

文章编号:0253-9985(2012)06-0867-10

塔东地区英东2井寒武系-奥陶系储层 流体地球化学示踪

王东¹, 王国芝^{2,3}, 刘树根², 丁代淑⁴

(1. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院海相所, 贵州贵阳 550004; 2. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610059; 3. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059; 4. 中国石油新疆油田公司石西油田作业区, 新疆克拉玛依 834000)

摘要:系统分析了英东2井中、上寒武统和中、下奥陶统围岩及裂缝中充填物的碳、氧、锶同位素、稀土元素及流体包裹体等地球化学特征。在此基础上,根据示踪流体的形成期次、来源,划分流体充注的时序关系,探讨流体对储层改造的影响,进而对油气动态保存条件进行探索性评价。流体地球化学研究表明,中、上寒武统和中、下奥陶统存在3期外来壳源富锶流体,其中第一期流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.710 8,第二期流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于0.709 8~0.710 0,最晚一期为来自地壳深部的热液流体,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.713 8。3期流体对储层的储集性能均起到了破坏性作用,但晚期热液流体在对储层改造的同时具有一定的建设性作用。最早一期流体充注时,中、上寒武统储层具有相对较好的油气保存条件;随后两期流体充注时,中、上寒武统储层不再具有保存油气的能力。流体地球化学示踪为动态了解英东构造带乃至整个塔东地区深部流体活动提供了一个新方法。

关键词:稀土元素;流体包裹体;地球化学示踪;储层流体;英东2井;寒武系;奥陶系;塔东地区

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical tracing of the Cambrian-Ordovician reservoir fluid in Well Yingdong-2, eastern Tarim Basin

Wang Dong¹, Wang Guozhi^{2,3}, Liu Shugen² and Ding Daishu⁴

(1. Marine Facies Academy of Exploration & Development Research Institute, Southwest Branch Company, SINOPEC, Guiyang, Guizhou 550004, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 4. Shixi Oil Block, Xinjiang Oil Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: The isotopes of carbon, oxygen and strontium, REE, and the geochemical features of the fluid inclusions in the Middle-Upper Cambrian and Middle-Lower Ordovician side-beds and fracture fillings of the well Yingdong-2 were systematically analyzed. Based on the results, we traced phases and sources of the reservoir fluids, determined chronogenesis of fluid charging, explored the impact of the fluids upon reservoir modification and discussed the dynamic preserving conditions for oil and gas in such settings. The geochemical study of the fluids suggests that there are three charging phases of allogenic fluids with abundant Sr from the crust in the Middle-Upper Cambrian and Middle-Lower Ordovician. The fluids charged in the first phase have a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of 0.710 8, the fluids charged in the second phase have a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in the range of 0.709 8–0.710 0, and the fluids charged in the last phase are hydrothermal fluid from the deep crust and have a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of 0.713 8. The fluids charged in these three phases all played a destructive role in the forming of reservoirs, but the hydrothermal fluids charged in the last phase were constructive to the reservoir formation. The Middle-Upper Cambrian reservoirs had relatively

收稿日期:2011-07-15;修订日期:2012-09-19。

第一作者简介:王东(1981—),男,硕士,石油地质。

基金项目:国家重点基础研究发展规划(“973”计划)项目(2005CB422106)。

better hydrocarbon preserving conditions during the first phase of fluid charging, but lost them when the second and the third phase occurred. Geochemical tracing of fluids provides a new method for dynamic evaluation of deep fluid activities in the Yingdong tectonic belt as well as the whole eastern Tarim Basin.

Key words: REE, fluid inclusion, geochemical tracing, reservoir fluid, Well Yingdong-2, Cambrian, Ordovician, eastern Tarim Basin

流体地球化学是当前国际地学界研究的前沿和热点之一。目前,同位素地球化学研究已经能够较为准确地标定地层中各种流体的活动期次、来源以及水—岩反应的强度^[1-5]。同时,古流体地球化学研究还可以用在保存条件动态评价之上^[3-5]。

实际钻井揭示塔东地区深部流体活动十分频繁,然而对于这些流体的地球化学方面缺乏系统研究。为此,文中以英东2井为例,选取该井中、下奥陶统和中、上寒武统不同深度最具代表性的样品,进行碳、氧、锶同位素、稀土元素及流体包裹体地球化学分析,研究深部流体活动的期次、来源、时序及其对储层改造的影响,进而对油气动态保存条件进行探索性评价。

1 地质背景

塔东地区是塔里木盆地具有良好油气勘探前景的重要油气勘探区块,包括孔雀河斜坡、满加尔凹陷、英吉苏凹陷、塔东低凸起与塔南隆起等多个二级构造单元,面积约 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。前人先后在区内开展了构造热事件^[6]、流体包裹体^[7]、

寒武系白云岩成因^[8]等多个有关流体方面的研究,揭示出塔东地区深部存在与深大断裂有关的构造热液活动。为了更加深入细致的研究这些深部流体,就有必要对其开展地球化学示踪研究,以期能明确流体的来源、期次及其对储层的影响,为动态了解英东构造带乃至整个塔东地区深部流体活动提供一个新思路、新方法。

英东2井位于塔里木盆地中央隆起塔东低凸起英东构造带上(图1)。该井钻遇的下古生界从上自下依次为上奥陶统却尔却克组、中下奥陶统黑土凹组、中下奥陶统突尔沙克塔格组上段、上寒武统突尔沙克塔格组下段、中寒武统莫合尔山组和下寒武统西大山组—西山布拉克组(图2)。却尔却克组和黑土凹组泥岩、粉砂质泥岩与下伏白云岩、灰岩储层可形成良好的储盖组合。该井在寒武系中途测试时,试获气 $316 \text{ m}^3/\text{d}$ 、水 $26.22 \text{ m}^3/\text{d}$,评价为含气水层^[9]。

