

doi: 10.12029/gc20200102

杨玉茹, 孟凡洋, 白名岗, 张家政, 夏响华, 包书景, 胡志方, 张聪, 王玉芳, 宋腾, 王向华, 于伟欣. 2020. 世界最古老页岩气层储层特征与勘探前景分析[J]. 中国地质, 47(1): 14–28.

Yang Yuru, Meng Fanyang, Bai Minggang, Zhang Jiazheng, Xia Xianghua, Bao Shujing, Hu Zhifang, Zhang Cong, Wang Yufang, Song Teng, Wang Xianghua, Yu Weixin. 2020. An analysis of reservoir characteristics, resources and exploration prospects of the oldest shale gas in the world[J]. Geology in China, 47(1):14–28(in Chinese with English abstract).

世界最古老页岩气层储层特征与勘探前景分析

杨玉茹^{1,2}, 孟凡洋¹, 白名岗^{1,2}, 张家政¹, 夏响华^{1,2}, 包书景^{1,2}, 胡志方^{1,2}, 张聪^{1,2},
王玉芳¹, 宋腾¹, 王向华^{2,3}, 于伟欣^{2,3}

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083; 2. 中国地质调查局非常规油气地质重点实验室, 北京 100029;
3. 中国地质大学能源学院, 北京 100083)

摘要: 在中国南方海相主要页岩层系中, 除已经成为页岩气工业产层的奥陶系五峰组—志留系龙马溪组页岩层系外, 还包括寒武系牛蹄塘组及震旦系陡山沱组等海相页岩。目前, 震旦系陡山沱组是中国乃至世界上发现的最古老页岩气层。本文在参考前人区域地质研究基础上, 依托位于中扬子地区的鄂阳页 1 井钻井岩心资料, 利用多尺度的储层性质表征方法, 结合有机质丰度与演化特征开展综合研究, 对陡山沱组古老页岩气层进行了储层及生烃潜力分析, 并与美国及中国四川盆地已形成商业开发的页岩气产层进行了对比。研究认为, 鄂阳页 1 井区震旦系陡山沱组页岩发育于相对稳定的沉积环境, 泥页岩厚度大, 有机质含量较高, 大部分样品总有机碳(TOC)含量大于 2%, 且有有机质显微形态以填隙状优质生气有机质为主; 页岩脆性矿物含量高, 微纳米孔隙及多尺度裂隙发育; 与四川盆地龙马溪组页岩相比, 陡山沱组页岩有机质热演化程度适中, 计算拉曼成熟度介于 2.0~3.0, 有机质处于热解生气阶段。分析认为鄂西陡山沱组具备形成页岩气藏的基本地质条件, 具有良好的资源与勘探前景。研究成果对于未来页岩气新领域、新层系的评价及勘探开发, 提供了较全面的基础资料。

关键词: 古老页岩气层; 震旦系陡山沱组; 新元古代; 储层特征; 勘探前景分析; 油气调查工程; 中国南方

中图分类号: TE122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2020)01-0014-15

An analysis of reservoir characteristics, resources and exploration prospects of the oldest shale gas in the world

YANG Yuru^{1,2}, MENG Fanyang¹, BAI Minggang^{1,2}, ZHANG Jiazheng¹, XIA Xianghua^{1,2},
BAO Shujing^{1,2}, HU Zhifang^{1,2}, ZHANG Cong^{1,2}, WANG Yufang¹, SONG Teng¹, WANG
Xianghua^{2,3}, YU Weixin^{2,3}

(1. Oil&Gas Survey, China Geological Survey, Beijing, 100083, China; 2. Unconventional Petroleum Geology Laboratory of China

收稿日期: 2019-02-14; 改回日期: 2019-09-10

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“武陵山下古生界页岩气战略选区调查”(DD20160195)及“十三五”国家科技重大专项项目(2016ZX05034003-007)联合资助。

作者简介: 杨玉茹, 女, 1965 年生, 教授级高级工程师, 石油地质专业, 主要从事油气实验测试及油气地质综合研究;

E-mail: 1415912087@qq.com。

通讯作者: 包书景, 男, 1964 年生, 教授级高级工程师, 石油地质专业, 主要从事非常规油气勘探; E-mail: 415530248@qq.com。

Geological Survey, Beijing 100029, China; 3. School of Energy, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Main marine shale formations in southern China, in addition to the Ordovician Wufeng Formation and the Silurian Longmaxi Formation which have become China's shale gas industrial production layers, include marine shale of the Cambrian Niutitang Formation and the Sinian Doushantuo Formation, and other marine shales. So far, the Sinian Doushantuo Formation is the oldest shale gas layer found in China and even in the whole world. Based on previous studies of regional geology and relying on drilling core data obtained in the middle Yangtze region, the authors used multi-scale methods for characterizing the reservoir properties and, combined with the organic matter abundance and evolution characteristics, carried out the comprehensive research. The reservoir and hydrocarbon potential of the world's oldest shale gas were analyzed for the first time. A comparison was made with the commercial shale gas reservoir in the United States and that in Sichuan basin of China. The results show that the Sinian Doushantuo Formation shale in the middle Yangtze area is developed in a relatively stable sedimentary environment, and the mud shale has large thickness and high organic matter content. The total organic carbon (TOC) content of most samples is more than 2%. The brittle mineral content of shale is high, and micro-nano pores and multi-scale fractures are developed. Compared with shale of Longmaxi Formation in Sichuan basin, the thermal evolution degree of organic matter in shale of Doushantuo Formation is moderate, the Raman maturity is between 2.0 and 3.0, the organic matter is in the stage of pyrolysis. The analysis indicates that Doushantuo Formation has the basic geological conditions for shale gas reservoirs and has a good resource and exploration prospect. The research results provide comprehensive basic data for the evaluation, exploration and development of new shale gas fields and new strata in the future.

Keywords: the oldest shale gas formation; Sinian Doushantuo Formation; Neoproterozoic; reservoir characteristics; resource and exploration prospect analysis; oil and gas survey engineering; South China

About the first author: YANG Yuru, female, 1965, senior engineer, majors in petroleum geology, mainly engages in oil and gas experimental testing and oil and gas geological comprehensive research; E-mail: 1415912087@qq.com.

About the corresponding author: BAO Shujing, male, born in 1964, senior engineer, majors in petroleum geology, mainly engages in unconventional oil and gas exploration; E-mail: 415530248@qq.com.

Fund support: Supported by Geological Survey Project "Investigation on Shale Gas Strategic Constituency in Lower Paleozoic in Wuling Mountain" (No. DD20160195), Major National Science and Technology Projects during the 13th Five-Year Plan Period (No. 2016ZX05034003-006).

1 引言

页岩气属于非常规油气资源的重要类型之一,为产自极低孔渗、富有机质暗色泥页岩层系中的天然气,是实现经济规模勘探、开发,资源丰富的非常规天然气资源(董大忠等,2011)。20世纪90年代以来,美国页岩气工业迅猛发展,2016年其页岩气产量达到4820亿 m^3 ,占天然气总产量的64.3%(据2018年3月22日天然气工业网)。随着世界能源消费的不断攀升,尤其北美页岩气的成功开发,中国对页岩气资源越来越重视,成为北美以外率先实现页岩气突破的国家(董大忠等,2012)。中国南方古生界及前寒武纪海相地层的非常规油气勘探已持续了十余年,自2010年第一口页岩气勘探评价井威201井在上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组海相页岩获工业气流后,陆续在渝东鄂西、滇黔北、湘西

等地区的五峰组—龙马溪组发现页岩气,并迅速在四川盆地实现了商业性开发(周文等,2013;董大忠等,2016;陈孝红等,2018)。随着页岩气开发水平井及分段压裂技术的进步,页岩气勘探领域越来越广(Curtis, 2002;董大忠等,2016)。2017年,中国地质调查局在湖北宜昌、长阳部署鄂宜页1井及鄂阳页1井等多口页岩气参数井,分别在下寒武统水井沱组、牛蹄塘组和震旦系陡山沱组钻遇良好页岩气显示(陈孝红等,2017;李浩瀚等,2017;王鹏等,2018),其中鄂阳页1井通过直井压裂,在震旦系陡山沱组获5460 m^3/d 页岩气流,不仅填补了中扬子地区前寒武系油气勘探的空白,而且首次在震旦系最古老层系获得目前全球最古老页岩气藏(翟刚毅等,2017)。

美国页岩气产量的巨大增长,除了得益于早期Barnett页岩气藏页岩气产量的稳定持续增长外,更

得益于2009年后Haynesville、Eagle Ford、Marcellus等不同类型的页岩气藏的跟进发现与开发。其中位于路易斯安那的Haynesville页岩气藏在2011年页岩气年产量达到 $689 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为当年美国最大的页岩气生产区块(Hammes et al., 2012; 朱彤等, 2014)。因此,开拓新的油气资源领域,有利于产业发展及国家能源安全,加强新区新层系地质条件研究意义重大。已有研究成果表明,中国中扬子地区震旦系发育多套富含有机质泥页岩,包括黑色(炭质)泥页岩、灰质泥岩或云质泥岩、泥质云岩等(万天丰, 2016; 董大忠等, 2016; 陈孝红等, 2018),由于震旦系埋藏较深,布井及钻井揭示地层少,以往研究多基于露头取样进行古老地层的成藏地质条件及相关参数分析。基于以上研究,为了进一步落实震旦

系古老页岩储层的生烃及储集潜力,本次研究及时跟进并充分利用鄂阳页1井陡山沱组全取心资料,以大量实际检测为基础,在对比美国相关页岩成藏条件基础上,开展下扬子地区震旦系陡山沱组古老页岩储层及生烃条件综合研究,以期探讨中国页岩气新领域新层系的资源潜力及未来勘探前景。

2 构造位置

区域上,鄂阳页1井位于湘鄂西褶皱带中的宜都—鹤峰复背斜,与黄陵隆起南翼交界处(图1)。根据前人研究成果,鄂阳页1井所处中扬子地区构造演化经历了震旦纪早期裂谷拉张阶段、震旦纪晚期—早奥陶世克拉通盆地阶段、中奥陶世—志留纪前陆盆地阶段、泥盆纪—石炭纪的差异沉降阶段、二

