文章编号:1001-6112(2014)02-0188-06
doi:10.11781/sysydz201402188

雪峰山西侧埃迪卡拉系陡山沱组页岩气成藏体系评价

李旭兵[1],陈绵琨[2],刘 安[1],危 凯[1],王保忠[1]
(1.武汉地质矿产研究所,武汉 430205;
2.中国石化 江汉油田分公司 勘探开发研究院,武汉 430223)

摘要:页岩气是一个很有潜力的非常规油气勘探新领域,资源丰富,属于"持续式"聚集的非常规天然气。目前我国还没有大规模开展页岩气的资源评价。对雪峰山西侧地区埃迪卡拉系陡山沱组碳质页岩的厚度、总有机碳含量、有机质类型、成熟度、裂缝、孔隙度、渗透率、矿物组成、深度及烃源岩生烃强度等页岩气藏因素进行了研究分析。结合陡山沱组地层对比以及岩相古地理特征,利用页岩气"甜点"的评价体系,指出雪峰山西侧地区埃迪卡拉系陡山沱组页岩气的有利勘探区为桑植—石门复向斜及宜都鹤峰背斜区,可以作为雪峰山西侧地区页岩气的战略突破区。

关键词:页岩气;成藏体系;陡山沱组;埃迪卡拉系;雪峰山西侧
中图分类号:TE132.2 **文献标识码**:A

Evaluation of accumulation system for shale gas of Doushantuo Formation in western Xuefeng Mountain

Li Xubing[1], Chen Miankun[2], Liu An[1], Wei Kai[1], Wang Baozhong[1]
(1.*Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources*, *Wuhan*, *Hubei* 430205, *China*;
2.*Exploration and Production Research Institute of SINOPEC Jianghan Oilfield Company*, *Wuhan*, *Hubei* 430223, *China*)

Abstract: Shale gas is an unconventional resource with great exploration potential and continuous accumulation. At present, our country has not carried out large-scale shale gas resource evaluation. The accumulation factors such as TOC, organic matter type, maturity, crack, porosity, permeability, brittle mineral content, thickness and depth of shale, and hydrocarbon potentials are analyzed in this paper. Based on the study of stratigraphic correlation and paleogeographic characteristics of the Doushantuo Formation, and the key parameters for shale gas sweet spots, the results suggest that the Sangzhi-Shimen synclinorium and the Yidu Hefeng anticline zone are the most favorable areas for shale gas exploration which will become strategic breakthrough areas in the western Xuefeng Mountain.

Key words: shale gas; accumulation system; Doushantuo Formation; Ediacaran; western Xuefeng Mountain

1 研究概况

页岩气已经成为非常规天然气全球油气资源勘探开发的新亮点[1-2]。世界页岩气资源丰富,中国页岩气技术可采资源量位列世界前十名[2],具备页岩气大量发育的基础地质条件。初步计算中国页岩气资源量约为(15~30)×10^{12} m^3,平面上以中国南方和西北地区最为有利(也包括鄂尔多斯盆地及其周缘),剖面上以古生界资源量最大,中生界位居其次[3-4]。

前人的调查、研究、总结都显示中国南方下古生界是我国页岩气主要有利区[3-6]。中国南方页岩气资源在成藏机理上既具有吸附、游离、水溶等多重特征,又具有自生、自储、自保、储层致密的特点,在区域上形成连续性大、丰度低的非常规天然气聚集区带[7-12]。

雪峰山西侧地区,现今处于中上扬子地块东部边缘与雪峰山基底拆离造山带之间,属于雪峰山前缘向四川盆地主体过渡的区域。自东向西依次为桑植石门复向斜、宜都鹤峰复背斜、花果坪复向斜、中央背斜带、利川复向斜、齐岳山背斜和石柱复向斜。埃迪卡拉系陡山沱组碳质页岩的厚度相对较

收稿日期:2012-10-10;修订日期:2014-01-06。
作者简介:李旭兵(1974—),男,副研究员,从事油气地质及地层古生物研究。E-mail: yclxubing@163.com。
基金项目:中国地质调查局项目"桑植—石门及邻区油气地质综合调查及地层对比研究"(1212011220745)资助。

