

桑植—石门复向斜及邻区 古流体特征与油气保存意义

刘安, 危凯, 李旭兵, 王保忠, 王强

(中国地质调查局 武汉地质矿产研究所, 武汉 430205)

摘要:通过对桑植—石门复向斜及相邻地区震旦系—三叠系方解石脉和围岩的碳氧同位素、锶同位素对比, 结合方解石脉中流体包裹体测试分析, 研究了桑植—石门地区古流体特征及其油气保存意义。下古生界围岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 部分高于同期海水, 也高于方解石脉, 表明围岩在裂隙形成之前受到高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 流体改造。桑植—石门复向斜北翼温泉附近的方解石脉体具高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、低 $\delta^{13}\text{C}$ 、低 $\delta^{18}\text{O}$ 特征, 显示大气水参与了方解石脉沉淀, 逆断层可能在形成之初就不具封闭性。流体包裹体盐度和均一温度指示, 桑植—石门地区上寒武统娄山关组上覆盖层残余厚度小于 3 km, 不具封闭能力; 中寒武统孔王溪组方解石脉流体包裹体高盐度表明膏盐盖层在研究区广泛分布, 在埋深超过 2 km 条件下对下伏地层具有较好的封盖能力。桑植—石门复向斜田二垭、向家垭、车坊背斜圈闭、桥头、中坪隐伏圈闭保存条件较好, 除田二垭背斜外, 可以同时将震旦系灯影组、寒武系清虚洞组白云岩作为勘探目的层。

关键词:古流体; 同位素; 流体包裹体; 保存条件; 桑植—石门复向斜; 中扬子区

中图分类号: TE122.2

文献标志码: A

Paleo-fluid characteristics and preservation of hydrocarbons in the Sangzhi–Shimen synclinorium and adjacent areas

Liu An, Wei Kai, Li Xubing, Wang Baozhong, Wang Qiang

(Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, China Geology Survey, Wuhan, Hubei 430205, China)

Abstract: The paleo-fluid characteristics and hydrocarbon preservation in the Sangzhi–Shimen synclinorium and adjacent areas are discussed using comparisons of C, O, and Sr isotopes between the calcite veins and surrounding rocks in the Sinian and Triassic formations and combined with the tests of fluid inclusions in calcite veins. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values of surrounding rocks in the Lower Paleozoic are higher than those of contemporary seawater and calcite veins, which suggests that the surrounding rocks had been reformed by fluid with high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values before fracturing. The calcite veins close to thermal springs in the north of Sangzhi–Shimen synclinorium have high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values, low $\delta^{13}\text{C}$ and low $\delta^{18}\text{O}$ values, which can be explained by the mixing of meteoric water during calcite vein deposition and suggests that reverse faults might have been open when they were formed. The salinity and homogenization temperature of fluid inclusions shows that the residual cap formations above the Upper Cambrian Loushanguan Formation are less than 3 km thick with poor sealing capacity. The high salinity of calcite inclusions in the Middle Cambrian Kongwangxi Formation showed that gypsum salt cap layers are distributed widely in the study area, and the gypsum salt layers buried over 2 km deep have excellent sealing capacity. The preservation conditions of the Tianerya, Xiangjiaya, Chefang anticline traps, and the Qiaotou, Zhongping buried structural traps are favorable. The dolomites in the Sinian Dengying Formation and Cambrian Qingxudong Formation are exploration targets except for those in the Tianerya anticline.

Key words: paleo-fluids; isotopes; fluid inclusions; preservation conditions; Sangzhi–Shimen synclinorium; middle Yangtze region

中扬子地区海相地层从震旦系至中生界发育多套生储盖组合, 但受到印支期以来强烈的构造挤

压和抬升剥蚀改造, 油气藏经历了形成、破坏和保存多期多阶段复杂演化, 保存条件是中国南方海相

收稿日期: 2014-08-29; 修订日期: 2015-09-08。

作者简介: 刘安(1981—), 男, 硕士, 工程师, 从事石油地质调查研究。E-mail: globstar@163.com。

基金项目: 中国地质调查局项目“武陵—湘鄂西页岩气资源调查评价”(12120114049801)、“桑植—石门及邻区油气地质综合调查研究”(1212011220745)资助。

油气成藏的关键已成为共识^[1-7]。马永生^[1]、楼章华^[2]采用盆地流体历史分析法研究中国南方的油气保存条件,并建立了相关评价体系;王国芝^[3]提出以碳、氧、锶同位素分析为主要手段,从古流体地球化学角度对保存条件进行动态评价。前人利用岩层方解石脉同位素对比,结合流体包裹体测试分析,在研究中扬子当阳复向斜、沉湖土地堂复向斜油气保存方面取得了较好的效果^[8-11]。国外也有学者利用同位素对比,结合流体包裹体分析,研究断裂带大气水渗透、油气渗漏^[12-13]。桑植—石门复向斜是中扬子地区油气勘探的有利构造单元,经地层水化学研究属于次级封存区^[14-15],但对于桑植—石门复向斜古流体特征及其保存意义缺乏详细的研究。本次研究主要依据桑植—石门及邻区海相地层裂隙充填的方解石脉、碳酸盐岩围岩的碳、氧、锶同位素以及方解石脉流体包裹体的均一温度和盐度特征,研究古流体来源及形成环境,分析评价研究区圈闭的保存条件。

1 地质背景

桑植—石门复向斜为中扬子南缘一个二级构造单元,北侧为宜都—鹤峰复背斜,南部以保靖—慈利断裂带为界与江南冲断褶皱带相邻(图1)。研究区发育震旦系—中生界地层,其中下震旦统陡山沱组、下寒武统牛蹄塘组、下志留统龙马溪组是区域性的烃源岩;牛蹄塘组、龙马溪组也是区域性的盖层,在近年的研究中,中寒武统孔王溪组膏盐层也被重视,被认为是一套广泛分布的盖层^[16-17];上震旦统灯影组、上寒武统娄山关组白云岩是区域

性分布的储集层,中寒武统膏盐层下伏清虚洞组白云岩储层近年也被关注。桑植—石门复向斜可以进一步分为堰塘湾、四望山、江垭、教子垭4个构造带,其间发育多个背斜圈闭,核部出露最老地层多为志留系^[18-19]。三叠纪以前该区形成以岩性圈闭为主的原生油气藏,燕山运动形成次生构造油气藏^[18]。宜都—鹤峰复背斜寒武系地层多已出露,保靖—慈利断裂带震旦系地层多处出露,常规油气勘探已无价值。

