

塔北侏罗-三叠系成岩反应^{*}

蔡春芳 梅博文·马 亭 柳常青

(江汉石油学院, 湖北荆沙 434102)

塔北隆起侏罗-三叠系连续埋藏砂泥岩体系成岩反应主要受温阶控制, 在90~135℃温度范围内油田水中有有机酸浓度达到高值, 导致铝硅酸盐及碳酸盐类矿物的溶解。斜长石的广泛溶解是本区富含自生高岭石、次生孔隙发育的主要原因。孔隙的改善程度与控制矿物溶解后离子迁移能力的原始岩石物性等因素紧密相关。

关键词 连续埋藏 有机酸 反应途径 有机-无机相互作用 次生孔隙

第一作者简介 蔡春芳 男 29岁 讲师(硕士) 储层地质学

1 成岩作用简述

塔北隆起自古生代末抬升遭受剥蚀后, 中生界基本上为连续沉积。三叠纪发育辫状三角洲-湖泊和扇三角洲-湖泊沉积体系; 侏罗纪时, 气候潮湿, 发育河湖相砂泥岩夹薄煤层。主要成岩作用简述如下:

1.1 长石溶解

主要分布于晚成岩A阶段, 地温约85~135℃, 长石沿解理缝、裂纹或粒内溶解, 使长石呈残余斑块, 或形成铸模孔和超大孔隙。

1.2 自生高岭石沉淀

主要发育于晚成岩A阶段, 与长石溶解作用相伴。自生高岭石多以集合体充填于粒间孔、溶孔中, 呈书页状, 分布范围广, 含量变化较大, 可高达12%以上。

1.3 石英次生加大作用

形成于早成岩B阶段及晚成岩A阶段, 地温约65~120℃, 石英加大级别多为I~II级, 分布广泛, 但含量不高, 一般4%以下, 多与自生高岭石伴生。

^{*} 国家“八五”科技攻关项目研究成果(85-101)

收稿日期: 1995-03-31 改回日期: 1995-05-05

1.4 泥晶碳酸盐胶结

形成于同生期,仅见于东河塘、轮西2井侏罗系中上统。泥晶碳酸盐已重结晶成微亮晶。

1.5 亮晶碳酸盐胶结

主要形成于早成岩B阶段及晚成岩A阶段,地温约65~135℃。英买力地区砂岩中碳酸盐胶结物含量为0~25%不等,一般为4%~8%。东河塘地区砂岩中为3%~6%,粉砂岩含5%~30%。轮南地区侏罗系多为2%~4%,三叠系0~10%。其中,不含铁的方解石、白云石胶结物较发育,多呈星散状、团块状,含量高时为镶嵌状连晶或基底式胶结。且以充填孔隙为主,也可交代颗粒。(含)铁碳酸盐胶结物主要分布于三叠系及侏罗系底部,可见交代早期形成的碳酸盐胶结物,一般含量为1%~5%。

1.6 方解石胶结物溶解

在早成岩B阶段和晚成岩A阶段较发育。方解石可溶解成残余斑块,悬浮于孔隙中;也可发生晶内溶解,常见早期方解石被晚期交代边缘的溶蚀现象。

2 油田水有机酸分布特点

泥岩成岩过程中腐殖型或腐泥腐殖型干酪根可热裂解产生有机酸,是有机酸的主要来源。干酪根有水热解实验结果表明,轮南地区LN3井侏罗系泥岩干酪根有机酸产率为1.8mg/g,中三叠统为10mg/g,下三叠统为5.18mg/g。油田水有机酸在80~120℃范围内达到高值,可高达 10000×10^{-6} ,在80~100℃内还可含有较多的二元羧酸,可高达 2500×10^{-6} [1]。塔北油田水有机组分中含甲酸、乙酸、苯甲酸、乳酸、丙酸和丁酸,未检测出二元羧酸,可能与

储集岩地温多高于100℃有关。此外,还检测出苯系物和酚。地温在100~120℃范围,一般以乙酸为主,占60%以上。高于125℃或低于95℃,乙酸优势消失,往往具有甲酸优势,如LN50井5510~5640m井段,检测出甲酸浓度为 1785×10^{-6} ,而乙酸仅 67×10^{-6} ,系微生物选择性消耗乙酸所致。

