文章编号：1004—5589（2018）01—0171—14

北黄海盆地东部坳陷下白垩统砂岩成岩作用及其储层意义

宫辰，程日辉，沈艳杰，高丹

吉林大学 地球科学学院，长春 130061

摘要：通过对取芯井砂岩镜下特征及孔隙度渗透率变化的分析，研究了北黄海盆地东部坳陷下白垩统砂岩的成岩作用及其储层意义。结果显示，储层砂岩类型以长石砂岩、长石石英砂岩和岩屑石英砂岩为主，处于中成岩作用阶段的A亚期末期至B亚期早期。主要的成岩作用类型有压实作用、压溶作用、胶结作用、交代作用、蚀变作用、溶蚀作用和重结晶作用，主要孔隙类型有粒间孔隙、粒内孔隙、填隙物内孔隙和次生裂缝。长石砂岩是主要储层。压实作用、压溶作用、胶结作用和重结晶作用使砂岩孔隙度减小，降低了储层物性，起到破坏性作用；交代作用、蚀变作用和溶蚀作用使砂岩孔隙度增大，改善了储层物性，起到建设性作用。孔隙度和渗透率整体上由浅变深而呈现由大到小趋势，在深度为3 000～3 020 m和3 140～3 250 m时出现异常高值，孔隙度与渗透率的异常高值带是次生孔隙发育带。

关键词：成岩作用；储层意义；北黄海盆地；下白垩统

中图分类号：P534.53；P512.2　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2018.01.015

Sandstone diagenesis and its reservoir significance of Lower Cretaceous in North Yellow Sea Basin

GONG Chen, CHENG Ri-hui, SHEN Yan-jie, GAO Dan

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: The sandstone diagenesis and its reservoir significance of Lower Cretaceous in North Yellow Sea Basin are studied by the analysis of the thin sections of sandstone and variation of porosity and permeability. The research shows that the reservoir sandstones are mainly composed of feldspar sandstone, feldspar quartz sandstone and lithic quartz sandstone. The sandstone reservoirs are in the late stage of the A-sub-period to early stage of B-sub-period in the middle diagenesis stage. The main types of diagenesis in studied area are compaction, pressure dissolution, cementation, metasomatism, alteration, dissolution and recrystallization. The main types of porosity are intergranular pores, intracellular pores, interstitial pores and secondary cracks. Feldspar sandstone is the main reservoir. Compaction, pressure dissolution, cementation and recrystallization decrease the porosity of sandstone and reduce the physical properties of the reservoir and play a destructive effect. Metasomatism, alteration and dissolution increase sand porosity, improve the physical properties of the reservoir, and play a constructive role. The porosity and permeability of the coring section decrease with depth and are abnormally high at depths of 3 000 ~ 3 020 m and 3 140 ~ 3 250 m, which are the secondary pore development zone.

收稿日期：2017-05-02；**改回日期**：2017-08-22

基金项目：松辽盆地营城组火山物质分散-堆积及火山机构重建项目（41602106）.

通讯作者：程日辉（1963-），男，教授，博士生导师，主要从事沉积学与石油地质研究. E-mail：chengrh@jlu.edu.cn

Key words: diagenesis; reservoir significance; North Yellow Sea Basin; Lower Cretaceous

0 引言

北黄海盆地位于中朝板块东南部[1]，南接临津江造山带和胶东隆起，北邻辽东隆起[2,3]，是印支—燕山运动时期发育的中新生代克拉通陆内断陷盆地（图1a）[4,5]。北黄海盆地由东部坳陷、中央隆起、中部坳陷、中西部隆起、西部坳陷及南部凹陷群6个二级构造单元构成[5]。本文研究的东部坳陷，发育有3凹4凸7个三级构造单元（图1b）[5]，是北黄海盆地最具勘探前景的一个坳陷，其内发育巨厚的中生界，油气生成和储集条件良好。中生界自下而上依次为中侏罗统、上侏罗统和下白垩统（图2）[6]，中、上侏罗统主要发育泥岩，是生油层，下白垩统发育着大量砂岩，是最主要的勘探目的层段，为储集层[5-7]。

北黄海盆地是中国近海勘探和研究程度较低的含油气盆地[8]。储层致密是制约该区油气勘探的因素之一，因此本文从成岩作用的角度，分析储层发育特征。北黄海盆地东部坳陷中Ⅱ构造带中的A井（图1b）所取岩芯样品充足，下白垩统储层砂岩发育良好。A井钻遇的下白垩统发育两个层序，K_1SQ1与K_1SQ2（图2）。K_1SQ1发育低位体系域、水进体系域和高位体系域：低位域主要发育细砂岩与粉砂岩，上部含有部分红褐色泥岩层；水进域红褐色泥岩发育较多，上部粉砂岩含量开始增多；高位域主体岩性以砂岩为主，含有砂砾岩、粉砂岩与细砂岩3种类型，泥岩以夹层形式出现，含量较少。K_1SQ2发育低位体系域、水进体系域：低位域以砂岩与砂砾岩发育为主，夹有少量红褐色泥岩层；水进域主要发育灰褐色泥岩，红褐色泥岩内含有少量浊流沉积的粉砂岩层。本次研究的取芯段在K_1SQ1（下白垩统层序1）内，主要利用A井所取砂岩样品详细描述下白垩统储层的砂岩类型、砂岩成岩作用特点及砂岩孔隙类型，综合分析孔隙度随深度变化规律，砂岩类型和成岩作用对储层物性的影响。

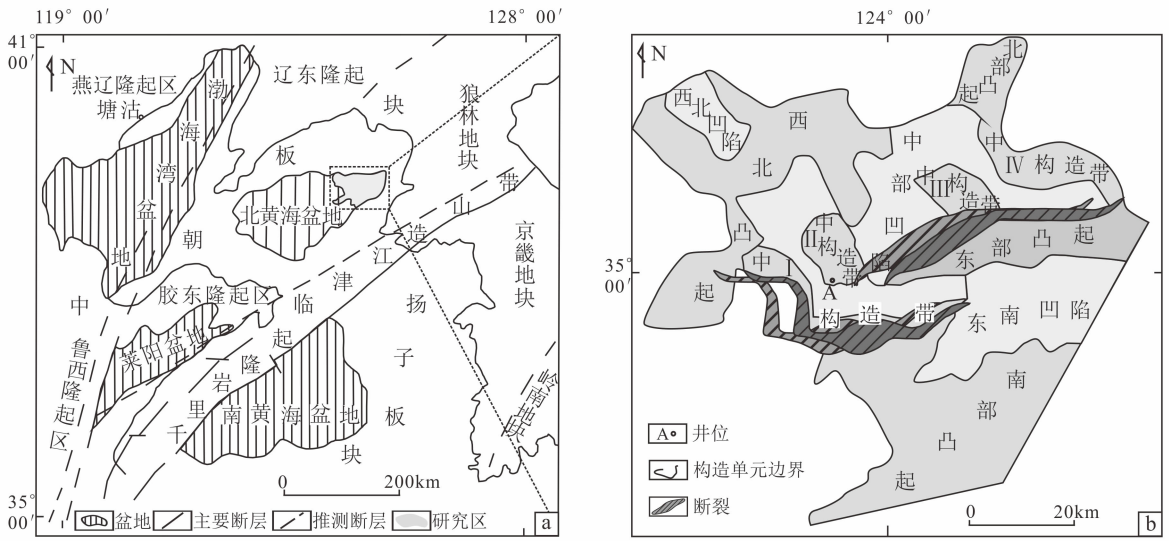


图1 北黄海盆地大地构造图（a）及盆地东部坳陷位置图（b）[3,5]

Fig. 1 Geodetic map of North Yellow Sea Basin (a) and location map of its eastern depression

1 岩石类型

A井下白垩统砂岩的基本类型包括长石砂岩、长石石英砂岩和岩屑石英砂岩3大类，进一步根据成分和粒度再细化分为7小类（表1），分别为含凝灰质长石粗砂岩（图3a）、凝灰质长石中砂岩（图3b）、凝灰质长石石英中砂岩（图3c）、凝灰质长石石英粗砂岩、含钙质岩屑石英中砂岩（图

