

再论东河砂岩孔隙成因

——以塔中地区为例

孙玉善 杨帆

(塔里木石油勘探开发指挥部勘探开发研究院 新疆库尔勒 841000)

摘要 塔里木盆地井下东河砂岩埋藏深、储层优质,属国内外罕见,对其成因众说纷纭。本文依据岩石学特征,针对不同类型的孔隙演化特征与其物性参数,对孔隙的成因类型进行分析后认为:东河砂岩储集空间类型主要以压实剩余的原生粒间孔为主,在部分压实或半充填的剩余(残留)粒间孔隙背景中发育有以溶蚀石英及铝硅酸盐等,而微度扩大的次生和原生混合型孔隙。原生粒间孔隙保存的条件与多种地质因素联合、复合作用关系极为密切。

关键词 东河砂岩 深层 孔隙 充填 溶蚀 保存 成因

第一作者简介 孙玉善 男 1954年出生 工程师 石油地质

中图分类号 P618.130.2+1 **文献标识码** A

1 引言

东河砂岩是塔里木盆地晚泥盆世(也有人认为早石炭世)沉积的一套巨厚的浅海—滨岸相石英砂岩,埋藏深度在3 500~6 100 m之间,最大厚度达129 m。其中塔中地区的埋藏深度在3 612.5~4 220 m之间。自89年在塔北东河塘地区首次发现并获得工业油流以来,由于储层深埋、物性优质,诸多的储层岩石学家对其孔隙成因类型持有较大的分歧。一种观点认为是成岩后生作用以溶蚀“碳酸盐胶结物”形成的次生孔隙为主^[1];另一种观点却认为以压实、胶结后剩余的原生粒间孔隙为主^①。其原因在于镜下识别孔隙类型成因的不同所致,尤其当储层中有少量碳酸盐胶结物的情况下,对孔隙的成因认识易造成各种假象。正如Giles所指出的那样^[2],当岩石学家试图从少量的碳酸盐胶结物中获得是否为溶蚀强烈或溶蚀轻微,就显得十分困难。对此,本文的目的着重从微观方面,通过大量岩石薄片(铸体薄片)及扫描电镜系统观察,将其孔隙演化特征分类,并结合对应的物性特征,再次对储层孔隙的主要成因进行以下讨论。

2 砂体岩石学概况

东河砂岩自上而下基本上是以细粒石英砂岩为主(见图1),并包括纯石英砂岩,其组分分别为:石英(含石英质岩块)含量60%~95%,平均83.45%,

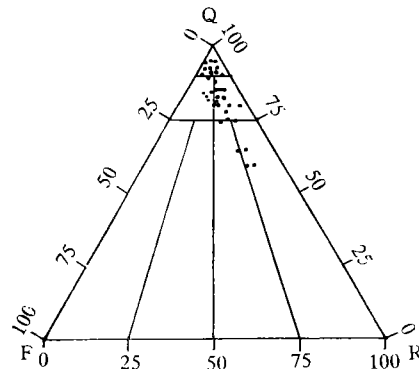


图1 塔中东河砂岩岩石类型

Q. 石英;F. 长石;R. 岩屑

Fig. 1 Types of Donghe sandstone in Tazhong area

长石2%~10%,平均6.49%,岩屑1%~25%,平均10.5%。其中,长石成分以正长石为主,斜长石微量,岩屑成分为中酸性火山岩,变质岩及少量泥岩等。颗粒分选中等—好,磨圆次—圆状,分别由不同成岩阶段析出的自生矿物所胶结,其含量不等,粒

① 王少依等. 塔里木盆地碎屑岩成岩作用与深埋优质储层成因. 1994
收稿日期:1999-04-01 收修改稿日期:1999-05-17

间呈点—线状接触以孔隙式胶结为主。岩石具有较高的成分成熟度和结构成熟度。

3 粒间孔隙演化分析

3.1 压实效应对粒间孔隙的影响

砂岩的压实效应是随着埋深的增加,其颗粒的接触形式是由点至线的接触,最终可形成凹凸状接触,尤其反应敏感的塑性颗粒和云母类碎片,它们均可变形形成假杂基状和曲状等。东河砂岩的压实效应通过镜下统计,投入到三端元图中(图2、图3)可

