

文章编号: 1001-6112(2010)02-046-06

# 塔河地区下古生界热液流体及储层发育主控因素探讨

——以 S88 和 TS1 井为例

李开开<sup>1,2</sup>, 蔡春芳<sup>1</sup>, 蔡镠璐<sup>1,2</sup>, 姜磊<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所油气资源研究重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** S88 及 TS1 井是塔河油田钻遇下古生界巨厚白云岩地层的典型钻井。对这 2 口井的岩样进行岩心观察、矿物鉴定、流体包裹体测温及地球化学研究表明, S88 井奥陶系蓬莱坝组及 TS1 井寒武系下丘里塔格组白云岩地层除受原地盆地流体的影响外还可能存在深部热液流体的影响, 流体性质以高温、富<sup>87</sup>Sr 且携带热化学硫酸盐还原作用产物(H<sub>2</sub>S 和 CO<sub>2</sub>)的酸性流体为主。热液流体的运移导致这 2 口井深部储层次生溶蚀孔洞的发育, 使得储集物性得到改善。研究还表明, 这 2 口井疏导层的存在为深部热液流体的向上运移及进入储层提供关键通道。S88 井热液流体对储层的影响主要受控于岩相和裂缝的发育程度, 白云岩段储层好于灰岩段, 裂缝发育段储层优于不发育段; TS1 井白云岩储层的发育主要受控于岩性组合, 下部井段的膏盐层与白云岩层的共生可能是其岩石物性优于上部纯白云岩井段的主要原因。

**关键词:** 热液流体; 热化学硫酸盐还原作用; 下古生界; S88 井; TS1 井; 塔河油田

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## HYDROTHERMAL FLUID ACTIVITIES AND MAIN CONTROLLING FACTORS OF DEEP RESERVOIR DEVELOPMENT IN THE LOWER PALEOZOIC OF THE TAHE OILFIELD

—TAKING WELLS S88 AND TS1 AS EXAMPLES

Li Kaikai<sup>1,2</sup>, Cai Chunfang<sup>1</sup>, Cai Liulu<sup>1,2</sup>, Jiang Lei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Graduate Institute of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr,  $\delta^{34}\text{S}$  and fluid inclusions were analyzed on the fracture fillings of thick dolomites in Wells S88 and TS1 in the Tahe Oilfield. The results indicate that the deep hydrothermal fluid has a significant effect on the dolomite reservoirs of the Penglaiba Formation from Well S88 and the Qiulitage Formation from Well TS1. The hydrothermal fluid is characterized by high temperatures and <sup>87</sup>Sr enrichment, and may have up-migrated with H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub>, which resulted likely from thermochemical sulfate reduction (TSR) of hydrocarbons. The migration of acidic hydrothermal fluid resulted in dissolution of carbonates and generation of abundant secondary vugs and micropores in Wells S88 and TS1, thereby, which improves the quality of reservoir properties. Also, faults and micro-fractures may have served as migration pathways for the hydrothermal fluid in Wells S88 and TS1. The degree to which the hydrothermal fluid influenced on quality of Penglaiba Formation in Well S88 was mostly controlled by lithology and cracks. The reservoir of dolomite strata is better than limestone strata, and fracture zone is prone to form better reservoir. In Lower Qiulitage Formation of Well TS1, TSR was enhanced by the occurrence of gypsum/anhydrite in dolomite strata, and thus might be one of main controlling factors in the development of deep favorable reservoirs.

**Key words:** hydrothermal fluid; TSR; Lower Paleozoic; Well S88; Well TS1; Tahe Oilfield

收稿日期: 2009-03-18; 修订日期: 2009-12-06。

作者简介: 李开开(1983-), 男, 博士生, 主要从事成岩流体地球化学研究。E-mail: likaikai1078@mail.igcas.ac.cn。

基金项目: 国家重大基础研究发展计划(973 计划)(2006CB202304)项目和国家自然科学基金委—中石化联合项目(40839906)资助。

近年来,深部热液流体对碳酸盐岩储层的改造作用日益受到重视,国内外均有相关方面的报道。加拿大盆地西部<sup>[1]</sup>和西班牙西南<sup>[2]</sup>的优质储层被认为是由深部热液流体改造的结果。国内塔里木盆地西部野外露头区及井下(如塔中地区的中3、中4、TZ45以及塔河地区的S76、S79等井)均发现有萤石、闪锌矿、热液石英及重晶石等热液矿物组合<sup>[3-6]</sup>;均一温度及地球化学测试结果也显示存在热液流体活动<sup>[3,7-9]</sup>,并对碳酸盐岩优质储层的形成有重要影响<sup>[4,9-10]</sup>。这改变了以往的深部储层差、不宜勘探的传统观念,为碳酸盐岩油气勘探提供了新的思路。

