

# 影响深层碎屑岩次生孔隙发育的因素<sup>①</sup>

## ——冀中坳陷与塔里木盆地实例讨论

徐志强 陈永武 熊 明

(中国石油天然气总公司新区勘探事业部, 北京 100083)

**提 要** 在一个含油气盆地内,随着勘探程度的提高,深层作为新的油气勘探领域越来越引起人们的关注。深层碎屑岩储层储集空间类型以次生溶蚀孔为主,被溶解物质往往是碎屑岩原始沉积的骨架颗粒和早期化学胶结物。塔里木三叠系砂(砾)岩以岩屑砂岩为主,其中碳酸盐胶结物含量为 5~35%;冀中下第三系砂岩以长石砂岩为主,并含有丰富的碳酸盐胶结物(3~35%);这些物质为晚期溶解形成次生溶蚀孔隙提供了丰富的物质基础。冀中下第三系深层碎屑岩当埋深大于 3500m 时,实测岩石孔隙度最大值小于 20%;渗透率最大值小于  $100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;大多数砂层的孔隙度小于 10%;渗透率小于  $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;单井日产液量不足 100 吨。而塔里木盆地三叠系碎屑岩储层,在埋深 5000m 时仍具有孔隙度最高值大于 20%、渗透率最高值大于  $1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的储集条件;单井产油量达到日喷油大于 500 吨,天然气大于 1 万立方米。本文通过对这两个地区深层碎屑岩储集条件分析认为两地古今地温场的差异是影响深部碎屑岩成岩作用的主要因素;多套烃源岩层系热演化时间跨度的差异直接影响了深部储层储集能力。

**关键词** 碎屑岩储层 成岩作用 次生孔隙 冀中坳陷 塔里木盆地

**分类号** P588.21

**第一作者简介** 徐志强 男 40 岁 高级工程师 岩石矿物学

### 1 成岩作用的差异

#### 1.1 机械压实作用

机械压实作用是成岩早期造成原生孔隙衰减的主要成岩作用方式。尽管地层时代相差约 165 百万年,无论是在塔里木盆地的三叠系或冀中坳陷的第三系机械压实作用对碎屑岩孔隙的影响范围仅局限在中—浅层。冀中 101 口探井砂岩体平均声波时差值所表现的压实特征为:中—浅层砂岩(小于 2500~2800 埋藏范围)受到正常压实作用,即随着地层埋深,沉积物原生孔隙呈线性关系衰减(图 1)。当砂岩声波时差值在  $250 \mu\text{s}/\text{m}$ (孔隙度约 15%)时,砂岩承受的上覆地层正常压实效应减弱,这时地层压力除了部分地层符合静水压力外,开始出现压力正异常。塔里木盆地碎屑岩承受的正常压实作用阶段与冀中地区基本一致,也仅局限在埋深小于 2500~2800m 范围内。在此深度以下出现异常压实。

#### 1.2 化学成岩作用

化学成岩作用是影响深层孔隙演化的主要成岩方式,它表现为两个方面:(1)岩石组份的溶解作用扩大原生孔隙形成次生溶蚀孔隙;(2)新生矿物的沉

淀作用堵塞原生和次生孔隙<sup>[1]</sup>。

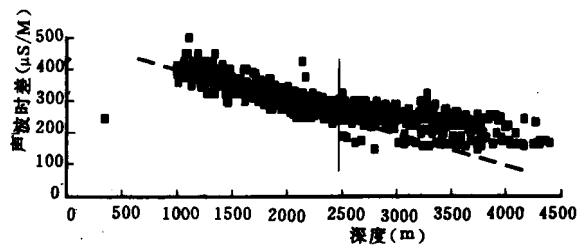


图 1 冀中坳陷下第三系砂岩压实特征

Fig. 1 Eocene sandstone compaction feature in the Jizhong Depression

根据冀中下第三系砂岩中所观察到的溶蚀和新生矿物沉淀现象可建立冀中下第三系碎屑岩成岩作用模式(图 2),冀中坳陷下第三系深层碎屑岩正处在新生矿物沉淀形成残余晶间孔隙阶段,自生矿物和盐类含量达 5%~8%,主要为自生石英、含铁碳酸盐、自生粘土和盐类矿物。冀中下第三系深层砂岩中大多数孔隙为这些新生矿物晶体之间的残余孔隙。而塔里木盆地三叠系碎屑岩由于受古生界和新生界两大套烃源岩的影响,形成了与冀中第三系不

