

碎屑岩储集层孔隙的形成、演化和预测

朱国华

(浙江省石油地质研究所)

提要 本文以八十年代以来国内外在成岩作用研究方面的新进展为指导,结合我国一些重要油气区的实例,论述了碎屑岩储集层孔隙的形成、演化和预测。着重指出:在一定地质背景下,有以残余粒间孔为主的深埋优质储层存在;陆相碎屑岩储层中铝硅酸盐组分的溶蚀往往比碳酸盐胶结物的溶蚀更强烈。

关键词 孔隙演化 深埋优质储层 硅酸盐矿物 碳酸盐矿物

作者简介 朱国华 男 60岁 高级工程师 沉积学

七十年代以来,确认了碎屑岩中确有大量次生孔隙,从而改变了碎屑岩储集层的孔隙基本上都是原生的传统观点。国内外已发现了不少以次生孔隙为主的深埋优质储层;近期,笔者又在塔里木盆地发现了以残余原生粒间孔为主的深埋优质储层,其埋深达5000—6000m。这些发现不仅改变了碎屑岩储集层孔隙死亡线的深度下限和深埋优质储层一定以次生孔隙为主的观点,并极大地拓宽了油气勘探领域。

不同成因深埋优质储层的不断发现启示我们:碎屑岩储集层的孔隙度不仅是埋深和次生孔隙发育程度的函数,而且是包括受物源和沉积环境控制的沉积物成分和结构、受构造运动控制的沉积物埋藏史、水动力条件、孔隙流体性质及其演化阶段、地温场、与储集岩相关的沉积体内有机质和粘土矿物的成岩演化等一系列相互关系因素共同影响的综合产物。本文介绍这一领域的研究进展。

一、次生孔隙(指溶解孔隙)的形成机理

次生孔隙形成机制的研究在八十年代有很大进展。其主要进展如下:

(一) 碎屑岩中各类组分的溶解机制不断完善

碎屑岩中可溶组分十分广泛,不仅碳酸盐组分可溶,硅酸盐、硫酸盐和石英等都可溶解。我国有很多碎屑岩储集层,特别是辽河盆地第三系储层、塔里木盆地塔北地区中生界和上古生界储层、鄂尔多斯盆地三叠系储层(朱国华,1988)等,其硅酸盐组分的溶蚀要比碳酸盐组分的溶蚀强烈得多(图版1,1、2、3)。

众所周知,酸溶性组分的溶解构成了碎屑岩储集层中最主要的次生孔隙,导致酸溶性组分溶解的观点主要有两种:一是含碳酸的水溶液引起的溶解;另一是有机酸,主要是短链羧酸——脂肪酸引起的溶解。

1. 碳酸的形成及其对组分的溶解

碳酸的形成可分有机说和无机说二种,有机成因者认为,泥质岩中有机质在成岩过程中产生的 CO_2 溶于水中形成碳酸,含碳酸的水溶液随泥岩压实排水进入碎屑岩中,导致碎屑岩中酸溶

性组分的溶解而产生次生孔隙, 具体过程如下 (Meshri I.D., 1986):

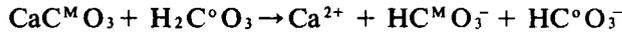
第一步, 当富含有机质的泥质岩下埋至一定深度, 发生有机成岩作用产生 CO_2 。



(C^{O} 代表同位素较轻的有机碳)

第二步, 生成的 $\text{C}^{\text{O}}\text{O}_2$ 溶于水形成碳酸, 碳酸离解产生 H^+ 、 $\text{HC}^{\text{O}}\text{O}_3^-$ 和 CO_3^{2-} 。

