

# Diagenesis and Reservoir Porosity Evolution of Paleogene in Xihu Sag

Mingyi Hu<sup>1,2</sup>, Haijun Jiang<sup>1</sup>, Ling Ke<sup>1</sup>, Yanxia Xu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Geosciences, Yangtze University

<sup>2</sup>Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources of Education, Yangtze University; Jingzhou 434023, China

**Abstract:** The Paleogene contains Pinghu Formation and Huagang Formation in Xihu Sag. The reservoirs of Paleogene in Xihu Sag are mainly lithic feldspathic sandstone, feldspathic lithic sandstone and little lithic sandstone. Which are typically middle porosity, middle permeability and low porosity, low permeability. Based on core observation and thin section observation, combined with ancient geothermal temperature,  $R_o$  and other test data, we make a detail research on Diagenesis of Paleogene in Xihu Sag and Porosity Evolution. It shows that the sandstone of Xihu Sag goes through the compaction, cementation, metasomatism and dissolution. During the diagenesis evolution, most original pores of the reservoir sandstone of Huagang Formation and Pinghu Formation are destroyed, the remain are mainly secondary pores, thus it can be seen that diagenesis is the key factor to control the characteristics of the reservoir. In the porosity evolution, the compaction and the cementation are mainly of destruction, the solution is of construction. Reservoir area and the secondary pores with depth are usually in the 2000-4000m. Two secondary pore zones correspond to the A<sub>1</sub> and A<sub>2</sub> stages of late diagenesis. By analysis of ancient geothermal temperature and  $R_o$ , it shows that the reservoir goes to A<sub>2</sub> stage of late diagenesis, the Longjing belt goes to B stage of late diagenesis in the north of the work area, thus the reservoirs of Paleogene in Xihu Sag have good reservoir conditions except from the Longjing belt.

**Key words:** diagenesis ; pore evolution ; secondary pore ; Xihu Sag ; Paleogene

## 西湖凹陷古近系深层储层成岩作用及孔隙演化

胡明毅<sup>1,2</sup>, 蒋海军<sup>1</sup>, 柯岭<sup>1</sup>, 徐艳霞<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长江大学地球科学学院

<sup>2</sup>长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 荆州, 中国, 434023

**摘要:** 西湖凹陷古近系主要包括平湖组和花港组, 该区储层主要为长石岩屑质石英砂岩和岩屑质长石砂岩, 多为中孔中渗和低孔低渗储集层。根据岩石薄片和铸体薄片观察, 结合古地温、镜质体反射率等测试资料, 对西湖凹陷成岩作用及孔隙演化进行了详细研究。研究表明: 该区古近系储层主要经历了机械压实作用、胶结作用、交代作用、溶解作用等成岩作用, 储集砂岩原生孔隙大部分被破坏, 以次生孔隙为主; 成岩作用是控制该区储层特征的一个关键因素, 在孔隙演化过程中, 压实、胶结作用主要起破坏性作用, 溶解作用起建设性作用。该区储集层次生孔隙发育带深度一般在2000—4000m左右, 两个次生孔隙发育带分别对应于晚成岩A<sub>1</sub>期和晚成岩A<sub>2</sub>期。古地温和镜质体反射率分析表明该区储层主要进入晚成岩A<sub>2</sub>期, 其中工区北部龙井构造区演化程度高, 已进入晚成岩B期, 因此除北部龙井构造区外, 西湖凹陷古近系具备良好的储集条件。

**关键词:** 成岩作用; 孔隙演化; 次生孔隙; 西湖凹陷; 古近系

## 1 引言

西湖凹陷古近系沉积厚度大、生油条件好, 是主

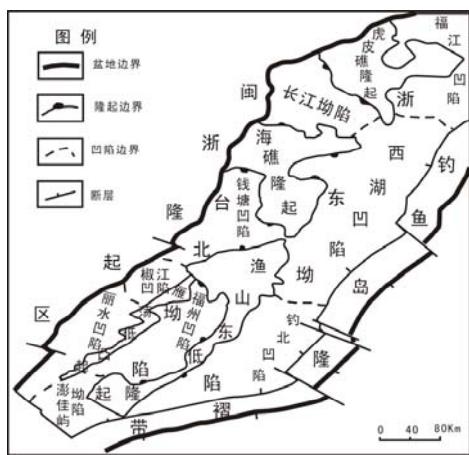
[基金项目]国家重大专项(2008ZX05023-001-003)和中海石油(中国)有限公司项目(CNOOCRC-2008-KTYJ-014)联合资助成果。