统计表明,总有机酸浓度变化大,低仅 2.45×10^{-6} ,高达 4094.28×10^{-6} ,以 $200 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ 为主。总有机酸浓度高值分布在储层温度90~135℃范围内(图1)。轮南三叠-侏罗系高值带埋深4300~4800m,地温106~118℃,对应于强溶解带。

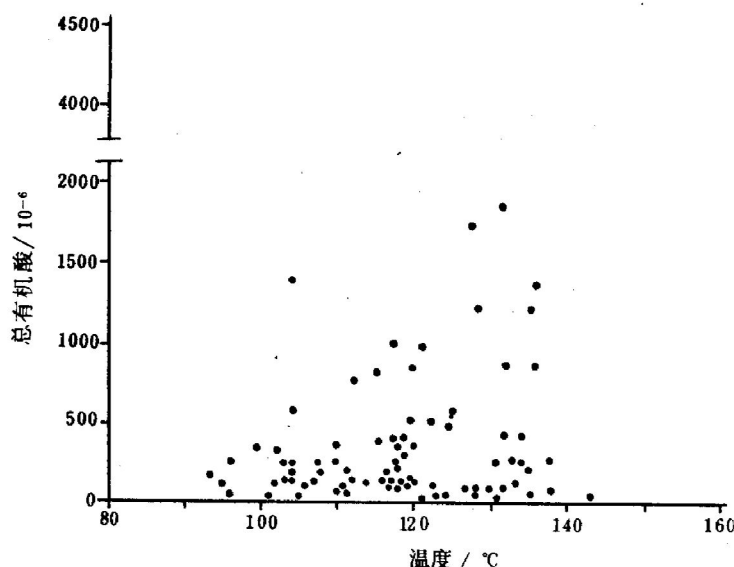


图1 塔里木盆地油田水有机酸浓度-温度变化图

塔北隆起第三系至下三叠统油田水有机酸测定结果表明,侏罗系上统、白垩系储层有机

酸总浓度较低,最高值仅 188×10^{-6} 。从侏罗系中统下部向下有机酸总浓度最高值多超过 800×10^{-6} (表1)。轮南-吉拉克三叠系 LN58 井 T₁ 油组等有机酸总浓度高于 1300×10^{-6} , 与高孔高渗带相对应,表明有机酸在储层物性改善上起较大作用。而中上侏罗统及英买力地区白垩系较低有机酸浓度,对储层物性影响相对小些。

3 成岩反应

3.1 同生期至早成岩期

局部同生期泥晶碳酸盐的沉淀,可降低孔隙度 1%~3%,增强了砂岩抗压实作用的能力。而在缺乏此类胶结物的砂岩中,常见云母、千枚岩挤压变形。有些岩石颗粒表面因粘土淋滤或火山岩岩屑水化作用而形成绿泥石、伊利石包壳。

地温达到 60~90℃时,进入早成岩 B 阶段,微生物活动有所减弱,泥岩中排出的有机酸可以部分残存下来,并可发生电离,产生

H⁺,使砂岩中碳酸盐胶结物发生溶解。由于在此温度范围内残存的有机酸有限,随着溶解作用的进行,H⁺很快被消耗,促使星散状、团块状、镶嵌状方解石沉淀下来。此类碳酸盐胶结物主要分布于侏罗系中,碳同位素组成偏重, $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-3\text{‰} \sim -5\text{‰}$ PDB。如 LN3 井 4255 m 星散状方解石,其 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -4.31‰ PDB, LN2 井 4395.48 m 团块状方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -4.98‰ PDB (表2)。 $\delta^{18}\text{O}$ 介于 $-11\text{‰} \sim -14\text{‰}$ PDB,较三叠系 $\delta^{18}\text{O}$ 值 $-13\text{‰} \sim -18\text{‰}$ PDB 重,表明前者形成的地温较低,即形成较早。