2 样品采集与测试

方解石脉及围岩样品采集大致从咸丰至慈利溪口,穿越宜都—鹤峰复背斜,桑植—石门复向斜、保靖—慈利断裂带(图2)。样品有分布于断裂带内部的,也有远离断裂带沿裂隙分布的。采集样品的层位从震旦系至三叠系,除了志留系—泥盆系没有分布外,其他各个时代均有涉及,志留系—泥盆系碎屑岩地层裂隙少见方解石充填。样品采集兼顾了横向和纵向对比分析的需要。

考虑到桑植—石门地区圈闭构造核部志留系地层多已出露,因此将分析测试的重点放在震旦系—下古生界,通过研究露头岩层的古流体信息推测覆盖区的古流体特征。样品测试工作主要在国土资源部中南测试中心完成。

3 结果与讨论

3.1 碳氧同位素特征及示踪

氧同位素在水和方解石之间的分馏与温度密切相关,深埋藏条件下氧同位素会负漂移,同时也会

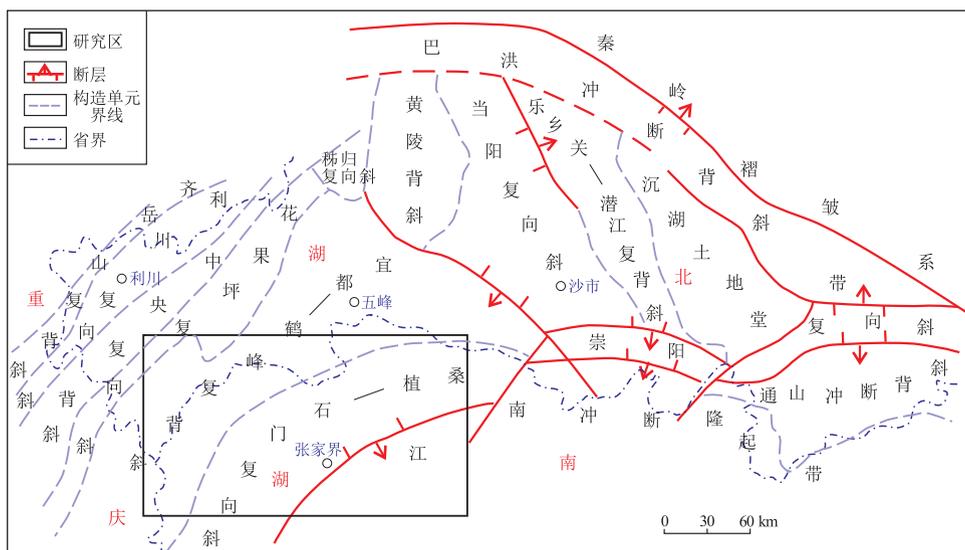


图1 桑植—石门复向斜及邻区位置

Fig.1 Location of the Sangzhi-Shimen synclinorium and adjacent areas

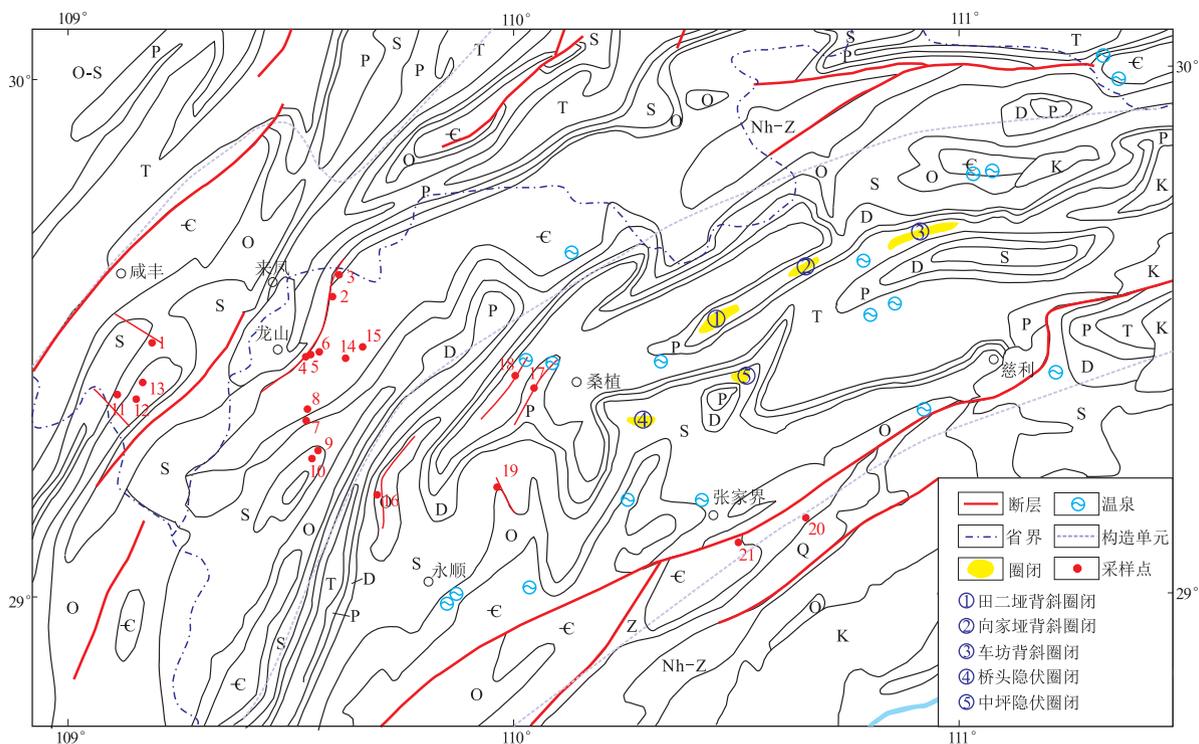


图 2 桑植—石门复向斜及邻区地质简图与采样位置

Fig.2 Simplified geological map and sampling sites of the Sangzhi-Shimen synclinorium and adjacent areas

受到来源的影响,大气水环境形成的方解石氧同位素也会负漂移^[20]。碳同位素分馏作用对温度不敏感,可以用碳酸盐岩胶结物的碳同位素来指示来源^[21]。

如表 1 所示,方解石脉的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为 $-6.69\text{‰} \sim 4.15\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 分布范围为 $-18.66\text{‰} \sim -7.83\text{‰}$; 围岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围为 $-2.59\text{‰} \sim 6.90\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 分布范围为 $-11.26\text{‰} \sim -5.79\text{‰}$ 。方解石脉的碳氧同位素一般都比围岩低, $\Delta^{13}\text{C}$ 和 $\Delta^{18}\text{O}$ 分布范围分别为 $-11.28\text{‰} \sim 0.38\text{‰}$ 和 $-9.51\text{‰} \sim 1.23\text{‰}$ 。根据 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素指示盐度值 (Z) 的公式^[22], 计算得到围岩的 Z 值为 $117.8 \sim 136.9$, 方解石脉的 Z 值为 $105.1 \sim 129.8$ 。一般认为 Z 值大于 120 为海水型碳酸盐岩, 小于 120 则可能有淡水混入。

