

文章编号:1673-8926(2014)05-0064-05

## 松辽盆地北部青一段含油泥页岩储集特征浅析

柳波<sup>1</sup>,王蕃<sup>2</sup>,冉清昌<sup>1,3</sup>,李梅<sup>1</sup>,戴春雷<sup>1</sup>,王猛<sup>1</sup>

(1.东北石油大学非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室培育基地,黑龙江大庆163318; 2.大庆钻探工程公司测井公司,黑龙江大庆163412; 3.中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院,黑龙江大庆163318)

**摘要:**储集性能的好坏是影响泥页岩含油气性的关键因素。利用岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜及等温吸附等手段,对松辽盆地北部青一段含油泥页岩进行了岩石学特征和储集特征研究,对其储集物性进行了初步评价。结果表明,青一段泥页岩储层的岩石类型主要包括含粉砂泥岩、粉砂质泥岩、含灰质泥岩及粉砂岩等,其中粉砂质泥岩、含灰质泥岩及粉砂岩脆性矿物含量相对较高,且储集空间类型多样,与微裂缝构成了“水平+垂直的裂缝网络系统”。薄层粉砂岩夹层或纹层的粒间溶蚀微孔较为发育,溶蚀微孔可达微米级。青一段泥页岩综合评价为特低孔、特低渗储层,其中又以粉砂质泥岩、含灰质泥岩及炭质粉砂岩储集物性较好,可望在页岩油气勘探中获得突破。

**关键词:**页岩油气;储集特征;致密储层;纳米孔隙;松辽盆地北部

中图分类号:TE122.1 文献标志码:A

## Characteristics of shale reservoir of the first member of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin

LIU Bo<sup>1</sup>, WANG Fan<sup>2</sup>, RAN Qingchang<sup>1,3</sup>, LI Mei<sup>1</sup>, DAI Chunlei<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>

(1. Accumulation and Development of Unconventional Oil and Gas, State Key Laboratory Cultivation Base Jointly-constructed by Heilongjiang Province and the Ministry of Science and Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China; 2. Well logging company, Daqing Drilling and Exploration Engineering Corporation, Daqing 163412, Heilongjiang, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing 163318, Heilongjiang, China)

**Abstract:** The reservoir quality is the key factor for influencing the enrichment of shale oil and gas. Through core observation, thin section identification, scanning electronic microscope, isothermal adsorption and other means, this paper studied the petrology and reservoir characteristics of oil shale of the first member of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin. The result shows that the rock types of reservoir include with-silt mudstone, silty mudstone, lime mudstone and siltstone. The silty mudstone, lime mudstone and siltstone are with higher contents of fragile mineral, and developed various types of reservoir space which constitutes a complexes level and vertical fracture net-system. Intergranular dissolved pores are more developed in thin siltstone layers or laminate, and their porosity can reach micron level. The reservoir of the first member of Qingshankou Formation belongs to ultra-low porosity and ultra-low permeability reservoir. The silty mudstone, lime mudstone and carbonaceous siltstone have best reservoir properties.

**Key words:** shale oil and gas; reservoir characteristics; tight reservoir; nano pore; northern Songliao Basin

收稿日期:2014-02-18;修回日期:2014-04-10

基金项目:国土资源部全国油气资源战略选区调查与评价专项“华北及东北地区页岩气资源调查评价与选区”(编号:2009GYXQ15)和国家青年自然科学基金项目“湖相纹层泥页岩有机质富集机理及其与页岩油关系”(编号:41202101)联合资助

作者简介:柳波(1983-),男,博士,副教授,从事油气成藏地质学、非常规油气地质与勘探等方面的研究工作。地址:(163318)黑龙江省大庆市东北石油大学地球科学学院。E-mail:liubo6869@163.com。

