

文章编号: 1001-6112(2010)04-0358-04

# 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩中硅化作用成因

朱东亚, 孟庆强

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩局部发生了显著的硅化作用。塔北的沙 15 井、沙 5 井、沙 13 井、塔深 1 井, 塔中的中 3 井、塔中 1 井等的下古生界岩心上可以看到晶簇状石英充填或半充填于碳酸盐岩溶蚀孔洞中。石英中的流体包裹体具有较高的均一温度, 其主峰区间为 150~190 °C。石英氧同位素  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  值位于 18.6‰ 和 24.14‰ 之间, 流体包裹体水氢同位素  $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$  值位于 -118.36‰ 和 -83.39‰ 之间。石英在稀土元素组成上具有轻稀土富集和显著的 Eu 负异常的特征。流体包裹体均一温度、氢氧同位素和稀土元素组成表明下古生界碳酸盐岩中的石英形成于岩浆热液流体。岩浆热液在沉淀石英的同时会对碳酸盐岩储层产生显著的溶蚀改造作用, 在实际油气勘探中应该给予足够的重视。

**关键词:** 同位素; 稀土元素; 硅化; 碳酸盐岩; 塔里木盆地

**中图分类号:** TE122.2+21

**文献标识码:** A

## THE GENESIS OF SILICIFICATION IN THE LOWER PALEOZOIC CARBONATE IN THE TARIM BASIN

Zhu Dongya, Meng Qingqiang

(SINOPEC Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Remarkable silicification was found locally in the Lower Paleozoic carbonate in the Tarim Basin. Euhedral drusy quartz were frequently observed filled or half-filled in the dissolution pores in the carbonate cores of some wells, such as S15, S5, S13 and TS1 wells in the north of Tarim Basin and Zhong 3 and Tazhong 1 wells in the central of Tarim Basin. The homogenization temperature of the fluid inclusions in the quartz is generally high, and the maximum frequency of the homogenization temperature is between 150°C and 190°C. The  $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$  values of the quartz and the  $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$  values of the water in the fluid inclusions in the quartz are between 18.6‰ and 24.14‰, -118.36‰ and -83.39‰, respectively. The rare earth elements of the quartz have features of relatively high content of heavy rare earth elements and considerable negative Eu anomaly. The characteristics of homogenization temperature, hydrogen and oxygen isotope compositions and rare earth elements indicate that the quartz in the Lower Paleozoic carbonate were precipitated from hydrothermal fluid associated with volcanic activity. When precipitating quartz, the hydrothermal dissolved the carbonate remarkably. So that, more attention should be paid to the hydrothermal alteration of the carbonate during the exploration.

**Key words:** isotope; rare earth element; silicification; carbonate; Tarim Basin

塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩中经常可以见到隐晶质的硅质条带或者硅质结核, 这些硅质条带和硅质结合通常认为是沉积形成的<sup>[1-3]</sup>。但在有些钻井的下古生界碳酸盐岩岩心中可以见到一些自形晶簇状石英, 充填或部分充填于碳酸盐岩的溶蚀孔洞中。特别是在后期溶蚀改造比较发育的白云岩中, 石英的充填较为常见。碳酸盐岩中的这种

硅化作用与某一种类型的流体活动有关, 此种类型的流体也会对碳酸盐岩产生一定的溶蚀改造作用。因此, 查明该流体类型对于探讨塔里木盆地碳酸盐岩后期溶蚀改造和储层发育有着一定的积极意义。本文试图通过对石英中的流体包裹体均一温度、包裹体水氢氧同位素以及石英的稀土元素分析等方法来揭示导致碳酸盐岩发生硅化作用的流体类型。

收稿日期: 2009-12-08; 修订日期: 2010-06-28。

作者简介: 朱东亚(1975-), 男, 博士, 主要从事流体与油气成藏方面的研究。E-mail: zhudy@pepris.com。

基金项目: 国家基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB422103), 国家重大专项(2008ZX05005-001)和中国石化海相前瞻性项目《中国典型地区深部流体活动与油气成藏作用研究》(G8804-07-ZS-0018)支持。

# 1 样品及方法

位于塔里木盆地北部雅克拉凸起的沙 15 井是硅化作用发育较为强烈和典型的一口钻井。沙 15 井所揭示的下奥陶统地层以白云岩为主,次生溶蚀改造和次生溶蚀孔隙较为发育。白云岩次生溶蚀改造发育段硅化作用也较为强烈。溶蚀孔洞被晶簇状石英部分或全部充填,石英颗粒一般可达几个毫米大小。除沙 15 井外,塔北的沙 5 井、沙 13 井、塔深 1 井、塔中的中 3 井、塔中 1 井等的下古生界碳酸盐岩岩心中也都能见到类似的硅化作用。

