

湘鄂西区寒武系层序划分及其对油气勘探的意义

王必金,包汉勇,郭战峰,陈绵琨

(中国石油化工股份有限公司 江汉油田分公司,武汉 430223)

摘要:通过对湘鄂西区寒武系大量露头 and 钻井剖面的系统分析及对寒武系主要储层样品和下部暗色泥页岩样品的分析测试,认为湘鄂西区寒武系可划分为6个三级层序,其层序界面主要为不整合面和岩性转换面;鲕粒云岩/灰岩是寒武系物性最好的储集岩,其主要分布于SQ5的海侵体系域,另外在SQ4和SQ5的高位体系域也有少量发育;寒武系下部暗色泥页岩中有机碳含量相差悬殊,丰度较高的暗色泥页岩主要分布于SQ1高位体系域,之上的泥页岩有机质丰度均较低。发育了较厚鲕粒云岩/灰岩的SQ5海侵体系域是常规油气勘探的主要目的层,而有机碳含量较高的SQ1高位体系域为页岩气勘探的主要目的层。

关键词:层序地层;储层;页岩气;寒武系;湘鄂西

中图分类号:TE121.3⁺4

文献标识码:A

Sequence stratigraphic division of Cambrian in western Hunan-Hubei and applications for petroleum exploration

Wang Bijin, Bao Hanyong, Guo Zhanfeng, Chen Miankun

(SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract: The systematic analyses of outcrops and drilling profiles and the tests of reservoir samples and dark mudstones from Cambrian in the western Hunan-Hubei indicate that the Cambrian in the study area can be divided into 6 third-order sequences, and the sequence boundaries are mainly unconformity surfaces and lithologic transitional surfaces. Oolitic limestones/dolomites are the most favorable reservoirs in Cambrian. They mainly distribute in the transgressive system tract of sequence 5, and a few of them locate in the highstand system tract of sequences 4 and 5. The content of total organic carbon (TOC) varies obviously among dark mudstones in the Lower Cambrian. The dark mudstones rich in TOC distribute in the highstand system tract of sequences 1, while those in the upper formation have lower TOC content. The transgressive system tract of sequence 5 which develops thick oolitic limestones/dolomites is the main target for normal exploration. The highstand system tract of sequences 1 which has higher TOC content is the main target for shale gas exploration.

Key words: sequence stratigraphy; reservoir; shale gas; Cambrian; western Hunan-Hubei

近年来,随着页岩气勘探理论的逐步完善^[1-5]及水平压裂等开发技术的重大突破^[6-8],页岩气勘探已成为我国油气地质界研究的热点,发育了巨厚暗色泥页岩的湘鄂西区寒武系被认为是我国南海相页岩气勘探最有利的层系之一^[9-10],但对于其垂向上具体的展布规律还未见报道。另外,对于湘鄂西区常规油气的勘探,尽管前人从基本油气地质特征^[11]、古油气藏解剖^[12-13]等多个方面也作了大量的研究,但长期以来因受地腹构造及储层发育和展布特征认识不清等因素的影响,湘鄂西区常规油气的勘探尚未取得实质性的突破。为此,本文试图通过对湘鄂西区寒武系层序地层研究,结合寒武系

下部暗色泥页岩有机碳的测试及常规油气储层样品物性分析,了解层序地层发育特点和规律,从而探讨湘鄂西区寒武系页岩气及常规油气勘探最为有利的层段。

1 研究区概况

湘鄂西区处于扬子板块中部,南东以慈利—保靖断裂与江南隆起相邻,北西以建始—彭水断裂与鄂西渝东区接壤,东至宜昌—临澧一带,北抵巫山,依据构造形变特征可将其分为中央复背斜、花果坪复向斜、宜都—鹤峰复背斜和桑植—石门复向斜4个次一级的构造单元(图1)。

