

松辽盆地北部深部储层的次生孔隙 发育机制和控制因素

杨宝星 李南豪

(成都地质学院)

古世祥

(大庆石油管理局)

摘要 本文对研究区内的次生溶孔的形成机制和控制因素进行了探讨: 1.次生格架颗粒溶孔和粒间溶蚀扩大孔的形成机制: 一是主要与沉积间断, 即表生期地表淡水渗入有关的溶蚀作用机制; 另一种是与埋藏期泥岩中有机质成熟作用有关的格架颗粒溶孔发育的机制。2.浊沸石溶孔的形成机制: 有机质进入高成熟阶段, 烃类热裂解造成孔隙水的 pH 值降低, 并产生少量二氧化碳, 导致浊沸石的溶解。沉积间断的存在和土壤化作用、泥岩中有机质的丰度和干酪根类型是控制次生孔隙发育的主要因素。据此对储层进行了区域性评价。

关键词 深部储层 次生孔隙 发育机制 松辽盆地北部

第一作者简介 杨宝星 女 51岁 副教授 石油地质

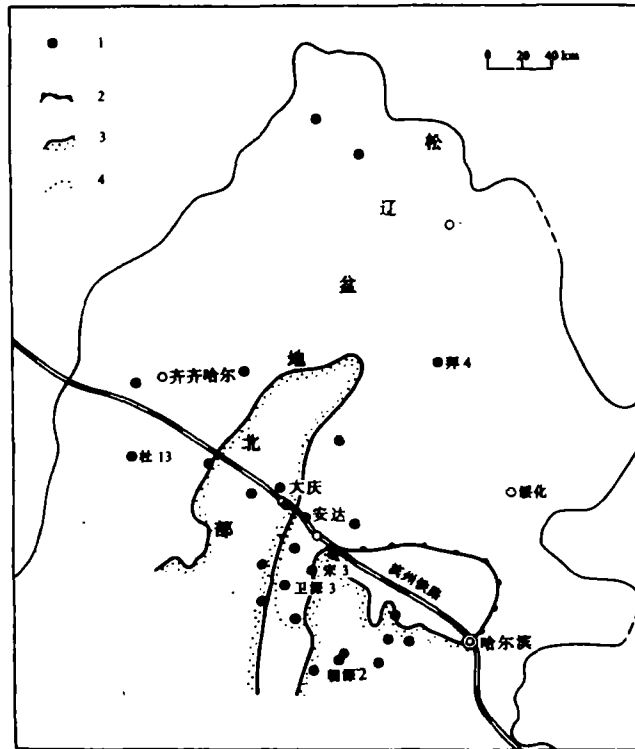
松辽盆地北部深部储层的研究工作已经研证实次生溶蚀孔隙是深部储层的主要储集空间。因而认识次生孔隙的发育机制及其控制因素已成为储层研究的重要课题。深部地层包括了松辽盆地下白垩统泉头组二段以下及侏罗系。本文使用的资料涉及到研究区的 26 口钻遇深部地层的钻井。各种分析样品则采自其中 14 口井 (图 1), 观察鉴定了约 400 片铸体薄片, 其中用电子探针分析了 25 个样品共 286 个测点, 阴极发光分析薄片 14 片, 电镜扫描 11 个样品, 6 个样品做了氧、碳同位素测定, X-射线衍射分析 34 个样品。

一、地质背景

松辽盆地是前古生代及古生代变质岩和火成岩基底上发育起来的中、新生代含油气盆地, 属于稳定区内的裂陷盆地。继三叠纪—早侏罗世的剥蚀夷平之后于晚侏罗世才形成互相分割的小型断陷盆地群。断陷内分别沉积了一套补偿型的粒度很粗、分选极差的扇三角洲相, 潮湿气候下的滨湖沼泽—浅湖相以及稳定深湖相沉积组合和火山碎屑岩建造。松辽盆地北部侏罗系的岩性以砂 (砾) 泥岩层夹煤层和煤线为特征, 其中夹多层火山岩和火山碎屑岩。

