

四川盆地上三叠统砂岩成岩作用 及其对孔隙的控制

邓康龄

(西南石油地质局地质综合研究大队)

四川盆地上三叠统不仅是一个含煤层系,也是一个有良好前景的含油(气)组合,已在多处获得工业油、气井(藏)。储集岩主要是须家河组的须二段和须四段的砂岩,其次是须三段、须五段和小塘子组的砂岩。近6000块砂岩物性分析,平均孔隙度6.8%,渗透率0.7毫达西,通常小于1毫达西。对某气田70余块砂岩所做的压汞分析,平均孔喉直径0.566微米。显然,它们主要属于细-微毛细管孔隙类型。何以形成如此低的孔、渗性呢?与其沉积环境和成岩作用有关。

一、成岩作用

关于成岩作用的术语、涵义,不同学者说法不一,文中采用欧美学者惯用的“早期成岩作用(early diagenesis)”,“晚期成岩作用(late diagenesis)”和表生成岩作用(epidiagenesis)。

(一) 机械压实作用

机械压实作用在须家河组砂岩中是突出的,特别是富含岩屑的砂岩。据6631件薄片资料统计,岩屑含量平均值24%,含量特别高者在须四段,个别井中的岩屑含量高达90%以上。岩屑中主要为碳酸盐岩,其次是砂岩、泥岩、燧石和变质岩。岩屑抗压强度较差,受力后极易变形或破碎,在地史时期深埋3000米以下,以及受到后来的构造运动,导致了部分塑形颗粒的变形,充填粒间孔隙,减少孔隙体积;强大的压力使较脆的颗粒(如石英、长石)破裂,也充填粒间孔隙,同时也产生一些更小的裂隙,这些小的裂隙与原粒间孔隙相比表面积增加,将会影响渗透性能;强大的压力使颗粒之间产生压溶,由点接触变为线接触与缝合接触(图版I-1,2)。上述机械压实作用使原生粒间孔隙减小,特别是富含岩屑砂岩的颗粒呈紧密镶嵌接触,原生粒间孔隙消失。在晚期成岩作用中,地下水不能在其中运移,因此次生溶蚀孔隙极不发育。盆地西部须四段中部,富含岩屑的砂岩平均孔隙度小于2%主要是此原因。

(二) 胶结作用及矿物的转化作用

导致四川盆地上三叠统砂岩孔隙度降低的主要作用,是粒间孔隙的化学沉淀和新生粘土矿物的充填。粘土中以自生水云母为主,包括少量自生高岭石和绿泥石;碳酸盐中以方解石和含铁方解石为主,包括少量铁白云石、菱铁矿和菱镁矿等(表1)。

表1 四川盆地上三叠统砂岩中胶结物、填隙物平均含量

地名 或井号	地层 层位	砂岩组 分 率			新生粘土类			碳酸盐类			填 隙 率	备 注
		石 英	长 石	岩 屑	水 云 母	高 岭 石	绿 泥 石	方 解 石	白 云 石	菱 铁 矿		
Y1	须四段	34.5	0.1	65.4	0.5	0.1		10.3	2.4	0.1		含有机质 0.1%
	须三段	74.1	2.4	23.5	5.3	0.3		3.1	3.2		0.1	含有机质 0.1%
	须二段	73.8	0.5	16.7	10.4			2.9	0.6		0.4	含有机质 0.3%
C38	须四段	38.1	0	63.9		1.6		8.5			0.04	
	须三段	70.9	5.5	23.6		1.7		4.1	0.1	0.4	0.06	普遍有少量有机质
	须二段	75.9	6.2	17.9		5.9		4.6				(同上)
	小塘子组	70.3	8.7	21		5.9		10.7			0.23	
Ca1	须四段	54.5	2.1	43.4		1.3		12		0.8	0.1	
	须三段	69.4	2.8	28.0				18		0.2	0.02	
C35	须四段	30.7	0	69.3		7.1		6.5				岩心薄片
Z20	须二段	61.4	9.2	29.4		1.4		1.9				(同上)
J13	须四段	62.8	12.3	24.9		16.3		1.76	1.22			
	须二段	82.6	7.6	9.9		12.7		3.98	3.72			
	小塘子组	86.4	3.4	10.2		14.9		2.95	0.72		0.5	
旺苍县	须四段	55.8	1.2	43		11.5		3.4			0.6	
	须三段	76.4	0.3	24.3		12.7		2.7			0.8	
卢家坝	须二段	61.3	5.4	33.3		6.7		3				
	小塘子组	64	6	30		4		8			1	
广元县	须四段	67.0	2.5	30.5		7		6.3				
	须三段	78.6	3.3	20.3		4		2.7	6.6	0.3		氧化铁 1.57%
须家河	须二段	50.9	4.5	44.6		1.7		11.9				氧化铁 0.1%
	须家河组上部	72.5	4.3	23.2		10.9		0.2				

