

doi:10.3799/dqkx.2016.040

塔中顺南缓坡奥陶系热流体活动与 天然气成藏的耦合关系

鲁子野¹, 陈红汉^{1,2*}, 云露³, 曹自成³, 韩俊³, 尚培¹

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074
2. 中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心, 甘肃兰州 730000
3. 中国石化西北油田公司勘探开发研究院, 新疆乌鲁木齐 830011

摘要: 天然气成藏已经成为目前的研究热点之一。通过对塔里木盆地顺南地区奥陶系 44 块样品进行成岩观察、流体包裹体系统分析、碳氧同位素分析测试和激光拉曼探针测试, 对区内的热流体活动及热液矿物进行了识别, 并对可能的热流体活动和油气成藏时期进行了推测。结果显示热流体活动在区内形成了大套的硅化地层和大量裂缝、溶洞中的方解石和石英胶结物, 并伴随区内第 1 期天然气成藏, 可能发生于海西晚期一印支期; 区内第 2 期油气成藏主要发生于喜山期, 以天然气为主。热流体活动不仅促进了海西晚期的天然气成藏, 同时也对储层物性的提高和储集空间的保存起到了积极作用。

关键词: 塔中北坡; 顺南地区; 热液矿物; 流体包裹体; 碳氧同位素组成; 油气。

中图分类号: P618.130

文章编号: 1000-2383(2016)03-0487-12

收稿日期: 2015-11-25

The Coupling Relationship between Hydrothermal Fluids and the Hydrocarbon Gas Accumulation in Ordovician of Shunnan Gentle Slope, Northern Slope of Tazhong Uplift

Lu Ziyi¹, Chen Honghan^{1,2*}, Yun Lu³, Cao Zicheng³, Han Jun³, Shang Pei¹

1. Department of Petroleum Geology, Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Lanzhou Center for Oil and Gas Resources, Institute of Geology & Geophysics Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
3. Institute of Petroleum Exploration, Sinopec Northwest Oil field Company, Urumqi 830011, China

Abstract: Natural gas allumulation has become one of the hot spots in the current research. In this paper, 44 samples of the Ordovician in Shunnan area have been employed to make diagenetic observation, fluid inclusions measurement, carbon and oxygen isotope measurement and Raman spectrum, aiming to recognize the hydrothermal fluid flows and speculate the time of the hydrothermal fluid flows and the accumulation of the oil and gas. The silicified limestone and the calcite, quartz cement in the cracks and caves are the products of hydrothermal fluids, accompanied with the first stage of gas accumulation during late Hercynian-Indosinian. The second stage of gas accumulation produced during Himalayan. Hydrothermal activities not only promote the gas accumulation during Hercynian, but also play a positive role in improve and preserve the reservoir spaces.

Key words: northern slope of Tazhong uplift; Shunnan area; hydrothermal mineral; Fluid inclusions; stable carbon and oxygen isotope ratios; hydrocarbon.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”课题(No. 2012CB214804); 国家“十二五”重大科技专项(No. 2011ZX05008-003-30); “构造与油气资源”教育部重点实验室开放基金项目(No. TPR-2014-20)。

作者简介: 鲁子野(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事热流体活动及油气成藏研究。E-mail: luziyei88@163.com

* **通讯作者:** 陈红汉, E-mail: hhchen@cug.edu.cn

引用格式: 鲁子野, 陈红汉, 云露, 等. 2016. 塔中顺南缓坡奥陶系热流体活动与天然气成藏的耦合关系. 地球科学, 41(3): 487-498.

所谓“热流体”是指比地层温度高 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的流体 (Davies and Smith, 2006). 沉积盆地深层热流体活动及其对油气储层改造以及与天然气成藏的关系正日益受到越来越多的关注, 因为热流体活动不仅能形成闪锌矿、萤石、重晶石和堇青石等成岩矿物 (李开开等, 2008; 李忠等, 2010; 刘显凤等, 2012), 而且作用于深层碳酸盐岩地层形成优质储层, 例如热流体可以溶蚀碳酸盐岩地层形成大量次生孔隙 (吴茂炳等, 2007; Wendte *et al.*, 2009a; 杨海军等, 2012; 金之钧等, 2013), 也可以使灰岩发生白云岩化或使泥微晶白云岩发生重结晶形成优质白云岩储层 (Lavoie and Chi, 2004; 陈代钊, 2008; 朱东亚等, 2010; 焦存礼等, 2011). 另外, 热流体活动形成的成岩矿物中常常捕获凝析油和纯气相烃类包裹体, 指示盆地深层热流体活动过程中伴随着高成熟油气的运移和聚集 (Goldstein, 2001; 吴悠等, 2011).

近年来, 塔中北坡顺南缓坡的油气勘探取得了巨大突破, SN1 井在一间房组和鹰山组上部揭示了缝洞型储层, 并产出天然气和少量凝析油; SN4 井在鹰山组钻遇硅化地层与溶洞 (图 2), 并获得高产天然气流, 显示出顺南缓坡巨大的勘探潜力. 本文通过对塔中北坡顺南地区奥陶系碳酸盐岩储层钻井岩心和薄片观察, 利用阴极发光、显微荧光、流体包裹体、碳氧同位素和显微激光拉曼等分析测试技术, 对热流体形成的成岩矿物进行了判识, 并探究热流体活动与天然气成藏的耦合关系.

1 地质背景

塔中顺南缓坡构造带西部以 I 号断裂为界与卡塔克隆起相接, 东为满加尔坳陷, 南为古城墟低凸, 北为顺托果勒低隆起 (图 1). 区内钻井揭示, 顺南缓坡构造带奥陶系自上而下发育了上奥陶统桑塔木组、上奥陶统良里塔格组、上奥陶统恰尔巴克组、中奥陶统一间房组、中下奥陶统鹰山组、下奥陶统蓬莱坝组, 奥陶系发育齐全 (图 2), 为大套碳酸盐岩“连续沉积” (刘忠宝等, 2012; 唐照星等, 2013).

早奥陶世: 塔中北坡为伸展构造背景下稳定的台地相沉积 (魏国齐等, 2000), 发育大量小型张性正断层. 早奥陶世末, 区内构造背景从伸展环境转向挤压环境, 塔中 I 号断裂开始活动, I 号断裂带上盘抬升剥蚀, 卡塔克隆起开始形成. 顺南缓坡为 I 号断裂带下盘, 靠近 I 号断裂带处古地貌较高.

中奥陶世末: 受加里东中期 I 幕构造运动的影响, 塔中 I 号断裂带剧烈活动, 北西向的逆冲岩片或滑动块体中由于差异运动而形成了一系列北东走向的撕裂断层—调节断层 (杨圣彬等, 2013). 卡塔克地区整体抬升, 中奥陶统一间房组及中下奥陶统鹰山组顶部剥蚀殆尽, I 号断裂带下盘的顺南地区受该期构造运动的影响较弱, 中奥陶统一间房组地层得以保留, 在靠近 I 号断裂带处可能发生抬升与暴露剥蚀 (马庆佑等, 2013).