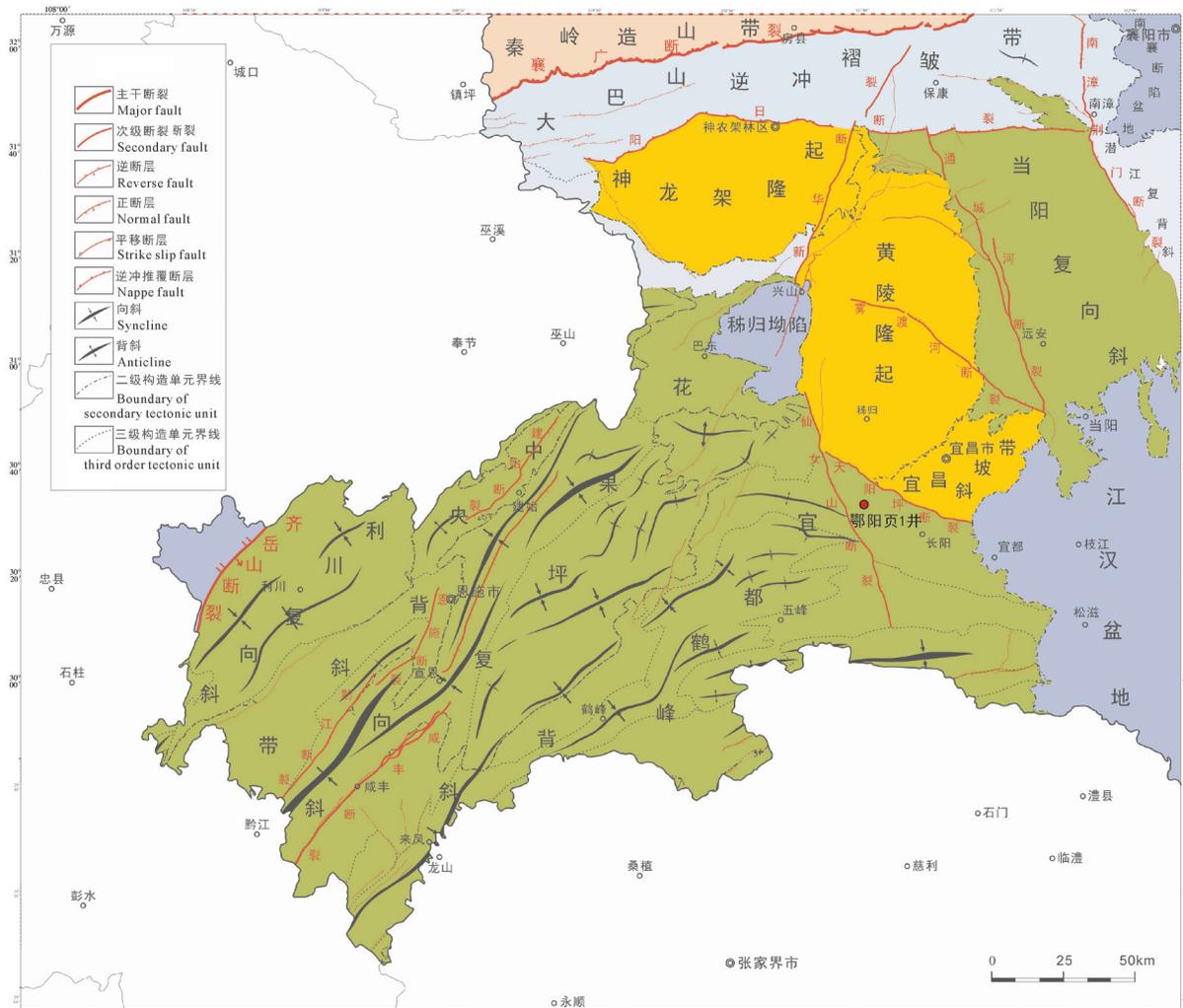


图1 鄂阳页1井区域构造及井位示意图

Fig.1 Schematic diagram of regional structure and Eyangye1 well location

表1 鄂阳页1井区陡山沱组页岩与Haynesville页岩基础地质条件对比

Table 1 Comparison of basic geological conditions between Doushantuo Formation of Eyangye1 well and Haynesville shale

| 页岩类型 | 沉积背景 | | 烃源性 | | 储集性 | |
|---------------|-------|---------------|--------|--------|---------|---------|
| | 沉积环境 | 岩石类型 | TOC/% | Ro/% | 厚度/m | 孔隙类型 |
| Haynesville页岩 | 前陆陆棚 | 硅质页岩, 钙质页岩 | 0.5~4 | 1.2~3 | 70~100 | 基质孔+有机孔 |
| 鄂阳页1井区陡山沱组页岩 | 克拉通陆棚 | 硅质页岩, 云质、钙质页岩 | 平均2.26 | 平均2.84 | 主力层位140 | 基质孔+有机孔 |

叠纪—三叠纪中期的克拉通稳定沉降阶段、晚三叠世—中侏罗世前陆盆地阶段、白垩纪—新近纪断陷—拗陷盆地阶段及喜山晚期隆升—剥蚀阶段8个构造—沉积演化阶段,区域上地层发育齐全,从元古宇至新生界均有出露(万天丰,2006)。虽然部分地区有上志留统、下泥盆统、上泥盆统、石炭系等地层的局部缺失,但上震旦统陡山沱组在黄陵隆起及其周缘背斜广泛发育(万天丰,2006;单长安等,2015;李斌等,2018)。前人研究认为,鄂阳页1井井区北邻秦岭—大别造山带,南接江南陆内造山带,处于两大造山带之间的相对稳定区,具有埋藏深度适中、抬升较早、构造变形较弱的特点,有利于页岩气的富集和保存(王玉芳等,2017;陈孝红等,2018)。因此,区域上研究区陡山沱组页岩具有较好的成藏及保存条件。

3 沉积环境及地层特征

3.1 沉积环境

根据前人研究成果(万天丰,2006;单长安等,2015),南华纪末,全球气候转暖,中扬子区在拉张背景下发生自南向北的大规模海侵,拉开海相沉积的序幕,在震旦系基底之上开始了以稳定沉积为主的拗陷型沉积盆地发育阶段。晚震旦世,中扬子区沉积相展布从陆棚(或碳酸盐岩台地)相区平缓延伸到次深海大陆斜坡和深海盆地相区,由上升洋流带入的丰富营养物质促进了海相低等生物的大规模繁衍,因而无论是陆棚(或台地)相区,还是较深水斜坡或盆地相区,都形成了富含有机组分的泥或泥云质烃源岩的连续沉积,从而形成面积广,厚度较大、层位稳定的上震旦统陡山沱组页岩岩组合,包括黑色页岩、深灰—灰黑色泥晶灰岩及含炭含泥云岩等。区域沉积条件显示,研究区陡山沱组富有机质页岩分布稳定(图2a),沉积中心位于西南部的五峰地区,区域上地层厚度在100~150 m。海相半深水—深水陆棚沉积条件,形成了震旦系陡山沱组

富有机质页岩稳定分布,其连续厚度及扬地区页岩气形成富集的重要物质基础。

通常,富有机质页岩的形成有两个重要条件:一是水体中生物丰富,能为页岩提供充足的有机物质;二是水体稳定,能为有机物质有效保存提供良好环境。鄂阳页1井陡山沱组岩心及薄片观察可见,陡山沱组上部为块状泥晶云岩,中下部为具显微层理的黑色(炭质)泥页岩、灰黑色泥质云岩及泥晶云岩互层(图3a~d)。下部泥页岩中可见大量有机质生屑。从下至上,整个陡山沱组地层普遍可见草莓状或块粒状黄铁矿(图3e~f),显示了陡山沱组页岩形成时期不仅具有海相半深水—深水陆棚相沉积条件,而且具有水体循环较差的还原条件,具备富有机质页岩形成的有利沉积及成岩环境。

3.2 地层特征

国内外页岩气相关研究证实,页岩气储层复杂,包括富有机质暗色页岩及夹层状的粉砂质页岩、泥质粉砂岩、钙质(云质)页岩等,不同的页岩气储层特征差异明显,其中富有机质、脆性矿物含量较高且天然微裂缝较发育的泥页岩是有利的页岩气开发甜点段(Hickey, 2007; Loucks, 2007; 董大忠等, 2011; Hammes, 2012; 邹才能等, 2013; 朱彤等, 2014)。

鄂阳页1井实钻岩心揭示,该区震旦系陡山沱组可划分为4个层段,自下而上包括陡一段、陡二段、陡三段及陡四段,总厚度约210 m(图2b),地层岩性主要为黑色、灰黑色炭质泥页岩,黑色、灰黑色含炭云质泥岩,黑灰色、灰色含炭泥质云岩、含泥白云岩或云岩。其中,陡四段为黑色炭质泥页岩,厚度较薄,仅0.65 m;陡三段为大套灰色、浅灰色白云岩、含泥白云岩,厚度52.25 m;陡二段以灰黑色、黑色炭质泥页岩、含炭云质泥岩为主,夹薄层深灰色泥质白云岩,厚度140 m;陡一段主要为灰色、浅灰色泥岩、灰黑色含云炭质泥岩夹灰色泥质白云岩,厚度17.3 m。整体上,陡二段是炭质泥页岩或含炭