1. 碳酸盐的胶结作用

据碳酸盐胶结物与颗粒之间的组构关系,砂岩中的碳酸盐大致形成在两个时期。

四川盆地中部须家河组二段或四段的细粒岩屑石英砂岩、细粒长石岩屑石英砂岩和细粒长石石英砂岩中,局部夹层含钙质砂岩中铁方解石或方解石富集于粒间孔隙中(含量高达20—30%,平均25%),碎屑颗粒呈点接触或呈悬浮状,这种碳酸盐胶结物经成岩后期的重结晶作用,形成变嵌晶结构(图版I-3)。此种夹层单层厚度0.17—2.1米,据一个剖面近170米砂岩的统计,约占砂岩总厚度的4%。在电测曲线上,其视电阻率比邻层高得多,呈狭窄的尖峰形。由于碳酸盐胶结物发育,孔隙度极低(0.97—2.7%),大大低于邻层(大于5%)。机械压实强度也比邻层差,反映在砂岩的填集密度较低。

前者78%,后者90%,填集接近率较低,前者40%,后者54%。再联系到上述含钙质砂岩,常位于一个河床砂体的中上部,据此推测:在一次大的洪泛沉积之后,河床砂(边滩或心滩)出露水面,含有 CO_2 的雨水淋溶溶蚀表层沉积物中的碳酸盐,并渗入河床砂中成为潜水,或含碳酸盐的地下水上升进入河床砂中。这种含有碳酸盐的潜水,在旱季里沿毛细管孔隙上升蒸发,于是碳酸盐被富集浓缩沉淀在河床砂中上部,使松散的砂粒产生了固结。潮湿与干旱气候周期性的交替,使这一部分砂岩先于邻层砂质沉积物进行成岩,所以在后来的埋藏过程中,机械压实差。类似的例子如四川第四纪的江北砾岩。刘宝瑞(1980)等称此阶段的成岩作用为表生成岩作用(epidiagenesis)^[1]。

安县须四段中富岩屑砂岩和岩屑砂岩,是中晚期碳酸盐胶结作用的例子。石英常被溶蚀呈港湾状或石英被方解石交代,石英与碳酸盐岩岩屑间,碳酸盐岩岩屑与砂、泥岩岩屑间,以及碳酸盐岩岩屑之间普遍为线接触、凹凸接触(图版I-2),反映碳酸盐沉淀之前有较强的机械压实(有部分压溶)。在碳酸盐沉淀之后,有的又经过了重结晶,碳酸盐呈嵌晶状。据此可作如下设想:当富岩屑砂岩或岩屑砂岩在埋深过程中(如1000米以下),碳酸盐岩岩屑产生了压溶,地下水增加了碳酸盐含量,成为后来碳酸盐胶结物一个方面的来源;有机质在成岩过程中产生了许多二氧化碳,它溶蚀碳酸盐岩岩屑,也成为碳酸盐胶结物的来源之一。碳酸盐的沉淀受pH值和温度的控制,随着埋藏深度的增大、温度的上升,粒间孔隙水将逸出 CO_2 ,于是提高了离子的活度积 $[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]$,当其大于它们热力学溶度积而沉淀。因此,这种类型的碳酸盐胶结物较表生成岩作用晚得多,它们在岩屑砂岩或富岩屑砂岩中含量也较高(6—20%)。

成岩后期的碳酸盐胶结物也广泛分布于岩屑石英砂岩、长石石英砂岩、长石岩屑石英砂岩和石英砂岩,但一般含量不高(2%左右)。在产状上常见两种类型:呈斑点、斑块状分布于粒间孔隙之中(图版I-1);或交代长石、高岭石、伊利石和石英,有的呈自形晶体。