晚奥陶世: I 号断裂带下盘的塔中北坡由开阔

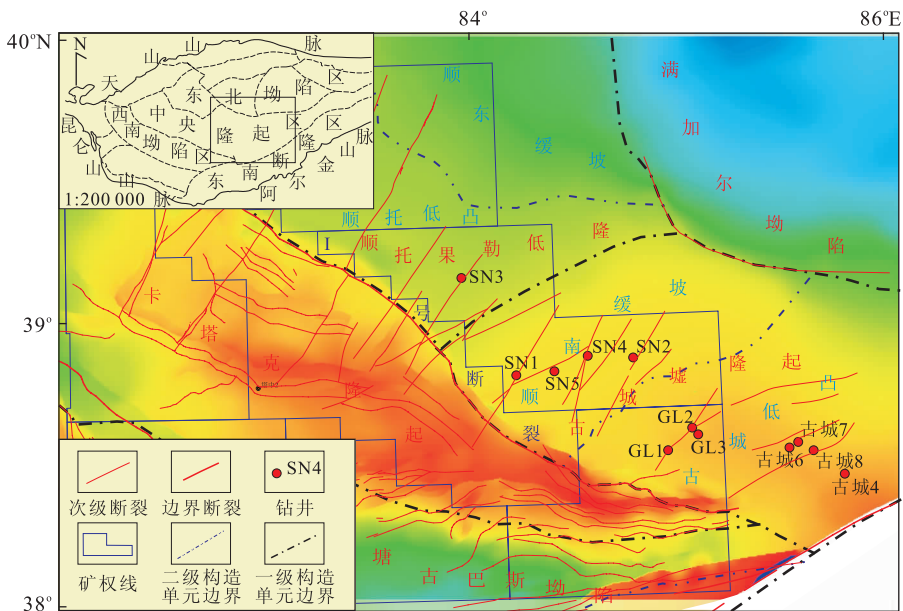


图 1 塔中北坡顺南地区位置及钻井分布

Fig. 1 The locations of Shunnan area and wells in the northern slope of Tazhong uplift

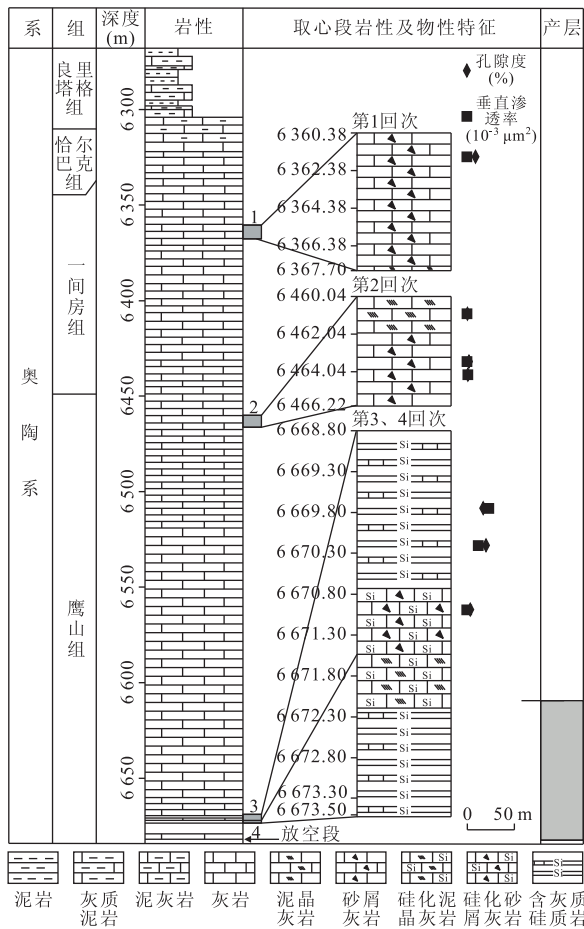


图 2 SN4 井奥陶系柱状图

Fig. 2 The lithological column of the Ordovician in well SN4

台地相碳酸盐岩转为混积陆棚相的碎屑岩沉积。

志留纪—泥盆纪:加里东晚期运动,由于车尔臣断裂的强烈左行走滑,塔中北坡受到东南方向强烈斜向挤压作用,在加里东中期北东走向断层的基础上,形成了一系列北东走向的左行走滑断裂.顺南缓坡带发生了抬升,但奥陶系碳酸盐岩总体上并未遭受显著剥蚀而发生大规模的近地表岩溶作用。

二叠纪:塔里木盆地经历了强烈的火山活动,塔里木早二叠世板内岩浆作用形成的岩浆岩系列构成了一个新的大火成岩省(杨树锋等,2014),岩浆序列的发育时间为 290~275 Ma(陈汉林等,2009).强烈的火山活动一方面对沉积作用具有明显的控制作用(余星等,2009),另一方面直接或间接的影响盆地内流体的大规模运动,对储层改造、油气运移发生积极的作用。

三叠纪—第四纪:印支—喜山运动,塔中地区以受南部造山运动挤压应力为主,顺南缓坡逐渐演化为北倾的“斜坡”,喜山期塔中北坡构造最终定型(汤良杰等,2014)。

2 热流体活动的证据

2.1 成岩作用及成岩序次

区内 SN1~SN4 井取心段主要集中在中奥陶统一间房组及中下奥陶统鹰山组.通过奥陶系岩心观察,采集并磨制了 44 块双面抛光薄片样品,进行了冷阴极发光、显微荧光及流体包裹体测试。

除 SN2 井外,其他井中奥陶统一间房组取心段裂缝发育较少,且均被方解石全充填.中下奥陶统鹰山组裂缝、溶蚀孔洞大量发育,被方解石、石英等矿物交代、充填或半充填(图 3a~3e),沿裂缝可见蜂窝状溶孔(图 3b),薄片观察识别出了 3 种主要的成岩矿物:硅质矿物、方解石和白云石。

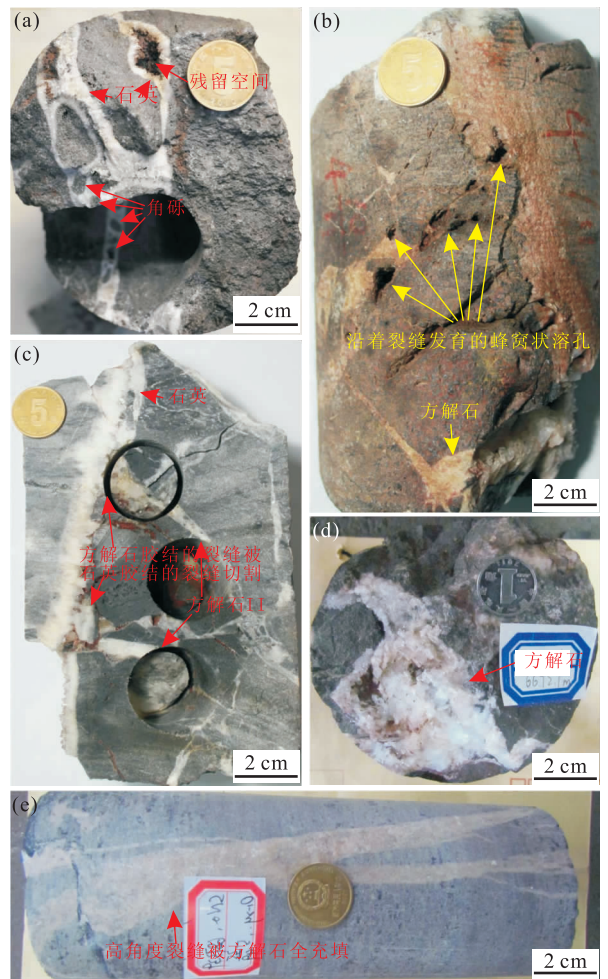


图 3 顺南地区奥陶系岩心照片

Fig. 3 The typical pictures of core samples in Shunnan area
 a. SN4 井, O₁₋₂y, 6 670. 44 m, 裂缝被石英充填或半充填; b. SN4 井, O₁₋₂y, 6 673. 28 m, 沿着裂缝发育的蜂窝状溶孔和溶洞中充填的方解石; c. SN4 井, O₁₋₂y, 6 673. 28 m, 高角度裂缝被石英半充填; d. SN4 井, O₁₋₂y, 6 672. 10 m, 溶洞被方解石半充填; e. SN2 井, O₂y, 6 873. 39 m, 高角度裂缝被方解石全充填

2.1.1 硅质矿物 硅化作用主要指碳酸盐岩被硅质流体硅化为硅质碳酸盐岩或硅质岩的过程(崔欢等, 2012). 顺南缓坡奥陶系岩心和镜下可见大量硅质交代、裂缝硅质充填和石英晶洞等现象. 胶结作用形成的石英呈自形晶簇状充填或半充填于裂缝、溶蚀孔洞中(图 3a, 3c), 发育于 SN4 井鹰山组. 这类石英以巨晶石英($>100\ \mu\text{m}$)为主(马文辛等, 2014), 阴极发光显微镜下呈蓝色、棕色, 镜下可观察到从裂缝、溶孔壁向缝洞中心石英颗粒变大、自形程度变高的趋势(图 4a, 4a').

