

俞宽坤. 萍乐坳陷上二叠统乐平组泥页岩储层特征[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 520–530.

Yu Kuankun. Reservoir characteristics of Upper Permian Leping Formation shale in Pingle depression[J]. Geology in China, 2016, 43(2): 520–530 (in Chinese with English abstract).

萍乐坳陷上二叠统乐平组泥页岩储层特征

俞宽坤

(江西省煤田地质局 223 地质队, 江西 鹰潭 335000)

摘要:为了探讨萍乐坳陷地区乐平组泥页岩的储层特征,以野外地质调查、老井复查资料及样品的分析测试结果为基础,对研究区泥页岩的分布特征、地球化学特征、矿物组成特征及微孔隙特征等进行了较深入分析。结果表明:乐平组泥页岩在研究区分布广泛,平均厚度在 100 m 以上。泥页岩的有机碳含量较高,介于 0.21%~23.4%,平均为 1.74%, R_o 为 0.7%~4.06%,平均为 1.88%,处于成熟—高成熟阶段,干酪根类型以 II₂ 型为主。泥页岩中脆性矿物含量较高,以石英为主,平均为 47.94%,表明泥页岩具有好的压裂潜力。黏土矿物含量中等,平均为 34.93%,主要为伊利石和伊蒙混层。泥页岩的孔隙度平均为 3.5%,渗透率平均为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,反映了乐平组泥页岩储层物性较好。扫描电镜下观察泥页岩微孔隙类型主要为粒间孔、粒内孔和有机质孔。孔隙形态呈较开放状态,以细颈状墨水瓶孔和四边开放的平行板状孔等为主。进一步分析表明乐平组泥页岩微孔隙发育主要受有机碳含量和石英矿物含量控制,有机碳含量越高,微孔和中孔越发育,石英含量则对宏孔贡献明显。

关键词:上二叠统;乐平组;页岩气;储层特征;孔隙类型;萍乐坳陷

中图分类号:TE132;P536 文献标志码:A 文章编号:1000-657(2016)02-0520-11

Reservoir characteristics of Upper Permian Leping Formation shale in Pingle depression

YU Kuan-kun

(No. 223 Geological Party Coal Geological Bureau of Jiangxi Province, Yingtan 335000, Jiangxi, China)

Abstract: On the basis of field geological investigation, old well reexamination and analysis results, the reservoir characteristics of Leping Formation shale in Pingle depression was discussed in such aspects as distribution characteristics, geochemical characteristics, mineral composition features and micro-pore features. The results show that Leping Formation shale is widely distributed and its thickness is above 100 m. The total organic carbon content of shale is high, reaching up to 0.21%–23.4%, averagely 1.74%, the thermal evolution degree of shale is also high, with R_o in the range of 0.7%–4.06%, averagely 1.88%, and the organic matter type is mainly of type II₂. The shale has abundant brittle minerals consisting mainly of quartz (averagely 47.94%) and shows a good fracturing potential; the clay minerals content is moderate (averagely 34.93%) composed mainly of illite and andreattite. The shale reservoirs have an average porosity of 3.5% and average permeability of $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, implying a good

收稿日期:2015-03-03;改回日期:2015-06-08

基金项目:江西省重大科技专项(20124ABE02103,20124ABE02108)、江西省科技支撑计划项目(20132BBG70023)联合资助。

作者简介:俞宽坤,男,1965年生,高级工程师,从事煤田及页岩气地质方面的研究;E-mail: xgl223@163.com。

physical property. The types of micropores include intergranular pores, intragranular pores and organic pores, as shown by scanning electron microscope. Shale reservoir pore shapes show opening state, including two-end opened cylindrical shape and four sides opened parallel pores. Further analyses show that the organic carbon content and quartz content were the major factor to control the shale reservoir porosity development, the effect of total organic content on shale micro-pores was mainly manifested in the development of micropores and mesopores, and the quartz mineral content contributed to macropores.

Key words: Upper Permian; Leping Formation; shale gas; reservoir characteristics; types of micro-pores; Pingle depression

About the first author: YU Kuan-kun, male, born in 1965, Senior engineer, mainly engages in the study of coal and shale gas geology; E-mail: xgl223@163.com.

Fund support: Supported by Jiangxi Province Science and Technology Special Projects (No. 20124ABE02103, 20124ABE02108) and Jiangxi Province Science and Technology Support Project (No. 20132BBG70023).

1 前言

页岩气是一种非常规天然气藏,具有典型的自生自储、原地成藏的特点,近年来受到国内外学者的广泛关注^[1-7]。全球估计页岩气资源量超过 $1000 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[4],其中中国页岩气资源量约为 $134 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (不含青藏区),主要分布于上扬子及滇黔桂区、华北及东北区、中下扬子及东南区等区域^[8]。因此,开展页岩气资源调查及勘探研究工作具有重要的意义。

江西省作为国土资源部发展页岩气13个重点规划省份之一,页岩气资源丰富。据国土资源部油气战略研究中心2012年公布的研究成果,江西省页岩气资源量高达 $1.18 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中萍乐坳陷页岩气地质资源量为 $0.62 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。江西省发育多套含气页岩层系,厚度较大、范围较广,具备形成大规模页岩气资源的地质基础。前人就江西北部地区下寒武统黑色页岩进行了较为深入的研究,在古生物、沉积环境、成藏条件、储层特征等方面进行了较为详细的探讨^[9-11],但是对于萍乐坳陷地区上二叠统乐平组地层的研究却鲜有报道。因此,本文以萍乐坳陷上二叠统乐平组为研究对象,以野外地质调查、老井复查资料及样品的分析测试结果为基础,对研究区泥页岩的分布特征、地球化学特征、矿物组成特征及微孔隙特征等进行了较深入分析,并利用扫描电镜技术分析了泥页岩储层的孔隙类型,探讨乐平组泥页岩储层特征及其主控因素,以为萍乐坳陷地区乐平组页岩气的勘探开发提供一定的地质依据。为了研究需要,本文参考IUPAC对孔隙孔径的分类标准将页岩的孔隙划分为:宏孔($>50 \text{ nm}$)、中孔($2 \sim 50 \text{ nm}$)和微孔($<2 \text{ nm}$)。

2 地质背景及样品采集、测试

2.1 地质背景

江西省地处欧亚大陆板块的东南缘,以中部萍乡—广丰断裂带为界,将江西省划分为赣北、赣中南两大构造单元,分别地属于下扬子板块西南缘及南华活动带^[12]。晋宁运动及加里东运动的两次碰撞造山运动致使扬子板块和华南造山带对接成为统一的整体,萍乐坳陷处于华南造山带的北部边缘,具有扬子板块和华南造山带两大构造单元的过渡性质,区域构造分析证实萍乐坳陷为华南被动大陆边缘盆地北缘的拉分断陷盆地^[12]。