下白垩统登娄库组沉积时期属于盆地的断拗阶段。登娄库早期是侏罗系不整合面上低洼

地区的充填时期, 沉积范围只限于安达—肇州背斜带两侧断陷。登娄库中晚期, 沉积范围有所扩大, 在包括了安达—肇州背斜带在内的区域内沉积了一套具有频繁韵律的砂、泥岩类复理石建造。登娄库末期局部地区又遭风化剥蚀。滨洲铁路线以北则缺失登娄库地层 (图 1)。泉头组一、二段仍为红色砂泥岩系列。



1.井位 2.登娄库组合分布区 3.登娄库组一、二段沉积区 4.登娄库晚期剥蚀区

图 1 研究区位置及采样井

Fig. 1 Location and sampling sites of study area

从深部储层砂岩的岩石学特征来看, 侏罗系砂岩由于各断陷的发育历史以及沉积物源不同, 加上埋藏史的明显差异, 使砂岩的岩石特征和成岩变化也必然存在着差异。总的看来, 侏罗系砂岩属于成分成熟度和结构成熟度均较低的长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩, 个别断陷内则为长石砂岩。其中石英的平均含量为 12%左右, 长石含量为 20-50%不等。岩屑成分与各断陷内沉积物的来源密切相关, 以中酸性喷出岩岩屑和浅变质岩、沉积岩岩屑为主。

下白垩系登娄库组和泉头组一、二段地层主要发育在滨洲铁路线以南。砂岩为岩屑长石砂岩, 平均碎屑组分为 Q20.5、F46.1、R33.4, 其中长石主要为 $An < 10\%$ 的钠长石, 岩屑成分中则以中酸性喷出岩岩屑为主, 砂岩粒级从粉砂岩到中粒砂岩以粉-细砂岩为主, 杂基含量普遍低于 6%。

二、深部储层砂岩的成岩序

致密的、低孔渗砂岩中的次生孔隙发育是成岩作用的重要产物,因而研究成岩作用是研究次生孔隙形成机制、控制因素和分布特征的基础。

侏罗系砂岩的成岩变化序列主要包括三种类型:

1.埋深较大(一般超过2700m)的砂岩属长石岩屑砂岩。浅变质岩(黑色泥板岩)岩屑等软颗粒含量超过50%,杂基占7—16%不等。该类砂岩受机械压实作用强烈,表现为颗粒填集紧密。成岩晚期又为铁方解石充填、孔渗性差,主要分布在滨洲线以南各断陷的东侧。

2.埋深小(小于1300m)的含砾粗砂岩。颗粒填集松散。碎屑组份中岩屑极少,属长石砂岩类。主要的成岩作用为格架颗粒(长石为主)的溶蚀以及原生粒间孔的溶蚀扩大。后者见有自生书页状高岭石充填。孔隙度可从10—26%。渗透性则各井差异较大,从0.01md—61md。此类砂岩分布于研究区北部各断陷内。

3.介于上述两类之间的长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩。岩屑中以中酸性喷出岩岩屑为主,长石则以 $An < 10\%$ 的钠长石为主。杂基含量少。此类砂岩经历的化学成岩作用较为复杂。本段砂岩由于石英和长石的次生加大发育较早(从埋深600m处即开始),颗粒填集方式一般为点接触至线接触,可见压实作用只在很浅的深度上成为孔隙减小的主要因素。随后发育的化学成岩作用主要有5个阶段:

- (1) 早期包围颗粒的粘土边发育阶段;
- (2) 表生期和中成岩早期格架颗粒溶孔的形成阶段;
- (3) 中成岩早期的石英和长石压溶、次生加大阶段;
- (4) 中成岩期斜长石钠长石阶段及浊沸石充填并交代碎屑颗粒阶段;
- (5) 中成岩晚期浊沸石溶孔和少量长石溶孔形成阶段。

三、深部砂岩储层的主要孔隙类型分布情况

1.原生粒间孔(IG)

包括埋藏较浅地层中由于颗粒填集松散,颗粒支撑形成的粒间孔以及由于石英加大后保存下来的剩余粒间孔。多见于滨洲线以北各凹陷内不足1000m的侏罗系砂岩中(图版I, 1, 2)。