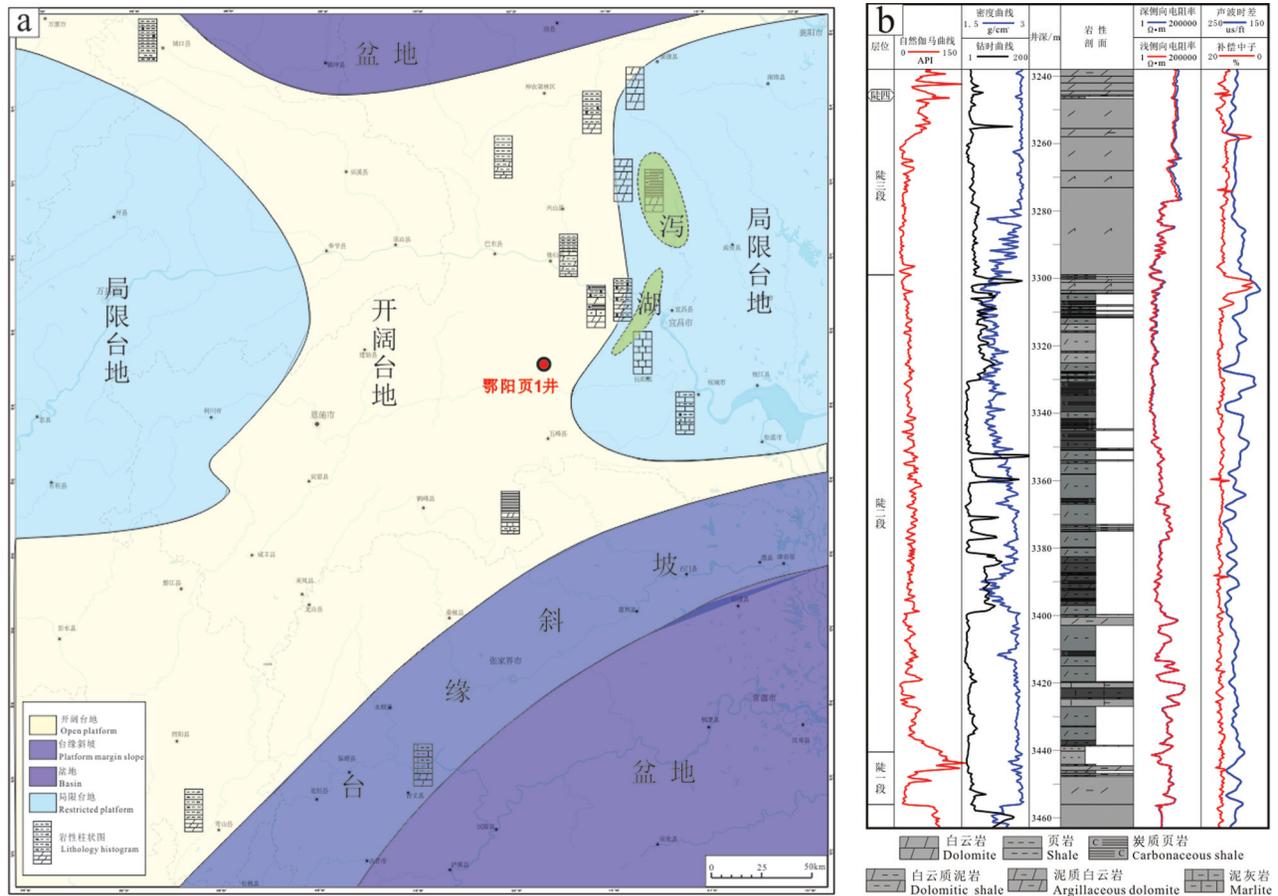


图2 鄂西地区震旦系陡山沱组岩相古地理(a)及鄂阳页1井震旦系综合柱状图(b)

Fig.2 Paleogeographic map of Sinian Doushantuo Formation in western Hubei Province (a) and lithological histogram of Doushantuo Formation of Eyangyan1 well (b)

云质泥页岩、泥云岩最为发育的层段,其中泥云岩类单层厚度最大2.85 m,累计厚度17.8 m,黑色炭质泥岩或云质泥岩类单层厚度最大11.75 m,累计厚度122 m。厚度是评价页岩气藏的有效指标之一,据美国页岩气田统计参考资料,半封闭沉积环境下形成的Haynesville页岩,具有与鄂阳页1井相似的微层状构造,发育富含有机质的云质、钙质和硅质泥页岩,微生物化石含量丰富,泥页岩总厚度介于15~107 m(蒲泊伶等,2008;朱彤等,2014;房大志等,2015)。与Haynesville页岩相比,鄂阳页1井区陡山沱组页岩达到页岩气成藏的可利厚度,其中陡二段黑色炭质页岩或含炭云质页岩是主要的生烃及储集层段,也是本次研究的重点层段。

4 岩石矿物学特征

页岩中的矿物组分按成因包括陆源碎屑(杂基)及自生矿物,按矿物成分包括脆性矿物(石英、

长石和方解石等)、黏土矿物和微量矿物(黄铁矿、石膏、重晶石等)。无论哪种分类方法,页岩的矿物构成对页岩气富集及后期开发都至关重要,不同页岩的组分和矿物成分不同,其差异会导致页岩储层孔隙发育程度及脆性程度不同,并最终影响或制约着页岩气的赋存形态及压裂改造所采取的工艺技术的不同(董大忠等,2012;李建忠等,2012;邹才能等,2015;赵金洲等,2015)。因此,页岩的矿物学研究在储层表征中具有重要意义。通常,岩石脆性越强,在人工压裂外力作用下越易诱导裂缝,有利于页岩气开采。国内外非常规油气研究领域通常将硅质矿物与碳酸盐矿物含量的总和进行脆性矿物评价(邹才能等,2015;赵金洲等,2015)。本次研究将长英质(包括陆源碎屑石英、长石及自生石英、长石)及碳酸盐矿物总体纳入脆性矿物,重点针对陡山沱组二段炭质泥页岩及含炭云质泥页岩进行了薄片、场发射扫描电镜及全岩(XRD)黏土成分分析。

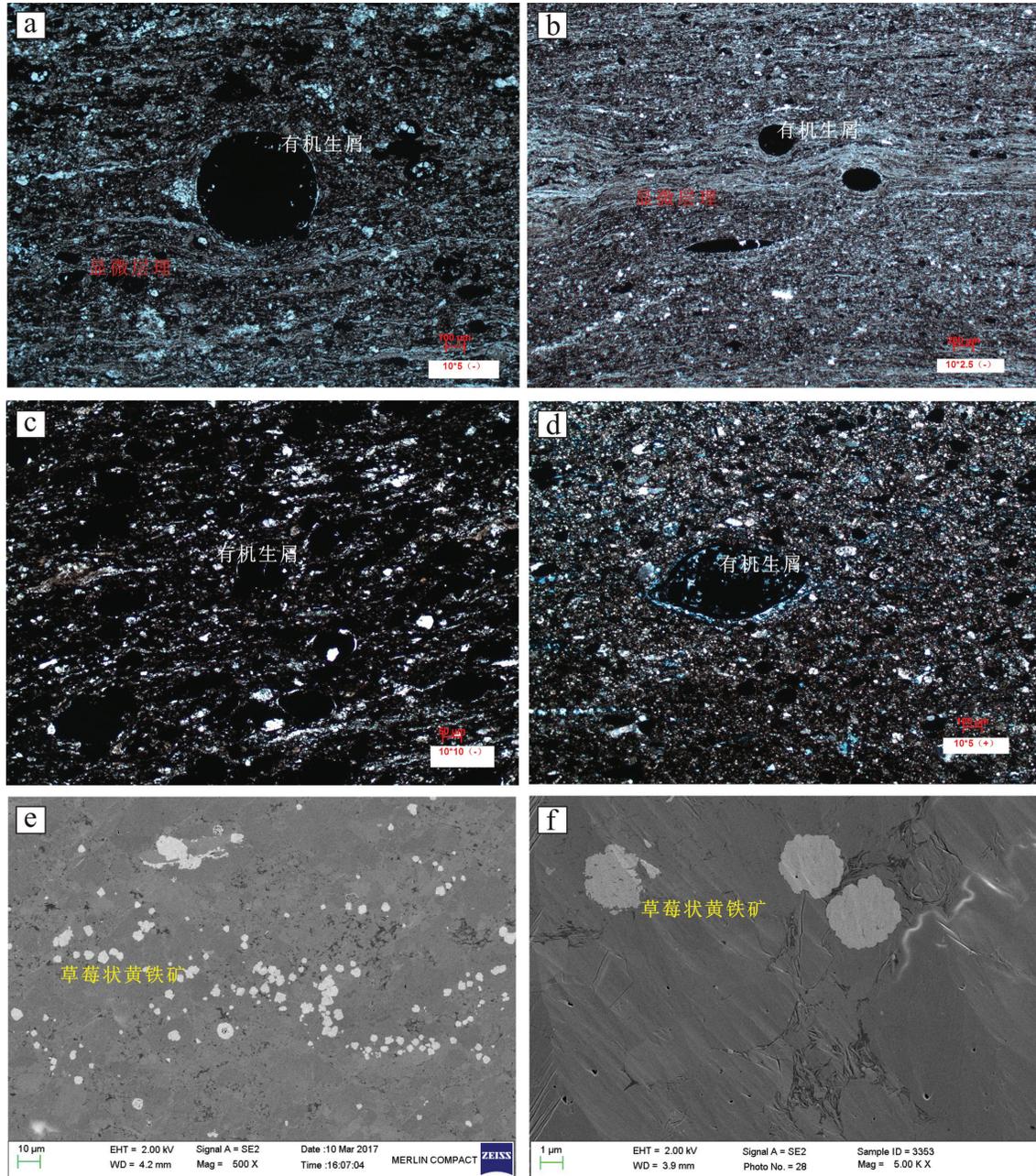


图3 陡山沱组泥页岩显微结构及组分特征

a,b,c,d—有机生屑;e,f—大量草莓状黄铁矿

Fig.3 Microstructure and component characteristics of mud shale in Doushantuo Formation

a, b, c, d—Organic matter debris and micro-stratification; e, f—Large quantities of strawberry pyrite

综合薄片鉴定、场发射扫描电镜检测及全岩、黏土分析检测结果,鄂阳页1井陡山沱组二段泥页岩、云质泥页岩主要矿物组分为碳酸岩(白云石或方解石,平均值44%)、长英质(平均36%)及黏土矿物(平均值20%,包括沸石),少量黄铁矿,个别层位见磷灰石及金红石等;黏土矿物以绿泥石为主,仅

个别层位富含蒙脱石(图4)。

借鉴前人对美国代表性页岩的总结成果(Hickey, 2007; Loucks, 2007; 董大忠等, 2011),美国福特沃斯盆地Barnett页岩矿物成分主要为石英、长石等陆源碎屑及自生脆性硅质矿物,占37.6%~84.3%,平均约为58%,其次为碳酸盐(成分为方解