本次研究以沙 15 井为例,选取含晶簇状石英的岩心磨制包裹体片以进行流体包裹体测温,然后挑选纯净的石英颗粒做包裹体水氢同位素分析、石英氧同位素分析和稀土元素分析。流体包裹体测温在 Linkam—TH600 冷热台上进行。通过热爆法获得石英中的包裹体水,然后用 MAT252 质谱仪检测其氢同位素。石英氧同位素也通过 MAT252 质谱仪检测获得,通过石英与水之间氧同位素平衡分馏系数和流体包裹体均一温度计算得到包裹体水氧同位素。稀土元素通过 ICP—MS 方法获得,所用仪器为 Yokogawa PMS—200 离子质谱仪。这些分析测试在中国科学院地质与地球物理研究所完成。

# 2 结果和讨论

## 2.1 石英中流体包裹体均一温度

石英晶体中通常可见大量的气液两相包裹体,包裹体呈长方形或呈不规则的形态,大小一般十几微米,气/液比在 5% 左右。石英中流体包裹体均一温度位于 120~200 °C 之间,主峰温度 150~190 °C 之间(图 1)。以地表温度 20 °C,现今地温梯度 20 °C/hm<sup>[4]</sup> 计算,若要形成这么高的均一温度,埋藏深度需要在 6 500~8 500 m 之间,根据埋藏史<sup>[5]</sup>,下奥陶统白云岩在地质历史上并没有达到这

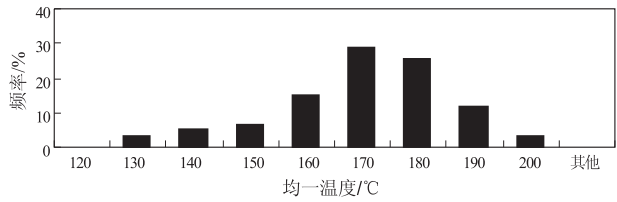


图 1 塔里木盆地北部下奥陶统石英中流体包裹体均一温度分布直方图

Fig. 1 Histogram of homogenization temperature of the fluid inclusions in the Lower Ordovician quartz in the north of Tarim Basin

样的埋藏深度。所以,沉淀形成石英的流体并不是原来就存在于地层内部的地层水,具有这么高温度的流体应该是岩浆热液流体。叶德胜<sup>[6]</sup>(1992)所测定的塔北地区丘里塔克群石英中流体包裹体均一温度为 192~278 °C,也说明了热液流体的活动。

## 2.2 石英中包裹体水氢氧同位素特征

沙 15 井下奥陶统白云岩溶蚀孔洞中充填的晶簇状石英的氧同位素和流体包裹体水氢氧同位素测试结果见表 1。4 个包裹体水氢同位素( $\delta D_{V-SMOW}$ )值分别为 -118.36‰, -106.58‰, -96.78‰, -83.39‰; 石英氧同位素( $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ )值分别为 24.14‰, 23.36‰, 22.73‰, 18.6‰。根据包裹体均一温度和石英与水之间的氧同位素平衡分馏方程计算得到沉淀石英的流体的  $\delta^{18}O_{V-SMOW}$  值分别为 8.69‰, 7.20‰, 8.50‰, 5.21‰(表 1)。

大部分高温下与岩浆平衡的岩浆水的  $\delta^{18}O$  位于 6‰~8‰ 之间,  $\delta D$  位于 -50‰~-80‰ 之间<sup>[7]</sup>。变质水  $\delta^{18}O$  位于 5‰~25‰ 之间,  $\delta D$  位于 -20‰~-70‰ 之间<sup>[8]</sup>。埋藏至深埋藏成岩阶段由于水岩相互作用,孔隙水的  $\delta^{18}O$  会逐渐增加,但最大不超过 3‰±1‰<sup>[9]</sup>, 否则演化线将于白云石区不相交,这一理论值也与石英实测  $\delta^{18}O$  值和根据包体测温计算的结果相一致。

石英样品中的流体氢氧同位素组成与大气水、海水以及变质水都相差较大(图 2)。塔北奥陶系地

表 1 塔里木盆地北部下奥陶统石英中流体包裹体水氢氧同位素组成

Table 1 Hydrogen and oxygen isotope compositions of the water in the fluid inclusions in the Lower Ordovician quartz in the north of Tarim Basin