第三步, 由此产生的 H^+ , 随泥岩压实排水进入碎屑岩, 溶解其中的酸溶性组分而产生次生孔隙。

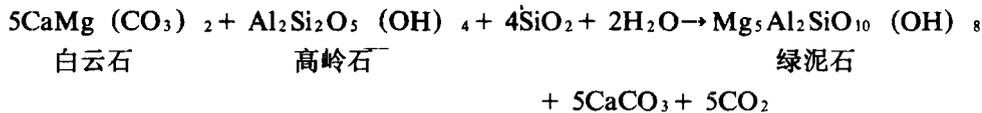


(C^{M} 代表同位素较重的碳, 如海相灰岩中的碳)

第四步, 形成的 $\text{C}^{\text{O}}\text{O}_3^-$ 和 $\text{C}^{\text{M}}\text{O}_3^-$, 与水中的 Ca^{2+} 结合形成碳酸盐, 在砂体一定部位形成碳酸盐胶结致密带。

这样, 生成的碳酸盐比砂岩中原生碳酸盐的碳同位素要轻。

Hutcheon (1980) 提出 CO_2 的无机成因说, 认为 CO_2 可由粘土矿物与碳酸盐反应产生:



如果砂岩中含 10% 按上式比例组成的高岭石、白云石和石英, 则在 25°C 、一个大气压下, 1 立方米砂岩可产生 2500 立升 CO_2 , 生成的 CO_2 溶于水中可溶解碎屑岩中的酸溶性组分。

2. 有机酸的形成及其对组分的溶解

Surdam (1982, 1984, 1986, 1989) 指出: 有机酸对砂岩次生孔隙的产生起了主要作用, 这是因为与碳酸相比, 有机酸对碳酸盐, 特别是对硅酸盐有更强的溶解能力。

酸的化学活动性可从两个方面来衡量, 一是酸奉献 H^+ 的能力, 二是与其反应生成的盐类在水中的溶解度。

有机酸奉献 H^+ 的能力是碳酸的 6-350 倍 (表 1)。

表 1 有机酸与碳酸分离效率的对比

Table 1 Comparison of separating efficiency between organic acids and carbonic acid

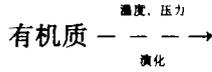
酸	pH	(H^+)	效 率
碳 酸	>3.2	6.3×10^{-4}	
丙 酸	2.44	3.6×10^{-3}	6 ×
乙 酸	2.38	4.2×10^{-3}	7 ×
甲 酸	1.88	1.3×10^{-2}	20 ×
草 酸	0.65	2.2×10^{-1}	350 ×

(据 Meshri I.D., 1986)

有机酸钙盐的溶解度约比碳酸钙大三个数量级 (图 1)。

(1) 有机酸的形成及其对碳酸盐的溶解过程

第一步，泥质岩中有机质下埋至一定深度时生成有机酸，有机酸离解产生 H^+ 。



第二步，富含 H^+ 的水随泥岩压实排水进入砂体，与砂体中碳酸盐组分反应产生次生孔隙。

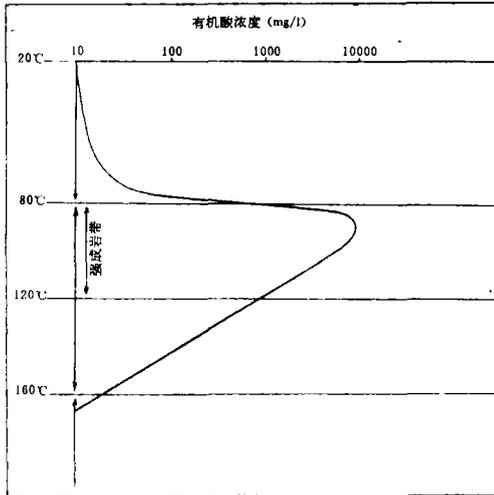


图1 钙盐溶解度的对比
(据 I.D.Meshri, 1986)