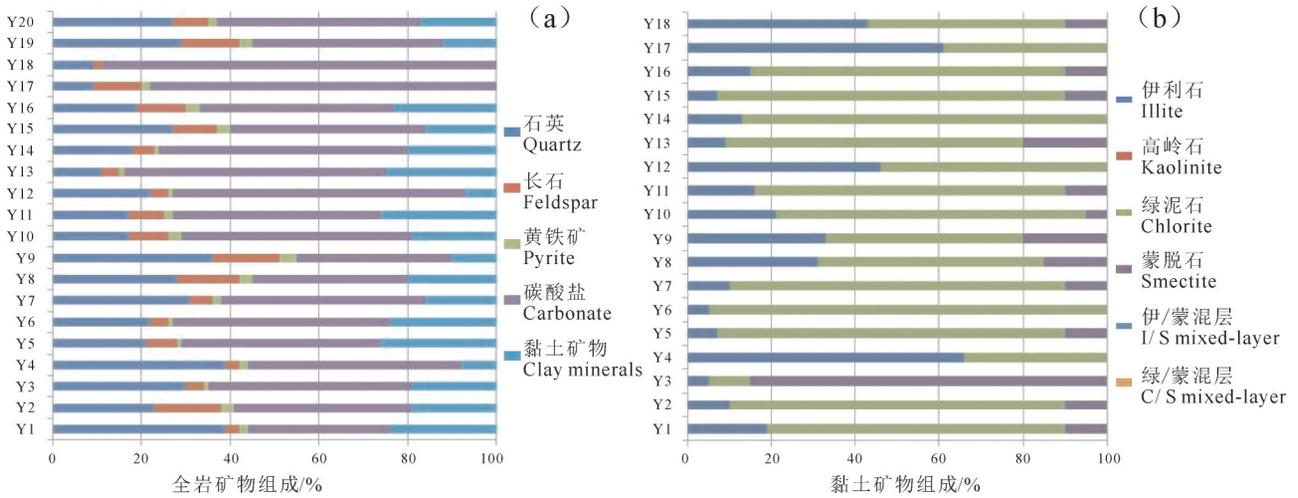


图4 鄂阳页1井陡山沱组二段泥页岩矿物组成(a)及黏土矿物成分(b)

Fig.4 The mineral composition (a) and clay mineral composition (b) of the second member of Doushantuo Formation in well Eyangyan1

石,少量白云石),占 2.5%~32%,平均约 13%,黏土矿物平均约 24%,黄铁矿等化学沉淀类自生矿物含量 < 5%; Haynesville 页岩中,脆性矿物的含量比重相对也较大,主要是碳酸盐矿物,其中石英、长石等矿物占矿物总含量的 8.4%~53%,平均约为 29%,碳酸盐矿物占 4.2%~90%,平均约为 34%,黏土矿物占 3.1%~65.4%,平均约为 37%。鄂阳页 1 井与北美两个典型页岩气藏储层及中国南方龙马溪组相关页岩矿物组成对比见图 5。从矿物组成特征对比也可

以看出,鄂阳页 1 井陡山沱组主力层段矿物组成与 Haynesville 页岩更加相近,脆性矿物以碳酸盐成分为主。

黏土矿物组成通常包括伊利石、高岭石、蒙脱石、水云母、绿泥石等,其含量高不利于形成裂缝,但相对于脆性矿物,黏土矿物往往具有较高的微孔隙体积和较大的比表面积,吸附气体的能力更强。鄂阳页 1 井陡山沱组二段黏土矿物组分分析结果显示,主力层段黏土矿物以稳定组分为主,仅个别层位含蒙皂石类膨胀性黏土矿物。北美及中国实际开发经验揭示,页岩中黏土矿物含量在 20%~40% 更有利于页岩气成藏及后期储层改造(据宜文等, 2016)。因此,鄂阳页 1 井区陡山沱组主力储层黏土矿物含量及组分有利于后期压裂造缝。

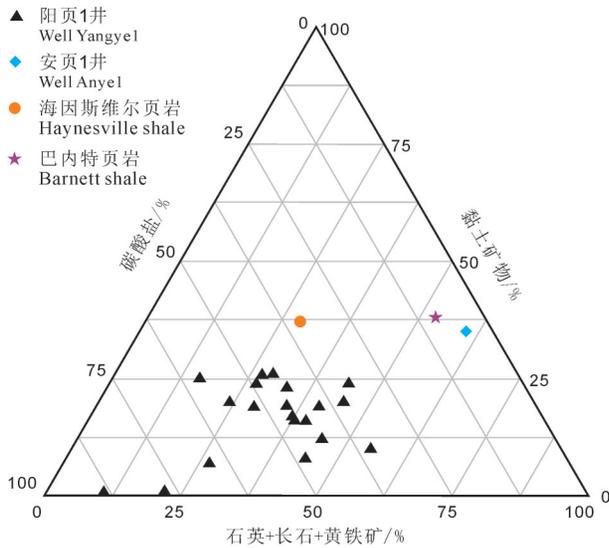


图5 (石英+长石+黄铁矿)-碳酸盐-黏土矿物三角图

Fig.5 Mineral triangle diagram of (quartz + feldspar + pyrite)-carbonate-clay

5 储层微观特征

页岩气的成功开发,突破了传统圈闭成藏理论,增加了资源类型与资源量,也确定了纳米级孔隙系统聚集油气的地位(Loucks et al., 2009; 邹才能等, 2015)。Loucks et al. (2009)对美国 Barnett 页岩研究首次证实了纳米孔隙的存在,认为页岩中的纳米孔主要有有机质孔、粒间孔、溶蚀孔三种。邹才能等(2011)首次在中国南方页岩中发现并描述了有机质微纳米孔隙,2012年,结合国内外研究成果,对页岩孔隙进行了产状-结构综合分类,进一步明确了页岩中微纳米尺度孔隙的地位和类型(于炳松,

2013)。本次研究以基于氩离子抛光样品的场发射扫描电镜检测为核心手段,结合常规光镜及岩心观察,从不同尺度对陡山沱组主力层段页岩储层的微观孔隙予以表征。大量检测结果揭示,鄂阳页1井陡山沱组主力层段页岩孔隙空间以“毫微米尺度的微裂隙”融合“有机质孔隙为主+基质孔缝为辅”以及“基质孔缝为主+有机质孔隙为辅”两类纳米尺度孔隙组合为特征。两类纳米孔隙结构组合受有机质含量控制,其中有机质含量较高的层段发育“有机质孔隙为主+基质孔缝为辅”的孔隙组合,有机质含量较低的层段发育“基质孔缝为主+有机质孔隙为辅”的孔隙组合。

5.1 有机质孔隙

鄂阳页1井陡山沱组二段页岩有机质丰富,可见填隙状、不规则斑块状、板条状及脉状多种形态的有机质,有机孔发育受有机质形态控制,主要发育于填隙状有机质中,其他形态的有机质极少发育或不发育孔隙。参照Loucks et al.(2014)研究成果,认为填隙状有机质为沉积成岩后干酪根热演化形成的迁移有机质,是最重要的生气母质,在页岩中表现为固体沥青或焦沥青,因生气而富有孔隙,也因其具有运移特质,对储层的渗透性能贡献巨大,是页岩气赋存与渗流的重要通道。

场发射扫描电镜检测揭示,鄂阳页1井陡山沱组页岩中填隙状有机质含量最高,是有机物质最主要的赋存方式,常见充填于重结晶的碳酸盐矿物晶间或自生石英晶间,或与黏土矿物交互生长。参照Loucks(2014)研究描述成果,鄂阳页1井陡山沱组主力层段具有优质的生气有机质类型。迁移(或填隙状)有机质的大量存在,广泛形成了以有机质孔隙为主导的纳米孔隙系统(图6a~f)。有机质孔径一般小于50 nm,少部分大于100 nm。

5.2 基质孔缝

鄂阳页1井陡山沱组页岩层系基质孔缝普遍发育,主要包括发育于层片状(或羽状)黏土矿物间的层间孔缝,重结晶的碳酸盐矿物晶间(或晶内)孔,自生石英(少量长石)晶间(或晶内)孔,以及成岩缝和少量的残余孔,并以广泛发育黏土矿物层间孔缝及碳酸岩晶间(或晶内)孔为特征。基质孔缝孔径范围介于10~500 nm,非均质性强烈(图7a~d)。通常,在有机质含量较少的层段,基质孔缝占主导。

5.3 微层理及微裂隙特征

岩心及光学显微镜观察检测显示,陡山沱组页岩微层理(或纹层)及微裂缝较为发育,裂隙多呈方向性,部分被碳酸盐、硅质或泥质充填。检测认为,陡山沱组页岩微层理或纹层主要形成于不同组分的沉积,包括脆性矿物(石英、长石、方解石、白云石等)、黏土矿物以及有机质的不均匀沉积;微裂隙成因包括构造活动、成岩作用和有机质生烃溶蚀等,其中溶蚀或成岩成因的微裂缝无方向性且多不连续,构造作用形成的微裂缝具有方向性且连续性较强,陡山沱组页岩中构造微裂隙更加常见(图8)。微层理或纹层呈连续或断续分布,常见被后期方向性微裂隙穿切。

5.4 岩石物性

本次研究选取陡山沱组主力层段泥页岩共10块岩心样品进行了氩孔隙度及渗透率测试,测试结果孔隙度介于0.6%~2.7%,渗透率总体介于 $0.008 \times 10^{-3} \sim 5.45 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,非均质性非常强,其中两个层段渗透率达到或超过 $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,显示了局部裂缝性孔隙的特征,除去异常高点,主力层段渗透率平均约 $0.0196 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。中国南方龙马溪组页岩主力产层孔隙度通常介于4.6%~5.4%,渗透率通常介于 $0.000436 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,除焦石坝页岩渗透率较高外,长宁及威远页岩渗透率平均值分别为 $0.00029 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2, 0.0000436 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (邹才能等,2015),与中国四川盆地主力页岩储层相比,鄂阳页1井区陡山沱组页岩具备有效页岩气储层的物性条件。