## 0 引言

页岩油气在油气资源中所占的比例逐年增长,影响了全球的能源格局<sup>[1-2]</sup>。泥页岩主要是由固结的细粒颗粒(粒径<0.005 mm)组成的片状岩,其矿物成分主要包括一定数量的长石、石英、碳酸盐、黏土矿物、有机碳和黄铁矿<sup>[3-4]</sup>。根据美国对页岩气的勘探开发成果可知,页岩的原始孔隙度可达35%以上,并随埋深增加而迅速减小,在埋深达到2 000 m以后,孔隙度仅为10%左右,甚至更低,但仍然可以储集具有工业价值的油气<sup>[5-6]</sup>。据美国含气页岩统计,页岩岩心孔隙度一般为4.0%~6.5%(测井孔隙度一般为4%~12%),平均为5.2%;渗透率一般为0.001~2.000 mD,平均为0.040 9 mD<sup>[7]</sup>。然而,在断裂带或裂缝发育带,页岩储层的孔隙度可达11%,渗透率可达2 mD<sup>[8]</sup>。

松辽盆地是一个油气资源非常丰富的断陷、拗陷叠合盆地,拗陷层发育白垩系青山口组及嫩江组2套富有机质暗色泥页岩<sup>[9-10]</sup>。其中,青山口组垂向上可以分为3段,自下而上分别为青一段、青二段和青三段。青山口组一段经历过一次大规模的湖侵,在盆地中央拗陷区几乎全部沉积暗色泥岩,厚度为60~80 m。介形虫层和油页岩比较发育是该段地层的重要标志之一。根据大庆油田2 000余口探井资料复查统计,青山口组含油泥页岩分布面积为3 314.4 km<sup>2</sup>,油页岩的平均累计厚度为7.4 m,油气显示异常丰富。此外,在埋深较大的盆地内部,已经勘探证实埋深适中并处于主要生烃阶段的青山口组泥页岩含油气性较好,尤其是齐家—古龙地区青山口组烃源岩有机质丰度高、成熟度适中,且地层发育超压,有利于在泥页岩系统内形成具有工业价值的油气分布。

笔者通过系统整理大量已有的青山口组出油气探井资料,包括其矿物成分特征、岩石类型及储集空间等,进行青一段泥页岩储集物性的量化研究,以此来探讨松辽盆地泥页岩层系的储层特征,并对其储集性能进行初步评价。

## 1 页岩层系沉积背景

泥页岩发育的沉积环境及沉积旋回,决定了泥页岩层段储层的宏观岩性组合特征,进而决定了储层岩相类型<sup>[11]</sup>。其中,海相泥页岩层系发育于深海、半深海等沉积环境,以厚层泥页岩夹海相砂质岩和

碳酸盐岩等为主要特征,分布范围大、横向稳定<sup>[12]</sup>;海陆过渡相泥页岩层系发育于沼泽、潮坪及泻湖等沉积环境,以薄层泥页岩与粉细砂岩、炭质泥岩等互层为显著特征,一般有机质丰度高,而有机质类型较差<sup>[13]</sup>;陆相泥页岩层系发育于深湖—半深湖等沉积环境,以大套或多套厚层泥页岩夹薄层砂岩、湖相碳酸盐岩为主要特征,可见风暴沉积,沉积环境对气候敏感,往往非均质性较强<sup>[14]</sup>。

松辽盆地北部青一段整体为一个中期下降半旋回,下部沉积的泥页岩有机质丰度略高,多口井于青一段底部见油页岩,代表了最大湖侵位置。根据层内岩性组合及有机质丰度的垂向变化规律,青一段自下而上可以识别出1个短期下降半旋回及2个完整的短期沉积旋回(图1)。