Fig. 1 Comparison of dissolution degree among calcaresous salts

第三步，随地层水上移到砂体上部的 $CaCO_3$ 与水中的 Ca^{2+} 结合形成 $CaCO_3$ 沉淀，而 Ca 的有机酸盐因溶解度高而仍溶于水中。

由此产生的碳酸盐胶结物，含有与原始沉积碳酸盐相似的 $\delta^{13}C$ 值（碳同位素较重），而地层水中仍有有机酸阴离子存在。

因而可通过碎屑岩中所含碳酸盐胶结物的 $\delta^{13}C$ 值和地层水中有无有机酸阴离子的存在，来判别次生孔隙的形成机制。

辽河盆地兴隆台油田兴隆台油层砂体的顶、底部常见钙质胶结致密层，其成因显然与泥质岩中有机质的热演化过程中形成的酸有密切关系，这些钙质致密层中碳酸盐的 $\delta^{13}C$ 值介于 -2‰ — 2‰ 之间，比较重，与沉积的原生碳酸盐的 $\delta^{13}C$ 值相似，说明其成因与泥质岩演化过程中产生

的有机酸进入砂体有关；塔里木盆地塔北轮南地区三叠系砂岩储层中星散状和团块状分布的碳酸盐，其 $\delta^{13}C$ 值为 -10‰ — 25‰ ，属于轻同位素，显然其成因与互层泥岩中有机质热演化过程中脱羧作用形成的碳酸有关。

表2 醋酸溶解试验结果 (100°C 2周)

Table 2 Result of dissolving experiment of acetic acid

长石类型	溶液最初浓度 Ac (ppm)	Al ppm	SiO ₂ ppm	最终浓度 Ac (ppm)	最终 pH 值
中长石	10.000	24	221	9640	3.40
钠长石	10.000	14	198	—	3.20
拉长石	10.000	72	195	9409	3.35
微斜长石	10.000	21	152	—	3.15
空白	10.000	<2	<1	9590	2.90

(据 Surdam, R.C.等,1984)

(2) 有机酸对硅酸盐的溶解

笔者在研究鄂尔多斯盆地三叠系、辽河盆地第三系、塔里木盆地中、古生界和浙江安徽一带二叠系碎屑储集岩过程中,发现选择性溶解硅酸盐而不溶解碳酸盐的现象极为普遍(图版 I, 1、2、3)。这与有机酸的性质有密切关系。

成岩体系中有有机-无机反应的研究成果,对碎屑岩中选择性溶解硅酸盐的现象作了较好的阐明。Surdam (1984) 的实验中表明(表 2、3),与油田水羧酸浓度相当的范围内,单官能团的醋酸溶液能使铝的溶解度增加一个数量级,而双官能团的草酸溶液能使铝的溶解度增加三个数量级。

表 3 草酸溶解实验结果 (100℃ 2周)

Table 3 Result of dissolving experiment of exalic acid

长石类型	溶液最初浓度 Ox ²⁻ (ppm)	Al ppm	SiO ₂ ppm	最终浓度	最终 pH 值
中长石	10.000	1300	413	7600	2.5
钠长石	10.000	790	506	7140	1.7
拉长石	10.000	1400	374	7900	2.7
微斜长石	10.000	150	540	4890	1.75
空白	10.000	<1	<1	8200	1.50

(据 Surdam, R.C.等,1984)

比较有机酸和碳酸溶解长石和碳酸盐反应的吉布斯自由能值(表 4)也证明,有机酸比碳酸具有更佳的热动力驱动性,即有机酸的溶解能力更强。另外,与碳酸盐相比,硅酸盐与有机酸反应的热驱动性更佳,更易溶解转化。

表 4 碳酸、甲酸和乙酸自由能对比

Table 4 Free energy of carbonic acid, formic acid and acetic acid

溶解、转化	转化(溶)剂	ΔGr° Kcal/mol
微斜长石→伊利石	H ₂ CO ₃	+102.6
	HCOOH	+95.6
	CH ₃ COOH	+23.6
微斜长石→高岭石	H ₂ CO ₃	+23.0
	HCOOH	+15.8
	CH ₃ COOH	-4.28
钙长石→高岭石	H ₂ CO ₃	+15.0
	HCOOH	+16.5
	CH ₃ COOH	-36.9
方解石溶解	H ₂ CO ₃	+28.37
	CH ₃ COOH	+11.20