2. 硅质胶结物

须家河组中砂岩的硅质胶结物含量较低,通常小于1%(表1),局部较富集,但也很少超过10%。硅质胶结物主要以石英加大形式出现。在成岩过程中析出的 SiO_2 以碎屑石英为晶核,同轴生长光性延续。石英加大部分与碎屑石英之间,常有断续分布的粘土薄膜(多为伊利石膜)(图版I-1),表明石英加大晚于伊利石膜。在自生伊利石膜发育的地方未见石英增生,显然,粘土膜阻止了石英的加大。M. T. Heald (1977)研究了粘土膜与石英加大关系,也得出了同样的结论^[2]。张河清等(1980)研究了川中须家河组砂岩后指出:杂基含量愈多,石英加大愈少,二者呈负相关的关系。须家河组砂岩中,岩屑含量较高(平均值24%),自生粘土发育,硅质胶结物较少,可能是此原因。

在石英砂岩、长石石英砂岩或岩屑石英砂岩中,石英颗粒之间常呈线状接触、凹凸接触(图版I-4),通过阴极发光研究,“现在一般认为它是石英加大干扰的结果”^[3]。硅质胶结物最发育的层位是小槽子组的石英砂岩,由于石英加大充填粒间孔隙,颗粒多呈线状接触,自生粘土不发育,孔隙度极低。

在电镜扫描研究中,发现有些砂岩有1微米大小的微晶石英,散在伊利石晶体或颗粒的边棱上(图版I-2)。其形成可能经玉髓或无序方石英阶段,在晚期成岩作用中才

结晶成微晶石英^[3]。

石英的沉淀，是不饱和的孔隙水在砂岩中作长时期的循环，pH值小于9，温度不高的情况下缓慢形成的。在一些薄片上，见石英加大粒上发育有自生粘土，有的可见方解石交代的现象，因此硅质主要沉淀时期在成岩过程中是较早的。

3. 自生粘土

作为砂岩填隙物质的粘土矿物，广泛分布于岩屑石英砂岩、岩屑砂岩和长石石英砂岩之中，它们主要是自生的。自生粘土矿物显著的特点是具有纤细的、精致的结晶习性，这就排除了连续搬运的可能。高岭石呈假六方鳞片状，埃洛石针状、棒状，伊利石片状、丝缕状，绿泥石针叶片状等。

在上三叠统砂岩中新生粘土矿物分布广泛，尤以伊利石最广，其次是高岭石和绿泥石。

(1) 伊利石

扫描镜下的伊利石晶体多呈略弯曲的或弯曲的薄片，偶有丝缕状，片长大于5微米，表面光滑，附着在石英或其他颗粒的表面，形成一包壳层（图版I-4），晶体呈束状堆积，有的呈“卷心菜”状。

砂岩粒间孔隙存在大量自生伊利石，“是长时期和/或深埋作用的结果”“与K和Mg对粘土矿物的Na和Ca的长期交代作用有关”^[3]。据韦弗（1959）对几个盆地的研究，认为在3280米以下蒙脱石变成了蒙脱石-伊利石，随着深度进一步的加大，伊利石的比例增加。四川盆地上三叠统砂岩古埋深多在3000米以下，加之漫长的岁月（1.9亿年），早成岩期形成的高岭石或蒙脱石，除局部地方（多邻暴露区，且今埋藏相对较浅）外，可能正如上述作者所述，逐渐地转化成了伊利石。

一部分伊利石在酸性水的作用下，边缘卷曲，随着阳离子的带出，伊利石边缘发生破裂和溶蚀，最后在伊利石边缘生成一个向外延伸的管状埃洛石。

(2) 高岭石

高岭石的分布虽不及伊利石广泛，但在乐山和彭县等地的须家河组砂岩中也常有之。其产状和成因分为两种类型：一类充填粒间孔隙，它是孔隙水溶液中沉淀的产物；另一种是碎屑颗粒的长石，在地下水缓慢的运动中遭到淋滤蚀变，长石的一部分或完全变为高岭石（图版I-5）。这两种类型的高岭石在电镜中呈鳞片状假六边形的晶体，集合体呈手风琴状或蠕虫状，单体高岭石片约5微米左右（图版I-3）。

