

引用格式:李浩涵,包书景,张焱林,等.鄂西地区下震旦统陡山沱组二段剖面特征及页岩气地质意义[J].油气藏评价与开发,2022,12(1):171-180.

LI Haohan, BAO Shujing, ZHANG Yanlin, et al. Outcrop characteristics and shale gas geological significance of the second member in Doushantuo Formation of Lower Sinian in western Hubei[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 171-180. DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.01.015

鄂西地区下震旦统陡山沱组二段剖面特征及页岩气地质意义

李浩涵¹,包书景¹,张焱林²,段轲²,陈科¹,周志¹,宋腾¹,李飞¹

(1.中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100083;2.湖北省地质调查院,湖北 武汉 430074)

摘要:随着黄陵背斜南翼下震旦统陡山沱组全球最古老页岩气的首次发现,该层系暗色页岩的含气性已获得证实。陡山沱组二段作为主力含气页岩层段分布广、沉积厚度大、页岩质量好。在鄂西地区选取典型的三斗坪镇头顶石村早震旦世剖面进行了地质测量,并针对陡山沱组二段开展小层划分和特征描述工作,证实该地区陡山沱组二段是一套具备生气潜力的白云质岩性组合。结合临近地质调查井秭地2井岩心资料及其测试分析数据,综合探讨了鄂西地区陡山沱组二段沉积特征、生烃条件和储层条件。认为该层段含气性受高演化程度的有机质丰度控制,依赖纳米级孔隙和微裂缝的吸附气是该常压层段页岩气的主要组成部分。

关键词:页岩气;资源潜力;陡山沱组;震旦系;鄂西地区

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Outcrop characteristics and shale gas geological significance of the second member in Doushantuo Formation of Lower Sinian in western Hubei

LI Haohan¹, BAO Shujing¹, ZHANG Yanlin², DUAN Ke², CHEN Ke¹, ZHOU Zhi¹, SONG Teng¹, LI Fei¹

(1. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

2. Hubei Institute of Geological Survey, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: With the first discovery of the world's oldest shale gas in Doushantuo Formation of the Lower Sinian in the southern wing of the Huangling anticline, the gas-bearing property of the dark shale has been confirmed. As the main gas-bearing shale bed, the second member of Doushantuo Formation has wide distribution, large sedimentary thickness and good shale quality. Based on the geological survey, and the layers division and characterization of the typical Early Sinian outcrop in Toudingshi Village, Sandouping Town, western Hubei, it is proved that the second member of Doushantuo Formation in this area is a set of dolomitic lithologic assemblage with potential for gas generation. Combined with the core data of the adjacent geological survey Well-ZD-2, the sedimentary characteristics, hydrocarbon generation and reservoir conditions are comprehensively discussed. Results show that the high evolutionary level of the kerogen controls the formation gas content. The adsorbed gas which depends on the Nanometer pores and micro-fractures, is the main component of shale gas in the normal formation pressure.

Keywords: shale gas; resource potential; Doushantuo Formation; Sinian System; western Hubei

自中国开展页岩气勘探开发工作以来,在四川盆地已取得一系列海相页岩气重大突破^[1-4],但在盆地外围还缺乏实质进展。中扬子鄂西地区自震旦系

起发育下震旦统陡山沱组、下寒武统牛蹄塘组等为代表的8套黑色页岩^[5-6],其中鄂阳页1井、秭地2井在陡山沱组见到页岩气显示,展示了良好的页岩气

收稿日期:2021-07-19。

第一作者简介:李浩涵(1986—),硕士,工程师,主要从事页岩气调查工作,地址:北京市海淀区北四环中路267号,邮政编码:100083。E-mail:akazan@126.com

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“南方盆地页岩气调查评价”(DD20221653)。

资源潜力^[7-22]。

目前该层系含气性虽已获得证实,但钻井取心不连续,尚不能覆盖整个层段,层序和沉积相还有待划分。与常规含气页岩页理发育、泥质含量高的特征不同,陡山沱组含气层段岩性以高有机质含量的泥质白云岩为主,页理等储集空间较不发育,其页岩气地质特征尚有待研究。该研究在鄂西地区选取震旦系典型剖面——三斗坪镇头顶石村早震旦世野外剖面,针对陡山沱组二段开展小层划分和特征描述工作,结合地质调查井秭地2井岩心资料及其测试分析数据,综合探讨了鄂西地区陡山沱组二段沉积特征、生烃条件和储层条件,以探索该层段页岩气主控因素。

1 地质概况

研究区位于鄂西地区东部,构造位置位于中扬子地区湘鄂西褶皱带北部,西起利川复向斜东缘,东至宜昌斜坡带,具体包括黄陵背斜、神农架背斜、秭归盆地和花果坪复向斜等三级构造单元。三斗坪镇头顶石村剖面位于黄陵隆起南部(图1)。

鄂西地区在新太古代—古元古代微型陆核的基础上经晋宁运动形成变质基底,在南华纪伴随伸展的构造环境形成大陆边缘裂谷盆地,快速沉降了一套磨拉石(碎屑岩)—冰碛岩沉积建造序列。震旦纪在先期裂陷盆地范围内沉积了下震旦统陡山沱组富

有机质页岩层系,随后在灯影期进入初始碳酸盐台地建设时期。

鄂西地区震旦系陡山沱组地层呈裙边状围绕黄陵隆起、神农架隆起周缘出露。从岩性组合上看,陡山沱组为一套整合于灯影组之下,平行不整合于南沱组之上的一套海相碳酸盐岩。陡山沱组地层划分为1个二级层序和4个三级层序:陡山沱组一段(Z_1d^1)为潮坪沉积环境的泥晶或细—微晶白云岩,也称“盖帽白云岩”;陡山沱组二段(Z_1d^2)为主要的烃源岩段,岩性主要为灰色—灰黑色中薄层泥灰岩与炭质页岩互层,反映了水体相对开阔的台内盆地沉积环境;陡山沱组三段(Z_1d^3)以微晶白云岩为主,夹有少量的硅质条带及燧石结核,为浅水的潮坪相沉积;陡山沱组四段(Z_1d^4)以顶部含有大量的白云岩结核的黑色页岩为主,反映了封闭的泻湖沉积环境^[14-15]。