二叠系在萍乐坳陷地区广泛分布,沉积厚度较大,自下而上分为下二叠统马平组、中二叠统栖霞组、小江边组、茅口组和南港组、上二叠统乐平组和长兴组。其中乐平组主要为一套含煤碎屑岩沉积,以泥页岩、砂岩夹煤层为主,由底至顶可分为4段:官山段、老山段、狮子山段和王潘里段,其中以老山段泥页岩十分发育,尤其是中老山段以黑色泥页岩为主,下老山段泥岩、含炭泥页岩亦十分发育,两者的厚度可达100 m以上。乐平组泥页岩在平面展布上总体呈现西厚东薄之势,暗色泥页岩的厚度中心主要位于萍乐坳陷西段樟树—丰城地区,平均厚度超过140 m(图1)。

2.2 样品采集及测试

本次研究共采集样品83块,采样位置见图1,岩性主要为黑色泥页岩或粉砂质泥页岩,均为老井复查岩心样品。对部分样品进行了黏土矿物及全岩X衍射分析、地球化学参数测试、高压压汞分析及低温液氮等测试分析。

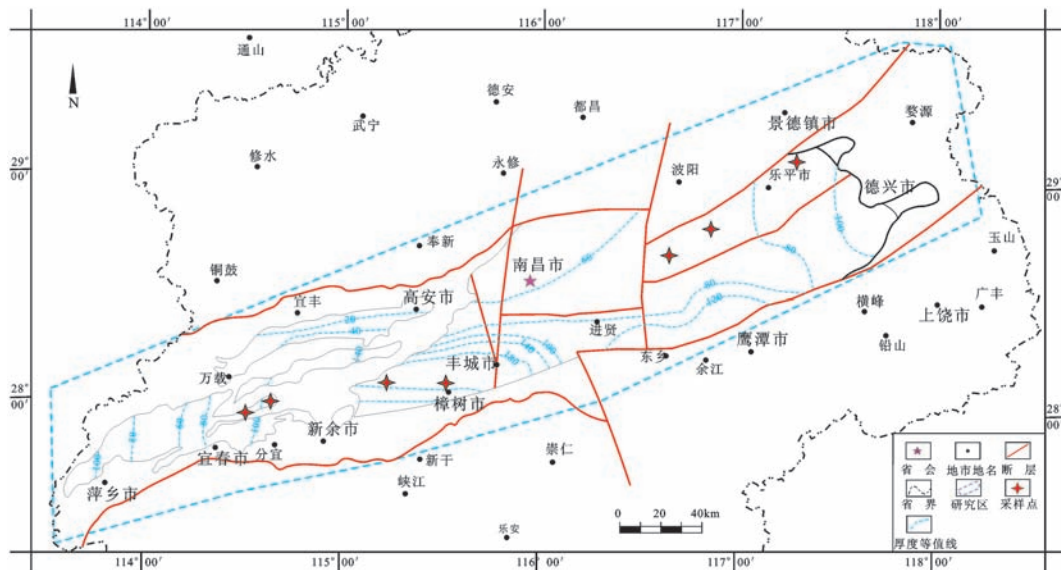


图1 萍乐拗陷乐平组页岩厚度分布及采样位置

Fig. 1 The thickness distribution and sampling location of Leping Formation shale in Pingle Depression

黏土矿物及全岩X衍射分析在江苏地质矿产开发研究院完成,在温度为27℃,相对湿度45%的实验条件下,采用D8 DISCOVER型X射线衍射仪进行测试。高压压汞分析是由华北油田勘探开发研究院在室温19℃、湿度20%、大气压力1030 hPa实验条件下,采用9510—IV型压汞仪进行测试。低温液氮分析是在江苏地质矿产研究院完成,采用的仪器为Thermo SURFER比表面测定仪(仪器编号FCG-032),测定得到样品吸附—脱附等温线数据和平均孔径数据,比表面积、体积分布通过BET方程、BJH方程得到。地球化学参数测试包括有机碳含量、有机质成熟度及干酪根类型测定等。

3 储层特征

3.1 沉积特征

根据研究区乐平仙涌、余干枫港、萍乡莲花等8口老井复查岩心样品,从岩性标志、地球化学标志等方面,并结合前人的研究成果,对萍乐拗陷乐平组泥页岩的沉积特征进行分析。

从钻孔岩心岩性分析来看,乐平组泥页岩可划分为3种岩相类型,即炭质泥页岩、灰黑色泥岩及黑色泥质粉砂岩。(1)炭质泥页岩:黑色,可染手,块状至碎块状,夹薄煤层或煤线,泥质结构,见植物化石碎片,多呈薄层状分布在富有机质泥页岩层段中,

主要形成于三角洲前缘或潮坪泥炭沼泽环境;(2)灰黑色泥岩:包括泥页岩和粉砂质泥岩,灰黑色,泥质结构,不污手,沉积构造见水平层理、缓波状层理及潮汐层理,含大量植物化石。在研究区乐平组分布广泛,多呈单一厚层状或薄层状与炭质泥页岩、粉砂岩互层,主要形成于三角洲前缘或潮坪环境中;(3)黑色泥质粉砂岩:包括粉砂岩和泥质粉砂岩,黑灰色至黑色,见于煤层夹矸或煤层顶底板中,呈薄层或中厚层状广泛分布,可见植物叶片和茎干化石,一般形成于三角洲前缘水下分流河道或远砂坝等环境。

从地球化学标志分析来看,在乐平组泥页岩中可见黄铁矿结核,同时在显微镜下也常见黄铁矿颗粒、条带状黄铁矿薄层等。一般来说,泥页岩中黄铁矿存在于较强还原环境下有机质含量较高的黑色泥页岩中。从研究区乐平组显微镜下(图2-a)及扫描电镜观察到的草莓状黄铁矿(图2-b),可推断出乐平组暗色泥页岩形成时期,处于较强的还原环境中。同时利用微量元素地球化学指标 $V/(V+Ni)$ 比值可知,研究区泥页岩的 $V/(V+Ni)$ 比值为0.55~0.85,平均为0.74,Davis et al.^[13]研究认为,当 $V/(V+Ni)$ 为0.6~0.84时,反映水体分层不强的厌氧环境。由此推断出萍乐拗陷乐平组泥页岩形成于水体分层不强的还原环境中。