2 岩心及样品描述

英东2井取心井段岩性描述见图2。现将本次研究所取流体地球化学样品特征描述如下。

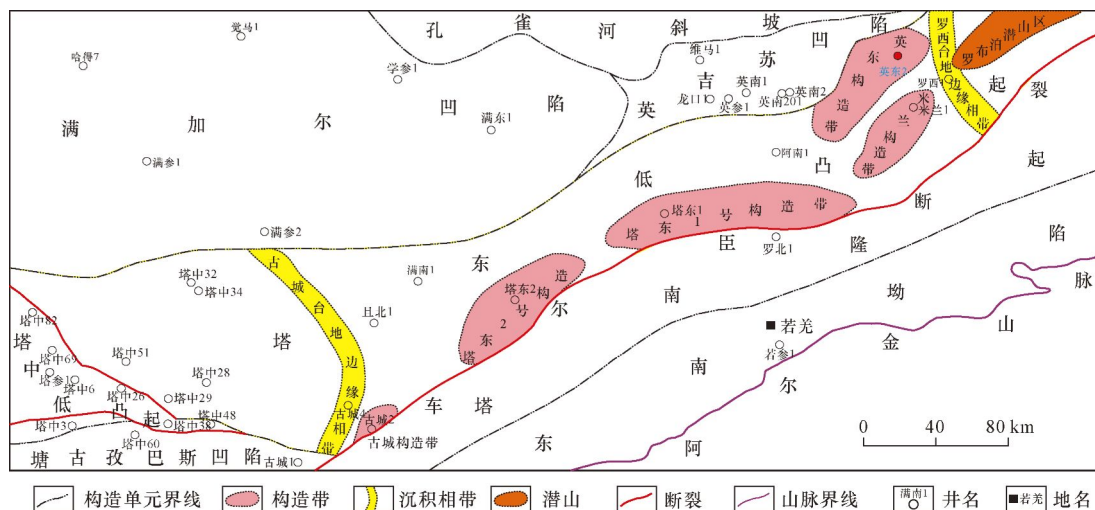


图1 塔东地区构造分区^①

Fig. 1 Structure division of eastern Tarim Basin

① 胡九珍. 塔东地区寒武系—下奥陶统碳酸盐岩储层研究. 成都理工大学, 2009.