交代作用形成的石英广泛发育于 SN2 井一间房组和鹰山组以及 SN4 井鹰山组. 前者发育的交代

石英以微晶石英($5\sim 100\ \mu\text{m}$)为主, 发蓝色阴极光, 呈长柱状或者等轴粒状, 自形程度高, 零星分布于灰岩围岩中(图 4b, 4b'). 后者的交代作用更为发育, 主要分布于 SN4 井鹰山组(图 2). 镜下可见这些硅质矿物以微晶石英为主, 少量巨晶石英, 发蓝色阴极光, 自形程度从他形至自形均有发育; 在硅化层段内石英自形程度高, 发育大量的石英晶间孔(图 4a, 4a', 图 4c, 4c'); 硅化灰岩中除了石英分布规模较大之外, 其他与 SN2 井总体相似(图 4d, 4d').

2.1.2 方解石 岩心观察表明方解石胶结物分布于裂缝、溶蚀孔洞及石英晶间孔中(图 3b~3d). 根据阴极发光颜色将观察到的方解石胶结物分为两个

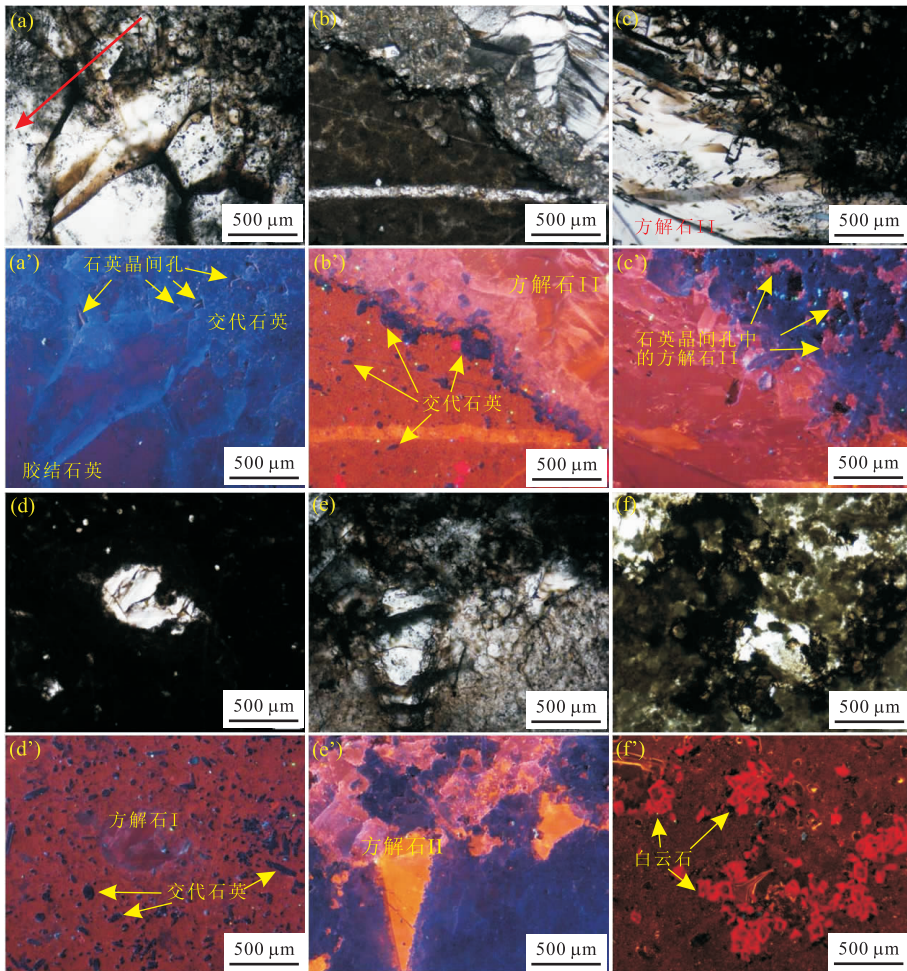


图 4 顺南地区奥陶系典型成岩现象照片

Fig. 4 The typical pictures of diagenesis processes in Shunnan area

a-a'. SN4 井, $O_{1-2}y$, 6 673. 28 m, 单偏光和阴极发光照片, 裂缝中的石英胶结物, 发蓝色和棕色阴极光, 从裂缝壁向中心石英颗粒变大、自形程度变高(红色箭头), 可见石英晶间孔; b-b'. SN2 井, $O_{1-2}y$, 6 874. 90 m, 单偏光和阴极发光照片, 灰岩围岩中分布的半自形—自形交代石英, 发蓝色阴极光, 裂缝中充填的方解石 II, 发亮橙黄色阴极光; c-c'. SN4 井, $O_{1-2}y$, 6 673. 28 m, 单偏光和阴极发光照片, 裂缝和石英晶间孔中充填的方解石 II, 发亮橙黄色阴极光; d-d'. SN4 井, $O_{1-2}y$, 6 671. 77 m, 单偏光和阴极发光照片, 硅化灰岩, 灰岩围岩中分布的半自形—自形交代石英, 发蓝色阴极光, 溶孔中充填的方解石 I, 发暗橙红色阴极光; e-e'. SN4 井, $O_{1-2}y$, 6 668. 81 m, 单偏光和阴极发光照片, 石英晶间孔中的方解石 II, 发亮橙黄色和亮橙红色阴极光; f-f'. SN4 井, $O_{2}y_j$, 6 363. 08 m, 单偏光和阴极发光照片, 沿着缝合线发育的白云石, 发红色阴极光

表1 顺南地区成岩矿物原生盐水流体包裹体测试数据

Table 1 The homogenization temperatures of primary aqueous inclusions in diagenesis minerals in Shunnan area

成岩矿物	井号	层位	流体包裹体均一温度(°C)		初熔温度(°C)		最终熔化温度(°C)	
			范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
方解石 I	SN1	O _{2y} j	122.6~178.1	153.7			-23.0~-4.0	-9.4
		O _{1-2y}	113.5~183.2	152.9			-27.4~-1.0	-6.9
	SN2	O _{1-2y}	172.9~188.9	179.5			-12.9~-2.1	-6.3
		O _{2y} j	145.2~179.0	156.6			-27.1~-6.5	-6.3
	SN3	O _{1-2y}	119.7~180.2	145.5			-27.1~-6.5	-19.8
		O _{2y} j	128.5~180.3	158.7			-11.7~-8.6	-10.3
	SN4	O _{1-2y}	158.6~188.9	172.1			-17.5~-7.7	-11.9
		O _{2y} j	151.6~162.4	157.4			-28.1~-25.4	-26.5
方解石 II	SN1	O _{1-2y}	154.2~199.2	180.9			-29.6~-7.5	-17.5
		O _{2y} j	157.1~230.9	192.6			-28.8~-13.0	-22.4
	SN2	O _{1-2y}	142.3~220.5	172.0			-36.1~-16.5	-24.6
		O _{2y} j	147.6~259.6	200.9	-58.2~-52.4	-56.3	-37.1~-4.2	-21.2
	SN4	O _{1-2y}	148.9~235.2	172.9			-25.1~-13.6	-19.2
		O _{2y} j	151.2~248.9	195.6	-56.3~-50.2	-53.9	-37.5~-3.2	-19.1
交代石英	SN4	O _{1-2y}	144.2~254.4	199.4	-60.0~-44.6	-50.6	-37.4~-3.3	-18.6

注:流体包裹体系统测试在中国地质大学(武汉)资源学院石油系微观烃类检测实验室完成.显微测温、测盐仪器为英国产 Linkam THMS 600G 冷热台,测定误差为±0.1 °C.显微测温初始升温速率为 8 °C/min,当包裹体临近均一状态时升温速率调整为 2 °C/min.

世代:方解石 I 阴极发光呈暗橙红色和暗橙黄色,主要为溶孔充填方解石(图 4d、4d'),区内各层位均有少量发育;方解石 II 阴极发光呈亮橙黄色和亮橙红色,主要发育于裂缝、溶洞和石英晶间孔中.镜下观察方解石 II 的发育规模远大于方解石 I(图 4b、4b',图 4c、4c',图 4e、4e').