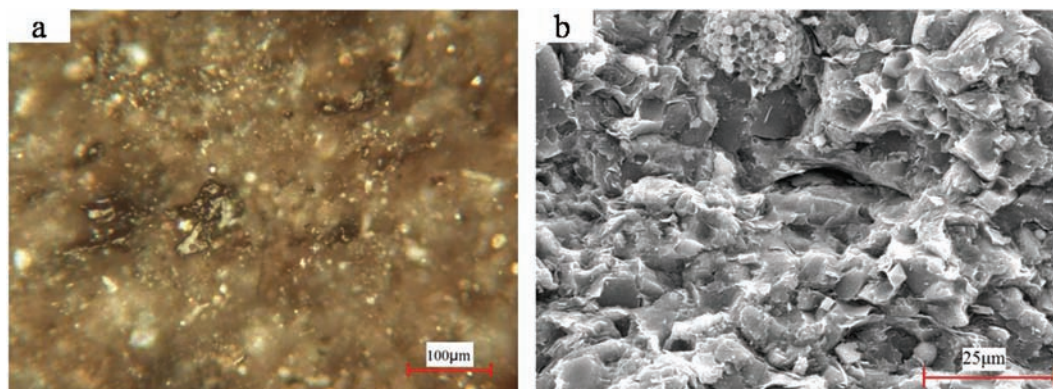


图2萍乐拗陷乐平组泥页岩镜下观测照片

a—草莓状黄铁矿,显微镜下;b—草莓状黄铁矿,扫描电镜下

Fig. 2 Pictures of Leping Formation shale under polarizing microscope and SEM in Pingle Depression

a—Framboidal pyrites, polarizing microscope; b—Framboidal pyrites, SEM

根据区域研究成果^[12],江西地区从中泥盆世至中三叠世处于稳定的克拉通陆表海为主的盆地发育阶段,但受到钦州造山带开合影响,萍乐拗陷地区总体表现为拉伸和挤压作用的交替。中二叠世小江边沉积时期,萍乐拗陷地区总体为开阔陆棚环境沉积,岩性以泥灰岩或页岩与生屑泥晶灰岩为主。至中二叠世晚期乐平组沉积早期,即乐平组官山段沉积期,萍乐拗陷主要属于滨海—湖沼环境,主要为海陆交互相含煤碎屑岩建造,萍乐拗陷大部分地区处于不利成煤环境;至晚二叠世中期乐平组老山段及晚二叠世晚期早时狮子山段沉积期,沉积物以海相碎屑岩为主,上部夹有泥灰岩,可见广盐度的瓣腮类和腹足类介壳化石,反映了老山段和狮子山段主要为潮坪沉积环境;至晚二叠世晚期晚时王潘里段沉积期,岩性以成熟度较高的砂岩、粉砂岩、泥岩和煤层为主,反映了研究区海平面已经下降,沉积环境主要为潮间—潮上环境。

综上,萍乐拗陷乐平组主要为潮坪环境沉积,黑色泥页岩广泛发育,加之水体还原性较强,对有机质的富集与保存有利,为一套有机质丰度较好的泥页岩层系。

3.2 有机地球化学特征

3.2.1 有机质丰度

有机质丰度是富有机质泥页岩产生页岩气的物质基础,是决定泥页岩生烃潜力的重要指标^[14]。据研究区83块老井复查岩心样品有机碳含量测试可知,萍乐拗陷地区乐平组残余有机碳平均含量为

1.74%(0.21%~23.4%),其中TOC含量大于1.0%的较好烃源岩样品占49.4%,表明乐平组泥页岩有机碳含量较高,是一套区域性重要的富有机质页岩层系。值得注意的是,本次实验所采集的样品均为老井复查岩心样品,可能由于长期暴露地表而受到氧化作用影响导致有机碳含量偏低,因此,新鲜的钻孔岩心泥页岩样品有机碳含量可能比本次实验测试值还要大一些。

3.2.2 有机质类型

有机质类型也是评价富有机质页岩生气质量的重要指标,它不仅影响页岩的生气能力,同样也影响着页岩的含气量^[15]。根据研究区泥页岩样品在显微镜下观察发现,萍乐拗陷地区乐平组泥页岩主要为含炭质粉砂质泥页岩,以黏土矿物为主,粉砂碎屑较多,二者均匀混合,有机质含量不多,主要为条带状镜质体、碎屑镜质体和碎屑丝质体,由于泥页岩热演化程度较高,碎屑镜质体和碎屑丝质体不易区分,黄铁矿含量较多,以微球粒状均匀分布(图3-a~c)。9个泥页岩样品的干酪根镜检结果显示,样品的镜检类型指数(TI)在-41~70,平均值为30,表明研究区泥页岩的干酪根类型主要为II₂型(表1)。干酪根显微组分分析表明,萍乐拗陷地区乐平组泥页岩中显微组分以壳质组为主,其含量在31%~51%,平均为53.56%;其次为腐泥组和镜质组,平均含量为22.11%和20%,惰质组含量极少。

3.2.3 有机质成熟度

有机质成熟度不仅可以决定页岩的生烃潜能,

表1 萍乐拗陷乐平组泥页岩 TOC 和 R_o 实验测试数据 (%)

Table 1 Total organic carbon content and maturity experimental data of Leping Formation shale in Pingle Depression (%)

采样位置	樟树八景	万年白马	乐平	分宜县红利	丰城河西	余干枫港
TOC	0.62 (1)	1.29 (1)	3.92 (4)	3.89 (8)	1.89 (2)	1.0 (10)
R_o	2.6 (1)	0.74 (2)	0.73 (10)	4.0 (2)	2.22 (1)	1.29 (7)
采样位置	新余	樟树刘公庙	新余梅山	萍乡莲花	分宜泉丘	安福枫田
TOC	0.69 (12)	1.19 (10)	1.89 (7)	0.82 (5)	1.19 (7)	1.07 (16)
R_o	2.31 (2)	2.91 (1)	1.27 (2)	-	2.47 (3)	3.05 (2)