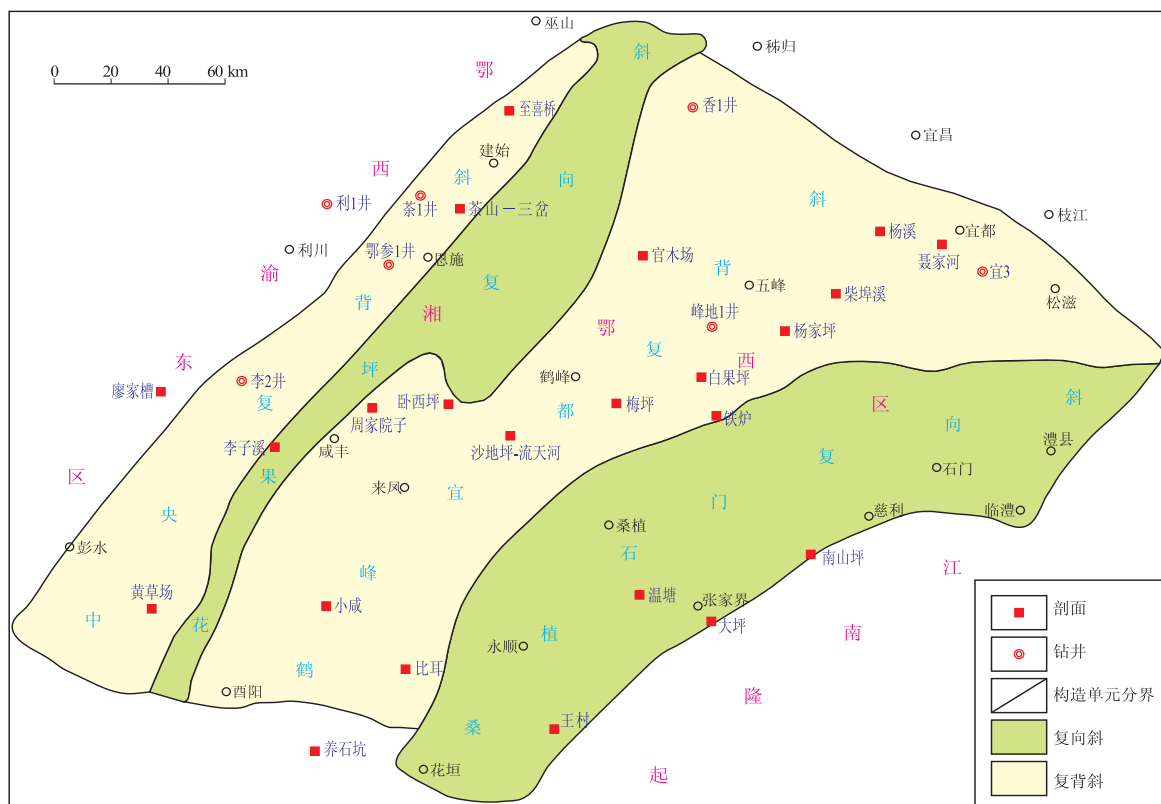


图1 湘鄂西区构造区划及寒武系重要剖面

Fig. 1 Main sections of Cambrian and structural units in western Hunan-Hubei

2 层序格架的建立

2.1 层序划分的标准

本次研究的地层年代参考了国际地层委员会2013年公布的标准,将寒武系划分为四统十阶。4个统分别为:纽芬兰统、第二统、第三统和芙蓉统,其中,湘鄂西区寒武系最下部的纽芬兰统并不十分发育,区域上多小于5 m,因而相较于总厚度达千米的寒武系而言,层序的划分更多考虑的是第二统至芙蓉统,这样时间跨度上从下部纽芬兰统顶(521 Ma)至芙蓉统顶(485.4±1.9 Ma),共经历了约36 Ma。作者将寒武系共划分为6个层序,这样从时间跨度的角度来讲,每个层序经历了约6 Ma,应属于三级层序范畴。此外,本次层序划分时,因主要依据大量的野外露头剖面,因而层序划分重点考虑了野外露头尺度的横向可比性。

2.2 层序界面特征与识别

层序地层的划分关键之一是识别出具体的层序界面,以此界面将上下新老地层分开,使其具有年代地层学的意义,便于全区建立等时界面和对比。本次研究证实湘鄂西区主要的层序界面可大体分为不整合面和岩性岩相转换面。其中不整合面主要出现在寒武系SQ1与下伏震旦系(伊迪卡