塔河地区油气田勘探开发过程中,常发现埋深在5 000~6 000 m,甚至在7 000 m以下的深层、超深层碳酸盐岩地层中依然具有高孔高渗特征,甚至一些层段还出现了放空、漏失现象,这可能是埋藏岩溶作用及深部热液流体活动产生的结果。然而,对于该地区下古生界地层中热液流体的性质及来源问题尚存在争议<sup>[4,11]</sup>;热液流体优化改造深部储层可能受到的主控因素尚不明确,这些问题的存在制约了对该地区深部优质碳酸盐岩的形成与分布的认识,因此有必要对上述问题进行深入探讨和研究。

## 1 区域地质概况

塔河油田位于塔里木盆地北部阿克库勒凸起西南斜坡位置。阿克库勒凸起经加里东中晚期、海西早晚期运动形成向西南倾伏的东北向展布的大型鼻凸<sup>[12]</sup>。塔河深层震旦系一下寒武统地层在大陆裂谷的伸展拉张背景下发育一系列正断层;至寒武—奥陶纪时期,受塔里木板块南缘与北昆仑碰撞事件控制,伸展拉张背景逐渐转换为挤压背景,寒武系—奥陶系地层在此背景下继承前期正断层发育一系列高角度逆冲断层;海西运动期间,这些断层再次活动,因此该地区深达基底的大断裂较为发育,活动性较强。S88和TS1井位于塔河油田北部地区(桑塔木尖灭线以北)(图1),该地区在经历了多期构造隆升引起的暴露风化剥蚀后,中上奥陶统地层剥蚀殆尽。钻井揭示(图2),S88井下古生界地层从上至下依次为奥陶系的鹰山组( $O_{1-2y}$ )和蓬莱坝组( $O_{1p}$ );TS1井下古生界地层依次为奥陶系的桑塔木组( $O_{3s}$ )、良里塔格组( $O_{3l}$ )、哈尔巴克组( $O_{2q}$ )、一间房组( $O_{2yj}$ )、鹰山组( $O_{1-2y}$ )、蓬莱坝组( $O_{1p}$ )以及寒武系的下丘里塔格组( $\epsilon_3ql$ )。

