

内蒙古索伦地区二叠系哲斯组泥岩微孔隙特征

李世臻,周新桂,王丹丹,张交东,林燕华,曾秋楠,张文浩

(中国地质调查局 油气资源调查中心,北京 100029)

摘要:在野外地质露头实测、系统取样和综合分析测试的基础上,对松辽西部外围内蒙古索伦地区上古生界二叠系哲斯组暗色泥岩的地球化学特征与微孔隙特征进行了研究。结果表明,哲斯组泥岩微孔隙主要包括微孔(粒间孔、粒内孔、有机质孔)和微裂缝(矿物层间缝、有机质与矿物间缝、有机质内裂缝)。进一步的微孔隙发育特征和成因分析得出,哲斯组泥岩有机质孔相对不发育的特征主要与TOC含量偏低及较强压实作用下的有机质孔塌陷作用有关,而泥岩微裂缝的发育主要与其脆性矿物含量较高有关。综合烃源岩与储集特征分析,索伦地区哲斯组泥岩具备了页岩气远景区的条件,寻找TOC含量高的富有机质泥页岩发育区是今后该区乃至东北地区上古生界页岩气勘探的关键。

关键词:泥岩;地球化学特征;微孔隙特征;哲斯组;索伦地区;内蒙古

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Micro-structure analysis of mudstones in the Middle Permian Zhesi Formation in Solun area, Inner Mongolia

Li Shizhen, Zhou Xingui, Wang Dandan, Zhang Jiaodong, Lin Yanhua, Zeng Qiunan, Zhang Wenhao

(Oil and Gas Resources Survey Center, China Geological Survey Bureau, Beijing 100029, China)

Abstract:The geochemical characteristics and micro-structure of dark mudstones from the Middle Permian Zhesi Formation in Solun area, Inner Mongolia were studied using field outcrops, samplings, and systematic analyses. Micro-pores (including interparticle, intraparticle and organic pores) and micro-fractures (including interlayer fractures in minerals, fractures between organic matter and minerals, and fractures in organic matter) developed in mudstones in the Zhesi Formation. Organic pores were not well developed in the Zhesi mudstones, mainly due to low TOC content and pore collapse under strong compaction effect. Micro-fractures were well developed thanks to high brittle mineral content. The characteristics of source rocks and reservoirs showed that mudstones in the Zhesi Formation have a good prospect for shale gas exploration. The areas with widespread mudstones rich in organic matter are targets for shale gas in the Upper Paleozoic in Northeast China.

Key words: mudstone; geochemical characteristics; characteristics of micro-pores and fractures; Zhesi Formation; Solun area

随着世界页岩气勘探的深入和实验技术的进步,对不同于常规砂岩、碳酸盐岩储层的泥页岩储层研究不断加强^[1-2],页岩气储层微观孔隙结构,尤其纳米级孔隙及其特征日渐成为研究的重点。众多学者认识到,微观孔隙结构表征是页岩气储层评价的核心内容,也是开展页岩气资源评价的最基础性工作,不同的孔隙、微裂缝、矿物组成影响着总孔隙度的大小、渗透性和储气能力^[3-5]。

由于泥页岩的复杂性和非均质性,微孔隙特征也成为研究的难点。许多学者从孔隙类型^[6-7]及其贡献^[8]、不同矿物对微观孔隙的贡献^[9]、纳米孔

隙孔径与体积分布^[2,10]、微观结构与富集天然气能力^[7]等方面进行了大量探讨。但目前泥页岩储层孔隙大小的分类尚无统一的标准和界定^[10-12];而泥页岩微观孔隙结构在产状上分为微孔隙和微裂缝,这已得到业内广泛共识。不同学者又将微孔隙、微裂缝按照形态产状或形成原因进行了详细分类^[6-8,13-15]。通过对储层微观结构的观察,研究其分类、地质成因、主要特征等,可以更好地评价页岩气储层特征和资源潜力,同时对经济开发前景做出准确判断。

松辽盆地及外围地区上古生界沉积厚度巨大,

收稿日期:2016-03-05;修订日期:2016-05-18。

作者简介:李世臻(1982—),男,博士,高级工程师,从事油气调查与石油地质综合研究。E-mail:lishz2006@sina.com。

通信作者:周新桂(1966—),男,博士,研究员,从事石油地质研究。E-mail:xinguizhou100@sina.com。

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(1211302108019-2)资助。

近年来,越来越多的学者通过研究认为“上古生界除局部遭受不同程度的动力接触变质或热力变质外,未发生区域变质”^[16-18],东北地区上古生界暗色泥岩的生烃条件及油气或页岩气资源远景得到广泛认可^[17,19-25]。