① 收稿日期:1997-03-31

同的化学成岩模式(图3)。塔里木中生界碎屑岩受前中生界烃源岩的影响三叠系碎屑岩组分被溶解改造后形成溶蚀孔隙的同时还形成富含轻碳同位素的次生方解石沉淀(见表3)。在此之后三叠系烃源岩产生的酸性溶液再一次对自身储集岩沉积组份和次生碳酸盐矿物进行溶蚀改造。经历了两次溶蚀改造以后,塔里木三叠系深层碎屑岩的储集能力得到了改善。

木盆地碎屑岩溶蚀孔隙发育深度大于冀中拗陷。

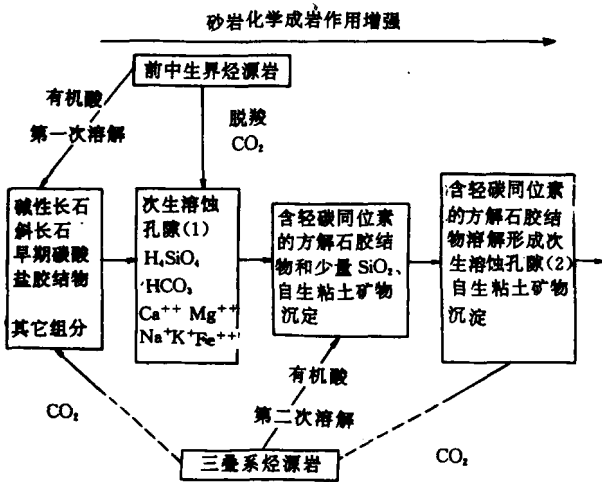


图2 冀中下第三系砂岩化学成岩模式

Fig.2 Chemical diagenesis model of Eogene Sandstone in the Jizhong Depression

## 2 影响深层碎屑化学成岩作用的原因

### 2.1 温度

#### 2.1.1 地温梯度

当地层温度在 80℃ ~ 120℃ 之间是有机酸羧酸阴离子最活跃阶段, 羧酸阴离子发生热脱羧, 形成富含 CO<sub>2</sub> 的酸性溶液。因此可以将 80℃ ~ 120℃ 看作次生溶蚀孔隙最发育阶段<sup>[1]</sup>。地温梯度差异使两地在相同深度范围存在孔隙演化差异。根据塔里木轮南、塔中地区系统地温测试, 塔里木盆地平均地温梯度为 2℃/100m (1.8℃ ~ 2.38℃/100m)。冀中 450 井钻井实测地温数据表明冀中下第三系平均地温梯度为 3.2℃/100m (2.4℃ ~ 4.3℃/100m)。

地表温度都按 14℃ 计算, 当地层温度介于 80℃ ~ 120℃ 之间时, 塔里木盆地三叠系碎屑岩埋藏范围为 3300 ~ 5300m, 而冀中下第三系碎屑岩的埋藏范围 2062.5 ~ 3312m。两地地温梯度的差异造成塔里