大,最大厚度为 300 m,分布广泛。2009 年 9 月 23 日,在宜昌—秭归陶家溪隧道中,陡山沱组页岩气被电焊火星点燃,焰高 30~40 cm。再次表明在雪峰山西侧地区埃迪卡拉系陡山沱组具备页岩气藏发育的条件,并具有一定的研究价值。笔者利用页岩气"甜点"的评价体系[13],通过对雪峰山西侧地区埃迪卡拉系陡山沱组碳质页岩的厚度、总有机碳含量、有机质类型、成熟度、裂缝、孔隙度、渗透率、矿物组成、深度及烃源岩生烃强度等页岩气藏发育有利区的参数进行研究分析,结合陡山沱组地层对比及岩相古地理特征,分析了埃迪卡拉系陡山沱组碳质页岩的分布、厚度、总有机碳含量等参数与沉积环境的关系,指出页岩气的有利勘探区。

2　页岩气成藏控制因素

尽管页岩具有吸附作用机理和自生自储的特点,二次运移不是页岩气成藏的主要影响因素和分布预测的主要研究内容,但页岩气分布的隐蔽性特点不可忽视;另外,页岩发育厚度、有机碳含量、有机质丰度、孔隙度、渗透率、裂缝发育程度、古构造配合以及后期保存条件等,均是影响页岩含气量、天然气赋存状态及是否具备工业勘探开发价值评价的重要因素[14]。而有机质类型和含量、成熟度、裂缝及孔隙度和渗透率是控制页岩气成藏的主要因素[3]。

2.1　碳质页岩的分布特征

本文以秭归黄牛岩、湖南慈利溪口、湖南石门中岭、湖北鹤峰白果坪、湖南张家界田坪、湖南张家界大坪以及湖南安化大福等埃迪卡拉系陡山沱组实测地层剖面为主要研究对象,开展了雪峰山西侧地区陡山沱组台地相区—斜坡相区—盆地相区的地层划分和对比研究(图 1)。

通过地层对比研究,笔者认为陡山沱组碳质页岩主要分布在陡山沱组二段以及四段,重点在其二段地层中,并且厚度存在相当大的差别。最大厚度达到 300 m,分布在湖北鹤峰白果坪一带,为台盆相沉积(图 2a)。并以鹤峰白果坪为中心,厚度向外围递减。在白果坪以西的湖北恩施一带,厚度变为 50 m,到湖北咸丰一带厚度仅为 10 m 左右;在白果坪以东的湖北宜昌一带,厚度变为 50 m,到湖北宜都一带厚度亦仅为 10 m 左右。说明在雪峰山西侧地区,埃迪卡拉系陡山沱组碳质页岩的分布受控于沉积环境,其最大厚度为 300 m,并向外围递减(图 2b)。