(3) 有机酸与强化学成岩作用带

研究表明, 沉积物中有机质在演化过程中不断产生有机酸, 但在温度低于 80℃ 的油田水中含量很低, 这是由于细菌降解的结果。当温度高于 80℃ 时, 有机酸在油田水中的含量呈指数增加, 因细菌活动在高于 80℃ 时急剧减少所致。当温度高于 120℃ 时, 有机酸因脱羧而降低。所以, 当储层温度经历 80—120℃ 的区间时, 有机酸对储层的反应最强烈, 也就是储层中化学成岩作用最强烈的时期 (图 2), 是一系列矿物强烈溶解和自生矿物析出的主要时期。

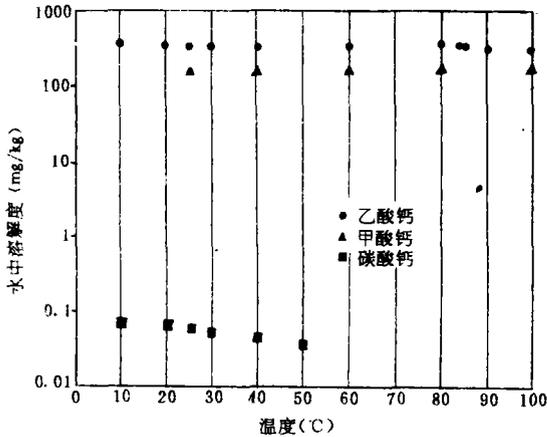


图 2 储层中化学成岩作用最强烈时期的反应途径

Fig. 2 Process of chemical reaction during the most intense chemical diagenesis stage in reservoir

与沉积埋藏史有关的储层经历强成岩作用带的时间长短, 与储层次生孔隙发育和孔隙保存的关系极大。塔里木塔北地区三叠系和下石炭统砂岩储层埋深已达 5000m 和 6000m, 但岩性疏松, 孔、渗良好, 除了其他一些因素外, 与其埋藏史决定的经历强成岩作用带的时间短有极大关系。由于深埋发生在上新世短暂的几百万年区间内, 储层经历 80—120℃ 强成岩作用带的时间仅 3—4 个百万年, 所以很多原生孔隙和新生的次生孔隙得以保存下来, 形成了罕见的以原生孔隙为主的深埋优质储层 (图版 I, 4)。反之, 浙皖地区二叠系龙潭组砂岩虽然其经历的最大埋深仅 2600m, 由于地温场较高, 在其埋藏史中经历 80—120℃ 的时间长达 100Ma 以上, 因而成岩作用十分强烈, 粒间孔几乎全被再生石英胶结物破坏 (图版 I, 5、6), 孔隙度仅 5—8%, 渗透率多小于 $1 \times 10^{-4} \mu\text{m}^2$, 成为极低渗储层。因而研究储层埋藏史及其所经历强成岩作用带时间

的长短, 对评价和预测储层性质优劣具有十分重要的意义。

图 3 是成岩体系中 CO_2 、有机酸、碳酸盐、铝硅酸盐相互作用的流程。根据流体化学性质和矿物组分, 其反应可出现五种情况。选择性溶解铝硅酸盐的储层, 其反应是按左侧路线 I 进行的。

我国陆相储层中常见硅酸盐的溶解强于碳酸盐, 这可能与陆相沉积中的干酪根多属于 III、II 型有关, 因为比起 I 型干酪根来, III 和 II 型干酪根在成岩演化过程中向有机酸的转化率更高, 导致成岩路线容易沿路线 I 进行。

综上所述, 沉积物中有机质在埋藏成岩过程中能产生大量有机酸和 CO_2 。成岩过程中有机与无机相互作用能使碳酸盐或铝硅酸盐溶解并形成次生孔隙和一系列重新沉淀出来的自生矿物。孔隙的增生度还决定于有机质与无机质的比例、有机质类型、地层层序、埋藏史、流体流动速度和砂、泥岩体的几何形态。