注:()内代表样品测试数量。

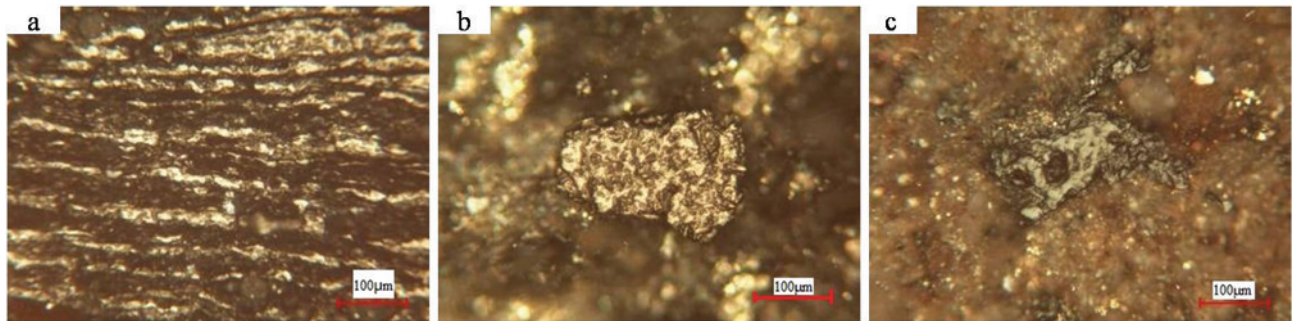


图3 萍乐拗陷乐平组泥页岩镜下观测照片

a—条带状镜质体;b—半磨圆状碎屑丝质体;c—半结构镜质体及微球粒状黄铁矿

Fig. 3 Micro-components micrograph of Leping Formation shale in Pingle Depression

a—Banded vitrinite; b—Half-rounded clastic fusinite; c—Semi-structured vitrinite and micro-granular pyrite

同样也影响着有机质表面吸附气含量^[15-16]。通常用镜质组反射率(R_o)来表征干酪根热成熟度。通过对研究区 33 块岩心样品 R_o 测试表明,萍乐拗陷乐平组泥页岩的成熟度在 0.7%~4.06%, 平均为 1.88%, 普遍达到高成熟阶段。值得注意的是,所测试的样品中存在 4 个样品的 R_o 值超过 3.0%, 认为可能与样品采样位置靠近岩浆体受热烘烤所致。

3.3 矿物组分特征

泥页岩中的矿物组成是影响泥页岩储层发育的重要因素^[17]。通过对研究区乐平组泥页岩矿物成分统计表明(图 4), 44 块乐平组泥页岩石英含量为 14.11%~72.52%, 平均为 47.94%, 长石含量为 0~14.04%, 平均为 4.21%; 碳酸盐类(包括方解石和白云石)含量为 0~73.62%, 平均为 8.67%。页岩中石

表2 萍乐拗陷乐平组泥页岩镜检结果 (%)

Table 2 The results of Leping Formation shale microscopic examination (%)

样号	腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组	类型指数	干酪根类型
D1	8	73	16	3	30	II ₂
D2	0	31	51	18	-41	III
D3	24	66	8	2	49	II ₁
D4	57	36	7	0	70	II ₁
D5	3	49	43	5	-9	III
D6	34	61	5	0	61	II ₁
D7	38	42	17	3	43	II ₁
D8	16	62	18	4	30	II ₂
D9	19	62	15	4	35	II ₂

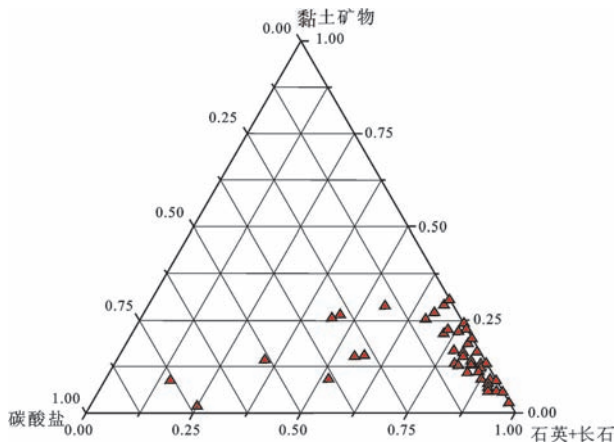


图4 萍乐坳陷乐平组泥页岩矿物组成及百分含量三角图
Fig.4 Mineral composition and percentage content triangular diagram of Leping Formation shale

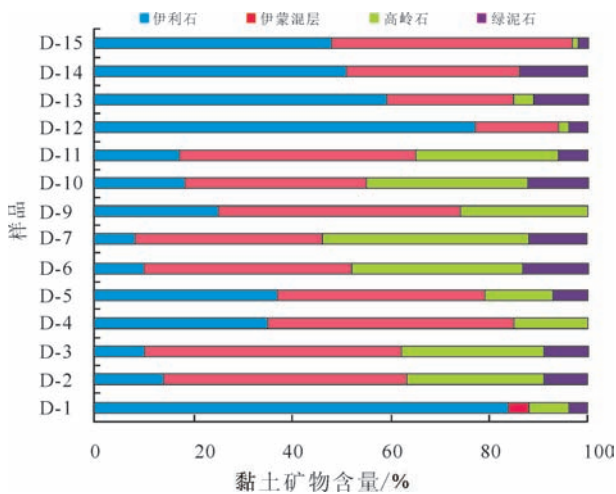


图5 萍乐坳陷乐平组泥页岩黏土矿物相对含量
Fig.5 Relative content of clay minerals of Leping Formation

英呈分散状分布,主要为陆源碎屑外源成因;黏土矿物含量为7.04%~60%,平均为34.93%。其中伊利石是研究区最普遍也是相对含量最高的黏土矿物(图5),含量介于1%~90%,平均为44.83%,其次为伊蒙混层,其含量为0~61%,平均值为26.06%,高岭石和绿泥石含量相对较低,分别为14.53%和14.58%。北美产气量最高的福特沃斯盆地Barnett页岩黏土矿物含量约为27%,石英含量为40%~60%^[18-19],与北美Barnett页岩相比萍乐坳陷乐平组泥页岩具有黏土矿物含量中等、石英含量中等的特点,页岩矿物组成相似。相对较高黏土矿物含量,可形成较多的微孔隙体积,对页岩的孔隙度贡献较

大,利于泥页岩中吸附气体的储集^[20]。

页岩的脆性越强,越容易在外力作用下形成人工诱导裂隙,影响着页岩气藏的产能。而泥页岩的脆性在很大程度上取决于脆性矿物含量。萍乐坳陷地区乐平组矿物组成中脆性矿物(包括石英、长石、方解石、黄铁矿等)含量平均高达57.10%,表明泥页岩储层脆性高,利于页岩气的解吸和渗流。

3.4 储集空间及物性特征

研究证实,页岩中因含有大量的微孔隙和裂缝可作为页岩气的赋存空间^[21-22]。利用扫描电镜技术对萍乐坳陷地区乐平组岩心样品进行了详细的观察,认为乐平组页岩中的微孔隙和微裂缝非常发育,并结合前人的研究成果,将萍乐坳陷乐平组泥页岩微孔隙分为粒间孔、粒内孔和有机质孔3类。