内蒙古索伦地区二叠系哲斯组暗色泥岩厚度巨大,是上古生界重要的烃源岩层,近年来被评价为中等或中等—好烃源岩^[16,20],认为具有一定资源潜力,但对于其作为页岩气储层的研究还相当薄弱。本次通过对索伦地区好仁苏木等地的哲斯组剖面实测及系统采样,完成了样品的有机质含量、成熟度、最大热解峰温、常量元素、矿物组成、微观结构等大量测试分析,在此基础上,系统剖析了哲斯组泥岩的地球化学特征、微观孔隙结构特征及页岩气资源前景,以期今后该区乃至东北地区的页岩气资源勘查提供科学依据。

1 地质背景

内蒙古索伦地区位于大兴安岭中南部,东临乌兰浩特,南至霍林郭勒,西与阿尔山毗连,北到扎兰屯,区内二叠系呈北北西向狭长带状展布。按照最新的大地构造区域划分观点^[17,26],索伦地区处于佳蒙地块的南缘,中二叠统哲斯组主体为一套稳定的具有被动大陆边缘特征的沉积建造,属于海相及海陆交互互相沉积,主要发育碳酸盐岩、砂岩、泥岩、粉砂质泥岩等,整体具有海平面不断下降的特点。

2 剖面位置与样品采集测试

索伦地区哲斯组剖面,位于内蒙古兴安盟科尔沁右翼前旗好仁苏木附近(图1),是典型的哲斯组出露区。该剖面出露较长,本次实测选取其中出露较好的一段(长821 m),分为27层,并进行了系统采样并编号。

该段地层主要以灰黑色泥岩为主,其次为粉砂质泥岩、细砂岩、泥质粉砂岩。暗色泥岩多为块状、

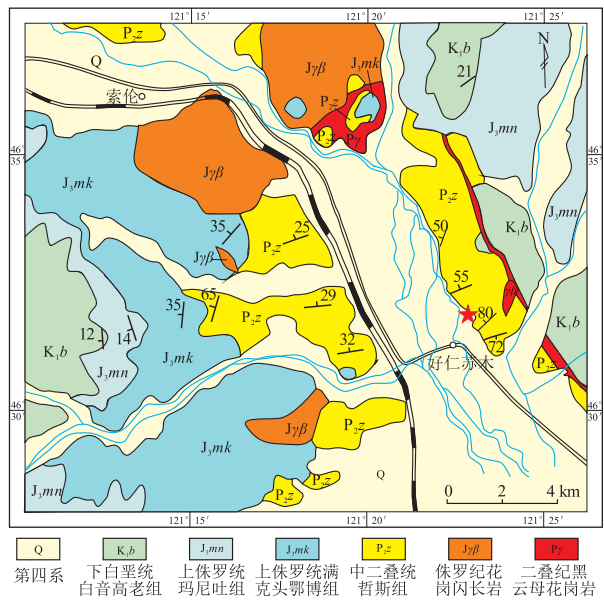


图1 内蒙古科尔沁右翼前旗索伦地区研究区地质概况

Fig.1 Geological map of Solun area, Horqin Right Front Banner, Inner Mongolia

厚层状构造,水平层理发育,地表泥岩劈理面较发育,与层面高角度相交(图2)。据岩性及沉积旋回等野外沉积特征初步推断,该地层是一套浅海三角洲前缘到深水陆棚相沉积,反映当时的沉积环境覆水较深。

本次研究主要对泥岩样品进行了系统分析,其中有机地球化学样品分析13件,矿物含量分析样品16件,常量元素分析样品14件,有机质元素分析样品4件,并对12件样品开展了电镜扫描,选取其中4件进行了氩离子抛光。

3 地球化学特征

3.1 有机地球化学

3.1.1 总有机碳含量

对13个样品的统计显示,总有机碳含量(TOC)在0.55%~1.01%之间,平均值为0.76%,与

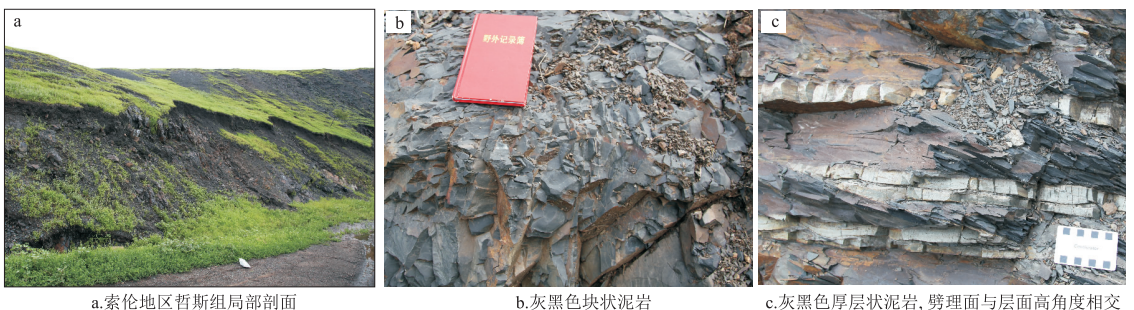


图2 内蒙古科尔沁右翼前旗索伦地区哲斯组泥岩照片

Fig.2 Mudstones from the Zhesi Formation in Solun area, Horqin Right Front Banner, Inner Mongolia