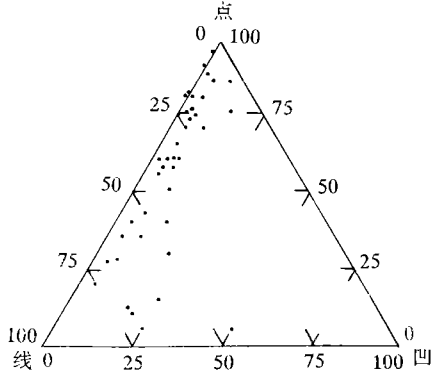


图2 塔中东河砂岩颗粒接触类型

Fig. 2 Types of intergranular contact of Donghe sandstone in Tazhong area

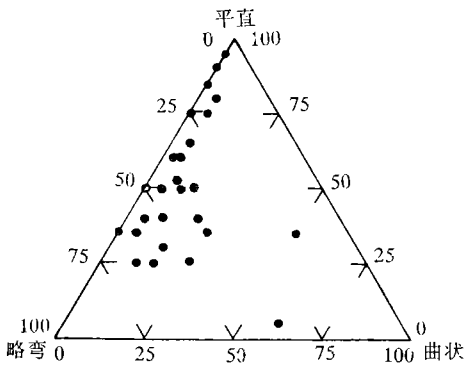


图3 塔中东河砂岩云母碎屑压实变形类型

Fig. 3 Types of compaction deformation of area sandstone mica in Tazhong

明显地看出,颗粒的接触形式基本上处在点—线区域,云母碎片的变形处在平直—略弯区域(图版 I-1)。二者所反映的压实效应一致,其强度处在中等以下,表明粒间孔隙的单位空间因压实作用损失不是太多。

3.2 填隙物对粒间孔隙的影响

3.2.1 粘土类因充填方式不同可分为以下两种类型

a、薄膜式 分布在颗粒表面,电镜下呈包壳状

将颗粒包裹(图版 I-2、3),属准同生—早成岩阶段初期产物,其含量不大于1%。该类型在砂体中的分布比例大于50%,且以砂体中部为主,其中有很少部分有被溶蚀的现象。

b、充填式 分布在粒间孔隙之中,在粉砂岩中多以准同生期的杂基为主,而在细粒砂岩中自生粘土矿物含量偏高,并且以占据孔隙中央为主,其成分为伊利石/蒙皂石混层矿物和伊利石,含量在10%左右,这一类型在砂体中分布的比例约25%左右。

两种类型对粒间孔隙的影响有着明显的差异性,从充填的产状上就可以看出:粘土膜很薄一般不大于10 μm 产在颗粒表面即孔隙边缘处,对孔隙及喉道影响不大,而且还能抑制其它自生矿物的析出,尤其在石英砂岩中粘土膜作用对孔隙的保存起到了至关重要的作用;而充填式类型直接占据孔隙中央,使储集空间大幅度缩减。幸而该类型的分布在砂体中比例不高。

3.2.2 碳酸盐类

由成岩早期至晚成岩期依次析出的为粉晶方解石,粒状方解石和连晶方解石、铁方解石及铁白云石,前三种多产自砂体上下两侧,多呈致密状胶结。当含量达35%时粒间孔隙几乎被完全占据,但此种状况在砂层的分布比例约13%左右。后两种包括连晶方解石是以凝块—斑点状胶结为主,多分布在砂体中部(图版 I-4),常有过渡成层状胶结形式。其中铁方解石往往沿方解石周围加大产出(图版 I-5),铁白云石为粉晶级单晶集合体产出,多与铁方解石共生,此类含量不等在砂体中的分布比例约6%左右。

3.2.3 石英及硅酸盐类

均为自生加大形式产出,长石一般发生在早成岩 A 阶段,而石英的加大陆续发生在早成岩至晚成岩 B 阶段,石英及长石的加大级别与分布均为非均质状,其含量随着加大级别的提高而增加,在Ⅳ级加大处硅质含量可达7%以上。长石析出量由于长石碎屑组分含量很低,级别与析出量对孔隙影响的意义无关紧要。