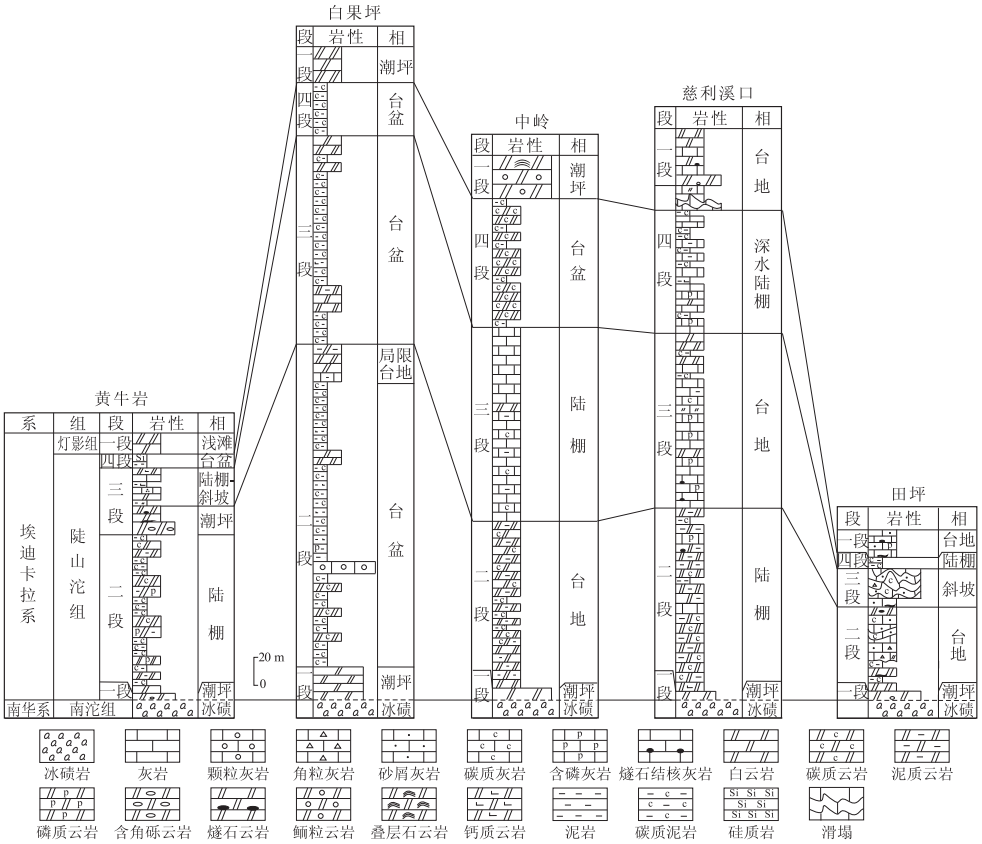
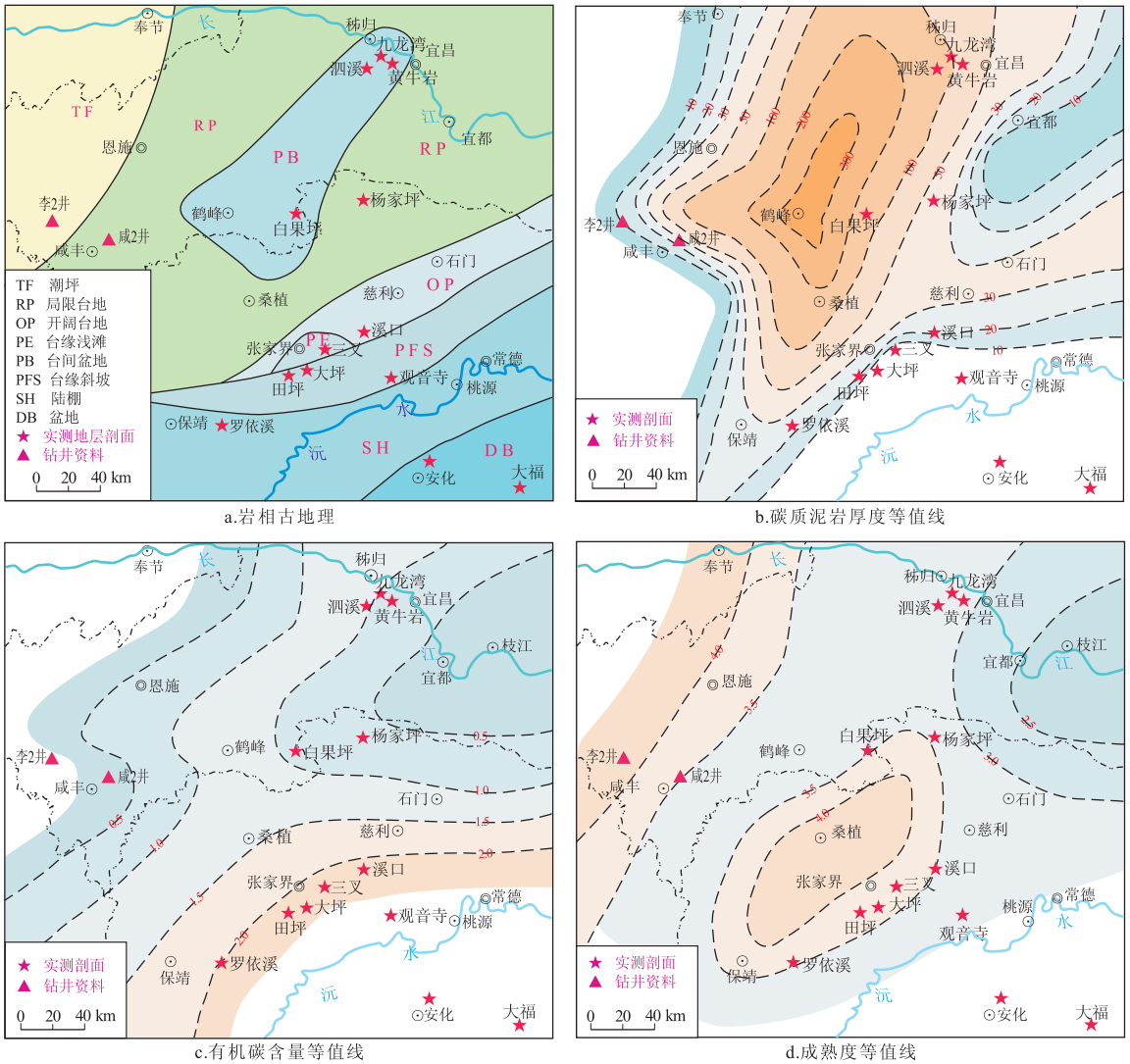


