1. 7	- 94. 99	- 13. 12	- 0. 78
T-11	5964 60	- 69	- 16. 6	- 2. 6	- 96. 93	- 13. 36	- 3. 24
T-005	5831 05	- 54	- 13. 7	- 5. 1	- 82. 38	- 11. 55	- 2. 15
T-004	5798 10	- 49	- 8. 3	- 0. 8	- 77. 53	- 10. 94	2. 64
T-003	5796 90	- 60	- 9. 6	- 0. 3	- 88. 2	- 12. 28	2. 68

同位素分析由国家地质实验测试中心白瑞梅完成。流体包裹体采用 DT/T0184 19—1997方法测定, 具体方法: 包体中 H_2O 用爆裂法取水, 钎法制氢, 质谱计 MAT251EM; 国际标准 V-SMOW; 分析精度 $\pm 0. 2\%$; 根据 $\delta_{PDB} = 0. 97\delta_{V-SMOW} - 30. 0$ 换算^[6]。

4 结论

通过对塔河油田的沙 79井、沙 85井奥陶系鹰山组中的裂隙、溶洞及巨型洞穴中方解石晶体的晶胞参数、化学成分、碳、氧同位素和流体包裹体中的氢同位素研究表明, 至少存在两种成岩环境。

沙 85井奥陶系鹰山组中部分溶洞及巨型洞穴中的方解石主要形成于大气淡水表生环境。其晶胞参数 $(c) = 17. 057 \sim 17. 062 \text{ \AA}$, $Fe_2O_3 = 0. 06\% \sim 0. 07\%$, $Sr = 53. 3 \times 10^{-6} \sim 96. 2 \times 10^{-6}$, $Ba = 19 \times 10^{-6} \sim 28 \times 10^{-6}$ 较低, $Mg/Ca (\times 10^3) = 1. 94 \sim 5. 14$, $Sr/Ba = 2. 12 \sim 5. 24$, $\delta^{18}O_{PDB} (-15\% \sim -17\%)$ 、较低 $\delta^{13}C_{PDB} (-4\% \sim -2. 0\%)$, 不含或较少含烃类中流体包裹体, 包裹体中 $\delta D_{PDB} = -94. 99\% \sim -109. 54\%$ 为特征。

假设裂隙、溶洞、巨型洞穴中方解石沉淀时及后期成岩变化主要经历了大气水改造, 而大气水则应服从于 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 。由于同位素分馏作用, 氢氧同位素组成将发生变化。在此, 利用流体包裹体的 δD 来估算平衡条件下的成岩介质与胶结物的 $\delta^{18}O$ 值 (表 4), 并将其与实测值对比分析来判断上述假设的合理性。

由表 4 可见: 6件样品估算的成岩介质与胶结物的 $\delta^{18}O_{PDB}$ 值与实测的差值 $\Delta\delta = -0. 36\%$ 、 $-0. 78\%$ 、 $-3. 24\%$ 、 $-6. 88\%$ 、 $-2. 15\%$ 、 $2. 64\%$ 、 $2. 68\%$ 。其中, 巨型洞穴中方解石 T-12、T-13样品的两者差值较小, 推论可能成立, 代表了大气水作用的产物; 其它样品差异较大, 主要有两种解释: 一是成岩介质主要是混合水或地层水条件; 二与古温度直接相关, 一般地, 若沉积时, 温差 $10^\circ C$ (年均) 所产生的大气水 $\delta^{18}O$ 差异也可达到 $-4\% \sim -5\%$ 左右。

沙 79 沙 85 井奥陶系鹰山组中的部分裂隙、溶洞方解石主要形成于混合水或地层水埋藏环境, 其晶胞参数 $(c) = 17. 064 \sim 17. 065 \text{ \AA}$, $Fe_2O_3 = 0. 06\% \sim 0. 18\%$, $Sr = 111 \times 10^{-6} \sim 208 \times 10^{-6}$, $Ba = 215 \times 10^{-6} \sim 479 \times 10^{-6}$ 较高, $Mg/Ca (\times 10^3) = 1. 53 \sim 1. 76$, $Sr/Ba = 0. 49 \sim 0. 58$, 方解石 $\delta^{18}O_{PDB} (-9. 6\% \sim -13. 7\%)$ 、流体包裹体中氢 $\delta D_{PDB} = -77. 5\% \sim -88. 2\%$ 为特征。

在沙 85井在埋藏深度 5 960 m 的巨型洞穴中方解石中组份剧烈变化反映了洞穴充填发生于不同的水文地质—地球化学体系。

参考文献 (References)

1 Budd D A, Saller A H, Harris P M. Unconformities and Porosity in Carbonate Strata[M]. AAPG Memoir 63. 1995, 63(1): 35-123