(3) 绿泥石

自生绿泥石分布很少，单晶呈六方形小片，集合体为鳞片状，具晶间孔隙（图版I-6），“是常时期和/或深埋的结果”^[3]。

二、次生孔隙

四川盆地上三叠统中的砂岩孔隙度通常在10%以下，孔隙主要是成岩后期的溶蚀孔、自生粘土矿物的晶间孔和长石蚀变后产生的次生孔隙。例外的是在中坝某些井的一些砂岩中，残留了少量原生粒间孔隙，最大孔隙度可达16%。其存在原因与该构造形成

较早(印支晚期),生成的油气较早运移进入了该构造,占据了孔隙空间,抑制了后来地下水的的作用有关。

(一) 溶蚀孔

1. 碳酸盐矿物的溶蚀孔隙

在富岩屑砂岩或岩屑砂岩中,颗粒富含碳酸盐岩岩屑,原生粒间孔隙已被碳酸盐胶结物充填,孔隙度极低(平均在2%左右)。从薄片观察,这类砂岩的孔隙主要是碳酸盐(颗粒的和胶结物的)次生溶蚀孔。它们是颗粒的粒内溶孔、粒间溶孔、颗粒与胶结物均被溶蚀的超大孔或溶蚀缝(图版I-6)。有的溶蚀缝被沥青充填,反映了溶蚀作用早于油气运移之前。

安县的须家河组第二段中岩屑石英砂岩和长石石英砂岩中,碳酸盐岩岩屑含量很少,碳酸盐胶结物常被溶蚀,次生孔隙较发育,孔隙度一般在6—10%,有的孔隙被沥青充填。

2. 硅酸盐矿物的溶蚀孔隙

在薄片和电镜扫描中,常见沿长石解理面或晶面缺陷部位被淋滤溶蚀,而呈蜂窝状或不规则形状的粒内溶孔,孔隙大小在0.5—3微米(图版II-5),有的溶孔被沥青充填(图版I-6)。石英在地下水的的作用下,也被溶蚀而呈许多小坑(图版II-4)。

地下水的溶蚀作用主要决定于其中所含的 CO_2 。有机物质在埋藏之后的生化阶段,以及深埋之后的生油期中脱羧基作用,均能产生大量的 CO_2 。这些 CO_2 溶于水中成为侵蚀性碳酸溶液,对砂岩中的某些碎屑颗粒和碳酸盐胶结物产生溶蚀,从而产生了溶蚀孔隙。但是,从现有资料看四川盆地中须家河组砂岩的溶蚀孔发育有限,除个别地区碳酸盐的溶蚀孔较发育外,常见的是长石溶蚀孔。这可能与四川盆地的上三叠统埋藏较深,成岩期长,地下水中的碳酸盐再次沉淀,堵塞了次生孔隙有关。薄片上常见到晚成岩期的碳酸盐,就是一证明。

(二) 自生粘土矿物的晶间孔隙

岩屑石英砂岩、长石石英砂岩中,分布最广的是作为填隙物的自生粘土矿物的晶间孔隙。须家河组砂岩中分布最广的是伊利石,据电镜观察,其晶间孔隙在0.5—5微米,通常在1微米左右。由于分布广泛,特别是在孔隙喉道上,对砂岩渗透率的影响是显而易见的。经铸体薄片观察,晶间孔充满了有机玻璃,表明是有渗透性能的,可以作为储集空间。压汞测出砂岩平均孔隙直径是:遂36井须二段0.94微米,须四段1.09微米^[4]。与上述目测粘土矿物晶间孔隙值相符合。因此,这些地区须家河组砂岩孔隙渗滤通道,主要应是自生伊利石的晶间孔隙。