图 1　雪峰山西侧陡山沱组地层层序对比

Fig.1　Comparison of sequence stratigraphy of Doushantuo Formation in western Xuefeng Mountain



a.岩相古地理　　b.碳质泥岩厚度等值线

c.有机碳含量等值线　　d.成熟度等值线

图 2　雪峰山西侧陡山沱组黑色页岩特征

Fig.2　Characteristics of black shales of Doushantuo Formation in western Xuefeng Mountain

2.2　有机质类型及含量

有机碳含量和热成熟度是决定页岩产气能力的重要变量[5,15]，产气页岩的有机碳含量（平均）下限值大约为 2%[16]，获得一个有经济价值的勘探目标，有机碳下限值为 2.5%～3%[17]。

在湖北鹤峰白果坪一带，陡山沱组有机碳含量为 0.55%～2.14%，平均为 1.14%；永顺王村有机碳含量为 1.31%～2.23%，平均为 1.63%；宜昌花鸡坡剖面有机碳含量为 0.51%～1.79%，平均为 1.09%。从平面分布看，泥页岩有机碳含量一般为 1.0%～2.0%，高值区分布在台缘斜坡—台盆过渡带（图 2c）。

陡山沱组烃源岩中干酪根显微组分以富含腐泥组及壳质组的组分为主体，体现了腐泥 I 型或腐植腐泥 II_1 型的母质特征。

2.3　成熟度

根据页岩成熟度可将页岩气藏分为对应的 3 种类型：高成熟度页岩气藏、低成熟度页岩气藏以及高低成熟度混合页岩气藏[5]。陡山沱组烃源岩总体演化程度较高，成熟度普遍大于 2.0%，一般为 3.0%～3.5%，主体处于过成熟阶段。受黄陵隆起影响，其周缘地区相对稍低，R_o 值介于 2.0%～2.5%之间，部分小于 2.0%。相对高值区集中于湘鄂西恩施、桑植一带（图 2d），为高成熟度页岩气藏。美国阿巴拉契亚盆地页岩成熟度的变化范围为 0.5%～4.0%[12]，在西弗吉尼亚州南部最高可达 4.0%，且只有在成熟度较高的区域才有页岩气产出[18]。由此可见，在雪峰山西侧地区埃迪卡拉系陡山沱组碳质页岩的成熟度大于 2%，不是制约页岩气成藏的主要因素，相反，成熟度越高越有利于页岩气成藏。