- 2 Hayes M J, Boles JR. Evidence for meteoric recharge in the San Joaquin Basin, California provided by isotope and trace element chemistry of calcite [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1993, 10(1): 136-144
- 3 Heasley E C, Worden R H, Hendry J P. Cement distribution in a carbonate reservoir: recognition of a palaeo oil-water contact and its relationship to reservoir quality in the humbly grove field, Onshore UK [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(3): 639-654
- 4 Cicero A D, Lohmann K C. Sr/Mg variation during rock-water interaction: implications for secular changes in the elemental chemistry of ancient seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(5): 741-761
- 5 Howard A P, Chuenbunchan S, Maki G, et al. Nang Nuan oil field B6/27, Gulf of Thailand: karst reservoir of meteoric or deep-burial origin? [J]. *Petroleum Geoscience*, 2000, 6(2000): 15-27
- 6 钱一雄, 蔡立国, 李国蓉, 等. 碳酸盐岩溶作用的元素地球化学表征——以塔河1号的S60井为例 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 70-75 [Qian Yixiong, Cai Lieguo, Liguorong, et al. Element geochemical implications for carbonate karstification interpretation: Taking Well S60 in Tahe as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(4): 70-75]
- 7 钱一雄, 陈跃, 马宏强, 等. 新疆塔河油田奥陶系碳酸盐岩溶洞、裂隙中方解石胶结物元素分析与成因 [J]. *沉积学报*, 2004, 22(1): 6-11 [Qian Yixiong, Chen Yue, Ma Hongqiang, et al. Chemical analysis and origin of calcite in cleavage and cave filled cements of Ordovician carbonates in Tahe oilfield, Xinjiang [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 6-11]
- 8 钱一雄, 邹远荣, 陈跃, 等. 塔里木盆地塔中西北部多期、多成因岩溶作用地质-地球化学表征——以中1井为例 [J]. *沉积学报*, 2005, 23(4): 596-603 [Qian Yixiong, Zhou Yuanrong, Chen Yue, et al. Geological and geochemical implications for multi-period and origin of carbonate karstification in the Northwest Tazhong: Taking well Zhong-1 as an example Northwest Tazhong, Xinjiang [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4): 596-603]
- 9 蔡立国, 钱一雄, 刘光祥, 等. 塔河油田及邻区地层水成因探讨 [J]. *石油实验地质*, 2002, 24(1): 57-60 [Cai Lieguo, Qian Yixiong, Liu Guangxiang, et al. Origin of formation water in Tahe oilfield and adjacent areas [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2002, 24(1): 57-60]

Mineralogical and Geochemical Identification for Diagenetic Settings of Paleo-caves and Fractures-Filling & Vugs Calcites in Carbonate Taking Wells S79 and S85 for example

QIAN Yixiong^{1,2} CHEN Qiang-lu¹ CHEN Yue^{1,2} LUO Yue-ming¹

(1. Wuxi Petroleum Geology Institute, Exploration & Production Institute SINOPEC, Wuxi Jiangsu 214151;

2. Northwest Exploration Centre Exploration & Production Institute SINOPEC, Urumqi 830011)

Abstract Based on observation of core of the Middle and Lower Ordovician carbonate in Wells S85 and S79, a wide range geochemical methods has been used to characterize the diagenetic settings of paleo-caves and fractures-filling & vugs calcites and to decipher their origin, which includes X-ray diffraction of crystal cell, carbon and oxygen isotope composition, fluid inclusion, hydrogen isotope of fluid inclusion and chemical elements analysis. Two diagenetic environments are defined and believed to be prevailing in the formation of paleo-caves and fractures-filling & vugs calcites: the first is diagenetic environment with prevailing hypergen fresh water, mostly related to phreatic zones in subaerial process and of characteristic of crystal cells $c = 17.057 \sim 17.062 \text{ \AA}$ and $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.06\% \sim 0.07\%$, $\text{Sr} = 53.3 \times 10^6 \sim 96.2 \times 10^6$, $\text{Ba} = 19 \times 10^6 \sim 28 \times 10^6$, $\text{Mg}/\text{Ca} (\times 10^3) = 1.94 \sim 5.14$, $\text{Sr}/\text{Ba} = 2.12 \sim 5.24$, the lowest values of $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} (-15\% \sim -17\%)$, the considerable lower values of $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} (-4\% \sim -2\%)$ for calcites without or with few hydrocarbon inclusions and $\delta\text{D}_{\text{PDB}} = -94.99 \sim -109.54\%$ of its fluid inclusion; the second is believed to occur in freshwater-seawater mixing and formed during some degree of burial environment and of features of crystal cell parameters (c) = $17.064 \sim 17.065 \text{ \AA}$ (exceptional for 17.212 \AA), the considerable high values $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.06\% \sim 0.18\%$, $\text{Sr} = 111 \times 10^6 \sim 208 \times 10^6$, $\text{Ba} = 215 \times 10^6 \sim 479 \times 10^6$, the considerable lower ratios $\text{Mg}/\text{Ca} (\times 10^3) = 1.53 \sim 1.76$, $\text{Sr}/\text{Ba} = 0.49 \sim 0.58$ for calcites, the lower values of $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} (-9.6\% \sim -13.7\%)$ for calcites, the considerable higher $\delta\text{D}_{\text{PDB}} = -77.5\% \sim -88.2\%$ of fluid inclusion. In addition, the study also demonstrated that differential hydro-geochemical systems had been developed in the formation of the gigantic speleothem calcite crystal at the 5960~5966 m depth of burial with more than 6 m in height palaeocave in Well S85 in Tahe oil field.

Key words cell parameters, carbon-oxygen isotope, fluid inclusion, element analysis, calcite, Tahe Oil Field