须家河组砂岩中局部发育高岭石和绿泥石,在电镜扫描和铸体薄片中间样证实了它们也有晶间孔隙,亦可作为油气储集和渗滤的通道。

长石蚀变成高岭石,高岭石晶体之间也有孔隙(图版I-5),铸体薄片可见有机玻璃注入,也是一种储集空间。

三、砂岩成分和沉积环境对孔隙的影响

四川盆地晚三叠世卡尼期(马敏塘期)海水从甘孜-阿坝入侵本区,由碳酸盐岩台

地发展到浅海陆棚;诺利早期(小塘子期)为一海湾;诺利晚期-瑞替期(须家河期)为滨海盆地^[5,6]。

物源来自盆地四周。由于各地母岩性质(沉积岩、火成岩和变质岩)、搬运距离的不同,以及沉积环境的差异,碎屑物在组分和组构上也有所不同。这些不同的碎屑物质,影响了砂岩的成岩作用和次生孔隙的形成,影响到砂岩的孔隙度和渗透率。

据G3井须家河组第四段(井深3716—3805米)77块薄片资料回归分析(由邓永富同志作),砂岩的碳酸盐胶结物含量与连通孔隙度值呈负相关关系,相关系数-0.881,回归方程如下:

$$m = 7.9074 - 0.3245y$$

其中, m , 连通孔隙度值, y : 碳酸盐胶结物含量。砂岩的碳酸盐胶结物含量与碳酸盐岩屑含量呈正相关关系, 相关系数 0.842, 回归方程如下:

$$y = 0.1463x + 2.3904$$

其中, x : 砂岩中碳酸盐岩屑含量, 由此计算出孔隙度与碳酸盐岩屑含量呈负相关关系, 相关系数-0.847, 回归方程如下:

$$m = 7.231 - 0.054x$$

砂岩中碳酸盐岩屑含量受制于当时的沉积环境。在须家河中后期, 阿坝地槽产生了强烈的挤压, 龙门山一带受到了波及, 也强烈上升成为一紧邻四川盆地的新的物源区, 这里出露了大片碳酸盐岩, 在河流的侵蚀切割之下, 碳酸盐岩陆屑物质被很快地搬运入沉积盆地, 堆积成冲积扇体(须四段中夹碳酸盐岩砾石为主的砾岩多层, 沿龙门山前缘一带分布), 这些冲积扇中的砂岩矿物成熟度低(有的石英/长石+岩屑比值小于0.5), 甚至出现富岩屑砂岩。它们在成岩过程中, 抗压强度差, 颗粒间常被压溶, 碳酸盐胶结物发育, 孔隙度极差(图版1-2)。在某些钻井中有时虽也发生井喷, 主要与裂缝发育有关, 钻井中放空或岩屑中出现晶形很好的方解石或石英是一证明。

有效孔隙度大于5%的多为岩屑石英砂岩、长石石英砂岩, 主要分布在须家河组第二段和部分第四段中。它们的碳酸盐胶结物通常较少, 填隙物为自生粘土(主要为伊利石), 经研究这些砂岩大多数是河流相砂岩, 少部分是三角洲相砂岩和滨湖相砂岩^[5,7,8]。这些砂岩的物源区较远, 搬运距离较长, 在其搬运过程中碳酸盐岩等岩屑不稳定矿物大量消失, 矿物成熟度较高(多大于2)。这两种砂岩抗机械压实作用较岩屑砂岩、富岩屑砂岩好, 有长石被溶蚀产生的溶蚀孔和自生粘土矿物的晶间孔, 所以砂岩的孔隙度相对较高, 构成了本统砂岩中的主要储集油气空间。

小塘子组中的滨海相石英砂岩发育, 石英含量高(多在90%以上), 反映了碎屑物质在波浪、潮汐流等反复作用下, 遭强烈的磨蚀, 不稳定矿物(长石等)消失, 残留的岩屑主要为砾石。这种石英砂岩抗机械压实作用强, 理应保留较多的原生粒间孔隙, 但在成岩作用中, 石英次生加大和硅质胶结物发育, 又因无可溶性矿物, 也不发育自生粘土, 所以也无次生孔隙, 孔隙度也很差(仅为2%左右)。

由此可见, 四川盆地上三叠统中砂岩的储集性能受制于砂岩的成分, 而砂岩的成分又与沉积环境有关。

本文所用薄片资料由我大队实验室所作,部分来自四川石油管理局,在此一并致谢。

(收稿日期 1983年11月29日)