要的供油区。但是对平湖组及以下地层的层序结构和沉积演化特征缺乏清楚的认识, 因此对其储层空间分布规律的研究也不够深入, 对深层储层物性发育特征及其控制因素、优质储层分布规律的研究也较少, 这

些方面还有待开展深入的研究，为深层油气勘探评价提供可靠的依据。本文在前人研究成果的基础上<sup>[1-3]</sup>，结合铸体薄片、扫描电镜、镜质体反射率等测试资料对西湖凹陷成岩作用类型和成岩阶段及孔隙演化进行了初步研究，认为该区已达到了晚成岩阶段，储集砂岩的原生孔隙大部分被破坏，主要以次生孔隙为主，成岩作用是控制该区储层特征的一个关键因素，在孔隙演化过程中，压实、胶结作用起主要破坏作用，溶解作用起建设性作用。研究区目前主要进入晚成岩 A 期，局部地区进入晚成岩 B 期，储集层埋深及次生孔隙发育带深度一般在 2000—4000m 左右，两个次生孔隙发育带分别对应于晚成岩 A<sub>1</sub> 期和晚成岩 A<sub>2</sub> 期。

## 2 区域地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地中部，呈北北东向，南北长约 420km，东西宽约 100km，面积约  $4.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，新生界最大埋深  $1.5 \times 10^4 \text{ m}$ ，是中国海域面积最大埋深最深的凹陷之一，同时西湖凹陷也是东海盆地油气资源最丰富，勘探潜力最大的凹陷。西湖凹陷东侧是钓鱼岛隆褶带，西侧是海礁—虎皮礁隆起，西南与钓北凹陷相邻，北与福江凹陷相接（图 1）。西湖凹陷在构造上具有东西分带和南北分区的特点，凹陷由西往东依次可分为西部斜坡带、中央反转构造带和东部断裂隆起带。



**Figure 1. The structural location map of Xihu Sag**  
**图 1. 西湖凹陷构造位置图**

从统计的岩石类型来看，西湖凹陷碎屑岩储层主要为长石岩屑质石英砂岩、岩屑质长石砂岩、其次长石石英砂岩和岩屑石英砂岩，长石质或岩屑质石英砂岩和长石质岩屑砂岩相对较少。其特点是长石和岩屑

含量高(图2),磨圆度多为次圆—一次棱角状,总体上反映成分成熟度相对较低,这都为深层溶蚀作用创造了条件。

### 3 成岩作用类型

通过大量岩石薄片和铸体薄片观察等分析,表明研究区成岩作用主要有机械压实作用、胶结作用、交代作用、自生高岭石的沉淀作用、溶解和溶蚀作用;次要成岩作用有火山岩屑绢云母化、自生伊利石和绿泥石沉淀作用、钠长石化作用等。

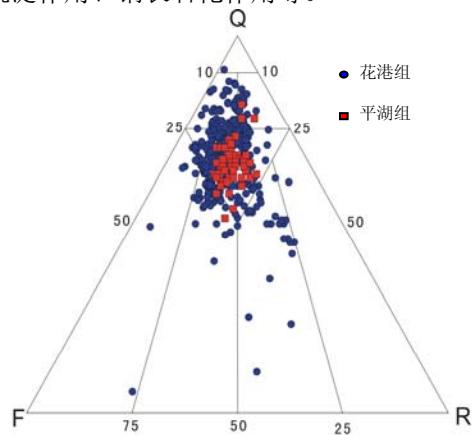


Figure 2. Rock types of the sandstone of Paleogene in Xihu Sag  
 图 2. 西湖凹陷古近系砂岩岩石类型