采样点 17、18 位于桑植—石门复向斜北翼北东走向逆断裂内, 逆断层切穿上古生界、中生界地层, 沿断裂附近有低温温泉分布(图 2)。方解石脉 $\text{SZP}_2\text{m}-1$ 和 $\text{SZT}_1\text{j}-3$ 的 Z 值最低, 分别为 105.1 和 108.6, 方解石脉 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 小, 与围岩的碳氧同位素的差值 $\Delta^{13}\text{C}$ 、 $\Delta^{18}\text{O}$ 绝对值较大。推测断裂带附近 $\delta^{13}\text{C}$ 负异常是富含有机质的流体沿断裂通道上升过程中氧化生成的二氧化碳参与了方解石脉形成所致, 或者是大气水中溶解的 CO_2 混入导致方解石脉的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 偏低。

采样点 21 位于保靖—慈利断裂带, 断层穿过寒武系娄山关组地层, 断裂角砾岩极为发育, 富含红色

铁质、钙泥质胶结物。方解石脉样品 $\text{XK}\epsilon_4\text{l}-6$ 的 Z 值也较小, 为 111.1; 但另一方解石脉样品 $\text{XK}\epsilon_4\text{l}-4$ 的 Z 值接近 120, 可能各期次流体来源具有差异, 不论是岩石同位素还是富含紫红色铁质胶结物, 都表明断裂带形成时有氧气介入。

但不是所有的油气渗漏都会导致形成的方解石脉具有低的碳同位素负异常, 同一断裂带不同位置方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成有很大差别, 主要取决于形成的方解石脉的碳是否有来自被氧化的甲烷、有多少被氧化的甲烷混入其中^[12]。采样点 19 位于北西向延伸的右旋走滑断层内部, 奥陶系方解石脉和围岩的碳氧同位素没有差异, 表明断裂形成时处于相对封闭的环境, 没有其他性质流体介入。

采样点 6、10 为岩层内部的裂隙, 采样点离断层距离较大, 寒武系清虚洞组和二叠系茅口组岩层方解石脉与围岩碳氧同位素值也非常接近, 表明采样点流体主要来自围岩, 没有外部流体通过断层或裂隙混入。

部分寒武系方解石脉样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值较小, Z 值也小于 120, 但围岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同样也较小, 如采样点 14 白云岩围岩样品 $\text{Cy}\epsilon_3\text{k}-2$ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -2.59‰ 。前人研究表明, 中寒武统一上寒武统底部碳同位素有多个可以全球对比的负漂移段, $\delta^{13}\text{C}$ 最小值为 -6.2‰ , 上寒武统上部—奥陶系碳同位素多为正漂移^[23-24], 因此推测孔王溪组方

表1 桑植—石门复向斜及邻区围岩与方解石脉的C、O、Sr同位素数据

Table 1 C, O, Sr isotope values of surrounding rocks and calcite veins in the Sangzhi—Shimen synclinorium and adjacent areas

采样点	地层	样号	样品岩性	$\delta^{13}C_{PDB}/\%$	$\delta^{18}O_{PDB}/\%$	$\Delta^{13}C_{PDB}/\%$	$\Delta^{18}O_{PDB}/\%$	Z	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$\Delta^{87}Sr/^{86}Sr$
1	红花园组	GDO ₁ h-1	方解石脉	-1.25	-17.93	-0.65	-8.91	115.8	0.709 77	0.000 56
		GDO ₁ h-2	生物灰岩	-0.60	-9.02			121.6	0.709 21	
2	孔王溪组	SP ϵ_3 k-1	方解石脉	0.25	-7.83	-0.37	-0.57	123.9	0.708 74	-0.005 05
		SP ϵ_3 k-2	白云岩	0.62	-7.26			125.0	0.713 79	
3	牯牛潭组	ZYBO ₂ g-1	方解石脉	0.82	-15.24	-0.18	-3.10	121.4		
		ZYBO ₂ g-2	灰岩	1.00	-11.26			123.7		
4	牯牛潭组	XLO ₂ g-1	方解石脉	0.54	-16.22	-0.40	-6.65	120.3		
		XLO ₂ g-2	灰岩	0.94	-9.57			124.5		
5	孔王溪组	XL ϵ_3 k-3	方解石脉	-1.86	-8.44	-1.30	-2.65	119.3	-0.002 16	
		XL ϵ_3 k-4	方解石脉	-2.20	-8.96	-1.64	-3.17	118.3	0.708 83	
		XL ϵ_3 k-5	白云岩	-0.56	-5.79			123.3	0.710 99	
6	清虚洞组	XL ϵ_2 q-6	方解石脉	0.31	-10.47	0.38	-1.12	122.7		
		XL ϵ_2 q-7	灰岩	-0.07	-9.35			122.5		
7	宝塔组	MPO ₃ b-1	方解石	0.98	-11.01	-1.04	-0.12	123.8		
		MPO ₃ b-2	灰岩	2.02	-10.89			126.0		
8	娄山关组	PM ϵ_4 l-3	方解石 1	-1.95	-12.88	-0.95	-5.14	116.9	0.709 04	-0.000 21
		PM ϵ_4 l-4	方解石 2	-2.89	-10.75	-1.89	-3.01	116.0	0.709 21	-0.000 04
		PM ϵ_4 l-5	白云岩	-1.00	-7.74			121.4	0.709 25	
9	栖霞组	MPP ₁ q-6	方解石 1	1.10	-11.38			123.9		
		MPP ₁ q-7	方解石 2	0.87	-11.28			123.5		
10	茅口组	MPP ₂ m-8	方解石	3.36	-8.88	-0.73	-3.68	129.8		
		MPP ₂ m-9	灰岩	4.09	-5.20			133.1		
11	南津关组	DHO ₁ n-1	方解石	-1.19	-11.96	-0.79	-1.36	118.9	0.709 40	0.000 30
		DHO ₁ n-2	灰岩	-0.40	-10.60			121.2	0.709 10	
12	孔王溪组	DH ϵ_3 k-3	方解石脉	-2.38	-8.74	-2.25	1.23	118.1	0.709 80	0.000 24
		DH ϵ_3 k-4	白云岩	-0.13	-9.97			122.1	0.709 56	
13	孔王溪组	DH ϵ_3 k-5	方解石 1	-2.38	-14.26	-2.03	-5.73	115.3	0.708 91	-0.000 37
		DH ϵ_3 k-6	方解石 2	-2.28	-14.15	-1.93	-5.62	115.6		
		DH ϵ_3 k-7	白云岩	-0.35	-8.53			122.3	0.709 28	
14	孔王溪组	Cy ϵ_3 k-1	方解石脉	-4.86	-13.47	-2.27	-4.99	110.6	0.708 84	-0.001 11
		Cy ϵ_3 k-2	白云岩	-2.59	-8.48			117.8	0.709 95	
15	娄山关组	Cy ϵ_4 l-3	方解石	-2.51	-14.41	-1.88	-4.56	115.0	0.709 20	-0.000 17
		Cy ϵ_4 l-4	白云岩	-0.63	-9.85			121.1	0.709 37	
16	大湾组	SCO ₂ d-1	方解石脉	-0.08	-16.81	-1.48	-7.72	118.8		
		SCO ₂ d-2	方解石脉	0.72	-17.31	-0.68	-7.77	120.2		
		SCO ₂ d-3	方解石脉	0.88	-17.28	-0.52	-7.74	120.5		
		SCO ₂ d-4	灰岩	1.40	-9.54			125.4		
17	茅口组	SZP ₂ m-1	方解石脉	-6.69	-17.08	-11.28	-9.51	105.1	0.708 09	0.000 30
		SZP ₂ m-2	灰岩	4.59	-7.57			132.9	0.707 79	
18	嘉陵江组	SZT ₁ j-3	方解石脉	-5.56	-14.66	-5.94	-7.85	108.6		
		SZT ₁ j-4	灰岩	0.38	-6.81			124.7		
19	宝塔组	SZO ₃ b-5	方解石脉	1.01	-11.28	-0.14	-1.03	123.8		
		SZO ₃ b-6	方解石脉	1.02	-13.48	-0.13	-3.23	122.7		
		SZO ₃ b-7	灰岩	1.15	-10.25			124.6		
20	陡山沱组	XKZ ₁ d-1	方解石脉	2.75	-12.94	-4.15	-3.80	126.5	0.710 02	0.001 63
		XKZ ₁ d-2	方解石脉	4.15	-12.40	-2.75	-3.26	129.6	0.710 40	0.002 10
		XKZ ₁ d-3	灰岩	6.90	-9.14			136.9	0.708 39	
21	娄山关组	XK ϵ_4 l-4	方解石脉	-0.66	-12.65			119.6	0.709 84	
		XK ϵ_4 l-6	方解石脉	-3.39	-18.66			111.1	0.709 75	

