

塔北三叠、侏罗系孔隙类型 及次生孔隙的成因*

王正允 王方平 林小云 吴东胜

(江汉石油学院, 湖北荆沙 434102)

塔北三叠、侏罗系储层主要发育粒间孔(包括残余原生粒间孔、次生粒间孔和混合粒间孔)、粒内孔、填隙物中微孔隙和缝隙等4类。尤以混合粒间孔最为发育, 占总面孔率的43%~51%, 是储集空间的主要组成部分。干酪根和粘土转化所释放的有机酸对储层中铝硅酸盐组分和部分石英颗粒阴离子的络合迁移作用是次生孔隙形成的主要原因, 可净增约9.6%的次生孔隙, 即增加的次生孔隙约占总孔隙的51.9%, 表明了次生孔隙在提高储层储集性中的重要作用。储层除受有利相带和储集类型控制外, 埋藏深度(以4200~4700 m最为有利)及由断裂和不整合面构成的输导通道亦是重要控制因素。

关键词 塔里木盆地 三叠系 侏罗系 储层 孔隙类型 次生孔隙 成因

第一作者简介 王正允 男 49岁 副教授 岩石学及储层地质学

1 地质概况

研究区包括轮南、东河塘、英买力三个主要探区, 是自加里东晚期以来长期发育的古隆起。因受海西晚期及印支运动影响, 三叠及侏罗系均以不整合与下伏地层接触。广泛发育海西晚期形成、印支期内继承性活动的各类断裂(图1)。这些不整合面及断裂(尤其是轮南地区所发育的“Y”字型断垒)所构成的体系, 无论在输导酸性溶解介质或促进油气运移上均具有重要意义。

三叠、侏罗系埋深大多在4000~5000 m, 为河湖相沉积。三叠系储层的储集类型主要为辫状三角洲及扇三角洲的水下分流河道、河口坝及滨湖砂坝等, 岩石类型主要为成分成熟度低的岩屑砂岩, 次长石岩屑砂岩等。侏罗系储层的储集类型除下侏罗统仍以辫状三角洲水下分流河道为主外, 中、上侏罗统则以滨浅湖砂坝为主, 岩性主要为次长石岩屑砂岩, 次岩屑长石砂岩, 少量石英砂岩和岩屑砂岩, 成分成熟度略高于三叠系。三叠、侏罗系储集岩的粒度可从砾状砂岩直到细粉砂岩, 但主要集中于粗粉砂到中砂的范围内。砂岩的结构成熟度较低, 多为次棱角-次圆状, 分选以中-较差为主, 颗粒以线接触最常见, 点接触相对较少, 凹凸

* 国家“八五”科技攻关项目研究成果(85-101)

收稿日期: 1995-04-11

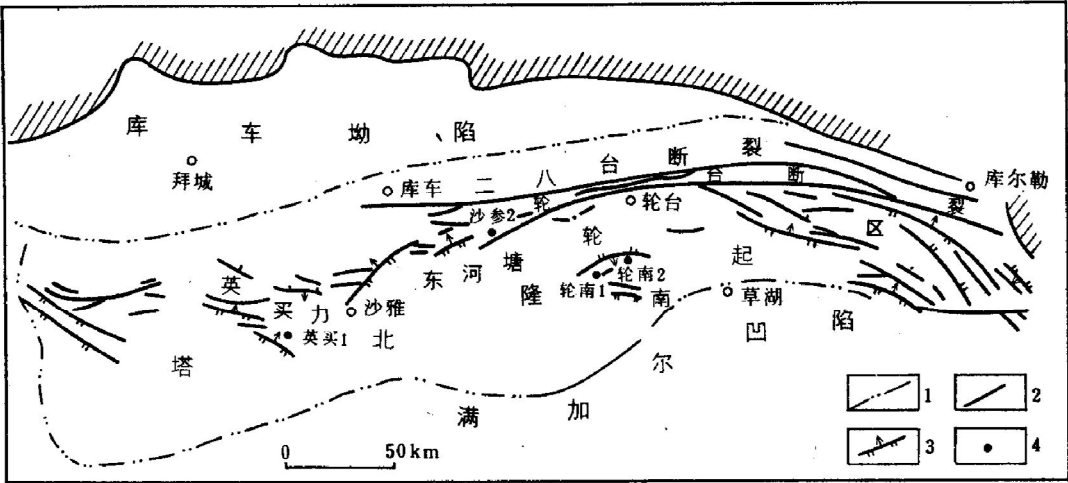


图 1 塔北地区构造区划位置及断裂发育简图 (据贾承造等, 1990)