表1 塔北各地层油田水最高有机酸浓度

地层	分析个数	浓度/ 10^{-6}	井号
N _{1j}	3	118.18	YM1
K	13	188	T1
J ₂₊₃	7	371	LN3
J ₂₊₃ 底	7	4094	DH21
J ₁	4	873.42	DH2
T ₁	18	814.0	LN31
T ₁	23	1390.86	LN58
T ₂	11	352.38	LN31

注: J₂₊₃厚度 350m 以上,底部 70m 定为 J₂₊₃底

表2 方解石胶结物同位素分布

井号	层位	深度/m	$\delta^{13}\text{C} \text{ ‰ PDB}$	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰ PDB}$
LN1	T	4928.7	-11.99	-15.45
	T	4945.5	-11.78	-16.51
	T	4965.7	-22.41	-12.86
	T	5013.2	-30.39	-15.86
LN2	J ₂	4395.48	-4.98	-13.54
	J ₂	4497.39	-3.39	-12.35
	T	4828.30	-12.88	-13.07
	T	4880.6	-9.28	-11.81
	T	4898.35	-10.30	-16.27
LN3	J ₃	4255.0	-4.31	-11.98
	T	4880.0	-13.41	-17.62
LN10	T	4752.6	-10.33	-16.73

注: 本表数据由朱国华提供

3.2 晚成岩期

在地温 85~110℃时, 羧酸脱羧作用较弱, 二氧化碳分压仍较低, 有机酸起主要作用, 碎屑长石和碳酸盐胶结物在孔隙水可交替处发生较强溶解。这

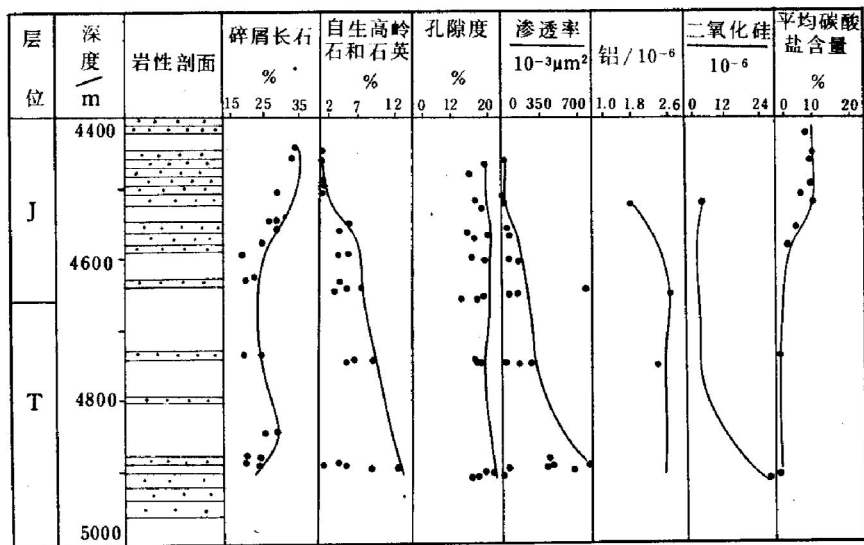


图2 LN3井储层矿物与流体化学关系图

这不仅与砂岩薄片观察结果吻合, 还得到LN3井剖面上储层矿物、物性与流体化学关系(图2)的证实。由图可见, LN3井在现今埋深4580m(古地温约100~105℃)以下, 碎屑长石和碳酸盐矿物含量明显降低, 究其原因, 主要是溶解的结果。溶解后产生的部分铝、硅可形成自生高岭石和次生加大石英, 使其含量增大; 部分 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 、 Si^{4+} 形成络合物进

入溶液, 引起油田水中铝离子或离子团浓度增大, 还可迁移出去使储层物性尤其是渗透率明显比上覆地层好。 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 的迁移距离很大程度受原始岩石物性(尤其是渗透率)和介质条件(主要是pH值)控制。渗透率越高、介质条件比较稳定, Ca^{2+} 、 Al^{3+} 搬运距离就比较长, 次生孔隙就较发育, 储层物性就变得更好。反之, 则不利于酸性水的渗滤, 溶解产生的 Al^{3+} 也不易迁出, 而多以高岭石沉淀下来, 影响次生孔隙的发育。如LN10井侏罗系-三叠系砂岩被大套泥岩包围, 砂体侧向连通性较差, 孔隙流体交替作用较弱, 孔隙度低于18%者占54.11%; 渗透率低于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 者占44.03%, 而低于 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩可占90.299%(图3A)。这类砂岩碎屑长石含量与自生高岭石和加大石英之和往往具有负相关关系(图4A)。与