6 资源与勘探前景分析

北美地区多个页岩气藏的开发实践形成了以页岩储层品质表征为核心的资源前景及勘探开发前景评价体系(Bowker, 2007; 蒋裕强等, 2010; 张金川等, 2012; 董大忠等, 2016; 邹才能等, 2016; 马永生等, 2018)。总体看,其评价体系包含两个方面:一是页岩的含气性评价,主要评价内容包括了页岩总有机碳含量(TOC)、有机质成熟度、孔隙度、富有机质页岩厚度、含气量等;二是与页岩气产量有着密切关联的可压裂性评价即脆性矿物及黏土矿物组分及含量评价。董大忠等(2016)对北美产气页岩剖析认为,页岩气资源丰度大、产量高的核心区总有机碳(TOC)含量 $> 2\%$,并将页岩中总有机碳含

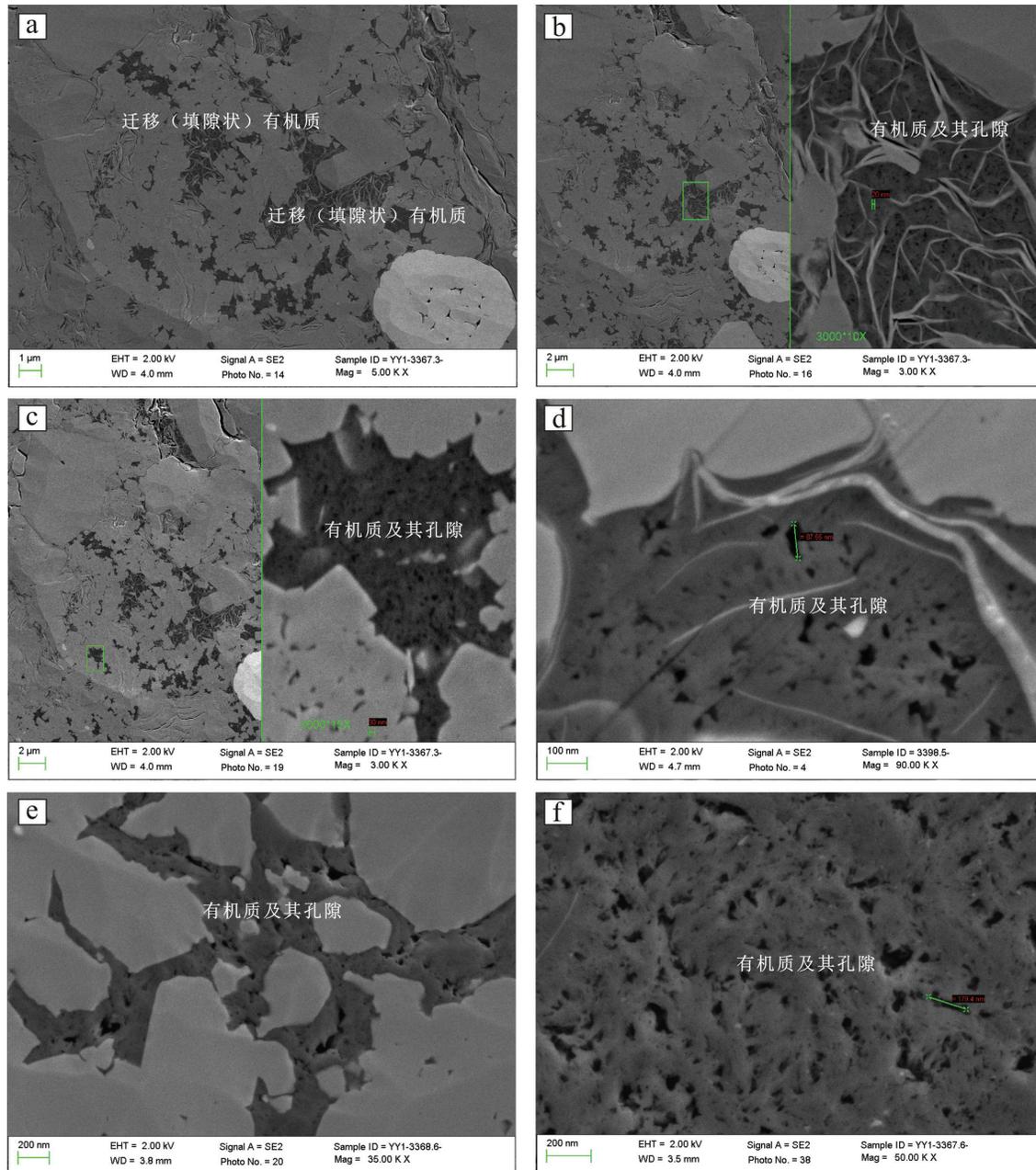


图6 陡山沱组主力层段的有机质孔隙

a—主力层段页岩中丰富的迁移(填隙状)有机质;b—e—填隙状充填于碳酸盐矿物晶间及自生硅质晶间或与黏土矿物交互生长的有机质及其孔隙;f—迁移(填隙状)有机质中的孔隙

Fig.6 Organic matter pores in the main member of Doushantuo Formation

a—Abundant migration (interstitial) organic matter in the shale of the main member;

b—e—Interstitial organic matter and pores interstitially filling in carbonate minerals' intercrystalline position and self-generating siliceous crystals or intergrowing with clay minerals; f—Pores in migrating (interstitial) organic matter

量标准具体确立为好、一般和差3个级别,同时综合页岩厚度、物性及矿物组分(包括脆性矿物及黏土矿物)等参数较系统总结了3个级别页岩储层关键参数(表2)。本文参考前人研究成果,也采用总有机碳含量(TOC)来评价鄂阳页1井陡山沱组主

力页岩的有机质丰度,并以董大忠等(2016)研究成果为对比基础,结合张金川等(2012)页岩产气下限对有机碳(TOC)指标要求的研究成果,对中扬子区陡山沱组主力页岩层段资源前景进行初步讨论。

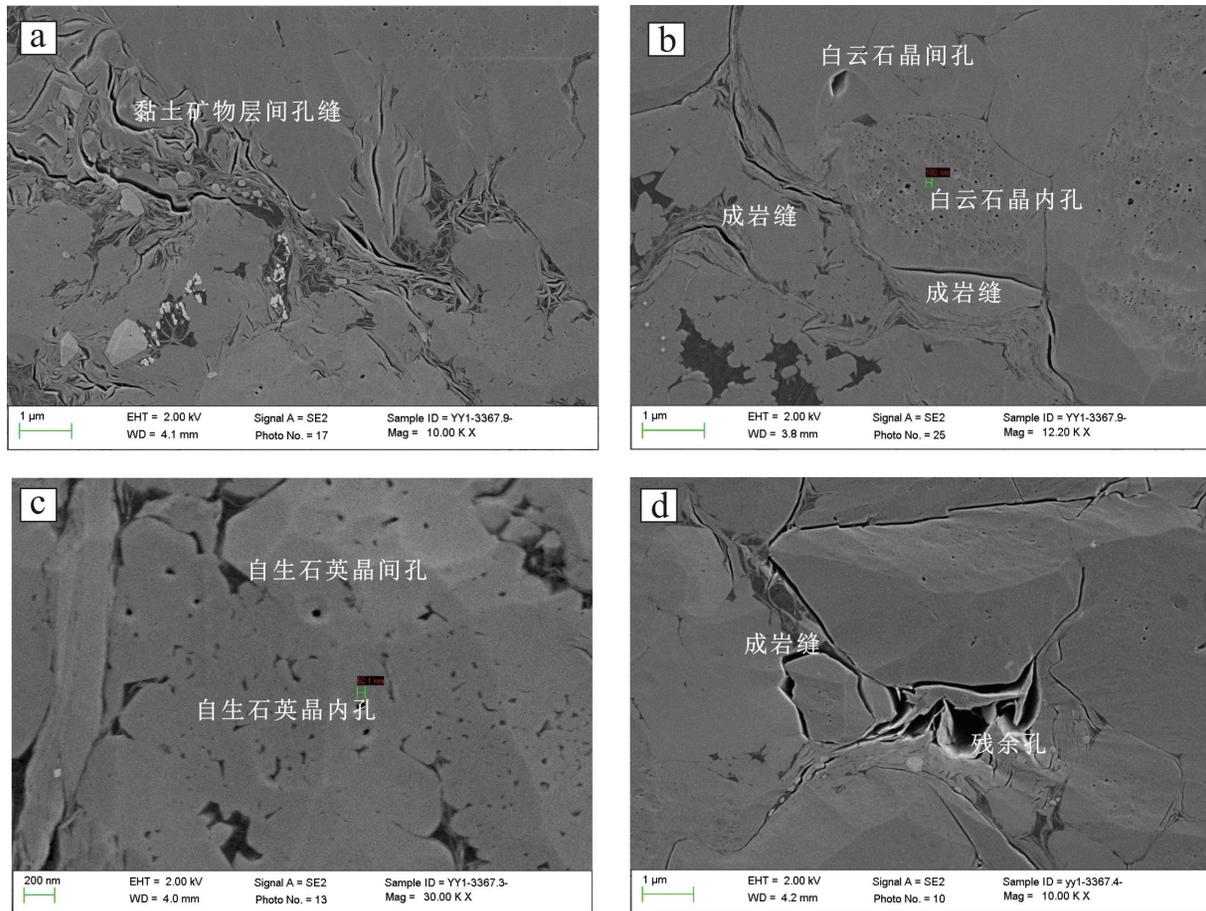


图7 陡山沱组主力层段的基质孔缝

a—广泛发育的黏土矿物层间孔缝;b—白云石晶间、晶内孔及成岩缝;c—自生石英晶间及晶内孔;d—成岩缝及少量的残余孔

Fig.7 Matrix pore in the main member of Doushantuo Formation

a—Widely developed interbedded pores in clay minerals; b—Dolomite intercrystalline pores, intracrystalline pores and diagenetic fractures; c—Autogenetic quartz intercrystalline and intracrystalline pores; d—Diagenetic fractures and a small number of residual holes