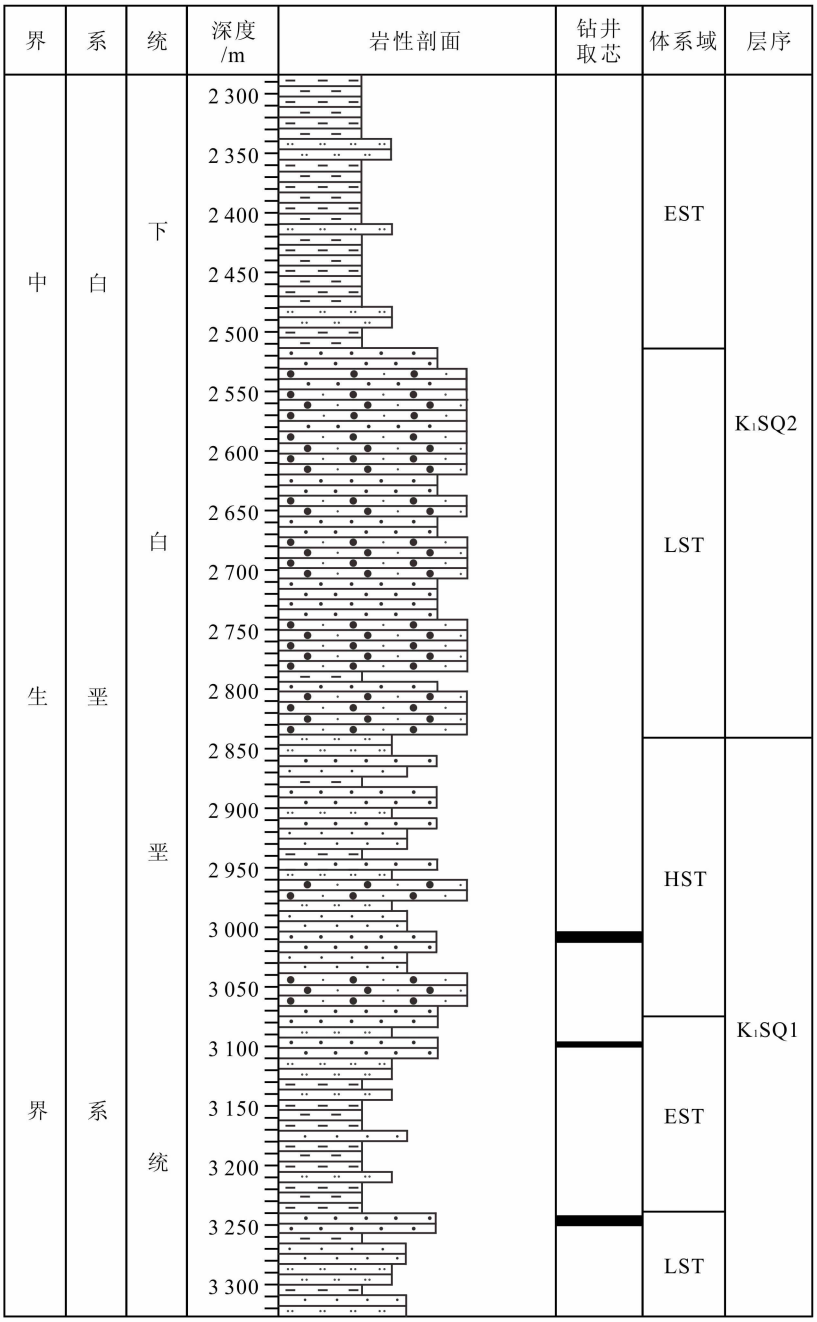
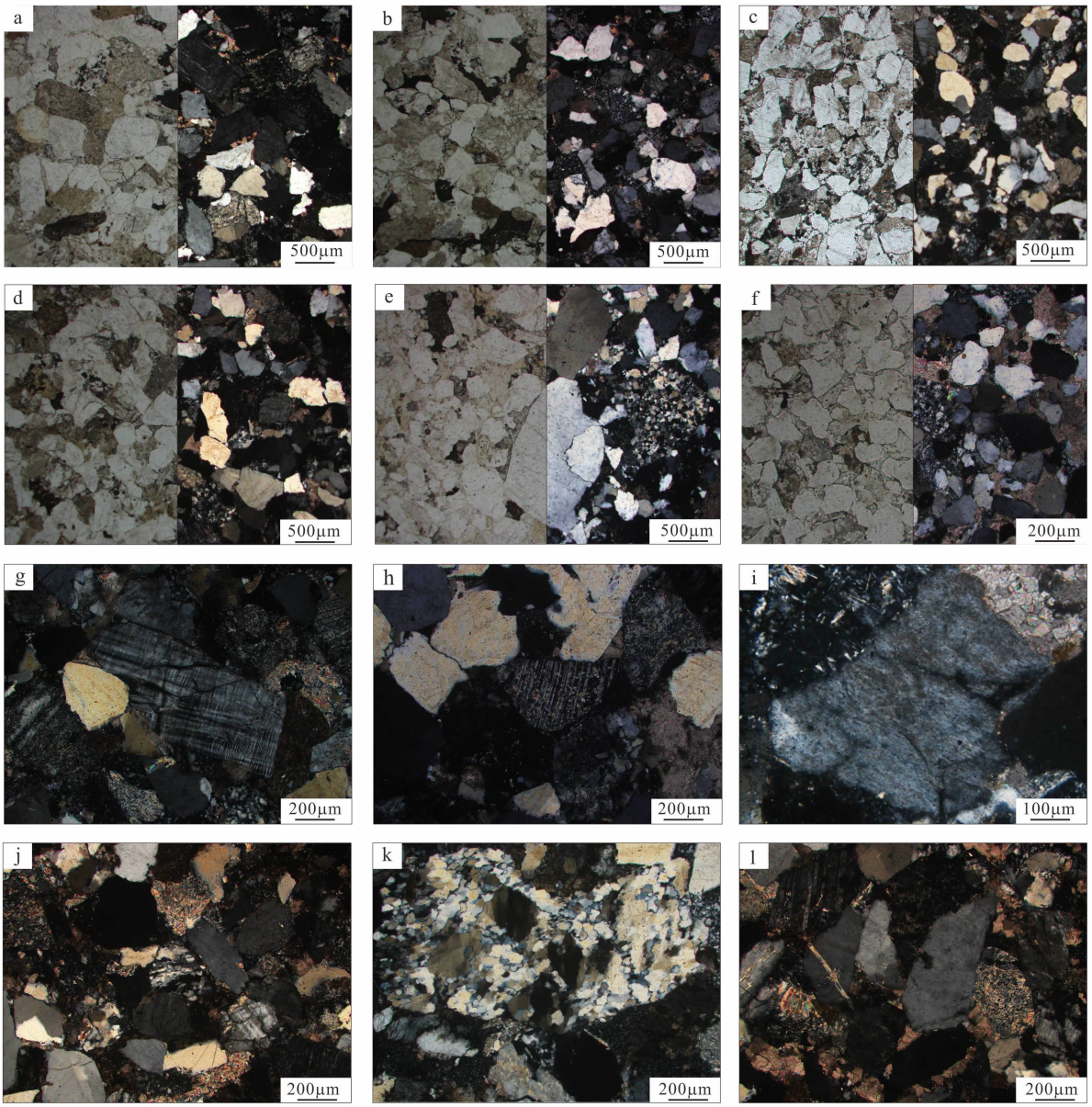


图 2　北黄海盆地 A 井综合柱状图

Fig. 2　Composite column of Well A in North Yellow Sea Basin

3d)、凝灰质含砾岩屑石英中砂岩（图 3e）及钙质胶结岩屑石英细砂岩（图 3f)。砂岩中碎屑归为石英、长石和岩屑三种，颗粒间的填隙物有胶结物和基质两种，其他矿物主要是白云母。石英有多晶和单晶两种，石英晶形较为完整，多为次棱角状，部分颗粒被溶蚀，且孔内为硅质充填；长石主要为酸性斜长石，少量的碱性长石、微斜长石和条纹长石等，且有蚀变的长石；岩屑以花岗岩和流纹岩岩屑为主，含少量沉积岩屑，花岗岩屑中长石常蚀变成绢云母和黏土；杂质主要为凝灰质和泥质两种物质，凝灰质部分发生黏土矿化，胶结物主要为钙质和黏土矿物，硅质较少。



a. 含凝灰质长石粗砂岩 A-b42（×43 012.61 m）；b. 凝灰质长石中砂岩 A-b44（×43 010.81 m）；c. 凝灰质长石石英中砂岩 A-b52（×43 003.84 m）；d. 含钙质岩屑石英中砂岩 A-b47（×43 010.50 m）；e. 凝灰质含砾岩屑石英中砂岩 A-b27（×43 244.10 m）；f 钙质胶结岩屑石英细砂岩 A-b8（×103 250.84 m）；g. 微斜长石格子双晶 A-b42（×103 012.61 m）；h. 斜长石绢云母化，聚片双晶 A-b44（×103 010.81 m）；i. 斜长石黏土矿化 A-b44（×203 010.81 m）；j. 玉髓 A-b52（×103 003.84 m）；k. 花岗岩屑 A-b52（×103 003.84 m）；l. 结晶方解石 A-b47（×103 010.50 m）.