### 3.1 机械压实作用

机械压实作用主要发生于早成岩阶段,压实作用是本区原生孔隙减少的最主要原因之一,经薄片观察估算由于压实作用损失的原生孔隙高达3~25%。压实作用在研究区主要表现为:(1)颗粒发生定向排列,由于埋深加大,地层压力增加,一方面使云母、泥岩岩屑等软颗粒发生受压弯曲、伸长或被硬碎屑嵌入,另一方面使碎屑颗粒长轴近于水平方向定向排列(图版1)。(2)使刚性颗粒发生破裂。主要是石英,当上覆压力超过颗粒抗压强度时,颗粒沿其薄弱面破裂,产生微细应力纹和裂缝,以及电气石等重矿物碎裂,并使碎屑颗粒间呈缝合接触甚至凹凸接触。(3)碎屑颗粒接触更加紧密。随埋深增加,颗粒接触关系渐趋紧密,由点线接触到凹凸接触、最后到缝合接触,机械压实作用使砂体原生孔隙大为减少。随着埋藏深度加大,开始出现化学压溶作用,研究区内常见石英颗粒的压溶作用现象,可以见到石英颗粒成缝合线接触,影响储层的渗透能力(图版2)。

## 3.2 胶结作用

研究区胶结作用主要为硅质胶结作用、碳酸盐胶结作用和粘土矿物的胶结作用。

### 3.2.1 硅质胶结作用

硅质胶结在西湖凹陷古近系砂岩中普遍发育，其含量一般为3~12%，最高可达15%以上。石英颗粒次生加大边形式最为常见，薄片和扫描电镜下，常以雏晶状分布在颗粒表面形成I级加大、或在颗粒表面连接成较大晶面形成II级加大（图版3）。研究区硅质胶结中 $\text{SiO}_2$ 的来源主要有以下几种：①刚性石英颗粒由于压溶作用可提供部分 $\text{SiO}_2$ ；②粘土矿物在转化过程中如蒙脱石向高岭石转化可提供部分 $\text{SiO}_2$ ；③酸不稳定矿物如斜长石、钾长石以及由这些矿物组成的花岗岩屑中普遍发生过溶蚀作用，在该反应中一个单位体积的钾长石可产生0.43个单位体积的 $\text{SiO}_2$ 。

### 3.2.2 碳酸盐胶结作用

研究区碳酸盐胶结作用较为发育（图版4），碳酸盐胶结物含量一般为2~20%，最高可达30%。研究区碳酸盐胶结物在成岩早期、中期和晚期均有发育，其中成岩早期主要为泥晶方解石，晶形通常为泥晶和微晶，胶结物是直接从砂层孔隙水中沉淀形成的；成岩中期主要为粉—细晶方解石胶结物，成岩晚期由于地层埋藏深度大，温度和压力增高，在高温缺氧的还原环境下，主要形成含铁的碳酸盐矿物。碳酸盐胶结是本区破坏储层的主要因素，包括方解石和铁方解石，白云石和铁白云石。早期的碳酸盐胶结物有利于保存粒间体积空间，使岩石体积不至于因为机械压实作用而下降，从而对晚成岩期溶解作用的发生和次生孔隙的形成有特别重要的意义。

### 3.2.3 粘土矿物的胶结作用

结晶高岭石是砂岩中常见的自生粘土矿物胶结物，多充填于粒间或附着于颗粒表面，电镜下观察呈蠕虫状或书页状集合体（图版5），阴极发光显微镜下呈暗兰色。砂岩碎屑颗粒间的溶蚀孔内常见到自生高岭石充填，粉晶级的高岭石呈典型的书页状晶形，因而保留了良好的晶间隙，是盆地储层重要的储集空间组成部分。

## 3.3 交代作用

（1）碎屑颗粒的碳酸盐化：包括方解石、铁方解石、铁白云石对碎屑颗粒石英、岩屑和粘土矿物的交

代作用。偏光镜下观察，交代作用往往是从颗粒边部开始，随着深度加大，铁方解石和铁白云石的交代现象越发育。

（2）碎屑颗粒的粘土化：火山岩岩屑普遍发生绢云母化、水云母化、高岭石化、伊利石化等作用，研究区不同岩性、不同的火山岩屑类型各种蚀变作用有所差别。在中粗粒砂岩中中酸性喷出岩岩屑多发生高岭石化，而在细砂岩中易发生绢云母化、水云母化，这可能是由于不同岩性在成岩中孔隙结构发生不同的变化，从而使孔隙流体的活动有所差别而形成不同的成岩环境所致。研究区在晚成岩早期孔隙水主要为酸性环境，其中的高岭石化作用明显较为发育，高岭石化可以产生一定的微孔隙，对于有效储层的形成有一定的贡献。