宋土顺等^[20]得出总体在 0.6%~1.0% 之间的结果相吻合;哲斯组暗色泥岩达到中等烃源岩标准,具备了油气生成的物质条件。

3.1.2 有机质成熟度

7 个泥岩样品的镜质体反射率(R_o) 在 1.64%~2.18% 之间,平均值为 1.82%;13 个泥岩样品的最大热解峰温(T_{max}) 处于 398~556 °C 之间,平均值为 483 °C,表明哲斯组总体处于高成熟—过成熟阶段。

3.1.3 有机质类型

有机质类型是评价烃源岩的重要指标,由于烃源岩成熟度高,样品干酪根元素组成中 H 的含量比较低,H/C 原子比基本上在 0.5 以下,O/C 原子比较高,绝大多数大于 0.1,不能很好地反映其原始有机质的类型, I_H 与 T_{max} 划分类型图亦不能很好地反映其母质类型。但从 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{27}$ 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷分布来看,哲斯组烃源岩都以 $\alpha\alpha\alpha 20R-C_{27}$ 规则甾烷占绝对优势,显示以 II₁、II₂ 型为主。从甾、萜类化合物分布看,反映其母质来源以藻类等低等水生生物为主。

3.2 矿物学特征

对索伦地区哲斯组剖面的 16 个样品测试进行了统计,脆性矿物(石英+钾长石+斜长石+碳酸盐)含量处于 44.2%~68.1%,平均值为 60.2%。其中主要脆性矿物为石英,含量占总矿物含量的 27.8%~48.7%,平均值为 39.78%;其次是斜长石,平均值为 15.1%;碳酸盐矿物(方解石+白云石+菱铁矿)含量较低,平均值为 5.3%;黏土矿物含量为 30.1%~50.8%,平均值为 39.8%(图 3)。黏土矿物主要由伊蒙混层和伊利石组成,伊蒙混层占黏土矿物含量的 35%~71%,平均值为 54.25%;伊利石占黏土矿物的 29%~58%,平均值为 42.14%;而伊蒙混层中蒙皂石混层比为 8%~27%,平均值为 16.5%。

3.3 元素特征

3.3.1 常量元素

索伦地区哲斯组 14 个样品的常量元素特征基本一致。样品具有高硅、高铝、高铁、低镁、低钙的特点, SiO_2 含量为 59%~63.47%,平均值为 61.85%; Al_2O_3 含量为 16.79%~18.73%,平均值为 17.60%; Fe_2O_3 含量为 4.61%~7.85%,平均值为 6.09%。与北美页岩相比,CaO 和 MgO 的含量均较低(其中 CaO 含量为 0.43%~1.22%,平均值为 0.64%;MgO 含量为 0.046%~0.138%,平均值为 0.08%),说明泥岩样品中碳酸盐的含量很低,与前面矿物分析结果一致。 SiO_2 的含量主要与富硅矿物(如石英、长石、黏土类)含量有关,而 Al_2O_3 含量则与长石、云母、黏土矿物等富铝矿物含量有关。

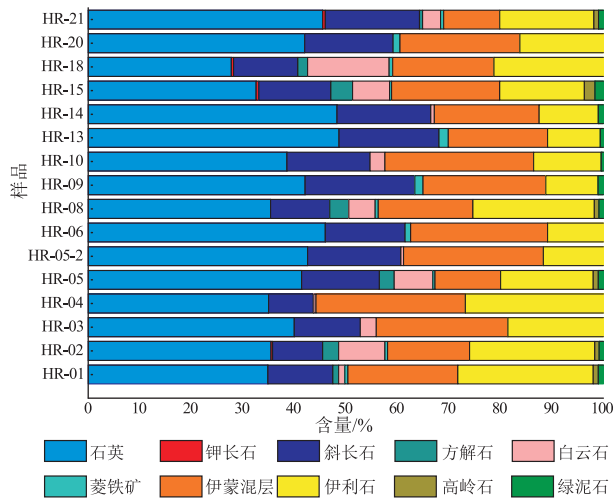


图 3 内蒙古科尔沁右翼前旗索伦地区哲斯组矿物构成

Fig.3 Mineral composition of the Zhesi Formation in Solun area, Horqin Right Front Banner, Inner Mongolia