1—构造区划, 2—大断裂, 3—逆断裂, 4—探井

接触也普遍发育。

根据成岩作用的研究*, 塔北三叠、侏罗系储层目前主要处于晚成岩 A 期, 经历了十分复杂的成岩作用 (图 2), 其中对储层孔隙发育影响最为显著的为压实、胶结及溶解作用。由于砂岩成分成熟度偏低, 含大量 (一般均大于 30%) 岩屑及云母类矿物, 故其压实作用强烈,

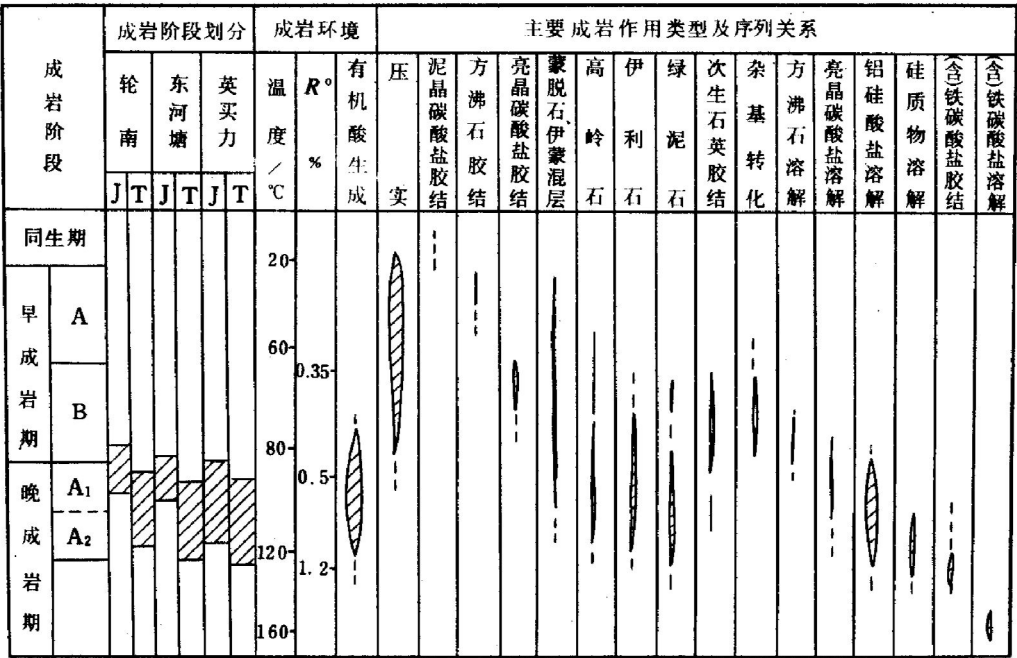


图 2 储层成岩阶段及成岩作用序列关系

对原生孔隙破坏严重。按 Scherer 公式粗略推算, 三叠、侏罗系砂岩中残余原生孔隙度, 均已小于 8%。胶结作用主要包括早成岩期的泥晶及亮晶碳酸盐, 方沸石和晚成岩期的 (含) 铁碳酸盐胶结沉淀; 次生石英的胶结则从早成岩 B 期直到晚成岩 A 期。但这些胶结作用强度有限,

* 王正允等. 塔里木盆地三叠、侏罗系储集层特征与分布规律及预测. “八五”国家重点科技攻关项目成果报告. 1994. 50~67

除个别地区和层位(如轮南三叠系底部的碳酸盐胶结)外,多为星散状零星分布,一般可使原生孔隙度减少2%~5%,总体上影响不大。溶解作用包括铝硅酸盐组分、硅质物(主要为石英颗粒)及少量亮晶碳酸盐、方沸石等早期胶结物的溶解,其中以铝硅酸盐组分的溶解作用对孔隙演化的影响最为显著,其次为硅质物的溶解。而碳酸盐等早期胶结物的溶解,除个别地段和层位外,一般影响不大。