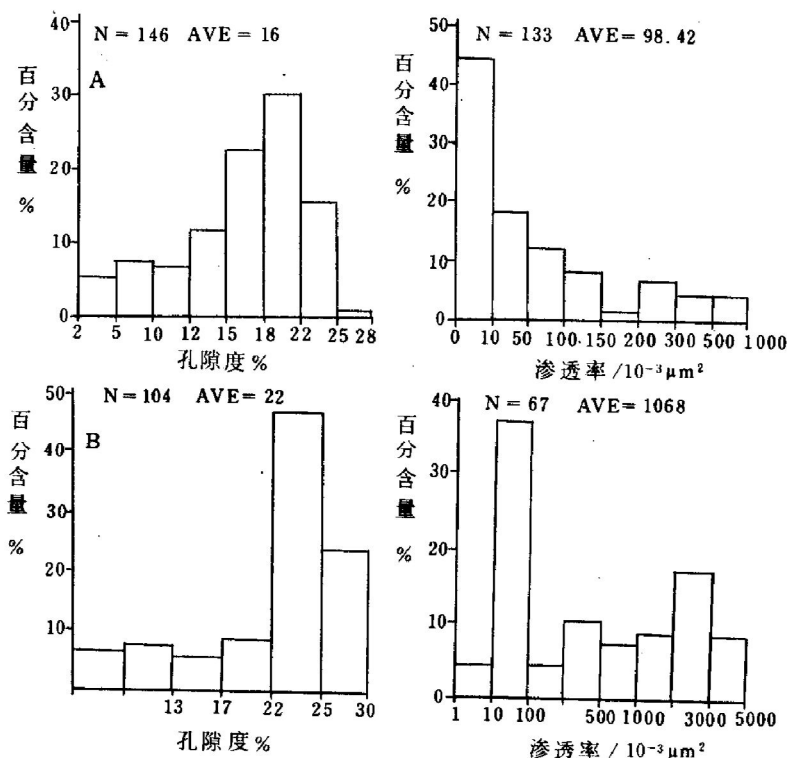


图3 孔隙度、渗透率分布直方图

A—LN10井, B—LN57井

与之相反, LN57井三叠系砂岩粒度粗, 砂体连通性好, 其孔隙度大于21%砂岩占86.586%, 而渗透率大于 $300 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩可占58%(图3B), 渗透率平均值($1068 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)比LN10

井 ($126.98 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 高出近一个数量级, 这是在原始较好储层物性的基础上进一步改造的结果。这类储层砂岩碎屑长石含量与自生高岭石和加大石英之和往往不具有负相关关系 (图 4B)。