2 剖面地层特征

该次测量剖面位于湖北省宜昌市夷陵区三斗坪镇头顶石村。剖面测量比例尺为1:500,自南沱组底部起,测至陡山沱组二段未完(图2),实测剖面长度386.00 m,导线数7个,测量产状9个,划分小层共26层。测量过程中共采集样品3个(表1)。剖面自下而上可划分为南沱组、陡山沱组2个地层单元。

南华系南沱组真厚度2.5 m,共划分1层(层号为0)。岩性组合为灰绿色块状含冰碛砾砂泥岩、

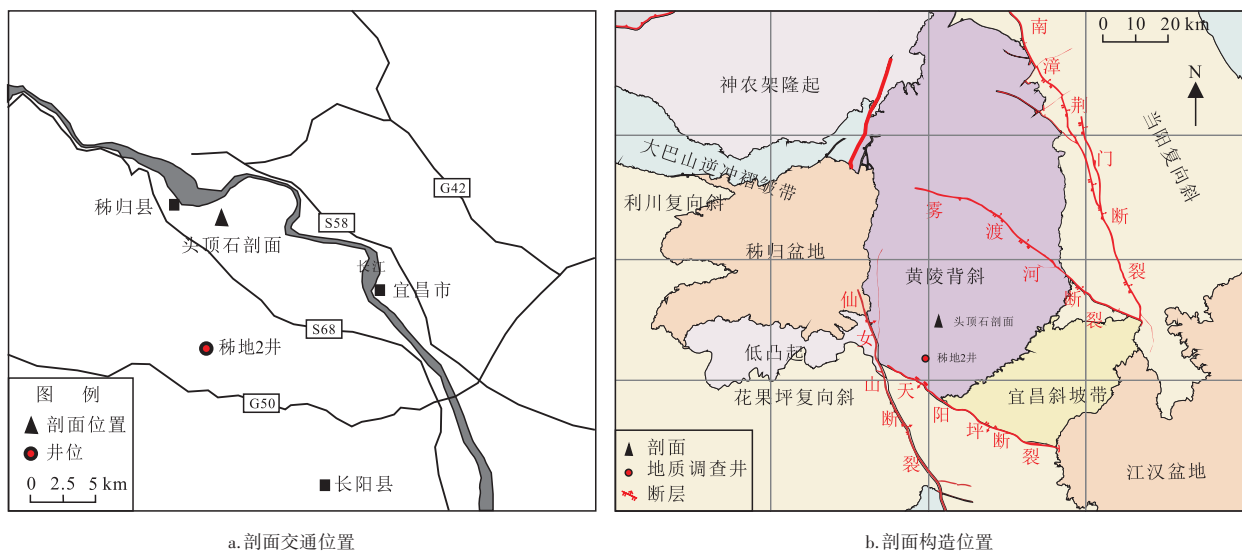


图1 鄂西地区下震旦统陡山沱组二段剖面交通与构造位置

Fig. 1 Traffic position and tectonic location of outcrop in the second member in Doushantuo Formation of Lower Sinian in western Hubei

中粗砂砾岩、粉砂砾岩、夹灰绿色块状冰碛含泥质粉砂砾岩。砾石含量较少,10%以下,分选较差,2~25 cm不等,磨圆较好。上覆陡山沱组产状一致、岩性突变,界面不平直,两者应为平行不整合接触。

震旦系陡山沱组以陡一段的浅灰色泥晶或细一微晶结构的“盖帽白云岩”为主要标志,根据岩性可进一步将该剖面陡山沱组划分为陡山沱组一段和陡

山沱组二段。陡山沱组一段真厚度3.3 m,共划分3层(1—3层)。岩性主要为浅灰色厚层块状含砂藻砂屑微晶白云岩及灰色—灰白色粉晶白云岩、泥晶白云岩。砾石大小混杂,砾径在8~18 cm,分选较差,磨圆较差,岩层表面可见硅质纹层,砂屑白云岩单层厚度50~120 cm。

陡山沱组二段真厚度53.3 m,共划分22层(4—

表1 头顶石剖面丈量数据
Table 1 Measurement data of Toudingshi Section

| 序号 | 地层单元 | | 分层描述 | 采样位置 |
|-------|-------------------|--|--|------|
| | 系统 | 组段斜距(m) 真厚度(m) | | |
| 25 | 震旦系 下统 陡山沱组 | 4.50 1.20 | 为浅灰色中—厚层粉晶白云岩,可见磷质结核发育 | |
| 24 | | 5.50 1.40 | 为浅灰色中—厚层粉晶白云岩夹炭质页岩。该层发育小型正断层,错断23—24层,断面产状210°∠32°,断面两侧岩层未见明显变形,断距约50 cm | |
| 23 | | 8.00 2.30 | 灰黑色炭质页岩 | |
| 22 | | 19.00 5.40 | 深灰色薄—中层粉晶白云岩夹炭质页岩,前者单层厚度4~20 cm | |
| 21 | | 17.50 5.00 | 灰黑色炭质页岩 | |
| 20 | | 2.50 0.70 | 深灰色中层状粉晶白云岩,单层厚度12~18 cm | |
| 19 | | 7.00 2.00 | 灰黑色炭质页岩 | |
| 18 | | 14.00 4.00 | 深灰色中层状粉晶白云岩,单层厚度25~35 cm | |
| 17 | | 10.00 1.60 | 灰黑色炭质页岩 | |
| 16 | | 9.00 1.50 | 深灰色薄层粉晶白云岩夹深灰色炭质泥质白云岩,前者单层厚度4~10cm | 样品3 |
| 15 | | 8.00 1.90 | 深灰色薄—中层粉晶白云岩、泥晶白云岩夹灰黑色碳质泥质白云岩,发育磷质结核 | |
| 14 | | 25.00 3.10 | 层岩性均为深灰色薄层泥质白云岩,单层厚度2~8 cm。根据磷质结核的发育程度,可细分为3层:0~8 m为14-1层(厚度1.2m),8~11 m为14-2层(厚度0.4m),11~22 m为14-3层(厚度1.6 m)。其中14-2层发育磷质结核,磷质结核长轴沿层面方向定向排列,砾径约1~2 cm,水平层理清晰可见 | |
| 13 | | 22.00 1.00 | 深灰色薄—中层泥质白云岩,单层厚度4~18 cm | |
| 12 | | 50.00 4.60 | 深灰色薄层炭质泥质白云岩,单层厚度4~8 cm | |
| 11 | | 27.00 2.30 | 深灰色薄—中层纹层状含炭泥—微晶白云岩,单层厚度5~15 cm | 样品2 |
| 10 | | 24.00 0.90 | 灰黑色薄层状炭质泥质白云岩,单层厚度2~6 cm | |
| 9 | | 16.00 1.40 | 浅灰色薄—中层微晶白云岩与灰黑色炭质泥质白云岩互层。前者单层厚度6~18 cm | |
| 8 | | 10.00 0.80 | 浅灰色炭质泥质白云岩 | |
| 7 | | 20.00 1.60 | 深灰色薄—中层粉晶白云岩夹炭质页岩。粉晶白云岩以中层为主,夹少量薄层,单层厚度8~20 cm | |
| 6 | | 20.00 1.60 | 灰黑色炭质纹层状泥—微晶白云岩,单层厚度2~4 cm | 样品1 |
| 5 | | 29.50 4.60 | 深灰色中层状灰质白云岩夹炭质白云质页岩。前者单层厚度10~25 cm | |
| 4 | | 6.00 1.50 | 为陡山沱组二段浅灰色薄层含黄铁矿含藻砂屑含灰质微晶白云岩,单层厚度2~8 cm | |
| 3 | 4.50 1.40 | 浅灰色厚层粉晶白云岩,单层厚度大于70 cm,含燧石条带 | | |
| 2 | 4.00 1.20 | 灰白色薄层粉晶白云岩、泥晶白云岩,单层厚度5~10 cm,水平层理发育 | | |
| 1 | 5.00 0.70 | 为陡山沱组一段浅灰色厚层块状含砾藻砂屑白云岩,砾石大小混杂,砾径在8~18 cm,分选较差,磨圆较差,岩层表面可见硅质纹层,砂屑白云岩单层厚度50~120 cm | | |
| 平行不整合 | | | | |
| 0 | 南华系 上统 南沱组 | 18.00 2.50 | 为南沱组灰绿色块状含冰碛砾砂泥岩,中粗砂砾岩。粉砂砾岩,夹灰绿色块状冰碛含泥质粉砂砾岩。砾石含量较少,10%以下,分选较差,2~25 cm不等,磨圆较好。 | |