3.3.2 有机质中的元素

通过电镜扫描发现,样品中有机质显示出灰黑色或黑色,与周围矿物区分明显。对 4 个样品中典型的有机质部分进行能谱扫描,有机质中有机碳的含量最高,质量分数平均值为 52.53%;其次为 Si,质量分数平均值为 13.99%;再次为 O,质量分数平均值为 14.81%。另外含有 K、Ca、Fe、Mg 等其他无机元素,但含量均较低。在扫描电镜下,有机质分布较多,呈分散状分布。在有机质内部,没有发现明显的有机质孔和充填矿物,但微裂缝发育(图 4)。

4 微孔隙特征

本次研究的微孔隙主要为纳米和微米级孔隙,通过扫描电子显微镜(SEM)和氩离子抛光技术,在大量系统的观察统计和总结前人对微孔隙分类的基础上,将索伦地区哲斯组泥岩微孔隙分为微孔和微裂缝,微孔进一步划分为粒间孔、粒内孔和有机质孔;微裂缝进一步划分为矿物层间缝、有机质与矿物间缝和有机质内裂缝。

4.1 微孔

(1) 粒间孔。本区粒间孔较为常见,又可进一步分为矿物颗粒间孔和溶蚀粒间孔。矿物颗粒间孔,存在于较大的矿物晶体堆积体中或存在于黏土矿物骨架中,形态大部分不规则,不圆滑,棱角状,孔隙结构复杂,但连通性好,孔径一般为 0.1~4 μm (图 5a);溶蚀孔主要与方解石、白云石和长石伴生,受到成岩晚期及埋藏过程中流体的溶蚀而成,形态较为圆滑,在其周围经常还可以见到新生矿物(图 5b,c)。

(2) 粒内孔。本区粒内孔形态相对圆滑,较为孤立,一般 0.01~5 μm (图 5d)。

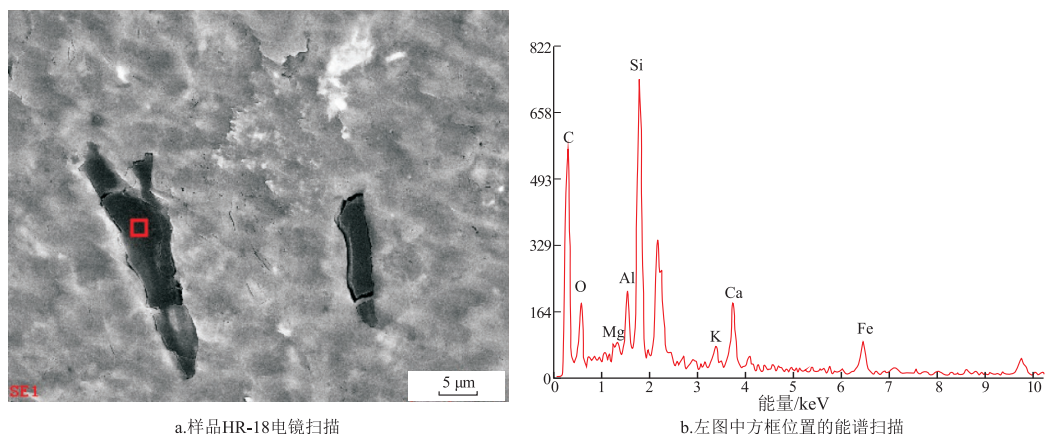


图4 内蒙古科尔沁右翼前旗索伦地区哲斯组有机质电镜扫描与能谱分析

Fig.4 SEM and EDS analysis of organic matter from the Zhesi Formation in Solun area, Horqin Right Front Banner, Inner Mongolia