2.1.3 白云石 区内白云石发育规模小,阴极发光下呈红色,主要沿着缝合线斑块状发育(图 4f、4f'),表明这种白云岩化是在缝合线形成之后才发生的,显示埋藏成岩特征(张学丰等,2008).

2.1.4 成岩序次 各样品中白云石发育规模较小,且显示出明显的埋藏成岩特征,说明白云岩化是在埋藏成岩阶段持续发生的过程.

SN4 井硅化段内可以观察到方解石 II 发育于交代石英的晶间孔中(图 4c、4c'),同时石英胶结物充填的裂缝切割了方解石 II 充填的裂缝(图 3c);SN2 井中裂缝边缘为少量交代石英,裂缝中央为方解石 II(图 4b、4b').因此成岩序列依次为:硅质交代—方解石 II 胶结—石英胶结.

2.2 流体包裹体证据

44 块流体包裹体样品测试结果列于表 1. 盐水包裹体的初熔温度(T_m)是流体包裹体完全冻结后回温过程中首次出现液相的温度, T_m 与体系的低共结点温度一致,因此通常用于判断盐水包裹体的流体体系. 盐水包裹体的最终熔化温度(T_m)通常用于推测流体的盐度(张文淮和陈紫英,1993;卢焕章等,2004). 盐水包裹体的均一温度(T_h)往往反映了它

捕获时的温度,如果发生再平衡作用,则记录的是捕获后发生再平衡的温度. 由于方解石中的流体包裹体容易发生捕获后再平衡作用,使其 T_h 增大并接近于地层经历的最高温度,所以它相对于石英流体包裹体 T_h 可靠性较差(池国祥和卢焕章,2008;李克蓬等,2012). 因此,本研究中方解石胶结物原生流体包裹体 T_h 以最低温度作为比较标准,而石英原生流体包裹体 T_h 则采用平均温度.

成岩矿物原生流体包裹体系统测试结果显示:4 口井方解石 I 的最低 T_h 为 113.5~172.9 °C,主要分布在 113.5~145.2 °C;方解石 II 的最低 T_h 为 142.3~157.1 °C,方解石 I 的最低 T_h 明显低于方解石 II;方解石 I 的平均 T_m 为 -19.8~-6.3 °C,主要分布于 -11.9~-6.3 °C;方解石 II 的平均 T_m 为 -26.5~-17.5 °C,方解石 I 的平均 T_m 明显高于方解石 II. 说明形成方解石 I 的流体的温度和盐度均低于方解石 II.

SN4 井鹰山组经历的最大埋深为 6 681.81 m,按照现今地温梯度 2.3~2.0 °C/100 m 和地表温度 20 °C 计算(李慧莉等,2005;朱东亚等,2013),SN4 井鹰山组经历的最大地层温度为 173.68~153.37 °C,而胶结和交代石英的流体包裹体平均 T_h 均高于此温度范围的最大值,因此推测其石形成于深部热流体.

方解石 II 和石英的平均 T_m 为 -56.3~-50.6 °C,推测可能同为 H₂O-NaCl-CaCl₂ 体系(Goldstein and Reynolds, 1994),且方解石 II 与石

表 2 顺南地区方解石 II 和泥晶灰岩碳氧同位素组成及对应流体包裹体最低均一温度

Table 2 The carbon and oxygen isotope compositions and minimum homogenization temperatures of calcite II and micrite limestone in Shunnan area

井号	层位	深度(m)	矿物类型	$\delta^{13}C_{PDB}(\text{‰})$	$\delta^{18}O_{PDB}(\text{‰})$	流体包裹体最低 $T_h(\text{°C})$
SN1	O ₂ yj	6 531.40	方解石 II	-0.24	-7.76	151.6
	O ₂ yj	6 533.04	方解石 II	-0.34	-9.46	155.7
	O ₁₋₂ y	6 672.81	方解石 II	0.24	-9.97	154.2
	O ₁₋₂ y	6 968.13	方解石 II	-2.22	-12.94	174.9
	O ₁₋₂ y	6 968.42	方解石 II	-2.22	-9.61	160.4
SN2	O ₂ yj	6 454.45	方解石 II	-2.18	-12.49	157.1
	O ₁₋₂ y	6 554.86	方解石 II	-0.44	-10.91	166.2
	O ₁₋₂ y	6 870.52	方解石 II	-2.48	-13.26	142.3
SN4	O ₁₋₂ y	6 460.66	泥晶灰岩	0.19	-6.58	
	O ₁₋₂ y	6 668.81	方解石 II	-1.82	-11.09	188.1
	O ₁₋₂ y	6 673.28	溶洞中方解石 II 裂缝中方解石 II	-1.98 -1.93	-10.83 -10.66	216.6 190.9

注:碳氧同位素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成.碳氧同位素测试采用了标准 100%磷酸法,使用的质谱仪型号为 MAT251EM, $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 均以 PDB 为标准,测试精度为: $\delta^{13}C < 0.01\text{‰}$, $\delta^{18}O < 0.02\text{‰}$.

英的 T_m 分布、平均 T_m 相似,均表现出高盐度的特征,两者具有相似的流体体系,推测可能为同源流体作用的产物.

2.3 碳氧同位素证据

碳酸盐矿物碳氧同位素组成测试结果列于表 2.需要说明的是,由于方解石 I 和白云石分布较少,难以取样,因此仅对方解石 II 和泥晶灰岩进行了采样测试(图 5).

由此可见,方解石 II 和泥晶灰岩的碳同位素 $\delta^{13}C_{PDB}$ 主要分布在 $-2.48\text{‰} \sim 0.44\text{‰}$,两者重叠性较高.而方解石 II 的氧同位素则明显较泥晶灰岩偏负,反映出可能受到大气淡水作用的影响,也可能是深部热流体作用的结果(刘存革等,2008;Cai *et*

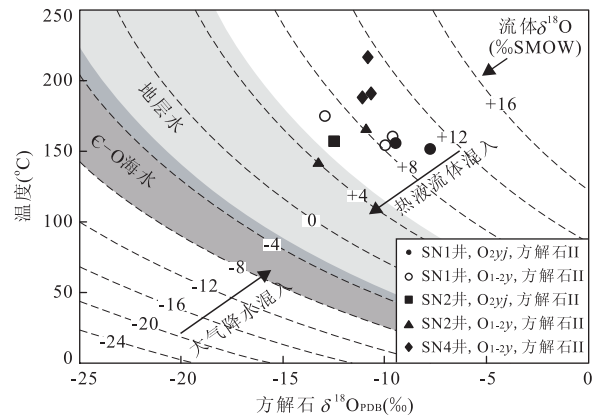


图 6 顺南地区奥陶系方解石 II 氧同位素 $\delta^{18}O_{PDB}$ 与最低 T_h 交汇

Fig. 6 Relationship between $\delta^{18}O_{PDB}$ values and minimum homogenization temperatures of the calcite II in the Ordovician, Shunnan area

据 Davies and Smith(2006);朱东亚等(2009);金之钧等(2013)修编.寒武纪-奥陶纪海水氧同位素 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 范围为 $-8\text{‰} \sim -3\text{‰}$ (Veizer, 1997),大气淡水比当时海水氧同位素 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 偏轻 3‰左右(Gat, 1996),即 $-11\text{‰} \sim -6\text{‰}$,地层水氧同位素 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 范围为 $-4\text{‰} \sim 5\text{‰}$ (Cai, 2001),热流体的氧同位素 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 最高可达 $10\text{‰} \sim 12\text{‰}$ (郑永飞和陈江峰,2000),随着与地层流体的混合而逐渐降低,直至最后完全表现出地层水的特征.流体氧同位素 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 等值线根据方解石-流体氧同位素分馏方程计算

al., 2008;尹观和倪师军,2009;高奇东等,2011).将方解石 II 的氧同位素 $\delta^{18}O_{PDB}$ 与其原生盐水流体包裹体最低 T_h 计算与方解石 II 平衡的流体氧同位素 $\delta^{18}O_{SMOW}$,投点到方解石-流体氧同位素分馏方程建立起来的流体来源判识图(Friedman and

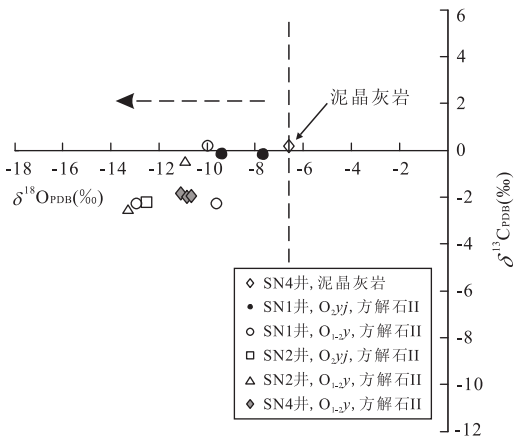


图 5 顺南地区泥晶灰岩、方解石 II 碳氧同位素分布

Fig. 5 The relationship between carbon and oxygen isotope compositions in Shunnan area

O'Neil, 1977)中,大量数据点落在热液流体范围内,仅一个数据点落在热流体与地层水混合的范围内(图6),由此可见,方解石II氧同位素偏负是热流体作用的结果.因此,形成方解石II的流体来源于深部的热流体,并表现出与地层水逐渐混合的特征.