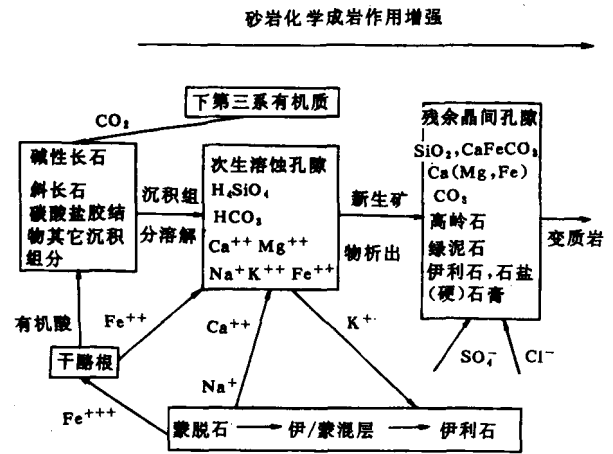


图3 塔里木盆地三叠系碎屑岩化学成岩模式

Fig.3 Chemical diagenesis model of Triassic Sandstone in Tarim Basin

表1 冀中拗陷下第三系古地温对比表(据梁狄刚等, 1983)

Table 1 Geohistory and present geotemperature comparison of the Eogene in the Jizhong Depression (Liang Digang, 1983)

井名	样品深度 (m)	时代	古地温 (°C)	今地温 (°C)
Jing13	4171	Es4	100	122
Cha3	3945	Es3	90	120
Ning4	3799	Es3	106	139.9
Zhe40	3770	Es3	75	129
Ning3	4035	Es2	103	136.7
Ning3	4150	Es2	103	138.8
Ning3	3920	Es1	98	134.9
Ning3	3968	Es1	100	135.8
Ren101	2943	Ed3	75	103.7

表2 塔里木盆地跃南1井砂岩包裹体温度分析表

Table 2 Inclusion temperature and present geotemperature of Well Yuenan - 1 in Tarim basin

井深 (m)	岩性 (时代)	原生包裹体 (°C)	次生包裹体 (°C)	实测地温 (°C)
4496	砂岩(P)	84~94.1		98.52
5320	砂岩(C)		142.2~147.4	114.02
5841	砂岩(S)	191.0	155~159.5	114.40
5842	砂岩(S)	93	125.7~182.3	123.83
5987.5	砂岩(S)	146.5~171.9	113~181.2	126.57

#### 2.1.2 古今地温场差异

冀中下第三系在沉积、成岩过程中, 地温场的变

化为升温的过程。而塔里木三叠系深层碎屑岩在沉积、成岩过程中经历了地温场降温的过程。升温过程使得冀中下第三系深层砂岩经历了岩石组份溶解形成溶蚀孔隙→新生矿物沉淀形成晶间残余孔隙这样一个循序渐进的成岩序列。地温场的降温过程使得塔里木深层碎屑岩储层成岩演化过程变缓不利于新生矿物析出,从而有利于保护深部储集空间。

利用冀中下第三系实测地层温度与镜煤反射率( $R_o$ )推测的古地温对比认为冀中下第三系今地温比古地温高22~54℃(表1)。塔里木盆地跃南1井砂

岩包裹体分析证实成岩过程中产生的次生包裹体的温度都大于今地温,古地温高于今地温33.38~58.47℃(表2)。王会祥(1991)曾对塔里木轮南地区地温场研究得出<sup>[4]</sup>,寒武纪至早奥陶世地温梯度为3.5℃/100m,中奥陶世至志留纪为3.25℃/100m,泥盆纪至二叠纪为3.0℃/100m,三叠纪为2.6℃/100m,侏罗纪为2.4℃/100m,白垩系沉积时古地表温度为20℃,地温梯度为2.2℃/100m,第三纪至现今2℃/100m。盆地演化过程中地温场的降温过程滞缓了成岩程度有利于深层孔隙保存。

表3 塔里木盆地岩石碳酸盐碳同位素分析数据表

Table 3 Carbon isotope analysis of carbonate in the Tarim Basin

时代	样品数	样品深度(m)	产状	$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ (范围)	$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ (平均值)
J	3	4255~4497.39	砂岩 胶结物	-3.93~-4.98	-4.41
T	22	4352~5018	砂岩 胶结物	-1.48~-30.39	-14.02
C-P	8	5037~5348	砂岩 胶结物	-1.76~-3.22	-2.52
		5069.7~5118.5	灰岩 (2)	0.39~-2.82	-1.61
D	3	5453~5840	砂岩 胶结物	0.62~-4.62	-2.69