拉系)交汇处(图2A),在鹤峰白果坪剖面寒武系底部发育了一套含铁铝质结壳的风化粘土层,证实经历了较长时间的沉积暴露,此界面全区发育,因而可以作为层序划分的等时界面。而其它的层序界面在研究区都为岩性岩相突变面(图2B),这种岩性岩相的差异,大多也指示了区域上沉积构造背景发生了重要转化,因而也可以沿此界面开展全区层序地层的等时划分。

2.3 层序地层划分

为了能够全面地反映出桑植—石门复向斜及其邻区各层序的具体变化特征,并使得划分的层序便于区域对比,本次研究共参考了30条野外露头和钻井剖面(图1)。在此选取了一些较具代表性的剖面,对纽芬兰统—第二统以及第三统—芙蓉统进行层序对比分析。

该区震旦系沉积结束后,区域上发生了大范围的构造抬升(常称之为桐湾运动),导致在寒武系下部发育了一套粘土质风化壳(图2A),出现了明显的沉积间断,这个间断面可全区对比,这也是SQ1与下伏地层的层序界面。之后发生了大规模的海侵,发育了以深水陆棚—盆地相为主的SQ1海侵体系域(TST)。区域上寒武系底部的纽芬兰统多以薄层的硅质页岩为主,如王村剖面,但有