3.3 溶蚀作用对孔隙的影响

在薄片或在电镜下观察到具有溶蚀特征的往往发生在粘土、石英自生加大边和石英、长石等颗粒中,而碳酸盐类的胶结物并包括碳酸盐岩碎屑均无溶蚀痕迹。

砂体中溶蚀现象与其强度具非均质性,最早期

是以溶蚀长石(正长石)等颗粒为主,晚期则以溶蚀石英加大边、石英等碎屑颗粒边缘和粘土矿物为主(图版 I-6)。在溶蚀的背景中可以将其分为两类:一类是在单一粘土膜胶结层中发生微度溶蚀现象,其特征粘土膜呈残余状,裸露的颗粒边呈模糊和齿状;二类是在石英颗粒多具Ⅱ-Ⅲ级自生加大的砂层中发育着中度溶蚀现象,其特征是除了溶蚀部分粒缘和相对颗粒较小的岩屑(呈残余状)外,石英加大边也有被溶蚀呈非连续脱落的现象。两种不同的溶蚀背景尽管第一类溶蚀强度不及第二类,但第一类粒间孔隙在溶蚀作用下是一种净增扩大的变化,第二类从溶蚀的空间位置上看,溶蚀与析出似乎相等,对孔隙的净增无意义。

4 孔隙成因类型及其量化分析

综合上所述,不难看出粒间孔隙是因压实和半充填作用残留下来的剩余孔隙,范围不广的溶蚀作用只是在此基础上略有扩大。砂体中部分被碳酸盐充填了的孔隙未被溶开,也并非溶蚀后的残留物,显然,砂体中的孔隙成因类型是:

- a、以压实+半充填而剩余的原生粒间孔隙为主,其类型为剩余原生粒间孔隙;
- b、剩余原生粒间孔隙+次生溶蚀扩大孔隙次之,其类型为混合型孔隙;
- c、少量一微量的粒内溶孔+铸模孔,属颗粒(组分)溶蚀型次生孔隙。

前两种基本反映了粒间孔隙的演化成因,据填充物成分与其充填方式的不同将其分为六种列入表中,其中的第一种由于早期粘土膜作用,使原始孔隙除压实缩减外保存较完整的一种类型,据此有理由将它的实测孔隙度作为纯压实后剩余粒间孔隙的基准值(小于1.5%粘土膜可省略不计)。再用恢复的原始孔隙度38%减去所测的孔隙度中值,便可以得出损失的孔隙度与其损失率。其它被充填或被溶蚀的类型可依据第一种孔隙度中值进行换算,得出充填损失或溶蚀扩大孔隙度的近似值(见表1)。

表1中列出的物性参数均来自于与六种类型对应细粒石英砂岩的实测结果,从表中的换算结果可以证实两点:一是压实作用对储集空间的破坏作用并不强烈;二是次生溶蚀作用对扩大储集空间效果也并非乐观,但对提高储层渗透性具有一定的贡献。

另外,还可以反映出不同成因类型的物性特征,是将表1中所有样品的数据投入到孔渗座标散点图中,便能进一步观察到它们所占据区间是具有一定规律性(图4)。如代表压实剩余原生粒间孔隙多集中在一定的孔渗范围之内,除少部分渗透率值较高(可能为粒级靠近细粒砂岩上限所致)外,基本上可以表明所代表的粒间孔隙的基准值是处在一个稳定物性范围内。在具有溶蚀特征的类型中,粘土膜及粒缘溶蚀的孔隙物性分布在代表原生粒间孔隙物性分布区的右边,表明了原生粒间孔隙略有增大的情况下,喉道半径较孔隙增大的快,致使渗透率值直线

表1 细粒石英砂岩粒间孔隙演化特征与其实测孔渗数据表

Table 1 Evolution features of intergranular pore of fine quartz sandstone and measurement data of porosity and permeability