25层)。岩性主要为深灰色薄—中层粉晶白云岩、泥晶白云岩、灰质白云岩夹灰黑色炭质泥质白云岩,泥质含量明显高于陡山沱组一段。粉晶白云岩、泥晶白云岩、灰质白云岩单层厚度5~18 cm,炭质泥质白云岩为2~5 cm。局部磷质结核发育,并呈向上增多的趋势。

3 陡山沱组层序及沉积相划分

3.1 层序地层划分

根据露头沉积结构等特征,该剖面可识别出4个三级层序(图3),其中南沱组—陡一段1个,陡二段3个。

层序1(ZSQ₁)为剖面1—3层。其中1—2层为海侵体系域(TST),厚度4.4 m。主要岩性为灰绿色块状含冰碛砾砂泥岩、中粗砂砾岩、浅灰色厚层块状含砾藻砂屑白云岩、粉砂砾岩夹灰绿色块状冰碛含泥质粉砂砾岩、浅灰色厚层块状含砾藻砂屑白云岩。浅灰色厚层块状含砾藻砂屑白云岩砾石含量较少,10%以下,分选较差,2~25 cm不等,磨圆较好。剖面第3层为高位体系域(HST),厚度1.40 m。主要岩性为浅灰色厚层粉晶白云岩,单层厚度大于70 cm,含燧石条带。

层序2(ZSQ₂)为剖面4—11层。其中4—6层为

海侵体系域(TST),厚度7.7 m。主要岩性为浅灰色薄层含黄铁矿含藻砂屑含灰质微晶白云岩、中层状灰质纹层状微—泥晶白云岩夹炭质白云质页岩。藻砂屑白云岩单层厚度2~8 cm,灰质白云岩单层厚度10~25 cm。剖面第7—11层高位体系域(HST),厚度6.0 m。主要岩性为炭质泥质白云岩、深灰色薄—中层粉晶白云岩夹炭质页岩。粉晶白云岩以中层为主,夹少量薄层,单层厚度6~20 cm。

层序3(ZSQ₃)为剖面第12—18层。其中12—17层为海侵体系域(TST),厚度13.7 m。剖面主要岩性为深灰色薄层炭质泥质白云岩、炭质页岩夹深灰色含炭粉晶、微晶白云岩。炭质泥质白云岩单层厚度4~8 cm,粉晶、微晶白云岩单层厚度4~18 cm。第18层为高位体系域(HST),厚度4 m。主要岩性为深灰色中层状粉晶白云岩,单层厚度25~35 cm。

层序4(ZSQ₄)为剖面第19—25层。其中19—23层为海侵体系域(TST),厚度15.4 m。主要岩性为黑色炭质页岩夹薄—中层粉晶白云岩,后者厚度4~20 cm。高位体系域(HST)为剖面第24—25层,厚度2.6 m。主要岩性为浅灰色中—厚层纹层状微—泥晶白云岩夹炭质页岩。