## 3.4 溶解作用

溶解作用对改善本区储层物性起着决定性作用，区内溶解作用可表现为对颗粒以及杂基、胶结物的溶解等，也有利于形成储层。

（1）岩屑的溶解：研究区长石岩屑石英砂岩和岩屑砂岩中中酸性喷出岩屑较发育，在这些岩屑中长石斑晶可优先溶蚀，形成粒内蜂窝状溶孔，若溶蚀完全则形成铸模孔（图版6）。

（2）碳酸盐胶结物、交代物的溶解：区内碳酸盐胶结物以方解石为主，到晚成岩作用阶段，无论是早期嵌晶方解石，还是晚期含铁方解石均可被溶解，砂体显得很“疏松”，有的颗粒间未完全溶解，可见方解石残余；交代物的溶解指的是一些交代矿物的溶解，有的矿物直接溶解一般不大可能，比如石英。要求 $\text{PH}>9$ ，而这种强碱性环境本区不易达到，所以最合理的解释是先被碳酸盐交代，然后碳酸盐又溶解，所以石英、某些岩屑等的溶解一般是间接进行的。

（3）杂基的溶解：本区常见高岭石被溶解形成晶内微溶孔，而且很少被再充填，对改善储层的渗透能力起到一定作用。

## 3.5 火山岩屑绢云母化

在古近纪，研究区的物源区岩浆、火山喷发剧烈，提供了丰富的沉积物质，常钻遇火山凝灰岩层（图版7）。碎屑砂岩中含有大量的火山岩屑，由于其中富含微细的长石晶体和火山玻璃，在埋藏地层水作用下，容易发生绢云母化，多为低温热液蚀变产物。在研究区古近系各组地层中碎屑岩普遍出现，可指示酸性流

体的参与成岩反应。绢云母在成分上与白云母相似，只是颗粒比较细小，有时火山岩屑受压实作用改造变成假杂基后，再绢云母化形成的细小鳞片容易堵塞孔隙喉道。

### 3.6 自生伊利石和绿泥石沉淀作用

粘土矿物在本区古近系砂岩有广泛的分布，主要有自生伊利石和绿泥石。伊利石常呈蜂窝状、丝缕状和搭桥状产在颗粒表面和孔隙中。伊利石形成于富含  $K^+$  的弱碱性溶液或在成岩过程中由其它矿物转变而来，随着埋藏深度的增加其结晶程度变好，最后绢云母化。实际上，在成岩作用的过程中，蒙脱石向伊利石和绿泥石的转化往往要经由混合阶段，即伊/蒙混层和伊/绿混层，其形成主要有两个途径：一是钾和钠的途径，可能通过钠板石类型的规则（有序）混层形成伊利石；另一个是镁的途径，可能通过柯绿泥石类型的规则混层而形成绿泥石。自生绿泥石单体形态多呈针叶片状，集合体为鳞片状、玫瑰花朵状以及绒球状。针状叶片状自生绿泥石多以孔隙包裹在颗粒表面，通过在粒表形成薄膜阻碍其它自生矿物的生长来保护原生粒间孔隙，常与石英共生。一般是蒙脱石在淋滤作用有限的情况下，并有镁离子供应的碱性条件下形成，也可以有高岭石和伊利石在还原条件下转变而来，通常发育于埋深约 2500m 以下成岩作用强烈的储层中。

### 3.7 钠长石化作用

钠长石化是指钠长石的次生加大作用，自生长石的形成要求孔隙溶液中有足够的溶解二氧化硅  $\text{SiO}_2$  和三氧化二铝  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的浓度，以及足够的  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  比值、比较高的温度，因此多形成于晚成岩期。本区自生钠长石多形成于长石颗粒溶蚀残骸上，呈现完好的柱状晶体（图版 8），它的存在可以指示含  $\text{Na}^+$  流体的活动。