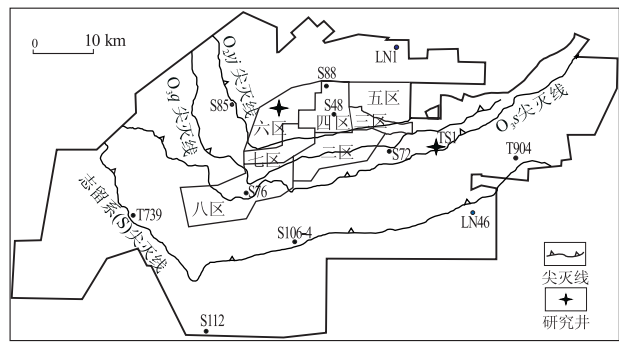


图1 塔河油田研究井位平面分布

Fig. 1 Map showing location of wells of interest in the Tahe Oilfield

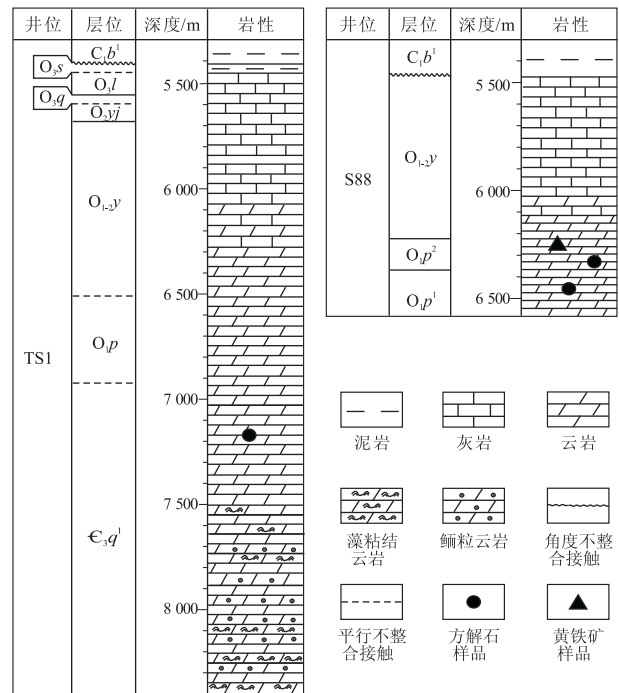


图2 塔河油田 TS1 和 S88 井下古生界地层特征及样品位置

Fig. 2 Stratigraphic column and location of samples for Wells TS1 and S88 in the Tahe Oilfield

## 2 研究井段、样品的选择及测试方法

由于塔河地区奥陶系碳酸盐岩储层的发育可能还受到了表生大气淡水的作用<sup>[13-15]</sup>,因此选择无大气淡水作用或影响较小、热液流体为主要作用流体的井段,成为此次研究的关键。研究区 TS1 井是该地区钻探的第一深井,也是唯一一口钻至寒武系地层( $\epsilon_3ql$ )的井位;S88 井是研究区除 TS1 井外仅有的一口钻遇蓬莱坝组地层的钻井。另外,从地层接触关系来看,TS1 井- $\epsilon_3ql$  组大部分井段距离最近的不整合面( $O_{1p}/\epsilon_3ql$ )超过了 200 m,甚至超过 1 000 m;而 S88 井由于蓬莱坝组与鹰山组

地层之间为整合关系,  $O_1p^2$  组地层与最近的不整合面( $C_1b^1/O_{1-2}y$ )距离超出了 700 m, 显然这些井段受到大气淡水的作用较少。因此, 这两段深部地层为我们研究该地区热液流体的活动以及热液流体改造型储层形成的主控因素提供了良好的背景。

所要分析测试的对象应尽量选择后期流体沉淀的自生矿物, 同时也应尽量避免大气水的影响, 因此本研究中所选样品为远离上覆不整合面的次生孔、洞、缝中沉淀的矿物(图 2)。S88 井 2 个方解石样品深度分别为 6 456.27 m 和 6 367.62 m, 距离不整合面( $C_1b^1/O_{1-2}y$ )大于 800 m, 1 个黄铁矿样品深度为 6 257.41 m; TS1 井溶洞充填巨晶方解石样品处于 7 102 m, 距离最近的不整合面( $O_1p/\epsilon_3ql$ )218 m, 距离海西期不整合面( $C_1b^1/O_{3s}$ )超出了 1 500 m。

对所选方解石样品进行流体包裹体显微测温及  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  测定, 另外对 S88 井黄铁矿样品进行硫同位素测定。流体包裹体测试采用英国 Linkam 科仪公司的 THMSG600 冷/热台进行, 测试过程中采用  $10\times 50$  的目镜和物镜搭配进行观察, 尽量选择个体较小、形状规则的原生盐水包裹体, 以保证所选包裹体具有均一体系、等容体系以及封闭体系<sup>[16]</sup>;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  测试化学流程按国际通用规范, 溶样后经阳离子交换柱分离纯化, 并利用 MAT262 同位素质谱计多接收器进行检测, 分析误差小于 0.02‰; 黄铁矿样品  $\delta^{34}\text{S}$  值的测定采用 Delta-S 质谱仪进行, 分析误差在  $\pm 1\%$  内。所有测试均在中国科学院地质与地球物理研究所进行。

### 3 分析结果

流体包裹体观察显示, S88 井无论是裂缝充填方解石还是方解石胶结物均可见成群分布或孤立分布的原生盐水包裹体, 发育丰度一般, 可见气态包裹体与其伴生, 并呈孤立状分布。TS1 井溶蚀孔洞方解石样品中原生盐水包裹体大量发育, 气态包裹体也较发育, 局部可见烃类包裹体, 发灰黄—黄绿色荧光。测试的均一温度数据显示(图 3), S88 井 6 367.62 m 处的裂缝充填方解石样品温度数据明显可分为相对高温( $123.2\sim 198.9\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n=10$ )和低温( $83.7\sim 116.2\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n=8$ )2 个区间; 6 456.27 m 深度的方解石胶结物以嵌晶形态充填于粒间孔隙内, 所测均一温度较为集中, 处于  $134.6\sim 198.9\text{ }^\circ\text{C}$  ( $n=12$ )区间范围内, 平均温度为  $166.1\text{ }^\circ\text{C}$ , 这与前人所测方解石样品(6 460.29 m)均一温度相近<sup>[9]</sup>。TS1 井溶蚀孔洞充填巨晶方解石样品均一