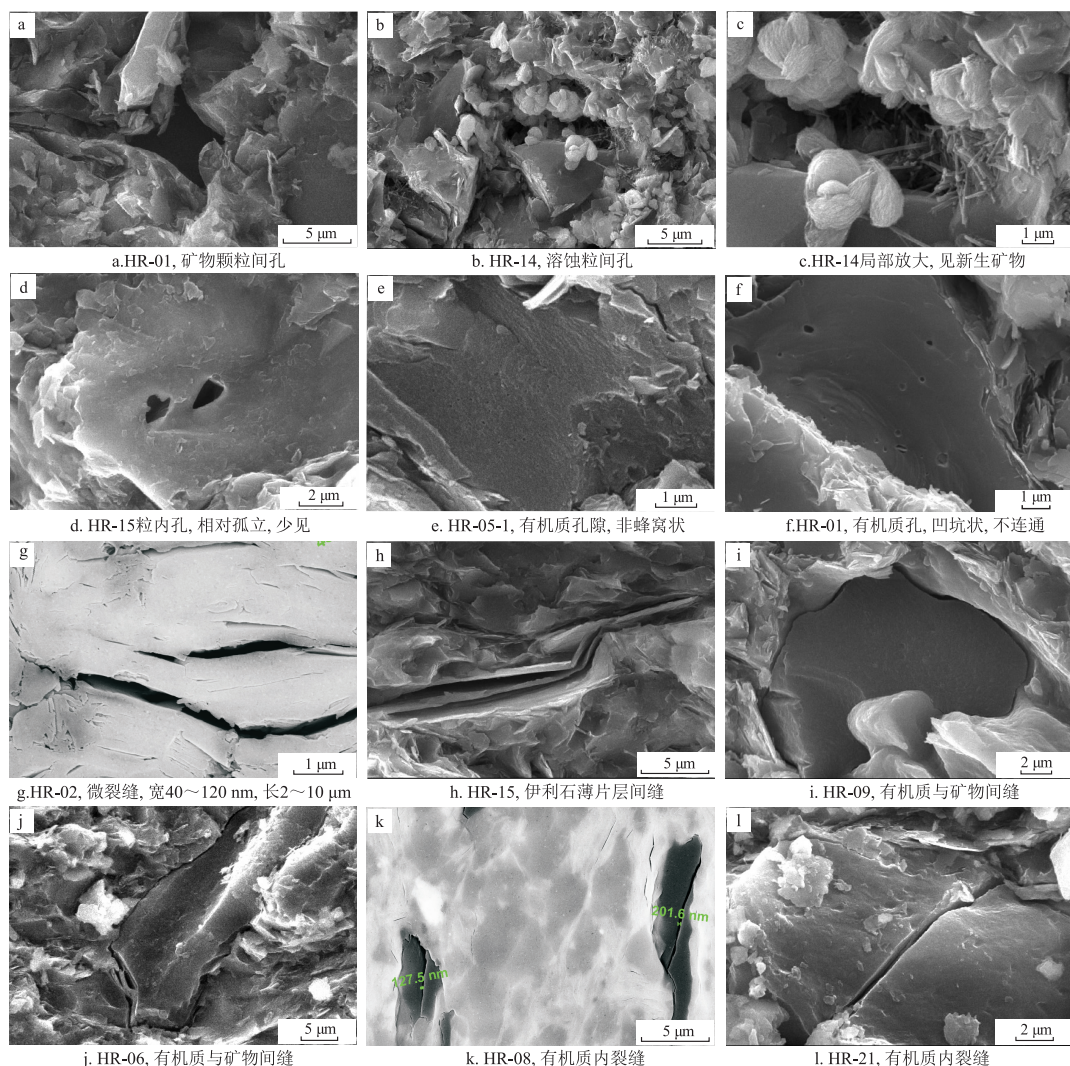


图5 内蒙古科尔沁右翼前旗索伦地区哲斯组微孔、微裂缝特征

Fig.5 Characteristics of micro-pores and micro-fractures in mudstones from the Zhesi Formation in Solun area, Horqin Right Front Banner, Inner Mongolia

(3)有机质孔。该类孔隙在样品中不常见, 相对孤立, 圆形、椭圆形, 凹坑状或片麻状, 边缘光滑, 纳米级别, 一般为 50~800 nm (图 5e, f)。

4.2 微裂缝

微裂缝较为常见, 缝宽一般为 10~300 nm 不等, 长度为微米级别, 一般未被其他矿物充填, 可进

表 1 内蒙古科尔沁右翼前旗索伦地区哲斯组泥岩微观孔隙分类及特征

Table 1 Classification and characteristics of micro pores and fractures in mudstones from the Zhesi Formation in Solun area, Horqin Right Front Banner, Inner Mongolia

微孔隙类型		形成原因	特征与规模	典型图像
微 孔	矿物颗粒间孔	成岩后生阶段由于重结晶作用、白云化作用,形成于晶形较好、晶体粗大的矿物之间	较常见,多为棱角状,不圆滑,一般为 0.1~4 μm	图 5a
	溶蚀粒间孔	钙质、长石等溶解(或溶蚀)作用形成的次生溶孔	较常见,不规则,较圆滑,常伴有新生矿物,较矿物颗粒间孔要大,一般为 0.2~20 μm	图 5b, c
	粒内孔	矿物内部发生溶蚀作用形成	不常见,孤立出现,相对圆滑,一般几十纳米~5 μm	图 5d
	有机质孔	高过成熟阶段,有机质热降解大量生排烃后形成的微孔	不常见,圆形、椭圆形,凹坑状或片麻状,边缘光滑,相对孤立,纳米级别,一般为 50~800 nm	图 5e, f
微 裂 缝	矿物层间缝	成岩后生阶段由于重结晶作用、白云化作用形成于晶形较好、晶体粗大的同种矿物之间	常见,长条形,一般宽 50~300 nm,长 2~10 μm	图 5g, h
	有机质与矿物间缝	有机质生烃膨胀,后温度降低冷缩形成	较常见,与有机质外部轮廓一致,一般宽 50~200 nm,长度取决于有机质大小	图 5i, j
	有机质内裂缝	有机质内含有 Si、Fe、Al 等无机脆性矿物,受压破裂形成	部分有机质可见,长条形,或横切穿透有机质,或仅存于内部,宽 100~200 nm,长 2~10 μm	图 5k, l