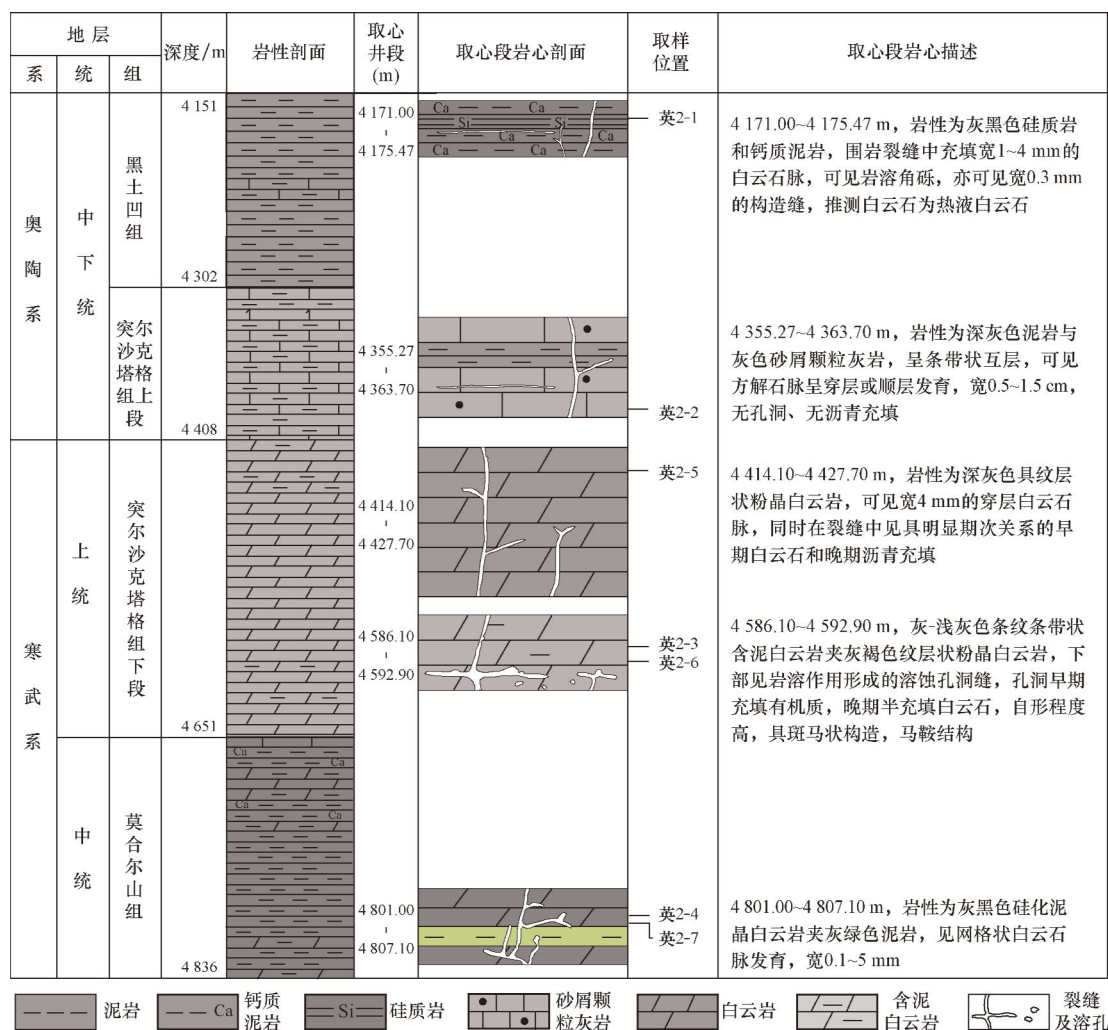


图2 英东2井取心井段综合柱状图

Fig. 2 Generalized column of cored interval in well Yingdong-2

井深4 172.30 m附近所取中、下奥陶统围岩样品(英2-1C)的岩性为灰黑色硅质岩和钙质泥岩,围岩中穿层或顺层裂缝较发育,顺层发育的裂缝多被有机质或泥质充填,穿层裂缝多被灰白色白云石脉充填(英2-1V),脉宽1~4 mm,同时见大量硅化和黄铁矿化产物——黄铁矿和石英。井深4 362.89 m附近所取中、下奥陶统围岩样品(英2-2C)的岩性为灰色灰岩,围岩中穿层中高角度裂缝较为发育,均被灰白色方解石脉充填(英2-2V),脉宽5~10 mm。井深4 417.65 m附近所取上寒武统围岩样品(英2-5C)的岩性为深灰色具纹层状粉晶白云岩,围岩中穿层裂缝较为发育,均被灰白色白云石脉充填(英2-5V),脉宽在4 mm左右。井深4 588.88 m和4 589.36 m附近所取上寒武统围岩样品(英2-3C、英2-6C)的岩

性为灰-浅灰色条纹条带状白云岩,白云岩围岩裂缝及溶蚀孔洞缝十分发育,裂缝均被灰白色白云石脉充填(英2-3V、英2-6V),脉宽在4~6 mm左右,溶蚀孔洞缝内部分或全充填重结晶白云石。井深4 803.80 m附近所取中寒武统围岩样品(英2-7C)的岩性为灰黑色硅化泥晶白云岩,围岩中网格状裂缝较为发育,被灰白色白云石脉充填(英2-4V、4 803.65 m),脉宽在3~5 mm左右。

3 流体地球化学特征

3.1 样品取样与分析测试

本次研究通过对岩心的详细观察与描述,划分出了不同期次、不同方向性质的裂隙。为了保证所取样品的代表性,取样时做到对于同一期次

或同一方向的脉体只取一个脉体样品,并在同一深度取围岩样品一个,将它们视为一对配对样品,避免重复取样。在该指导思想下,本次研究共选取该井上寒武统、中-下奥陶统中取心井段不同深度和层位最具代表性的 12 件(6 对配对)样品(4 803.65 m 的英 2-4V 和 4 803.80 m 的英 2-

7C 因深度相近,算一对配对样品),取样位置见图 2。采用直径为 3 mm 的牙钻分别钻取围岩及孔洞缝充填物,样量为 2 g 左右,小于 200 目。所取样品的锶同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)、无机碳氧同位素($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)、稀土元素测定由中国科学院地质与地球物理研究所完成。分析测试结果见表 1 和表 2。

表 1 英东 2 井碳酸盐样品碳、氧、锶同位素分析结果

Table 1 Carbon, oxygen, strontium isotopes of carbonate samples from Well Yingdong-2

样品编号	岩性	取样深度/m	层位	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\Delta(\text{充填物}-\text{围岩})/\text{‰}$		
							$\Delta\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\Delta\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\Delta^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
英 2-1V	白云石脉	4 172.30	O_{1-2}	-2.557	-15.143	0.713 8			0.002 8
英 2-1C	硅质岩和钙质泥岩					0.711 0			
英 2-2V	方解石脉	4 362.89	O_{1-2}	0.462	-21.944	0.709 8	-0.215	-9.847	0.000 3
英 2-2C	灰色灰岩			0.677	-12.097	0.709 5			
英 2-5V	白云石脉	4 417.65	ϵ_3	0.830	-13.138	0.710 8	-0.431	-3.171	0.001 4
英 2-5C	纹层状粉晶白云岩			1.261	-9.967	0.709 4			
英 2-3V	白云石脉	4 588.88	ϵ_3	0.003	-15.224	0.710 0	2.675	6.521	0.000 8
英 2-3C	条纹条带状白云岩			-2.672	-21.745	0.709 2			
英 2-6V	白云石脉	4 589.36	ϵ_3	0.443	-12.414	0.710 8	0.842	1.925	0.001 4
英 2-6C	条纹条带状白云岩			-0.399	-14.340	0.709 4			
英 2-4V	白云石脉	4 803.65	ϵ_2	-7.688	-12.062	0.710 8			

注:样品编号中“C”代表围岩,“V”代表同一层位围岩裂缝中的充填物; Δ 表示充填物与围岩同位素的差值。

表 2 英东 2 井碳酸盐样品稀土元素分析结果

Table 2 REE analysis of carbonate samples from Well Yingdong-2

样品编号	英 2-1V	英 2-5V	英 2-5C	英 2-3V	英 2-3C	英 2-6V	英 2-6C	英 2-4V	英 2-7C
层位	O_{1-2}	ϵ_3	ϵ_3	ϵ_3	ϵ_3	ϵ_3	ϵ_3	ϵ_2	ϵ_2
井深/m	4 172.30	4 417.65	4 417.65	4 588.88	4 588.88	4 589.36	4 589.36	4 803.65	4 803.80
岩性	白云石	白云石	白云岩	白云石	白云岩	白云石	白云岩	白云石	白云岩
稀土元素含量/ 10^{-6}	La	6.43	1.92	2.00	3.66	3.67	2.80	4.33	3.73
	Ce	26.46	6.36	4.32	11.02	7.41	5.07	9.80	8.19
	Pr	3.17	0.97	0.52	1.70	0.97	0.62	1.37	1.50
	Nd	15.68	4.34	1.91	7.48	3.93	2.49	5.81	5.67
	Sm	5.73	0.91	0.45	1.71	0.71	0.51	1.24	1.13
	Eu	3.67	0.19	0.10	0.45	0.20	0.16	0.34	0.39
	Gd	8.01	0.98	0.38	1.82	0.88	0.58	1.25	1.16
	Tb	1.43	0.15	0.06	0.29	0.10	0.08	0.18	0.16
	Dy	7.86	0.91	0.33	1.58	0.56	0.55	1.01	0.80
	Ho	1.34	0.14	0.07	0.30	0.10	0.09	0.19	0.13
	Er	3.39	0.41	0.19	0.72	0.26	0.28	0.49	0.32
	Tm	0.43	0.06	0.03	0.08	0.03	0.03	0.06	0.03
	Yb	2.25	0.31	0.19	0.46	0.17	0.15	0.31	0.20
	Lu	0.31	0.04	0.03	0.06	0.03	0.03	0.04	0.04
	Y	39.39	4.59	2.05	9.32	3.55	3.27	6.20	5.01
	ΣREE	125.55	22.28	12.63	40.65	22.57	16.71	32.62	28.46
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	1.88	4.08	6.93	5.24	14.22	12.30	9.20	12.29	6.78
δCe	1.36	1.08	0.98	1.03	0.91	0.89	0.93	0.80	0.68
δEu	1.67	0.62	0.75	0.79	0.78	0.91	0.84	1.05	0.65