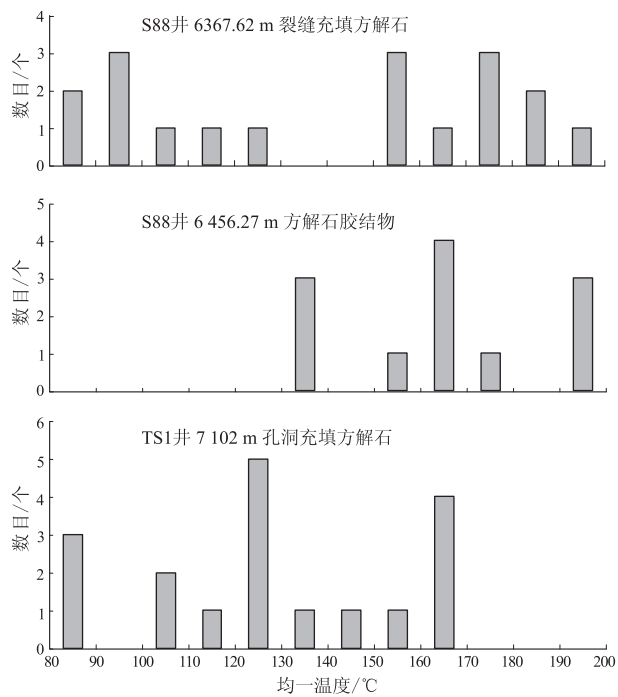


图 3 塔河油田 TS1 和 S88 井方解石样品均一温度直方图  
Fig. 3 Histograms of homogenization temperatures of calcite samples for Wells TS1 and S88 in the Tahe Oilfield

温度同样分布范围大( $84.4\sim 167.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n=18$ ), 可划分为高温( $149\sim 167.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n=6$ )及低温( $84.4\sim 136.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n=12$ )区间, 所测数据与先前报道的数据也接近<sup>[17]</sup>。

S88 井裂缝充填方解石样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.708 9, TS1 井孔洞充填巨晶方解石样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.709 3。而前人研究显示<sup>[17-18]</sup>, TS1 井寒武系溶蚀孔、洞、缝中充填的方解石矿物的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  范围为  $0.709\ 0\sim 0.709\ 3$  ( $n=9$ ), 白云石矿物  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  范围为  $0.709\ 0\sim 0.709\ 6$  ( $n=20$ ), 这与本次研究测试结果相近。数据显示, 部分样品具有比上寒武统一奥陶统海水高的锶同位素比值<sup>[19]</sup>(图 4), 显示具有外来富  $^{87}\text{Sr}$  的流体贡献。另外还

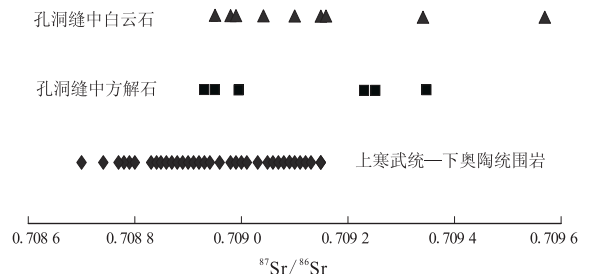


图 4 塔河油田 S88 和 TS1 井裂缝充填物锶同位素比值对比  
Fig. 4 Diagram showing  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio of fractural and cavernous filling minerals for Wells TS1 and S88 in the Tahe Oilfield

存在一部分孔洞缝中充填的白云石及方解石矿物,其锶同位素处于海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 范围内,很有可能为原地流体溶解围岩后再沉淀的结果。

S88 井  $\text{O}_1p$  地层 6 257.41 m 处细晶白云岩岩样表面黄铁矿产状以裂缝、微裂缝充填为主,局部呈斑块状附着岩块表面。该黄铁矿样品硫同位素测定值为 17.02‰,与塔中地区所报道<sup>[20-21]</sup>的奥陶系储层中黄铁矿及气藏中硫化氢气体的硫同位素值(15‰~18.5‰)相近。