粒间孔隙是指矿物颗粒之间的孔隙,可分为刚性的脆性矿物颗粒与塑性的有机质颗粒之间的孔隙(图6-a)、塑性黏土矿物与塑性有机质颗粒间孔隙(图6-b)以及黏土矿物层间孔隙(图6-c)。脆性矿物与有机质粒间孔隙表现为脆性的石英、长石等颗粒分布在有机质周围,有机质颗粒在地层压力或构造挤压下呈改造边缘形态,扫描电镜下观察发现边界形成了大量的粒间孔隙,孔径小,呈细长条状分布(图6-a);黏土矿物与有机质粒间孔隙表现为:有机质通常保存较完整形态,或有机质与黏土矿物一起由于受到挤压而呈现杂乱发育或形态发生改变,形成了大量的纳米尺度的颗粒接触边界,反映了有机质颗粒和黏土矿物颗粒间形成了大量的纳米级的粒间孔隙,孔径多为几纳米至几十纳米,多数接触边界孔隙由于孔径细小,难于被扫描电镜发现。黏土矿物层间孔隙是指在压实过程中,黏土矿物发生脱水作用而析出大量的层间水,在“絮状体”层间形成的微孔隙,黏土矿物层间孔隙一般长0.5 nm~2 μm、宽50~300 nm(图6-c),呈扁平波浪状,连通性较好,是研究区页岩中主要的孔隙类型。

粒内孔主要是指粒内溶蚀孔隙、草莓状黄铁矿晶间孔隙等。粒内溶蚀孔隙主要是由于长石、白云石等不稳定矿物在酸性介质下发生溶蚀作用所形成,形态一般为港湾状、分散状,孔径多在几百纳米至几微米之间(图6-d),连通性差;草莓状黄铁矿晶间孔隙是指存在于黄铁矿集合体紧密排列的晶体间的微孔隙(图2-b),主要发育于有机质丰富的泥

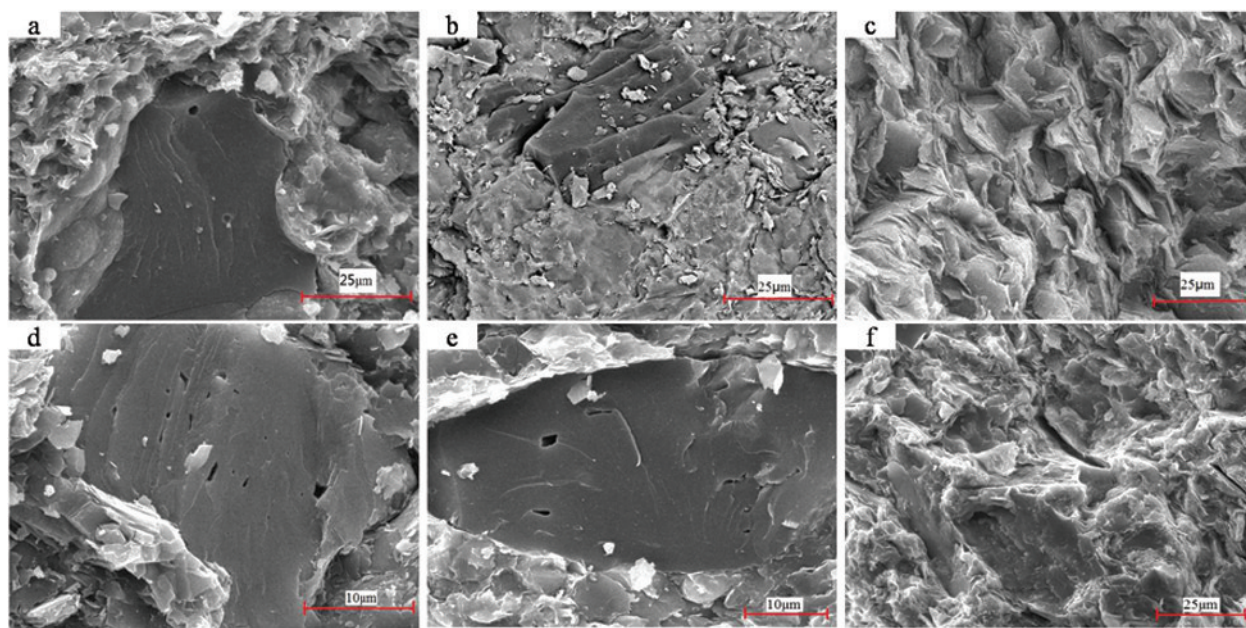


图6乐平组泥页岩孔裂隙特征的扫描电镜分析图像

a—脆性矿物与有机质孔隙；b—黏土矿物与有机质孔隙；c—黏土矿物层间孔隙；
d—白云石溶蚀孔隙；e—有机质孔隙；f—微裂缝

Fig. 6 Image analysis of scanning electron microscopy from Leping Formation shale

a—Brittle minerals and organic pores ; b—Clay minerals and organic pores; c—Clay minerals interlayer pores; d—Dolomite dissolution pores; e—Organic pores; f—Microcrack

页岩储层中,孔径多为纳米级别,一般为50~100 nm,孔隙连通性差,对页岩气的储集作用不大。

有机质孔在扫描电镜下观察多为纳米级,比表面积大,是吸附气赋存的主要载体。主要为有机质在生烃过程中产生的孔隙。这类孔隙的形成与有机质的类型及热演化程度密切相关^[23]。乐平组是江西省主要的产煤岩系,本次研究采集的样品也多数是黑色泥页岩或炭质泥页岩,有机碳含量较高,发育丰富的有机质孔隙。这类孔隙孔径多为十几纳米至几十纳米,通常呈不规则圆形(图6-e),连通性好,易形成有效的孔隙网络,是主要页岩气储集空间。

研究区微裂缝主要发育于脆性矿物晶体间、晶体间及黏土矿物颗粒内。这些微裂缝规模较小,宽度一般为几十纳米,长度一般为几微米(图6-f),可作为甲烷分子的渗流通道。通常微裂缝形成以后,常被后期方解石或自生黏土矿物充填,呈现半闭合—半开放状态,可降低微裂缝的渗流能力,但这些半闭合—半开放状的微裂缝非常利于后期水力压裂人工造缝,可成为微孔隙与宏观裂缝间的连通通道,对后期页岩气的开发具有重要意义。

压汞实验结果显示,研究区乐平组泥页岩储层孔喉直径均值为38.75 nm,分选系数较小,介于0.09~0.16,平均为0.124,均值系数较大,介于0.50~0.61,平均为0.54,说明泥页岩储层的孔喉分布较为集中,分选程度较好;排驱压力较大,介于7.83~16.31 MPa,平均为12.19 MPa,退出效率介于58.63%~74.66%,平均为68.46%,两者说明页岩储层孔喉非常细小。乐平组泥页岩孔隙度在1.5%~5.1%,平均为3.5%,与北美Barnett页岩的孔隙度(平均为4.0%)相当,渗透率在 $0.0036\sim 0.0166\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均为 $0.01\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,高于Barnett页岩的渗透率(平均为 $0.001\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$),表明研究区乐平组具有好的储层物性条件。