3.2 沉积相划分

根据各组岩石类型、层厚、沉积构造等特征,本

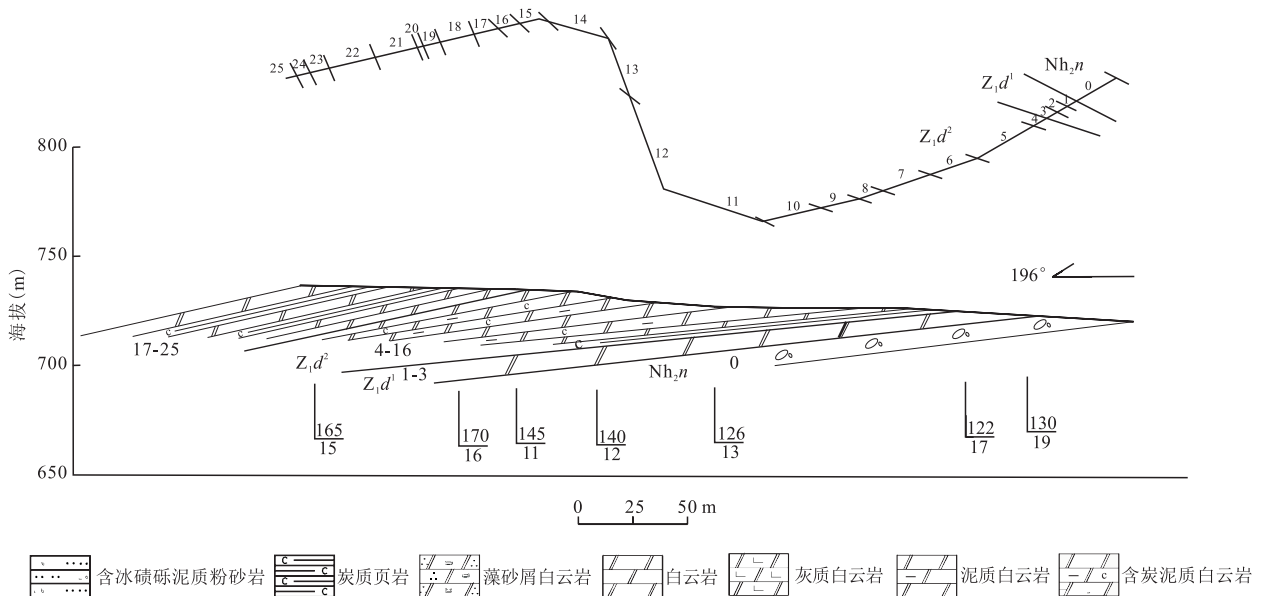


图2 头顶石剖面实测地层剖面

Fig. 2 Measured stratigraphic section of Toudingshi outcrop

剖面陡山沱组主要为一套局限台地——台地边缘相沉积。

陡山沱组一段对应着层序1(剖面1—3层),主要岩性为浅灰色厚层块状含砂藻砂屑微晶白云岩,砾石大小混杂,砾径在8~18 cm,分选较差,磨圆较差,岩层表面可见硅质纹层,砂屑白云岩单层厚度50~120 cm。结合区域资料判断为局限台地相之潮间—潮上带。

陡山沱组二段下部对应着层序2的海侵体系域(剖面4—6层),主要岩性为浅灰色薄层含黄铁矿含藻砂屑含灰质微晶白云岩、中层状灰质纹层状微—泥晶白云岩夹炭质白云质页岩。藻砂屑白云岩单层厚度2~8 cm,灰质白云岩单层厚度10~25 cm。结合区域资料判断为开阔台地相。

陡山沱组二段上部对应着层序2的高位体系域—层序4(剖面6—25层):主要岩性为深灰色薄—中层粉晶白云岩、泥晶白云岩、灰质白云岩夹灰黑色炭质泥质白云岩、灰黑色炭质泥质白云岩夹深灰色薄—中层粉晶白云岩、泥晶白云岩、粉晶白云岩、泥晶白云岩。灰质白云岩单层厚度5~18 cm,炭质泥质白云岩为2~5 cm。局部磷质结核发育,并呈向上增多的趋势。厚度53.3 m。为台盆—台盆边缘相。

4 陡山沱组二段页岩气地质特征

露头样品受采样条件、风化作用等影响难以获得全面的测试参数,因此,该文结合临井稀地2井岩心样品测试分析结果探讨页岩气地质特征。

稀地2井位于头顶石剖面正南偏西方向约10 km,是一口以陡山沱组为目的层的页岩气地质调查井(图1)。稀地2井控制陡山沱组二段厚度155 m,岩性组合上部为灰色中层状微晶白云岩与黑色炭质泥质白云岩、炭质白云质泥岩互层,下部为灰黑色中薄层炭质泥质白云岩、含炭质含粉砂微晶白云岩、炭质白云质泥岩,发育多层硅磷质结核,厚度154.67 m。

4.1 地球化学特征

头顶石剖面共测试烃源岩样品3个,其陡二段TOC(总有机碳含量)分布范围0.35%~0.69%,平均为0.49%(表2)。稀地2井TOC范围为0.53%~1.78%,平均值为0.85%(图4),考虑到露头一般受风化作用的影响TOC结果偏低较为合理^[8]。

头顶石剖面陡二段样品 R_o (镜质体反射率)值为2.91%~3.24%,平均值为3.12%;稀地2井样品 R_o

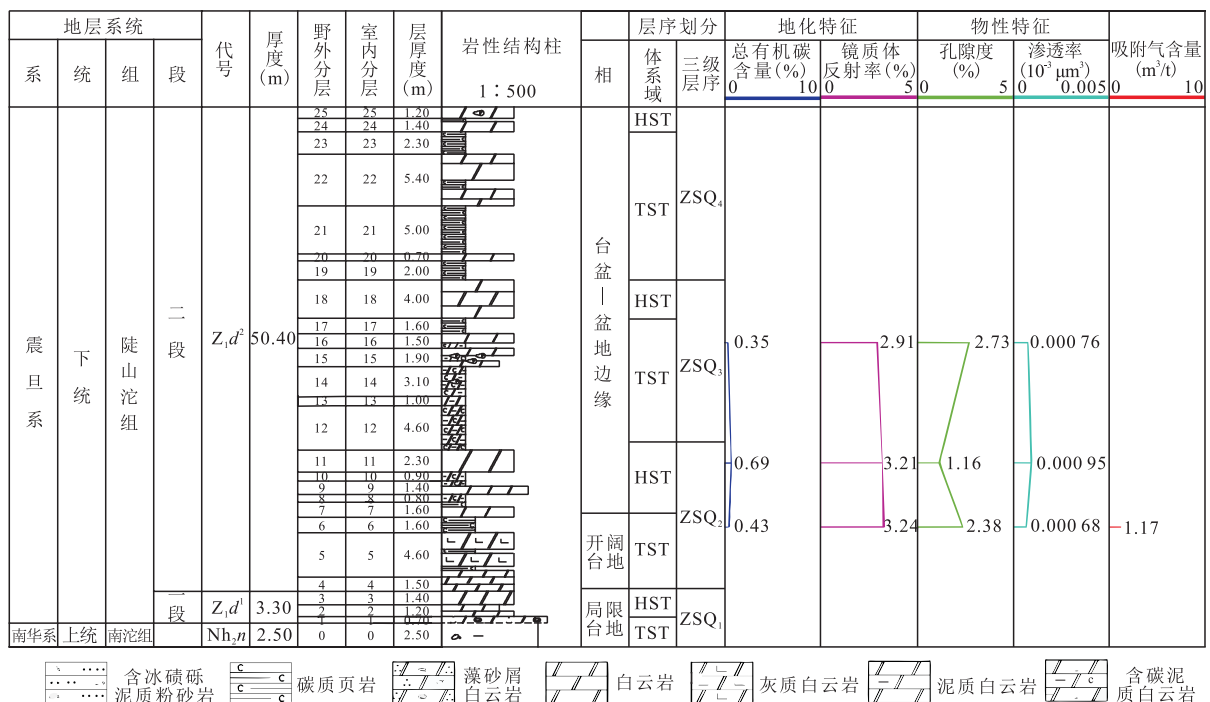


图3 头顶石剖面地层柱状图
Fig. 3 Stratigraphic histogram of Toudingshi outcrop

值为2.56%~3.19%,平均值为2.83%,均属过成熟阶段。根据有机质镜检分型结果,测得有机质类型均为II₁型,反应了海相有机质来源。总体而言,该地区陡二段TOC含量虽然低于传统意义上的富有机质页岩,但在碳酸盐岩中相对较高,有机质演化程度相对适中(相对于南方地区有机质普遍过成熟度的背景下),页岩气地质条件相对有利。