2 孔隙

2.1 类型及特征

本文以孔隙产状为基本分类依据,而在进一步细分中考虑其成因意义。

2.1.1 粒间孔隙

区内最主要储集空间,从成因上可分为残余原生粒间孔、次生粒间孔和混合粒间孔。

2.1.1.1 残余原生粒间孔

指在成岩过程中基本未受影响或仅受到压实和部分胶结作用后有所缩小的原生孔隙。孔隙周围的颗粒无溶蚀迹象,颗粒以点接触为主,颗粒外缘若有“粘土膜”发育,则常保存完好(图版I-1,5),孔隙分布亦较均匀。由于较强烈的压实胶结和溶解作用的破坏和改造已保存不多,一般均与其它类型的粒间孔共存。

2.1.1.2 次生粒间孔

根据受溶蚀的物质及程度,可分为以下三类。

(1) 粒间溶孔:分布不均匀,常与各类微缝隙伴生,孔隙内可残存溶解的填隙组分。单纯的粒间溶孔一般不大,但可使颗粒脱离或局部脱离接触(图版I-2,3)。

(2) 粒边溶孔:受溶部位为颗粒外围,使颗粒边缘呈港湾状、锯齿状等多种溶蚀形态(图版I-4,6)。粒边溶孔同样可影响颗粒接触关系,使原来的线接触变为点接触或脱离接触。这部分孔隙空间常合并入粒间溶孔,使粒间孔隙不规则地加宽,分布更为不均匀。

(3) 超大溶孔:由于原孔隙喉道被溶蚀加宽,孔隙可呈长条状(图版I-4),若一个或多个颗粒全部被溶解,则形成典型超大孔隙(图版I-6),此时孔隙直径可大于颗粒直径,孔隙分布极不均匀。

判断次生粒间孔的标志,除溶蚀特征外,还有:①所发育的部位明显具有压实和早期胶结作用的迹象。②孔隙分布不均匀,在溶解作用强烈部位,由于粒边溶孔或超大孔隙的发育,面孔率可达20%以上,而相邻部位则可以很低甚至无孔隙发育。③孔隙内常可观察到溶解残余的粒间填隙物和孤岛状残余颗粒组分。

2.1.1.3 混合粒间孔

指由原生粒间孔及与之毗邻的次生粒间孔共同组成的孔隙空间。

2.1.2 粒内孔隙

溶孔一般沿颗粒结构薄弱面(如解理面、双晶面、微裂理、易溶组分条带等)作用于颗粒内部扩大而成(图版I-6),多呈条带状、串珠状、网络状等形态。溶解强烈与粒间溶孔相连时则发展成超大溶孔。

2.1.3 填隙物内微孔隙

主要指自生粘土矿物和原生杂基内的细小孔隙(图版I-2),一般以自生高岭石最为发

育。由于孔径细小, 连通性差, 尽管具有一定数量, 对储层储集性能的贡献不大。

2.1.4 缝隙

包括裂缝和溶缝两类, 规模都不大 (0.05~0.5 mm)。前者是单纯的应力作用产物, 较为少见; 后者则主要在构造薄弱面或裂缝基础上经溶解作用改造而成 (图版 I-3), 大多数缝隙属此类。

2.2 发育程度

观察并用计点法统计了具代表性的 64 个铸体薄片样品 (表 1), 从表 1 可以看出: (1) 混合粒间孔为主要孔隙类型, 占总面孔率 43%~51%, 其次为残余原生粒间孔, 占总面孔率 11%~20%, 次生粒间孔和粒内孔隙比例较小, 分别占总面孔率的 6%~15% 和 7%~13%, 微孔隙及缝隙所占比例均很小。其中微孔隙因较难观察, 可能统计偏低。(2) 混合粒间孔中原生孔和次生孔的比例难以确定, 暂时假设为 1:1, 则可粗略得出各层系中原生孔隙占总面孔率的 32%~43%, 次生孔隙占总面孔率的 46%~53%。(3) 轮南地区的次生孔隙所占比例较高, 可能与该区储层中发育“Y”字型断垒, 且与海西晚期及印支期的区域不整合相邻接有关。