2.次生格架颗粒溶孔(FGD)

包括长石溶孔和岩屑内溶孔。其中以长石溶孔为主。此类孔内不见任何自生矿物充填(图版I, 3, 4)。经染色及电子探针分析表明,被溶长石中38%为钾长石,62%为 $An < 10\%$ 的斜长石。次生格架颗粒溶孔几乎在有孔隙发育的层段和地区均有发现。

3.粒间溶蚀扩大(IGD)

是指在原生粒间孔的基础上,溶蚀了长石、岩屑颗粒的边缘以及粘土杂基所形成的孔隙。它们常与格架颗粒溶孔连通成较大的孔隙空间(图版I, 5)。

格架颗粒溶孔经常与粒间溶蚀扩大孔隙同时出现,有时以前者为主,有时则以后者为

主。以格架颗粒溶孔为主的类型, 孔隙度为6-7.5%, 其中格架颗粒(长石)溶孔的贡献从2% (朝深2井登三段)到5.8% (卫深3井登三段)。以粒间溶蚀扩大为主的组合, 孔隙度高, 为9.4-15.7%, 其中长石溶孔的贡献仍为2.5-5.7%, 如宋3井登娄库组和杜13井侏罗系砂岩。

4. 次生浊沸石胶结物溶孔 (LGD)

浊沸石胶结物被溶蚀后所形成的孔隙, 溶蚀轻微者, 仅沿解理溶蚀。溶蚀强烈者, 浊沸石已大部分或全部被溶, 形成较大的孔隙空间(图版I, 6、7)。浊沸石溶孔和长石溶孔配合, 可造成4.1-7.9%的孔隙度。当浊沸石溶孔和原生粒间孔共存时, 可以获得高孔隙度, 如任6井的侏罗系砂岩, 孔隙度达18.20%。

5. 火山岩及凝灰岩内长石斑晶和微晶

凝灰岩内的长石晶屑遭溶蚀而形成的孔隙, 可见于火山岩发育的侏罗系地层(图版I, 8)。一般面孔率仅为1%左右。

四、深层砂岩中次生孔隙发育机制及控制因素讨论

近年来通过对砂岩组分在地下的溶解作用的研究, 人们进一步认识到过去主要用碳酸来解释次生孔隙的形成是很不完全的, 还必须从化学和水动力机制等方面研究各种有机酸对铝硅酸盐和碳酸盐矿物的影响。但至今世界上对次生孔隙发育的化学机制和流体循环对流机制的研究还处于初期阶段。

1. 次生格架颗粒溶孔和粒间溶蚀扩大孔的形成

所谓格架颗粒溶蚀作用(FGD)是长石和岩屑被溶蚀的现象。粒间扩大溶孔(IGD)大部分亦为硅酸盐组分溶蚀的结果。

长石中最不稳定的是斜长石, 钾长石次之, 钠长石一般不溶。深层砂岩中, 经钠长石化作用的斜长石平均 $A_n=17.6\%$, 而埋藏较浅的, 只有轻微钠长石化作用的泉头组三段砂岩中, 斜长石的 $A_n=26.6\%$ 。此类长石在氢离子浓度增加, 即pH值降低的水介质条件下, 很容易遭受溶蚀(Siebert等, 1984)。据计算(卓胜广硕士论文, 1988), 在25℃标准状态下, 溶蚀反应吉布斯自由能 -31.45kcal/mol 。这意味着不需要任何驱动因素(如温度、压力), 反应即可以很容易地向右进行, 而且温度升高是促进反应的。

八十年代以来的研究表明, 硅酸盐矿物的溶解问题, 除了氢离子的浓度外, 还涉及到铝离子的迁移。事实上, 铝离子的迁移愈有效, 铝硅酸盐的溶解就愈快。人们发现很多油田水中存在着短链脂肪酸, 如醋酸、丙酸、草酸等, 这些一元或二元羧(即含一个或2个羧基)的阴离子能有效地络合铝离子, 形成铝的络合物迁移至孔隙水溶液中。而粘土矿物蒙脱石向伊利石的转化, 可使页岩水中铝的活度降低。这种铝活度低的页岩水既含氢离子, 又含能够络合铝的有机酸阴离子, 进入砂岩时, 即能溶蚀长石和其他的铝硅酸盐组分。实验亦已证明, 二元有机酸的存在能有效地提高铝硅酸盐格架颗粒的溶解度。