(二) 从流体动力学观点研究溶解组分的转移

酸性水溶解碎屑岩中各种组分过程中有一个化学平衡问题, 如无酸性水源不断的交替, 则会很快达到饱和状态而停止溶解, 显然不可能形成有意义的次生孔隙。要形成有实际意义的次生

孔隙, 必须有水的大规模渗流交替。沉积物中流体运动一般有以下儿种形式:



图3 一般的含 CO₂、有机碳、碳酸盐和铝硅酸盐四组分的碎屑岩反应流程图 (据 Surdam)

Fig. 3 Reactive flow diagram of clastic rock containing CO₂, Organic carbon, carbonate and silicate (after Surdam)

1. 上升流

流体沿渗透性单元向上或向外侧运移, 墨西哥湾地区地形起伏小, 埋藏速度快, 那里的流体就是以此方式运移的。

由于压实作用和温度是随埋深增加而增强和增高的, 所以上升流也是我国很我盆地沉积物中普遍存在的流体运移方式。上升流的作用是把深部沉积物中所溶解的组分迁移至浅部, 并往往因温度、压力下降, 溶解度降低或地化条件的变化而在沉积物的一定部位重新沉淀出来, 或以新的自生矿物析出。这一作用过程往往导致较深部位形成次生孔隙发育带, 而在较浅部位形成致密带。在一定条件下, 这类致密带可成为油气藏的特殊圈闭条件——成岩圈闭。鄂尔多斯盆地陕北地区三叠系延长组成岩圈闭油藏的形成与这种上升流有密切关系 (朱国华, 1988)。

2. 下降流

大气水通过渗透性单元向下运移, 往往发生在地形起伏大的地区。如非常靠近大山脉的加拿大阿尔伯达盆地区, 那里有非常充足的水动力势能, 大气水沿渗透性单元向下运移可达地面以下3000m深处。此种流体运移方式往往在较浅部位形成次生孔隙发育带, 而在较深部位由于溶质的再沉淀而形成致密带。下降流也是渗流带流体运动的主要形式, 可形成大规模的淋滤次生孔隙带。广泛发育于不整合面或沉积间断部位附近的淋滤带就是由此种流体运动形成的。

3. 对流

许多盆地中超压带的形成往往是由于非渗透性岩层的分隔, 使多孔的渗透性岩层间失支了连通性, 因而缺少上升流和下降流型的流体运动。但这些渗透性砂体中仍有很多可证明与流体运动有关的成岩变化, 也同样有次生孔隙形成, 显然发生过流体运动。Wood 和 Surdam (1979) 提出的流体对流运动可导致物质迁移的观点可解释此类碎屑岩中的成岩变化。流体的对流运动也同样存在于非封闭性碎屑岩体中。一些研究工作者已倾向于用流体的这种对流运动解释碎屑岩中物质的溶解、沉淀和一系列成岩变化。

除了流体运动, 扩散作用也能导致物质迁移。在促使粒间压溶方面, 流体运动并不重要, 而

扩散作用是很重要的。笔者在研究浙皖边境地区二叠系龙潭组储层过程中,发现油气在砂体中聚集后成岩作用并未停止,扩散作用可能是孔隙水已停止交替的油层中使成岩作用继续进行的重要原因。

(三) 不整合和沉积间断对形成次生孔隙的重要作用

七十年代以来,以 Schmidt 为代表的一些学者和我国的一些研究人员都十分强调深部的溶解作用在形成储集岩次生孔隙过程中的重要作用。从近期的发展趋势看,很多学者又重新强调沉积体中不整合和沉积间断对形成次生孔隙的重要作用 (Schanmugan G, 1985; 郑浚茂等, 1987)。这是因为与深部相比,临近不整合面和沉积间断下面的储集岩,经历过强烈的淋滤作用。