图 3 北黄海盆地 A 井下白垩统主要砂岩亚类显微镜下特征照片

Fig. 3 Main characteristics of micrographs of Lower Cretaceous sandstone subclass of Well A in North Yellow Sea Basin

1.1 长石砂岩

长石砂岩包括含凝灰质长石粗砂岩和凝灰质长石中砂岩。含凝灰质长石粗砂岩的胶结类型主要为颗粒支撑孔隙胶结，主要为泥质胶结，少量钙质和凝灰质胶结（图 3a），凝灰质物质含量较少。主要矿物成分为石英，石英颗粒多为次棱角状，少部分为次圆状，且石英表面较为干净。长石含量约占含凝灰质长石粗砂岩的 30%，主要发育斜长石，碱性长石含量较少，可见微斜长石（图 3g）。长石表面蚀变较为严重，部分中基性斜长石发生绢云母化

表 1　A 井取芯段砂岩类型统计表

Table 1　Statistics of sandstone type of the core in Well A

类型	岩性
长石砂岩	含凝灰质长石粗砂岩
	凝灰质长石中砂岩
长石石英砂岩	凝灰质长石石英中砂岩
	凝灰质长石石英粗砂岩
岩屑石英砂岩	含钙质岩屑石英中砂岩
	凝灰质含砾岩屑石英中砂岩
	钙质胶结岩屑石英细砂岩

或黏土矿化现象，只有少数斜长石颗粒表面可见聚片双晶；微斜长石镜下可见格子双晶，矿物颗粒发生刚性破裂，破裂处被轻微蚀变（图 3g），沿裂缝发生了高岭土化。岩屑含量约占 5%，主要为花岗质和流纹质岩屑。

凝灰质长石中砂岩的胶结类型亦为颗粒支撑孔隙胶结，颗粒分选中等，多为棱角状，少数次圆状（图 3b）。主要矿物成分为石英，长石含量约为 28%，主要为酸性斜长石和碱性长石。酸性斜长石表面发生轻微绢云母化，可见聚片双晶（图 3h），中基性斜长石表面蚀变作用强，发生黏土矿化（图 3i）。岩屑为花岗岩屑，其含量 <5%。基质主要为凝灰质，含少量泥质成分（图 3h）。部分凝灰质发生强烈蚀变，组分内细小的石英颗粒，是脱玻化产物，部分未发生蚀变的凝灰质正交镜下呈现全消光，表现玻璃质特征。

1.2　长石石英砂岩

凝灰质长石石英中砂岩的胶结类型为颗粒支撑孔隙胶结（图 3c）。主要矿物成分为棱角状石英，包括单晶石英和多晶石英两种（图 3c）。样品中少部分结晶程度低的硅质没有形成石英颗粒而发育成玉髓（图 3j）。长石含量约占 15%，部分长石被钙质交代，发生绢云母化。岩屑百分含量约占 5%，主要为花岗岩屑（图 3k），岩屑内斜长石部分发生绢云母化。基质为凝灰质，部分被钙质交代，少部分发生绢云母化。

凝灰质长石石英粗砂岩占所有砂岩的百分含量约为 3.3%，镜下观察的岩性特征和凝灰质长石石英中砂岩基本相同，仅粒度更粗一些。

1.3　岩屑石英砂岩

岩屑石英中砂岩的胶结类型为杂基支撑基底胶结和颗粒支撑孔隙胶结间的过渡类型（图 3d）。颗粒分选中等，磨圆多数为次棱角状，少数为棱角状。主要矿物类型为石英，磨圆较差。长石含量极少，岩屑含量约为 10%，主要为流纹岩屑，有少量黑色炭屑混入（图 3j）。基质有黏土质和凝灰质两种，部分凝灰质脱玻化成隐晶质。胶结物成分为钙质，有部分为交代作用形成的方解石。

凝灰质含砾岩屑石英中砂岩的胶结类型为颗粒支撑孔隙胶结，颗粒为次棱角状，分选差（图 3e）。主要矿物类型为石英，部分石英颗粒 > 1 mm。岩屑含量约为 10%，主要为流纹岩屑（图 3k）。基质为凝灰质，部分脱玻化成细小石英颗粒和未脱玻化的凝灰质充填在颗粒孔隙中。

钙质胶结交代的岩屑石英细砂岩的胶结类型为杂基支撑基底胶结，局部为颗粒支撑孔隙胶结（图 3f）。主要矿物类型为石英，岩屑类型为流纹岩屑（图 3l），含量较少（ <10%）。胶结物为钙质，含量约为 30%，充填于整个岩石之中（图 3f，图 3l）。长石部分被钙质交代，发生轻微破裂。镜下可观察到条状黑色被炭化的有机质，且可见少量沿石英边部生长的片状白云母（图 3l）。

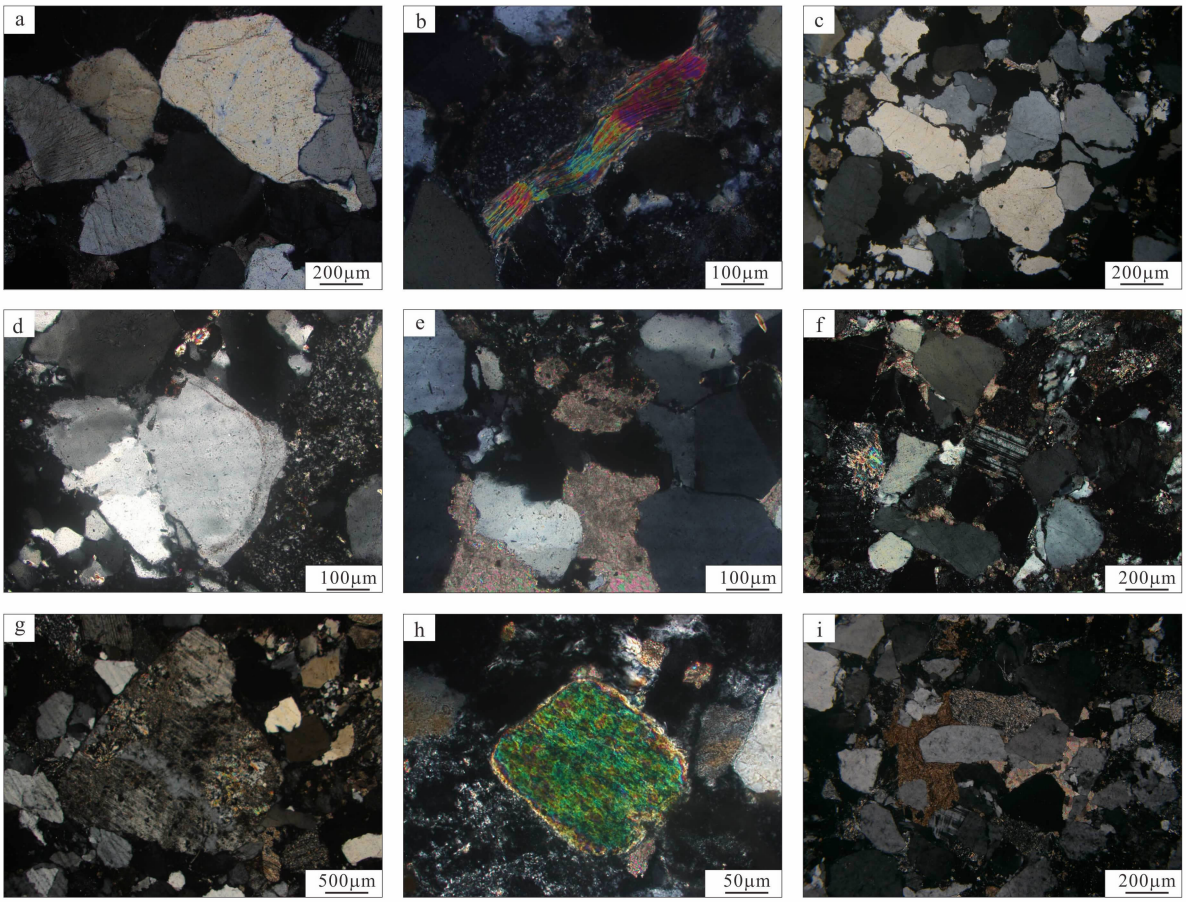
2　成岩作用

2.1　成岩作用类型

根据对取芯段岩芯样品的镜下观察，识别出的成岩作用类型有压实作用、压溶作用、胶结作用、交代作用、蚀变作用、溶蚀作用和重结晶作用。

压实作用主要表现为颗粒间的接触关系、排列方式、颗粒的破碎及变形等，主要发生在矿物颗粒的边界接触带。压实作用导致砂岩中石英、长石、岩屑和其他矿物颗粒在上覆压力或构造应力作用下排水、孔隙度降低和体积缩小[9,10]。取芯段随深度增加，压实作用逐渐增强。颗粒的接触关系以石英颗粒的点接触-线接触为主（图 4a），少数样品中可见矿物颗粒局部定向排列（图 3d）。由于白云母的塑性较强，常表现为被其他矿物压弯或压碎，如白云母的一组解理缝在压力作用下变形（图 4b）。

压溶作用是深埋藏成岩作用的特征，主要发生在机械压实作用之后，较压实作用更为强烈，随着深度增加，压溶作用逐渐变强，颗粒边界的接触带会发生溶解，由物理接触向化学溶解转化[10]。压溶导致颗粒间接触关系更进一步，表现为凹凸接触



a. 石英颗粒点-线接触 A-b42（×103 012.61 m）；b. 白云母被挤压变形 A-b52（×203 003.84 m）；c. 石英颗粒间溶解作用 A-b49（×103 011.60 m）；d. 石英次生加大 A-b52（×203 003.84 m）；e. 钙质交代石英、凝灰质 A-b8（×203 250.84 m）；f. 钙质交代长石、黏土 A-b8（×103 250.84 m）；g. 高岭土化 A-b46（×43 010.05 m）；h. 绿泥石化 A-b46（×403 010.05 m）；i. 钙质胶结物重结晶 A-b25（×103 244.33 m）.