#### 4 成岩阶段划分及孔隙演化模式

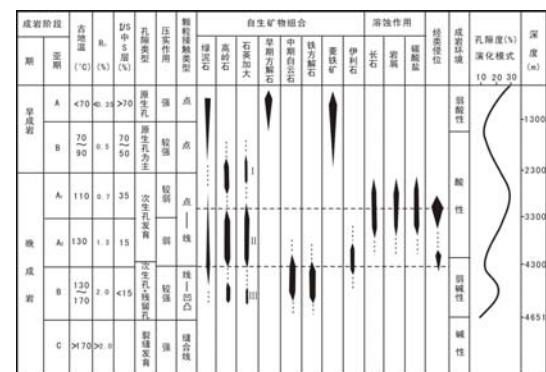
根据西湖凹陷古近系地温梯度、镜质体反射率( $Ro$ )和自生矿物组合等标志,认为西湖凹陷古近系总体处于晚成岩A<sub>2</sub>期,局部达到成岩B期<sup>[4-6]</sup>,由于它们分别处于不同的地质构造背景,其成岩作用和孔隙演化也有所差异。

#### 4.1 西斜坡带成岩历史及演化模式

西斜坡的成岩演化如下(图3):早成岩A期,埋深小于1300m,古地温低于70℃,有机质未成熟,岩石处于弱固结状态,机械压实对孔隙度影响较大,原生

粒间孔为主,局部见早期方解石和菱铁矿及绿泥石膜,成岩作用主要为压实作用和少量的方解石胶结和菱铁矿环边胶结;早成岩B期,埋深1300—2300m,古地温为70—90℃,0.35%<Ro<0.5%,有机质半成熟,成岩仍以机械压实为主,粒间孔明显减少,可见石英I级加大,自生高岭石发育;晚成岩A<sub>1</sub>期,埋深2300—3300m,古地温为90—110℃,0.5%<Ro<0.7%,有机质低成熟,点-线接触,次生孔大量发育,可见石英II级加大,自生高岭石发育;晚成岩A<sub>2</sub>期,埋深3300—4500m,古地温为110—130℃,0.7%<Ro<1.3%,有机质成熟,线接触,次生孔隙大量发育,石英III级加大,出现晚期含铁碳酸盐交代物;晚成岩B期,埋深大于4500m,古地温130—170℃,1.3%<Ro<2.0%,有机质高成熟,凹凸接触,次生孔隙压缩,石英加大边遭受溶蚀,连晶状晚期碳酸盐发育,交代作用强。

西斜坡地区地温梯度较低, 镜质体反射率  $Ro$  最大在 1.0% 左右, 以晚成岩 A2 阶段为主, 孔隙流体以酸性为主, 其次生孔隙发育。典型成岩演化序列可以归纳为: 早期机械压实—早期方解石沉淀—岩屑绢云母化—有机酸流体进入—长石、岩屑溶蚀—次生孔隙+自生高岭石+自生石英—液态烃类侵位—伊利石沉淀—晚期气态烃充注—晚期亚铁碳酸盐充填交代。



**Figure 3. Characteristics of diagenetic sequence and pore evolution in West Slope in Xihu Sag**

图 3. 西湖凹陷西斜坡成岩序列及孔隙演化特征

## 4.2 中央隆起带成岩历史及演化模式

中央隆起带的成岩演化如下(图4):早成岩A期,埋深小于1500m,古地温低于70℃,有机质未成熟,岩石处于弱固结状态,机械压实对孔隙度影响较大,原生粒间孔为主,局部见早期方解石和菱铁矿及绿泥石膜,成岩作用主要为压实作用和少量的方解石胶结和菱铁矿环边胶结;早成岩B期,埋深1500—2000m,

古地温为 70—90°C, 0.35%<Ro<0.5%, 有机质半成熟, 成岩仍以机械压实为主, 粒间孔明显减少, 可见石英 I 级加大, 自生高岭石发育; 晚成岩 A<sub>1</sub> 期, 埋深 2000—3000m, 古地温为 90—110°C, 0.5%<Ro<0.7%, 有机质低成熟, 点-线接触, 次生孔大量发育, 可见石英 II 级加大, 自生高岭石发育; 晚成岩 A<sub>2</sub> 期, 埋深 3000—4500m, 古地温为 110—130°C, 0.7%<Ro<1.3%, 有机质成熟, 线接触, 次生孔隙大量发育, 石英 III 级加大, 出现晚期含铁碳酸盐交代物; 晚成岩 B 期, 埋深大于 4500m, 古地温 130—170°C, 1.3%<Ro<2.0%, 有机质高成熟, 凹凸接触, 次生孔隙压缩, 石英加大边遭受溶蚀, 连晶状晚期碳酸盐发育, 交代作用强。