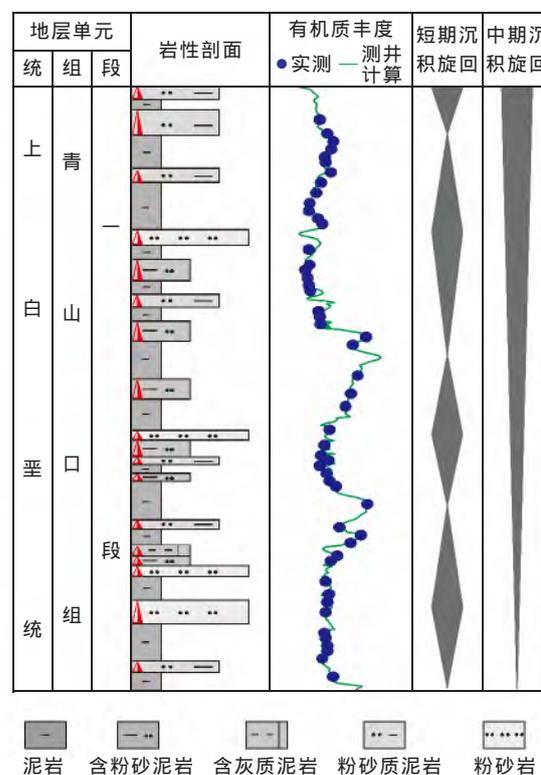


图1 松辽盆地北部青一段沉积旋回柱状图(鱼15井)

Fig. 1 Columnar section of sedimentary cycle of the first member of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin

每个短期沉积旋回均控制了随着水退岩石粒度变粗及有机质丰度逐渐降低的特点,构成了高有机质丰度暗色泥岩与其他岩石类型呈薄互层的岩性组合特征。此外,在泥页岩层内还发育钙质、砂质条带和介形虫层(图2)。这种内部沉积旋回为青一段“源内”泥页岩油气的形成提供了有利的源储多层紧密叠置条件。

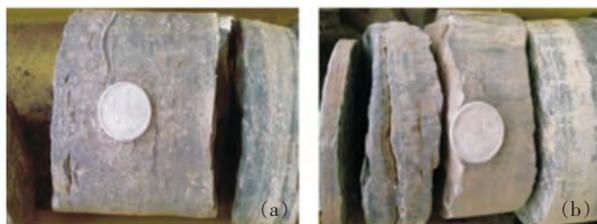


图2 松辽盆地北部青一段泥页岩储层钙质、砂质条带(a)和介形虫层(b)(D28井,1903.40~1903.55m)

Fig. 2 Calcareous, sandy strips (a) and ostracod layer (b) of shale reservoir of the first member of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin

## 2 页岩层系岩石学特征

### 2.1 岩石类型

青一段表现为大套厚层泥页岩与薄层砂质岩石的岩性组合特征,录井及岩心观察可见这些砂质岩石微孔和微裂缝相对较为发育,具有较好的油气显示级别,是源内最主要的储集层。大量的岩心观察结果表明,储集层的岩石类型主要为含粉砂泥岩、粉砂质泥岩、含灰质泥岩及粉砂岩等。

#### (1) 含粉砂泥岩

岩石整体较为致密,具有含粉砂黏土质结构(粉砂体积分数为10%~25%),少量极细砂。薄片观察碎屑颗粒主要为石英、长石、云母及碳酸盐晶屑,个别可见少量硅灰石等。不同的碎屑颗粒呈星散状分布,且欠均匀,可见条带状聚集;泥质以伊利石为主,具明显重结晶且定向消光,少量炭质碎屑多呈条带状定向分布。可见黄铁矿呈斑点状或零星分布;见

炭质碎屑、蛋白石充填的干缩缝(图版 -1)。

#### (2) 粉砂质泥岩

岩石具有粉砂质黏土结构(粉砂体积分数为25%~50%)。薄片观察粉砂质成分主要为石英、长石、碳酸盐晶屑及云母,云母略具定向分布;泥质以伊利石为主,炭质碎屑混杂分布且欠均匀。可见少量黄铁矿呈星点状分布;见炭质碎屑、玉髓充填的干缩缝(图版 -2)。