表 1 铸体薄片各类孔隙的观察统计结果

探 区	代 表 井	层 位	深度范围/m	样品 数/个	各类孔隙面孔率/占总面孔率比例						总面 孔率	原生/次生 孔隙占总 面孔率 比例
					粒 间 孔 隙			粒内 孔隙	填隙物内 微孔隙	缝 隙		
					残余原生 粒间孔	次生粒 间孔	混合粒 间孔					
轮 南	LN ₃	J	4300~4600	12	2.0/11	1.7/9	7.8/43	2.1/11	3.2/17	1.5/8	18.3	32/50.3
	LN ₅₈	T	4200~4400	18	3.0/15	2.9/14	10.1/50	1.8/9	1.5/7	1.0/5	20.3	40/53
东 河 塘	DH ₁	J	5200~5400	11	2.8/18	1.0/6	7.5/48	1.2/8	1.8/12	1.2/8	15.5	42/46
	H ₁	T	4800~5200	7	3.1/20	2.4/15	6.8/43	1.1/7	1.7/11	0.7/4	15.8	41/48
英 买 力	ym ₁	J	4300~4700	10	2.6/14	2.1/11	8.9/47	2.5/13	2.1/11	0.8/4	19.0	37/52
		T	4800~4900	6	2.5/18	1.6/11	7.2/51	1.5/11	1.1/8	0.2/1	14.1	43/49,

3 次生孔隙的成因及规模

3.1 成因

铝硅酸盐组分和部分层位石英颗粒的溶解作用是该区三叠、侏罗系储层次生孔隙形成的主要原因; 碳酸盐、方沸石等早期胶结组分的溶解则在大多数情况下不占主要地位。

据各类碳酸盐及石英次生加大边包裹体测定, 储层主要成岩作用是在 90℃~112℃的古

* 梅博文等. 塔里木盆地油田水地球化学性质与储层性质. “八五”国家重点科技攻关项目成果报告. 1994. 12

地温范围内进行的,正属于有机酸大量形成的温度范围^[1,2]。有关资料*表明,目前地层水中仍含有一定数量的有机酸根离子,主要组分为甲酸、乙酸、丙酸、苯甲酸等(以乙酸为主要组分),而三叠、侏罗系总有机酸丰度为塔里木盆地各层系之最(图3),为 $100 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$,最高可达 700×10^{-6} 。其最高值深度(4300~4600 m)恰与区内三叠、侏罗系储层孔隙度最高值的深度范围吻合(图4),也与前述铸体薄片次生孔隙最为发育深度(4200~4700 m)一致,反映了有机酸的溶解作用与次生孔隙形成之间的密切联系。

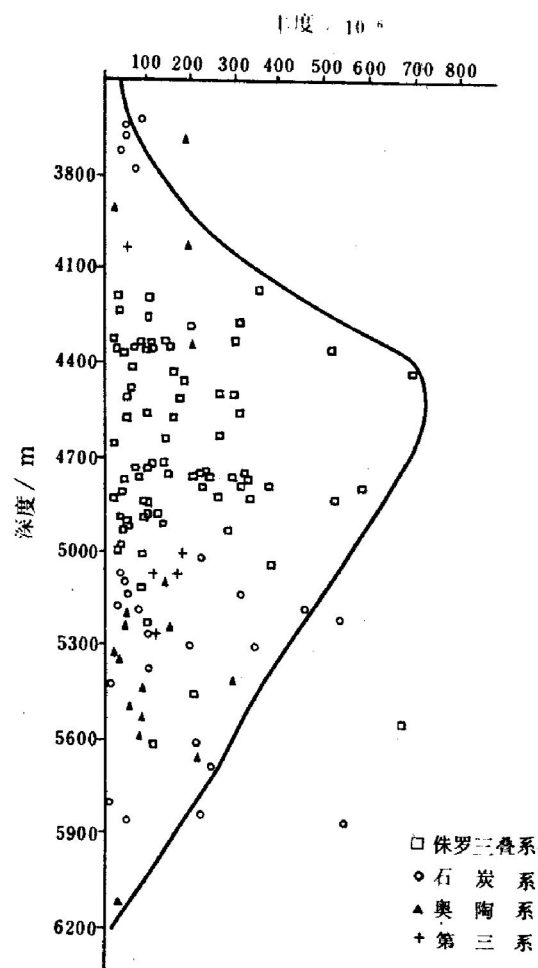


图3 有机酸丰度与深度的关系
(据梅博文等, 1992)