2.4　裂缝、孔隙度与渗透率

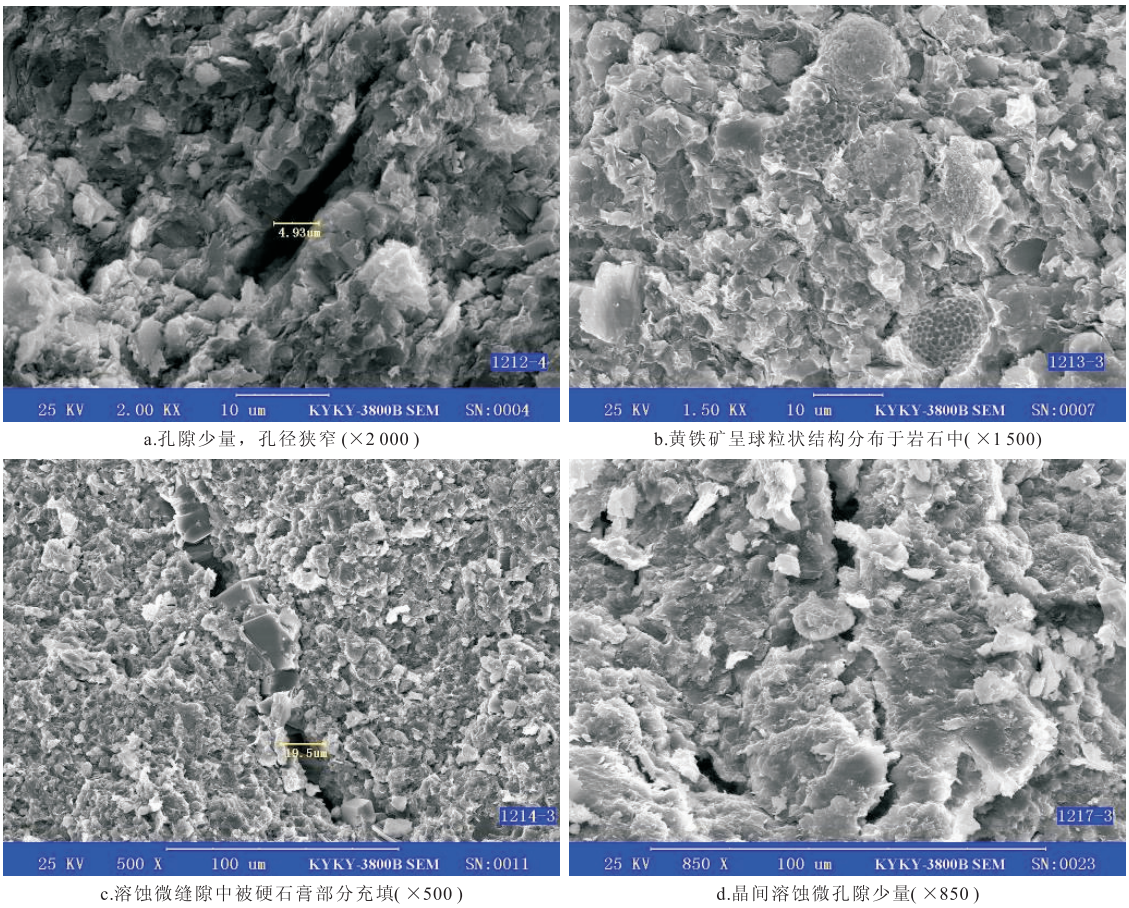
陡山沱组泥页岩具有较低的基质孔隙度，一般为 0.61%～6%，孔隙以粒间孔为主，发育少量粒内

孔和溶蚀孔。黄牛岩陡山沱组地层见微裂缝和溶蚀孔发育,含黄铁矿。

宜昌黄牛岩剖面扫描电镜分析显示,陡山沱组底部灰黑色碳质泥页岩中孔隙不发育,面孔率小,孔径狭窄(图 3a),泥晶白云石、弯曲状泥质相互混杂,陆源碎屑颗粒少,绢云母片少,黄铁矿呈球粒状结构分布于岩石中(图 3b)。陡山沱组下部深灰色含碳泥岩中粒间孔隙不发育,岩石面孔率小,溶蚀孔隙孤立分布,溶蚀微缝隙中被硬石膏部分充填(图 3c)。中部含碳泥岩陆源碎屑颗粒等少量,岩石孔隙不发育,面孔率小。泥质呈片状结构,充填或覆盖于晶粒表面,晶间溶蚀微孔隙少量(图 3d)。

2.5　矿物组成

埃迪卡拉系陡山沱组二段和四段黑色岩系多含白云质,二段以泥质白云岩为主,因此矿物组成具有脆性矿物含量高、黏土矿物含量低的特点。据宜昌黄牛岩剖面陡山沱二段 16 块样品 X 衍射,其中石英 11.5%~31.0%/24.6%、长石 1.1%~8.5%/4.0%、碳酸盐岩 53.7%~78.7%/65.1%、黄铁矿 0.5%~5.8/1.8、菱铁矿 0.4%~1.2%/0.8%,黏土含量为 2.0%~8.0%/4.41%。在峡东黄山洞剖面陡山沱组黏土矿物含量较高,达到 23.07%,张家界大坪剖面陡山沱组黏土矿物也只有 10.95%(表 1)。长英质和碳酸盐等脆性矿物含量高有利于压裂改造。黏土矿物组成以伊利石为主,次为伊/蒙间层,高岭石和绿泥石的含



a.孔隙少量,孔径狭窄(×2 000)　　b.黄铁矿呈球粒状结构分布于岩石中(×1 500)

c.溶蚀微缝隙中被硬石膏部分充填(×500)　　d.晶间溶蚀微孔隙少量(×850)

