

文章编号: 1009-3850(2016)03-091-07

沉积环境对页岩气储层的控制作用 ——以渝东北地区五峰组-龙马溪组为例

杨宇宁^{1,2}, 王 剑³, 熊国庆³

(1. 成都理工大学研究生院, 四川 成都 610059; 2. 四川中成煤田物探工程院有限公司, 四川 成都 610072; 3. 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610081)

摘要:以“沉积控相 相控储层”为研究思路,基于野外露头剖面实测与室内实验测试,以及前人的研究成果,探讨渝东北地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组沉积环境对页岩气储层的控制作用。研究表明,渝东北地区五峰组-龙马溪组富有机质泥页岩主要发育于滞留浅海陆棚相中,沉积中心页岩厚度可达70~80m,有机碳含量(TOC)最高可达7.56%,平均3.09%。静水缺氧还原沉积环境岩石类型主要以富含有机质的含碳质含粉砂泥(页)岩、含碳质含硅质泥(页)岩、含硅质泥(页)岩、含碳质泥(页)岩、含粉砂泥(页)岩及硅质泥(页)岩为主。页岩矿物成分以石英(平均达62.76%)和黏土矿物(平均达22.61%)为主。缺氧还原环境下沉积的大量黄铁矿形成的黄铁矿晶间孔、黏土矿物层间微孔隙、有机质生烃形成的微孔隙以及脆性矿物控制形成的微裂缝为页岩气提供了良好的储集空间。沉积环境控制的储层发育特征的研究可为页岩展布、有机质丰度、储集空间及其之后有利区评价等研究提供基础。

关键词:沉积环境;页岩气;储层特征;渝东北地区;五峰组-龙马溪组

中图分类号: P534.4

文献标识码: A

引言

页岩气发育具有广泛的地质意义,存在于几乎所有的盆地中,只是由于埋藏深度、含气饱和度等差别较大分别具有不同的工业价值^[1]。页岩气储层研究是页岩气基础地质研究的重要组成部分^[2-3]。研究页岩气储层需要研究沉积环境与沉积相,因为沉积环境不仅能控制泥页岩的厚度、面积以及有机质类型、成熟度等特征,沉积相还影响沉积岩石的类型、岩石矿物组成等特征;而岩石类型和岩石矿物组成这些因素又决定着储层物性的发育,并影响页岩气成藏^[4]。正因为研究沉积环境对储层发育的控制作用对于分析页岩气成藏机理以及资源评价等方面具有重要的理论指导意义,笔者选取正在研究的渝东北地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组黑色页岩为研究对象,研究沉积环境

对页岩气储层的控制作用。

1 地质概况与沉积背景

渝东北地区构造上位于扬子北缘大巴山冲断带内,西与米仓山冲断带相连,东南与川东高陡褶皱带-华南造山带毗邻。地质构造极为复杂,在平面上,城口-房县断裂将其分为北、南大巴山冲断褶皱带;大巴山被认为是南秦岭造山带和扬子地块之间的拼合带,南大巴山则代表典型的前陆冲断褶皱带的特点^[5-8]。经历多期构造运动,北部形成密集、大体平行、不对称的褶皱构造,构造线主要呈北西向延展;南部构造宽缓,呈北东-北北东向展布。与褶皱伴生的一系列逆冲断层多发育在背斜轴部,以沿北东向斜冲为特点,常切割褶皱使背斜轴部遭受破坏。受多期构造改造影响,地层倾角多为高角度,常见小型断裂和次级褶皱。