综上所述,区内大规模发育的裂缝、溶洞中的方解石II和石英以及硅化现象可能是同源热流体多次作用的结果,SN2井和SN4井鹰山组热液流体活动最为强烈,表现出高温、高盐度的特征.

方解石I形成的温度和盐度明显低于方解石II和石英,推测为埋藏成岩阶段地层水作用的产物.

3 含烃流体观测

原油在紫外光激发下会散发出荧光,且不同性质的原油具有不同的荧光颜色和荧光光谱,因此可以通过荧光颜色和荧光光谱参数(主峰波长和QF-535)来判断油的成熟度(陈红汉,2007).本次研究所采用的荧光显微镜为Nikon 80I双通道荧光显微镜,紫外激发光为多色激发,激发波长为330~380 nm;显微荧光光谱仪为Maya 2000 Pro光谱仪,运用Yuanao显微光谱分析软件进行光谱数据处理和成图.通常定量描述显微荧光光谱参数主峰波长(λ_{\max})和QF-535,它们均与包裹体油成熟度成反比.

拉曼光谱技术是一种有效的识别富气相包裹体中气体组分的手段(Burke, 2001),通过对成岩矿物中的富气相包裹体进行拉曼探针测试可以识别气体组分并进行半定量分析.本次研究的拉曼探针测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用英国Renishaw公司产RM-1000型拉曼光谱仪,光源 $\lambda = 532 \text{ nm}$,输出功率为22 mW.

3.1 油包裹体

显微荧光观察在SN1井一间房组和SN4井鹰山组检测到少量油包裹体.SN1井一间房组检测到的油包裹体捕获于裂缝中的方解石II中,发蓝绿色荧光,为次生流体包裹体(图7a、7b),显示其捕获晚于方解石II的形成.SN4井鹰山组的油包裹体捕获于交代石英和裂缝中的方解石II中(图7c、7d),发蓝色和黄绿色荧光,呈孤立或团簇状分布,推测为原生包裹体,可能与宿主矿物同时形成.

油包裹体均一温度、光谱参数(λ_{\max} 和QF-535)测试分析结果显示,SN1井一间房组方解石II中发蓝绿色荧光的次生油包裹体和SN4井鹰山组石英

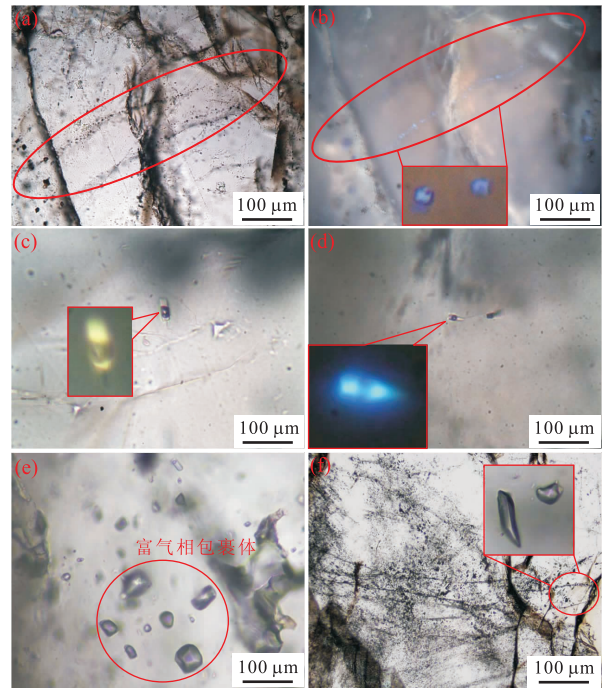


图7 油包裹体和富气相包裹体照片集

Fig. 7 The typical pictures of oil and gas inclusions in Shunnan area

a, b. SN1井, O_2y_j , 6 531. 40 m, 单偏光和显微荧光照片, 裂缝方解石II中捕获的发蓝绿色荧光的次生油包裹体; c. SN4井, $O_{1-2}y$, 6 673. 28 m, 单偏光和显微荧光照片, 裂缝方解石II中捕获的发黄绿色荧光的原生油包裹体; d. SN4井, $O_{1-2}y$, 6 673. 05 m, 单偏光和显微荧光照片, 交代石英中捕获的发蓝色荧光原生油包裹体; e. SN4井, $O_{1-2}y$, 6 673. 28 m, 单偏光照片, 胶结石英中捕获的原生气相包裹体; f. SN4井, $O_{1-2}y$, 6 673. 28 m, 单偏光照片, 切穿多个石英颗粒的愈合裂纹中捕获的次生气相包裹体

中发蓝色荧光的原生油包裹体成熟度较高,SN4井鹰山组方解石II中黄绿色荧光的原生油包裹体成熟度较低(图8a).SN1井一间房组方解石II中发蓝绿色荧光的次生油包裹体均一温度较低;SN4井鹰山组石英中发蓝色荧光的原生油包裹体和鹰山组方解石II中黄绿色荧光的原生油包裹体均一温度异常偏高,部分包裹体在300℃时仍未均一(图8b).

与热液矿物石英和方解石II同时捕获的油包裹体(SN4井油包裹体)均一温度异常偏高,且成熟度差异较大,可能与热流体活动中的强制成熟有关(Davies and Smith, 2006; Wendte, 2009b),而与油气成藏无关.SN1井油包裹体均一温度低,成熟度较高,可能代表了一期高熟油充注.

3.2 天然气包裹体

通过包裹体岩相学的观察,顺南地区成岩矿物中发育大量原生、次生气相包裹体,对这些气相包裹体进行了拉曼探针测试,检测到两类富气相包裹体:

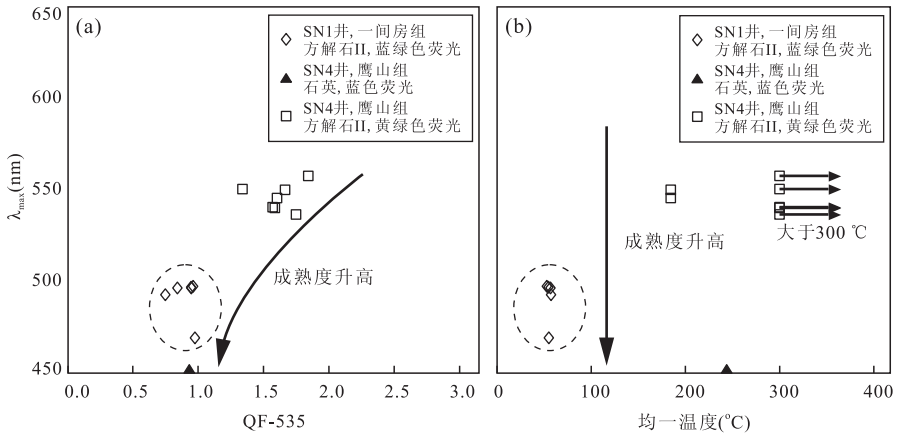


图 8 顺南地区油包裹体均一温度和光谱参数关系

Fig. 8 Relationship between homogenization temperatures and spectral parameter of oil inclusions in Shunnan area