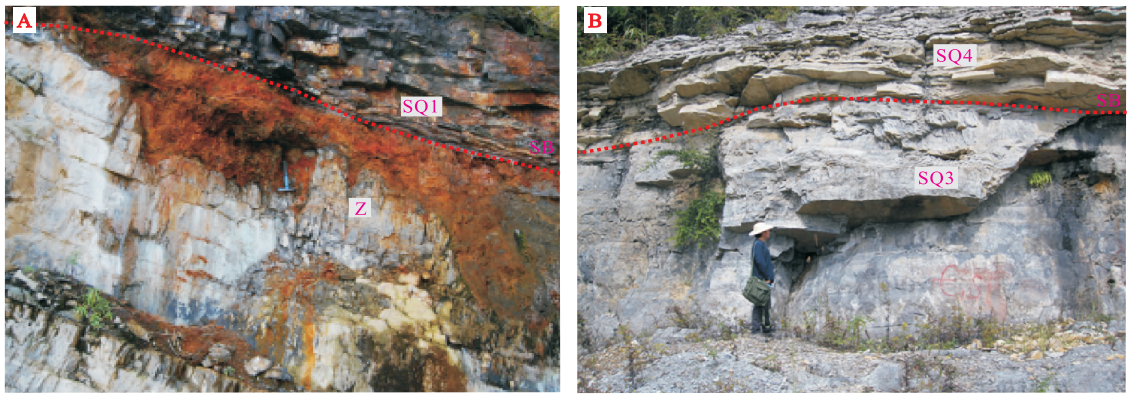


图2 湘鄂西区主要的层序界面类型

Fig. 2 Main boundaries of sequence in western Hunan-Hubei

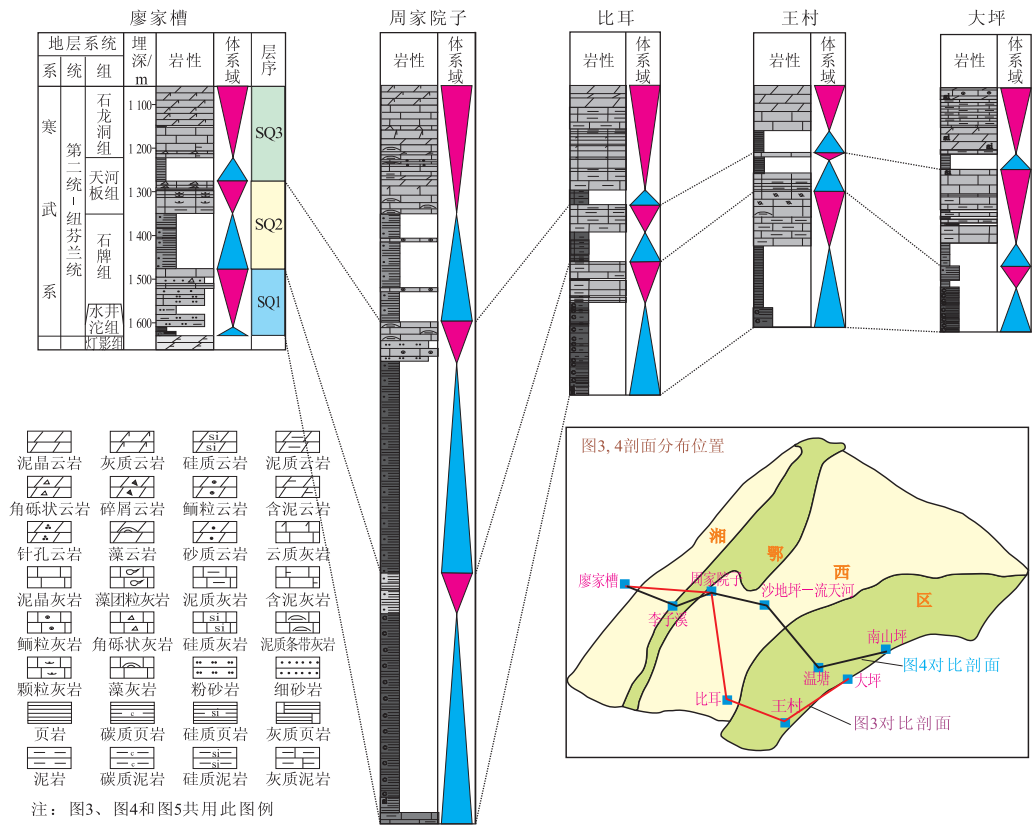


图3 湘鄂西区寒武系纽芬兰统一第二统层序对比

Fig. 3 Sequence comparison of the Terenevian and the Series 2 of Cambrian in western Hunan-Hubei

些剖面如廖家槽中这套硅质岩并不十分发育。随着相对海平面继续上升,在多个区域都可见到牛蹄塘组/水井沱组发育了一套暗色富碳质、硅质页岩,之后进入到杷榔组/石碑组等,相对海平面开始下降,区域上发育了SQ1的高位体系域(HST),多为一套深水—浅水陆棚相的沉积。

SQ2与下伏SQ1之间没有出现明显的沉积暴露,其层序界面主要为岩性转换面。如廖家槽剖面就由SQ1高位域的灰岩变为SQ2海侵域的砂质页岩。SQ2海侵体系域(TST)发育时,水体较SQ1高

位域有了一定程度的加深,但其沉积环境仍较SQ1海侵域时要浅(图3),多为以粉砂质泥、页岩为主的深水陆棚环境,较为特别的是位于研究区西部的利1井—廖家槽一带以及东部秭归—宜昌一带水体要略浅些,多为浅水陆棚环境。而在SQ2高位域时,区域上除南缘的王村一带外,大部分区域均变为碳酸盐岩浅—内缓坡环境。