中央隆起带地温梯度中等, 镜质体反射率 Ro 最大在 1.4% 左右, 以晚成岩 A<sub>2</sub> 阶段为主, 孔隙流体为酸性为主, 次生孔隙较发育。该区典型成岩演化序列可归纳为: 早期机械压实—早期方解石沉淀—岩屑绢云母化—有机酸流体进入—长石、岩屑溶蚀—次生孔隙+自生高岭石+自生石英—少量烃类侵位—烃类二次侵位—晚期亚铁碳酸盐充填交代。

#### 4.3 龙井构造带成岩历史及演化模式

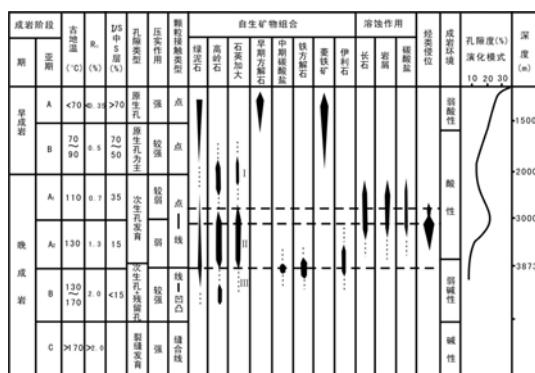


Figure 4. Characteristics of diagenetic sequence and pore evolution in the central uplift area in Xihu Sag

图 4. 西湖凹陷中央隆起带典型成岩序列及孔隙演化特征

龙井构造带的成岩演化如下(图 5): 早成岩 A 期, 埋深小于 1100m, 古地温低于 70°C, 有机质未成熟, 岩石处于弱固结状态, 机械压实对孔隙度影响较大, 原生粒间孔为主, 局部见早期方解石和菱铁矿及绿泥石膜, 成岩作用主要为压实作用和少量的方解石胶结和菱铁矿环边胶结; 早成岩 B 期, 埋深 1100—2000m, 古地温为 70—90°C, 0.35%<Ro<0.5%, 有机质半成熟; 成岩仍以机械压实为主, 粒间孔明显减少, 可见石英

I 级加大, 自生高岭石发育; 晚成岩 A<sub>1</sub> 期, 埋深 2000—2900m, 古地温为 90—110°C, 0.5%<Ro<0.7%, 有机质低成熟; 点-线接触, 次生孔大量发育, 可见石英 II 级加大, 自生高岭石发育; 晚成岩 A<sub>2</sub> 期, 埋深 2900—3600m, 古地温为 110—130°C, 0.7%<Ro<1.3%, 有机质成熟, 线接触, 次生孔隙大量发育, 石英 III 级加大, 出现晚期含铁碳酸盐交代物; 晚成岩 B 期, 埋深大于 3600m, 古地温 130—170°C, 1.3%<Ro<2.0%, 有机质高成熟, 凹凸接触, 次生孔隙压缩, 石英加大边遭受溶蚀, 连晶状晚期碳酸盐发育, 交代作用强。

龙井构造带地温梯度较高, 镜质体反射率 Ro 最大在 2.0% 左右, 以晚成岩 B 阶段为主, 孔隙流体为弱碱性, 铁方解石胶结作用强烈, 次生孔隙不发育。该区典型成岩演化序列可归纳为: 早期机械压实—早期方解石沉淀—岩屑绢云母化—有机酸流体进入—长石、岩屑溶蚀—次生孔隙+自生高岭石+自生石英—少量烃类侵位—强压实(颗粒线—凹凸接触+孔隙压缩)—中晚期亚铁碳酸盐充填交代+石英溶蚀。

#### 5 结论

(1) 西湖凹陷古近系储层主要为长石岩屑质石英砂岩和岩屑质长石砂岩, 多为中孔中渗和低孔低渗储集层, 该区储层主要经历了机械压实作用、胶结作用、交代作用、溶解作用等成岩作用, 储集砂岩原生孔隙大部分被破坏, 以次生孔隙为主。