注: $\Delta^{13}C = \delta^{13}C(\text{方解石}) - \delta^{13}C(\text{围岩})$; $Z = 2.048(\delta^{13}C + 50) + 0.498(\delta^{18}O + 50)$; $\Delta^{18}O = \delta^{18}O(\text{方解石}) - \delta^{18}O(\text{围岩})$; $\Delta^{87}Sr/^{86}Sr = ^{87}Sr/^{86}Sr(\text{方解石}) - ^{87}Sr/^{86}Sr(\text{围岩})$ 。

解石脉的流体来源为孔王溪组内部碳同位素负漂移段。

采样点 8、15 娄山关组方解石样品 PM ϵ_4 l-4、Cy ϵ_4 l-3 的 $\delta^{13}C$ 分别为 -2.89‰、-2.51‰, 在上寒

武统围岩 $\delta^{13}\text{C}$ 整体正偏移背景下^[23] 有较大的 $\Delta^{13}\text{C}$ 和低的 Z 值,推测其来源为下部的负偏移围岩段,或者是大气水的介入;下文的流体包裹体盐度分析表明并没有中寒武统高盐度的卤水混入,推测 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 低值是由于大气水介入所致。

另一些样品的方解石和围岩的同位素差异不大,需要结合其他手段推测古流体来源。

3.2 锶同位素特征及示踪

碳酸盐岩在成岩过程中所产生的流体如果没有外来流体的加入,其锶同位素应与母岩相同^[25]。当流体迁移到另外一个具有不同锶同位素组成的地层中,若流体与围岩的水岩反应弱,没有发生充分的同位素交换,那么重溶流体形成的碳酸盐岩矿物与围岩地层锶同位素就会产生差异,因此可以用锶同位素判断流体是外源或内源。地质历史中海水锶同位素是时间的函数, Veizer^[26] 建立了全球不同时代海水锶同位素曲线(图 3)^[26-28],因此外源锶同位素与全球海水相比较又可以推测其具体来源。

寒武系一二叠系地层碳酸盐岩围岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化较大,为 0.707 79~0.713 79,方解石脉体的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素变化范围在 0.708 09~0.710 40,各个时代地层方解石脉 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 特点是震旦系>上寒武统娄山关组—奥陶系>中寒武统孔王溪组(表 1,图 3^[26-28])。保靖—慈利断裂带附近采样点 20 获得陡山沱组灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{S}$ 为 0.708 39,

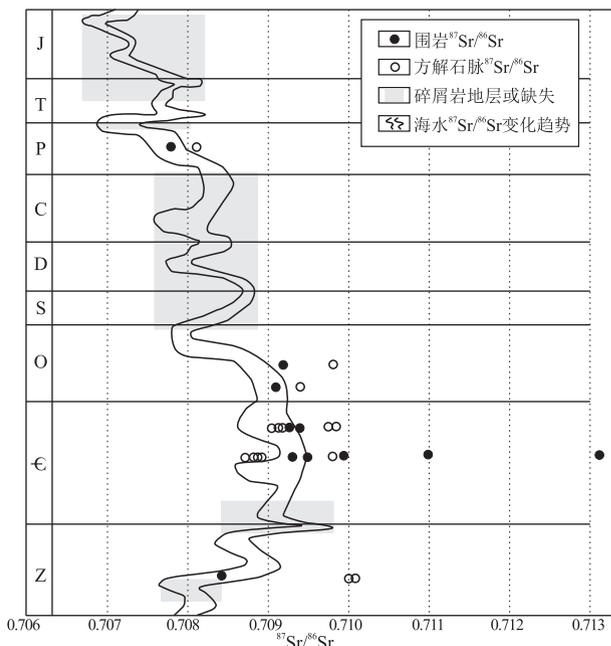


图 3 桑植—石门复向斜及邻区围岩及方解石脉锶同位素分布
海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值据文献^[26-28]。