SQ3与下伏SQ2之间也不存在明显的沉积暴露面,其层序界面也为岩性岩相转换面,区域上大多数剖面都由灰岩、泥灰岩突变为灰质泥岩或灰质

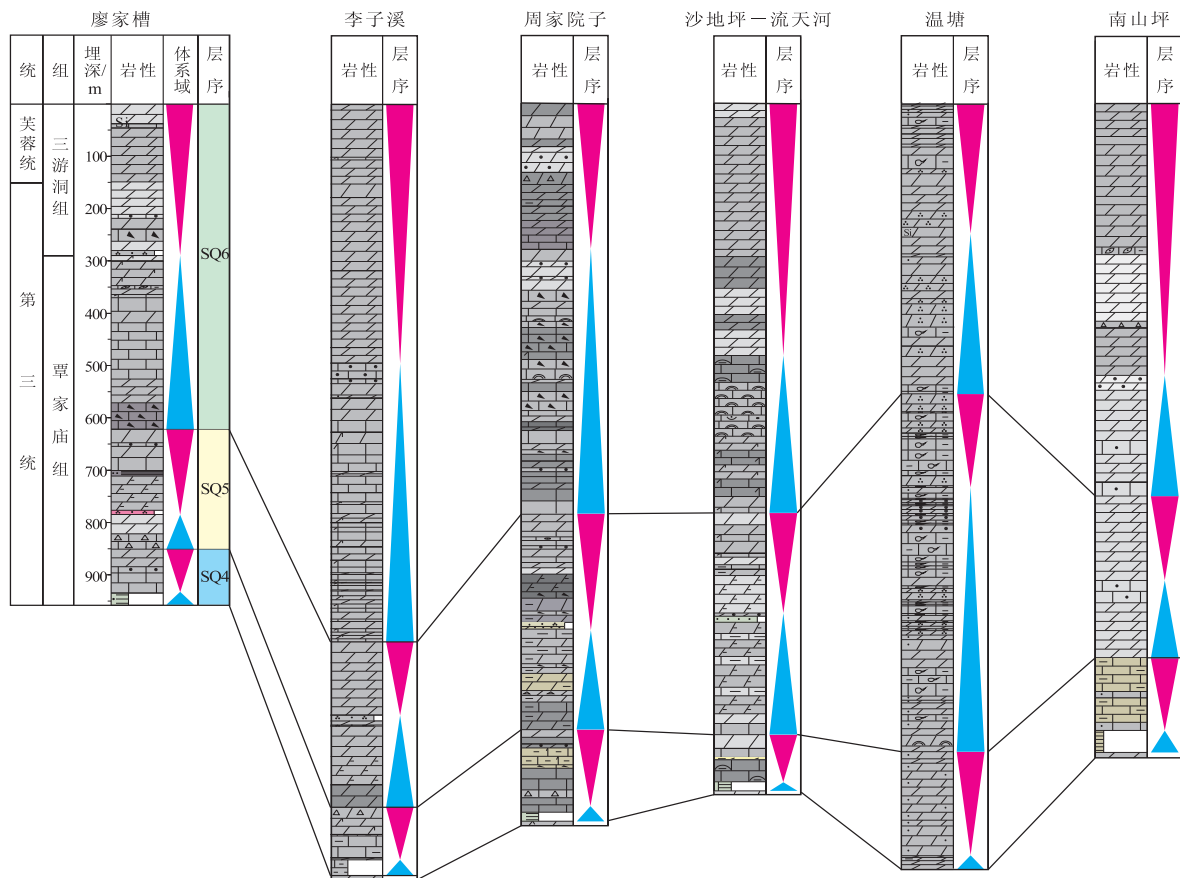


图4 湘鄂西区寒武系第三统一芙蓉统层序对比

Fig.4 Sequence comparison of the Series 3 and the Furongian of Cambrian in western Hunan-Hubei

页岩。沉积环境也多由 SQ2 高位域时的浅—内缓坡变为深—浅缓坡。SQ3 高位域发育时,相对海平面较 SQ3 海侵域明显变浅(图3),剖面多为一套以碳酸盐岩台地边缘—台地环境为主的灰岩或是灰质白云岩。

SQ4 与下伏 SQ3 之间依旧不存在明显的沉积间断面,其层序界面也主要为岩性转换面(图2B)。在 SQ4 海侵域发育时,多个剖面显示沉积了一套以开阔台地滩间海亚相环境为主的灰质页岩或页岩夹灰岩,厚度较小,多小于 20 m,大体相当于通常所说的高台页岩。而高位域时相对海平面有了进一步的下降,但研究区除南部的永顺王村—慈利南山坪一带为台地边缘—台前斜坡的沉积环境外,其它大部分区域均以开阔—局限台地的沉积环境为主。

SQ5 与下伏 SQ4 之间以及 SQ6 与下伏 SQ5 之间的层序界面也为岩性转换面。但这 2 个层序发育时有着较为相似的沉积特征,即除南部的王村一大坪一带还依旧处于台地边缘的环境外,研究区其它大部分区域都为碳酸盐岩台地。并且相对海平面变化也不大,其沉积环境在海侵体系域时多由局