图 3　雪峰山西侧陡山沱组泥页岩典型显微照片

Fig.3　Typical microphotographs of shales of Doushantuo Formation in western Xuefeng Mountain

表 1　雪峰山西侧陡山沱组泥岩类黏土矿物含量统计

Table 1　Clay mineral content of shales of Doushantuo Formation in western Xuefeng Mountain

剖面	层位	样品数量	黏土矿物含量/%					
			黏土总量	伊/蒙间层		伊利石	高岭石	绿泥石
				含量	间层比			
张家界大坪	陡山沱组	3	10.95	2.77	10	4.51		
峡东黄山洞	陡山沱组	3	23.07	9.32	23	10.77	1.43	3.04

量很低。黏土矿物组成不仅反映了陡山沱组烃源岩高演化程度的特征,以伊利石为主的黏土矿物也有利于形成吸附气[19],有利于成熟阶段生产页岩气的保存。

2.6 埋深

埃迪卡拉系陡山沱组在研究区出露较少,主要分布在鄂西黄陵穹窿周边、东山峰—走马带,南部桑植—石门复向斜以南则分布广泛。现今埋藏深度主要受到燕山运动(165~95 Ma)陆内递进变形的影响,剥蚀作用由南东向北西推进[20],复背斜的剥蚀强度要明显大于向斜的剥蚀强度。桑植—石门复向斜核部陡山沱组在晚三叠—早侏罗世的最大埋深近万米,现今的最大埋深仍超过 6 000 m,两翼多出露志留—二叠系地层,埋深减小至 4 000~5 000 m。宜都—鹤峰复背斜多出露寒武系—下志留统地层,陡山沱组埋深多在 2 000~3 000 m(图 4)。因此,雪峰山西侧陡山沱组页岩气勘探有利区域主要分布在桑植—石门复向斜两翼及宜都—鹤峰复背斜。

2.7 生烃强度及含气量

生烃强度是表征烃源岩母质生油气潜力的一个重要标志。前人已经通过实验做过这方面的研究[21],并对中下扬子中—古生界烃源岩进行过系统评价[22]。研究显示,烃源岩母质类型好,烃类降解率高,生烃强度大,形成油气藏的排给效率也就高。陡山沱组烃源岩在湘鄂西区较发育,主力生烃在加里东期,尤以湾潭周边生烃强度最大,阶段生烃强度为 49.87×10^8 m^3/km^2,排烃强度为 37.69×10^8 m^3/km^2。海西—早印支期,湘鄂西区阶段生排烃强度较低,多数地区在 $(10\sim20)\times10^8$ m^3/km^2。湘鄂西区以泥质烃源岩占绝对优势,尤以鹤峰—桑植—湾潭区域生烃强度最大,高效烃源灶主要集中在此区域,属于有利生烃区。

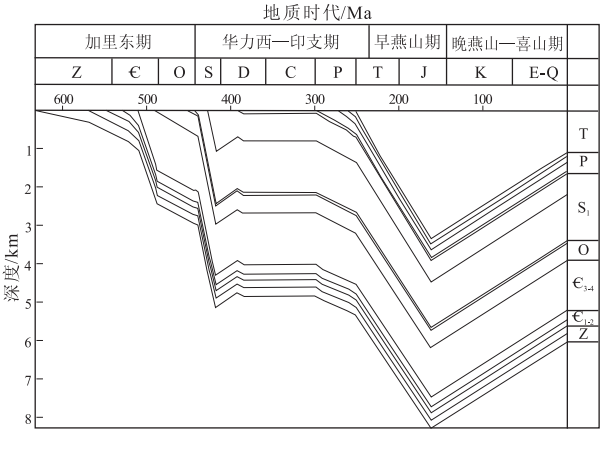


图 4 雪峰山西侧桑植—石门复向斜埋藏史

Fig.4 Burial history of Sangzhi - Shimen synclinorium in western Xueferg Mountain