## 4 讨论

### 4.1 热液流体的存在性

判断研究区是否存在热液流体活动需要从热液流体定义入手<sup>[22]</sup>,对矿化流体的温度及地层所经历温度进行对比。据塔河油田相邻的轮南及满加尔北部地区埋藏—热历史曲线显示<sup>[23-24]</sup>,蓬莱坝组地层古生代所经历的最高古地温不超过 120℃,上寒武统丘里塔格组地层古生代经历的温度低于 145℃。S88 及 TS1 井样品均具有数目较多的高均一温度的原生流体包裹体,其温度较各自地层古生代经历的最高温度高 5~10℃以上,显示具有热液流体。这里之所以强调地层在古生代期间经历的温度,是出于考虑二叠纪塔里木盆地存在广泛的火山活动<sup>[25]</sup>,该热事件可能诱发研究区深部热液流体的产生和运移,这为以往的热液矿物年代测定以及成岩序列研究结果所支持<sup>[18,26-27]</sup>,尽管该热液流体的性质及来源尚存在争议<sup>[4,11]</sup>。2 口井样品相对较低的温度数据范围(不低于 80℃)可能指示了原地盆地流体的贡献,而较宽的盐度范围也可能揭示,存在高盐度热液流体与相对较低盐度地层封存水的混合。

### 4.2 热液流体来源、性质及其对储层的影响

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  结果显示,S88 及 TS1 井样品可能具有外来富 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 流体贡献,前人研究成果表明<sup>[7-8]</sup>,大气降水及深部热液流体均可能携带壳源的富 $^{87}\text{Sr}$ 。而由于这 2 口井所选样品分别距上覆最近的不整合面超出了 200 m,超出了大气降水的影响范围。显然,外来高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 应为深部热液流体贡献,该热液流体很有可能流经前寒武碎屑岩。

S88 井  $\text{O}_1p$  黄铁矿样品具有同塔中地区油气藏中  $\text{H}_2\text{S}$  气体相近的  $\delta^{34}\text{S}$  值,而研究显示<sup>[11]</sup>,塔河地区除 S88 井  $\text{O}_1p$  外其他井段还存在具有类似特征的黄铁矿,如 S77( $\text{O}_{1-2}y$ )、T417( $\text{O}_{1-2}y$ )、T904( $\text{O}_3q$ )及 S110( $\text{O}_3l$ ),这些黄铁矿被认为是热化学硫酸盐还原作用(TSR)的产物,并且是由热液

流体携带中寒武统膏盐层的  $\text{SO}_4^{2-}$  向上运移,并与遇到的烃类发生反应<sup>[21,24,28]</sup>。塔河地区下古生界地层中的 TSR 能够在储层中产生高含量的  $\text{H}_2\text{S}$  及  $\text{CO}_2$  气体,该地区伴生气中  $\text{H}_2\text{S}$  的浓度可高达 8.6%,流体包裹体成分也显示具有高含量的  $\text{H}_2\text{S}$  及  $\text{CO}_2$  气体<sup>[29]</sup>,这种酸性气体的生成使得热液流体具有一定的溶蚀性。

多种证据表明,S88 及 TS1 井深部地层中存在着热液流体的活动。该热液流体来源于深部地层,有较强的流动性和较高的温度,另外可以携带 TSR 反应所产生的大量  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  酸性气体以及有机酸<sup>[30-31]</sup>。因此,这种热液流体是深埋藏环境下一种重要的溶蚀流体,能够对储层进行优化改造。S88 井  $\text{O}_1p$  组白云岩溶蚀孔洞、孔隙发育,部分被自形—弯曲晶面的白云石充填,测定的孔隙度可高达 6.8%;TS1 井 3,4,5 回次岩心溶蚀孔洞大量发育,孔径变化范围大,以 5~15 mm 为主,局部可高达 50 mm,孔洞连通性较好,孔隙度最高可达 9.1%。事实上,塔河地区深部热液流体影响下碳酸盐岩地层具有高孔高渗特征的现象并非个别。S79 井中—上奥陶统灰岩、S83 井鹰山组白云岩段针状孔密集分布,显然受到了深部流体溶蚀作用<sup>[4]</sup>;S76 井第 13,14 回次岩心针状溶蚀十分发育,并见少许大于 2 mm 的溶洞,孔隙度、渗透率明显好于上覆地层,被认为是埋藏岩溶作用的结果<sup>[32]</sup>。于是有理由相信,塔河地区下古生界地层深部流体的活动较为广泛,并影响着该地区不少井区的深部碳酸盐岩储层。