4.2 岩石矿物学特征

从岩性上看,头顶石剖面陡二段以高白云质含

量为主要特征。剖面样品受制于风化作用,岩石X-衍射分析仅能检出白云石、石英以及少量黏土矿物和方解石(表2)。

而秭地2井样品更具参考价值,陡山沱组二段主要矿物成分包括白云石、石英、黏土矿物,含少量长石和黄铁矿。其中黏土矿物含量介于4%~18%,平均值约13.3%;石英含量介于4%~22%,平均值约16%;白云石介于59%~84%,平均值约67.3%;长石含量介于1%~4%,平均值1.4%;黄铁矿含量介于0~4%,平均值约2%。总体表现为白云石含量

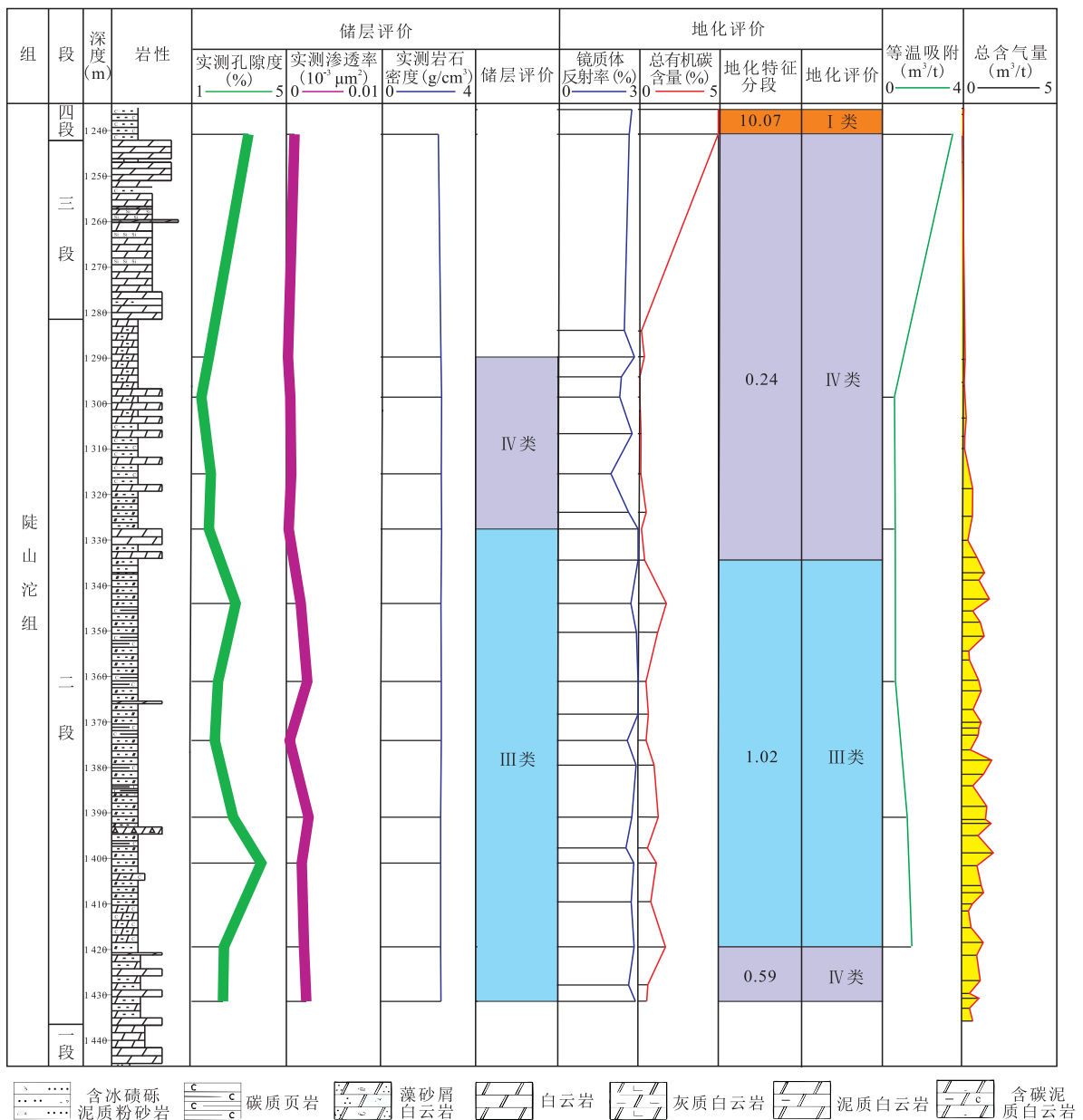


图4 秭地2井陡山沱组综合柱状图

Fig. 4 Comprehensive histogram of Doushantuo Formation in Well-ZD-2

较高,不含方解石矿物,脆性矿物总含量较高,易于压裂(图5)。

4.3 储集空间特征

头顶石剖面陡二段孔隙度平均为2.09%,渗透率平均为 $0.0008 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;秭地2井陡二段孔隙度平均为2.27%;渗透率平均为 $0.0012 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。说明孔隙度和渗透率相对较低,属于低孔—特低孔、特低渗型储层。

秭地2井扫描电镜结果显示陡二段主要发育纳米级有机质孔隙和微米级粒内孔隙,其中有机质孔隙介于 $50 \sim 300 \text{ nm}$,形状一般为不规则状;粒内孔隙大小 $1 \sim 5 \mu\text{m}$,呈椭球状或不规则状,微裂缝常见,大小一般为纳米级(图6)。相较一般页岩,层理及页理不发育,镜下可见微裂缝,裂缝宽度 $30 \sim 100 \text{ nm}$,分布不规则。