图 4 北黄海盆地 A 井下白垩统砂岩成岩作用类型显微照片

Fig. 4 Micrographs of Lower Cretaceous sandstone diagenesis type of Well A in North Yellow Sea Basin

-缝合接触（图 4c）。由于上覆压力的加大使颗粒间接触线变凹凸，甚至完全缝合，一个颗粒嵌入另一个颗粒之中，但由于不同方向上的矿物所受力的不均匀性影响，部分颗粒仍为点接触关系（图 4c）。

胶结作用可使松散的沉积物固结成岩[11,12]，研究区样品中发育的胶结物主要为钙质和凝灰质，部分样品中硅质及黏土也起到胶结作用。镜下可见钙质胶结物充填在石英、长石及其他矿物颗粒之间（图 3f），起到胶结作用。颗粒间局部发生凝灰质胶结，少数石英发生压溶作用形成二氧化硅流体，二氧化硅流体再沉淀使颗粒间的硅质发育成次生加大边，亦可将颗粒胶结起来（图 4d）。

交代作用是一种物质取代另一种物质的过程[10,11]。研究区内砂岩发生的交代作用有钙质交代石英（图 4e）、钙质交代长石（图 4f）、钙质交代凝灰质（图 4e）及钙质交代黏土（图 4f）。钙质交代石英和长石较为常见，颗粒间被钙质充填，内部发生钙质交代。石英长石破裂处可观察到明显钙质交代现象，被交代的长石表面可发生轻度蚀变，但仍保留原有结构。

蚀变作用是物理和化学性质发生改变的一种作用，以形成新矿物为标志，可形成砂岩中的次生孔隙[13,14]。研究区发生的蚀变作用主要有正长石高岭土化（图 4g）、基性斜长石绢云母化（图 3h）和绿泥石化（图 4h），颗粒结构发生改变，长石蚀变成黏土矿物。在所观察样品中，绿泥石化蚀变发育较少。由于温压条件因素的影响，斜长石发生绿

泥石化，单偏光镜下也清晰可见颗粒整体呈绿色，树叶状，仍保留颗粒原有结构，属于轻微低级变质作用。

溶蚀作用是碎屑岩中的碎屑颗粒、杂基、胶结物和交代矿物，在一定的成岩环境中不同程度地发生溶解的作用，溶蚀作用的结果形成了砂岩中的次生孔隙[14]。研究区内最常见长石、石英发生溶蚀作用，石英、长石表面可见溶蚀孔（图 4c）。

重结晶作用是晶体二次结晶的过程[13,14]，研究区的重结晶作用主要有方解石重结晶和石英重结晶。方解石重结晶可由细晶变为粗晶，颗粒间的钙质胶结物重新结晶形成具有晶形的方解石颗粒（图 4i）。由于重结晶程度不同，钙质可以形成细晶和粗晶两部分[14]。硅质胶结物可以发生重结晶形成石英次生加大边，只有极少数石英可见次生加大边现象。

2.2　成岩作用阶段划分

将取芯段内深度在 3 006.40 ~3 242.20 m 的岩石进行碎样后，分析样品内的黏土组分发现深度为 3 006 m 时，主要发育伊利石和高岭石，发育少量绿泥石；随着深度增加伊利石含量减少，高岭石和绿泥石含量增加；深度达到 3 242.20 m 时，高岭石和绿泥石黏土矿物百分含量达到最大值。

深度在 3 003.84 ~3 012.61 m 区间时，岩石类型以长石砂岩为主。随着深度增加，钙质、黏土质含量并无明显变化。由于随着深度增加，孔隙水中溶解的硅质组分在颗粒表面逐渐沉淀，以石英次生加大边形式发育在颗粒间（图 4d），硅质胶结作用变强；随深度增加，温压条件发生变化，凝灰质发生黏土矿化、绢云母化，从而蚀变成绢云母，导致凝灰质含量减少，绢云母化现象增多；绿泥石在此深度范围内部分发育（图 4h），但含量较少，其颗粒多呈叶片状形态发育；在此深度范围内，钙质组分通常以胶结物形式出现，钙质交代石英、长石及凝灰质普遍发育。

深度在 3 242.40 ~3 250.84 m 区间时，长石含量极少，岩石类型以岩屑石英砂岩为主，由浅变深岩石粒度明显变细，表现为反粒序特征。随着深度增加，长石均发生强烈的蚀变作用，长石的绢云母化作用增强，长石蚀变成绢云母，长石绿泥石化作用亦增强，长石蚀变成绿泥石，此深度范围内绿泥石含量比 3 003.84 ~3 012.61 m 范围含量增高；铁质含量和绿泥石含量变化规律同步，含量增高；由于此深度范围内钙质和硅质组分相互交代，导致石英颗粒的次生加大边与钙质组分含量表现为负相关，孔隙流体的性质对两者的沉淀起到重要作用；深度在 3 242 ~3 246 m 范围内，黏土质为砂岩内部的泥岩夹层，含量较高，在 3 250 m 时，细砂岩内泥质含量极少，故黏土质含量极少；深度在 3 250 m ± 时，水动力条件较弱，发生钙质沉淀，钙质组分含量较高。

通过对镜下的各种成岩现象以及取芯段不同深度成岩作用类型和黏土矿物含量变化的分析，以碎屑岩成岩阶段划分标准[15]为依据，绘制了 A 井下白垩统砂岩成岩作用特征图（图 5），其中粗线条代表级别好，发育程度高。再根据各种矿物的产出状况及生成条件，将研究区取芯段成岩作用阶段划分为中成岩作用阶段的 A 亚期末期至 B 亚期早期。

3　孔隙类型

研究区内砂岩中的次生孔隙是储集空间的主体，而次生孔隙在砂岩中主要是通过成岩作用形成的。根据取样岩芯的显微镜下和扫描电镜下特征，研究区白垩纪储层砂岩主要发育的孔隙类型有粒间孔隙、粒内孔隙、填隙物内孔隙和次生裂缝。其粒间孔隙可分为粒间扩大孔和粒间缩小孔；粒内孔隙主要为次生粒内溶蚀孔；填隙物内孔隙主要是凝灰质填隙物内孔隙；次生裂缝主要为压裂缝。

粒间扩大孔是由于碎屑颗粒边缘或颗粒间填隙物发生溶蚀作用产生的，溶蚀作用沿颗粒边缘进行，扩大孔隙空间，研究区多见颗粒边缘被溶蚀成齿状、港湾状（图 6a）和圆弧状（图 6b）等，提高了流体渗流能力。粒间孔周围的颗粒被钙质胶结而导致粒间孔缩小，从而产生粒间缩小孔（图 3f，图 4e），减弱流体渗流能力。导致粒间孔缩小的胶结物主要为石英次生加大（图 4d）、各种黏土矿物及碳酸盐胶结物（图 6c）等。

次生粒内溶蚀孔多为长石和岩屑的粒内溶孔，岩屑颗粒内部发生溶蚀作用多在颗粒内形成孔洞造成晶体缺陷（图 6d）。粒内溶孔是研究区中成岩 A 期的最主要孔隙类型，主要是由酸性水溶液的溶蚀作用产生的（图 6d），酸性水溶液的形成与生油岩中黏土矿物转化脱水和有机质在成熟演化过程中生成的有机酸密切相关[16,17]，此阶段产生大量的溶