6.1 陡山沱组有机质丰度及演化特征

鄂阳页1井陡山沱组二段发育了总厚度约140 m的黑色炭质泥页岩、含云炭质泥页岩及黑灰色含炭云质泥页岩、深灰色泥质白云岩。本次研究主要针对炭质泥页岩及云质泥页岩以每米2个点进行采样,局部层理变化频繁层段加密取样,共分析测试183块炭质泥页岩、含云炭质泥页岩及黑灰色含炭云质泥页岩岩心样品。结果显示:所有样品总有机碳(TOC)测试结果均大于0.5%,介于0.5%~4.21%,平均2.16%;89%的样品总有机碳(TOC)大于1.0%,60%的样品大于2.0%。根据董大忠等(2016)研究成果(表2),鄂阳页1井区陡山沱组主力页岩89%以上的储层为具有较高有机质丰度及较好储层品质的页岩气储层,其中60%为优质储层;参考张金川等(2012)研究成果,鄂

阳页1井区整个陡山沱组主力层段均达到了页岩气产气下限标准。因此,鄂阳页1井陡山沱组主力层段具备中等—最好烃源岩及储集层条件。

由于镜质组反射率($R_o\%$)在高一过成熟样品中非均质性强且数据变化范围较大,而古老海相页岩中又缺乏镜质体,因此常规镜质组反射率在高一过成熟泥页岩评价中往往存在不足,影响样品热演化程度的准确评价(刘德汉等,2013)。为此,笔者采用激光拉曼光谱测定方法,参考刘德汉等建立的热演化成熟度计算公式,以有机质拉曼散射中出现的D峰和G峰信息及衍生参数,直接计算有机质热演化成熟度。本次研究选取陡山沱组主力层段泥页岩共10块样品进行了拉曼光谱检测,每块样品除进行不同形态有机质的单点检测外,还以曝光面积44

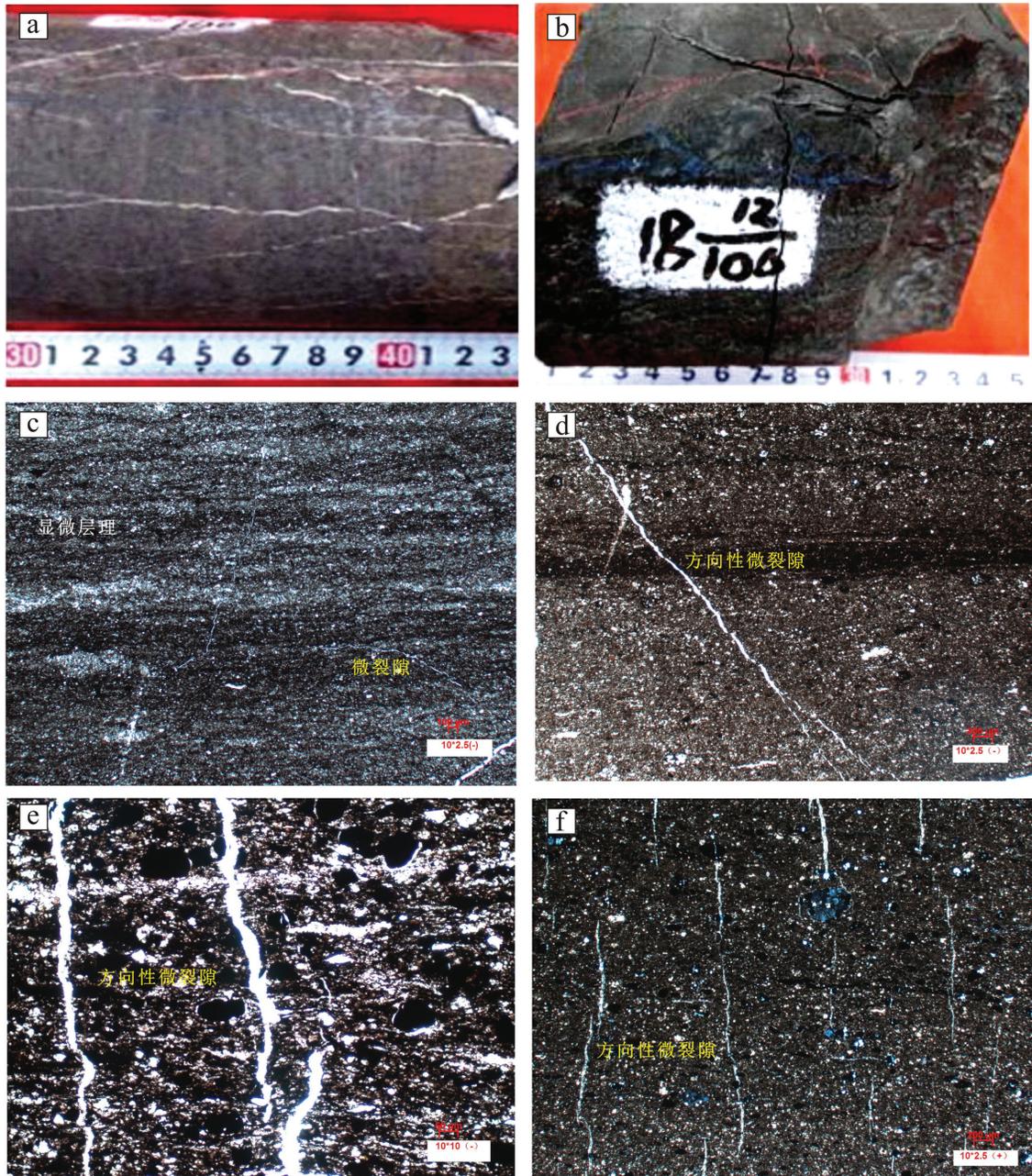


图8 陡山沱组主力层段微裂隙

a,b—岩心尺度裂隙,大部分被碳酸盐及硅质充填;c~f—薄片尺度的显微层理及微裂隙(c—无方向性微裂隙,d,e,f—方向性微裂隙,穿切层理)

Fig.8 Microfractures in the main member of Doushantuo Formation

a,b— Core scale fractures, mostly filled with carbonate and silicate; c~f—Microstratification and microfissures at the thin-section scale (Non-directional microfissure in Fig. c, directional microfissure cutting through beddings in Fig. d, e, f)

μm ×44 μm 进行了面积取谱,以充分揭示鄂阳页1井陡山沱组主力层段泥页岩有机质成熟度。测试结果显示,陡山沱组主力层段泥页岩有机质成熟度(Ro)介于2.0~3.0,平均为2.84%,总体演化程度处于高一过成熟生气阶段。董大忠等在对北美页岩

气藏及我国四川盆地页岩气剖析的基础上总结出北美主要页岩气层Ro值一般大于1.1%,最高约为5.0(Bowker, 2007; Chalmsrs, 2008; 蒋裕强等, 2010;董大忠等,2016;马永生等,2018)。综合上述有机质丰度及演化程度条件,认为陡山沱组主力层

段总计 140 m 泥页岩具有较好的生气潜力。

6.2 陡山沱组储层埋深及关键参数

借鉴北美页岩气开发经验,其勘探开发主体深度为 2000~4000 m (Bowker, 2007; 蒋裕强等, 2010; 马永生等, 2018)。埋深过浅时,保存条件差、含气量偏低,而埋深过大时,热成熟度会增高,储层孔、渗条件变差,勘探开发成本增加,且储层改造难度加大,不利于页岩气有效开发。钻井揭示,鄂阳页 1 井陡山沱组主力层段埋深介于 3300~3440 m。研究区陡山沱组富有机质页岩厚度较大、分布稳定,主力层段埋深介于 3300~3440 m,周邻地区该套页岩埋深也主要介于 2500~3500 m,总体呈北浅南深的趋势。董大忠等(2016)考虑中国富有机质页岩发育、分布特征,结合现有经济技术条件,将中国页岩气有利勘探开发深度界限定以 1000~4500 m 为主。近年来中国在 3500 m 以浅页岩气勘探开发技术水平已趋于成熟,因此,鄂阳页 1 井陡山沱组富有机质页岩主力层段处于较有利勘探开发的深度。

通过以上综合分析,形成关键地质参数及相关参数对比表(表 2, 表 3),对比北美及中国已形成商业性开发的页岩气藏经验参数(Bowker, 2007; 蒋裕强等, 2010; 张金川等, 2012; 董大忠等, 2016; 马永生等, 2018),鄂阳页 1 井陡山沱组主力层段泥页岩厚度大,有机质丰度较高、演化程度高且适中,具备较好成藏基础及资源前景。

6.3 陡山沱组含气性及含气量

根据前人研究统计成果,北美商业开发的页岩总含气量为 0.44~9.91 m³/t,其开发实践认为商业性页岩气开发的页岩总含气量下限平均值为 2.0 m³/t

(Curtis, 2002; Bowker, 2007; Chalmers, 2008; 蒋裕强等, 2010; 董大忠等, 2012; 邹才能等, 2017; 马永生等, 2018)。鄂阳页 1 井钻井揭示,陡山沱组主力层段页岩含气性较好,富气页岩厚度大,共钻遇油气显示层 11 层,累计厚度 120 m,全烃异常值大于 1% 的地层累计厚达 115.7 m,全烃异常值大于 2% 的地层累计厚达 105 m,气显示最高达 10.32%,其中 3335~3386 m、3397~3447 m 现场甲烷气测异常平均达到 4%~8%。岩心浸水实验气泡逸出强烈,现场解析气量 1.18~1.86 m³/t(不含损失气和残余气),总含气量最高达 4.82 m³/t。对比北美商业开发的页岩总含气量下限平均值,认为陡山沱组主力层段页岩具备商业开发价值。2018 年初,中国地质调查局针对陡山沱组二段主力页岩层实施直井压裂储层改造,总液量 1817 m³,总加砂量 131.40 m³,试气日产量达 5460 m³/d,进一步展示了古老陡山沱组页岩的勘探开发潜力及商业价值。