a. 油包裹体 λ_{max} 和 QF-535 关系; b. 油包裹体 λ_{max} 和均一温度关系

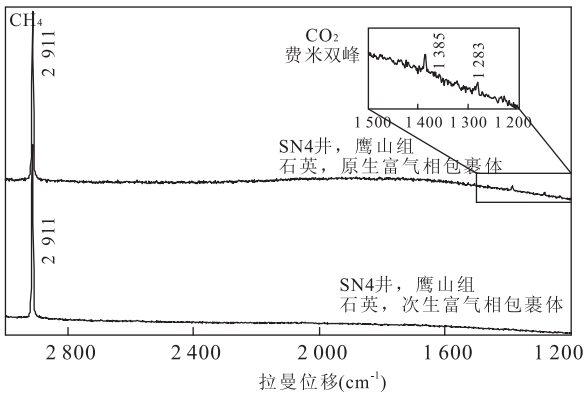


图 9 顺南地区富气相包裹体拉曼谱图

Fig. 9 Raman spectroscopic analysis result of the gas inclusions in Shunnan area

(1) 热液矿物石英和方解石中的原生气相包裹体(图 7e), 以 CH_4 - CO_2 体系为主, CO_2 含量约 4% ~ 13%; (2) 热液矿物石英中的次生气相包裹体(图 7f), 以 CH_4 体系为主。

热液矿物中捕获的大量原生气相烃类包裹体显示伴随着热流体活动, 有一期大规模的天然气充注, 天然气成分以 CH_4 和 CO_2 为主; 热液矿物中捕获的次生气相烃类包裹体显示在热流体活动后, 有一期天然气充注, 天然气成分以 CH_4 为主。

3.3 热流体活动与油气成藏耦合关系

结合成岩观察和埋藏史投影法, 可以间接推测热流体活动及油气成藏的时间(图 10)。

热流体在进入地层后, 流体温度下降并逐渐趋近于地层温度, 因此可以用表 1 中热液矿物方解石 II 和石英中测得的流体包裹体最低均一温度推测热流体可能的最晚活动时期。SN1 井、SN4 井热液矿

物的最低温度投点均具有多解性, 将所有的多解性投图后, 最早的投点落在三叠纪, 因此推测大规模热流体活动可能发生在三叠纪之前。

非热液矿物和热液矿物中与烃类包裹体同期的次生流体包裹体均一温度可以用于推测油气成藏时期。结合前人对塔里木盆地生烃史的研究(张水昌, 2000; 张水昌等, 2000), 顺南地区共有两期成藏: 第 1 期成藏与热流体活动有关, 并有少量的 CO_2 , 发生在海西晚期到印支期, 这与推测的热流体最晚活动时期相符; 第 2 期成藏主要发生在喜山期, 高熟油捕获于热液矿物次生流体包裹体中, 即晚于热流体活动, 第 2 期成藏以天然气为主, 并伴有少量高熟油。

顺南缓坡热流体活动对油气成藏明显起到了积极作用, 具体表现为以下 3 点:

(1) 高角度裂缝充填的热液矿物中捕获了大量的原生气相烃类包裹体(CH_4 - CO_2 体系), 说明深大断裂的活动不仅成为热流体上升的通道, 也是天然气运移的通道。

(2) SN4 井约 4 m 厚地层遭受硅化, 且硅化段下出现漏失和放空段(图 2), 现今地层内方解石胶结物的含量远少于被硅质交代进入流体的灰岩 CaCO_3 , 说明富硅流体对灰岩地层有较强的溶蚀能力。虽然顺南地区有发生大气淡水溶蚀的可能, 但热流体对灰岩的溶蚀同样不可忽视, 而两者的贡献度尚需要进一步研究。

(3) 除了热流体对灰岩地层的溶蚀作用以外, SN4 井大量观察到石英交代灰岩形成的晶间孔, 硅化程度较高的地层孔隙度和渗透率远大于未发生硅化和硅化程度低的地层(图 2)。另外, 由于石英硬度较大, 硅化地层中可以观察到大量石英颗粒支撑的

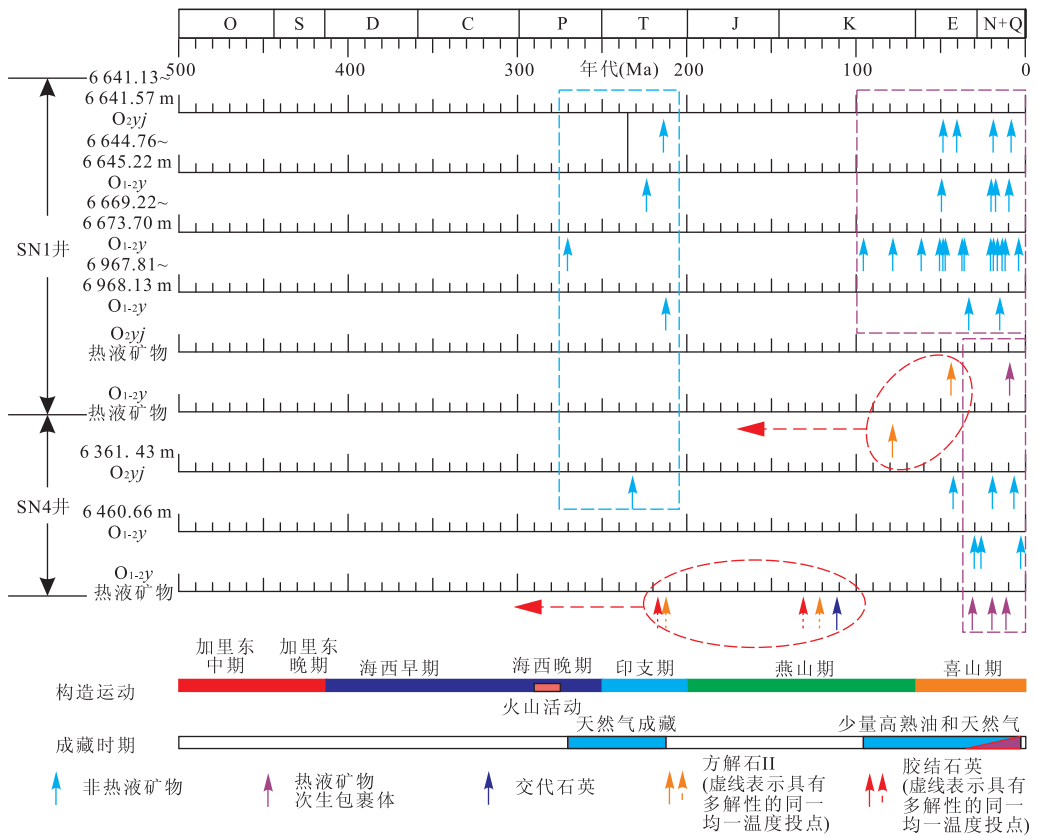


图 10 埋藏史投影法推测顺南地区热液活动及油气成藏时期

Fig. 10 The period of hydrothermal fluid and the hydrocarbon charging

开启裂缝(图 3b、3c),说明热流体作用不仅改善了灰岩围岩的孔隙度和渗透率,同时可能在晚期埋深压实过程中对地层的孔缝空间起到了保存作用,有利于后期的油气充注。

4 结论

通过对顺南地区奥陶系 4 口井的岩心薄片观察、流体包裹体显微测试和碳氧同位素组成分析测试,获得如下认识:

(1)方解石 I 和白云石可能为埋藏成岩阶段形成,并非直接来源于热流体;硅化灰岩、方解石 II 和石英胶结物则可能形成于热流体,并表现出与地层水混合的特征,热流体活动可能发生在三叠纪之前。

(2)顺南地区共发生过两期油气成藏:第 1 期天然气成藏与热流体活动同时,气体成分以 CH₄ 为主,有少量 CO₂,发生在海西晚期至印支期;第 2 期成藏主要发生在喜山期,以天然气成藏为主,并伴有少量高熟油。

(3)顺南地区热流体活动对油气成藏起到了积极作用,一方面热流体的活动促进了海西晚期—印

支期天然气的成藏,另一方面热流体活动显著改善了储层物性并可能对孔缝空间起到了保护作用。

References

Burke, E. A. J., 2001. Raman Microspectrometry of Fluid Inclusions. *Lithos*, 55 (1-4): 139-158. doi: 10. 1016/s0024-4937(00)00043-8

Cai, C. F., Li, K. K., Li, H. T., et al., 2008. Evidence for Cross Formational Hot Brine Flow from Integrated ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, REE and Fluid Inclusions of the Ordovician Veins in Central Tarim, China. *Applied Geochemistry*, 23(8): 2226-2235. doi: 10. 1016/j. apgeochem. 2008. 03. 009

Chen, D. Z., 2008. Structure-Controlled Hydrothermal Dolomitization and Hydrothermal Dolomite Reservoirs. *Oil & Gas Geology*, 29(5): 614-622 (in Chinese with English abstract).