收稿日期: 2015-09-10; 改回日期: 2015-10-13

作者简介: 杨宇宁(1987-),女,博士研究生。主要从事含油气盆地沉积与层序地层研究。E-mail: yyn8711@163.com

资助项目: 国家自然科学基金(41030315)资助

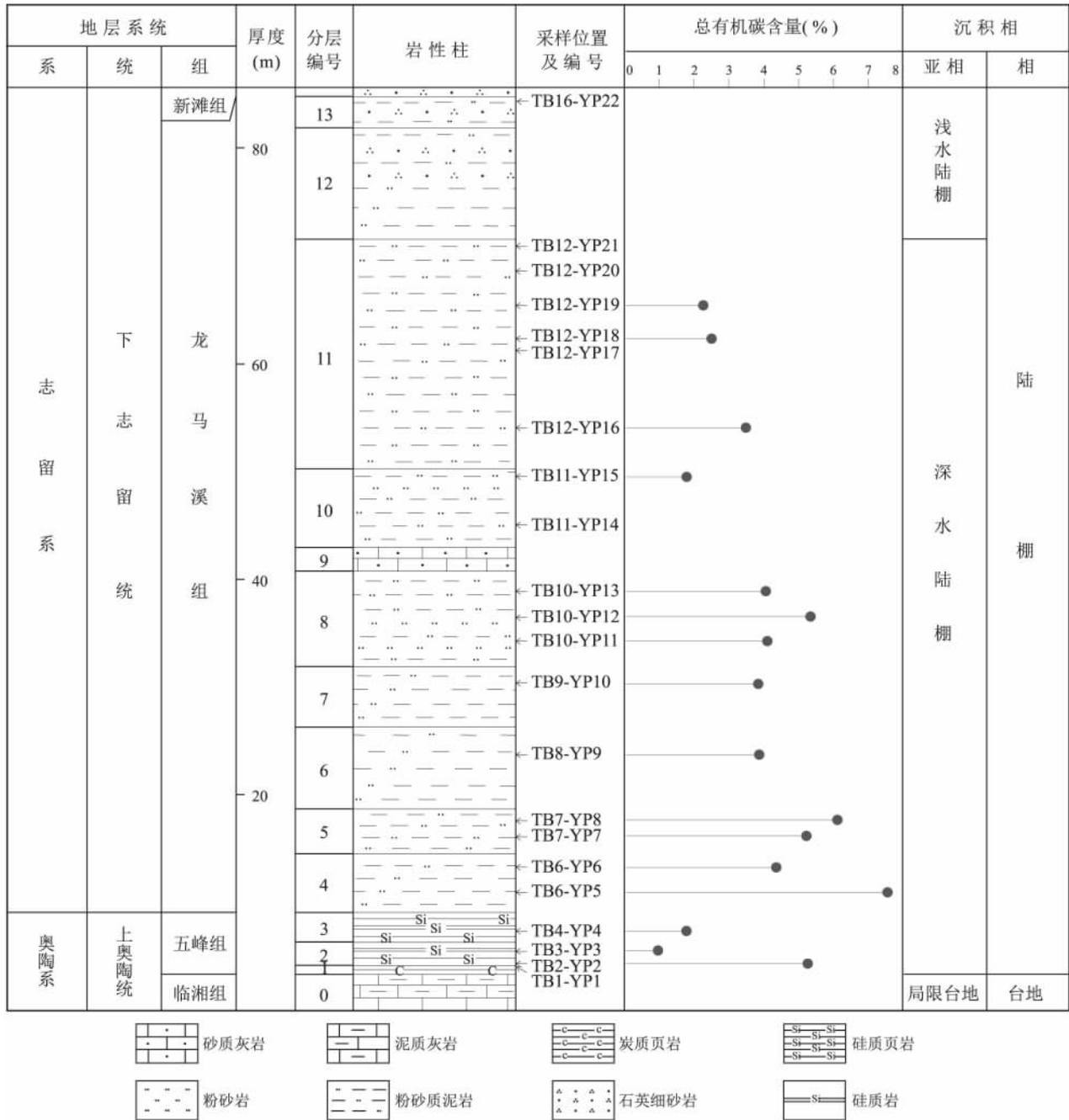


图 2 渝东北地区五峰组-龙马溪组沉积环境综合柱状图

Fig. 2 Generalized column showing the sedimentary environments in the Wufeng and Longmaxi Formations in northeastern Chongqing

(2) 粉砂质页岩相

主要发育于深水陆棚环境,因含少量碳质物(小于5%)而呈黑色,具粉砂质泥质结构,主要由泥质物和粒径一般在0.01~0.03mm左右的石英不均匀分布组成。泥质物含量大于50%,一般在60%~70%。粉砂级石英颗粒含量大于25%,多在30%左右。岩石中见少量长石及在局部富集的黄铁矿。

(3) 硅质页岩相

主要发育于深水陆棚环境,由泥质物和粒径一

般在0.01~0.2mm左右的石英及硅质物呈隐晶泥质结构不均匀分布组成。硅质物呈不规则圆形、椭圆形,粒径一般在0.04~0.2mm左右,部分硅质物呈放射状,主要为玉髓。含少量碳质物,浸染岩石不均匀分布,使岩石呈黑色。

(4) 碳质页岩相

主要发育于深水陆棚环境,主要呈薄层-极薄层状夹于泥岩中,质地较软。具泥质结构,泥质成分含量多在65%以上,其次为碳质成分,含量在25%

以上较多的碳质成分导致岩石呈深黑色且污手。大部分岩石中碳质含量在 25% 以下,为含碳质泥岩,亦呈黑色。

(5) 钙质页岩相

主要发育于浅水陆棚环境,整体呈灰-灰黑色。部分岩石见黑白相间的纹层状构造,其中亮层为钙质层或含钙质较高的泥质层,暗层为泥质物层。岩石整体呈泥质结构,泥质物含量一般为 60% ~ 80%,钙质成分多在 30% 左右,但部分岩层中钙质成分高于 50% 而变成泥灰岩。