注: δCe 和 δEu 通过 Leedey 球粒陨石标准化值计算得来。

3.2 中、下奥陶统中的流体

该套地层中所取围岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别为0.711 0和0.709 5,充填于同一层位围岩裂缝中的白云石和方解石脉体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别为0.713 8和0.709 8(表1;图3),脉体与围岩之间具有明显的锶同位素差异($\Delta^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分别为0.002 8与0.000 3),氧同位素差异($\Delta\delta^{18}\text{O}$ 为-9.847‰)以及碳同位素差异($\Delta\delta^{13}\text{C}$ 为-0.215‰)。脉体具有比围岩富锶而贫碳、贫氧的特征。

碳酸盐岩矿物的稀土元素总量较低,一般只有几至十几ppm。而4 172.30 m附近泥岩裂缝中白云石脉(英2-1V)的稀土元素总量(ΣREE 为125.55)明显大于这个范围,表明形成白云石脉体

的流体具有极其富稀土元素的特征。该白云石脉的 δCe 值和 δEu 值分别为1.36和1.67,且 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值明显大于1(为1.88)(表2),表明白云石脉体具有正Ce和正Eu异常特征^[10-11],总体属轻稀土元素富集型(图4a)。

4 172.30 m(英2-1V)处白云石脉内原生流体包裹体观测(图5),不但见气液两相的流体包裹体,亦可见纯液相的流体包裹体。拉曼光谱分析表明,纯液相流体包裹体的成分以 CH_4 为主,而气液两相流体包裹体中的气相部分也以 CH_4 为主。4 362.89 m(英2-2V)处充填物中的原生流体包裹体气相部分含有大量的 C_2H_6 和非烃物质 CO_2 ,液相部分还含有少量的 H_2S 。对比这两处不同深度的流体不难发现,它们具有明显不一样的流体包裹体组成特征,这可能暗示它们具有不同的来源。

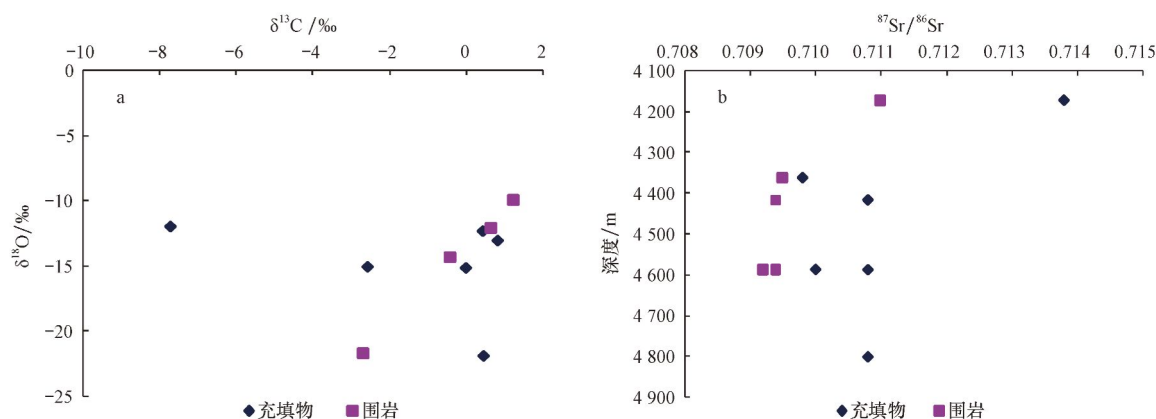


图3 英东2井碳酸盐样品 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ a)和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -深度 b)关系图

Fig. 3 The $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ plot a) and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Depth plot b) of carbonate samples from Well Yingdong-2

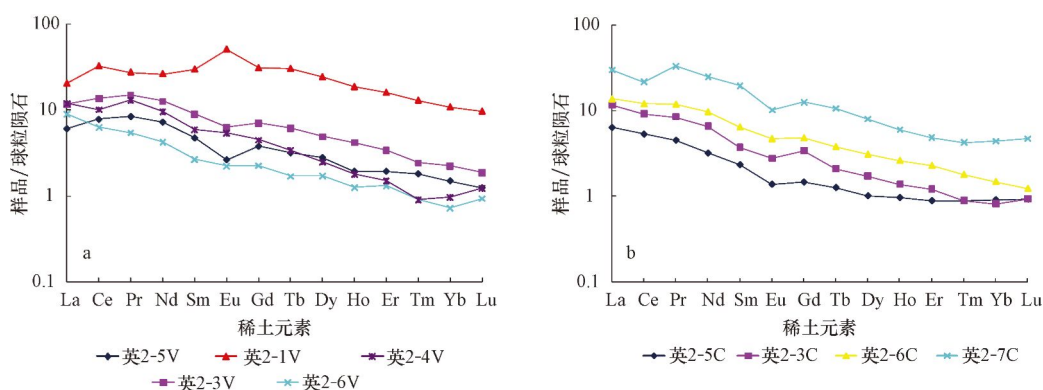


图4 英东2井不同碳酸盐样品球粒陨石标准化稀土元素配分模式

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns of different types of carbonate samples from Well Yingdong-2