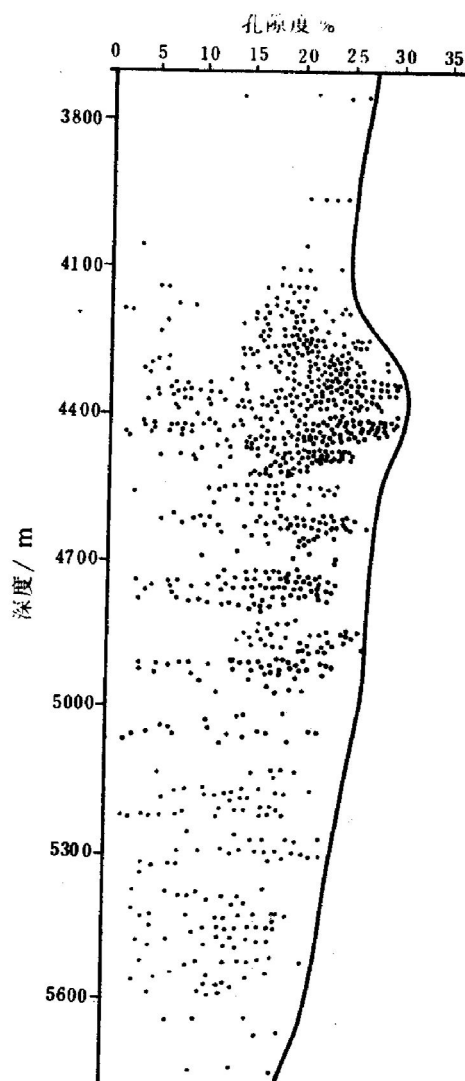


图4 储层孔隙度与深度的关系

值得注意的是根据岩芯和镜下的观察,这种溶解作用主要对铝硅酸盐组分起作用(包括长石、含铝硅酸盐组分的岩屑以及原生粘土填隙物等),而通常认为形成次生孔隙的主要易溶物质——碳酸盐胶结物则普遍表现为稳定状态,除常在孔隙中呈自形晶外,还常对石英、长石等颗粒组分起交代作用。这种现象应与有机质的类型有关。因为三叠、侏罗系生油岩的干酪根类型绝大多数为Ⅲ型,在其热演化过程中除形成大量羧酸外,同时还产生大量 CO_2 。在受到弱羧酸盐缓冲的体系中,pH值可在一个时期内保持不变,而高 P_{CO_2} 将抑制碳酸盐的溶解,在这种情况下,铝硅酸组分受到溶解而碳酸盐则基本保持稳定状态。

3.2 规模

测算次生孔隙数量的方法已有过尝试^[3], 本文将通过估算原始有机酸的产值及其溶解能力的方法, 来讨论次生孔隙的规模问题。

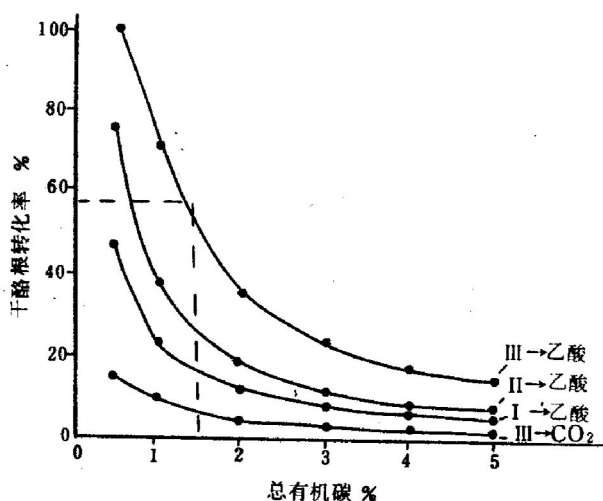


图5 干酪根转化率与总有机碳的关系
(据 Grossey 等, 1986)

塔北三叠、侏罗系地层水中含有一定数量的有机酸, 但与国外有关资料 (如美国路易斯安那海湾沿岸, Santa、Maria 盆地等)^[4]对比, 在相同的地温条件下, 低一个数量级以上。这种偏低的情况, 除取样和分析过程中可能的失误外, 主要是现今地下水与成岩阶段地层水性质上有区别。本文采用以下公式估算原始有机酸的产值:

$$TOA = C_o \cdot m \cdot K_i$$

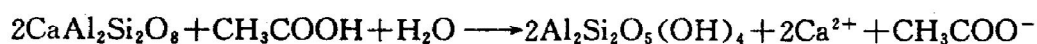
式中 TOA —— 原始有机酸总量 (g/cm³);
C_o —— 原始有机碳丰度 (%); m —— 泥岩密度, 取 2.3 g/cm³; K_i —— 有机碳生成有机酸转化率 (%).