2009 年 9 月 23 日,在宜昌—秭归陶家溪隧道中,陡山沱组页岩气被电焊火星点燃,焰高 30~40 cm。之后保持 24 h 不间断以 8.2×10^4 m^3/h 送风量通风,6 d 后仍燃烧。直到 10 月 11 日火焰完全熄灭(在人为通风条件下熄灭),共 18 d。中国石化宜 10 井,在陡山沱组 961~986 m 和 1 150~1 222 m,见 2 层气测异常;咸 2 井在陡山沱组 1 160~1 219 m,见 1 层气测异常。表明在雪峰山西侧地区埃迪卡拉系陡山沱组具备页岩气藏发育的条件,并具有一定的研究价值。

3 结论

(1)雪峰山西侧地区埃迪卡拉系陡山沱组碳质页岩的分布、厚度以及有机碳含量与沉积环境存在较大关系。碳质页岩主要分布在陡山沱组二段以及四段,重点在其二段地层中,并且厚度存在相当大的差别。最大厚度达到 300 m,分布在湖北鹤峰白果坪一带,为台盆相沉积。并以鹤峰白果坪为中心,厚度向外围递减。

(2)在台缘斜坡—台盆过渡带(湖南桑植—张家界一带),陡山沱组有机碳含量较大,为 0.55%~2.23%,平均有机碳含量 1.40%。干酪根显微组分以富含腐泥组及壳质组的组分为主体,体现了腐泥Ⅰ型或腐植腐泥Ⅱ$_1$型的母质特征。总体演化程度较高,成熟度普遍较高,普遍大于 2.0。成熟度、有机碳含量在湘西张家界—桑植一带相对较高,是形成页岩气藏的良好参数。

(3)陡山沱组泥页岩具有较低的基质孔隙度,孔隙以粒间孔为主,发育少量粒内孔和溶蚀孔。见微裂缝和溶蚀孔发育,含黄铁矿。

(4)雪峰山西侧地区埃迪卡拉系陡山沱组页岩气的有利勘探区为桑植—石门复向斜及宜都鹤峰背斜区。

参考文献:

[1] 张大伟.加速我国页岩气资源调查和勘探开发战略构想[J].石油与天然气地质,2010,31(2):135-139,150.
Zhang Dawei.Strategic concepts of accelerating the survey,exploration and exploitation of shale gas resources in China[J].Oil & Gas Geology,2010,31(2):135-139,150.

[2] 周庆凡.世界页岩气资源量最新评价[J].石油与天然气地质,2011,32(4):614.
Zhou Qingfan.The latest assessment of shale gas resources in the world[J].Oil & Gas Geology,2011,32(4):614.

[3] 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.Exploration potential of shale gas resources in china[J].Natural Gas Industry,2008,28(6):136-140.

[4] 杨镱婷,张金川,王香增,等.陆相页岩气的泥页岩评价:以延长下寺湾区上三叠统延长组长 7 段为例[J].东北石油大学学报,2012,36(4):10-17.
Yang Yiting,Zhang Jinchuan,Wang Xiangzeng,et al.Source rock evaluation of continental shale gas:A case study of Chang 7 of Mesozoic Yanchang Formation in Xiasiwan area of Yanchang[J].Journal of Northeast Petroleum University,2012,36(4):10-17.

[5] 聂海宽,唐玄,边瑞康.页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J].石油学报,2009,30(4):484-491.
Nie Haikuan,Tang Xuan,Bian Ruikang.Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J].Acta Petrolei Sinica,2009,30(4):484-491.

[6] 董大忠,程克明,王玉,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):288-299.
Dong Dazhong,Cheng Keming,Wang Yu,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):288-299.

[7] 董大忠,程克明,王世谦,等.页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用[J].天然气工业,2009,29(5):33-39.
Dong Dazhong,Cheng Keming,Wang Shiqian,et al.An evaluation method of shale gas resource and its application in the Sichuan basin[J].Natural Gas Industry,2009,29(5):33-39.

[8] 刘成林,葛岩,范柏江.页岩气成藏模式研究[J].油气地质与采收率,2010,17(5):1-5.
Liu Chenglin,Ge Yan,Fan Bojiang.Study on shale gas accumulation mode[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2010,17(5):1-5.

[9] 范昌育,王震亮.页岩气富集与高产的地质因素和过程[J].石油实验地质,2010,32(5):465-469.
Fan Changyu,Wang Zhenliang.Geological factors and process in enrichment and high production of shale gas[J].Petroleum Geology & Experiment,2010,32(5):465-469.