### 4.3 深部储层发育的主控因素

前文已讨论,S88 井  $\text{O}_1p$  及 TS1 井  $\text{C}_3ql$  组良好的储层是热液流体改造的结果,而热液流体在储层中的运移及其对所经围岩的溶蚀受到多种因素控制,这些因素在很大程度上控制着深部储层的发育。因此,为研究深部储层发育的主控因素,还需要着眼于热液流体及其作用的对象,从流体的疏导层、可能与围岩发生的反应、岩石性质等方面进行研究。

深部热液流体进入储层需要疏导层的存在。1) 断裂作用导致断裂带及其附近岩石强烈破碎或破裂,能够改善岩石的透水性能,这为下部的深部热液流体向上运移提供有利通道。资料显示,区域上塔河地区寒武系—奥陶系继承震旦—寒武系正断层发育了一系列逆断层,均表现为高角度断裂,表明该地区存在深部流体向上运移的关键通道——深大断裂;局部构造上看,S88 井所属牧场



表 1 塔河地区 S88 井白云岩段与灰岩段孔、渗及裂缝密度数据对比

Table 1 Data comparison of porosity, permeability and density between dolomite and limestone sections in the Tahe Oilfield

岩性段	孔隙度/%	孔隙度>3%数目/个	渗透率/(10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> )	裂缝密度/(条·m <sup>-1</sup> )
白云岩	$\frac{0.1 \sim 6}{2.56(30)}$	13	$\frac{0.004 \sim 5.04}{0.56(29)}$	$\frac{0 \sim 26.04}{7.34(10)}$
灰岩	$\frac{0.005 \sim 6.6}{0.93(42)}$	2	$\frac{0.003 \sim 3.2}{0.1(41)}$	$\frac{0 \sim 11.01}{4.86(9)}$

注:表中分式意义  $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}(\text{样品数})}$ 。

北 3 号构造下奥陶统底部发育 2 组背冲断裂,也是控制本构造的主干断裂。TS1 井加里东中期及海西早期均存在断达基底的深部断裂<sup>[17]</sup>。2) 储层中的裂缝也是热液流体运移的重要通道。对 S88 井 O<sub>1</sub>p 没有发育裂缝的层段孔隙度进行统计,并将其作为储层基质孔隙度;对有裂缝发育层段孔隙度进行统计,并作为裂缝孔隙度,总孔隙度(POR)即为基质孔隙度与裂缝孔隙度(PORF)之和<sup>[33]</sup>。S88 井测井解释显示在纵向上,裂缝发育段与孔隙发育段具有良好的对应关系,这可能是由于热液流体沿裂缝运移并对所经围岩进行溶蚀迁移,从而造成次生孔隙发育。3) 不整合面也可以作为热液流体运移的良好通道。然而由于该地区 S88 井 O<sub>1</sub>p 组及 TS1 井 C<sub>3</sub>ql 组取心井段没有达到不整合面深度,因此不便作出讨论。

不同沉积相带的深部碳酸盐岩,由于岩性、结构组分、化学性质等差异,可能会导致各相带储层在储渗空间方面差别很大。S88 井 O<sub>1</sub>p<sup>2</sup> 岩性特征为灰岩段与白云岩段互层,对此 2 种岩性层段的孔隙度进行统计,结果显示(表 1),白云岩段孔隙度及渗透率均高于灰岩段。这可能是因为白云岩较灰岩具有更好的机械性能,抗岩溶能力较强,原生孔隙保留较好;另外白云岩性脆易被压裂产生裂缝<sup>[34]</sup>(表 1),这为热液流体的输导及水-岩反应接触面积的增大提供有利条件,而且实验研究表明<sup>[35-38]</sup>,高温高压(分别超过 75 °C 及 20 MPa)的深埋地层中白云岩比灰岩更易被乙酸溶解,因此白云岩中次生溶蚀孔隙较灰岩更为发育。另外,热液白云岩化作用也可以产生丰富的次生孔隙<sup>[39]</sup>。