据热解资料恢复*, 以轮南三叠系为例, 其泥岩 C_o 为 1.12%~2.49%, 平均值 1.6%;

干酪根类型主要为 III 型, 有机酸以乙酸为主, 据此, 从 Grossey^[2]干酪根转化率与有机碳关系图 (图 5) 得出区内转化率约为 56%。据此计算每立方分米页岩可产生 20.608 g 的乙酸。

铝硅酸盐组分主要与有机酸阴离子形成有机金属络合物而被溶解^[1], 其溶解度比高岭石高出 3 个数量级以上。虽然关于其它有机酸铝络合物的地化行为尚无定量研究, 但普遍认为将大大提高铝相的溶解和迁移能力。

据 Meshri^[5]对有机酸的热力学研究结果, 采用乙酸与微斜长石及钙长石的反应:



求得转化反应的自由能 (ΔG_r°) 分别为 -17.92 kJ/mol 和 -154.49 kJ/mol, 均表明有较大的热力学趋势。

根据以上两式, 每立方分米泥岩所产的乙酸分别能与 95.5 g 和 191 g 的微斜长石和钙长石反应。取长石密度为 2.65 g/cm³, 按泥岩与砂岩的平均比值 1.6:1 计算, 则在每立方分米砂岩中分别可溶解 57.7 ml 的微斜长石和 115.3 ml 的钙长石。据薄片鉴定估计, 区内砂岩中斜长石与钾长石之比约为 2:1, 所以可被溶解的长石体积约为 96.1 ml。这意味着砂岩中大约有 9.6% 体积的长石或其它组构中的铝硅酸盐组分被溶解。如果将此数值视为增加的次生孔隙度, 则其占区内平均总孔隙度的 51.9%, 十分接近由铸体薄片统计得出的次生孔隙占总面孔隙率的比例 (46%~53%)。

* 江汉石油学院测试中心, 塔里木盆地油气层地球化学录井技术与应用, 国家“八五”重点科技攻关项目 (阶段报告), 1992

4 讨论

4.1 有机酸产值的估算

在以上的计算中,虽然采用了数值较高的Ⅲ型干酪根转为乙酸的转化率,实际上泥岩中也含有少量Ⅰa型干酪根,现今地下水中也含有除乙酸外的其它有机酸,所以势必导致产值估算过高;但另一方面,也同样存在以粘土矿化转化过程中所释放的 Fe^{3+} 作为唯一的氧化剂,未考虑干酪根热降解所释放的有机酸(多为二元酸)和泥岩以外其他地层(如泥质粉砂岩)中的有机酸。而导致低估有机酸产值的因素。因此,总体上来看有机酸产值的估算还是偏于保守的。

4.2 铝硅酸盐溶蚀量的估算

计算过程中虽然考虑了两种长石与乙酸的反应,但实际上铝硅酸盐组分还包括其它种类的长石和部分粘土矿物,有机酸的种类也较为复杂,同样存在使溶解量估算过低或过高的因素。前者如相同数量的甲酸能溶解的长石数量要低得多,且反应进行较困难;后者如当溶液中二元酸或酚类占较大比例时,铝硅酸盐组分的溶解程度将大大提高,所以总的来看,乙酸和两种长石的反应可基本满足粗略估算的要求。

4.3 净增次生孔隙度的估算

铝硅酸盐组分的溶解,能否增加储层的孔隙度,主要取决于所生成的产物能否发生区域规模或储层规模的质量传递。铝硅酸盐组分被溶解后,如果体系边界条件发生变化(主要是pH值从中酸性向碱性变化),则被有机酸络合的铝将发生去稳定作用,而以高岭石的形式沉淀下来。这时虽因长石溶解而有次生孔隙形成,但所沉淀的高岭石占据原生孔隙空间,基本上是一种孔隙类型的转化而净增的孔隙度十分有限(约占所溶解长石体积的12.5%~12.6%)。但在另一种情况下,如果在一定的地质时期中,所划定规模范围的储层体系内,水溶液的pH值、温度等保持稳定,同时范围内有较理想的输导通道,使之成为一个能有效清除生成物的开放体系,这时就有可能发生有效的质量传递,使体系内储层的孔隙度因次生孔隙的形成而得到净增加。