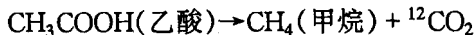
表4 冀中下第三系碳酸盐碳同位素分析数据表

Table 4 Carbon isotope analysis of Eocene Carbonate in the Jizhong Depression

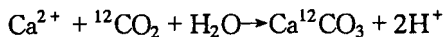
时代	样品数	样品深度(m)	产状	$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ (范围)	$\delta^{13}C_{\text{‰}}$ (平均值)
Es1	6	2319~3705.65	砂岩 胶结物	-1.11~-4.18	-2.22
		2320.97~2378	生物 灰岩	-1.11~-2.85	-1.98
Es2	1	3100	砂岩 胶结物	-5.38	-5.38
Es3	1	4159	砂岩 胶结物	-6.24	-6.24
Es4 -Ek	2	4096~4131.20	砂岩 胶结物	-2.80~-2.85	-2.83

## 2.2 多套烃源岩不同时期产生的酸性溶液对储集岩组份溶蚀,改善了深层的储集条件

在有机酸和 $CO_2$ 存在的情况下,方解石(碳酸盐)胶结物的溶解作用是形成溶蚀孔隙的另一有效途径<sup>[3]</sup>。但是随着烃源岩热演化程度升高,有机质热解过程中,断开链接 $^{12}C$ 的键所需能量低于链接 $^{13}C$ 的键<sup>[2]</sup>,因此在地层内产生富含较轻同位素的 $^{12}CO_2$ 酸性溶液,如:



当富含较轻同位素的 $^{12}CO_2$ 酸性溶液向上部地层运移时,由于二氧化碳分压( $P_{CO_2}$ )降低,在碎屑岩次生溶蚀孔隙内形成含轻碳同位素的碳酸盐沉淀。



这些富含轻碳同位素的碳酸盐胶结物再一次溶解,是改善塔里木盆地三叠系深层碎屑岩储集条件的主要化学方式。塔里木三叠系砂岩内部方解石胶结物含量不均,它们在结构上呈斑点或斑状块,反映了明显被溶蚀特征。这些碳酸盐的能谱分析表明主要为

钙方解石、含锰方解石、含铁方解石。选取这些碳酸盐胶结物所做的碳同位素分析结果与上覆侏罗系、下伏古生界地层灰岩、砂岩碳酸盐胶结物碳同位素分析结果对比表明,塔里木盆地三叠系碎屑岩储层内的方解石胶结物的碳同位素比上下地层都轻。这说明砂岩成岩阶段存在脱羧产生的 $^{12}CO_2$ 加入的晚期碳酸盐沉淀(表3)。塔里木盆地中生界下伏的石炭系烃源岩在中生界沉积后就达到了有机质脱羧阶段。由此而产生的 $^{12}CO_2$ 向上部三叠系地层运移,对长石质颗粒溶蚀形成溶蚀孔隙的同时还形成了含轻碳同位素的碳酸盐沉淀。

冀中下第三系深层碎屑岩碳酸盐胶结物分布非常普遍(3~35%),能谱分析结果以钙方解石和含铁方解石为主,它们的 $\delta^{13}C$ 值与冀中下第三系原始沉积的生物灰岩非常接近(表4)。这证明冀中下第三系深层砂岩成岩演化过程中没有发生有机质脱羧后的碳酸盐沉淀作用。深层被溶解的碳酸盐胶结物为早期沉淀碳酸盐。

目前塔里木三叠系烃源岩所处的温度范围正是在有机酸最为活跃期间(低成熟),由此而产生的酸性溶液,继石炭系之后再一次对三叠系储集岩进行溶解,从而改善了深层碎屑岩溶蚀孔隙的储集能力(图3)。