有利的岩性组合能够促进热液流体的溶蚀作用。深部寒武系地层中,膏盐夹层多与白云岩储层共生,膏盐的溶解一方面可以形成溶蚀孔提供有效的储集空间,另一方面可以为后期的 TSR 反应提供充足的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 来源,并与侵位的烃类发生反应,导致硬石膏与白云石溶解,产生次生孔隙/孔洞。TS1 井下部 3, 4, 5 回次岩心孔隙度(3.7%~9.1%)明显高于上部 1, 2 回次孔隙度(0.6%~

3.7%),可能与基质白云岩因 TSR 反应而溶解有关。另外,岩心观察 3, 4, 5 回次较第 1, 2 回次含有更多的藻粘结、藻纹层及鲕粒云岩等有机质含量高的岩石类型,更易发生埋藏溶蚀作用,这种溶蚀在岩心上常表现为斑状溶蚀<sup>[32,40]</sup>,易溶组分所产生的细小溶蚀孔隙也为热液流体的注入及 TSR 反应的持续进行提供有利空间。

## 5 结论

1) 热液流体在塔河地区下古生界地层中普遍存在,该流体以高温、富<sup>87</sup>Sr 为特点,并很有可能携带热化学硫酸盐还原作用的酸性气体 H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub> 及有机酸运移,对寒武-奥陶系储层进行溶蚀和改造。

2) 改善 S88 及 TS1 井深部储层的主要作用流体为深部热液流体,于是疏导层的存在(包括深达断裂、裂缝及不整合面等)成为这 2 口井优质储层发育的关键因素。S88 井不同的沉积相带、裂缝发育段影响着次生孔隙的发育,白云岩段优于灰岩段,裂缝发育段优于不发育段;TS1 井主要受控于岩性组合,膏盐层段白云岩段的互层有利于 TSR 反应的发生,使得基质白云岩溶蚀而产生次生孔隙,同时白云岩段中所含的藻粘结岩、藻纹层云岩及鲕粒云岩等易溶组分的溶解也为白云岩的进一步溶蚀提供有利条件。

## 参考文献:

- [1] AL - AASMI, LONNEE J, CLARKE J. Multiple fluid flow events and the formation of saddle dolomite: examples from Middle Devonian carbonates of the Western Canada Sedimentary Basin [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2000, 69/70: 11-15.
- [2] GASPARRINI M, BECHSTADT T, BONI M. Massive hydrothermal dolomites in the southwestern Cantabrian Zone (Spain) and their relation to the Late Variscan evolution[J]. Marine and Petroleum Geology, 2006, 23(5): 543-568.
- [3] 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): 245-254.
- [4] 朱东亚, 金之均, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地深部流体对碳酸盐岩储层影响[J]. 地质论评, 2008, 54(3): 348-354.
- [5] 吴茂炳, 王毅, 郑孟林, 等. 塔中地区奥陶纪碳酸盐岩热液岩