#### (3) 含灰质泥岩

岩石具有纹层状泥质结构(粉砂体积分数<10%),可见大量粉晶方解石,泥质混杂,分布均匀。局部见纹层状有机质。陆源碎屑以石英、长石及白云母为主,分散分布。暗色泥质条纹与亮色灰质、云质条纹间互分布,定向排列明显。偶见介形类生物化石碎片、生物钻穴及黄铁矿斑块(图版 -3)。

#### (4) 粉砂岩

岩石致密,发育有微裂缝,具有细粉砂结构,少量可达到极细砂,个别为细砂级别。碎屑成分主要为碳酸盐晶屑,少量石英、长石和云母等;可见炭质碎屑定向分布,并与泥质不均匀混杂;见介屑。黄铁矿零星分布或呈条带状聚集;见炭质碎屑、硅质半充填的微裂缝及干缩缝(图版 -4)。

### 2.2 矿物学特征

在对样品进行薄片鉴定后,通过 Dmax 12 kw 粉末衍射仪对不同岩性岩石的典型样品进行了 X 射线衍射分析(表1)。结果表明:含粉砂泥岩中石英、长

表1 松辽盆地北部青一段不同岩性岩石的矿物平均体积分数统计

Table 1 The average mineral content of different lithologies of the first member of Qingshankou Formation in northern Songliao Basin

岩性	平均体积分数									
	石英	钾长石	钠长石	钙长石	方解石	黏土矿物	绿泥石	蒙脱石	高岭石	伊利石
粉砂岩	19.129 2	1.983 6	2.023 1	53.519 5	9.229 4	4.751 0	1.211 1	1.047 1	1.193 0	1.299 9
粉砂质泥岩	21.293 5	2.157 7	11.516 7	29.774 8	0.667 7	22.592 8	1.407 3	0.893 1	1.551 8	18.740 6
含灰质泥岩	19.196 4	3.592 1	16.685 8	17.969 3	12.664 1	24.030 1	2.963 3	0.944 9	0.404 7	19.717 2
含粉砂泥岩	9.405 2	1.814 6	5.973 4	15.443 5	0.964 7	61.626 5	0.465 3	0.420 8	0.599 5	60.140 9

石、方解石及黏土矿物体积分数分别为9.4%、23.2%、1.0%和61.6%;粉砂质泥岩中石英、长石、方解石及黏土矿物体积分数分别为21.3%、43.4%、0.7%和22.6%;含灰质泥岩中石英、长石、方解石及黏土矿物体积分数分别为19.2%、38.2%、12.7%和24.0%;粉砂岩中石英、长石、方解石及黏土矿物体积分数分别为19.1%、57.5%、9.2%和4.8%。不同岩性的岩石之间矿物成分差别明显,主要是长石含量控制了全岩粉砂含量,方解石含量控制了全岩灰质含量,表明在沉积时期湖水水退过程中,黏土矿物含量减少,

在水动力较强的地区沉积了以长石为主的陆源碎屑沉积,发育了粉砂岩—含粉砂泥岩系列,而在水动力较弱、缺少物源供给的地区则沉积了以粉晶方解石为主的灰质泥岩。

总体上看,该区粉砂质泥岩、含灰质泥岩及粉砂岩与美国典型泥页岩油气藏区的泥页岩矿物组成既具有一定的相似性又有明显不同,即两者均具有相对低的黏土矿物含量,但美国典型海相页岩石英含量占有绝对优势,而研究区青一段陆相泥页岩长石含量最高,其次为石英。这种矿物含量的差异

主要是由于泥页岩体系沉积背景不同造成的。湖相沉积往往距离物源较近,成分成熟度低,且缺少海相生屑石英来源。Alqahtani等<sup>[15]</sup>的研究表明,虽然长石对页岩脆性的贡献低于石英,但也常用“长石+石英的含量”来整体评价页岩的脆性,说明松辽盆地北部青一段粉砂岩、粉砂质泥岩及含灰质泥岩的脆性矿物含量较高,具有较好的造缝能力,适合通过压裂技术开采,而含粉砂泥岩的矿物组成以黏土矿物为主,脆性矿物含量相对较低。