序号	井号	深度/m	层位	石英 $\delta^{18}O_{V-SMOW}/\%$	包裹体水 $\delta D_{V-SMOW}/\%$	均一温度/°C	包裹体水 $\delta^{18}O_{V-SMOW}/\%$ <sup>1)</sup>
1	S15	5 345.07	O <sub>1</sub>	24.14	-118.36	156	8.69
2	S15	5 395.87	O <sub>1</sub>	23.36	-106.58	148	7.20
3	S15	5 416.26	O <sub>1</sub>	22.73	-96.78	171	8.50
4	S15	5 412.69	O <sub>1</sub>	18.63	-83.39	182	5.21

1) 包裹体水  $\delta^{18}O_{V-SMOW}$  是通过实测的石英  $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 、流体包裹体均一温度(T)和石英与流体之间的氧同位素分馏系数( $\alpha=3.38 \times 10^6/T^2 - 2.90$ , 据郑永飞等(2000)<sup>[7]</sup>)计算得到, 计算公式为: 流体  $\delta^{18}O_{V-SMOW} = \delta^{18}O_{V-SMOW}(\text{石英}) - 3.38 \times 10^6/T^2 + 2.90$ 。

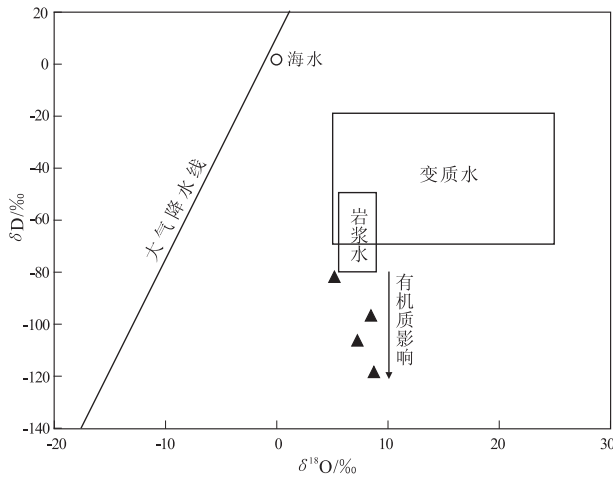


图 2 塔里木盆地北部下奥陶统石英包裹体水氢、氧同位素分布

Fig. 2 Distribution of hydrogen and oxygen isotope compositions of the water in the fluid inclusions in the Lower Ordovician quartz in the north of Tarim Basin

层水的  $\delta D_{V-SMOW}$  值位于  $-44.7\text{‰} \sim -61.0\text{‰}$  之间<sup>[10]</sup>, 石英中流体包裹体水与之也有着显著的差别。与岩浆水相比, 石英中流体包裹体水氧同位素正好位于岩浆水的范围内, 但氢同位素低于岩浆水的范围。可以推测沉淀石英的流体为岩浆热液, 氢同位素降低是岩浆热液与沉积地层中的有机质发生氢同位素交换的结果。

### 2.3 稀土元素特征

稀土元素是元素周期表中元素序号从 57 到 71 的镧系的 15 个元素, 由于这些元素的电价基本相等、离子半径相近, 所以具有相似的地球化学性质, 可以用来追踪地球化学过程<sup>[11-16]</sup>。沙 15 井 3 个石英样品稀土元素测试结果见表 2, 其配分模式见图 3a。

从稀土元素配分模式图(图 3a)上可以看出, 沙 15 井的石英具有轻稀土富集的特征, 其  $LREE/HREE$  分别为 11.866, 9.276, 11.326, 平均值为 10.816;  $(La/Yb)_N$  分别为 15.950, 10.034, 13.206, 平均值为 13.063。石英还具有较为明显的 Eu 负异常(图 3a), 其  $\delta Eu$  分别为 0.636, 0.616, 0.638, 平均值为 0.613; 但不具有明显的 Ce 负异常。

根据贾承造(2004)<sup>[16]</sup>的研究成果, 塔里木盆地二叠纪中酸性火成岩大部分样品具有明显的 Eu 的负异常, 但不具有明显的 Ce 负异常(图 3b)。中酸性火成岩的  $LREE/HREE$ 、 $(La/Yb)_N$ 、 $\delta Eu$  和  $\delta Ce$  平均分别为 10.96, 12.09, 0.536 和 0.94。从稀土元素配分模式和几个参数来看, 石英与中酸性火成岩比较接近, 说明沉淀石英的流体是与中酸性火成岩活动有关的岩浆热液流体。