参 考 文 献

- [1] 刘宝璋主编, 1980, 沉积岩石学, 地质出版社。
- [2] Heald M. T., 1982, Diagenetic changes in sandstone reservoirs, *Oil & Gas Journal*, Vol. 80, No. 18.
- [3] F. J. 佩雷兹等著, 1972, 砂和砂岩, 李汉谔译, 1977, 科学出版社。
- [4] 陈立平, 邹绍春等, 1981, 川中泥盆系上三叠统香二、香国组砂岩的初步研究, 天然气工业, 第4期。
- [5] 邓康龄, 1983, 四川盆地西部上三叠统岩相及其与油气关系的探讨, 石油地质文集——沉积相, 地质出版社。
- [6] 王庭斌, 安凤山, 冯世煥等, 1983, 岩相是川中须家河组油气的主要控制因素, 石油地质文集——沉积相, 地质出版社。
- [7] 冯世煥, 1983, 四川江油中须—须家河地区晚三叠世马夹湾组—须二组时沉积相分析, 石油地质文集——沉积相, 地质出版社。
- [8] 罗自后, 1983, 永进河床充填砂体在古代沉积中的发现, 沉积学报, 第1卷, 第3期。

DIAGENESIS OF UPPER TRIASSIC SANDSTONES IN SICHUAN BASIN AND THEIR CONTROL OVER RESERVOIR POROSITY

Deng Kangling

(Comprehensive Research Brigade of Geology, Xinan Bureau of Petroleum Geology)

Abstract

The Upper Triassic reservoirs in Sichuan Basin are composed of sandstones. The porosity and permeability of them are very poor, i.e. 2-10% (averaging 6.8%) < 1md, pore-throat radius is less than 1 μ m. The voids, observed in rock slice, casting slice and SEM, are mainly secondary solution pores and the intercrystal pores of authigenic clays. The development of these secondary pores are related to the diagenesis which is controlled by the component, fabric and sedimentary environment of the sandstones.

With poor compressive resistance, strong mechanical compaction, the lithic sandstone and graywacke are considered to be sediments of alluvial fan. The porosity here is less than 2%.

Littoral quartzose sandstone is cemented by silica with well-developed quartz overgrowth. The secondary porosity is not developed so well for lack of soluble minerals, and the average porosity is only 2%.

The original intergranular pores of the feldspathic and lithic quartzose sandstones are vanished owing to mechanical compaction, secondary changes of

debris and the infilling of authigenic clay mineral during diagenesis, but the intercrystal pores of authigenic illite and kaolinite, and dissolution pores in the feldspars and calcites are well developed. These pores become the main reservoir pore spaces of the sandstones in the Xujiahe Formation. Being deposited as deltaic or fluvial sediments of meandering stream, the porosity and permeability of these sandstones are rather low.

全国油气资源评价构造研究成果交流会简讯

由石油工业部科技司组织的全国油气资源评价构造研究成果交流会,于5月21日至28日在任丘油田召开。石油部系统二十一个单位和武汉地质学院、西北大学等院校代表58人出席了会议。石油部科技司和勘探开发科学研究院有关领导主持了会议。

会议收到成果报告29篇,会上宣读了21篇。

随着石油勘探开发工作的进一步加强和发展,石油构造学研究水平无论从广度或深度上均有很大的提高。这些报告反映了全国石油系统近几年来构造研究的水平。报告题材广泛,从大地构造区域划分和地史演化的角度,对国内含油气盆地的类型、构造特征、构造演化史、形成机制等进行了深入的分析和探讨,并从构造评价入手,对含油气盆地的油气资源进行评价和预测,从而进一步认识了全国含油气区的构造特征及其差异性,这对全国石油勘探有一定的指导作用。

会上,对石油工业部组织编写的7篇全国含油气区构造研究报告进行了重点评议。在评议中,与会代表敞开心扉,畅所欲言,提出了不少宝贵的意见和建议,并交流了研究经验。

会议根据目前各油田构造研究的现状,特别是在油气资源勘探中加强构造研究的紧迫性,探讨了更有成效的研究方式和方法。同时,与会代表对如何把构造研究成果应用于油田开发方面,使之发挥更大的作用,引起了高度重视。

会议代表一致认为,在现有的基础上,应集中力量,加强各单位的联系和协作,互通信息,进一步提高研究水平,更好地为石油工业的高速度发展服务。

(卢学祺 黄希陶)