根据深部地层砂岩中普遍存在的格架颗粒溶孔和粒间溶蚀扩大孔的发育和组合特征, 本文认为孔隙有两种形成机制。一种主要与沉积间断时地表淡水渗入有关, 另一种则主要与泥岩有机质成熟作用有关, 不同层位和不同地区的深部砂岩中的格架颗粒溶孔发育的机制不尽相同。

与表生期淡水溶蚀作用(沉积间断)有关的次生孔隙形成机制 据大庆石油勘探开发研究院程学儒(1980)的研究报告,登娄库晚期在研究区内存在着沉积间断,使隆起高部位遭受剥蚀。风化剥蚀环境造成了地表水向岩层渗滤。Surdam et al (1983)对土壤的研究证实了在风化剖面上,斜长石的溶解以及铝的迁移是存在的。除了丰富的二氧化碳的作用外,土壤水中还存在草酸,对铝硅酸盐组分的溶解十分有利。位于古中央断裂隆起带的安达—肇州背斜带上的卫深3井,在登三段井深2757.00—2767.00m处见以格架颗粒溶孔为主的溶孔发育段,溶孔段距现登娄库组顶面仅40.5m。井深2762.20m处的砂岩样品中部分长石颗粒在阴极射线下发鲜艳的红色光,表明了三价铁离子取代了长石中铝离子,亦可作为风化作用的证据。同在安达—肇州背斜带上的宋3井登娄库组亦见有次生孔隙发育段,井深2036.80—2236.00m厚约200m,距登娄库组顶面约36m。本区登娄库组为氧化环境下的一套红色泥岩和砂岩的发育区。暗色泥岩缺乏,泥岩有机质含量低,与泥岩有机质成熟作用有关的溶孔发育机制似乎不十分重要。溶孔的发育与沉积间断有关。

登娄库组地层中的溶蚀长石大多为 $An < 10\%$ 的斜长石(钠长石),少量为钾长石。遭溶蚀钠长石的化学成分与未遭溶蚀的钠长石一致。由于钠长石的稳定性,可以认为,溶蚀的是未经钠长石化的斜长石,然后溶蚀剩余部分钠长石化。

与沉积间断有关的溶孔发育还决定于砂岩的初始孔隙度和渗透性。如芳深1井,从目前已有资料看来,杂基含量较高可能是造成早期溶蚀不发育的原因之一。

与埋藏期泥岩中有机质成熟作用有关的格架颗粒溶孔发育机制 关于泥岩中有机质的脱羧基作用提供碳酸而造成次生孔隙的理论(施密特,麦克唐纳,1982)早已为人们所熟知。新的发现是,对硅酸盐矿物的溶解来说,干酪根的氧化和热降解产生大量有机酸的作用应得到加倍的重视。

据研究,二元酸的氢离子贡献能力比碳酸高6—350倍(25℃时)(表1)。有机酸又是有效的铝络合剂,而且有机酸盐溶解度比碳酸高几个数量级(如 $Ca(COOH)_2$ 的溶解度比 $CaCO_3$ 高三个数量级),使钙盐不易沉淀,有助于保护次生孔隙。实验还证明,干酪根热解产生各种二元酸的量决定于干酪根类型。目前世界上许多油田水分析表明,80—140℃间有机酸含量最丰富。一般讲,有机酸最丰富的位置(温度值)和蒙脱石—伊利石混合层存在的区间吻合,同时混合层粘土的成岩作用还促进了液体的流动。

表1 各种有机酸和碳酸的氢离子贡献能力

Table 1 Efficency of organic acids versus that of carbonic acid

种类	近似的 pH 值	氢离子 mol/l	效率
碳酸	3.20	6.3×10^{-4}	0
丙酸	2.44	3.6×10^{-3}	× 6
粗酸	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 I.D.Meshri)

总之, 可以认为影响格架颗粒溶蚀孔隙产生的重要因素是:

- (1) 有机质丰度决定产生二氧化碳和有机酸的多少;
- (2) III型(腐植型)的干酪根能产生的含氧基团和双元酸最多, I型(腐泥型)最少, II型居中;
- (3) 剖面上的砂岩比

最理想的状况是具备上述三方面有利条件的有机母岩邻近储集岩, 并且储集岩中有较好的初始孔隙度、渗透性。

松辽盆地侏罗系(包括局部地区的下白垩统)发育的格架颗粒溶孔与暗色泥岩占地层比例、泥岩中有机质的丰度以及成熟程度有关。滨洲线以北的侏罗系普遍为一套煤系, 如杜13井侏罗系暗色泥岩占地层总厚的49.2%, 有机碳含量4.29%, 干酪根类型为II_A—III_B型, 次生溶孔发育, 孔隙度为12.1%, 其中长石溶孔的贡献为4.8%。拜4井侏罗系的暗色泥岩占地层总厚的28.2%, 有机碳含量1.38%, 孔隙度为9.6%, 长石溶孔的贡献为5.7%。

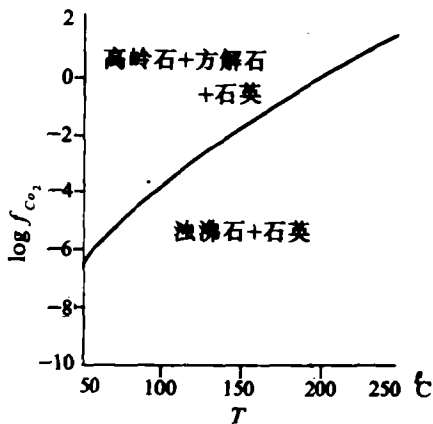


图2 浊沸石+CO₂=高岭石+方解石+石英+2H₂O反应在不同CO₂和温度条件下的平衡曲线(据 R. C. Surdam).

Fig. 2 Calculated equilibrium curve for reaction: $Lm + CO_2 = Cal + Kao + Q + 2H_2O$ as a function of $\log f_{CO_2}$ vs. $T(^{\circ}C)$ (from R. C. Surdam)

2. 浊沸石溶孔的形成

研究区内凡是有浊沸石胶结物出现的地区或层段均或多或少地发育浊沸石溶孔, 从图2可见, 在成岩温度下(75–150℃), 极少量的CO₂在流体中就能导致浊沸石的溶解。

本区深部地层的浊沸石明显发育层段的R^o值为1.9%左右, 埋深达2000m以上。据大庆石油管理局杨万里、高瑞琪(1985)研究报告, 已属于成岩中晚期阶段, 此时有机质进入高成熟和过成熟阶段, 烃类的热裂解造成孔隙水的pH值降低, 并产生少量的CO₂, 可以导致浊沸石的溶解。但下白垩统红色砂泥岩可能生成的烃类很少, 而且成岩晚期的砂岩已经经历了相当程度的成岩变化, 孔渗性较差, 也是阻碍浊沸石溶孔发育的原因之一。由于浊沸石含量普遍较少, 除个别井段外, 一般含量均在10%以下, 因此形成的浊沸石溶孔是有限的, 但如果浊沸石溶孔与粒间孔或格架颗粒溶孔相配合, 在个别情况下可使孔隙度达到

15%以上。

结 语

根据上述次生孔隙发育机制及控制因素的讨论, 可见本区滨洲铁路以北各凹陷的侏罗系砂(砾)岩厚度大, 埋藏浅, 保存了较多的原生粒间孔隙。在暗色泥岩发育, 有机质丰富的地区可望找到较好的格架颗粒溶孔与之配合, 即可形成较好的储集条件。下白垩统泉二段

以下的地层中登娄库三段砂岩发育。但砂岩粒度细,分选差,次生充填作用强,储集条件不理想。但在近南北向展布的安达—肇州背斜带上,曾经历过表生期的淡水渗滤溶蚀作用,使该区发育了粒间溶蚀扩大和长石溶孔以及浊沸石溶孔。储渗条件得到了改善。