Chen, H. H., 2007. Advances in Geochronology of Hydrocarbon Accumulation. *Oil & Gas Geology*, 28(2): 143-150 (in Chinese with English abstract).

Chen, H. L., Yang, S. F., Li, Z. L., et al., 2009. Spatial and Temporal Characteristics of Permian Large Igneous Province in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*,

- 30(2):179—182 (in Chinese with English abstract).
- Chi, G. X., Lu, H. Z., 2008. Validation and Representation of Fluid Inclusion Microthermometric Data Using the Fluid Inclusion Assemblage (FIA) Concept. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 1945—1953 (in Chinese with English abstract).
- Cui, H., Guan, P., Jian, X., 2012. Magmatic Hydrothermal Fluids-Formation Water Compound System and Diagenetic response of Carbonate Reservoir Rocks in Northern Tarim Basin. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, (3): 30—32 (in Chinese with English abstract).
- Davies, G. R., Smith, L. B., 2006. Structurally Controlled Hydrothermal Dolomite Reservoir Facies: An Overview. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1641—1690. doi: 10.1306/05220605164
- Friedman, I., O'Neil, J. R., 1977. Compilation of Stable Isotope Fractionation Factors of Geochemical Interest. U. S. Geol. Surv. Prof. Paper, U. S. A., 440 KK: 12.
- Gao, Q. D., Zhao, K. Z., Hu, X. F., et al., 2011. C-O, Sr Isotope Composition of the Carbonate in Ordovician in Tarim Basin and Implication on Fluid Origin. *Journal of Zhejiang University: Science Edition*, 38(5): 579—583 (in Chinese with English abstract).
- Gat, J. R., 1996. Oxygen and Hydrogen Isotopes in the Hydrologic Cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24(1): 225—262. doi: 10.1146/annurev.earth.24.1.225
- Goldstein, R. H., 2001. Fluid Inclusions in Sedimentary and Diagenetic Systems. *Lithos*, 55(1—4): 159—193. doi: 10.1016/s0024-4937(00)00044-x
- Goldstein, R. H., Reynolds, T. J., 1994. Systematics of Fluid Inclusions in the Diagenetic Minerals. SEPM Short Course 31, Tulsa.
- Jiao, C. L., He, Z. L., Xing, X. J., et al., 2011. Tectonic Hydrothermal Dolomite and its Significance of Reservoirs in Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 277—284 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. J., Zhu, D. Y., Meng, Q. Q., et al., 2013. Hydrothermal Activities and Influences on Migration of Oil and Gas in Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 1048—1058 (in Chinese with English abstract).
- Lavoie, D., Chi, G., 2006. Hydrothermal Dolomitization in the Lower Silurian La Vieille Formation in Northern New Brunswick: Geological Context and Significance for Hydrocarbon Exploration. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 54(4): 380—395. doi: 10.2113/gscpg-bull.54.4.380
- Li, H. L., Qiu Nanhsheng, Jin, Z. J., et al., 2005. Geothermal History of Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 26(5): 613—617 (in Chinese with English abstract).
- Li, K. K., Cai, C. F., Cai, L. L., et al., 2008. Hydrothermal Fluid Activity and Thermochemical Sulfate Reduction in the Upper Ordovician, Tazhong Area. *Oil & Gas Geology*, 29(2): 217—222 (in Chinese with English abstract).
- Li, K. P., Chen, H. H., Feng, Y., 2012. Characteristics of Homogenization Temperatures of Fluid Inclusions and Application in Deeply Buried Carbonate Rocks. *Natural Gas Geoscience*, 23(4): 756—763 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Huang, S. J., Liu, J. Q., et al., 2010. Buried Diagenesis Structurally Controlled Thermal Fluid Process and Their Effect on Ordovician Carbonate. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 969—979 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. G., Li, G. R., Zhu, C. L., et al., 2008. Geochemistry Characteristics of Carbon, Oxygen and Strontium Isotopes of Calcites Filled in Karstic Fissure—Cave in Lower-Middle Ordovician of Tahe Oilfield, Tarim Basin. *Earth Science*, (3): 377—386 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. F., Cai, Z. X., Li, S. X., et al., 2012. Geochemistry and Genesis of Mineral Rare Earth Elements in Fluorite Ore Cavities in Xinjiang Xiker Area. *Xinjiang Petroleum Geology*, 33(06): 660—663 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. B., Li, H. L., Qiang, Y. X., et al., 2012. Characteristics of Lower Paleozoic Carbonate Sediment and Reservoir of Guchengxu Uplift in Tazhong Area. *Chinese Journal of Geology*, 47(3): 640—652 (in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, et al., 2004. Fluid Inclusions. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Ma, Q. Y., Sha, X. G., Li, Z. J., et al., 2013. Evidence of Exposure Erosion of Lower-Middle Ordovician Top in Beixie Region, Middle Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(5): 500—504 (in Chinese with English abstract).
- Ma, W. X., Liu, S. G., Huang, W. M., et al., 2014. Fabric Characteristics and Formation Mechanism of Chert in Sinian Dengying Formation, Eastern Chongqing. *Acta Geologica Sinica*, (2): 239—253 (in Chinese with English abstract).
- Tang, L. J., Qiu, H. J., Yun, L., et al., 2014. Poly-Phase Reform-Late-Stage Finalization Composite Tectonics and Strategic Area Selection of Oil and Gas Resources in