4 储层微孔隙特征及其控制因素

4.1 孔径分布

低温液氮吸附-脱附实验结果显示(图7),萍乐坳陷地区乐平组泥页岩以中孔(2~50 nm)为主,占总孔体积的57.57%~77.34%,平均为67.96%,是研究区微孔隙的主要分布空间;宏孔(>50 nm)次之,

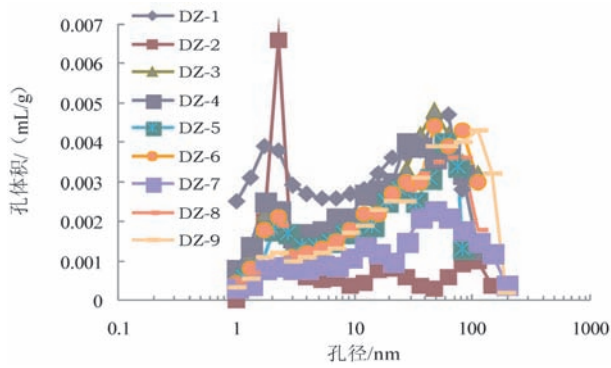


图7 萍乐坳陷乐平组泥页岩孔径分布曲线
Fig. 7 Pore distribution curves of Leping Formation shale in Pingle Depression

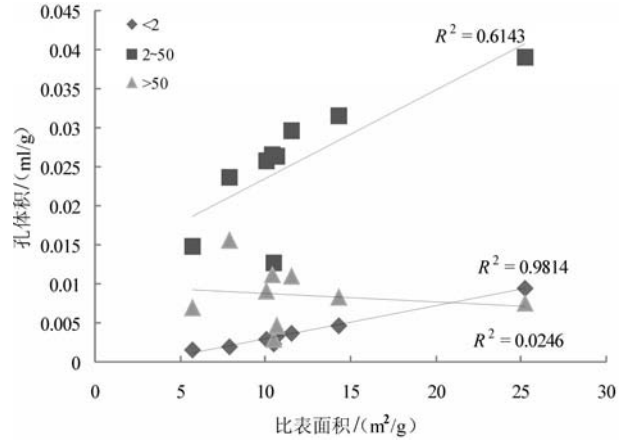


图9 页岩样品孔隙与表面积的关系
Fig. 9 Relationship between pore volume and pore specific surface of shale samples

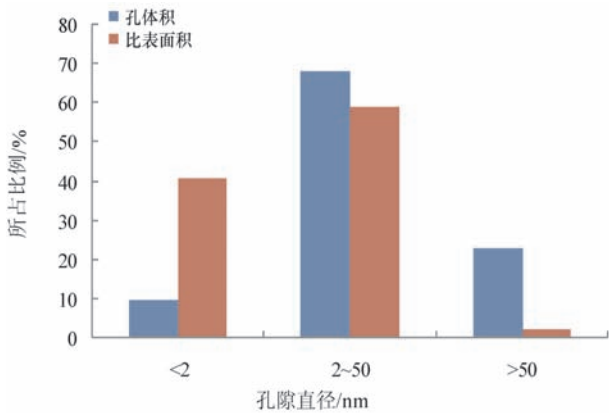


图8 研究区页岩样品微观孔隙直径分布
Fig. 8 Shale micropores size distribution in the study area

占总孔体积的13.38%~37.77%，平均为22.86%；微孔(<2nm)最少，占总孔体积的4.75%~17.06%，平均为9.44%(图8)。

进一步对泥页岩样品进行比表面积测试表明，乐平组泥页岩的比表面积为5.7444~25.2645 m²/g，平均为11.81 m²/g，表明萍乐坳陷乐平组泥页岩的比表面积较大，较有利于页岩气的吸附。泥页岩中的微孔占比表面积的40.68%，中孔占比表面积的58.83%，微孔和中孔构成了比表面积的主体(99.51%)。并且微孔和中孔与比表面积呈好的相关性(相关系数为0.981和0.614)(图9)，而宏孔与比表面积的相关性差，进一步印证了泥页岩乐平组比表面积主要是由微孔和中孔构成。

4.2 孔隙形态

通过对研究区上二叠统乐平组页岩进行低温

液氮吸附—脱附实验，吸附曲线(图10-A)和脱附曲线(图10-D)在中等相对压力(P/P_0 在0.4~0.5)附近发生分离，形成滞后回线。根据研究区泥页岩样品的吸附—脱附曲线对比，可归纳为2种曲线类别：一类为缓慢上升型，表现为吸附曲线和解吸曲线均缓慢上升，脱附曲线和吸附曲线趋势基本一致，解吸曲线在相对压力为0.7时有小幅度凸起，滞后环窄小。在相对压力接近1.0时，曲线出现陡然增加现象，所反映的孔隙形态是一端开口的圆筒形孔，如溶蚀孔，说明泥页岩中存在大孔，利于游离气的储存；另一类是脱附曲线先下降至某一值，稳定一定时间后再快速下降至另一值，表现为吸附曲线缓慢上升，但在中等压力($P/P_0=0.5$)处解吸曲线突然上凸，滞后环宽大，反映的孔隙类型是细颈状的墨水瓶孔、两端开口的圆筒形孔和狭缝平板孔，说明泥页岩中微孔较为发育，代表的是利于页岩气吸附储层，但不利于渗流。

4.3 微孔隙发育控制因素

研究表明，泥页岩的孔隙发育特征是影响页岩气赋存状态的重要因素^[23]。前人主要是通过TOC含量、石英、黏土矿物、微孔体积、中孔体积和宏孔体积等相互相关性来探讨泥页岩储层微孔隙发育的控制因素^[24-29]。

研究表明，TOC含量与微孔体积和中孔体积呈好的正相关关系(图11)，相关系数分别为0.740和0.471，表明TOC含量是影响泥页岩储层微孔体积、中孔体积的主要因素。前人研究也表明，页岩中有