表 2 塔里木盆地北部下奥陶统石英稀土元素组成

Table 2 Rare earth element compositions of the Lower Ordovician quartz in the north of Tarim Basin

项目	序号			平均
	1	2	3	
深度/m	5345.07	5395.87	5416.26	
La	1.491	0.608	0.922	1.007
Ce	2.882	1.285	1.876	2.014
Pr	0.289	0.145	0.182	0.205
Nd	0.951	0.539	0.630	0.707
Sm	0.201	0.107	0.125	0.144
Eu	0.035	0.019	0.023	0.026
Gd	0.147	0.084	0.098	0.110
Tb	0.024	0.013	0.014	0.017
Dy	0.140	0.079	0.087	0.102
Ho	0.027	0.017	0.019	0.021
Er	0.075	0.047	0.055	0.059
Tm	0.010	0.007	0.008	0.008
Yb	0.061	0.039	0.045	0.048
Lu	0.009	0.006	0.006	0.007
$\Sigma REE$	6.343	2.995	4.090	4.476
$LREE/HREE$	11.866	9.257	11.326	10.816
$(La/Yb)_N$	15.950	10.034	13.206	13.063
$\delta Eu$	0.636	0.619	0.638	0.631
$\delta Ce$	0.978	0.965	1.022	0.988

注: 稀土含量单位为  $\mu g/g$ ;  $\Sigma REE$  为总稀土含量;  $LREE/HREE$  为轻重稀土比值;  $(La/Yb)_N$  代表球粒陨石标准化后的比值;  $\delta Eu = Eu / \sqrt{(Sm \times Gd)_N}$ , N 表示球粒陨石标准化后的值;  $\delta Ce = Ce / \sqrt{(La \times Pr)_N}$ , N 表示球粒陨石标准化后的值。

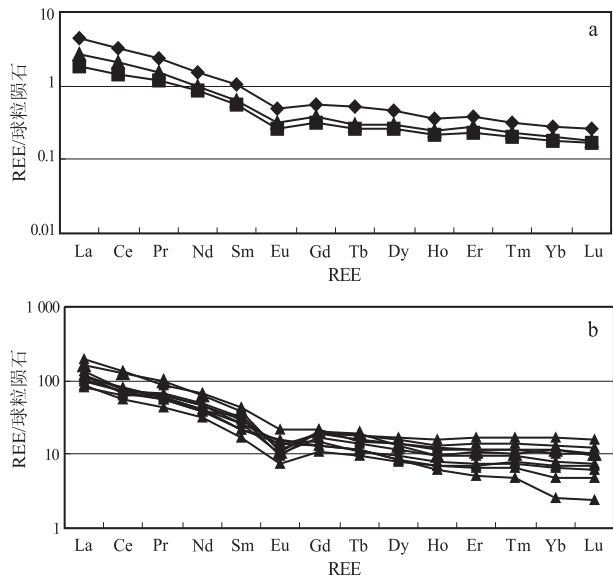


图 3 塔里木盆地北部下奥陶统石英和中酸性火山岩稀土元素配分模式

球粒陨石稀土数据引自 Wakita 等(1971)<sup>[15]</sup>

a. 石英稀土配分模式; b. 中酸性火山岩稀土配分模式<sup>[16]</sup>

Fig. 3 Distribution patterns of rare earth elements of the Lower Ordovician quartz in the north of Tarim Basin and the intermediate-felsic igneous rocks in the Tarim Basin

### 2.4 石英成因

从石英中流体包裹体均一温度、氢氧同位素以及稀土元素组成上可以看出,沙 15 井下奥陶统白云岩溶蚀孔洞充填的石英颗粒是从岩浆热液中沉淀形成的。岩浆热液成因的石英在金属矿床中较为常见,研究的也较多,热液流体的温度、压力、酸碱度等性质的改变可导致硅质的过饱和和硅化作用的发生<sup>[17-18]</sup>。同时对硅过饱和并对方解石不饱和的流体是存在的<sup>[19]</sup>,这种类型的流体和碳酸盐岩相遇时,在沉淀石英的同时还会溶解其中的灰质成分,从而使碳酸盐岩储层在一定程度上得到改善。

### 3 结论

流体包裹体测温、氢氧同位素和稀土元素特征表明塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩溶蚀孔洞中充填的晶簇状石英是从岩浆热液中沉淀形成的。晶簇状石英在许多钻井的下古生界碳酸盐岩岩心中都可以看到,在一定程度上表明了塔里木盆地热液活动的广泛性。热液流体具有较高的温度并一般富含 CO<sub>2</sub>,对碳酸盐岩会形成显著的溶蚀改造作用,实际勘探中应给予足够的重视。

#### 参考文献:

[1] 刘万洙,白雪峰,包亚范,等. 新疆库鲁克塔格地区寒武—奥陶系硅质岩的岩石学特征及其成因分析[J]. 新疆地质, 2006,24(4):344—348.