Fig.3 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios for surrounding rocks and calcite veins
in the Sangzhi-Shimen synclinorium and adjacent areas

与峡东地区陡山沱组灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.708 16~0.708 66)^[29] 很接近,都落在早震旦世海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的分布范围内。陡山沱组裂隙方解石脉体样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.710 02 和 0.710 40,远大于同期的碳酸盐岩,也大于任何时代海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{S}$ 组成,推测方解石脉沉淀时有外来富含 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 流体介入。

中寒武统孔王溪组围岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.709 28~0.713 79,方解石脉体 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.708 74~0.709 80, $\Delta^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 -0.005 05~0.000 20。除个别样品外,所有采样点方解石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值都比围岩要小,且孔王溪组碳酸盐岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与同时期海水相比较偏高,可能部分碳酸盐岩在形成裂隙方解石脉之前已经受到富含 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 流体的影响,但是过高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值也可能是碳酸盐岩围岩含泥质成分所致。孔王溪组碳酸盐岩往往夹有泥质、砂质碎屑岩,或者是碳酸盐岩含有泥质成分,前人对古生界多套碎屑岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 有过相关测试,达到 0.718 9~0.743 1^[30]。全球锶同位素地层对比研究表明,中寒武统 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化较大,具有先较低、后升高的变化规律^[28],这与孔王溪组方解石脉 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化较大相一致,因此孔王溪组裂隙充填方解石脉体可能主要还是来源于孔王溪组内部。

上寒武统娄山关组白云岩和下奥陶统灰岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.709 10~0.709 37,方解石脉的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.709 20~0.709 77, $\Delta^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 -0.000 17~0.000 56。8 号采样点 PM- ϵ_4 l-4 方解石与围岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 基本一致,表明其流体主要来自围岩。8 号采样点和 15 号采样点娄山关组另外 2 个方解石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 都小于围岩,可能来自中下奥陶统或中寒武统的碳酸盐岩,但结合下文流体包裹体分析来看,可能来自上覆奥陶系地层。采样点 21 娄山关组方解石脉 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 明显高于同期围岩,推测主要为外来流体所致,这与方解石碳氧同位素的判断一致。奥陶系方解石脉 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比围岩大,而奥陶系以来海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 整体是降低的^[26],因此奥陶系方解石脉的流体有上覆碎屑岩的混入或者是大气水混入。

采样点 17 二叠系茅口组灰岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.707 79,与同时代的海水相比较 (0.707 5~0.708 0) 非常接近^[26],方解石脉样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.708 09,较围岩要大,明显小于下古生界碳酸盐岩锶同位素,因此可以排除下古生界碳酸盐岩流体沿着断裂进入二叠系的可能,很可能是大气水将地表高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 流体沿着断裂带带入所致,这与碳氧同位素获得的认识相同。

3.3 流体包裹体特征及意义

本次研究共采集 33 块方解石脉包裹体样品,其中大部分样品中流体包裹体不发育,或零星分布的流体包裹体个体太小($<3 \mu\text{m}$),不利于观测。因此挑选了震旦系和寒武系 6 个具有代表性的样品,对其流体包裹体进行了均一温度和冰点温度的测试。方解石脉流体包裹体多呈小群分布、少数定向分布;流体包裹体的形状多为四边形、椭圆形、多边形等;流体包裹体大小为 $4\sim 22 \mu\text{m}$,多数为 $6\sim 11 \mu\text{m}$;获得均一温度为 $70.0\sim 141.7 \text{ }^\circ\text{C}$;冰点温度为 $-18.9\sim -6.2 \text{ }^\circ\text{C}$ (表 2)。

流体包裹体冰点温度反映的盐度也可以作为判断流体来源的重要手段。郑荣才^[31]在研究川西拗陷方解石脉时,发现部分流体包裹体在 $-45 \text{ }^\circ\text{C}$ 仍不结冰,因此推测该期方解石脉的物质来源主要是雷口坡组蒸发盐岩地层水;陶士振^[32]在研究飞仙关组白云岩的包裹体时,也发现了高盐度流体的存在,并认为这种流体来自飞仙关组潟湖相沉积。海水的盐度一般大于 3%,而淡水的盐度一般小于 3%,因此包裹体的盐度还可以判别形成方解石脉的流体是否有大气水混入。

根据冰点温度计算获得方解石脉样品的平均盐度分布在 $9.17\%\sim 21.92\%$,从样品层系来看寒武系孔王溪组、清虚洞组样品的盐度要高于寒武系娄山关组、震旦系陡山沱组样品的盐度,盐度最高值为湖南龙山兴隆孔王溪组样品。孔王溪组方解石脉的高盐度流体说明研究区存在膏盐岩层,这与金之钧^[16-17]研究认为中寒武统膏盐层在中上扬子广泛分布的结论是相一致的。但就相邻地区不同层位的盐度来看,娄山关组要比下伏孔王溪组和清虚

洞组方解石脉的盐度明显偏低,可能是因为孔王溪组本身有一定的封闭作用,方解石脉形成时少有外源流体介入,而上覆娄山关组为高孔渗岩层受到了大气水的影响,盐度降低。采样点 20 方解石脉 XKZ₁d-2 位于保靖—慈利断裂带附近,盐度相对较低,为 10.4%。从早古生代大地构造位置来看该点处于被动大陆边缘的斜坡带,水深较台地深,缺乏膏盐层发育,该点的盐度可能代表了斜坡带盆地地层水的正常盐度。

流体包裹体的均一温度变化范围较大($70\sim 140 \text{ }^\circ\text{C}$),且同一套地层的均一温度差别也较大,表明方解石脉形成具有多期次的特点,这里用均一温度结合地温梯度来推算各个方解石脉样品形成的深度。郑冰^[33]利用黏土矿物混层比和伊利石结晶程度,计算了中扬子地区各个阶段地温梯度的变化,印支期以来中扬子地区地温梯度为 $2.2\sim 2.7 \text{ }^\circ\text{C}/\text{hm}$,喜马拉雅期地温梯度为 $3.7 \text{ }^\circ\text{C}/\text{hm}$ 。湘鄂西地区主要抬升剥蚀和断裂褶皱主要发生在印支运动之后,因此认为构造裂隙方解石脉主要是在印支运动之后产生,且喜马拉雅期高地温场主要分布在江汉盆地区,湘鄂西地区地温梯度应该没有明显上升,因此将湘鄂西地区印支期以来的地温梯度设定为 $2.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{hm}$,推测当时地表温度在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,那么样品 XL ϵ_3 k-3、XL ϵ_2 q-6、CY ϵ_3 k-1、PM ϵ_4 l-3、PM ϵ_4 l-4、XKZ₁d-2 均一温度所对应的地层埋深分别为 2.0、3.2、4.7、3.7、3.0、4.8 km。结合包裹体的盐度分析可知,孔王溪组膏盐层埋深大于 2 km 条件下对下伏地层具有较好的封闭性。孔王溪组上覆娄山关组方解石脉体较下伏地层盐度急剧减小,推测上覆残余地层厚度小于 3 km,已有大气水混