二、碎屑储集岩孔隙的演化和预测

Scherer (1987) 研究了世界各地 428 个岩心,通过筛选认为:沉积物的年龄、最大埋深、碎屑石英(可包括其它刚性颗粒)含量和分选是决定地下储集岩孔隙度的主要因素。他提出的地下储层可保存孔隙度的计算式如下:

$$\text{孔隙度} = 18.60 + (4.73 \times \ln \text{石英}) + (17.37 / \text{分选}) - (3.8 \times \text{埋深}) - (4.65 \times \ln \text{年龄})$$

式中石英:碎屑石英百分比;埋深: km; 年龄: Ma; 分选: Trask 分选系数

在恢复储集岩埋藏史的条件下,可用上式恢复储集岩在各埋藏阶段的孔隙度。笔者用此法恢复了浙皖长广地区龙潭组 (P_{1-2}) 砂质储层的孔隙演化史和聚油期储层的孔隙度,获得了较好的效果。

此法不适用于含多量胶结物和经历过强烈溶解作用的碎屑储集岩,也不适用于特高和特低地温场地区的储层孔隙预测,因而有其局限性。

89 年美国 AAPG74 届年会上, Schmoher 的论文中提出的观点认为:热成熟度是影响储层孔隙保存的主要因素。他提出的储层可保存孔隙度的计算式为:

$$\text{孔隙度} = 7.5 \times R^0^{-1.18}, \quad \text{或} \quad \text{孔隙度} = 30 \times TTI^{-0.33}$$

笔者用此式测算了塔里木盆地塔北地区埋深近 5000m 的三叠系砂岩的可保存孔隙度,取得了满意的结果。塔北属特低地温场地区,说明此法适用于地温场明显偏低(或偏高)地区储层可保存孔隙度的预测。

三、储层孔隙度预测的发展趋势与展望

综上所述:综合各种有机-无机相互作用的成岩反应,结合盆地的构造-沉积-热演化模式,为预测储层孔隙度和恢复孔隙演化史开辟了很有前景的途径,也能初步建立碎屑岩孔隙演化的预测模型。能提供次生孔隙发育的空间位置及其形成阶段;能指出对孔隙保存的有利和不利地区;也有可能 在钻井前预测地下储层的性质优劣及其空间展布,并已有了初步的成功实例。

要指出的是,现阶段这种以有机-无机反应为基础的孔隙演化模式及储层性质预测还只是一种在向量化方向发展的探索,它提供了很多新的思路,不少理论和机理尚未成熟,特别是对地下相对封闭体系中储层中组分的溶解和迁移的规模问题并未定量的解决,因而对地下相对封闭体系中储层中形成不规模次生孔隙的可能性争议极大。对储层中次生孔隙的识别和定量也存在很多

困难, 对原生孔隙死亡线的争议也十分突出。

最近 Surdam 提出了不同温度区间 ($<80^{\circ}\text{C}$, $80-130^{\circ}\text{C}$, $>130^{\circ}\text{C}$) 砂岩中碳酸盐胶结物的成因, 分布和骨架颗粒稳定性的控制因素。认为在取得水文条件、水化学性质、羧酸 / CO_2 值、硫酸盐 / 有机质值等资料的基础上, 可进行储层孔隙分布预测。Meshri 也提出了在获得岩石成分、结构、砂岩成分、砂 / 岩比值、压力、温度和成岩矿物热力学数据的基础上, 可用化学模拟预测储层性质。

八十年代以来, 我国石油地质工作者在储层成岩作用和孔隙演化研究方面取得了很大进展, 有些已对油气勘探与开发起了重要作用。笔者认为现在急需总结研究不同地质背景下储层孔隙的形成、演化和保存条件的模式, 只停留在前述国外以试验室为主的预测模式上是远远不够的。可以预料, 90 年代我国的石油地质学家和地球化学家们应紧密合作, 把储层孔隙预测发展到一个崭新的阶段。