一步细分为矿物层间缝、有机质与矿物间缝和有机质内裂缝,其特征见表 1。

(1) 矿物层间缝。通常是薄片状黏土矿物及集合体或大颗粒矿物层间的裂缝,或受压力破裂形成,长条形,一般缝宽 50~300 nm,长 2~10 μm (图 5g, h)。图 5h 是伊利石薄片定向排列造成的。

(2) 有机质与矿物间缝。有机质生烃膨胀,生烃后体积收缩与周围矿物残留的裂缝,一般未被其他物质充填,在有机质周围较常见,形态取决于有机质的外部形状,与有机质外部轮廓一致,一般缝宽 50~200 nm,长度取决于有机质大小(图 5i, j)。

(3) 有机质内裂缝。该裂缝一般比较平直,曲折度较小,少有胶结物充填,初步分析其形成原因为有机质内含有 Si、Fe、Al 等无机脆性矿物,在压实作用下受压力破裂形成。其形呈长条状,或横切穿透有机质,或存于有机质内部,宽 100~200 nm,长 2~10 μm (图 5k, l)。较之微孔来说,本区微裂缝较发育,其形成主要与岩石脆性矿物含量高有关。

5 讨论

5.1 有机质孔不发育的主要因素

本次采集的样品 $R_o = 1.64\% \sim 2.18\%$, 平均值为 1.82%, 处于高成熟—过成熟阶段; 总有机碳含

量处于 0.55%~1.01% 之间, 平均值为 0.76%, 仅在 $w(\text{TOC}) > 0.8\%$ 的少量样品中 (HR-05-01, $w(\text{TOC}) = 0.91\%$; HR-01, $w(\text{TOC}) = 0.80\%$) 见到有机质孔, 且不十分发育。说明 TOC 含量的多少直接影响了有机质孔的发育, TOC 含量较低是有机质孔不发育的主要原因。另外, 有机质孔不发育与页岩热成熟度过高有关, 有机碳可能出现碳化, 在地质时期较强的压实作用下, 导致在生烃后出现的有机质孔部分出现塌陷压实, 从而使有机质孔保留较少。

5.2 有机质中的无机矿物

有机质母质在沉积时, 黏土矿物中蒙皂石吸附有机质的能力最强, 伊利石最弱, 有机质与黏土矿物结合形成有机黏土复合体。这种结合为有机质的聚集、沉积和保存打下了基础^[27], 因而, 在有机质中检测到 Si、Fe、Al 等无机矿物。本次所采样品中主要由伊蒙混层和伊利石组成, 伊蒙混层占黏土矿物的 35%~71%, 平均值为 54.25%, 伊利石占黏土矿物的 29%~58%, 平均值为 42.14%。有机质中含有 Si、Fe、Al 等无机矿物, 增加了有机质的脆性, 有机质中微裂缝发育与无机矿物含量高有直接关系。无机矿物与有机质的结合, 降低了有机质的纯度, 但为有机质的保存提供了良好条件, 总体不

影响有机质的生烃能力。

5.3 页岩气资源前景

在页岩气选区过程中,有机质丰度、有机质成熟度、矿物组成、孔隙度和渗透率、厚度、埋深、含气量是表征页岩气富集程度最基本的参数^[28-31]。一般认为在有机碳含量大于0.5%、有机质成熟度大于0.4%、岩石总孔隙度大于3%、渗透率大于 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 等条件下即可形成页岩气。索伦地区样品 $w(\text{TOC}) = 0.55\% \sim 1.01\%$,有机质成熟度处于1.6%~2.2%之间,平均值为1.76%,有机质达到高一过成熟,具备了页岩气生气条件;脆性矿物含量处于44.2%~68.1%,平均值为60.2%,易形成天然裂缝和诱导裂缝,达到了页岩气远景区的标准^[30]。但该区所测样品的TOC较低,制约了页岩气高丰度富集,因此,寻找TOC较高的有利区,是未来东北地区上古生界页岩气勘探的关键。

6 结论

(1)索伦地区二叠系哲斯组泥岩微孔隙主要为粒间孔和微裂缝。TOC含量较低与有机质演化程度较高是本区有机质孔不发育的主要原因,而微裂缝的发育与其含有Si、Fe、Al等无机矿物有直接关系;无机矿物与有机质的结合,降低了有机质的纯度,但为有机质的保存提供了良好条件。