### 3 页岩层系储集空间特征

松辽盆地北部青一段岩石类型虽以大套厚层泥岩为主,但也普遍发育钙质、砂质条带和介形虫层薄夹层,这些薄夹层的储集空间相对于纯泥岩较为发育。笔者通过氩离子抛光后的扫描电子显微镜下观察,分析了储层的孔隙组成和孔隙类型<sup>[16]</sup>。

岩心观察结果表明,在青一段泥页岩储层发育段,泥页岩裂缝十分发育,断面可见储层沥青。经扫描电镜观察发现,青一段泥页岩发育的储集空间主要有3种类型,即微裂缝、溶蚀微孔及晶间微孔。密集发育的微裂缝组成了“水平+垂直的裂缝网络系统”,不但为油气储集提供了有效的空间,更重要的是沟通了微米—纳米级孔隙,有利于油气渗流(图版 -1~ -2)。粒间溶蚀孔和晶间微孔在粉砂岩—含粉砂泥岩中较普遍,尤其在纹层状灰质泥岩中,粒间溶蚀微孔更为发育,溶蚀微孔可达微米级(图版 -3~ -4)。

此外,本次研究还通过 ASAP2020 比表面测定仪对该区泥页岩样品的储集空间进行了定量描述,即岩石比表面与总孔体积的测定,测试过程严格遵守标准 SY/T6154—1995<sup>[17]</sup>(表 2)。结果表明,青一

表 2 松辽盆地北部不同层系泥页岩岩石比表面及孔径分布  
Table 2 Specific surface area and pore size distribution of different shale layers in northern Songliao Basin

层位	岩性	井深/m	BET 比表面/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	BJH 总孔体积/(mL·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/nm
沙河子组	暗色泥岩	3 658.11	2.959	0.143 35	7.354
沙河子组	暗色泥岩	3 975.16	2.898	0.282 00	7.142
沙河子组	暗色灰质泥岩	4 147.03	2.979	0.171 34	6.974
嫩江组	暗色灰质泥岩	3 903.00	1.493	0.003 41	9.511
嫩江组	暗色泥岩	4 118.80	1.095	0.031 07	7.425
青山口组	暗色泥岩	1 705.00	3.237	0.081 28	7.448
青山口组	暗色泥岩	1 645.22	3.542	0.077 29	7.245
青山口组	暗色泥岩	2 347.08	2.968	0.110 43	6.254
青山口组	暗色泥岩	2 322.39	2.997	0.143 24	9.254

段暗色泥岩样品比表面为 2.968~3.542 m<sup>2</sup>/g,总孔体积为 0.077 29~0.143 24 mL/g,平均孔隙直径为 6.254~9.254 nm,与同地区嫩江组和沙河子组暗色泥岩样品(比表面为 1.095~2.979 m<sup>2</sup>/g,总孔体积为 0.003 41~0.282 00 mL/g,平均孔隙直径为 6.974~9.511 nm)相差不大,而不同层系泥页岩含油气性明显不同,由此推断纳米级孔隙在储集作用方面贡献有限,粉砂质和灰质泥岩中发育的微米级孔隙对页岩油气,尤其是页岩油的富集影响更为显著。