孔隙成因类型	填充物成分及次生状况	充填方式	分布特征	样品数	孔隙度/%			渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$			孔隙损失及溶蚀扩大率/%			
					范围值	平均值	中值	范围值	平均值	中值	损失孔隙度	充填损失率	总损失率	扩大孔隙度/扩大率
剩余原生粒间孔	伊利石及伊/蒙混层矿物	薄膜衬垫式	均匀	69	17.41~21.58	20.21	20.17	100.4~555.6	247.94	216.66	纯压实 17.822		46.90	
	伊利石及伊/蒙混层矿物	充填式	均匀非均匀	34	14.55~19.96	17.87	18.00	8.92~97.36	45.03	40.00	压实+充填 20.00	2.17	52.63	
	碳酸盐矿物	充填式	凝块一斑点	9	4.03~17.99	11.27	11.00	1.93~59.08	22.44	16.25	压实+充填 27.00	9.17	71.05	
	连晶方解石	镶嵌式	均匀	18	2.72~6.79	4.09	3.75	0.01~6.24	0.77	0.56	压实+充填 34.25	<16.42	90.13	
剩余原生粒间孔+溶蚀扩大孔	粘土膜及粒缘溶蚀状	残余薄膜衬垫	非均匀	6	20.69~22.86	21.76	21.66	234.70~618.00	415.05	400.00				1.49/7.38
	石英加大及粒缘溶蚀状	残余再生充填	非均匀	6	17.61~20.05	19.09	19.33	306.5~532.00	414.93	400.00				溶蚀量小于充填量

上升。石英加大边及粒缘溶蚀孔隙却分布在原生粒间孔隙物性分布区的左边,显示出孔隙度在溶蚀作用下未发生净增长,但由于溶蚀是在喉道的连通作用下进行的,无论溶蚀程度如何,渗透率较孔隙度的增加明显。

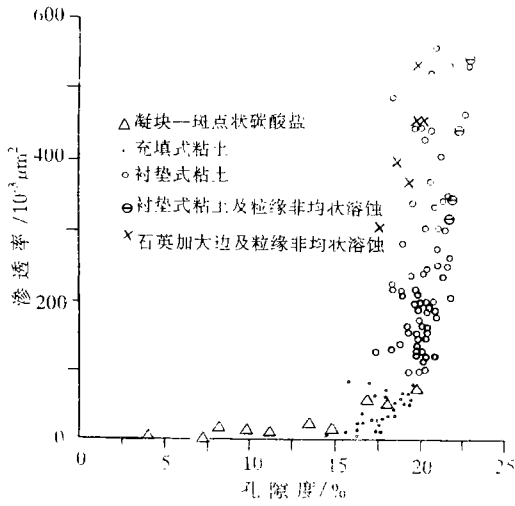


图4 细粒石英砂岩粒间孔隙演化类型与其物性分布特征塔中东河砂岩岩石类型

Fig. 4 Evolution types of intergranular pore and distribution of physical property of fine quartz sandstone

5 原生粒间孔隙成因依据及其保存因素分析

5.1 成因依据

5.1.1 碳酸盐充填特征

当今储层中的方解石及含铁方解石并非是充填了绝大部分粒间孔隙后,被后期溶蚀而成凝块一斑状点的残留物,这些“残留物”未被溶蚀的证据有以下三点:

(1)在凝块一斑状碳酸盐胶结物的边缘上,均无溶蚀后形成的港湾、锯齿等溶蚀特征,且相反的是在其边缘处晶面、晶棱都显得非常整齐干净,未遭受任何溶蚀痕迹(图版 I-7、8)。

(2)凝块一斑状碳酸盐胶结物,在其核心部位常能见到是以灰岩块作为晶核而形成。并且在方解石形成的外围又由含铁方解石沿其增生形成的外围(如图版 I-5 和图版 I-9)。由此证实,凝块一斑状碳酸盐胶结物是一个形成过程中的产物。

(3)方解石形成于早成岩期,所胶结的孔隙面积大,并且还可以交代一些颗粒边缘,如果被溶蚀,那

么,在薄片残余方解石所占的孔隙面积就应该小于或者至少等于被溶蚀的孔隙面积,但镜下明显地可以观察到,与此相反的是前者大于后者,而后的粒间空间并非被方解石曾经充填过(图版 I-10)。

5.1.2 粘土膜充填特征

成岩同期至早成岩 A 阶段产出的衬垫式粘土薄膜,在砂层中分布十分广泛,如果早成岩 B 阶段碳酸盐充填了这些粘土膜分布孔的空隙,那么,孔隙边缘的粘土膜首先是被交代的产物之一,方解石在被溶掉形成次生孔隙后,这些被交代的粘土膜也会自然消失,不会像目前仍然保留在孔隙边缘上。