(2)索伦地区哲斯组泥岩达到了页岩气远景区的标准,但所测样品TOC含量偏低,制约页岩气的高丰度富集。寻找TOC含量高的富有机质泥页岩发育区是今后东北地区上古生界页岩气勘探的关键。

致谢:在论文的完善过程中,中国地质大学(北京)陶树副教授、中国石化石油勘探开发研究院聂海宽高级工程师提出了指导意见,在此致谢。

参考文献:

- [1] 朱如凯,白斌,崔景伟,等.非常规油气致密储集层微观结构研究进展[J].古地理学报,2013,15(5):615-623.
Zhu Rukai, Bai Bin, Cui Jingwei, et al. Research advances of microstructure in unconventional tight oil and gas reservoirs [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 615-623.
- [2] Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1099-1199.
- [3] Ambrose R J, Hartman R C, Diaz-Campos M, et al. New pore-scale considerations for shale gas in place calculations [J]. SPE Journal, 2012, 17(1): 219-229.
- [4] 王玉满,董大忠,杨桦,等.川南下志留统龙马溪组页岩储集空间定量表征[J].中国科学(地球科学),2014,44(6):1348-1356.
Wang Yuman, Dong Dazhong, Yang Hua, et al. Quantitative characterization of reservoir space in the Lower Silurian Longmaxi Shale, southern Sichuan, China [J]. Science China (Earth Sciences), 2014, 57(2): 313-322.
- [5] Clarkson C R, Wood J M, Burgis S E, et al. Nanopore structure analysis and permeability predictions for a tight gas/shale reservoir using low-pressure adsorption and mercury intrusion techniques [C]// SPE Americas Unconventional Resources Conference. Pittsburgh, Pennsylvania, USA; Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [6] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [7] 聂海宽,边瑞康,张培先,等.川东南地区下古生界页岩储层微观类型与特征及其对含气量的影响[J].地学前缘,2014,21(4):331-343.
Nie Haikuan, Bian Ruikang, Zhang Peixian, et al. Micro-types and characteristics of shale reservoir of the Lower Paleozoic in Southeast Sichuan Basin, and their effects on the gas content [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 331-343.
- [8] 王玉满,董大忠,李建忠,等.川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J].石油学报,2012,33(4):551-561.
Wang Yuman, Dong Dazhong, Li Jianzhong, et al. Reservoir characteristics of shale gas in Longmaxi Formation of the Lower Silurian, southern Sichuan [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(4): 551-561.
- [9] Choquette P W, Pray L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates [J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(2): 207-250.
- [10] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等.川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J].煤炭学报,2012,37(3):438-444.
Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Structure characteristics and accumulation significance of nanopores in Longmaxi shale gas reservoir in the southern Sichuan Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 438-444.
- [11] Rouquerol J D, Avnir C W, Fairbridge D H, et al. Recommendations for the characterization of porous solids [J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(8): 1739-1758.
- [12] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C. Morphology, genesis, distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(12): 848-861.
- [13] 韩双彪,张金川, Horsfield B, 等.页岩气储层孔隙类型及特征研究:以渝东南下古生界为例[J].地学前缘,2013,20(3):247-253.
Han Shuangbiao, Zhang Jinchuan, Horsfield B, et al. Pore types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(3): 247-253.
- [14] 李世臻,姜文利,王倩,等.中国页岩气地质调查评价研究现状与存在问题[J].地质通报,2013,32(9):1440-1446.
Li Shizhen, Jiang Wenli, Wang Qian, et al. Research status and