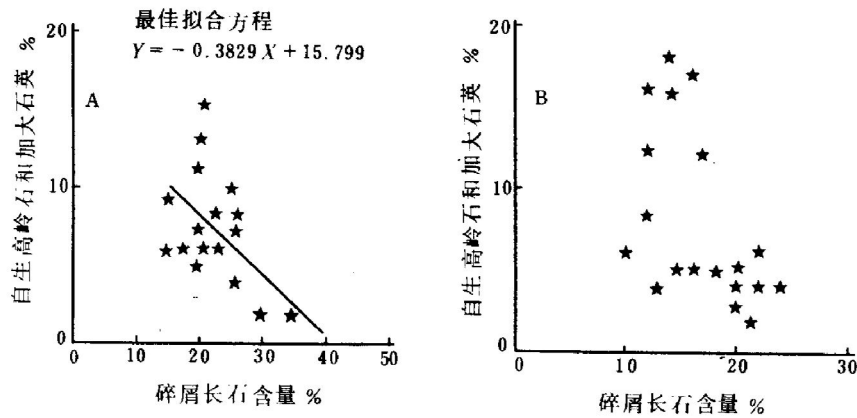


图 4 碎屑长石含量与自生高岭石和加大石英关系

A—LN10 井三叠-侏罗系, B—LN57 井三叠系

从反应热力学上看, 在乙酸参与下, 钙长石转化反应的自由能 ΔG° 远低于钾长石, 前者转化反应更容易进行。Dunn 发现^[5], 具钾长石加大边的钙长石颗粒, 在乙酸作用下, 核心钙长石强烈溶解, 而钾长石加大边影响较小。正是由于钙长石、钾长石溶解度的差异, 才导致研究区高岭石含量较高, 自生石英含量低。钙长石的普遍溶解为晚期碳酸盐沉淀提供了重要的 Ca^{2+} 来源。

当古地温高于 $100 \sim 110^\circ\text{C}$ 时, 羧酸脱羧作用比较强烈, 二氧化碳分压增高, 晚期碳酸盐可以沉淀下来^[6]。这一期碳酸盐胶结物主要分布于三叠系砂岩中, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低, 多为 $-10\text{‰} \sim -30\text{‰}$ PDB (表 2)。

当地温高于 135°C 时, 脱羧作用更加强烈, 二氧化碳分压进一步增大, 可使碳酸盐发生溶解, 但是岩矿观察表明, 晚期碳酸盐溶解现象少见。

综上所述, 塔北三叠-侏罗系储层砂岩经历了连续埋藏砂泥岩体系成岩改造作用, 其成岩反应是受温阶或埋深控制的。而改善储层物性的作用主要发生在地温 $90 \sim 135^\circ\text{C}$ 范围内。有利的次生孔隙分布于埋深 4300 m 以下的地层并与富含有机质的暗色泥岩毗邻, 为有利的相带组合。

致谢: 在研究过程中, 浙江石油地质研究所朱国华教授、北京石油勘探开发研究院应凤祥教授、郭宏莉高级工程师、江汉石油学院王正允副教授及塔里木勘探开发研究院有关人员提供了部分岩矿资料, 并给予了大力支持和帮助, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 MacGowan D B, Surdam R C. 油田水中的二元羧酸阴离子. 见: 梅博文主译. 储层地球化学译文集. 西安: 西北大学出版社, 1991. 65~82
- 2 Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis. *Bull. AAPG*, 1989, 73: 1~23
- 3 Curtis C D, Coleman M L. Controls on the precipitation of early diagenetic calcite, dolomite, and siderite concretions in complex depositional sequences. In: Gautier D L, ed. Roles of organic matter in sediment diagenesis. *SEPM Spec.*

Publ., 1986, 38: 23~34

- 4 McMahon P B, Chapelle F H, Falls W F, *et al.* Role of microbial processes in linking sandstone diagenesis with organic-rich clays. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1992, 62: 1~10
- 5 Surdam R C, Dunn T L, Heasler H P, *et al.* Porosity evolution in sandstones and shale systems. Mineralogical Association of Canada, Diagenesis Short Course Notes, 1989. 61~133
- 6 Meshri I D. On the reactivity of carbonic and organic acids and generation of secondary porosity. In: Gautier D L, ed. Roles of organic matter in sediment diagenesis. SEPM Spec. Publ., 1986, 38: 123~128

DIAGENETIC REACTION OF JURASSIC-TRIASSIC SYSTEM IN NORTH TARIM

Cai Chunfang, Mei Bowen, Ma Ting, Liu Changqing

(Jiangnan Petroleum Institute, Jingsha, Hubei)

Abstract

The diagenetic reactions of Jurassic-Triassic successively deposited sandstone-mudstone system in North Tarim Basin were mainly controlled by temperature intervals. The concentration of organic acid in oilfield water reached the peak value when temperature was 90~135°C, and this resulted in the dissolution of aluminosilicate and carbonate minerals. Extensive dissolution of plagioclase is the main cause of abundant authigenic kaolinite and high secondary porosity. The improvement of porosity was closely related to the physical properties of original reservoir.