[10] 范柏江,师良,庞雄奇.页岩气成藏特点及勘探选区条件[J].油气地质与采收率,2011,18(6):9-13.
Fan Bojiang,Shi Liang,Pang Xiongqi.Shale gas reservoir characteristics and exploration constituency conditions[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2011,18(6):9-13.

[11] 聂海宽,张金川.页岩气藏分布地质规律与特征[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(2):700-708.
Nie Haikuan,Zhang Jinchuan.Shale gas reservoir distribution geological law,characteristics and suggestions[J].Journal of Central South University:Science and Technology,2010,41(2):700-708.

[12] 梁超,姜在兴,郭岭,等.黔北地区下寒武统黑色页岩沉积特征及页岩气意义[J].断块油气田,2012,19(1):22-26.
Liang Chao,Jiang Zaixing,Guo Ling,et al.Sedimentary characteristics and shale gas significance of Lower Cambrian black shale in Qianbei Area[J].Fault-Block Oil and Gas Field,2012,19(1):22-26.

[13] 周德华,焦方正.页岩气"甜点"评价与预测:以四川盆地建南地区侏罗系为例[J].石油实验地质,2012,34(2):109-114.
Zhou Dehua,Jiao Fangzheng.Evaluation and prediction of shale gas sweet spots:A case study in Jurassic of Jiannan area,Sichuan Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2012,34(2):109-114.

[14] 闫剑飞,余谦,刘伟,等.中上扬子地区下古生界页岩气资源前景分析[J].沉积与特提斯地质,2010,30(3):96-103.
Yan Jianfei,Yu Qian,Liu Wei,et al.Perspectives of the Lower Palaeozoic shale gas resources in the middle-upper Yangtze area[J].Sedimentary Geology and Tethyangeology,2010,30(3):96-103.

[15] Jarvie D M,Hill R J,Pollastro R M,et al.Evaluation of unconventional natural gas prospects,the Barnett Shale fractured shale gas model[C]//European Association of International Organic Geochemists Meeting.Poland:Krakow,2003.

[16] Schmoker J W.Determination of organic-matter content of Appalachian Devonian shales from gamma-ray logs[J].AAPG Bulletin,1981,65(7):1285-1298.

[17] Bowker K A.Barnett Shale gas production,Fort Worth Basin:Issues and discussion[J].AAPG Bulletin,2007,91(4):523-533.

[18] Milici R C,Swezey C S.Assessment of Appalachian Basin oil and gas resources:Devonian Shale-Middle and Upper Paleozoic total petroleum system[M/OL].Denver:USGS Information Services,2006[2008-09-18]. http://teamfrack.pbworks.com/w/file/fetch/48486328/of2006-1237_milici%20swezey.pdf

[19] 张雪芬,陆现彩,张林晔,等.页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义[J].地球科学进展,2010,25(6):597-604.
Zhang Xuefen,Lu Xiancai,Zhang Linye,et al.Occurrences of shale gas and their petroleum geological significance[J].Advances in Earth Science,2010,25(6):597-604.

[20] 梅廉夫,刘昭茜,汤济广,等.湘鄂西—川东中生代陆内递进扩展变形:来自裂变径迹和平衡剖面的证据[J].地球科学:中国地质大学学报,2010,35(2):161-174.
Mei Lianfu,Liu Zhaoqian,Tang Jiguang,et al.Mesozoic intra-continental progressive deformation in Western Hunan-Hubei-Eastern Sichuan provinces of China:Evidence from apatite fission track and balanced cross-section[J].Earth Science:Journal of China University of Geosciences,2010,35(2):161-174.

[21] 李术元,郭绍辉,徐红喜,等.烃源岩热解生烃动力学及其应用[J].沉积学报,1997,15(2):138-141.
Li Shuyuan,Guo Shaohui,Xu Hongxi,et al.Source rock pyrolysis kinetics of hydrocarbon and its application[J].Acta Sedimentologica Sinica,1997,15(2):138-141.

[22] 高林,周雁.中下扬子区海相中—古生界烃源岩评价与潜力分析[J].油气地质与采收率,2009,16(3):30-33.
Gao Lin,Zhou Yan.Evaluation and potential analysis on source rocks in Mesozoic and Paleozoic marine sequence,middle-lower Yangtze area[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2009,16(3):30-33.

(编辑　韩　彧)