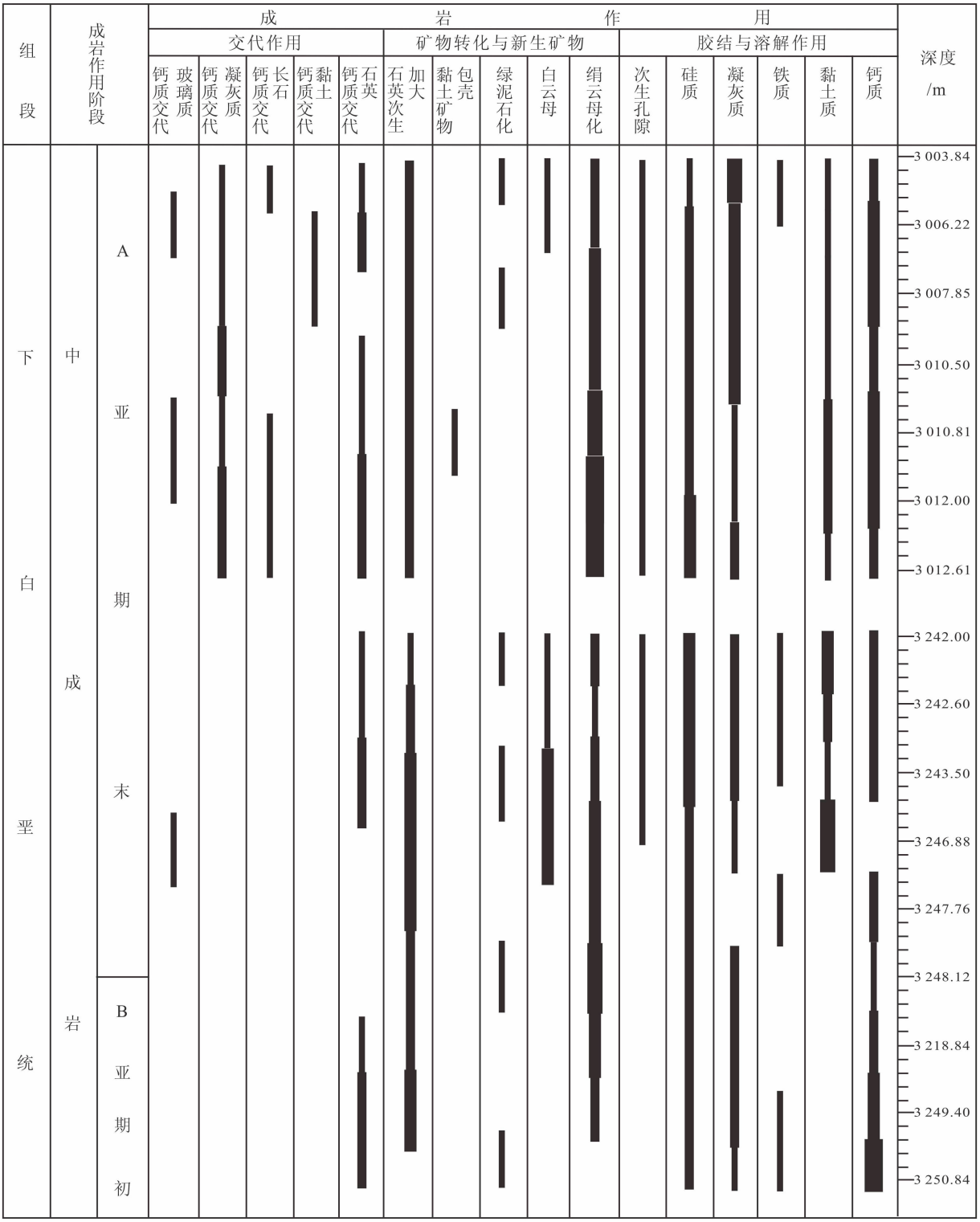
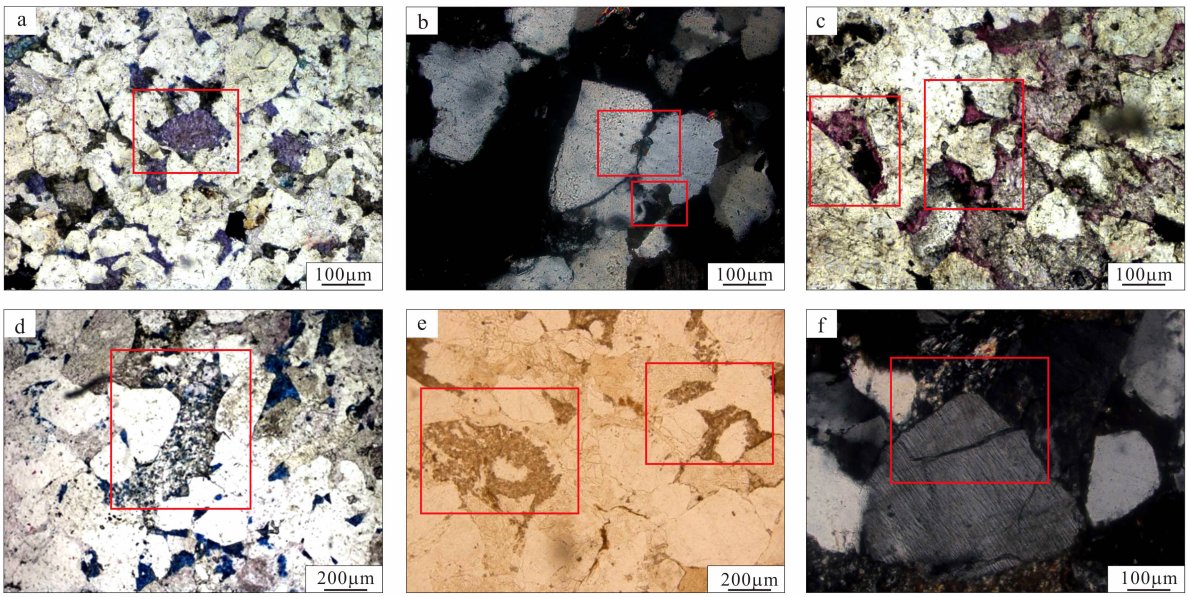


图 5 北黄海盆地 A 井下白垩统砂岩成岩作用特征图

Fig. 5 Characteristic illustration of Lower Cretaceous sandstone diagenesis of Well A in North Yellow Sea Basin

蚀次生孔隙，提高了孔隙流体渗流的能力。研究区发育大量凝灰质砂岩，凝灰质填隙物内部发育毛细孔，孔径小，连通性好。当凝灰质填隙物被酸溶液淋滤溶蚀，则可形成较大的粒间次生溶蚀孔隙，单偏光为浅褐色（图 6e）。

研究区的次生裂缝主要为矿物颗粒的压裂缝，压裂缝主要包括长石压裂缝（图 6f）和石英压裂缝（图 3e）。微裂缝可形成良好的流体通道，提高孔隙中流体的渗流能力。



a. 颗粒港湾状溶蚀孔 A-b42（×203 012.61 m）；b. 石英颗粒圆弧状溶蚀孔 A-44（×203 010.81 m）；c. 方解石充填的粒间缩小孔 A-b29（×203 243.50 m）；d. 岩屑内溶蚀孔 A-b28（×203 244.10 m）；e. 凝灰质填隙物内孔隙 A-b48（×103 007.85 m）；f. 长石压裂缝 A-b50（×103 006.22 m）.

图 6　北黄海盆地 A 井下白垩统砂岩孔隙镜下特征

Fig. 6　Characteristics of Lower Cretaceous sandstone porosity of Well A in North Yellow Sea Basin

通过对取芯段的原始测井解释孔渗数据及实测孔渗数据（表 2）分析，结果显示孔隙度的平均值为 7.23%，渗透率的平均值为 0.13 md，属于特低孔、超低渗。根据 A 井下白垩统取芯段数据进行计算，可以得到了该井内的孔隙度 Φ 与声波时差 $\triangle t$ 线性关系式 $\Phi = -0.019\triangle t + 14.82$ 和孔隙度 Φ 与渗透率 K 指数关系式 $K = 0.008e^{0.314\Phi}$。根据上述实测数据的关系式，进一步计算出了 A 井孔隙度和渗透率值，绘制出该井下白垩统 K_1SQ1 层序 2 800 ~ 3 320 m 深度区间的孔隙度和渗透率随深度变化曲线（图 7）。

孔隙度和渗透率曲线整体的趋势显示，随深度变深孔隙度和渗透率数值均变小，即在一般情况下，所处深度越浅，储层孔隙发育较好，孔隙度与渗透率会偏高（图 7）。孔隙度和渗透率异常高点，是次生孔隙发育所致，深度为 3 000 ~ 3 020 m 和 3 140 ~ 3 250 m 的孔隙度和渗透率的异常高值带是次生孔隙发育带。深度在 3 000 ~ 3 020 m 时孔隙度基值为 10%，最大异常高值为 14%，差值为 4%，渗透率基值为 0.2 md，最大异常高值为 0.8 md，差值为 0.6 md；深度在 3 140 ~ 3 250 m 时孔隙度基值为 6%，最大异常高值为 9%，差值为 3%，渗透率基值为 0.2 md，最大异常高值为 0.5 md，差值为 0.3 md（图 7）。在异常高值对应深度下的岩性分别长石砂岩和岩屑石英砂岩。长石砂岩中的长石容易发生溶蚀形成次生孔隙（图 6a），从而使孔渗升高；岩屑石英砂岩中的石英含量较多，由于石英硬度大且不易蚀变，蚀变的为岩屑，石英的骨架大，骨架之间的岩屑溶蚀成次生孔隙（图 6d）。溶蚀作用可导致孔隙度异常高，但由于压实作用使砂岩变得致密，因此在异常高值带内渗透率的变化并不完全同步于孔隙度。在其他深度存在的异常高