### 3 结 论

机械压实作用对砂岩储集条件影响只存在于中—浅层(小于2500~2800m),是造成砂岩原生孔隙的衰减的主要因素。而影响深层储集条件的主要因素是化学成岩作用。岩石组分的溶解、新生矿物的沉淀作用是影响深层碎屑岩储集条件主要因素。

温度控制深层碎屑岩化学成岩过程。塔里木盆地地温梯度低,而且在盆地演化过程中,地温场呈降温趋势。这一现象延缓了深层砂岩内新生矿物的沉淀作用,从而有利于深层次生溶蚀孔隙的保存。而冀中坳陷地温梯度相对高。在下第三系沉积过程中地温场呈升温的趋势。这一现象造成深层成岩演化程度高,促进了新生矿物化学沉淀作用(如石英、碳酸盐等),从而使得塔里木三叠系深度相当的冀中下

第三系深层碎屑岩储集条件相对较差。

多套烃源岩对于改善深部碎屑岩储集条件有利。塔里木盆地具有早古生界寒武—奥陶系、晚古生界石炭—二叠系、中生界三叠—侏罗系三套烃源岩。它们演化时间跨度大,酸性溶液多期对深层储层改造使得塔里木三叠系深层碎屑岩具有良好的储集条件。而冀中坳陷仅在下第三系存在三套烃源岩,热演化间隔短,成岩作用是一个由浅到深的连续过程,从而使得冀中下第三系深层碎屑岩经历了压实—溶解—新生矿物沉淀的完整过程。这套储层目前正处在新生矿物沉淀阶段,储集条件相对差。

#### 参 考 文 献

- (1) Surdam R. C., Crossey L. J., Hagen E. S. et al., Organic-inorganic Interaction and Sandstone Diagenesis, AAPG Bulletin, 1989, 73(1):1~23.
- (2) John M., Hunt, Petroleum Geochemistry and Geology, W. H. Freeman and Company, 1979.
- (3) Bjorlykke K. and Egeberg P. K., Quartz Cementation in Sedimentary Basins, AAPG Bulletin, 1993, 77(9):1538~1548.
- (4) 童晓光等.塔里木盆地油气勘探论文集.乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1992,321~363.

## Factors Affecting on Dissolution Porosity in Deep Burial Clastic Reservoirs — Examples from Jizhong Depression and Tarim Basin

*Xu Zhiqiang Chen Yongwu and Xiong Ming*

(Frontier Petroleum Exploration Department, CNPC, Beijing 100083)

#### Abstract

Secondary porosity caused by dissolution of primary skeleton grains and chemical cements is the most important petroleum storage spaces in deep burial clastic reservoirs. Lithic arkose is the main component of Triassic reservoir sandstones in the Tarim basin; carbonate cement in the reservoir ranges from 5% to 35%, and in the Tertiary of the Jizhong Depression the common reservoir rock is arkose, of which carbonate cement is between 3% and 35%. The feldspathic grains and carbonate cement provide basic materials for the formation of solution porosity. Cores taken from below 3500m in Jizhong Depression show the maximum porosity <20% and maximum permeability <math>100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2</math>. Most of the samples have porosity <10% and permeability <math>10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2</math>; In the Tarim basin the Triassic sandstone reservoirs buried deeper than 5000m still have maximum porosity >20% and permeability <math>1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2</math>. Production shows that when clastic reservoir buried deeper than 3500m in Jizhong Depression the fluid production is always less than 100t/d; while in the Tarim Basin when buried below 5000m, Tertiary clastic reservoirs still have an oil production of 500t/d and gas 100000m<sup>3</sup>/d. This paper compares the deep burial clastic reservoirs in the Tertiary of the Jizhong Depression with the Triassic of Tarim Basin and discusses the factors affecting the porosity evolution in deep burial situation. Geotemperature and multiple hydrocarbon sources are the main factors that bring about the difference of reservoir storage capacity in deep burial clastic reservoirs in the Jizhong Depression and the Tarim Basin.

**Key Words** clastic reservoir diagenesis secondary porosity Jizhong depression Tarim basin