收稿日期:1989年12月1日

参 考 文 献

- (1) 杨万里等, 1985年松辽陆相湖盆地石油地质, 石油工业出版社, 北京, 208-219页.
- (2) Surdam R. C. et al., 1985, AAPC Memoir 37, Clastic Diagenesis, p. 127-148
- (3) Siebert R. M. et al., 1985, AAPC Memoir 37, Clastic Diagenesis p. 163-175
- (4) Meshri I. D. 1985, SEPM Special Pub. No. 38, p. 123-128
- (5) 施密特、麦克唐纳著, 1982, 砂岩成岩过程中的次生储集孔隙, 陈荷立 汤锡元译 石油工业出版社

Generation Mechanism of Secondary Porosity and Control Factors in Deep Sandstone Hydrocarbon Reservoirs, Northern Songliao Basin

Yang Baoxing Li Nanhao

(Department of Petroleum, Chendu College of Geology)

Abstract

Songliao Basin formed by rifting in craton interior during the Yanshan Movement of Late Jurassic. The deep stratigraphy of Songliao Basin includes the Upper Jurassic (J_{2-3}) and the Lower Cretaceous formations (K_{1d} & K_{1q1-2}). The succession consisting mainly of sandstone, shale and coal-bearing sequence and partially volcanics, volcanoclastic rocks were established during the rifting and the early depression stage. The clastic sequence displays terrestrial alluvial fan, fan delta, fluvial floodplane and lacustrine sedimentary facies. The sandstone reservoirs are mineralogically characterized by immature feldspathic litharenite and lithic arkose and have been altered by a series of diagenetic alteration. The secondary dissolution pores are frequently found as the dominant type of porosity including framework dissolution porosity, intergranular dissolution enhanced porosity and authigenetic laumontite dissolution porosity.

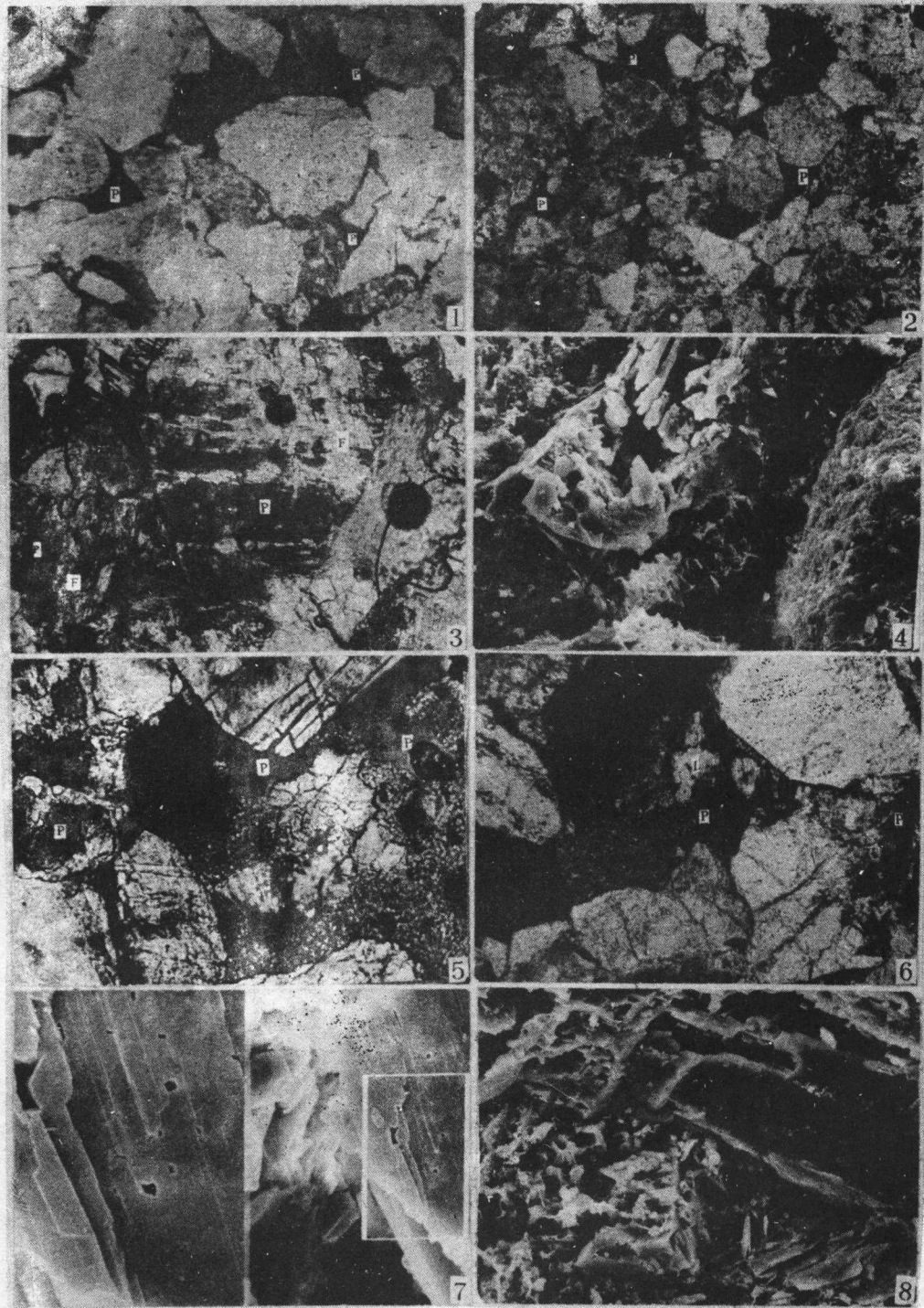
This paper describes the dissolution mechanism and its control factors. The effect of organic acids on dissolution of aluminosilicate is closely taken into account since many information of organic-inorganic interaction and sandstone porosity enhancement have been demonstrated in recent years.