### 4 页岩层系储集物性特征

采用气测法及 PDP 200 型脉冲渗透率仪对松辽盆地泥页岩的孔隙度和渗透率进行了实验测定,检测依据为 SY/T5336—2006<sup>[18]</sup>和 SY/T6490—2000<sup>[19]</sup>。测试结果表明,青一段泥页岩孔隙度为 2.84%~5.16%,平均为 3.93%,渗透率为 0.000 136~0.805 240 mD,平均为 0.173 8 mD。另据大庆油田研究院测定,青一段泥页岩(1 960~2 090 m)孔隙度为 1.4%~8.7%,平均为 4.4%,渗透率多小于 20μD;美国威德福实验室测定青一段泥页岩孔隙度为 3.5%~5.8%,平均为 4.6%,渗透率为 0.8~3.4μD,平均为 2.1μD。由此可以看出,青一段泥页岩属特低孔、特低渗储层。其中,粉砂质泥岩、含灰质泥岩及炭质粉砂岩等岩石类型孔隙度可达 5.0%~5.3%,渗透率可达 0.3~16.3 μD,是特低孔、特低渗储层中相对高孔渗发育的有利岩石类型,其发育的沉积旋回位置横向分布稳定,构成了研究区青一段页岩油可望获得突破的钻探层段。

### 5 结论

(1) 松辽盆地北部青一段泥页岩储层的岩石类型主要为含粉砂泥岩、粉砂质泥岩、含灰质泥岩及炭质粉砂岩等,其中粉砂质泥岩、含灰质泥岩及炭质粉砂岩脆性矿物含量较高,具有较好的造缝能力。

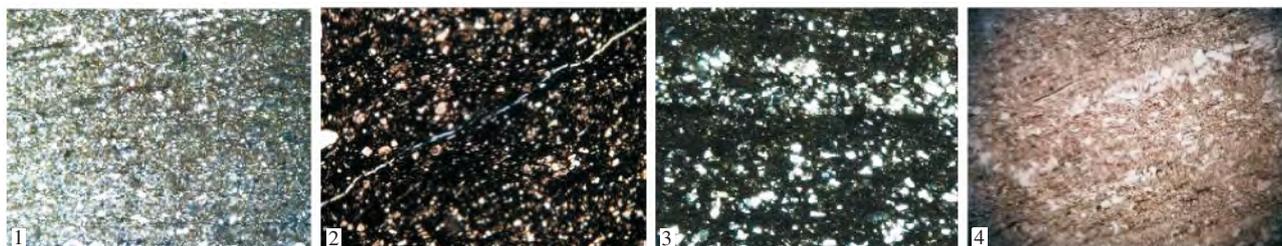
(2) 青一段泥页岩发育密集的微裂缝、粒间溶蚀孔、晶间微孔和有机质孔等,组成了“水平+垂直的裂缝网络系统”。在薄层粉砂岩夹层或纹层中,粒间溶蚀微孔更为发育,溶蚀微孔可达微米级。

(3) 青一段泥页岩孔隙度为 2.84%~5.16%,渗透率为 0.000 136~0.805 240 mD,属特低孔、特低渗储层。粉砂质泥岩、含灰质泥岩及炭质粉砂岩的物性较好,是有利的储集岩性。