- currently existent problems of shale gas geological survey and evaluation in China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(9):1440-1446.
- [15] 龙鹏宇,张金川,姜文利,等.渝页 1 井储层孔隙发育特征及其影响因素分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(10):3954-3963.
Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Jiang Wenli, et al. Analysis on pores forming features and its influence factors of reservoir well Yuye-1 [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(10):3954-3963.
- [16] 张永生,王延斌,卢振权,等.松辽盆地及外围地区石炭系—二叠系烃源岩的特征[J].地质通报,2011,30(2-3):214-220.
Zhang Yongsheng, Wang Yanbin, Lu Zhenquan, et al. Characteristics of source rocks from Carboniferous-Permian in Songliao Basin and its peripheral area, northeastern China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2-3):214-220.
- [17] 张兴洲,周建波,迟效国,等.东北地区晚古生代构造—沉积特征与油气资源[J].吉林大学学报(地球科学版),2008,38(5):719-725.
Zhang Xingzhou, Zhou Jianbo, Chi Xiaoguo, et al. Late Paleozoic tectonic-sedimentation and petroleum resources in Northeastern China [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2008, 38(5):719-725.
- [18] 任收麦,乔德武,张兴洲,等.松辽盆地及外围上古生界油气资源战略选区研究进展[J].地质通报,2011,30(2/3):197-204.
Ren Shoumai, Qiao Dewu, Zhang Xingzhou, et al. The present situation of oil & gas resources exploration and strategic selection of potential area in the Upper Paleozoic of Songliao Basin and surrounding area, NE China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2/3):197-204.
- [19] 董清水,张凯文,许之,等.吉林延边地区上古生界油气资源潜力分析[J].石油实验地质,2013,35(2):120-126.
Dong Qingshui, Zhang Kaiwen, Xu Zhi, et al. Hydrocarbon potential of Upper Paleozoic in Yanbian area, Jilin Province [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(2):120-126.
- [20] 宋土顺,朱占平,曲希玉,等.内蒙古乌兰浩特市索伦镇中二叠统哲斯组海相暗色泥岩有机地球化学特征[J].地质通报,2011,30(2/3):300-307.
Song Tushun, Zhu Zhanping, Qu Xiyu, et al. Organic geochemistry characteristics of marine dark mudstone in the Middle Permian Zhesi Formation in Suolun area of Inner Mongolia, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2/3):300-307.
- [21] 公繁浩,黄欣,陈树旺,等.内蒙古西乌珠穆沁旗地区寿山沟组烃源岩有机地球化学特征[J].地质通报,2013,32(8):1322-1328.
Gong Fanhao, Huang Xin, Chen Shuwang, et al. Organic geochemical characteristics of source rocks in Shoushangou Formation, Xi Ujimqin Banner of Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(8):1322-1328.
- [22] 王建强,薛林福,王满,等.松辽盆地北部石炭—二叠系油气远景[J].吉林大学学报(地球科学版),2011,41(S1):9-16.
Wang Jianqiang, Xue Linfu, Wang Man, et al. Oil-gas potential of Carboniferous-Permian formation in the North Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(S1):9-16.
- [23] 陈树旺,丁秋红,郑月娟,等.松辽外围早侏罗世—晚古生代油气远景分析[J].矿床地质,2010,29(S1):1037-1038.
Chen Shuwang, Ding Qiuhong, Zheng Yuejuan, et al. The oil and gas exploration prospect of early Jurassic - late Paleozoic formations, external Songliao Basin [J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(S1):1037-1038.
- [24] 康玉柱.中国东北、华北、西部等地区古生界油气前景探讨[J].西南石油大学学报(自然科学版),2009,31(3):1-7.
Kang Yuzhu. The oil and gas prospect of Paleozoic in several areas of the Northeast, the North and the West China [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2009, 31(3):1-7.
- [25] 朱占平,张明杨,孙雷,等.内蒙古索伦—林西地区林西组泥页岩储层特征[J].石油实验地质,2015,37(3):354-360.
Zhu Zhanping, Zhang Mingyang, Sun Lei, et al. Reservoir characteristics of mud shales from Upper Permian Linxi Formation in Suolun-Linxi area, Inner Mongolia [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2015, 37(3):354-360.
- [26] 王成文,金巍,张兴洲,等.东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识[J].地层学杂志,2008,32(2):119-136.
Wang Chengwen, Jin Wei, Zhang Xingzhou, et al. New understanding of the late Paleozoic tectonics in northeastern China and adjacent areas [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2008, 32(2):119-136.
- [27] 蔡进功,卢龙飞,丁飞,等.烃源岩中黏土与可溶有机质相互作用研究展望[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(12):1679-1684.
Cai Jingong, Lu Longfei, Ding Fei, et al. Significance of interaction between soluble organic matter and clay minerals in muddy source rocks [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2009, 37(12):1679-1684.
- [28] 李延钧,刘欢,刘家霞,等.页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(2):28-34.
Li Yanjun, Liu Huan, Liu Jiaxia, et al. Geological regional selection and an evaluation method of resource potential of shale gas [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2011, 33(2):28-34.
- [29] 王鹏万,陈子焯,贺训云,等.桂中坳陷泥盆系页岩气成藏条件与有利区带评价[J].石油与天然气地质,2012,33(3):353-363.
Wang Pengwan, Chen Ziliao, He Xunyun, et al. Shale gas accumulation conditions and play evaluation of the Devonian in Guizhong Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3):353-363.
- [30] 王社教,杨涛,张国生,等.页岩气主要富集因素与核心区选择及评价[J].中国工程科学,2012,14(6):94-100.
Wang Shejiao, Yang Tao, Zhang Guosheng, et al. Shale gas enrichment factors and the selection and evaluation of the core area [J]. *Engineering Science*, 2012, 14(6):94-100.
- [31] 张金川,林腊梅,李玉喜,等.页岩气资源评价方法与技术:概率体积法[J].地学前缘,2012,19(2):184-191.
Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. The method of shale gas assessment: Probability volume method [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(2):184-191.