表 2 桑植—石门复向斜及邻区流体包裹体均一温度和盐度测试结果

Table 2 Homogenization temperature and salinity of fluid inclusions in calcite veins in the Sangzhi-Shimen synclinorium and adjacent areas

采样点	样品号	形状	大小/ μm	分布状态	冰点温度/ $^\circ\text{C}$	盐度/%	均一温度/ $^\circ\text{C}$
5	XL ϵ_3 k-3	四边形、长方形、椭圆形	6~12	小群分布	-18.7~-19.1/-18.9	21.73~22.00/21.92	68~74/70
6	XL ϵ_2 q-6	四边形、椭圆形、长方形,以四边形为主	8~10	小群分布	-15.2~-15.4/-15.3	18.96~19.13/19.01	91.2~130/102.5
8	PM ϵ_4 l-3	长方形、四方形、椭圆形、三角形,以长方形为主	5~22	定向分布	-1.5~-10.5/-8.9	2.56~14.52/11.62	80~137/112.5
8	PM ϵ_4 l-4	椭圆形、长方形	4~10	小群分布	-4.0~-10.6/-6.2	6.44~14.63/9.17	91~102/95.5
14	CY ϵ_3 k-1	椭圆形、四边形,以椭圆形为主	4~10	小群分布	-15.2~-15.8/-15.3	18.96~19.46/19.04	87~200/137.4
20	XKZ ₁ d-2	以长方形为主,另见椭圆形、不规则状	4~22	小群分布	-4.4~-10.0/-7.1	7.01~13.99/10.40	135~149/141.7

注:表中算式含义为最小值~最大值/平均值。

入。马永生^[1]研究湘鄂西地区大气水的下渗深度约 2 200~4 600 m,与本次流体包裹体分析的结论大致相似。

3.4 古流体对油气保存的指示

根据方解石脉及围岩的碳、氧、锶同位素以及方解石脉流体包裹体测试,结合地质条件及前人的研究成果,对桑植—石门复向斜油气保存可以得到以下认识:

(1)同位素指示在印支期以来逆冲挤压作用下产生的不同断层封闭性条件不一样。部分断层或伴生节理方解石脉与围岩具有相似的同位素特征,没有外源流体介入(如采样点 19),而裂隙被方解石脉完全充填则会增强断裂的封闭性。现在温泉的分布与各种规模的断层密切相关,断裂带方解石同位素表明发育温泉的断裂可能在形成时已经具开启性,有大气水的混入,油气保存条件差(如采样点 17、18)。研究区温泉的水温为 26.0~55.5 °C,推测桑植—石门复向斜地区开启性断裂带地下深度 2 km 以内大气水下渗循环强烈,不具有油气保存条件。

(2)中寒武统孔王溪组方解石脉流体包裹体高盐度指示了中寒武统膏盐层在中扬子广泛存在,该套盖层上覆地层残余厚度大于 2 km 条件下对下伏地层具有较好的封闭条件,威远气田勘探也证明中寒武统膏盐层在 2 km 埋深条件下对下伏气藏有较好的封闭性^[34];上寒武统娄山关组埋深 3 km 条件下已经不具备保存条件。考虑到桑植—石门地区构造复杂,膏盐层在一定温度、压力条件下才表现为塑性,前人研究塔里木盆地膏盐盖层在构造复杂区埋深大于 3 km 条件下才具有有效封盖能力^[35],因此将研究区埋深大于 3 km 的孔王溪组膏盐盖层作为有效盖层。

(3)综合研究桑植—石门复向斜地区田二垭、向家垭、车坊背斜圈闭、桥头、中坪隐伏圈闭志留系盖层残余厚度大、远离温泉、断层不发育,保存条件相对较好(图 2)。其中除了田二垭背斜外,圈闭构造核部孔王溪组的埋深均大于 3 km,膏盐盖层的封闭条件较好,可以同时将震旦系灯影组、寒武系清虚洞组白云岩作为勘探目的层。

4 结论

(1)下古生界围岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 部分高于同期海水,也高于裂隙方解石脉,表明围岩在裂隙形成之前受到高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 流体改造。

(2)方解石脉的碳、氧、锶同位素研究表明断裂、裂隙的封闭性差异大,分布在温泉点的逆断层

在断裂形成时已具有开启性,导致大气水的渗入,形成的方解石脉与围岩相比具有高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、低^δ¹³C、低^δ¹⁸O 的特点。

(3)桑植—石门地区中寒武统孔王溪组膏盐层分布广泛,埋深超过 2 km 条件下封闭条件较好。推测桑植—石门复向斜田二垭、向家垭、车坊背斜圈闭、桥头、中坪隐伏圈闭保存条件较好。除田二垭背斜外,其他圈闭可以同时将震旦系灯影组、寒武系清虚洞组白云岩作为勘探目的层。

致谢:感谢武汉地质矿产研究所李芳、周芸工程师在流体包裹体测试方面给予的帮助,感谢曾雄伟、李继涛等同事在野外采样方面给予的帮助。

参考文献:

- [1] 马永生,楼章华,郭彤楼,等.中国南方海相地层油气保存条件综合评价技术体系探讨[J].地质学报,2006,80(3):406-417.
Ma Yongsheng, Lou Zhanghua, Guo Tonglou, et al. An exploration on a technological system of petroleum preservation evaluation for marine strata in South China [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3):406-417.
- [2] 楼章华,马永生,郭彤楼,等.中国南方海相地层油气保存条件评价[J].天然气工业,2006,26(8):8-12.
Lou Zhanghua, Ma Yongsheng, Guo Tonglou, et al. Evaluation of oil and gas preservation conditions in marine formation in South China [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(8):8-12.
- [3] 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.
- [4] 李海,白云山,王保忠,等.湘鄂西地区下古生界页岩气保存条件[J].油气地质与采收率,2014,21(6):22-25.
Li Hai, Bai Yunshan, Wang Baozhong, et al. Preservation conditions research on shale gas in the lower Paleozoic of western Hunan and Hubei area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6):22-25.
- [5] 冯爱国,张建平,石元会,等.中扬子地区涪陵区块海相页岩气层特征[J].特种油气藏,2013,20(6):15-19.
Feng Aiguo, Zhang Jianping, Shi Yuanhui, et al. Characteristics of marine shale gas play in fuling block in the Middle Yangtze area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(6):15-19.
- [6] 李荣西,魏家庸,肖家飞,等.海进体系域碳氧同位素地球化学响应:以黔西南地区三叠系为例[J].地球科学与环境学报,2007,29(1):1-5.
Li Rongxi, Wei Jiayong, Xiao Jiafei, et al. Response of carbon and oxygen isotopic geochemistry to transgressive systems tract: An example from Triassic stratigraphy in southwestern Guizhou Province [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(1):1-5.