表 2 A 井取芯段砂岩实测孔渗数据表

Table 2 Table of sandstone measured pore permeability data of the core in Well A

岩石类型	深度/m	孔隙度/%	渗透率/md
长石砂岩	3 003.84	10.04	0.17
	3 007.23	9.76	0.23
	3 007.85	10.75	0.22
	3 008.24	9.47	0.18
	3 010.50	10.93	0.17
	3 010.81	10.93	0.17
	3 012.00	13.40	0.72
	3 012.61	11.59	0.53
长石石英砂岩	3 005.55	12.34	0.14
	3 006.22	10.69	0.31
	3 010.05	10.55	0.26
	3 244.33	8.13	0.09
岩屑石英砂岩	3 242.00	4.84	0.04
	3 242.02	5.03	0.04
	3 242.50	6.08	0.06
	3 242.56	7.41	0.29
	3 242.60	8.75	0.52
	3 243.50	7.57	0.06
	3 243.66	7.57	0.06
	3 244.10	9.55	0.21
	3 244.17	8.71	0.15
	3 244.73	8.45	0.01
	3 245.35	6.89	0.04
	3 245.86	6.32	0.02
	3 245.99	5.39	0.02
	3 246.06	5.39	0.02
	3 250.84	4.85	0.02

值点，也是次生孔隙发育的地方。下白垩统取芯段曲线在 3 012 ~3 013 m 和 3 243 ~3 245 m 存在异常高值，取芯段内的孔渗异常高值带即为取芯段的次生孔隙发育带。

在取芯段内，3 000 ~3 012 m 范围的取芯段曲线显示孔隙度随深度加深无明显变化，孔隙度在 10% ±波动，属于低孔级别，中等储层。3 240 ~ 3 250 m 范围内，由下向上随深度变浅孔隙度值会变高，大致集中在 4% ~10% 范围内，属于低孔隙度类型，较差储层。在 3 000 ~3 012 m 范围时渗透率波动普遍 >0.2 md，在 3 243 ~3 250 m 范围时渗透率则普遍 <0.3 md。3 003 ~3 021 m 范围内岩石类型主要为长石中砂岩，岩石内部孔隙胶结较强，因此在孔隙度、渗透率与深度的曲线图内表现为在该深度范围，孔隙度与深度均呈下降趋势。

在取芯段内渗透率与孔隙度均呈指数上升关系（图 8）。在图 8a 内趋势线所示渗透率变化幅度较高，孔隙度变化为 4%，渗透率变化为 0.5 md，而在图 8b 内趋势线所示的渗透率变化幅度较低，孔隙度变化为 6%，渗透率仅变化为 0.2 md。总体上呈 3 243 ~3 250 m 范围的渗透率低于 3 003 ~3 012 m 范围内的渗透率。

在 A 井取芯段内，3 003 ~3 021 m 深度范围内岩石类型主要为长石砂岩。在深度 3 012 ~3 013 m 时，砂岩内孔隙度与渗透率表现为突然增高现象（图 9），孔隙度可达到 14%，渗透率达到 0.7 md。在 <3 012 m 时，孔隙度主要在 10% ±波动，渗透率在 0.2 ~0.8 md 附近波动。在 3 240 ~3 250 m 范围内，岩石类型为岩屑石英砂岩，并且随着深度加深，粒度由粗变细，表现为反粒序特征。其孔隙度在 4% ~10% 之间波动，渗透率总体 <0.5 md。从图 9 可以看出孔隙度与渗透率呈轻微双峰式变化，有两个波动峰值。岩石内部孔隙胶结较强，因此在孔隙度、渗透率与深度的曲线图内表现为在该深度范围，孔隙度与渗透率度均呈下降趋势（图 9）。长石砂岩的孔隙度和渗透率整体上高于岩屑石英砂岩，为研究区内的主要储层。

4 成岩作用对储层的影响

研究区内的砂岩储层具有特低孔超低渗的特征，成岩作用对储层的影响具有双重性。其中压实作用、压溶作用、胶结作用和重结晶作用使砂岩孔隙度减小，降低了储层的物性，起到破坏性作用；交代作用和溶蚀作用使砂岩孔隙度增大，改善了储层的物性，起到建设性作用[17]。

4.1 破坏性成岩作用

砂岩在压实作用过程中主要表现为定向排列与粒间充填，在上覆地层压力下，砂岩内部颗粒由于压实作用较强，呈线接触方式使得粒间孔喉半径减小。在进一步发生压溶作用过程中，颗粒接触边界发生压实溶解作用后，孔隙堵塞，喉道基本不发

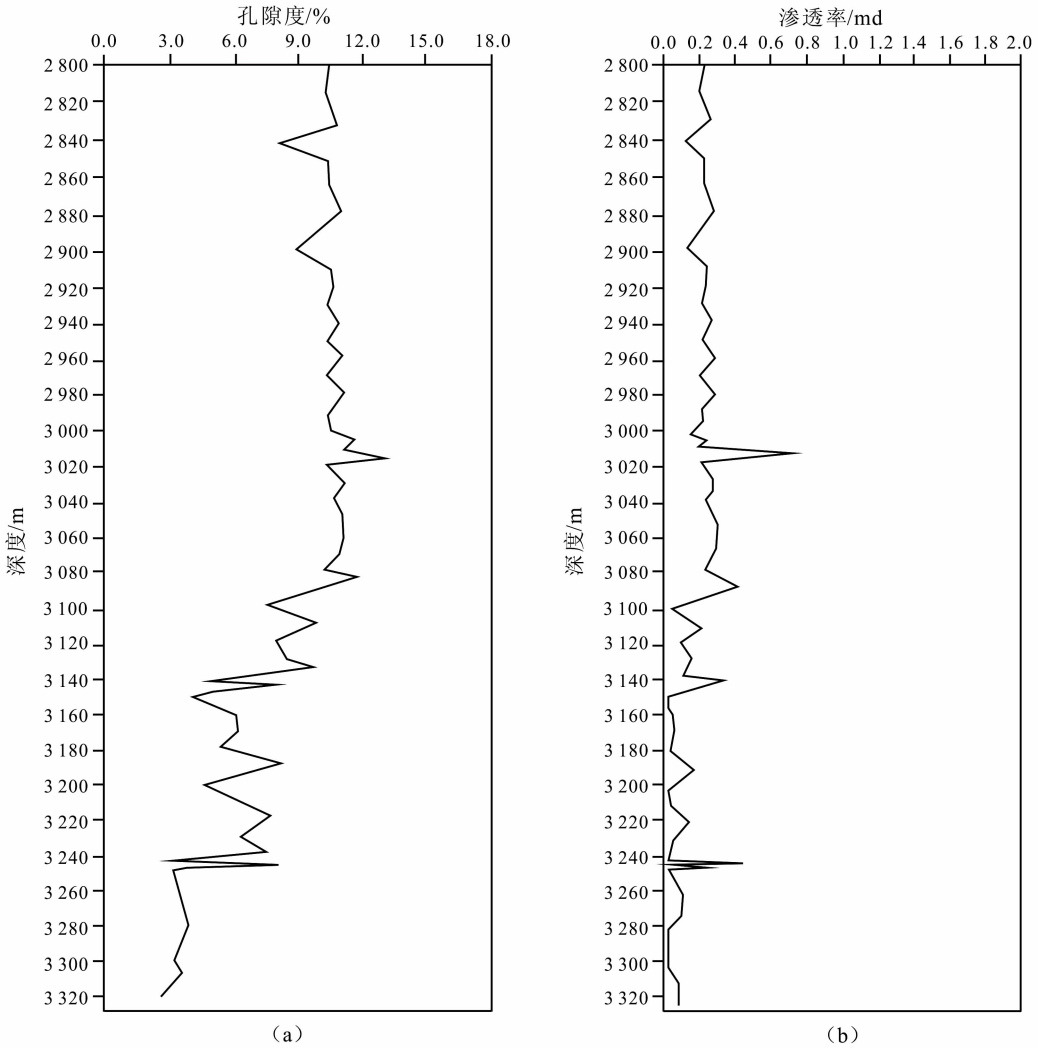


图 7　北黄海盆地 A 井 K_1SQ1 层序孔隙度（a）和渗透率（b）随深度变化图

Fig. 7　Illustration of porosity（a）and permeability（b）vary with depth of K_1SQ1 sequence in Well A in North Yellow Sea Basin