参 考 文 献

- (1) 朱国华, 1988, 沉积学报, 6卷, 4期, 1-11页。
- (2) 郑浚茂等, 1989, 碎屑储集岩的成岩作用研究, 中国地质大学出版社。
- (3) Meshri I.D., 1986, On the reactivity of carbonic and organic acids and generation of secondary porosity, in D.L.Gautier, ed., Roles of organic matter in sediment diagenesis. SEPM special publication 38, p.123-128.
- (4) Schmmugan G., 1985, Significance of secondary porosity AAPG V.69, No.3., p.379-380.
- (5) Scherer M., 1987, AAPG V.71, No.5., p.485-489.
- (6) Surdam R.C., L.J.Crossey, E.S.Hagen, and H.P.Heasler, 1989, AAPG V.73, N.1, p.1-23.

Origin and Evolution and Prediction of Porosity in Clastic Reservoir Rocks

Zhu Guohua

(Zhejiang Institute of Petroleum Geology, China)

Abstract

With the development of oil and gas exploration, a number of high quality clastic rock reservoirs at great depth have been discovered both domestically and abroad. Concerning the porosity, some of them have dominant secondary porosity and others are dominated by preserved primary porosity. Specially the discovery of the later ones changes one's idea of porosity deadline, which attracts petroleum geologists' great attention.

Combining new progress and new theory of diagenesis both domestically and abroad with some case history about diagenesis and porosity evolution in some major oil and gas area in our country, this paper describes the new progress of porosity origin, evolution and prediction of clastic reservoir rocks.

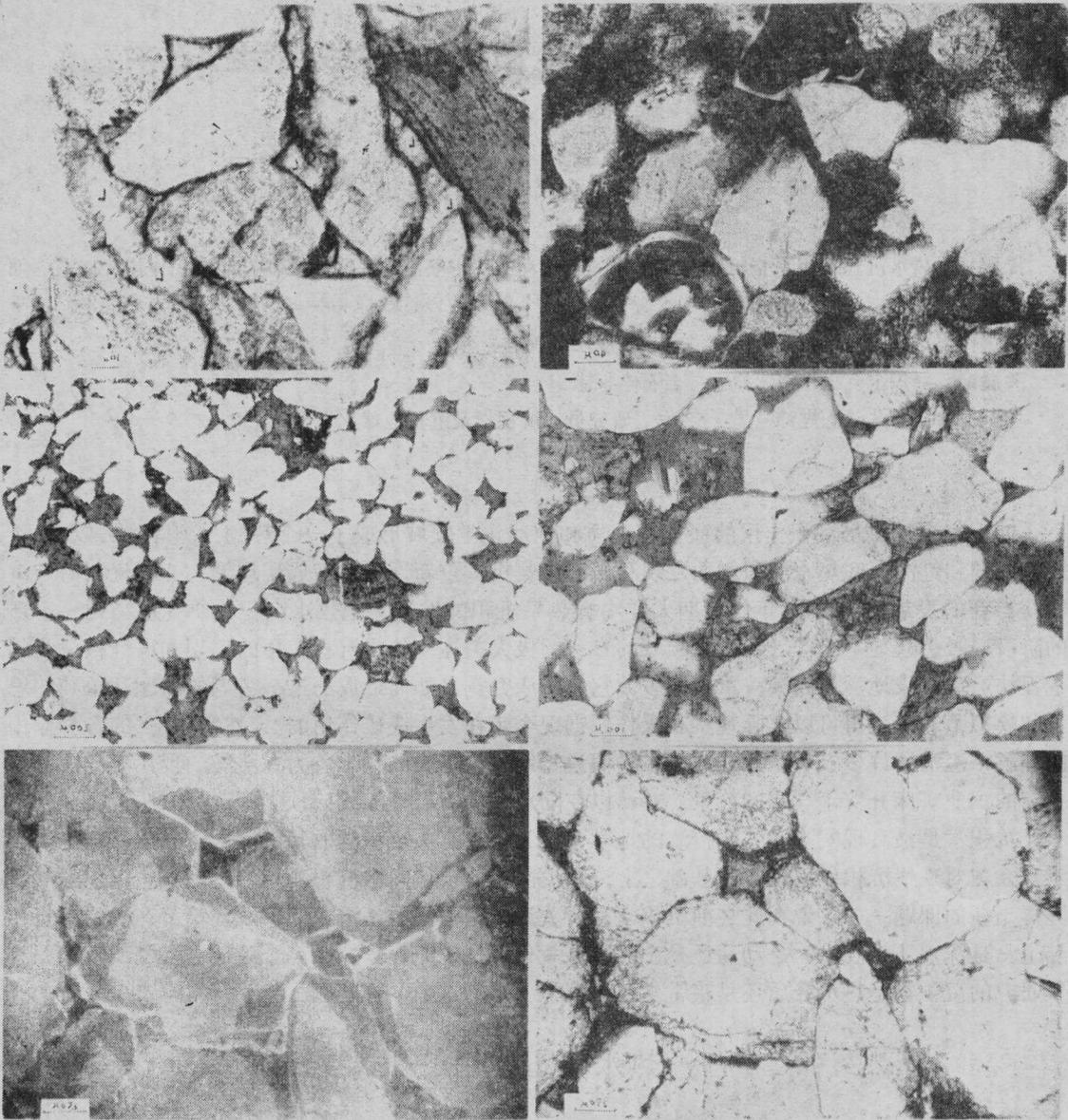
1. The dissolution of aluminosilicate is often stronger than carbonate in the reservoirs of some major oil and gas area in our country, which is shown that the dissolution of the organic acids in the diagenesis is very clear. The dissolution of organic acids is closely related to the type of kerogen evolved by organic matter in