- Tarim Basin, Nw China. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 44(1): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Z. X., Cao, Z. C., Wang, X. W., et al., 2013. Reservoir Characteristics and Influencing Factors in the Inner Yingshan Formation in Guchengxu Uplift, Tarim Basin. *Lithologic Reservoirs*, 25(4): 44—49 (in Chinese with English abstract).
- Weizer, J., Azmy, K., Ala, D., et al., 1997. Oxygen Isotope Evolution of Phanerozoic Seawater. *Palaeo*, 132: 159—172.
- Wei, G. Q., Jia, C. Z., Song, H. Z., et al., 2000. Ordovician Structural-Depositional Model and Prediction For Profitable Crack Reservoir of Carbonate Rock in Tazhong Area, Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 408—413 (in Chinese with English abstract).
- Wendte, J., Byrnes, A., Sargent, D., 2009a. The Control of Hydrothermal Dolomitization and Associated Fracturing on Porosity and Permeability of Reservoir Facies of the Upper Devonian Jean Marie Member (Redknife Formation) in the July Lake Area of Northeastern British Columbia. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 57(4): 387—408. doi: 10. 2113/gscpgbull. 57. 4. 387
- Wendte, J., Chi, G., Al-Aasm, I., et al., 2009b. Fault/fracture Controlled Hydrothermal Dolomitization and Associated Diagenesis of the Upper Devonian Jean Marie Member (Redknife Formation) in the July Lake Area of Northeastern British Columbia. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 57(3): 275—322. doi: 10. 2113/gscpgbull. 57. 3. 275
- Wu, M. B., Wang, Y., Zheng, M. L., et al., 2007. Hydrothermal Fluid Karst and Influence to Reservoir in Ordovician Carbonate Rocks of Tazhong Area. *Science in China: Series D*, 37(S01): 83—92 (in Chinese).
- Wu, Y., Chen, H. H., Xiao, Q. G., et al., 2011. Active Thermal Fluids and the Lower Cretaceous Hydrocarbon Accumulation in the Cuoqin Basin, Tibet. *Acta Petrolei Sinica*, 32(4): 621—628 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H. J., Li, K. K., Pan, W. Q., et al., 2012. Burial Hydrothermal Dissolution Fluid Activity and its Transforming Effect on the Reservoirs in Ordovician in Central Tarim. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 783—792 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. B., Liu, J., Li, H. L., et al., 2013. Characteristics of the NE-Trending Strike-Slip Fault System and its Control on Oil Accumulation in North Peri-Cline Area of the Tazhong Paleouplift. *Oil & Gas Geology*, (6): 797—802 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. F., Chen, H. L., Li, Z. L., et al., 2014. Early Permian Tarim Large Igneous Province in Northwest China. *Science China: Earth Sciences*, 44(2): 187—199 (in Chinese).
- Yin, G., Ni, S. J., 2009. Isotope Geochemistry. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yu, X., Chen, H. L., Yang, S. F., et al., 2009. Geochemical Features of Permian Basalts in Tarim Basin and Compared with Emeishan LIP. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1492—1498 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., 2000. Middle-Upper Ordovician Source Rock Geochemistry of the Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 21(6): 23—28 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., Zhang, B. M., Wang, F. Y., et al., 2000. Middle-Upper Ordovician Stratium; The Main Hydrocarbon Source Rocks. *Marine Origin Petroleum Geology*, 5(2): 16—22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. H., Chen, Z. Y., 1993. Geology of Fluid Inclusions. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Zhang, X. F., Hu, W. X., Zhang, J. T., et al., 2008. Geochemical Analyses on Dolomitizing Fluids of Lower Ordovician Carbonate Reservoir in Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 15(2): 80—89 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Chen, J. F., 2000. Stable Isotope Geochemistry. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, D. Y., Jin, Z. J., Hu, W. X., 2009. Hydrothermal Alteration Dolomite Reservoir in Tazhong Area. *Acta Petrolei Sinica*, 30(5): 698—704 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. Y., Jin, Z. J., Hu, W. X., 2010. Hydrothermal Recrystallization of the Lower Ordovician Dolomite and Its Significance to Reservoir in Northern Tarim Basin. *Science in China: Series D*, 40(2): 156—170 (in Chinese).
- Zhu, D. Y., Meng, Q. Q., Hu, W. X., et al., 2013. Differences between Fluid Activities in the Central and North Tarim Basin. *Geochimica*, (1): 82—94 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈代钊, 2008. 构造—热液白云岩化作用与白云岩储层. 石油与天然气地质, 29(5): 614—622.
- 陈汉林, 杨树锋, 房子龙, 等, 2009. 塔里木盆地二叠纪大火成岩省发育的时空特点. 新疆石油地质, 30(2): 179—182.
- 陈红汉, 2007. 油气成藏年代学研究进展. 石油与天然气地质, 28(2): 143—150.

- 池国祥,卢焕章,2008. 流体包裹体组合对测温数据有效性的制约及数据表达方法. 岩石学报,24(9): 1945—1953.
- 崔欢,关平,简星,2012. 塔北西部岩浆热液—地层水流动体系及碳酸盐岩储层的成岩作用响应. 北京大学学报:自然科学版,(3): 30—32.
- 高奇东,赵宽志,胡秀芳,等,2011. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩碳氧同位素组成及流体来源讨论. 浙江大学学报:理学版,38(5): 579—583.
- 焦存礼,何治亮,邢秀娟,等,2011. 塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义. 岩石学报,27(1): 277—284.
- 金之钧,朱东亚,孟庆强,等,2013. 塔里木盆地热液流体活动及其对油气运移的影响. 岩石学报,29(3): 1048—1058.
- 李慧莉,邱楠生,金之钧,等,2005. 塔里木盆地的热史. 石油与天然气地质,26(5): 613—617.
- 李开开,蔡春芳,蔡缪璐,等,2008. 塔中地区上奥陶统热液流体与热化学硫酸盐还原作用. 石油与天然气地质,29(2): 217—222.
- 李克蓬,陈红汉,丰勇,2012. 深层碳酸盐岩流体包裹体均一温度特征及应用探讨. 天然气地球科学,23(4): 756—763.
- 李忠,黄思静,刘嘉庆,等,2010. 塔里木盆地塔河奥陶系碳酸盐岩储层埋藏成岩和构造—热流体作用及其有效性. 沉积学报,28(5): 969—979.
- 刘存革,李国蓉,朱传玲,等,2008. 塔河油田中下奥陶统岩溶缝洞方解石碳、氧、锶同位素地球化学特征. 地球科学,(3): 377—386.
- 刘显凤,蔡忠贤,李树新,等,2012. 新疆西克尔萤石矿洞稀土元素地球化学特征及成因. 新疆石油地质,33(6): 660—663.
- 刘忠宝,李慧莉,钱一雄,等,2012. 塔中古城墟隆起下古生界碳酸盐岩沉积与储层特征. 地质科学,47(3): 640—652.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,等,2004. 流体包裹体. 北京:科学出版社.
- 马庆佑,沙旭光,李宗杰,等,2013. 塔里木盆地塔中北围斜中下奥陶统顶部暴露剥蚀的证据探讨. 石油实验地质,35(5): 500—504.
- 马文辛,刘树根,黄文明,等,2014. 渝东地区震旦系灯影组硅质岩结构特征与成因机理. 地质学报,(2): 239—253.
- 汤良杰,邱海峻,云露,等,2014. 塔里木盆地多期改造—晚期定型复合构造与油气战略选区. 吉林大学学报:地球科学版,44(1): 1—14.
- 唐照星,曹自成,汪新文,等,2013. 塔里木盆地古城墟隆起鹰山组内幕储层特征及影响因素. 岩性油气藏,25(4): 44—49.
- 魏国齐,贾承造,宋惠珍,等,2000. 塔里木盆地塔中地区奥陶系构造—沉积模式与碳酸盐岩裂缝储层预测. 沉积学报,18(3): 408—413.
- 吴茂炳,王毅,郑孟林,等,2007. 塔中地区奥陶纪碳酸盐岩热液岩溶及其对储层的影响. 中国科学(D辑): 地球科学,(S1): 83—92.
- 吴悠,陈红汉,肖秋苟,等,2011. 青藏措勤盆地白垩统活动热流体与油气成藏. 石油学报,32(4): 621—628.
- 杨海军,李开开,潘文庆,等,2012. 塔中地区奥陶系埋藏热液溶蚀流体活动及其对深部储层的改造作用. 岩石学报,28(3): 783—792.
- 杨圣彬,刘军,李慧莉,等,2013. 塔中北围斜区北东向走滑断裂特征及其控油作用. 石油与天然气地质,(6): 797—802.
- 杨树锋,陈汉林,厉子龙,等,2014. 塔里木早二叠世大火成岩省. 中国科学(D辑): 地球科学,(2): 187—199.
- 尹观,倪师军,2009. 同位素地球化学. 北京:地质出版社.
- 余星,陈汉林,杨树锋,等,2009. 塔里木盆地二叠纪玄武岩的地球化学特征及其与峨眉山大火成岩省的对比. 岩石学报,25(6): 1492—1498.
- 张水昌,2000. 塔里木盆地中上奥陶统油源层地球化学研究. 石油学报,21(6): 23—28.
- 张水昌,张宝民,王飞宇,等,2000. 中—上奥陶统:塔里木盆地的主要油源层. 海相油气地质,5(Z1): 16—22.
- 张文淮,陈紫英,1993. 流体包裹体地质学. 武汉:中国地质大学出版社.
- 张学丰,胡文瑄,张军涛,等,2008. 塔里木盆地奥陶统白云岩化流体来源的地球化学分析. 地学前缘,15(2): 80—89.
- 郑永飞,陈江峰,2000. 稳定同位素地球化学. 北京:科学出版社.
- 朱东亚,金之钧,胡文瑄,2009. 塔中地区热液改造型白云岩储层. 石油学报,30(5): 698—704.
- 朱东亚,孟庆强,胡文瑄,等,2013. 塔里木盆地塔北和塔中地区流体作用环境差异性分析. 地球化学,(1): 82—94.
- 朱东亚,金之钧,胡文瑄,2010. 塔北地区下奥陶统白云岩热液重结晶作用及其油气储集意义. 中国科学:地球科学,(2): 156—170.