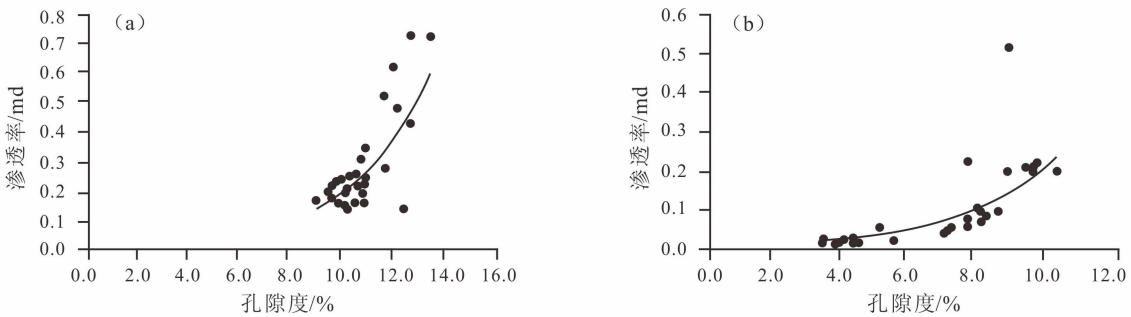
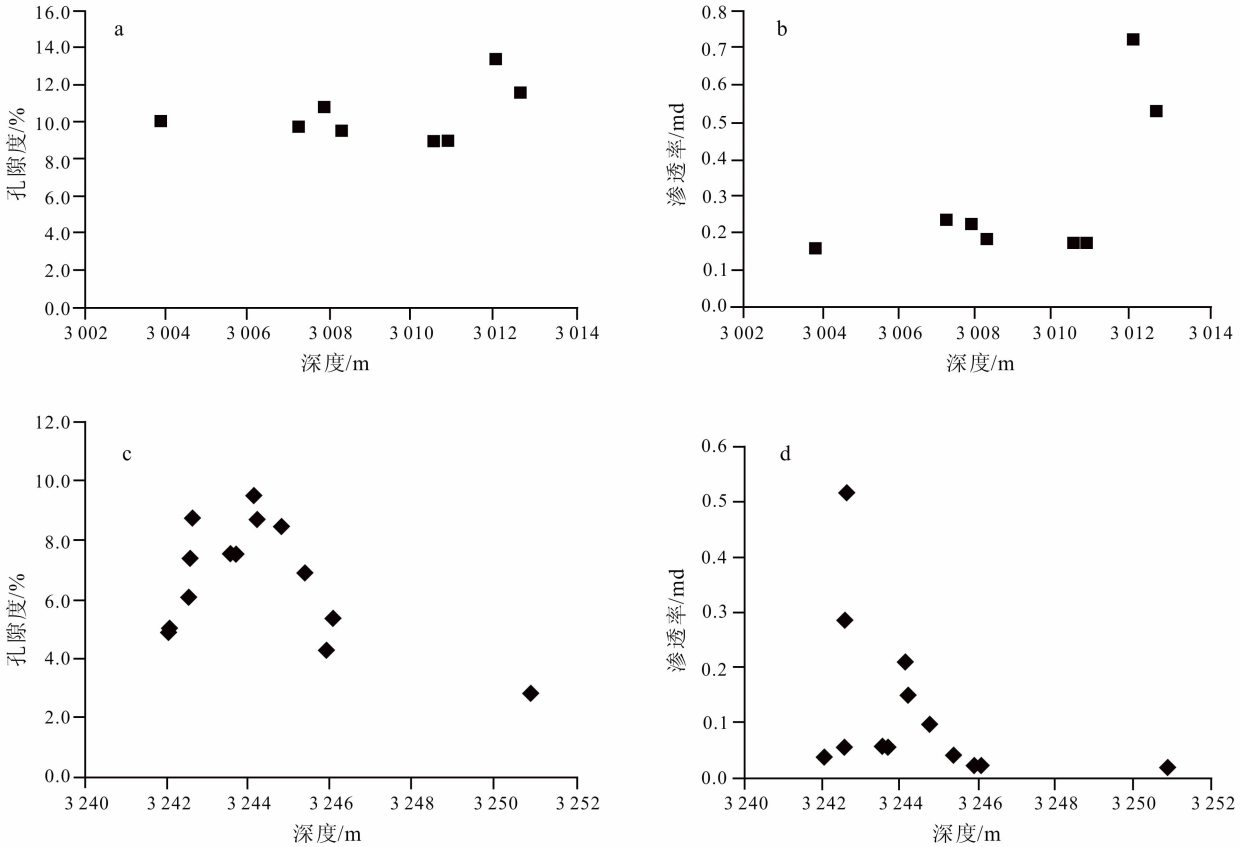


图 8　北黄海盆地 A 井取芯段不同深度 3 003 ~ 3 012 m（a）、3 243 ~ 3 250 m（b）孔隙度与渗透率散点图

Fig. 8　Illustration of porosity and permeability scatter plots at different depths in 3 003 ~ 3 012 m（a）and 3 243 ~ 3 250 m（b）of core of Well A in North Yellow Sea Basin



a、b. 长石砂岩；c、d. 岩屑石英砂岩.

图 9 北黄海盆地 A 井主要发育的砂岩类型与孔隙度、渗透率散点图

Fig. 9 Main sandstone types with porosity, permeability scatter plot of Well A in North Yellow Sea Basin

育，对储层起较大破坏性作用。部分样品内由于压实作用较强，镜下显示粒间孔隙被挤压充填并发生破裂，呈线接触方式，局部碎屑颗粒边界发生压溶，表现为凹凸接触。砂岩孔隙受压实作用影响，孔隙度明显降低。

随着成岩作用进行的过程中，当孔隙内水体含有大量钙质组分时，发生沉淀作用后以碳酸盐岩形式附着在颗粒表面并充填孔隙内部，使砂岩储层整体孔隙度降低，胶结作用通常表现为对储层有破坏性作用。在3 243 ~3 250 m 深度范围时，胶结物含量 >10%，其孔隙度为 4% ~10%，而在 3 003 ~ 3 012 m 深度范围时胶结物含量较低，孔隙度为 10% ~15%，当胶结物含量高于 10% 时，胶结作用对砂岩内孔隙发育影响较大，可以达到特低孔低渗储层级别。砂岩内胶结作用表现为胶结物将碎屑颗粒进一步固结成岩，它可以发生在各个阶段，主要受流体性质影响。在研究区中常见的为钙质胶结，钙质胶结物含量在研究区内变化较大，在 3 243 ~3 250 m 范围内受钙质胶结作用较强，其含量偏高。总体上，样品内仍以粒间孔隙为主，部分颗粒有溶蚀孔，但在胶结作用后孔隙被胶结物充填，使孔隙度急剧下降。

重结晶作用在研究区主要发生在钙质胶结物和硅质胶结物之中，主要表现为钙质组分通过重结晶作用形成方解石（图 4i），对孔隙起到轻微的堵塞破坏作用，很小程度破坏了储集性能，因此不多做考虑。

4.2 建设性成岩作用

交代作用在研究区内主要表现在碎屑颗粒、自生石英和长石等被碳酸盐交代，这与方解石在流体内大量沉淀有关。方解石对长石交代更具有选择性，长石的边缘或解理缝常发生交代，长石颗粒边

缘被交代成港湾状、锯齿状等不规则形状。颗粒被交代后刚性减弱，破裂后即形成孔隙。方解石也可在颗粒破裂处发生交代作用，使颗粒进一步破裂。由于交代作用主要是成分之间的相互取代，故对孔隙的改善作用有限，储层物性的改良亦有限[17]。

在研究区内常发育有长石蚀变为绢云母与黏土矿物现象，部分颗粒间的凝灰质组分既可以脱玻化为硅质组分充填孔隙，又可以发生黏土化转化。长石颗粒发生绢云母化，颗粒结构基本破坏，形成粒内孔隙。岩屑颗粒发生蚀变，颗粒内部矿物蚀变后残留粒内孔隙，均有利于储层。部分颗粒也蚀变为黏土物质，形成的黏土矿物如高岭石、伊利石、绿泥石和伊—蒙混层会严重堵塞砂岩内孔隙喉道，降低储层渗透率。根据对黏土矿物相对含量资料的比较来看，在 3 000 m 的取芯段内以高岭石与伊利石为主，在 3 240 m 取芯段高岭石含量较高，含有部分伊利石与绿泥石，对该砂岩层孔隙有较大影响。