a. 充填物稀土元素;b. 围岩稀土元素

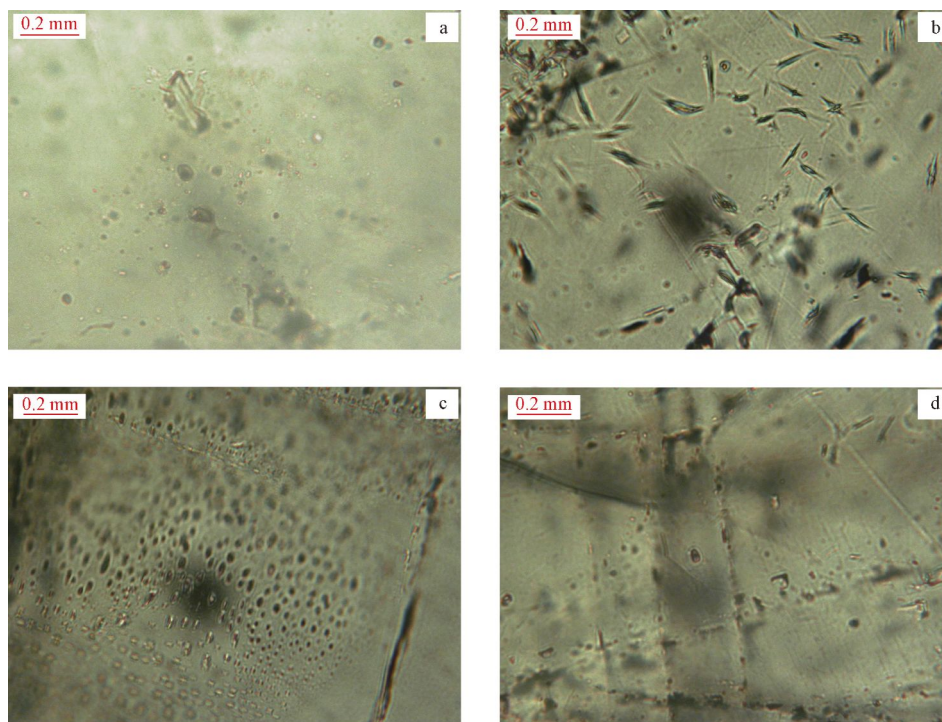


图5 英东2井脉体中流体包裹体显微照片及特征

Fig. 5 Photomicrographs and characteristics of fluid inclusions in the veins from Well Yingdong-2

a. 4 172.30 m, O_{1-2} , 气液两相、液相原生有机包裹体, 呈圆形、椭圆形, 气液比 1 : 4, 单偏光; b. 4 362.88 m, O_{1-2} , 气液两相原生有机包裹体, 形状不规则, 包裹体边缘粗黑, 液相颜色较暗, 气液比 1 : 6, 单偏光; c. 4 417.65 m, E_3 , 气液两相原生有机包裹体, 包裹体小, 数量众多, 沿一定方向排列, 呈短柱状、椭圆状, 气液比 1 : 8, 单偏光; d. 4 588.88 m, E_3 , 气液两相原生有机包裹体, 呈椭圆形, 气液比 1 : 4, 单偏光

3.3 寒武系中的流体

寒武系所取白云岩围岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于0.709 2~0.709 4, 同一层位围岩裂隙中所取白云石脉体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于0.710 0~0.710 8(表1;图3), 同一层位脉体与围岩之间具有明显的碳、氧、锶同位素差异, 其 $\Delta\delta^{13}\text{C}$ 介于-0.431‰~2.675‰, $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 介于-3.171‰~6.521‰, $\Delta^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 介于0.000 8~0.001 4。脉体同样明显具有比围岩富锶的特征。

同一层位白云岩脉体与白云石围岩之间在稀土元素总量(ΣREE)上具有明显的差异, $\Delta\Sigma\text{REE}$ 介于-40.86~18.08(表2)。除4 417.65 m(英2-5C)和4 589.36 m(英2-6V)两样品而外, 其余样品的 ΣREE 均较高, 表明形成脉体的流体具有富稀土的特征。而围岩则受到了富稀土流体的改造, 从而同样具有了富稀土的特征。

从稀土元素配分模式图上不难发现, 4 589.36 m

(英2-6V)白云石脉具有弱负Ce负Eu异常特征(图4a), 4 803.65 m(英2-4V)白云石脉具有明显的负Ce异常, 且Eu异常不明显特征(图4a), 4 417.65 m(英2-5V)和4 588.88 m(英2-3V)白云石脉具明显负Eu异常特征(图4a)。同时, 所取白云岩围岩及白云石脉体的(La/Yb)值(介于4.08~14.22)均明显的大于1(表2;图4), 总体上均属于轻稀土元素富集型。

4 417.65 m(英2-5V)处所取白云石脉体中所测两原生流体包裹体气相部分含有一定量的 C_6H_6 , 同时还含有大量的 CO_2 , H_2S 和CO, 均一温度较高(127.6℃)。4 588.88 m(英2-3V)处充填物中的原生流体包裹体气相部分由 CH_4 和 C_2H_6 组成, 液相部分以 H_2O 为主, 同时也含有少量的 H_2S 和 CO_2 , 均一温度较高(为167.2℃)。从寒武系所取流体包裹体特征上不难看出, 不同深度的流体具有不相一致的流体包裹体组份特征, 可能暗示它们可能为不同来源的流体。

4 讨论

研究表明^[12],锶同位素组成不会因环境物化条件的改变和生物作用过程而发生同位素分馏作用,而主要受锶的来源控制;加之前人已建立起了显生宙以来海水的锶同位素组成曲线^[4],从而可以通过测定孔洞缝中充填物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,并与寄主地层围岩和同时代海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值进行对比,便可获得形成孔洞缝内充填物的流体是来自于哪一套碳酸盐岩地层重溶后形成的流体或是来自于碳酸盐岩地层以外的外来流体^[3-5]。前人研究表明^[5],在地质历史时期内,碳、氧同位素组成受各种因素的影响较大,不能单独作为示踪元素,因而我们仅将碳、氧同位素作为锶同位素示踪的有益补充。而对于稀土元素来说,因其具有极其相似的化学性质、较低的溶解度、不易发生迁移以及元素分馏小等优势,从而使其同样具有示踪流体来源的能力^[13]。