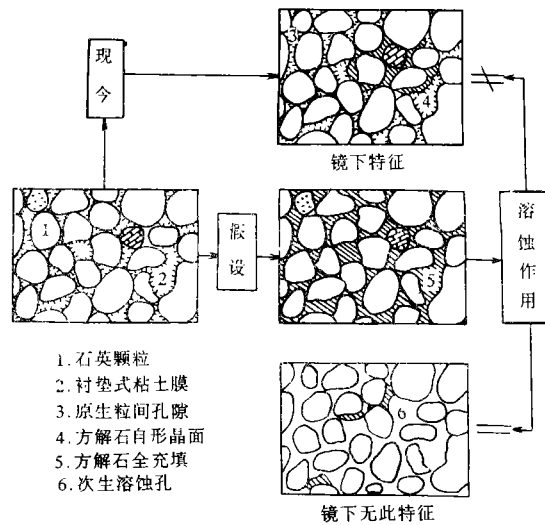


图5 粒间孔隙演化及其成因判别

Fig. 5 Evolution of intergranular pore and its origin

显然,粘土膜的产出不仅能抑制一些自生矿物的析出,而且对判别粒间孔隙成因能提供有力证据。图5中使任何一个有关专家都能直观地看出,在含有灰岩碎屑和广泛分布粘土膜的砂岩中,假设先被方解石全胶结再溶蚀后,应是具备有以下几个特征。

a、被方解石交代的粘土膜及粒缘部分,随着方解石一起溶掉,形成的次生孔隙体积增大;

b、在局部应该观察到方解石被溶蚀后的残留物;

c、碎屑组分中的灰岩块应该一同被溶蚀掉形成超大孔隙。

但是,当今粒间孔隙的特征并非如此,从碳酸盐胶结物的特征上可以看出,呈层状分布的往往是产在孔隙(粒径)较大的薄纹层之中,而凝块和斑点状的在中心部位常能见到起晶核作用的灰质岩块,由此表明,地层水中钙离子由于供应不足,而未造成碳酸盐对储层的全部胶结。这点从保留的粘土膜便

给予了充分的证明,所以由图中便能直观地观察到原生粒间孔隙成因的真面目。

5.2 粒间孔隙保存因素分析

就砂体本身具备保存优势前已述及,如岩石组分,抗压效应及早成岩初期粘土膜的形成与作用等。现通过区域地质背景对孔隙保存因素作如下分析。

(1)塔中地区东河砂岩自晚泥盆世至早第三纪末的三百多万年一直处于浅埋藏^①(1 000~2 000 m),以及低温(45~73℃)的成岩环境中。深埋(3 500 m)与较高温度(98~110℃)只是在新第三纪以来的几百万年,相对时间短暂,所以有利于孔隙的保存。

(2)当烃类注入储层后,对抑制成岩作用的继续和对孔隙的保存具有很大的作用。塔中地区中—上奥陶统烃源岩排烃高峰期与老第三纪末深埋史相匹配^②,储层中的烃类注入更加缩短了深埋高温下成岩作用时间。换言之,98~110℃是成岩体系中有有机酸大量形成对储层产生极大影响的强化学成岩带,酸性水从外部进入砂体会带来很多处于溶解状态的酸溶物质,加上有机酸与砂体反应过程中进入流体的组分再沉淀,往往形成很多自生矿物而使孔隙堵塞,但就在强化学作用同时由于油气的注入原生粒间孔才得以保存下来。

(3)从区域上看东河砂岩上覆有泥岩、生屑灰岩和厚层砂泥岩段,靠盆地斜坡呈超覆沉积,在该套地层遭受初次构造运动以前(海西末),地下水由于处在盆底的封闭带中,随着温度的上升有可能造成成岩初期异常高压带,从而粒间孔隙在早成岩期就具备了保存条件。

(4)塔里木盆地自晚古生代以来一直处于南北

挤压的应力场中,地层静压力受其应力影响有可能在区域上消减压实强度,并引起地温场背景的偏低。白垩、侏罗、三叠和泥盆系优质储层的保存是否与此有关,还待进一步研究。

6 结 论

(1)东河砂岩因各种保存条件较为优越,主要的储集空间类型为剩余原生粒间孔,其次是剩余原生粒间孔+次生溶蚀扩大(包括颗粒溶孔)混合性孔。

(2)广泛分布的粒缘粘土膜不仅能抑制自生矿物的析出,而且为鉴别粒间孔的成因提供了重要依据。

(3)凝块一斑点状碳酸盐胶结物,自始至终为析出形成过程,是钙离子浓度在砂体中欠饱和而形成的产物,并非次生溶蚀后的残留物。

(4)具有次生溶蚀迹象的主要表现在石英及铝硅酸盐方面,而碳酸盐基本处于非溶蚀状态。次生溶蚀作用对储层渗透性的贡献较为明显,但对提高储层整体孔隙度,只是发生了占有原空间位置的物质与孔隙所处位置的调换而已。