溶蚀作用主要使砂岩储层形成各类的次生孔隙，是研究区砂岩次生孔隙发育的最主要因素，对改善砂岩储层的储集性能起到了非常重要的作用(图 4g)。但对研究区进行成岩作用特征分析后，发现区内砂岩储层的压实作用和胶结作用较强，导致原生孔隙在砂岩储层内不易发育，阻碍了流体介质的流动。因此该地区砂岩储层内部的溶蚀孔隙不太发育，也导致了该地区砂岩表现为特低孔超低渗的储层特征。

5　结论

（1）北黄海盆地东部坳陷下白垩统砂岩的类型以长石砂岩、长石石英砂岩和岩屑石英砂岩为主。在 A 井取芯段内，3 003 ~ 3 021 m 深度范围内岩石类型主要为长石砂岩，3 240 ~ 3 250 m 深度范围内，岩石类型为岩屑石英砂岩。

（2）下白垩统主要发育的成岩作用类型有压实作用、压熔作用、胶结作用、交代作用、蚀变作用、溶蚀作用和重结晶作用，处于中成岩作用阶段的 A 亚期末期至 B 亚期早期。3 003 ~ 3 021 m 深度范围内交代作用发育程度高，3 240 ~ 3 250 m 深度范围内胶结作用较强。

（3）下白垩统储层砂岩主要发育的孔隙类型有粒间孔隙、粒内孔隙、填隙物内孔隙和次生裂缝。其粒间孔隙可分为粒间扩大孔和粒间缩小孔；粒内孔隙主要为次生粒内溶蚀孔；填隙物内孔隙主要是凝灰质填隙物内孔；次生裂缝主要为压裂缝。

（4）下白垩统储层砂岩具有特低孔超低渗的特征，成岩作用对储层的影响具有双重性。压实作用、压溶作用、重结晶作用和胶结作用使砂岩孔隙度减小，降低了储层的物性，为破坏性成岩作用；交代作用、溶蚀作用和蚀变作用对储层孔隙发育有利，改善了储层的物性，为建设性成岩作用。孔隙度和渗透率整体上随深度变浅有增高趋势，在深度为 3 000 ~ 3 020 m 和 3 140 ~ 3 250 m 时存在异常高值，孔隙度与渗透率的异常高值带为次生孔隙发育带。

参考文献：

[1] 李文勇，李东旭，夏斌，等. 北黄海盆地构造演化特征分析 [J]. 现代地质，2006，20 (2)：268-276.
LI Wen-yong，LI Dong-xu，XIA Bin，et al. Characteristics of structural evolution in North Yellow Sea Basin [J]. Geoscience，2006，20 (2)：268-276.

[2] 杜民，王改云，刘金萍，等. 北黄海盆地东部坳陷地层划分及沉积特征 [J]. 特种油气藏，2014，21 (2)：51-57.
DU Min，WANG Gai-yun，LIU Jin-ping，et al. Stratigraphic delineation and depositional characteristics in the eastern depression，North Yellow Sea Basin [J]. Special Oil and Gas Reservoirs，2014，21 (2)：51-57.

[3] 陈亮，刘振湖，金庆焕，等. 北黄海盆地东部坳陷中新生代构造演化 [J]. 大地构造与成矿学，2008，32 (3)：308-316.
CHEN Liang，LIU Zhen-hu，JIN Qing-huan，et al. Meso-Cenozoic tectonic evolution of the east depression of North Yellow Sea [J]. Geotectonica et Metallogenia，2008，32 (3)：308-316.

[4] 肖丹，石万忠，王嘹亮，等. 北黄海盆地东部 M 隆起构造特征及演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质，2016，36 (5)：75-84.
XIAO Dan，SHI Wan-zhong，WAN Liao-liang，et al. Tectonic characteristics and evolution of the M uplift in the east area of North Yellow Sea Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology，2016，36 (5)：75-84.

[5] 胡小强，沈艳杰，高丹，等. 北黄海盆地东部坳陷沉积层序充填与盆地演化 [J]. 世界地质，2015，34 (4)：1042-1051.
HU Xiao-qiang，SHEN Yan-jie，GAO Dan，et al. Filled characteristics of depositional sequence and evolu-

tion of eastern sag in North Yellow Sea Basin [J]. Global Geology, 2015, 34 (4): 1042-1051.

[6] 马文, 於文辉, 张世晖. 北黄海盆地地质构造特征及其演化 [J]. 海洋地质动态, 2005, 21 (11): 21-27.
MA Wen, YU Wen-hui, ZHANG Shi-hui. The structural features of North Yellow Sea Basin and its evolution [J]. Marine Geology Letters, 2005, 21 (11): 21-27.

[7] 龚承林, 雷怀彦, 王英民, 等. 北黄海盆地东部坳陷构造演化与油气地质特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29 (1): 79-86.
GONG Cheng-lin, LEI Huai-yan, WANG Ying-min, et al. Hydrocarbon geologic characters and structural evolution in the eastern depression of North Yellow Sea Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29 (1): 79-86.

[8] 王改云, 刘金萍, 简晓玲, 等. 北黄海盆地下白垩统致密砂岩储层特征及成因 [J]. 地球科学, 2016, 41 (3): 523-532.
WANG Gai-yun, LIU Jin-ping, JIAN Xiao-ling, et al. Characteristics and genetic mechanism of tight sandstone reservoirs of Lower Crataceous in North Yellow Sea Basin [J]. Earth Science, 2016, 41 (3): 523-532.

[9] 禚志博, 朱占平, 丁歌, 等. 内蒙古林西地区晚二叠世林西组碎屑岩成岩作用及其对储层物性的影响 [J]. 世界地质, 2016, 35 (4): 1058-1065.
ZHUO Zhi-bo, ZHU Zhan-ping, DING Ge, et al. Clastic diagenesis in Late Permian Linxi Formation in Linxi area, Inner Mongolia and its influence on physical properties [J]. Global Geology, 2016, 35 (4): 1058-1065.

[10] 张鐘月, 高福红, 杨扬, 等. 梨树断陷十屋油田营城组砂岩成岩作用特征及孔隙演化 [J]. 世界地质, 2015, 34 (1): 157-166.
ZHANG Zhong-yue, GAO Fu-hong, YANG Yang, et al. Diagenesis characteristics and pore evolution of sandstone in Yingcheng Formation of Shiwu oil field in Lishu fault depression [J]. Global Geology, 2015, 34 (1): 157-166.

[11] 王伟, 王兴志, 张帆, 等. 四川广安地区须家河组四段储层成岩作用与孔隙演化 [J]. 世界地质, 2010, 29 (1): 96-103.
WANG Wei, WANG Xing-zhi, ZHANG Fan, et al. Diagenesis and pore evolution of reservoir in the 4th Member of Xujiahe Formation in Guang'an area of Sichuan Province [J]. Global Geology, 2010, 29 (1): 96-103.

[12] 洪雪, 赵洪伟, 沙娟芳. 彰武断陷沙海组碎屑岩储层成岩作用及对储层物性的影响 [J]. 世界地质, 2011, 30 (3): 410-421.
HONG Xue, ZHAO Hong-wei, SHA Juan-fang. Diagenesis of clastic rock reservoirs and its influence to reservoir physical property in Shahai Formation, Zhangwu depression [J]. Global Geology, 2011, 30 (3): 410-421.

[13] 郑锐. 鄂尔多斯盆地 ZC 地区长 4+5 储层成岩作用及其对储层性质的影响: 硕士学位论文 [D]. 西安: 西北大学, 2011.
ZHENG Rui. Diagenesis and its impact on reservoir property of Chang 4+5 reservoir of Yanchang Formation in ZC area of Ordos Basin: master's degree thesis [D]. Xi'an: Northwest University, 2011.

[14] 王春连. 四川盆地东北部长兴组碳酸盐岩储层研究: 硕士学位论文 [D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
WANG Chun-lian. Research on carbonate reservoirs of the Changxing Formation in northeastern Sichuan Basin: master's degree thesis [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.

[15] 刘宝口, 张锦泉. 沉积成岩作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1992: 98-99.
LIU Bao-kou, ZHANG Jin-quan. Sedimentary diagenesis [M]. Beijing: Science Press, 1992: 98-99.

[16] 朱平, 王成善. 海拉尔盆地碎屑储集岩成岩变化与孔隙演化关系 [J]. 矿物岩石, 1995, 15 (2): 41-46.
ZHU Ping, WANG Cheng-shan. Relationship between the variation of diagenesis and the evolution of pore in the clastic reservoir rock of Hailaer Basin [J]. Mineral Rocks, 1995, 15 (2): 41-46.

[17] 邱隆伟, 姜在兴, 席庆福. 欧利坨子地区沙三下亚段火山岩成岩作用及孔隙演化 [J]. 石油与天然气地质, 2000, 21 (2): 139-147.
QIU Long-wei, JING Zai-xing, XI Qing-fu. Diagenesis and pore evolution of Lower Es3 volcanic rocks in Oulituozi region [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21 (2): 139-147.