限台地变为开阔台地的环境,而在高位体系域时则因相对海平面的变浅,由开阔台地变为局限台地。王村剖面 SQ5 及 SQ6 海侵体系域发育时一直处于台前斜坡的环境,直至 SQ6 晚期 HST 时,才处于台地边缘滩的环境,这一特征明显区别于其它区域。

3 层序对常规油气储层的控制

对于湘鄂西及其邻区的储层岩性的描述,学者们给予了较多关注^[12,14-15],可大体归为:针孔云岩、晶洞云岩、鲕粒云岩/灰岩和粉晶云岩。为此,本次研究针对这 4 类岩性进行了取样测试(表 1),以分析这 4 类岩性储集物性的好坏。

其中,鹤峰铁炉剖面下部的 TL-58-W1、宜昌兆吉坪剖面石龙洞组上部的 ZJP-SL-WX-1 及彭水万宝剖面的 WB-WX-1 样品均为针孔云岩,可以看出其孔隙度介于 3.4%~9.6%之间,渗透率区间值在 $(0.071 \sim 2.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;鹤峰五里剖面的 WL-WX-1 和 WL-WX-2 样品都取自石龙洞组顶部的晶洞云岩中,其孔隙度分别为 4.0% 和 3.4%,渗透率分别为 $0.084 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.081 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;另外取自张家界温塘剖面的 4 个鲕粒云岩孔隙度也

表1 湘鄂西区寒武系储层物性特征

Table 1 Physical property of Cambrian reservoir in western Hunan-Hubei

序号	剖面	样品编号	岩性	层位	孔隙度/%	渗透率/ ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
1	鹤峰铁炉	TL-1-W1	粉晶云岩	第三统—芙蓉统	0.39	0.081
2		TL-5-W1	粉晶云岩	第三统—芙蓉统	0.37	0.183
3		TL-7-W1	粉晶灰岩	第三统—芙蓉统	0.07	0.065
4		TL-10-W1	粉晶云岩	第三统—芙蓉统	0.33	0.055
5		TL-32-W1	粉晶云岩	第三统—芙蓉统	0.65	8.210
6		TL-58-W1	针孔云岩	第三统—芙蓉统	4.00	0.084
7	鹤峰五里	WL-WX-1	晶洞云岩	第二统上部	3.40	0.081
8		WL-WX-2	晶洞云岩	第二统上部	4.20	1.540
9		WL-WX-3	粉晶云岩	第二统上部	0.07	0.080
10		WL-WX-4	粉晶云岩	第二统上部	0.36	0.080
11		WL-WX-5	粉晶云岩	第二统上部	0.29	0.051
12	宜昌兆吉坪	ZJP-SL-WX-1	针孔云岩	第二统上部	9.60	2.500
13	张家界温塘	WT-WX-1	鲕粒云岩	第三统中上部	3.10	0.143
14		WT-WX-2	鲕粒云岩	第三统中上部	2.70	0.082
15		WT-WX-3	鲕粒云岩	第三统中上部	3.40	0.117
16		WT-WX-4	鲕粒云岩	第三统中上部	2.40	0.050
17	彭水万宝	WB-WX-1	针孔云岩	第二统中上部	5.60	0.071

都在2.4%以上,渗透率都在 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上,这些样品物性也都较好。而取自鹤峰五里剖面石龙洞组顶晶洞云岩层之下的WL-WX-3、WL-WX-4和WL-WX-5样品,其孔隙度均小于1%,渗透率也多小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,物性较差。另外,取自鹤峰铁炉剖面覃家庙和三游洞组粉晶云岩/灰岩的样品TL-1-W1、TL-5-W1、TL-7-W1、TL-10-W1和TL-32-W1其物性也较差。因而,综合来看研究区内物性较好的应为针孔云岩、晶洞云岩和鲕粒云岩/灰岩。