(5)原生粒间孔的保存因素,是多种地质因素联合、复合作用的结果,并非单一因素作用。其中,刚性的石英碎屑骨架、中弱程度的压实作用和成岩早期粘土膜产出对于孔隙的保存具备了先决条件。

参 考 文 献

- 1 蔚远江,何远碧,杨友运. 塔中隆起石炭系 CI 油组储集层成岩模式与储集性能的关系[J]. 新疆石油地质,1998,10(5):388~392.
- 2 Giles M R. (1987). 深埋烃层次生孔隙形成过程中的质量传递和有关问题[A]. 见:梅博文,杨文宽译. 储层地球化学[C]. 西安:西北大学出版社,1992. 218~241.

① 陈永武等. 塔里木盆地石炭系储层特征分布规律和预测(“八五”科研报告). 1994

② 梁狄刚等. 塔里木盆地生油岩与油源研究。(“九五”科研报告). 1998

Redisussion on Pore Genesis of Donghe Sandstone

——An example from Tazhong area

SHUN Yu-shan YANG Fan

(Tarim Petroleum Exploration and Development Headquarters, Karla, Xinjiang, 841000)

Abstract

Donghe sandstone is typical shore-shallow-sea facies quartz sandstone with burial depth ranging from 3500 to 6100m and the largest thickness 129 meter formed during late Devonian (or early Carboniferous) in Tarim basin. Although it has great depth, it still has better reservoir quality (Porosity is about 20% and permeability $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) and that is quite rare in the world. Different viewpoints on its genesis yet exist. Some believe that the well-developed porosity was formed by dissolution of calcite cement in late diagenesis, but the others think it is primary pore retained after compaction and cementation.