7 结 论

(1)综合研究及对比揭示,中扬子湘鄂地区陡山沱组主力层段黑色炭质页岩及灰黑色含炭云质泥页岩发育,且厚度大(钻井揭示 140 m),有机质丰度较高(总有机碳介于 0.5%~4.21%),页岩成熟度高且适中(*R_o* 平均 2.84),关键地质参数与北美及中国四川盆地龙马溪组页岩可比性较好,具有页岩气形成及富集的基础地质条件。

(2)陡山沱组主力层段有机质以填隙状运移有机质为主,有机孔发育好,根据美国页岩气开发实践及页岩生烃及富集理论最新研究成果,该类有机

表 2 鄂阳页 1 井陡山沱组关键地质参数
Table 2 Key geological parameters of Doushantuo Formation

| 评价参数 | 董大忠等中外页岩气研究综合评价参数 | | | 鄂阳页 1 井 陡山沱组 | |
|-------------------------|--------------------------------------|-------------------|-----------|---|-----------------------|
| | 评价级别 差 | 一般 | 好 | | |
| TOC/% | < 1.0 | 1.0~2.0 | > 2.0 | < 1.0 占 11%; 1.0~2.0 占 29%; > 2.0 占 60% | |
| 有效页岩厚度/m | < 15 | 15~30 | > 30 | > 30 | |
| <i>R_o</i> /% | < 1.1 或 > 5.0 | 1.1~1.6 或 4.0~5.0 | 1.6~4.0 | 平均 2.84 | |
| 含气量/(m ³ /t) | < 1.0 | 1.0~2.0 | > 2.0 | 平均 2.9 | |
| 物性 | 含气孔隙度/% | < 1.0 | 1.0~2.0 | > 2.0 | 平均 1.48 |
| | 渗透率/10 ⁻⁶ μm ² | < 0.001 | 0.001~0.1 | > 0.1 | 19.6(去掉高异常点的均值) |
| 矿物含量 | 脆性矿物/% | 30 | 30~40 | > 40 | 80(含碳酸盐矿物,其中长英质平均 37) |
| | 黏土矿物/% | 20 | 20~30 | < 30 | 平均 20 |

表3 鄂阳页1井陡山沱组与龙马溪组及北美典型页岩参数对比

Table 3 Comparison of parameters of Doushantuo Formation, Longmaxi Formation and typical shale in North America

| 类别 | 四川盆地 | 北美台地 | 鄂阳页1井区 | |
|------------------------------|---------|-------------------|-----------------------|---------------|
| 时代 | 志留系龙马溪组 | Barnett 页岩 石炭系 | Haynesville 页岩 侏罗系 | 震旦系 |
| 盆地类型 | 克拉通 | 前陆 | 前陆 | 克拉通 |
| 沉积环境 | 陆棚 | 陆棚 | 陆棚 | 陆棚 |
| 岩石类型 | 硅质页岩 | 硅质页岩、钙质页岩 | 硅质页岩、钙质页岩 | 硅质页岩、(云质)钙质页岩 |
| TOC/% | 1.5~6 | 4.5 | 0.5~4 | 0.5~4.21 |
| Ro/% | 1.5~3 | 0.5~2.1 | 1.2~3 | 平均2.84 |
| 孔隙度/% | 3~10 | 4~5 | 8~9 | 平均1.48 |
| 渗透率/ $10^{-6} \mu\text{m}^2$ | 0.01~9 | < 1.0 | < 5.0 | 平均19.6 |
| 厚度/m | 26~100 | 30~180 | 70~100 | 140 |
| 孔隙类型 | 有机孔为主 | 有机孔为主 | 有机孔为主 | 基质孔+有机孔 |
| 孔径范围/nm | 20~200 | 5~700(平均100) | 20 | 10~50 |
| 脆性矿物/% | 30~85 | 40~80 | 35~65 | 平均81 |

质是最好的生气母质。填隙状有机质的普遍存在,确保了陡山沱组主力层段的生气能力并提供了具有一定连通性的孔隙系统,具备较好的资源及勘探前景。

(3)陡山沱组主力层段脆性矿物含量高且黏土矿物组分稳定,是实施人工诱导缝的良好基础,具备形成体积压裂改造的优势条件,进一步彰显了陡山沱组页岩气勘探开发潜力。

References

- Bowker K A . 2007. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: issues and discussion[J]. AAPG Bulletin , 91 (4):523-533 .
- Chen Xiaohong,Wang Chuanshang, Liu An, Luo Shengyuan, Li Hai, Wei Kai. 2017. The discovery of the shale gas in the Cambrian Shuijingtu Formation of Yichang area, Hubei Province [J]. Geology in China, 44(1):188-189 (in Chinese).
- Chen Xiaohong, Zhang Baomin, Zhang Guotao, Chen Lin, Zhang Miao, Li Peijun. 2018. High shale gas industry flow obtained from the Ordovician Wufeng Formation and the Silurian Longmaxi Formation of Yichang area, Hubei Province [J]. Geology in China, 45(1):199-200 (in Chinese).
- Curtis J B. 2002. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 86 (11): 1921-1938.
- Dong Dazhong, Zou Caineng, Li Jianzhong, Wang Shejiao, Li Xinjing, Wang Yuman, Li Denghua, Huang Jinliang. 2011. Resource potential, exploration and development prospect of shale gas in the whole world [J]. Geological Bulletin of China, 30(2/3):324-336(in Chinese with English abstract).
- Dong Dazhong, Wang Yuman, Li Denghua, Yang Hua, Li Xinjing, Wang Shufang. 2012. Global shale gas development revelation and prospect of shale gas in China[J]. China Engineering Sciences, 14 (6):69-76(in Chinese with English abstract).
- Dong Dazhong, Wang Yuman, Li Xinjing, Zou Caineng, Guan Quanzhong, Zhang Chenchen, Huang Jinliang, Wang Shufang, Wang Hongyan, Liu Honglin, Bai Wenhua, Liang Feng, Lin Wen, Zhao Qun, Liu Dexun, Qiu Zhen. 2016. New breakthroughs in shale gas exploration and development in China and their development prospects [J]. Natural Gas Industry, 36(1): 19-32(in Chinese with English abstract).
- Dong Dazhong, Wang Yuman, Huang Xunan, Zhang Chenchen, Guan Quanzhong, Huang Jinliang, Wang Shufang, Li Xinjing.2016. Discussion about geological characteristics, resource evaluation methods and its key parameters of shale gas in China [J]. Natural Gas Geoscience, 27(9): 1583-1601(in Chinese with English abstract).
- Fang Dazhi, Zeng Hui, Wang Ning, Zhang Yong. 2015. Study on high production factors of high-pressure shale gas from Haynesville Shale Gas development data[J]. Oil Drilling & Production Technology, 37(2): 58-62(in Chinese with English abstract).
- Hammes U, Frébourg G. 2012. Haynesville and Bossier mudrocks: A facies and sequence stratigraphic investigation, East Texas and Louisiana, USA[J]. Marine and Petroleum Geology, 31(1) : 8-26.
- Hickey J J, Henk B. 2007. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett Shale, Mitchell 2 T. P. Sims well, Wise County, Texas[J]. AAPG Bulletin, 91(4) : 437-443.
- Jiang Yuqiang , Dong Dazhong , Qi Lin, Shen Yanfei, Jiang Chan, He Fuwei. 2010. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 30(10): 7-12(in Chinese with English abstract)
- Ju Yiwen, Qi Yu, Fang Lizhi, Zhu Hongjian, Wang Guochang, Wang Guiliang. 2016. Chinese shale gas reservoir types and their controlling factors[J]. Advances in Earth Science, 31(8) : 782-799 (in Chinese with English abstract).
- Li Bin, Hu Bowen, Luo Qun. 2018. Tectonic sequence stratigraphy and sedimentary environment evolution of prototype basin in middle and upper Yangtze Region[J]. Coal Science and Technology, 46(2):