1. The generation mechanism of framework grain dissolution porosity and intergranular dissolution enhanced porosity. Two types of mechanism are suggested based on the distribution and association of these dissolution pores. One is related to the telogenetic percolating meteoric water in correspondence with the sedimentary hiatus during the end of K_{1d} stage. As the result, porosity are largely by combining the

intergranular dissolution enhanced porosity and detrital grain dissolution porosity. The generation mechanism of framework grain dissolution porosity could be basically contributed to the maturation of type III kerogen in the Jurassic coal-bearing sequence. Carbonic acid and short-chain aliphatic acid effectively provides H^+ and Al-complexing agent to the pore solution. Thus this type of dissolution is obviously influenced by the organic matter content in the shale, type of kerogen and the shale to sand ratio.

2. Dissolution mechanism of authigenetic laumontite. Unstable laumontite could be easily dissolved under the condition of lower pH value, high maturation of organic material and the thermal degradation of hydrocarbon during the progressive burial of sediments.

It could be concluded that the generation of the secondary pores closely related to sedimentary hiatus(or unconformity) and maturation of organic matter. To understand the generation mechanism and control factors of dissolution porosity would allow us to make a regional evaluation of reservoirs.



1. 未充满剩余粒间孔(p) 单偏光 $\times 35$ 朝深2井118号 Kd_3 井深 2615.52—54m。2. 粒间溶蚀扩大孔(P) 单偏光 $25\times$ 宋3井54号 K_1d_1 井深 2234.79m。3. 长石内溶孔(P) 单偏光 $\times 47$ 拜4井 J 井深 968.40m。4. 微斜长石内溶孔。SEM $\times 200$ 五深1井23号 K_1q 井深 1474.36m。5. 自生高岭石充填于粒间孔内, 长石溶孔内未见单偏光 $\times 47$ 拜4井118号 J 井深 969.40m。6. 浊沸石溶蚀孔(P), 孔内浊沸石残余见一组解理。单偏光 $\times 35$ 朝深2井112号 K_1d_3 井深 2569.92—94m。7. 浊沸石溶孔, 沿解理缝溶蚀。扫描电镜 $\times 600 \times 1800$ 朝深4井13号 K_1d 井深 2585.25m。8. 安山岩中的钙长石斑晶被溶(EDX)。SEM $\times 200$ 杜403井101号 J 井深 1412.35m