4.4 含气性特征

秭地2井1 295.46~1 431.06 m钻遇陡山沱组黑色炭质泥质白云岩时均获显著的含气性显示:水浸

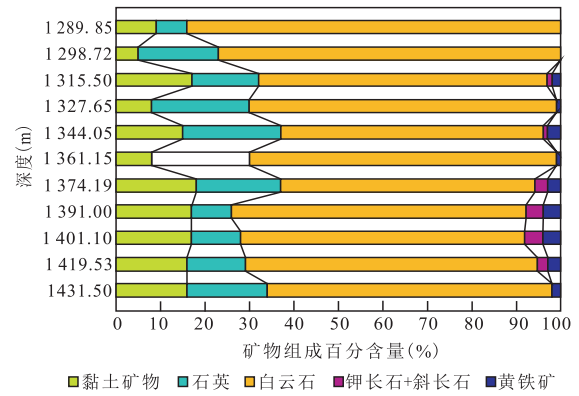


图5 秭地2井陡山沱组二段矿物成分分布
Fig. 5 Mineral constituents of the second member of Doushantuo Formation in Well-ZD-2

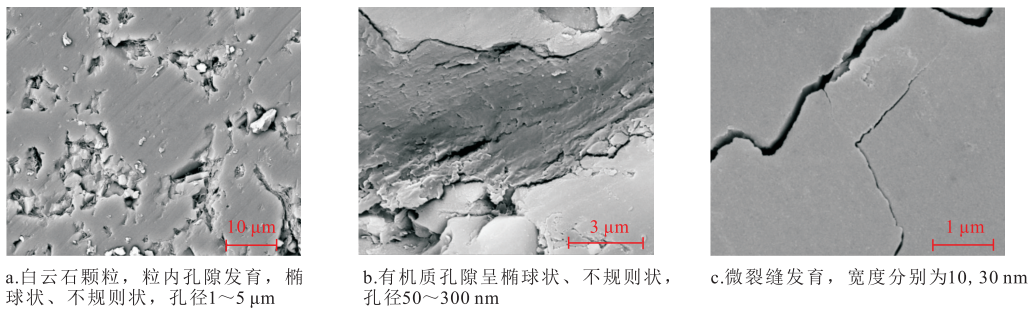


图6 秭地2井陡山沱组微孔隙、微裂缝特征

Fig. 6 Characteristics of micro-pores and micro-fractures of Doushantuo Formation in Well-ZD-2

表2 头顶石剖面陡山沱组测试分析数据
Table 2 Testing results of Doushantuo Formation in Toudingshi outcrop

| 序号 | 岩石类型 | 总有机碳含量 (%) | 镜质体反射率 (%) | 腐泥组 (%) | | 壳质组 (%) | | 腐殖质组 (%) | 镜质组 (%) | 惰质组 (%) | 类型指数 | 渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$) | 孔隙度 (%) | 岩石密度 (g/cm^3) | 全岩定量分析 (%) | | | | | | | | |
|----|---------------|------------|------------|---------|-----|---------|----|----------|---------|---------|-----------------|---------------------------------|---------|---------------------------------|------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| | | | | 无定形 | 藻质体 | 孢粉体 | 其他 | | | | | | | | 黏土总量 | 石英 | 钾长石 | 斜长石 | 方解石 | 白云石 | 黄铁矿 | 菱铁矿 | 石膏 |
| 1 | 纹层状含炭泥—微晶白云岩 | 0.43 | 3.24 | 74 | | | | | 26 | 48 | II ₁ | 0.000 68 | 2.38 | 2.46 | 7 | 35 | | 2 | 54 | 2 | | | |
| 2 | 纹层状含炭泥—微晶白云岩 | 0.69 | 3.21 | 80 | | | | | 20 | 60 | II ₁ | 0.000 95 | 1.16 | 2.56 | 1 | 28 | | 4 | 67 | | | | |
| 3 | 纹层状含炭含粉砂微晶白云岩 | 0.35 | 2.91 | 76 | | | | | 24 | 52 | II ₁ | 0.000 76 | 2.73 | 2.49 | 3 | 28 | | | | 69 | | | |

实验均剧烈起泡,点火试验均成功燃烧,火焰呈淡蓝色,显示甲烷含量较高。陡山沱组二段等温吸附分析含气量为 $0.64 \sim 1.51 \text{ m}^3/\text{t}$,解吸气最高含量达 $0.92 \text{ m}^3/\text{t}$,总含气量最高达 $1.67 \text{ m}^3/\text{t}$ (图4)。

针对剖面样品甲烷等温吸附结果表明,在 8.70 MPa 的压力下吸附气量值 $1.17 \text{ m}^3/\text{t}$,与秭地2井陡二段等温吸附结果相近,与解析结果相吻合(图7)。

5 讨论

页岩气含量主要由游离气、吸附气和溶解气组成,一般溶解气占比重极小,以游离气和吸附气为主。

其中游离气以页岩层理、页理间孔隙和微米至纳米级孔隙、微裂缝为主要储集空间,并受地层压力控制。头顶石剖面及秭地2井陡山沱组二段样品岩性以黑色炭质泥质白云岩为主,非传统页岩,其层理、页理等储集空间较不发育,孔隙度均为 2% 左右,渗透率也仅为 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 级别。考虑到秭地2井含气层埋深仅 $1300 \sim 1400 \text{ m}$,且为常压地层,因此其游离气聚集条件较为不利。

吸附气主要受黏土矿物和有机质含量影响。较多的黏土矿物和较高的 TOC 含量可以带来更多的纳米级孔隙,大大提升矿物的比表面积。在秭地2井样品中黏土矿物含量不高,平均不到 15% 对含气量影响较为有限,但其 TOC 随深度变化曲线与总含气量随深度变化曲线高度吻合(图8)。秭地2井 TOC 含量与含气性关系研究表明,总含气量与 TOC 含量明显呈正相关性,关系式为 $y=0.7999x+0.0395$ ($R^2=0.647$)。因此 TOC 含量是陡山沱组二段含气性的主控因素。此外剖面和钻井样品的II1型干酪根在 R_o 值介于 $2.8\% \sim 3.1\%$ 高过成熟度条件下在生气过程中可产生更多的纳米孔隙从而提高了矿物比表面积,为吸附气提供了更多的储集空间。