continental sandstone-shale. Type II and III have higher convertibility from kerogen to organic acids in comparison with type I.

2. The origin of high quality reservoirs at great depth with dominant preserved primary intergranular porosity is closely related with burial history of the reservoir rocks. These kinds of reservoirs, Mesozoic and Paleozoic, are widely distributed in Tabei area, Tarim Basin. Lower geothermal gradient, lower thermal maturity, short time of strong chemical diagenesis (80–120°C) and deep burial only since Pliocene, all these are the reasons that resulted in the wide distribution of these reservoirs in the area.

3. Hypogene flow, supergene flow and convection were the main forms of water migration in sedimentary system. It was one of the domination that the secondary porosity development was controlled by the amount of migration of dissolved matter together with fluid migration. Many secondary porosities were often developed and closely related with unconformity and interruption of deposition in geological history because the surfaces of unconformity and interruption of deposition were considered that the sedimentary prism had a period of exposure and leaching.

4. The new progress of clastic rocks diagenesis and porosity evolution has a great significance of the prediction of reservoir properties. But it is not well perfect yet and still in the investigation stage. It is an urgent need to investigate the various types of models of reservoir porosity origin, evolution and preservation at different geological settings, only in this way, the prediction of reservoir properties could be improved.



1.砂岩中的长石铸模孔,溶蚀后只剩下钠长石质次生加大边,原长石颗粒全部溶去 曙光油田杜家台油层 单偏光铸体片(红色) 2.砂岩中强烈溶蚀的浊沸石胶结物(L) 安塞油田长6油层 单偏光铸体片(红色) 3.砂岩中强烈溶蚀的长石(F),方解石(红色)和含铁方解石(紫色)未溶 塔北石炭系油层 单偏光铸体片(兰色) 4.深埋但孔隙发育的砂岩储层,长石和岩屑强烈溶蚀,原生粒间孔保存良好 塔北石炭系油层 单偏光铸体片(兰色) 5.石英强烈加大后成嵌合状的砂岩,孔隙极不发育 浙皖龙潭组砂岩油层 单偏光铸体片 6.与照片5同一视域的阴极发光照片,次生加大十分发育(暗色石英)