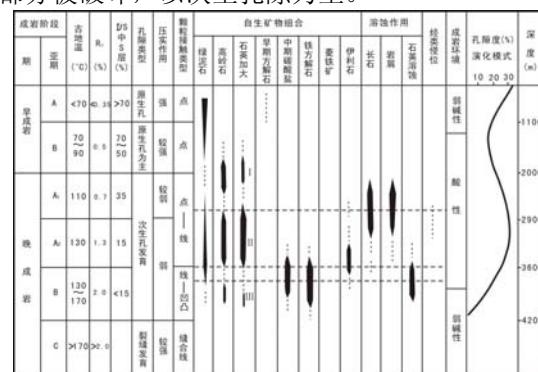


Figure 5. The typical characteristics of diagenetic sequence and pore evolution in the Longjing belt in Xihu Sag

图 5. 西湖凹陷龙井构造带典型成岩序列及孔隙演化特征

(2) 古地温和镜质体反射率分析表明该区储层次生孔隙发育带深度一般在 2000—4000m 左右, 两个次生孔隙发育带分别对应于晚成岩 A<sub>1</sub> 期和晚成岩 A<sub>2</sub> 期。

(3) 研究去不同地区成岩演化程度不同, 其中工区北部龙井构造区演化程度高, 已进入晚成岩 B 期,

工区大部分地区处于晚成岩 A<sub>2</sub>期,因此除北部龙井构造区外,西湖凹陷古近系具备良好的储集条件。

## References (参考文献)

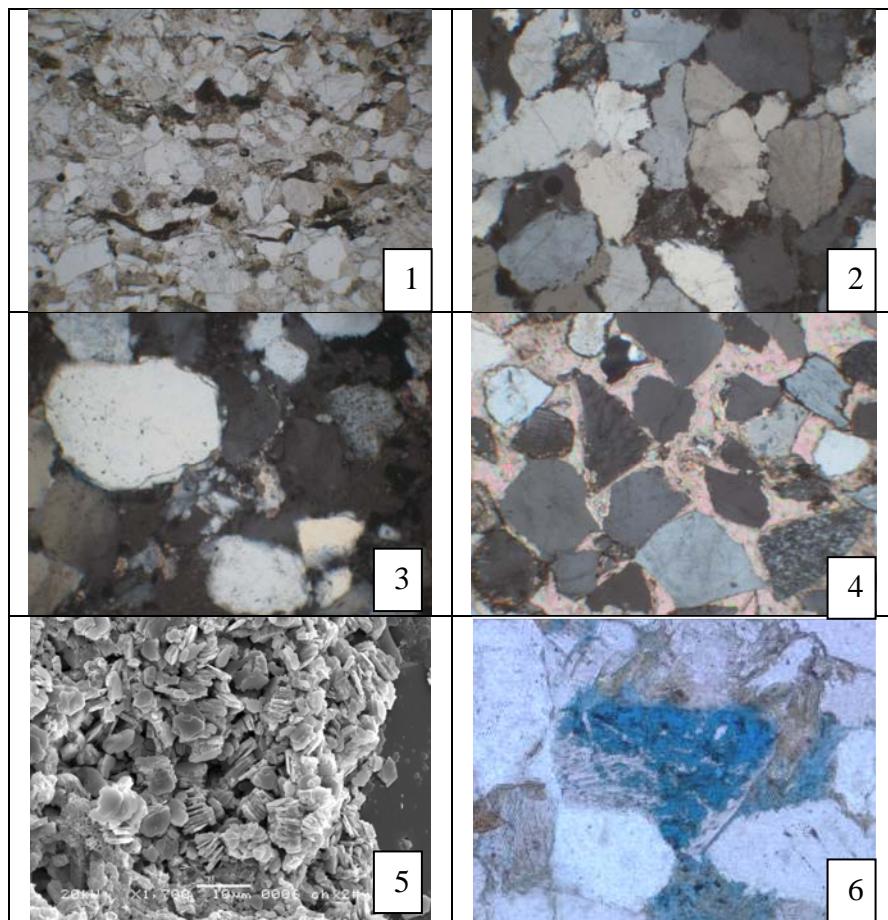
- [1] Pu Qingnan, Liang Lianxi, Yan Baoxing. Secondary Minerals' Analysis of Reservoir Sandstones in Xihu Sag of East China Sea Shelf Basin[J]. Shanghai Geology, 1995, 54(2): 46—61  
蒲庆南、梁连喜、杨宝星。东海西湖凹陷下第三系储层砂岩自生矿物研究[J]。上海地质, 1995, 54(2): 46—61
- [2] Zhang Jianpei, Ge Heping, Qi Binwen. Characteristics of authigenic kaolinite in sandstones of Xihu Sag and it's impact on reservoir physical properties [J]. OFFSHORE OIL, 2009, 29 (1) : 1—8  
张建培、葛和平、漆滨汶。西湖凹陷砂岩自生高岭石发育特征及其对储层物性的影响[J]。海洋石油, 2009, 29 (1) : 1—8
- [3] You Guoqing, Pan Jiahua, et al. Diagenesis and pore evolution of Paleogene sandstone reservoir in Dongying depression [J].