- [7] 李旭兵,陈绵琨,刘安,等.雪峰山西侧埃迪卡拉系陡山沱组页岩气成藏体系评价[J].石油实验地质,2014,36(2):188-193.
Li Xubing, Chen Miankun, Liu An, et al. Evaluation of accumulation system for shale gas of Doushantuo Formation in western Xuefeng Mountain[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2):188-193.
- [8] 杨建,王国芝,徐国盛,等.中扬子当阳复向斜带流体地球化学示踪及保存条件研究[J].矿物岩石,2010,30(4):95-101.
Yang Jian, Wang Guozhi, Xu Guosheng, et al. Research on fluid geochemistry and condition of trace and hydrocarbon preservation in Dangyang syncline, Central Yangtze[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2010, 30(4):95-101.
- [9] 王芙蓉,何生,杨兴业.中扬子海相碳酸盐岩中方解石脉成岩环境研究[J].石油实验地质,2011,33(1):56-60,65.
Wang Furong, He Sheng, Yang Xingye. Diagenetic environments of calcite veins hosted in marine carbonate rocks in middle Yangtze region of South China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1):56-60,65.
- [10] 王芙蓉,何生,杨兴业.方解石脉对中扬子地区沉湖土地堂复向斜油气保存单元的指示意义[J].矿物岩石,2012,32(1):94-100.
Wang Furong, He Sheng, Yang Xingye. Indication of calcite vein characteristics on petroleum preservation in the Chenhutudang synclinorium, middle Yangtze region, Southern China[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2012, 32(1):94-100.
- [11] 杨兴业,何生,何治亮,等.京山地区方解石脉包裹体、同位素特征及古流体指示意义[J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(1):19-26,34.
Yang Xingye, He Sheng, He Zhiliang, et al. Characteristics and paleo-fluid activity implications of fluid-inclusion and isotope of calcite veins in Jingshan area[J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(1):19-26,34.
- [12] Boles J R, Eichhubl P, Garven G, et al. Evolution of a hydrocarbon migration pathway along basin-bounding faults: Evidence from fault cement[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(7):947-970.
- [13] Katz D A, Eberli G P, Swart P K, et al. Tectonic-hydrothermal brecciation associated with calcite precipitation and permeability destruction in Mississippian carbonate reservoirs, Montana and Wyoming[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11):1803-1841.
- [14] 应维华,黄良汉.湘西北桑植—石门复向斜下古生界天然气保存条件研究[J].石油与天然气地质,1989,10(2):170-181.
Ying Weihua, Huang Liangan. Preservation condition of the lower Paleozoic natural gas in Shangzhi-Shimen syncline, northwest Hunan[J]. Oil & Gas Geology, 1989, 10(2):170-181.
- [15] 胡晓风,王韶华,盛贤才,等.中扬子区海相地层水化学特征与油气保存[J].石油天然气学报,2007,29(2):32-37.
Hu Xiaofeng, Wang Shaohua, Sheng Xiancai, et al. Hydrochemical characteristics and hydrocarbon preservation of marine formation in middle Yangtze[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(2):32-37.
- [16] 金之钧,龙胜祥,周雁,等.中国南方膏盐岩分布特征[J].石油与天然气地质,2006,27(5):571-583,593.
Jin Zhijun, Long Shengxiang, Zhou Yan, et al. A study on the distribution of saline-deposit in southern China[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5):571-583,593.
- [17] 金之钧,周雁,云金表,等.我国海相地层膏盐岩盖层分布与近期油气勘探方向[J].石油与天然气地质,2010,31(6):715-724.
Jin Zhijun, Zhou Yan, Yun Jinbiao, et al. Distribution of gypsum-salt cap rocks and near-term hydrocarbon exploration targets in the marine sequences of China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6):715-724.
- [18] 文志刚,杨申谷,李建国,等.桑植—石门复向斜成藏条件探讨[J].江汉石油学院学报,2003,25(4):21-23.
Wen Zhigang, Yang Shenggu, Li Jianming, et al. Shangzhi-Shimen synclinorium reservoir forming conditions[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25(4):21-23.
- [19] 郭建华,朱美衡,刘辰生,等.湖南桑植—石门复向斜走廊剖面构造特征分析[J].大地构造与成矿学,2005,29(2):215-222.
Guo Jianhua, Zhu Meiheng, Liu Chensheng, et al. Structural characteristics of the corridor section in Sangzhi-Shimen syncline[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2005, 29(2):215-222.
- [20] 陈荣坤.稳定氧碳同位素在碳酸盐岩成岩环境研究中的应用[J].沉积学报,1994,12(4):11-21.
Chen Rongkun. Application of stable oxygen and carbon isotope in the research of carbonate diagenetic environment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(4):11-21.
- [21] 王大锐.油气稳定同位素地球化学[M].北京:石油工业出版社,2000:123-145.
Wang Darui. Petroleum stable isotope[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000:123-145.
- [22] Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1964, 28:1786-1816.
- [23] 冯洪真,刘家润,施贵军.湖北宜昌地区寒武系—下奥陶统的碳氧同位素记录[J].高校地质学报,2000,6(1):106-115.
Feng Hongzhen, Liu Jiarun, Shi Guijun. Records of carbon and oxygen isotopes from the Cambrian and Lower Ordovician carbonates in Yichang area, Hubei Province[J]. Geological Journal of China Universities, 2000, 6(1):106-115.
- [24] 左景勋,彭善池,朱学剑.扬子地台寒武系碳酸盐岩的碳同位素组成及地质意义[J].地球化学,2008,37(2):118-128.
Zuo Jingxun, Peng Shanchi, Zhu Xuejian. Carbon isotope composition of Cambrian carbonate rocks in Yangtze platform, South China and its geological implications[J]. Geochimica, 2008, 37(2):118-128.
- [25] Dogramaci S S, Herczeg A L. Strontium and carbon isotope constraints on carbonate-solution interactions and inter-aquifer mixing in groundwaters of the semi-arid Murray Basin, Australia[J]. Journal of Hydrology, 2002, 262(1-4):50-67.
- [26] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical Geology, 1999, 161(1-3):59-88.
- [27] Sawaki Y, Tahata M, Ohno T, et al. The anomalous Ca cycle in the Ediacaran ocean: Evidence from Ca isotopes preserved in carbonates in the Three Gorges area, South China[J]. Gond-

wana Research, 2014, 25(3) : 1070-1089.