4.1 流体的来源及形成期次

许效松等研究表明^[14],早奥陶世塔东地区仍处于拉张背景之下,形成的拉张系统可以成为深部热液流体向上运移的通道。从中、下奥陶统取心井段岩心观察发现,有热液白云石化的地层中均可见围岩发生大量硅化和黄铁矿化,石英和黄铁矿矿物组合的存在是热液活动的有力证据之一^[15],表明中、下奥陶统中存在来自地壳深部的热液流体。

同一层位脉体与围岩对比发现,两者之间具有明显的同位素差异(表1),且脉体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值均明显高于同时代早、中奥陶世和中、晚寒武世正常海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(分别介于0.708 5~0.709 0和0.709 1~0.709 3)^[2],表明形成脉体的流体并非来自围岩,应为外来富锶的流体。通过对比,可以将这些流体划分为3个期次:①中、下奥陶统4 172.30 m处围岩裂缝中存在一期 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值明显高于本井其他层位的外来富锶流体;②中、下奥陶统4 362.89 m处和上寒武统4 588.88 m处围岩裂缝中外来富锶流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值十分接近,暗示两处可能为同一期外来富锶流体;③上寒武统4 417.65,4 589.36与4 803.65 m处的外来富锶流体具有相同的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,说明它们应当属于另

一期同源的外来富锶流体。而对于这3期外来富锶流体的具体来源而言,研究表明流体的锶来源主要受控于壳源锶、幔源锶以及重溶锶和大气淡水^[16-17]。这3期外来富锶流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值均明显高于海相碳酸盐岩化学风化提供的重溶锶(初始值为0.708左右),这说明流体不可能来自于任一时代表正常沉积海相碳酸盐岩的重溶。区域构造研究表明塔东地区中、下奥陶统和中、上寒武统未曾有过暴露地表,因而流体也不可能来源于大气淡水。幔源锶主要由洋中脊热液系统或海底火山作用提供, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值为0.703 5,其明显低于这3期外来富锶流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,因而流体也不可能来源于地幔。壳源锶主要由大陆古老硅铝质岩石风化提供, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的全球平均值为0.711 9,这与这3期外来富锶流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值相近或相似,因此我们认为这3期外来富锶流体均应来自于地壳深部,为3期壳源富锶流体。

从稀土元素特征上看,所有形成充填物的流体和与之对应的围岩均具有明显不同的稀土元素地球化学特征(表2;图4),说明形成充填物的流体应为外来流体充注的结果。研究表明^[18-19],在酸性还原环境下,海底热水流体不但具有LREE富集、HREE亏损、较高的Y/Ho比值,同时具有明显正Eu异常特征,且无负Ce异常,甚至出现正Ce异常。中、下奥陶统中4 172.30 m处的这期流体具有轻稀土富集、重稀土亏损、高的正Eu异常,且流体的Y/Ho比值(29.39)在现代深海热水流体的Y/Ho比值范围(25~50)之内,暗示该期外来流体应当为来自地壳深部的热液流体。稀土元素地球化学特征不但证实了前述碳、氧、锶同位素研究结果,还从微观上印证了宏观岩心观察所得出的中下奥陶统中存在地壳深部热液活动的认识。

4.2 流体充注时序的划分

宏观上,从岩心裂缝中充填物的交切关系可见本井所取流体样品中至少存在先后两期的流体充注,最先充注的第一期流体为4 589.36 m处所取的白云石脉,第二期为形成4 588.88 m处白云石脉的流体。

微观上,流体包裹体研究可以用在确定关键性流体充注期次及时序上^[5,7]。王国芝等认为^[5],生油窗后生气窗前所充注的流体,其流体包裹体中多具有丰富的液态油包裹体;生气窗后所充注

的流体,其流体包裹体中常赋存大量的甲烷包裹体。4 417.65 m处所测充填物中的两流体包裹体气相部分均含有一定量的 C_6H_6 ,同时还含有大量的 CO_2 、 H_2S 和 CO ,其特征与王国芝所建立的油气生成史中的生气窗特征相一致^[5],同时结合其明显较高的均一温度,表明4 417.65 m处盐水流体充注时正处于天然气生气窗内。4 362.89 m处与4 588.88 m处充填物中所取流体包裹体成份较为相似,气相部分均含有大量的 C_2H_6 ,液相部分以 H_2O 为主,这说明充注于这两处裂缝中的流体可能为同一期流体;同时气相部分含有大量的 CO_2 ,均一温度明显较高,表明该流体的形成时间仍处于生气窗中,但由于气相中不再含有 C_6H_6 ,说明该期流体充注时天然气的演化程度明显要高于4 417.65 m处流体中的天然气,暗示该期流体的充注时间应晚于4 417.65 m处的流体。4 172.30 m处充填物中纯液相流体包裹体的成份以 CH_4 为主,而气液两相流体包裹体中的气相部分也以 CH_4 为主,其明显与生气窗后所充注流体的特征相似,表明该期流体是一期生气窗后所充注的流体。