塔北三叠、侏罗系储层具有地温低,地层水至今仍保持为中-弱酸性的特点,这对保持溶解作用后的欠饱和水溶液的稳定性是十分有利的。同时,该区由于不整合面以及所发育的“Y”字型断垒,以及其它性质的断裂构成了良好的输导体系,使流体具有较高的流通能力及对溶解产生的副产矿物的机械分散能力。所以具备了形成大规模质量传递的条件。如在轮南断垒、桑塔木断垒、吉拉克断裂带周围,储层物性明显优于其它地段。铸体薄片表明,虽局部可观察到长石溶解后就地沉淀的自生高岭石及自生石英,但大多数次生孔隙或混合粒间孔附近均无此类沉淀物。

以上讨论表明,虽然上述对净增次生孔隙规模的估算,还存在许多需要深入探讨的方面,但在整体上符合区内的实际情况,反映了次生孔隙在改善储层条件,使之成为深埋优质储层的重要作用。

5 结论

(1) 塔北地区三叠、侏罗系储层中发育粒间孔隙、粒内孔隙、填隙物中微孔隙和缝隙等四大类,以前二者为主。粒间孔隙的混合粒间孔占总面孔隙率的比例最高,约为43%~51%,残余原生粒间孔次之,约11%~20%,次生粒间孔和粒内孔隙再次之,分别约为6%~15%和7%~13%。

(2) 次生孔隙主要是铝硅酸盐组分(长石,含铝硅酸盐组分的岩屑及填隙的粘土矿物)和部分石英颗粒受有机酸阴离子的络合迁移作用而形成,碳酸盐等早期胶结物的溶解不占主导地位。

(3) 通过有机酸(以乙酸为代表)产值和铝硅酸盐溶蚀量的估算,可形成约9.6%的净增孔隙度,即增加的次生孔隙约占总孔隙的51.9%±。

(4) 埋深4200~4600 m为一高孔隙发育带。

参 考 文 献

- 1 Surdam R C, *et al.* Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. *AAPG Bull.*, 1989, 73 (1): 1~23
- 2 Crossey L J, *et al.* Application of organic/inorganic diagenesis to porosity prediction. In: Gautier D, ed. Roles of organic matter in diagenesis. *SEPM. Spec. Publ.*, 1986, 38: 147~155
- 3 朱国华等. 塔北轮南构造带三叠、侏罗系储层孔隙类型和深埋优质储层的成因. 见: 袁亦楠等编. 中国油气储层研究论文集(续一). 北京: 石油工业出版社, 1993. 240~261
- 4 MacGowan D B, Surdam R C. Difunctional carboxylic acid anions in oilfield waters. *Organic Geochemistry*, 1988, 12 (3): 245~259
- 5 Meshri I D. On the reactivity of carbonic and organic acids and generation of secondary porosity. In: Gautier D, ed. Roles of organic matter in diagenesis. *SEPM. Spec. Publ.*, 1986, 38: 123~128

PORE TYPES AND ORIGIN OF SECONDARY PORES OF TRIASSIC AND JURASSIC IN NORTH TARIM

Wang Zhengyun Wang Fangping
Lin Xiaoyun Wu Dongsheng

(Jiangnan Petroleum Institute, Jingsha, Hubei)

Abstract

Intergranular pores, intragranular pores, micropores in interstitial material and crevices are developed in Triassic and Jurassic reservoirs in North Tarim region, and the secondary porosity of mixed intergranular pores, amounting to 43%~51% of total pore amount, is the main part of reservoir spaces. Organic acids released by kerogen and clay mineral transformation affected the aluminosilicate component and quartz anions in reservoirs. This is the principle cause for the formation of secondary porosity. The increased secondary porosity is up to about 51.9% of the total porosity. Besides, the reservoir property is also controlled by burial depth, unconformity and the passage formed of "Y"-type faults.