- 19–27.
- Li Haohan, Song Teng, Chen Ke, Lin Tuo, Jin Chunshuang, Meng Fanyang, Wang Peng, Zhang Yanlin. 2017. The discovery of shale gas from Sinian Formation at ZD–2 well in western Hubei [J]. *Geology in China*, 44(4):812–813 (in Chinese).
- Li Jianzhong, Li Denghua, Dong Dazhong, Wang Shejiao. 2012. Comparison and enlightenment on formation condition and distribution characteristics of shale gas between China and U.S. [J]. *Chinese Engineering Science*, 14(6):56–62(in Chinese with English abstract).
- Liu Dehan, Xiao Xianming, Tian Hui, Min Yushun, Cheng Peng, Shen Jiagui. 2013. Sample maturation calculated using Raman spectroscopic parameters for solid organics: Methodology and geological applications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58: 1228–1241.
- Loucks R G, Ruppel S C. 2007. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep– water shale– gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 91(4) : 579–601.
- Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, Jarvie D M. 2009. Morphology genesis, and distribution of nanometer– scale pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett shale[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 79(9):848–861.
- Loucks R G, Reed R M. 2014. Scanning electron microscope petrographic evidence for distinguishing organic matter pores associated with depositional organic matter versus migrated organic matter in Mudrock[J]. *GCAGS Journal*, 3:51–60.
- Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. 2018. China’s shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 45(4): 1–14(in Chinese with English abstract)
- Pu Poling, Bao Shujing, Wangyi, Jiang Youlu. 2008. Analysis of shale gas reservoir forming conditions[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 22(3): 33–39(in Chinese with English abstract).
- Shan Changan, Zhang Tingshan, Guo Junjie, Liang Xing, Zhang Chao. 2015. Geological characteristics and resource potential of the Upper Sinian Doushantuo Formation shale gas in the north of middle Yangtze region[J]. *Geology in China*, 42(6): 1944–1958(in Chinese with English abstract).
- Wang Peng, Song Teng, Chen Ke, Lin Tuo, Li Haohan, Meng Fanyang. 2018. The discovery of algal and bioherm reservoir in Sinian Dengying Formation, Yichang area, western Hubei Province[J]. *Geology in China*, 45(1):203–204. (in Chinese).
- Wang Yufang, Zhai Gangyi, Bao Shujing, Zou Zhi, Song Teng, Li Haohan. 2017. Evaluation of Sinian Doushantuo Formation shale gas content and fracturing property of Eyangye1well in Hubei Province[J]. *China Mining Magazine*, 26(6):167–172(in Chinese with English abstract).
- Wan Tianfeng. 2006. Tectonic evolution in the Chinese continent from Middle Cambrian to Early Devonian[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6):30–42(in Chinese with English abstract).
- Yu Bingsong. 2013. Classification and characterization of gas shale pore system[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 211–220 (in Chinese with English abstract)
- Zhai Gangyi, Bao Shujing, Wang Yufang, Chen Ke, Wang Shengjian, Zhou Zhi, Song Teng, Li Haohan. 2017. Reservoir accumulation model at the edge of Palaeohigh and significant discovery of shale gas in Yichang area, Hubei Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4):441–447(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, Jiang Shengling, Liu Jinxia, Jiang Wenli, Tang Xuan, Han Shuangbiao. 2012. The method of shale gas assessment: Probability volume method[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(2): 184–191(in Chinese with English abstract).
- Zhao Jinzhou, Xu Wenjun, Li Yongming, Hu Jinyang, Li Jinqin. 2015. A new method for fracability evaluation of shale– gas reservoirs [J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(6): 1165–1172(in Chinese with English abstract).
- Zhou Wen, Wang Hao, Xie Runcheng. 2013. Characteristics and exploration potential of Lower Paleozoic marine shale gas reservoir in middle– upper Yangtze area, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* 40(5): 569–576(in Chinese with English abstract).
- Zhu Tong, Cao Yan, Zhang Kuai. 2014. Typical shale gas reservoirs in USA and enlightenment to exploration and development[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(6):718–724(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, Yang Zhi, Wu Songtao, Su Ling, Dong Dazhong, Li Xingjing. 2011. First discovery of nano– pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6):1857–1864(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, Tao Shizhen, Hou Lianhua, Zhu Rukai, Yuan Xuanjun, Ran Qiquan, Li Denghua, Wang Zhiping. 2013. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 40(4): 385–454(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Yang Zhi, Zhu Rukai, Zhang Guosheng, Hou Lianhua, Wu Songtao, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Dong Dazhong, Wang Yuman, Wang Lan, Hang Jinliang, Wang Shufang. 2015. Progress in China’s unconventional oil and gas exploration and development and theoretical Technologies[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 89(6): 979–1007(in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Yuman, Li Xingjing, Huang Jinliang, Wang Shufang, Guan Quanzhong, Zhang Chenchen, Wang Hongyan, Liu Honglin, Bai Wenhua, Liang Feng, Lin Wen, Zhao Qun, Liu Dexun, Yang Zhi, Liang Pingping, Sun Shasha, Qiu Zhen. 2015. Shale gas in China: Characteristics, challenges and

- prospects (I) [J]. Petroleum Exploration and Development, 42 (6): 689-701(in Chinese with English abstract)
- Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Yuman, Li Xinjing, Huang Jinliang, Wang Shufang, Guan Quanzhong, Zhang Chenchen, Wang Hongyan, Liu Honglin, Bai Wenhua, Liang Feng, Lin Wen, Zhao Qun, Liu Dexun, Yang Zhi, Liang Pingping, Sun Shasha, Qiu Zhen. 2016. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (II) [J]. Petroleum Exploration and Development, 43(2): 166-178(in Chinese with English abstract)
- Zou Caineng, Zhao Qun, Dong Dazhong, Yang Zhi, Qiu Zhen, Liang Feng, Wang Nan, Huang Yong, Duan Anxiang, Zhang Qin, Hu Zhiming. 2017. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 28(12): 1781-1796(in Chinese with English abstract).
- ### 附中中文参考文献
- 陈孝红, 王传尚, 刘安, 罗胜元, 李海, 危凯. 2017. 湖北宜昌地区寒武系水井沱组探获页岩气[J]. 中国地质, 44(1):188-189
- 陈孝红, 张保民, 张国涛, 陈林, 张森, 李培军. 2018. 湖北宜昌地区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组获页岩气高产工业气流[J]. 中国地质, 45(1):199-200.
- 董大忠, 邹才能, 李建忠, 王社教, 李新景, 王玉满, 李登华, 黄金亮. 2011. 页岩气资源潜力与勘探开发前景 [J]. 地质通报, 30(2/3): 324-336.
- 董大忠, 王玉满, 李登华, 杨桦, 李新景, 王淑芳. 2012. 全球页岩气发展启示与中国未来发展前景展望[J]. 中国工程科学, 14(6):69-76.
- 董大忠, 王玉满, 李新景, 邹才能, 管全中, 张晨晨, 黄金亮, 王淑芳, 王红岩, 刘洪林, 拜文华, 梁峰, 吝文, 赵群, 刘德勋, 邱振. 2016. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J]. 天然气工业, 36(1):19-32.
- 董大忠, 王玉满, 黄旭楠, 张晨晨, 管全中, 黄金亮, 王淑芳, 李新景. 2016. 中国页岩气地质特征、资源评价方法及关键参数[J]. 天然气地球科学, 27(9): 1583-1601.
- 房大志, 曾辉, 王宁, 张勇. 2015. 从Haynesville页岩气开发数据研究高压页岩气高产因素[J]. 石油钻采工艺, 37(2):58-62.
- 据宜文, 臧宇, 房立志, 朱洪建, 王国昌, 王桂梁. 2016. 中国页岩气的储层类型及其制约因素[J]. 地球科学进展, 31(8): 782-799.
- 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 沈妍斐, 蒋婵, 何涛为. 2010. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. 天然气工业, 30(10):7-12.
- 李斌, 胡博文, 罗群. 2018. 中、上扬子地区构造层序地层及原型盆地沉积环境演化[J]. 煤炭科学技术 46(2):19-27.
- 李浩涵, 宋腾, 陈科, 林拓, 金春爽, 孟凡洋, 王鹏, 张森林. 2017. 鄂西地区(秭地2井)震旦纪地层发现页岩气[J]. 中国地质, 44(4):812-813.
- 李建忠, 李登华, 董大忠, 王社教. 2012. 中美页岩气成藏条件、分布特征差异研究与启示[J]. 中国工程科学, 14(6): 56-62.
- 刘德汉, 肖贤明, 田辉, 闵育顺, 周秦, 程鹏, 申家贵. 2013. 固体有机质拉曼光谱参数计算样品热演化程度的方法与地质应用[J]. 科学通报, 58: 1228-1241.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 2018. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 45(4): 1-14.
- 蒲泊伶, 包书景, 王毅, 蒋有录. 2008. 页岩气成藏条件分析[J]. 石油地质与工程, 22(3):33-39.
- 单长安, 张廷山, 郭军杰, 梁兴, 张朝. 2015. 中扬子北部上震旦统陡山沱组地质特征及页岩气资源潜力分析[J]. 中国地质, 42(6): 1944-1958.
- 王玉芳, 翟刚毅, 包书景, 周志, 宋腾, 李浩涵. 2017. 鄂阳页1井陡山沱组页岩储层含气性及可压性评价[J]. 中国矿业, 26(6):166-172.
- 王鹏, 宋腾, 陈科, 林拓, 李浩涵, 孟凡洋. 2018. 鄂西宜昌地区震旦系灯影组藻丘灰岩钻获油气显示[J]. 中国地质, 45(1):203-204.
- 万天丰. 2006. 中国大陆早古生代构造演化[J]. 地学前缘, 13(6): 30-42.
- 于炳松. 2013. 页岩气储层孔隙分类与表征[J]. 地学前缘, 20(4): 211-220.
- 翟刚毅, 包书景, 王玉芳, 陈科, 王胜建, 周志, 宋腾, 李浩涵. 2017. 古隆起边缘成藏模式与湖北宜昌页岩气重大发现[J]. 地球学报, 38(4): 441-447.
- 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 姜生玲, 刘锦霞, 姜文利, 唐玄, 韩双彪. 2012. 页岩气资源评价方法与技术: 概率体积法[J]. 地学前缘, 19(2):184-191.
- 赵金洲, 许文俊, 李勇明, 胡晋阳, 李晋秦. 2015. 页岩气储层可压性评价新方法[J]. 天然气地球科学, 26(6): 1165-1172.
- 周文, 王浩, 谢润成, 陈文玲, 周秋媚. 2013. 中上扬子地区下古生界海相页岩气储层特征及勘探潜力[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(5):569-576.
- 朱彤, 曹艳, 张快. 2014. 美国典型页岩气藏类型及勘探开发启示[J]. 石油实验地质, 36(6):718-724.
- 邹才能, 朱如凯, 白斌, 杨智, 吴松涛, 苏玲, 董大忠, 李新景. 2011. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 27(6): 1857-1864.
- 邹才能, 张国生, 杨智, 陶士振, 侯连华, 朱如凯, 袁选俊, 冉启全, 李登华, 王志平. 2013. 非常规油气概念、特征、潜力及技术[J]. 石油勘探与开发, 40(4):385-454.
- 邹才能, 董大忠, 王玉满, 李新景, 黄金亮, 王淑芳, 管全中, 张晨晨, 王红岩, 刘洪林, 拜文华, 梁峰, 吝文, 赵群, 刘德勋, 杨智, 梁萍萍, 孙莎莎, 邱振. 2015. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. 石油勘探与开发, 42(6):689-701.
- 邹才能, 杨智, 朱如凯, 张国生, 侯连华, 吴松涛, 陶士振, 袁选俊, 董大忠, 王玉满, 王岚, 黄金亮, 王淑芳. 2015. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 89(6):979-1007.
- 邹才能, 董大忠, 王玉满, 李新景, 黄金亮, 王淑芳, 管全中, 张晨晨, 王红岩, 刘洪林, 拜文华, 梁峰, 吝文, 赵群, 刘德勋, 杨智, 梁萍萍, 孙莎莎, 邱振. 2016. 中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J]. 石油勘探与开发, 43(2):166-178.
- 邹才能, 赵群, 董大忠, 杨智, 邱振, 梁峰, 王南, 黄勇, 端安祥, 张琴, 胡志明. 2017. 页岩气基本特征、主要挑战与未来前景[J]. 天然气地球科学, 28(12): 1781-1796.