4.3 流体对储层改造的影响

流体对储层改造的影响可以是正反两方面的。对于中下奥陶统中最晚一期来自地壳深部的热液富铈流体而言,其沿断裂、裂缝、层理及岩溶

不整合面等进入储层,岩心观察发现在热液活动通道两侧形成了一定范围的溶蚀改造区,从而达到改善储层储集性能的目的^[20-21]。另一方面,热液活动还会沉淀出与热液作用相关的标型矿物组合^[22],这些矿物大量充填于先存的孔洞缝中,造成中、下奥陶统储层孔隙度降低,破坏了储层的物性。而对于中、下奥陶统和中、上寒武统中另外两期较早充注的外来流体而言,因其并非是热液流体,且岩心观察发现流体主要沿先存围岩裂缝充注,并沉淀结晶析出,占据先存裂缝空间,从而降低了裂缝型储层的储集空间,因而其对储层改造明显起破坏性作用。另外,前人研究表明^[22],上寒武统4 589.28 m附近白云岩中大量溶蚀孔洞是中-深埋藏阶段富含有机酸的热液流体对碳酸盐岩溶蚀的结果。总体来说,裂缝为热液流体的运移提供良好的通道,而沿裂缝发生热液白云石化的岩石则具有更高的孔隙度,裂缝与热液溶蚀孔隙共同构成油气良好的储集空间,是塔东奥陶系、上寒武统碳酸盐岩储层今后勘探的一个重要方向^[23]。

4.4 保存条件动态评价

通过前述流体地球化学研究,我们已明确了英东2井流体充注的期次、时序及可能来源,建立了流体的运移轨迹,如图6所示。

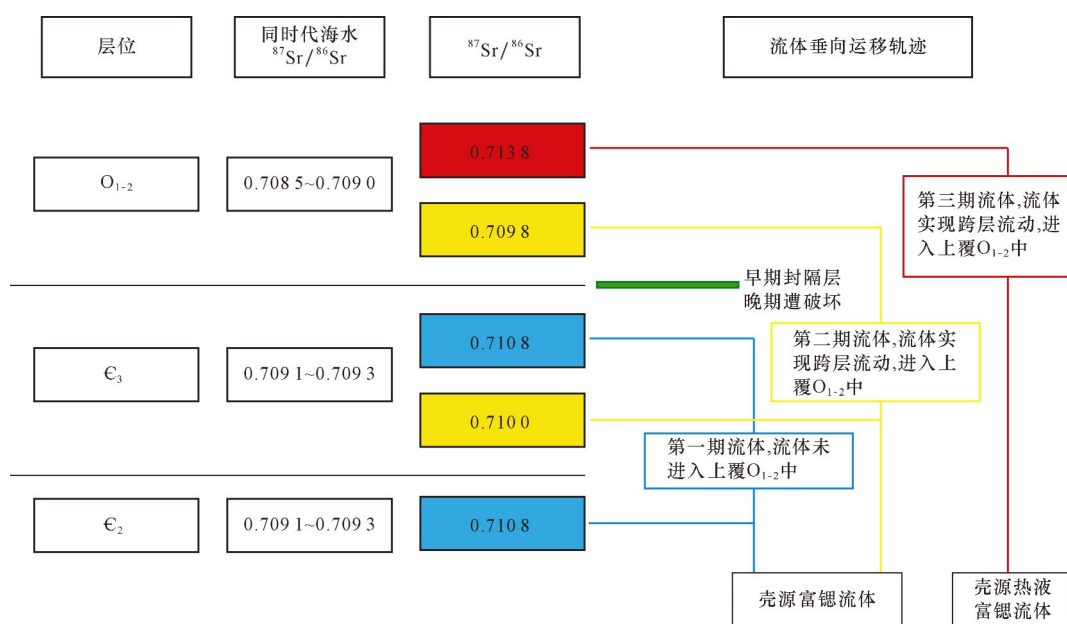


图6 英东2井古流体垂向运移轨迹

Fig. 6 Vertical migration path of Paleo-fluid in Well Yingdong-2

最早一期流体充注于中、上寒武统围岩裂缝中时,由于其与上覆地层中的流体具有不同的同位素组成特征,表明最早这一期流体可能并未进入到上覆地层中,暗示中、上寒武统与上覆中、下奥陶统是互不连通的,两套地层之间应存在一良好的封隔层,这为中、上寒武统储集层在此时具有相对较好的油气保存能力提供了条件。

第二期流体充注时,由于中、上寒武统和中、下奥陶统中均能见这期流体的存在,表明流体实现了跨层流动,暗示此时中、下奥陶统与下伏深部地层中的裂缝是相互连通的。这不但可以为深部盐水流体向上运移提供通道,同时也可作为寒武系烃源岩层中油气向上运移的通道。前述流体包裹体研究表明,该期流体充注时正处于天然气生气窗,那么烃源岩层生成的油气便能与第二期盐水流体一起向上运移进入中、下奥陶统中,从而造成中、上寒武统储集层此时不再具有保存油气的能力。

最晚一期来自地壳深部的壳源热液富铈流体充注时,由于其具有深源热液成因,表明这期热液流体充注时,中、下奥陶统与寒武系下伏地壳深部地层中的裂缝同样是相互连通的,从而更进一步破坏了中、上寒武统储集层保存油气的能力。

5 结论

1) 英东2井中、下奥陶统和中、上寒武统围岩裂缝中存在3期先后充注的壳源富铈流体。最早一期流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.7108;第二期流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于0.7098~0.7100;最晚一期流体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.7138,且具有正Ce正Eu异常特征,为一深源热液流体。

2) 最晚一期热液富铈流体对储层改造起到正反两方面影响,但其同时能在很大程度上改善储层的储集性能,而后两期外来富铈流体对储层改造均起破坏性作用。

3) 最早一期流体充注时,中、上寒武统储集层具有相对较好的油气保存条件,而后两期流体充注时,其不再具备保存油气的能力,这可能是造成实钻中、上寒武统储集层现今无油气产能的原因之一。