[28] 黄思静, 石和, 毛晓东, 等. 重庆秀山寒武系锶同位素演化曲线及全球对比[J]. 地质论评, 2002, 48(5) : 509-516.
Huang Sijing, Shi He, Mao Xiaodong, et al. Evolution of Sr isotope of the Cambrian sections in Xiushan, Chongqing, and related global correlation [J]. Geological Review, 2002, 48(5) : 509-516.

[29] 张自超. 我国某些元古宙及早寒武世碳酸盐岩石的锶同位素组成[J]. 地质论评, 1995, 41(4) : 349-354.
Zhang Zichao. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr data for some middle-late Proterozoic to early Cambrian carbonate rocks in China [J]. Geological Review, 1995, 41(4) : 349-354.

[30] 薛钧月. 龙门山构造带中—北段构造流体地球化学特征及其与成藏关系的探讨[D]. 成都: 成都理工大学, 2009: 15-46.
Xue Junyue. The geochemistry of tectonic fluids and a discussion on the hydrocarbon conservation in the central-northern section of Longmenshan Tectonic Belt, Western Sichuan, China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009: 15-46.

[31] 郑荣才, 彭军, 高红灿, 等. 川西坳陷断裂活动期次、热流性质和油气成藏过程分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2003, 30(6) : 551-558.
Zheng Rongcai, Peng Jun, Gao Hongcan, et al. Analysis of fracture active stages, heat fluid nature and the process of forming reservoir in Western Sichuan Sag [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2003, 30(6) : 551-558.

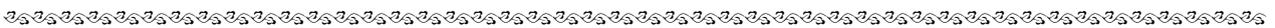
[32] 陶士振. 内生矿物序次是确定包裹体期次的根本依据[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2) : 154-160.
Tao Shizhen. Sequence of diagenetic authigenic mineral: The basis of timing the inclusions formation in sedimentary rocks [J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(2) : 154-160.

[33] 郑冰. 中扬子区多源、多期油气成藏地球化学研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008: 30-111.
Zheng Bing. Geochemical study of hydrocarbon accumulations with multiple sources and multiple generation stages in the middle Yangzi area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008: 30-111.

[34] 周雁, 金之钧, 朱东亚, 等. 油气盖层研究现状与认识进展[J]. 石油实验地质, 2012, 34(3) : 234-245, 251.
Zhou Yan, Jin Zhijun, Zhu Dongya, et al. Current status and progress in research of hydrocarbon cap rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3) : 234-245, 251.

[35] 卓勤功, 李勇, 宋岩, 等. 塔里木盆地库车坳陷克拉苏构造带古近系膏盐岩盖层演化与圈闭有效性[J]. 石油实验地质, 2013, 35(1) : 42-47.
Zhu Qingong, Li Yong, Song Yan, et al. Evolution of Paleogene saline deposits and effectiveness of traps in Kelasu tectonic zone, Kuqa Depression, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(1) : 42-47.

(编辑 韩 或)



(上接第 741 页)

[13] 张成林, 黄志龙, 卢学军, 等. 二连盆地巴音都兰凹陷油气资源空间分布研究[J]. 断块油气田, 2014, 21(5) : 550-554.
Zhang Chenglin, Huang Zhilong, Lu Xuejun, et al. Research on spatial distribution of petroleum resources in Bayindulan Sag of Erlian Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(5) : 550-554.

[14] 崔周旗, 李文厚, 吴健平, 等. 乌里雅斯太凹陷斜坡带湖底扇相砾岩体沉积特征与隐蔽油藏勘探[J]. 沉积学报, 2005, 23(1) : 21-28.
Cui Zhouqi, Li Wenhou, Wu Jianping, et al. The depositional characteristics of conglomerate bodies and exploration in subtle oil pools of sublacustrine fan facies in slope zone, Wuliyasitai Sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(1) : 21-28.

[15] 吴远坤, 陈吉, 王春红, 等. 南堡凹陷深层砂质碎屑流储层特征[J]. 特种油气藏, 2014, 21(6) : 57-60.
Wu Yuankun, Chen Ji, Wang Chunhong, et al. Features of deep sandy debris flow reservoir in Nanpu Sag [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(6) : 57-60.

[16] 纪友亮, 李清山, 王勇, 等. 高邮凹陷古近系戴南组扇三角洲沉积体系及其沉积相模式[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1) : 9-19.
Ji Youliang, Li Qingshan, Wang Yong, et al. Fan delta sedimentary system and facies models of dainan formation of Paleogene in Gaoyou Sag [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1) : 9-19.

[17] 赵贤正, 降栓奇, 淡伟宁, 等. 二连盆地阿尔凹陷石油地质特征研究[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(1) : 12-17.
Zhao Xianzheng, Jiang Shuanqi, Dan Weining, et al. Petroleum geologic characteristics of Artala Sag in Erlian Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2010, 22(1) : 12-17.

[18] Horton B K, Schmitt J G. Sedimentology of a lacustrine fan-delta system, Miocene Horse Camp Formation, Nevada, USA [J]. Sedimentology, 1996, 43(1) : 133-155.

[19] 张关龙, 陈世悦, 鄢继华, 等. 三角洲前缘滑塌浊积体形成过程模拟[J]. 沉积学报, 2006, 24(1) : 50-55.
Zhang Guanlong, Chen Shiyue, Yan Jihua, et al. Simulation of luxoturbidite in front of delta [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1) : 50-55.

[20] 徐显生, 王建新, 杨婷, 等. 贝尔凹陷南屯组湖底扇特征及有利储集相带[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(4) : 361-364.
Xu Xiansheng, Wang Jianxin, Yang Ting, et al. Characteristics and favorable reservoir facies belt of sublacustrine fan of Nantun Formation in Beier Sag, Hailaer Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(4) : 361-364.

(编辑 徐文明)