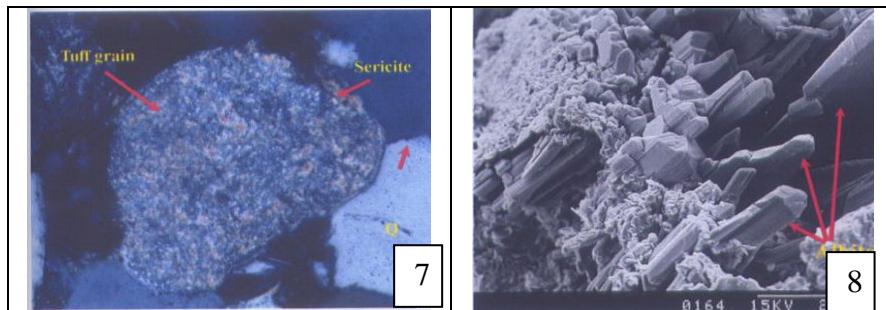
ACTA PETROLOGICA ET MINERALOGICA, 2006, 25 (3) : 237—242

游国庆、潘家华等。东营凹陷古近系砂岩成岩作用与孔隙演化[J]。岩石矿物学杂志, 2006, 25 (3) : 237—242

- [4] Hu Mingyi, Hu Zhihua, et al. Diagensis And Porosity Evolution of Tertiary Reservoirs in Kumukuli Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technolog, 2008, 30 (2) : 421—424  
胡明毅、胡治华等。库木库里盆地第三系储层成岩作用及孔隙演化研究[J]。石油天然气学报, 2008, 30 (2) : 421—424
- [5] Liu Menghui, Zhao Chenglin. Diagenetic model of reservoir rocks in clastic rocks [J]. Bei Jing: Petroleum University Press, 1993, 25~51 刘孟慧、赵澄林。碎屑岩储集岩的成岩模式[M]。北京: 石油大学出版社, 1993, 25~51
- [6] Jiang Shu, et al. Diagenesis of Liaozhong sag in Liaohe depression and pore evolution in its middle-deep strata [J]. OIL& GAS GEOLOGY, 2007, 28 (3) : 362—369  
蒋恕。辽河坳陷辽中凹陷成岩作用与中深层孔隙演化[J]。石油与天然气地质, 2007, 28 (3) : 362—369

## 图版及说明




**图版说明:**

1. 机械压实作用强烈, 颗粒具有定向排列, 云母碎片呈弯曲状。PH1 井, 2329.1 米, 单偏光。2. 化学压溶作用, 颗粒呈缝合状接触。HY14-1-1 井, 3039.0 米, 正交光。3. 石英次生加大胶结, 石英次生加大边不连续, II 级加大。PH2 井, 3508.68 米, 正交光。4. 强烈的铁方解石胶结作用, 基底式胶结作用。DH1 井, 3683.5 米, 正交光。5. 充于粒间孔隙中的片状高岭石集合体。CHX2 井, 2678.3 米, 花岗组。6. 岩屑粒内溶孔。DH1 井, 3412.80 米, 花上段。7. 磨圆的火山岩屑绢云母化。HY7-1-1 井, 3416.75 米。8. 斜长石表面发生钠长石化作用。PH5 井, 2935.05 米。