2.2.2 源岩矿物成分定量分析

对渝东北地区五峰组-龙马溪组泥页岩进行的全岩 X 射线衍射分析(表 1)表明,矿物成分较复杂,其中以石英和黏土矿物为主,含有少量长石等碎屑

矿物以及重晶石等自生矿物。总体来说,石英含量最高,为 7% ~ 89%,平均达 56.6%;其次为黏土矿物,为 9% ~ 49%,平均达 26.3%;长石含量较少,为 0% ~ 13%,平均达 7%。黏土矿物主要以伊利石和伊利石-蒙脱石间层为主,含有少量的绿泥石和绿泥石-蒙脱石间层。石英颗粒既有陆源碎屑石英,又有硅质岩中的自生石英和玉髓等,呈无色粒状,粒径大小不一,磨圆较差,部分呈“漂浮状”。长石作为陆源碎屑成分,在研究区内主要以泥质颗粒出现,少数为粉砂质颗粒级别。研究区研究层段大部分形成于深水还原环境,黄铁矿普遍发育,主要呈分散状零星分布,偶尔呈粉末状、透镜状和结核状集中分布。

表 1 渝东北地区五峰组-龙马溪组页岩矿物成分(%)

Table 1 Mineral compositions in the shales from the Wufeng and Longmaxi Formations in northeastern Chongqing(%)

剖面位置	TOC 含量(%)	矿物成分含量(%)									
		黏土	石英	钾长石	斜长石	黄铁矿	白云石	方解石	重晶石	硬石膏	其它
巫溪白鹿	5.2	16.1	64.4	1.8	8.9	7.0					1.8
巫溪白鹿	5.8	6.2	79.4	1.1	8.0	5.3					
巫溪白鹿	4.1	18.9	65.7		3.9	9.0			0.7		1.8
巫溪白鹿	3.0	17.7	69.8	2.4	5.7	3.0	1.4				
巫溪白鹿	2.3	14.9	73.2	1.3	5.3	4.9					0.4
巫溪白鹿	2.8	36.2	43.6	1.1	8.0				2.5	3.5	5.1
巫溪白鹿	1.2	35.2	50.3		6.5				2.3	1.0	4.7
巫溪田坝	5.3	33.1	57.7	1.4	4.0				1.0	0.8	2.0
巫溪田坝	1.8	12.9	87.1								
巫溪田坝	5.2	19.1	71.8	1.8	6.5						
巫溪田坝	3.9	36.9	49.6	4.5	5.1					0.8	3.1
巫溪田坝	4.1	31.3	53.2	1.8	8.3	3.1		1.2			1.1
巫溪田坝	2.5	38.7	47	0.9	8.9	2.0					2.5
巫溪田坝	1.6	47.3	42.6		7.0	1.3				1.8	
城口庙坝	0.5	17.7	80.7		1.6						
城口庙坝	1.8	10.5	79.2	1.2	1.4				2.3		5.4
城口庙坝	1.8	10.5	79.5	1.4	1.4				2.1		5.1
城口庙坝	5.1	19.5	60.7	1.2	7.3	6.8			1.8		2.7
城口庙坝	4.9	18.1	64.0	1.4	7.0	4.2			1.4	0.4	3.5
城口庙坝	2.8	20.0	61.6	2.1	10.1	5.2					1.0
城口庙坝	3.9	30.3	51.4		7.1	5.8			1.3		4.1

2.2.3 矿物成分对沉积环境的响应

渝东北地区五峰组-龙马溪组的黑-灰黑色泥页岩属于典型的深水还原环境沉积的地层^[10],是重要的富有机质泥页岩层系^[11]。分析结果显示,页岩中含有碎屑状的石英以及重晶石等自生矿物,并且在显微镜下还观察到草莓状黄铁矿的存在,这些均能