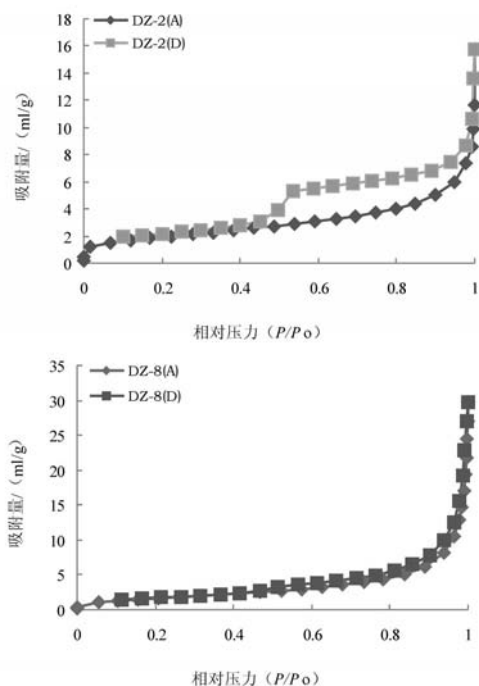


图10 泥页岩样品的吸附—脱附等温线(A—吸附曲线, D—脱附曲线)

Fig. 10 Adsorption-desorption isotherms of shale samples

机质在热解生烃过程中,页岩的孔隙结构发生改变,中孔和微孔(<50 nm)的数量会明显增多^[4]。进一步对黏土矿物、石英含量与微孔、中孔和宏孔的相关性分析表明,黏土矿物含量与微孔、中孔以及宏孔的孔容均无明显相关关系,而石英含量与宏孔孔容呈较好的正相关关系,相关系数为0.515(图11)。由此表明,页岩中石英含量在一定程度上影响了泥页岩宏孔的发育,而黏土矿物对储层中微孔隙发育影响小。

5 结论

(1) 萍乐拗陷地区上二叠统乐平组泥页岩分布较广泛,平均厚度在100 m以上,为还原性较强的海陆过渡相沉积环境,较利于有机质的富集和保存。测试表明,研究区TOC含量较高,为0.21%~23.4%,平均为1.74%,有机质类型以II₂型干酪根为主, R_o为0.7%~4.06%,平均为1.88%,处于成熟—高成熟阶段,总体认为属于较好的烃源岩。

(2) 实验测得乐平组泥页岩脆性矿物含量较高,以石英为主,平均为47.94%,表明具有好的压裂潜力。黏土矿物含量中等,平均为34.93%,主要为

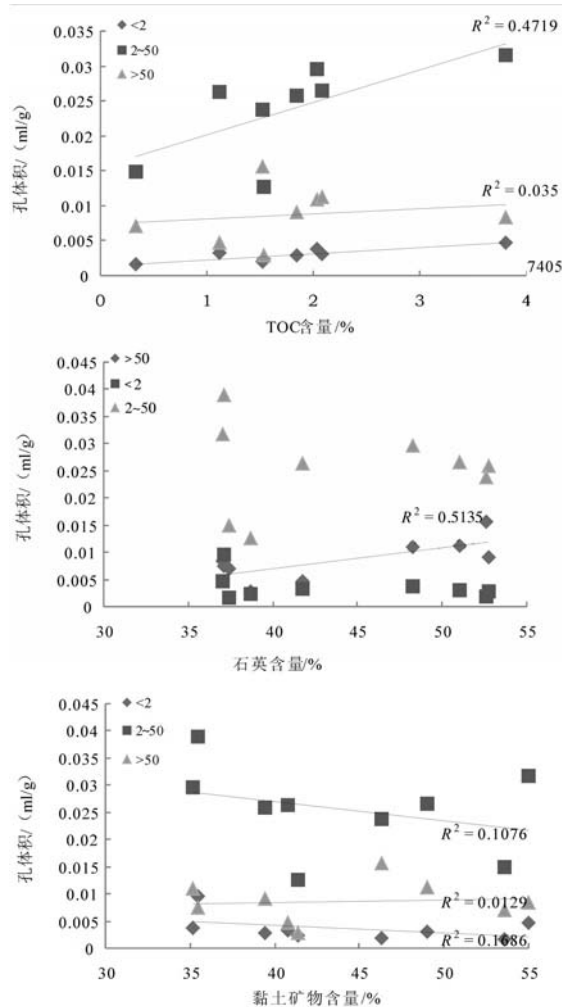


图11 乐平组泥页岩TOC含量、石英含量、黏土矿物含量与孔隙的关系

Fig. 11 Relationship between TOC, quartz content, clay mineral content and pore volume in Leping Formation

伊利石(相对含量平均为44.83%)和伊蒙混层(相对含量平均为26.06%)。泥页岩中微孔隙主要为粒间孔、粒内孔和有机质孔。泥页岩储层孔隙形态较为复杂,可分为2种类型,分别代表利于游离气赋存的圆筒形孔和利于吸附气赋存的细颈状墨水瓶孔、两端开口的圆筒形孔和狭缝平板孔。乐平组泥页岩孔隙总体积中,以中孔为主,其次为宏孔。泥页岩样品的比表面积为5.7444~25.2645 m²/g,平均为11.81 m²/g,表明乐平组页岩的比表面积较大,利于页岩气的吸附。微孔和中孔构成了比表面积的主体(99.51%)。

(3) 萍乐拗陷乐平组泥页岩微孔隙发育主要受

有机碳含量和石英含量控制。TOC含量是影响泥页岩储层微孔体积、中孔体积的主要因素。石英含量对页岩微孔隙发育的影响,主要体现在对宏孔(>50 nm)发育具有一定影响。

参考文献(References):