6 结论

1) 头顶石剖面陡山沱组发育一套局限台地—台地边缘相沉积。其中陡二段为台盆—台盆边缘相沉积,可划分出3个三级层序(ZSQ_2 — ZSQ_4),并可进一步划分出3个海侵体系域(TST)和3个高位体系域(HST)。

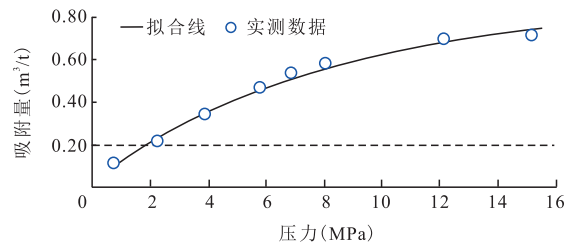


图7 头顶石剖面陡山沱组甲烷等温吸附曲线

Fig. 7 Methane isothermal adsorption curve of Doushantuo Formation in Toudingshi Section

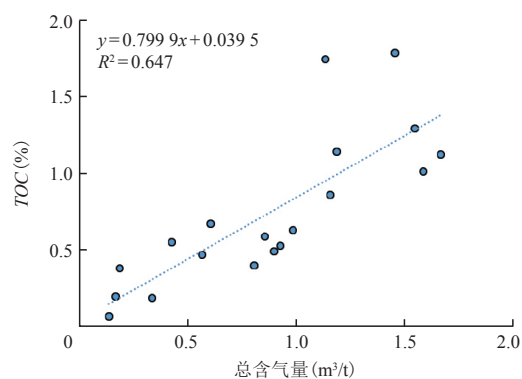


图8 秭地2井 TOC 与总含气量关系

Fig. 8 Relation between TOC and total gas content in Well-ZD-2

2) 陡山沱组二段以高白云石含量(平均 67.3%)的碳质泥质白云岩—碳质白云质泥岩为主要岩性组合。岩性致密、孔渗性能较差,层理和裂缝较不发育,游离气储集空间少;但矿物粒间孔、有机质孔等纳米级孔隙和微裂缝较发育,吸附气储集空间丰富。

3) 陡山沱组二段含气性主要受有机质丰度控制,吸附于高过成熟度干酪根大量发育的纳米级有机质孔中的吸附气是该常压层段页岩气的主要组成部分。

参考文献

- [1] 董大忠,邹才能,李建忠,等.页岩气资源潜力与勘探开发前景[J].地质通报,2011,30(2-3):324-336.
DONG Dazhong, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Resource potential, exploration and development prospect of shale gas in the whole world[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2-3): 324-336.
- [2] 董大忠,程克明,王玉满,等.中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J].石油与天然气地质,2010,31(3):288-308.

- DONG Dazhong, CHENG Keming, WANG Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region, China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(3): 288-308.
- [3] 邹才能,杜金虎,徐春春,等.四川盆地震旦系-寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 278-293.
- ZOU Caineng, DU Jinhu, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 278-293.
- [4] 刘树根,孙玮,罗立志,等.兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(5): 511-520.
- LIU Shugen, SUN Wei, LUO Lizhi, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(5): 511-520.
- [5] 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.
- [6] 张金川,姜生玲,唐玄,等.我国页岩气富集类型及资源特点[J]. *天然气工业*, 2009, 29(12): 109-114.
- ZHANG Jinchuan, JIANG Shengling, TANG Xuan, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(12): 109-114.
- [7] 李忠权,刘记,李应,等.四川盆地震旦系-威远-安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 26-33.
- LI Zhongquan, LIU Ji, LI Ying, et al. Formation and evolution of Weiyuan-Anyue extension-erosion groove in Sinian system, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 26-33.
- [8] 李双建,高平,黄博宇,等.四川盆地绵阳-长宁凹槽构造演化的沉积约束[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 889-898.
- LI Shuangjian, GAO Ping, HUANG Boyu, et al. Sedimentary constraints on the tectonic evolution of Mianyang-Changning trough in the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 889-898.
- [9] 汪泽成,赵文智,胡素云,等.克拉通盆地构造分异对大油气田形成的控制作用—以四川盆地震旦系—三叠系为例[J]. *天然气工业*, 2017, 37(1): 9-23.
- WANG Zecheng, ZHAO Wenzhi, HU Suyun, et al. Control of tectonic differentiation on the formation of large oil and gas fields in craton basins: A case study of Sinian-Triassic of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(1): 9-23.
- [10] 赵文智,魏国齐,杨威,等.四川盆地万源—达州克拉通内裂陷的发现及勘探意义[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(5): 659-669.
- ZHAO Wenzhi, WEI Guoqi, YANG Wei, et al. Discovery of Wanyuan-Dazhou intracratonic rift and its exploration significance in the Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(5): 659-669.
- [11] 魏国齐,杨威,张健,等.四川盆地中部前震旦系裂谷及对上覆地层成藏的控制[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(2): 179-189.
- WEI Guoqi, YANG Wei, ZHANG Jian, et al. The pre-Sinian rift in central Sichuan Basin and its control on hydrocarbon accumulation in the overlying strata[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 179-189.
- [12] 刘静江,李伟,张宝民,等.上扬子地区震旦纪沉积古地理[J]. *古地理学报*, 2015, 17(6): 735-753.
- LIU Jingjiang, LI Wei, ZHANG Baomin, et al. Sedimentary palaeogeography of the Sinian in Upper Yangtze Region[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2015, 17(6): 735-753.
- [13] 汪泽成,刘静江,姜华,等.中—上扬子地区震旦纪陡山沱组沉积期岩相古地理及勘探意义[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(1): 39-51.
- WANG Zecheng, LIU Jingjiang, JIANG Hua, et al. Lithofacies paleogeography and exploration significance of Sinian Doushantuo depositional stage in the middle-upper Yangtze region, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 39-51.
- [14] 李文正,张建勇,李浩涵,等.鄂西—渝东地区克拉通内裂陷分布特征及油气勘探意义[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(5): 675-685.
- LI Wenzheng, ZHANG Jianyong, LI Haohan, et al. Distribution characteristics of intracratonic rift and its exploration significance in western Hubei and eastern Chongqing area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(5): 675-685.
- [15] 杨平,谢渊,李旭兵,等.雪峰山西侧震旦系陡山沱组烃源岩生烃潜力及油气地质意义[J]. *中国地质*, 2012, 39(5): 1299-1309.
- YANG Ping, XIE Yuan, LI Xubing, et al. Hydrocarbon-generating potential of the source rocks of the Sinian Doushantuo Formation on the western side of the Xuefeng Mountain[J]. *Geology in China*, 2012, 39(5): 1299-1309.
- [16] 李浩涵,宋腾,陈科,等.鄂西地区(秭地2井)震旦纪地层发现页岩气[J]. *中国地质*, 2017, 44(4): 812-813.
- LI Haohan, SONG Teng, CHEN Ke, et al. The discovery of shale gas from Sinian Formation at ZD-2 well in western Hubei[J]. *Geology in China*, 2017, 44(4): 812-813.
- [17] 翟刚毅,包书景,王玉芳,等.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*, 2017, 38(4): 441-447.
- ZHAI Gangyi, BAO Shujing, WANG Yufang, et al. Reservoir accumulation model at the edge of Palaeohigh and significant discovery of shale gas in Yichang Area, Hubei Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2017, 38(4): 441-447.
- [18] 翟刚毅,包书景,庞飞,等.武陵山复杂构造区古生界海相油气实现重大突破[J]. *地球学报*, 2016, 37(6): 657-662.
- ZHAI Gangyi, BAO Shujing, PANG Fei, et al. Breakthrough of the natural gas of Paleozoic Marine Strata in Wuling Mountain complex tectonic zone[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2016, 37