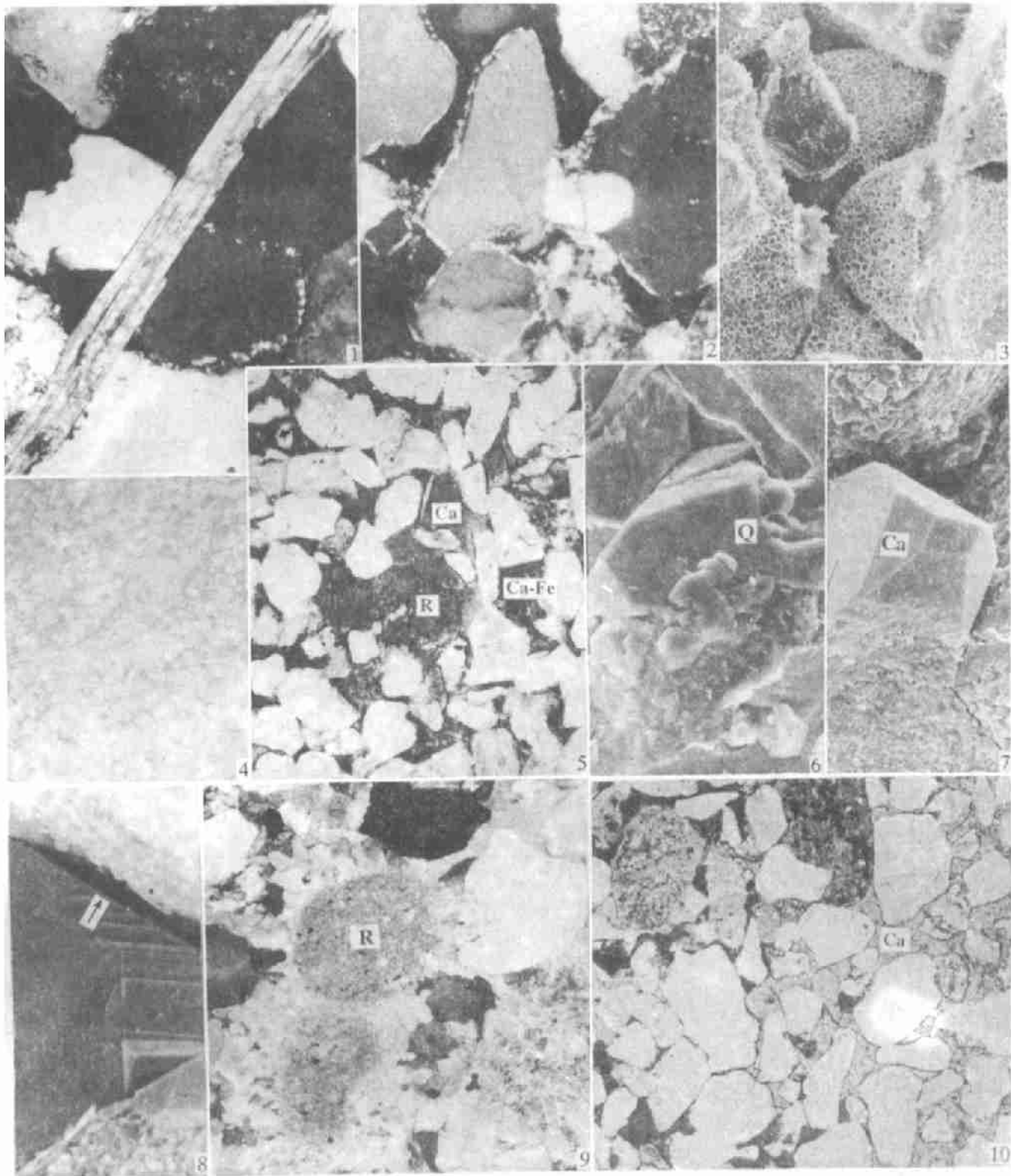
On the basis of numerous data collected from casting section, thin section and SEM, the author draw a conclusion that pore in Donghe sandstone is chiefly primary porosity retained after compaction and cementation, and the proofs are as follows: First, the compaction intensity on porosity is not strong and pore fillings come mainly from authigenic clay, quartz and calcite minerals in which the clay film is the most common infillings form, and next clay fill, quartz overgrowth as well as carbonate fill. The carbonate cement is abundantly distributed around the sandbody, but in the middle they present in spot, granule and laminae. Second dissolution is not well developed in the sandstone and they mainly take place in clay, quartz overgrowth and quartz grain as well as feldspars while the carbonate cement shows no any dissolution and they are not the remains produced by intensive dissolution.

Under the background of the remained intergranular pore, the mixed pores formed by the remained primary pore and the secondary dissolution pore.

Dissolution has the eminent contribution to the sandstone permeability.

By quantitative analysis on the evolution of porosity and related physical property parameters, the author believe that the primary pore, such as the pore with well-developed clay film and substrate loss porosity 17.82% by compaction, and the other forms of loss by filling and compaction is 20%, 27% and 34.3%, respectively. The secondary dissolution can increase part of porosity by 1.49%. The protection condition of primary porosity has close relation to the integrated geological factors.

Key words Donghe sandstone deeply buried porosity filling dissolution genesis



图版说明 1. 板条状云母碎屑平直未被压实弯曲现象。3742.20m, 正交, 64×; 2. 颗粒边缘粘土膜分布特征, 3695.00m, 正交, 64×; 3. 电镜下粘土膜在颗粒表面呈包壳状。3703.37m, 300×; 4. 方解石呈囊块一斑状分布特征, 3675.00m, 岩心照片, 2×; 5. 砂岩中囊块状碳酸盐分布特征, 片中心为亮晶灰岩岩屑(R)起晶核作用, 向外第一圈为方解石析出物(Ca), 第二圈为含铁方解石(Ca-Fe), 其他部分为孔隙铸体充填物, 3705.55m, 单偏光, 25.6×; 6. 电镜下石英自生加大边(Q)被溶蚀特征, 3716.80m, 750×; 7. 方解石(Ca)晶棱及晶面完整无损, 无溶蚀现象, 3691.83m, 电镜, 800×; 8. 方解石囊块状胶结边缘晶面完整无损, 3691.83m, 电镜, 700×; 9. 粒间方解石胶结物以灰岩岩屑为晶核析出的特征, 3603.5m, 正交, 25.6×; 10. 孔隙被方解石充填部分(Ca)的面孔率大于左边未充填部分(铸体物)的面孔率, 3666.3m, 25.6×。