- [1] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(6):136-140.
Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. The exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6):136-140(in Chinese with English abstract).
- [2] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(6): 641-653. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘树根,曾祥亮,黄文明,等.四川盆地页岩气藏和连续型-非连续型气藏基本特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(6):578-592.
Liu Shugen, Zeng Xiangliang, Huang Wenming, et al. Basic characteristic of shale and continuous discontinuous transition[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2009, 36(6): 578-592 (in Chinese with English abstract).
- [4] Jarvie M D. Unconventional Shale Resource Plays: Shale-Gas and Shale-Oil Opportunities[J]. Texas Christian University, Worldwide Geochemistry, 2008, Texas, U.S.A.
- [5] 汪凯明.桂中坳陷泥盆系页岩气成藏条件浅析[J].中国地质,2013,40(2):430-438.
Wang Kaiming. Shale gas accumulation conditions of Devonian strata in Guizhong depression[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 430-438(in Chinese with English abstract).
- [6] 卢炳雄,郑荣才,梁西文,等.四川盆地东部地区大安寨段页岩气(油)储层特征[J].中国地质,2014,41(4):1387-1398.
Lu Bingxiong, Zheng Rongcai, Liang Xiwen, et al. Characteristics analysis of Da'anzhai shale gas (oil) reservoirs in eastern Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1387-1398(in Chinese with English abstract).
- [7] 邱小松,胡明毅,胡忠贵,等.页岩气资源评价方法及评价参数赋值——以中扬子地区五峰组—龙马溪组为例[J].中国地质,2014,41(6):2091-2098.
Qiu Xiaosong, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. Evaluation methods and parameter assignments of shale gas resources: A case study of the Wufeng-Longmaxi Formation in the Middle Yangtze region[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 2091-2098(in Chinese with English abstract).
- [8] 刘洪林,王红岩,刘人和,等.中国页岩气资源及其勘探潜力分析[J].地质学报,2010,84(9):1374-1378.
Liu Honglin, Wang Hongyan, Liu Renhe, et al. China shale gas resources and prospect potential[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(9): 1374-1378(in Chinese with English abstract).
- [9] 王冉,桑树勋,刘水根,等.赣东北地区下寒武统荷塘组页岩储层特征[J].西南石油大学学报(自然科学版),doi:10.11885/j.issn.1674-5086.2013.08.29.08
Wang Ran, Sang Shuxun, Liu Shuigen, et al. Shale reservoir characteristics of Lower Cambrian Hetang formation in Northeastern Jiangxi area[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science and Technology Edition), doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2013.08.29.08(in Chinese with English abstract).
- [10] 刘伟伟,田景春,林小兵,等.江西修武盆地寒武统黑色页岩矿物成分特征及意义[J].成都理工大学学报(自然科学版),2015,42(1):90-97.
Liu Weiwei, Tian Jingchun, Lin Xiaobin, et al. Characteristics and significance of mineral compositions in Lower Cambrian black shale from Xiuyu basin, Jiangxi, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2015, 42(1):90-97(in Chinese with English abstract).
- [11] 谢国梁,刘水根,沈玉林,等.赣东北荷塘组页岩气成藏条件及有利区评价[J].中国矿业大学学报,2015,44(4):738-747.
Xie Guoliang, Liu Shuigen, Shen Yulin, et al. Reservoir-forming conditions and evaluation of favorable areas of shale gas in Hetang formation, northeastern Jiangxi area[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(4): 738-747 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王昆,吴安国,张玉清.江西省区域地质概况[J].中国区域地质,1993,(3):200-210.
Wang Kun, Wu Anguo, Zhang Yuqing. A brief account of regional geology of Jiangxi Province[J]. Regional Geology of China, 1993, (3): 200-210(in Chinese with English abstract).
- [13] Davis C, Pratt L, Silter W, et al. Factors Influencing Organic Carbon and Trace Metal Accumulation in the Upper Cretaceous La Luna Formation of the Western Maracaibo Basin, Venezuela[M]. Boulder: Geological Society of America, 1999.
- [14] 邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,28(6):641-653.
Zhou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, et al. Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,28(6):641-653(in Chinese with English abstract).
- [15] 王祥,刘玉华,张敏,等.页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J].天然气地球科学,2010,21(2):350-356.
Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, et al. Condition of formation and accumulation for shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 350-356(in Chinese).
- [16] 陈更生,董大忠,王世谦,等.页岩气藏形成机理与富集规律初探[J].天然气工业,2009,29(5):17-21.

- Chen Gengsheng, Dong Dazhong, Wang Shiqian, et al. A preliminary study on accumulation mechanism and enrichment pattern of shale gas [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(5): 17-21 (in Chinese with English abstract).
- [17] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(11):1921-1938.
- [18] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(4): 392-400.
Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Suggestions for the development of fractured shale gas in North America[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34 (4): 392-400 (in Chinese with English abstract).
- [19] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91 (4): 579-601.
- [20] 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(D辑)*, 2014, 44(6): 1348-1356.
Wang Yuman, Dong Dazhong, Yang Hua, et al. Quantitative characterization of reservoir space in the Lower Silurian Long Maxi Shale, southern Sichuan, China[J]. *Science in China (Series D)*, 2014, 44 (6): 1348-1356(in Chinese).
- [21] 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 shale[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 78: 848-861.
- [22] 顾志翔, 彭勇明, 何幼斌, 等. 湘中坳陷二叠系海陆过渡相页岩气地质条件[J]. *中国地质*, 2015, 42(1): 288-299.
Gu Zhixiang, Peng Yongming, He Youbin, et al. Geological conditions of Permian sea-land transitional facies shale gas in the Xiangzhong depression[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 288-299(in Chinese with English abstract).
- [23] 黄振凯, 陈建平, 王义军, 等. 松辽盆地白垩系青山口组泥岩微观孔隙特征[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(1):30-36.
Huang Zhenkai, Chen Jianping, Wang Yiping, et al. Microstructural characteristics of the Cretaceous Qingshankou Formation shale, Songliao Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40 (1):30-36 (in Chinese with English abstract).
- [24] 魏祥峰, 黄静, 李宇平, 等. 元坝地质大安寨段陆相页岩气富集高产主控因素[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 970-981.
Wei Xiangfeng, Huang Jing, Li Yuping, et al. The main factors controlling the enrichment and high production of Da'anzhai member continental shale gas in Yuanba area[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 970-981(in Chinese with English abstract).
- [25] 陈文玲, 周文, 罗平, 等. 四川盆地长芯1井下志留统龙马溪组页岩气储层特征研究[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 1073-1086.
Chen Wenling, Zhou Wen, Luo Ping, et al. Analysis of the shale gas reservoir in the Lower Silurian Longmaxi Formation, Changxin 1 well, southeast Sichuan Basin, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 29(3): 1073-1086(in Chinese with English abstract).
- [26] 郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. *天然气工业*, 2014, 34(6):9-16.
Guo Xusheng, Li Yuping, Liu Ruobin, et al. Characteristics and controlling factors of micro-pore structures of Longmaxi Shale Play in the Jiaoshiba area, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry* 2014, 34(6):9-16(in Chinese with English abstract).
- [27] 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 Rikang, 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 (in Chinese with English abstract).
- [28] 张廷山, 杨洋, 龚其森, 等. 四川盆地南部早古生代海相页岩微观孔隙特征及发育控制因素[J]. *地质学报*, 2014, 9(9):1728-1740.
Zhang Tingshan, Yang Yang, Gong Qisen, et al. Characteristics and Mechanisms of the Micro-pores in the Early Palaeozoic Marine Shale, Southern Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 9(9): 1728-1740(in Chinese with English abstract).
- [29] 李娟, 于斌松, 夏响华, 等. 黔西北地区上二叠统龙潭组泥岩储层特征[J]. *地学前缘*, 2015, 22(1): 301-311.
Li Juan, Yu Binsong, Xia Xianghua, et al. The characteristics of the Upper Permian shale reservoir in the northwest of Province, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(1): 301-311 (in Chinese with English abstract).