- (6): 657-662.
- [19] 翟刚毅,王玉芳,刘国恒,等.鄂西地区震旦系—寒武系页岩气成藏模式[J].地质力学学报,2020,26(5): 696-711.
ZHAI Gangyi, WANG Yufang, LIU Guoheng, et al. Accumulation model of the Sinian-Cambrian shale gas in western Hubei Province, China[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 696-711.
- [20] 李浩涵,陈科,包书景,等.鄂西黄陵背斜南翼震旦系陡山沱组有利目标区页岩气资源潜力评价.石油实验地质,2019,41(1):31-37.
LI Haohan, CHEN Ke, BAO Shujing, et al. Evaluation of shale gas resources of the Sinian Doushantuo Formation in the southern Huangling anticline, western Hubei Province[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1): 31-37.
- [21] 单长安,张廷山,郭军杰,等.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,2015,42(6):1944-1955.
SHAN Changan, ZHANG Tingshan, GUO Junjie, et al. Geological characteristics and resource potential of the Upper Sinian Doushantuo Formation shale gas in the north of middle Yangtze region[J]. Geology in China, 2015, 42(6): 1944-1955.
- [22] 李旭兵,陈绵琨,刘安,等.雪峰山西侧埃迪卡拉系陡山沱组页岩气成藏体系评价[J].石油实验地质,2014,36(2): 188-193.
LI Xubing, CHEN Miankun, LIU An, et al. Evaluation of accumulation system for shale gas of Doushantuo Formation in western Xuefeng Mountain[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(2): 188-193.
- (编辑 常燕)

(上接第159页)

- [16] 仰云峰,鲍芳,腾格尔,等.四川盆地不同成熟度下志留统龙马溪组页岩有机孔特征[J].石油实验地质,2020,42(3): 387-397.
YANG Yunfeng, BAO Fang, BORJIGIN Tenger, et al. Characteristics of organic matter-hosted pores in Lower Silurian Longmaxi shale with different maturities, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 387-397.
- [17] 熊德明,马万云,张明峰,等.干酪根类型及生烃潜力确定新方法[J].天然气地球科学,2014,25(6):898-905.
XIONG Deming, MA Wanyun, ZHANG Mingfeng, et al. New method for determination of kerogen type and the hydrocarbon potential[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(6): 898-905.
- [18] 李双建,肖开华,沃玉进,等.南海相上奥陶统一志留统优质烃源岩发育的控制因素[J].沉积学报,2008,26(5): 872-880.
LI Shuangjian, XIAO Kaihua, WO Yujin, et al. Developmental controlling factors of Upper Ordovician-Lower Silurian high quality source rocks in marian sequence, South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 872-880.
- [19] 马中良,申宝剑,潘安阳,等.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气成因与碳同位素倒转机制——来自热模拟实验的认识[J].石油实验地质,2020,42(3):428-433.
MA Zhongliang, SHEN Baojian, PAN Anyang, et al. Origin and carbon isotope reversal of shale gas in Wufeng-Longmaxi formations, Sichuan Basin: Implication from pyrolysis experiments[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(3): 428-433.
- [20] 王庆波,刘若冰,李春燕,等.四川盆地及周缘五峰—龙马溪组页岩气地质条件研究[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2012,14(5):17-21.
WANG Qingbo, LIU Ruobing, LI Chunyan, et al. Geologic condition of the Upper Ordovician-Lower Silurian shale gas in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2012, 14(5): 17-21.
- [21] 刘树根,王世玉,孙玮,等.四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组黑色页岩特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2013,40(6):621-639.
LIU Shugen, WANG Shiyu, SUN Wei, et al. Characteristics of black shale in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(6): 621-639.
- [22] 宋董军,妥进才,王晔桐,等.富有机质泥页岩纳米级孔隙结构特征研究进展[J].沉积学报,2019,37(6):1309-1324.
SONG Dongjun, TUO Jincai, WANG Yetong, et al. Research advances on characteristics of nanopore structure of organic-rich shales[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(6): 1309-1324.
- [23] 朱洪建,琚宜文,孙岩,等.构造变形作用下页岩孔隙结构演化特征及其模式——盆地及其周缘下古生界海相页岩为例[J].石油与天然气地质,2021,42(1):186-240.
ZHU Hongjian, JU Yiwen, SUN Yan, et al. Evolution characteristics and models of shale pores and fractures under tectonic deformation: A case study of the Lower Paleozoic marine shale in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 186-240.
- [24] 王玉杰,赵迪斐,卢琪荣,等.纹层、夹层沉积构造对海相页岩储集空间和储层脆性的影响——以四川盆地龙马溪组页岩为例[J].非常规油气,2020,7(6):33-40.
WANG Yujie, ZHAO Dipei, LU Qirong, et al. Impact of laminae and interlayer sedimentary structure on the storage and brittleness of shale reservoirs: Taking Longmaxi formation shale in Sichuan Basin as an example[J]. Unconventional Oil & Gas, 2020, 7(6): 33-40.
- (编辑 柳超超)