- 溶及其对储层的影响[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(增刊 I): 83-92.
- [6] 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): 284-289.
- [7] CAI C F, LI K K, LI H T. Fluid inclusion and isotopic constraint for fluid evolution in the Ordovician veins in Central Tarim, NW China[M]//Bullen T D, Wang Y C. Water-Rock Interaction. London: Taylor & Francis Group, 2007: 703-707.
- [8] CAI C F, LI K K, LI H T, et al. Evidence for cross formational hot brine flow from integrated  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , REE and fluid inclusions of the Ordovician veins in Central Tarim, China[J]. Applied Geochemistry, 2008, 23: 2226-2235.
- [9] 程军蕊. 塔河油田奥陶系地下流体特征与油气藏形成研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [10] 吕修祥, 解启来, 杨宁, 等. 塔里木盆地深部流体改造型碳酸盐岩油气聚集[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊 I): 142-148.
- [11] 蔡春芳, 李开开, 蔡镗璐, 等. 塔河地区奥陶系碳酸盐岩缝洞充填物的地球化学特征及其形成流体分析[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2399-2404.
- [12] 康玉柱. 中国塔里木盆地塔河大油田: 纪念沙参 2 井油气重大突破 20 周年[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2004: 1-187.
- [13] 闫相宾. 塔河油田下奥陶统古岩溶作用及储层特征[J]. 江汉石油学院学报, 2002, 24(4): 23-25.
- [14] 钱一雄, CONXITA TABERNER, 邹森林, 等. 碳酸盐岩表生岩溶与埋藏溶蚀比较: 以塔北和塔中地区为例[J]. 海相油气地质, 2007, 12(2): 1-7.
- [15] 杨宁, 吕修祥. 塔里木盆地轮南、塔河油田碳酸盐岩储层特征研究: 以沙 107 井和轮古 40 井为例[J]. 石油实验地质, 2008, 30(3): 247-251.
- [16] 陶士振. 包裹体应用于油气地质研究的前提条件和关键问题[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 77-91.
- [17] 乔冀超. 塔深 1 井寒武系白云岩储层特征及其地球化学特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- [18] 王丹. 塔里木盆地塔北、塔中地区早古生代白云岩形成机理[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2009.
- [19] DENISON R E, KOEPNICK R B, BURKE W H. Construction of the Cambrian and Ordovician seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  curve[J]. Chemical Geology, 1998, 152: 325-340.
- [20] 蔡春芳, 邹光辉, 李开开, 等. 塔中地区古生界热化学硫酸盐还原作用与原油中硫的成因[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(1): 44-48.
- [21] CAI C F, ZHANG C M, CAI L L. Origins of Palaeozoic oils in the Tarim Basin: Evidence from sulfur isotopes and biomarkers[J]. Chemical Geology, 2009, 268: 197-210.
- [22] MACHEL H G, LONNEE J. Hydrothermal dolomite: a product of poor definition and imagination[J]. Sedimentary Geology, 2002, 152(3/4): 163-171.
- [23] 赵宗举, 周新源, 郑兴平, 等. 塔里木盆地主力烃源岩的诸多证据[J]. 石油学报, 2005, 26(3): 10-15.
- [24] CAI C F, LI K K, MA A L. Distinguishing Cambrian from Upper Ordovician source rocks: Evidence from sulfur isotopes and biomarkers in the Tarim Basin[J]. Organic Geochemistry, 2009, 40: 755-768.
- [25] 贾承造, 魏国齐, 姚惠君, 等. 盆地演化与区域构造地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [26] 张兴阳, 顾家裕, 罗平, 等. 塔里木盆地奥陶系萤石成因及其油气地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2220-2228.
- [27] 陈强路. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩成岩作用与孔隙演化[D]. 北京: 中国地质大学, 2004.
- [28] CAI C F, HU W S, WORDEN R H. Thermochemical sulphate reduction in Cambro-Ordovician carbonates in Central Tarim[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18: 729-741.
- [29] 钱一雄. 塔河油田下奥陶统储层中流体包裹体成份[J]. 地质科学, 2002(增刊 1): 22-28.
- [30] 蔡春芳, 梅博文, 马亭, 等. 塔里木盆地有机酸来源、分布及对成岩作用的影响[J]. 沉积学报, 1997, 15(3): 103-109.
- [31] 王恕一, 蒋小琼, 管宏林, 等. 川东北地区普光气田飞仙关组储层孔隙演化[J]. 石油实验地质, 2009, 31(1): 26-30.
- [32] 朱东亚, 胡文, 张学丰, 等. 塔河油田奥陶系灰岩埋藏溶蚀作用特征[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 57-62.
- [33] 邓兴梁. 裂缝对和田河气田石炭系生屑灰岩段储层的控制作用[J]. 中国岩溶, 2007, 26(3): 237-242.
- [34] SUN S Q. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(2): 186-204.
- [35] 韩宝平. 任丘碳酸盐岩溶蚀实验研究[J]. 中国岩溶, 1988, 7(4): 81-88.
- [36] 张文正, 杨俊杰, 黄月明, 等. 碳酸盐岩深埋藏溶蚀成岩过程的实验模拟研究[J]. 低渗透油气田, 1997, 2(1): 34-37.
- [37] 杨俊杰, 黄思静, 张文征, 等. 表生和埋藏成岩作用的温压条件下不同组成碳酸盐岩溶蚀成岩过程的实验模拟[J]. 沉积学报, 1995, 13(4): 49-54.
- [38] 崔振昂, 鲍征宇, 张天付, 等. 埋藏条件下碳酸盐岩溶解动力学实验研究[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 204-207.
- [39] SMITH L B, DAVIES G R. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: Introduction [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1635-1640.
- [40] 郑和荣, 刘纯燕, 吴茂柄, 等. 塔里木盆地奥陶系颗粒石灰岩埋藏溶蚀作用[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 9-15

(编辑 李凤丽)