## 参考文献:

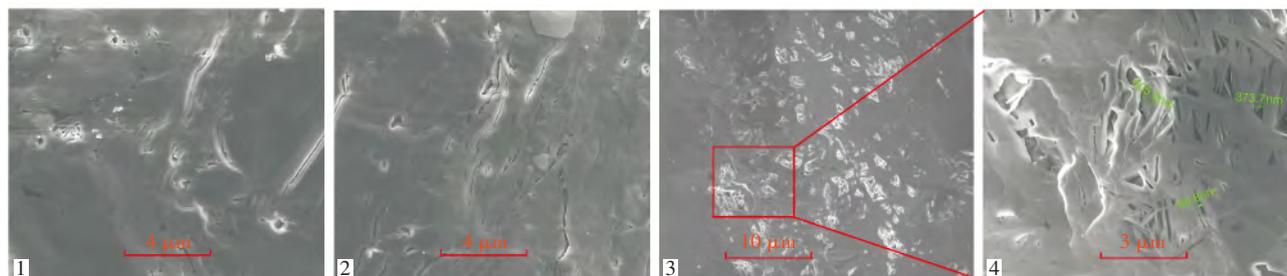
- [1] Chaudhary A S. Shale oil production performance from a stimulated reservoir volume[D]. Texas: Texas A & M University, 2011: 1-11.
- [2] 张小龙, 张同伟, 李艳芳, 等. 页岩气勘探和开发进展综述[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(2): 116-122.
- [3] 霍凤斌, 张涛, 徐发, 等. “两层·六端元”页岩评价方法在下扬子地区的应用[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(3): 87-91.
- [4] Kuuskraa V A, Schmoker J W. Koperna Barnett shale rising star in Fort Worth basin[J]. Oil & Gas Journal, 1998, 96(21): 67-76.
- [5] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shales[J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 848-861.
- [6] 祝彦贺, 胡前泽, 陈桂华, 等. 北美 A-29 区块页岩油资源潜力分析[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(3): 66-70.
- [7] Sondergeld C H, Ambrose R J, Rai C S. Micro-structural studies of gas shale[R]. SPE 131711, 2010.
- [8] Gale F W, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments [J]. AAPG Bulletin, 91(4): 603-622.
- [9] 霍秋立, 曾花森, 张晓畅, 等. 松辽盆地北部青山口组一段有效烃源岩评价图版的建立及意义[J]. 石油学报, 2012, 33(3): 379-384.
- [10] 张静平, 唐书恒, 吕建伟, 等. 松辽盆地青山口组一段油页岩成矿条件及有利目标区分析[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 156-162.
- [11] 杨振恒, 李志明, 王果寿, 等. 北美典型页岩气藏岩石学特征、沉积环境和沉积模式及启示[J]. 地质科技情报, 2010, 29(6): 59-65.
- [12] 李娟, 于炳松, 郭峰. 黔北地区下寒武统底部黑色页岩沉积环境条件与源区构造背景分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(1): 20-31.
- [13] 李婧婧, 汤达祯, 许浩, 等. 准噶尔盆地南缘大黄山矿区二叠系芦草沟组油页岩沉积特征[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(1): 68-72.
- [14] 陈方文, 卢双舫, 黄振凯, 等. 松辽盆地古龙凹陷青一段沉积特征及有利勘探区[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(5): 1955-1963.
- [15] Alqahtani A A, Mokhtari M, Tutuncu A N, et al. Effect of mineralogy and petrophysical characteristics on acoustic and mechanical properties of organic rich shale[R]. SPE 168899, 2013.
- [16] 何涛, 王芳, 汪伶俐. 致密砂岩储层微观孔隙结构特征——以鄂尔多斯盆地延长组长 7 储层为例[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(4): 23-26.
- [17] 中国石油天然气总公司. SY/T6154—1995 岩石比表面和孔径分布测定静态氮吸附容量法[S]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [18] 石油工业标准化委员会. SY/T5336—2006 岩心分析方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [19] 石油测井专业标准化委员会. SY/T6490—2000 岩样核磁共振参数实验室测量规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 2000.

## 图版



图版 说明: 松辽盆地北部青一段不同岩相类型显微照片。1. 含粉砂泥岩, Y16 井, 1 645.22 m, 单偏光,  $\times 100$ ; 2. 粉砂质泥岩, SJ5 井, 2 430.00 m, 单偏光,  $\times 100$ ; 3. 含灰质泥岩, ZS1 井, 2 903.00 m, 单偏光,  $\times 100$ ; 4. 炭质粉砂岩, Y12 井, 1 705.00 m, 单偏光,  $\times 100$

## 图版



图版 说明: 1. 大量微裂缝发育, Y29 井, 2 094.70 m, 扫描电镜; 2. 大量微裂缝发育, 并伴有裂缝溶蚀现象, Y29 井, 2 094.70 m, 扫描电镜; 3. 大量溶蚀孔发育, GP1 井, 2 804.40 m, 扫描电镜; 4. 典型溶蚀孔孔径测量, GP1 井, 2 804.40 m, 扫描电镜

(本文编辑: 于惠宇)