但是这三者中针孔云岩的分布非均质性很强,连片度不高,难以进行横向上有效追踪。晶洞云岩在石龙洞/清虚洞组中上部均较发育,但除鄂西渝东区厚度较大外,本次研究发现其在湘鄂西区的多个露头中石龙洞/清虚洞组顶部的晶洞云岩厚度多仅有1~3 m,因而尽管石龙洞组/清虚洞组顶部晶洞云岩物性好,但厚度太薄,勘探潜力有限。

而代表台地边缘相或台内滩相环境的鲕粒云岩/灰岩,纵向上厚度较大,平面上分布较广。如图4所示,温塘剖面仅在SQ5海侵体系域时鲕粒云岩/灰岩的厚度就有近90 m。另外,隆头比耳剖面也发育了一套厚约100 m的台地边缘滩相鲕粒云岩和角砾云岩,慈利南山坪剖面在SQ5海侵体系域时也发育了一套厚约近百米的台地边缘滩相沉积,说明SQ5海侵体系域时发育了大量的优质储层。此外,从温塘、比耳及南山坪等剖面还可看出,

SQ4高位体系域和SQ5高位体系域中,也有表征台地边缘相的颗粒云岩/灰岩的发育,只是其厚度较SQ5发育时要薄。

4 层序划分对油气勘探的启示

近年来,不同的学者从有机地化特征、矿物组成、天然裂缝发育情况等^[16-19]多个方面对湘鄂西及其邻区寒武系下部暗色泥页岩的页岩气勘探潜力进行了评价,均认为其具有较好的勘探前景,但事实上,寒武系纽芬兰统—第二统(传统意义上的下寒武统)的水井沱组/清虚洞组以及之上的石碑组和天河板组/杷榔组等也发育了暗色泥页岩,是否寒武系下部这些暗色泥页岩都具有较好的页岩气勘探前景还有待落实。为此,本文以石门杨家坪剖面为例对寒武系下部暗色泥页岩进行了系统的取样测试(图5),以期对上述问题作出初步回答。

从图5上可以看出,石门杨家坪剖面牛蹄塘组SQ1海侵体系域的有机碳含量分布在0.5%~1.5%之间,绝大部分样品TOC值均在1%以上。而SQ1高位体系域及其之上的暗色泥页岩样品有机碳含量多小于0.5%。结合目前国外页岩气勘探开发的主产区如美国的5大页岩气盆地^[2,20],即Fort Worth盆地的Barnett页岩, San Juan盆地的Lewis页岩, Michigan盆地的Antrim页岩, Appalachian盆地的Ohio页岩和Illinois盆地的New Albany页岩TOC含量来看,其下限值多为0.5%,而主产层的TOC含量多在1%以上,

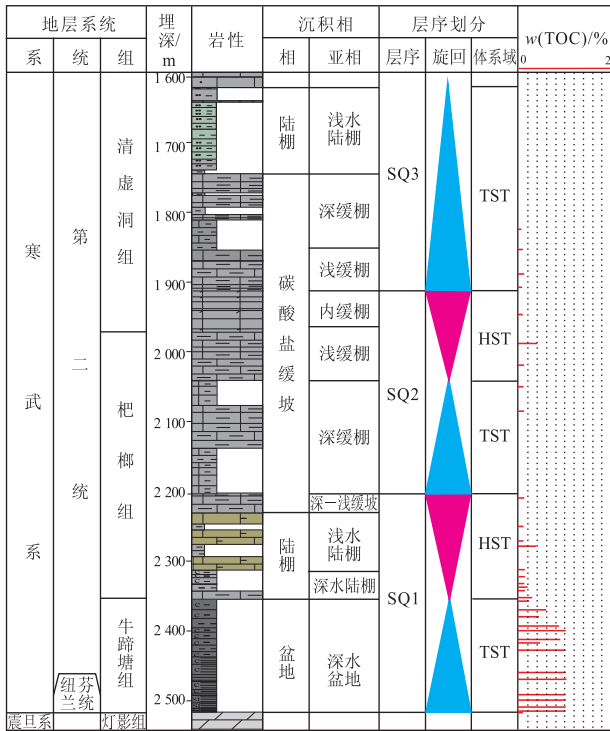


图5 湘鄂西杨家坪剖面纽芬兰统及第二统的 TOC 含量

Fig. 5 Total organic carbon content of the Terenevian and the Series 2 of Cambrian, Yangjiaping section