参考文献

- [1] 倪师军,滕彦国,张成江.成矿流体活动的地球化学示踪研究综述[J].地球科学进展,1999,14(4):346-352.
Ni Shijun, Teng Yanguo, Zhang Chengjiang. Review on the geochemical tracing of mineralizing fluid[J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(4): 346-352.
- [2] Mc Arthur J M, Howarth R J, Bailey T R. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: Best fit to the marine Sr isotope curve for 0-509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age[J]. Journal of Geology, 2001, 109: 155-170.
- [3] 王东,王国芝,冉启贵,等.塔东地区古城4井上寒武统-中、上奥陶统流体地球化学示踪[J].现代地质,2008,22(4):586-591.
Wang Dong, Wang Guozhi, Ran Qigui, et al. Geochemical tracing of fluid from Upper Cambrian-Ordovician in well Gucheng 4, Eastern Tarim Basin[J]. Geoscience, 2008, 22(4): 586-591.
- [4] Wang Guozhi, Liu Shugen, Su Wenchao, et al. Water soluble gas in deep carbonate reservoir, Sichuan Basin, Southwest China[J]. Journal of China University of Geosciences, 2008, 19(6): 636-644.
- [5] 王国芝,刘树根.海相碳酸盐岩区油气保存条件的古流体地球化学评价——以四川盆地中部下组合为例[J].成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(6):631-644.
Wang Guozhi, Liu Shugen. Paleo-fluid geochemical evaluation of hydrocarbon preservation in marine carbonate rock areas: taking lower association in central Sichuan Basin as an example[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(6): 631-644.
- [6] 冉启贵,程宏岗,肖中尧,等.塔东地区构造热事件及其对原油裂解的影响[J].现代地质,2008,22(4):541-548.
Ran Qigui, Cheng Honggang, Xiao Zhongyao, et al. Tectono-thermal event and its influence on cracking of crude oil in eastern Tarim Basin[J]. Geoscience, 2008, 22(4): 541-548.
- [7] 张鼐,邢永亮,曾云,等.塔东地区寒武系白云岩的流体包裹体特征及生烃期次研究[J].石油学报,2009,30(5):692-697.
Zhang Nai, Xing Yonglian, Zeng Yun, et al. Characteristics of fluid inclusions of cambrian dolomite and hydrocarbon—generation history in the eastern Tarim Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 2009, 30(5): 692-697.
- [8] 马锋,许怀先,顾家裕,等.塔东寒武系白云岩成因及储集层演化特征[J].石油勘探与开发,2009,36(2):144-155.
Ma Fen, Xu Huaixian, Gu Jiayu, et al. Cambrian dolomite origin and reservoir evolution in eastern Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 144-155.
- [9] 金英爱,桑洪,李毓丰,等.塔东地区英东2井钻探成果分

- 析及其意义[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(1): 34-36.
- Jin Ying'ai, Sang Hong, Li Yufeng, et al. Analysis of the result of drilling in Yingdong 2 and its application[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(1): 34-36.
- [10] 赵志根. 不同球粒陨石平均值对稀土元素参数的影响—兼论球粒陨石标准[J]. 标准化报道, 2000, 21(3): 15-16.
- Zhao Zhigen. Effect of different chondrite on the parameter of rare earth elements[J]. Reporting of Standardization, 2000, 21(3): 15-16.
- [11] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989, 90-93.
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua, et al. Rare earth element geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1989, 90-93.
- [12] Aberg G, Wickman T, Mutvei H. 用贻贝壳内锶同位素比值作为酸化指标[J]. 人类环境杂志, 1995, 24(5): 265-267, 309.
- Aberg G, Wickman T, Mutvei H. Using strontium isotope ratios of mussel shell as indicators of acidification[J]. AMBIO, 1995, 24(5): 265-267, 309.
- [13] 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 810-818.
- Hu Wenxuan, Chen Qi, Wang Xiaolin, et al. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 810-818.
- [14] 许效松, 汪正江, 万方, 等. 塔里木盆地早古生代构造古地理演化与烃源岩[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 49-57.
- Xu Xiaosong, Wang Zhengjiang, Wan Fang, et al. Tectonic paleogeographic evolution and source rocks of the Early Paleozoic in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3): 49-57.
- [15] 朱东亚, 孟庆强, 解启来, 等. 云南腾冲热液发育模式及其对塔里木盆地热液溶蚀改造的启示[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(3): 327-334.
- Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Xie Qilai, et al. Development pattern of hydrothermal fluids in Tengchong, Yunnan Province and its implications for hydrothermal dissolution in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(3): 327-334.
- [16] Palmer M R, Elderfield H. Sr isotope composition of sea water over the past 75 Myr[J]. Nature, 1985, 314: 526-528.
- [17] Palmer M R, Edmond J M. The strontium isotope budget of the modern ocean[J]. Earth Planet Sci Lett, 1989, 92: 11-26.
- [18] Olivier N, Boyet M. Rare earth and trace elements of microbialites in Upper Jurassic coral and sponge microbialite reefs[J]. Chemical Geology, 2006, 230: 105-123.
- [19] 丁振举, 刘丛强, 姚书振, 等. 海底热液系统高温流体的稀土元素组成及其控制因素[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 307-312.
- Ding Zhenju, Liu Congqiang, Yao Shuzhen, et al. Rare earth elements compositions of high-temperature hydrothermal fluids in sea floor and control factors[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(3): 307-312.
- [20] 舒晓辉, 张军涛, 李国蓉, 等. 四川盆地北部栖霞组-茅口组热液白云岩特征与成因[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 442-448, 458.
- Shu Xiaohui, Zhang Juntao, Li Guorong, et al. Characteristics and genesis of hydrothermal dolomites of Qixia and Maokou Formations in northern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 442-448, 458.
- [21] 吕修祥, 杨宁, 解启来, 等. 塔中地区深部流体对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 284-296.
- Lu Xiuxiang, Yang Ning, Xie Qilai, et al. Carbonate reservoirs transformed by deep fluid in Tazhong area[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(3): 284-296.
- [22] 胡九珍, 刘树根, 冉启贵, 等. 塔东地区寒武系-下奥陶统成岩作用特征及对优质储层形成的影响[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(2): 138-146.
- Hu Jiuzhen, Liu Shugen, Ran Qigui, et al. Diagenetic characteristics and their effect on the formation of good-quality reservoirs of the Cambrian System to Lower Ordovician in the east of Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(2): 138-146.
- [23] 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. 地质学报, 2006, 80(2): 245-253.
- Jin Zhijun, Zhu Dongya, Hu Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(2): 245-253.

(编辑 董立)