[2] 楼雄英,许效松. 塔里木盆地早古生代晚期构造—沉积响应[J]. 沉积与特提斯地质,2004,24(3):72—79.

[3] 艾华国,兰林英,王筠,等. 塔里木盆地雅克拉断凸前中生界不整合面之下奥陶统白云岩储层特征[J]. 地质学报, 1999,73(4):342—349.

[4] 李慧莉,邱楠生,金之钧,等. 塔里木盆地的热史[J]. 石油与天然气地质,2005,26(5):613—617.

[5] 赵洪文,李铁军,张忠民,等. 雅—轮断凸油气勘探目标评价与优选[R]. 北京:中国石油化工有限公司石油勘探开发研究院,2006:84.

[6] 叶德胜. 塔里木盆地北部丘里塔格群(寒武系至奥陶系)白云

岩的成因[J]. 沉积学报,1992,10(4):77—86.

[7] 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2000.

[8] TAYLOR H P JR. Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits[M]//BARNES H L, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. 2nd ed. New York:John Wiley & Son,1979:236—277.

[9] LONGSTAFFE F J. Stable isotope studies of diagenetic processes[C]//KYSER T K. Stable Isotope Geochemistry at Low Temperature Fluids, MAC Short Course Series 13. Québec: Mineralogical Association of Canada,1987:187—257.

[10] 贾存善,马旭杰,饶丹,等. 塔河油田奥陶系油田水同位素特征及地质意义[J]. 石油实验地质,2007,29(3):292—297.

[11] 李红敬,解习农,周炼. 扬子地区二叠系硅质岩成因分析及沉积环境研究[J]. 石油实验地质,2009,31(6):564—569.

[12] 刘显凤,蔡忠贤,云露,等. 塔河油田岩溶作用元素地球化学的特征响应[J]. 石油实验地质,2009,31(3):270—274.

[13] 俞惠隆,张金亮,徐伦勋. 东濮凹陷沙河街组泥岩的稀土元素地球化学特征[J]. 石油与天然气地质,1990,11(2):178—186.

[14] 刘宁,樊德华,郝运轻,等. 稀土元素分析方法研究及应用:以渤海湾盆地东营凹陷永安地区物源分析为例[J]. 石油实验地质,2009,31(4):427—432.

[15] WAKITA H, REY P, SCHMITT R A. Elemental abundances of major, minor, and trace elements in Apollo 11 lunar rocks, soil and core samples. Proc. Apollo 11 Lunar Science Conference [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1970, Supplement: 1685—1717.

[16] 贾承造,张师本,吴绍祖. 塔里木盆地及周边地层(下册)[M]. 北京:科学出版社,2004:227—262.

[17] ANDERSON R N, HOBERT M A, LANGSETH M G. Geothermal convection through oceanic crust and sediments of the Indian Ocean [J]. Science, 1979, 204: 828—832.

[18] HESSE R. Silica diagenesis: origin of inorganic and replacement cherts [M]// MCILREATH I, MORROW D W, eds. Diagenesis. Geological Association of Canada Geoscience Reprint Series 4. Newfoundland: Geological Association of Canada Geoscience, 1990: 253—276.

[19] PACKARD J J, AI—AASM I, SAMSON I, et al. A Devonian hydrothermal chert reservoir: the 225 bcf Parkland field, British Columbia, Canada [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85: 51—84.

(编辑 徐文明)

(上接第 357 页)

[8] 张小莉. 陕北三叠系延长组低阻油层特性及其形成机理分析[J]. 测井技术,1999,23(4):276—287.

[9] 回雪峰,吴锡令,谢庆宾,等. 大港油田原始低电阻率油层地质成因分析[J]. 勘探地球物理进展,2003,26(4):329—332.

[10] 郑维才,陈为贞,高聚同,等. 孤东油田北部地区低阻油层研究与挖潜[J]. 油气地质与采收率,2007,14(4):45—47.

[11] 中国石油勘探与生产公司. 低阻油气藏测井识别评价方法与技术[M]. 北京:石油工业出版社,2006:89—120.

(编辑 黄娟)