因而,基于本次测试结果来看,湘鄂西区寒武系下部 SQ1 海侵体系域发育层段其有机碳含量较高,单从有机质的丰度来看,此层段应为页岩气勘探的主要目的层。而之上的暗色泥页岩有机碳含量并不太高,多处于目前国外页岩气勘探开发的下限值之下。

5 结论

1) 湘鄂西区寒武系底部的纽芬兰统不太发育,主体部分为第二统一芙蓉统,持续了约 36 Ma,寒武系可分为 6 个三级层序,其层序界面可分为不整合面 and 与之相对应的岩性岩相转换面。

2) 湘鄂西区以鲕粒云岩/灰岩为主的台地边缘或台内滩型储层物性较好,厚度较大,连片分布,是研究区主要的储集类型。其主要分布于 SQ5 的海侵体系域,另外在 SQ4 和 SQ5 的高位体系域也有发育,但规模较小。

3) 研究区寒武系下部的暗色泥页岩中,并不是所有的泥页岩都具有较好的页岩气勘探潜力。基于对杨家坪剖面寒武系下部暗色泥页岩 TOC 含量的系统测试,SQ1 海侵体系域有机碳含量较高,应为页岩气勘探的主要目的层。

参考文献:

[1] 陈振林,王华,何发岐,等. 页岩气形成机理、赋存状态及研究评价方法[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2011.

[2] Pollastro R M. Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett Shale continuous(unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4) :551-578.

[3] Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian - Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(1) :87-125.

[4] 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.

[5] 王飞宇,贺志勇,孟晓辉,等. 页岩气赋存形式和初始原地气量(OGIP)预测技术[J]. 天气地球科学, 2011, 22(3) :501-510.

[6] Gale J F, Reed R M, Holder J. Natural fractures in the Barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4) :603-622.

[7] Cipolla C L, Lolon E P, Mayerhofer M J, et al. Fracture design considerations in horizontal wells drilled in unconventional gas reservoirs[R]. SPE 119366, 2009.

[8] 唐颖,唐玄,王广源,等. 页岩气开发水力压裂技术综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3) :393-399.

[9] 龙幼康. 中扬子地区下古生界页岩气的勘探潜力[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3) :344-348.

[10] 陈清礼,陈高. 湘鄂渝交界地区页岩气优先勘探开发目标区研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(8) :43-52.

[11] 李旭兵,刘安,曾雄伟,等. 雪峰山西侧地区寒武系娄山关组碳酸盐岩储层特征研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2) :153-157.

[12] 李旭兵,王传尚,刘安,等. 雪峰山西侧秭归—五峰段海相系油气地质条件研究[J]. 石油实验地质, 2009, 31(2) :197-206.

[13] 金之钧,周雁. 我国南方王村上寒武统大型古油藏的首次发现[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(2) :159-161.

[14] 杨平,谢渊,汪正江,等. 秀山上寒武统古油藏地球化学特征及油源分析[J]. 地球化学, 2010, 39(4) :354-363.

[15] 张士万,杨振武,梁西文,等. 中扬子区海相天然气勘探层系及突破方向[J]. 石油实验地质, 2007, 29(4) :361-366.

[16] 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.

[17] 孟庆峰,侯贵廷. 页岩气成藏地质条件及中国上扬子区页岩气潜力[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(1) :11-14.

[18] 朱定伟,丁文龙,邓礼华,等. 中扬子地区泥页岩发育特征与页岩气形成条件分析[J]. 特种油气藏, 2012, 19(1) :34-37.

[19] 李艳霞,林娟华,龙幼康,等. 中扬子地区下古生界海相泥-页岩含气勘探远景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3) :349-356.

[20] Strapoc D, Mastalerz M, Schimmelmann A, et al. Geochemical constrains on the origin and volume of gas in the New Albany Shale (Devonian - Mississippian), eastern Illinois Basin [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(11) :1713-1740.