证明研究区五峰组-龙马溪组形成的沉积环境为还原缺氧环境。五峰组-龙马溪组这种还原环境对有机质的保存和富集有利,为页岩气的形成提供了良好条件^[12]。

2.3 页岩储集空间发育特征

沉积环境是页岩孔隙、裂缝形成的外部控制因

素之一,而受环境控制下的页岩岩性、岩相以及矿物组分等条件又是控制页岩孔隙发育的内部因素。因此,探讨沉积环境对页岩孔隙的控制作用具有重要的意义^[9]。

2.3.1 矿物组分对孔隙、裂缝的影响

泥页岩孔隙、裂缝的发育受到黏土矿物与脆性矿物的控制,而黏土矿物与脆性矿物又受到沉积环境的影响。在前人的研究中可得知,泥页岩中的黏土矿物由于具有较大的微孔隙体积和比表面积,对页岩气的吸附具有重要作用^[13]。石英、方解石等矿物的组成变化对岩石力学性质、孔隙结构等特征也能产生一定的影响^[14-15]。此外,黏土矿物对孔隙演化、保存也具有重要的作用。一般情况下,孔隙度和渗透率随着页岩中黏土总量的增加而降低,高岭石相对含量变化与孔隙演化趋势一致,伊利石、绿泥石相对含量的变化与孔隙演化趋势相反^[16]。究其原因可能有两方面:第一方面是随埋深的增加并且地层水逐渐变成碱性,黏土矿物发生脱水转化并析出层间水,在层间形成微裂隙(图3a);第二个方面则是黏土矿物伊利石化使得某些元素的消耗以及矿物的溶蚀,在这一过程中会产生大量微孔隙(图3b)。还有一个比较互补的现象就是当黏土矿物含量较少时,石英、方解石等脆性矿物的含量就会相应增多,而脆性矿物在外力的作用下就会形成裂隙等易于渗流的空间。

2.3.2 沉积环境控制的孔隙、裂缝发育特征

沉积相控制了不同的岩石类型和岩石组分。五峰期早期水体的突然加深,使渝东北中部地区沉积了一套以硅质岩为主的黑色岩层,其中沉积于封闭-半封闭的缺氧还原环境下的草莓状或细粒状黄铁矿呈纹层状或星散状分布在页岩层中,因此发育大量的黄铁矿晶间孔(图3c);而西部厚坪、庙坝地区由于更靠近古陆或古隆起,其水深较中部田坝地区浅。岩性上表现为灰绿色泥岩夹灰色薄层泥岩,

向上渐变为黑色泥岩的过渡相沉积,页岩黏土矿物含量较高,发育较多矿物晶间孔。总体来说,发育于深水陆棚相的五峰组-龙马溪组,沉积了大量富有机质的黑色-灰黑色泥页岩,并且在高成熟期有机质的大规模烃类排放形成了较多的呈凹坑状密集分布的有机质孔隙(图3d)。

3 讨论

通过对渝东北地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组的富有机质页岩层段的厚度、页岩组分、TOC含量以及孔隙、裂隙等的特征对比分析表明,深水陆棚相比浅水陆棚相为更有利的页岩气储层发育的沉积环境。对比两种具有潜力的沉积环境控制下的页岩气富集储层特征可以看出(表2),相比浅水陆棚相,深水陆棚相的泥页岩空间展布更广,并且富有机质泥页岩发育的厚度也更大,有机碳含量和黏土矿物含量相对更高,储集空间主要为矿物晶间孔和有机质孔等;而浅水陆棚相的页岩脆性矿物含量相对更高,储集空间以微裂隙为主。从以上对比可以发现,沉积相对页岩储层的空间分布以及储层特征等因素的控制比较明显。

4 结论

(1)渝东北地区五峰组-龙马溪组页岩有机碳含量和厚度发育受沉积相带的控制,主要发育于深水陆棚亚相中,沉积中心在田坝-尖山地区。整体上来看,由北向南页岩厚度逐渐变薄,富有机质页岩厚度主要分布在10~60m范围内。全区有机碳含量(TOC)最高可达7.56%,平均达到3.35%,并与厚度高值分布区形成良好的对应关系。

(2)受深水还原环境的控制,五峰组-龙马溪组主要发育含碳质含粉砂页岩、粉砂质页岩、硅质页岩、碳质页岩及钙质页岩等5种岩相。矿物成分较复杂,其中以石英和黏土矿物为主,含少量长石等碎

表2 渝东北地区沉积相控制储层特征对比

Table 2 The controls of sedimentary facies on the shale gas reservoirs in northeastern Chongqing

储层特征	沉积相	
	深水陆棚相	浅水陆棚相
岩石类型	黑色碳质页岩、粉砂质页岩、硅质页岩为主,夹少量薄层粉砂岩和粉砂质泥岩	灰色-灰绿色页岩、粉砂质页岩、钙质页岩为主
页岩厚度(m)	30~80	0~60
矿物组成	黏土矿物10.7%~40%;石英9.5%~88.2%	黏土矿物6.2%~47.3%;石英42.6%~79.4%
TOC	0.7%~7.6%	1.6%~5.8%
储集空间发育类型	矿物晶间孔和有机质孔为主	微裂隙为主

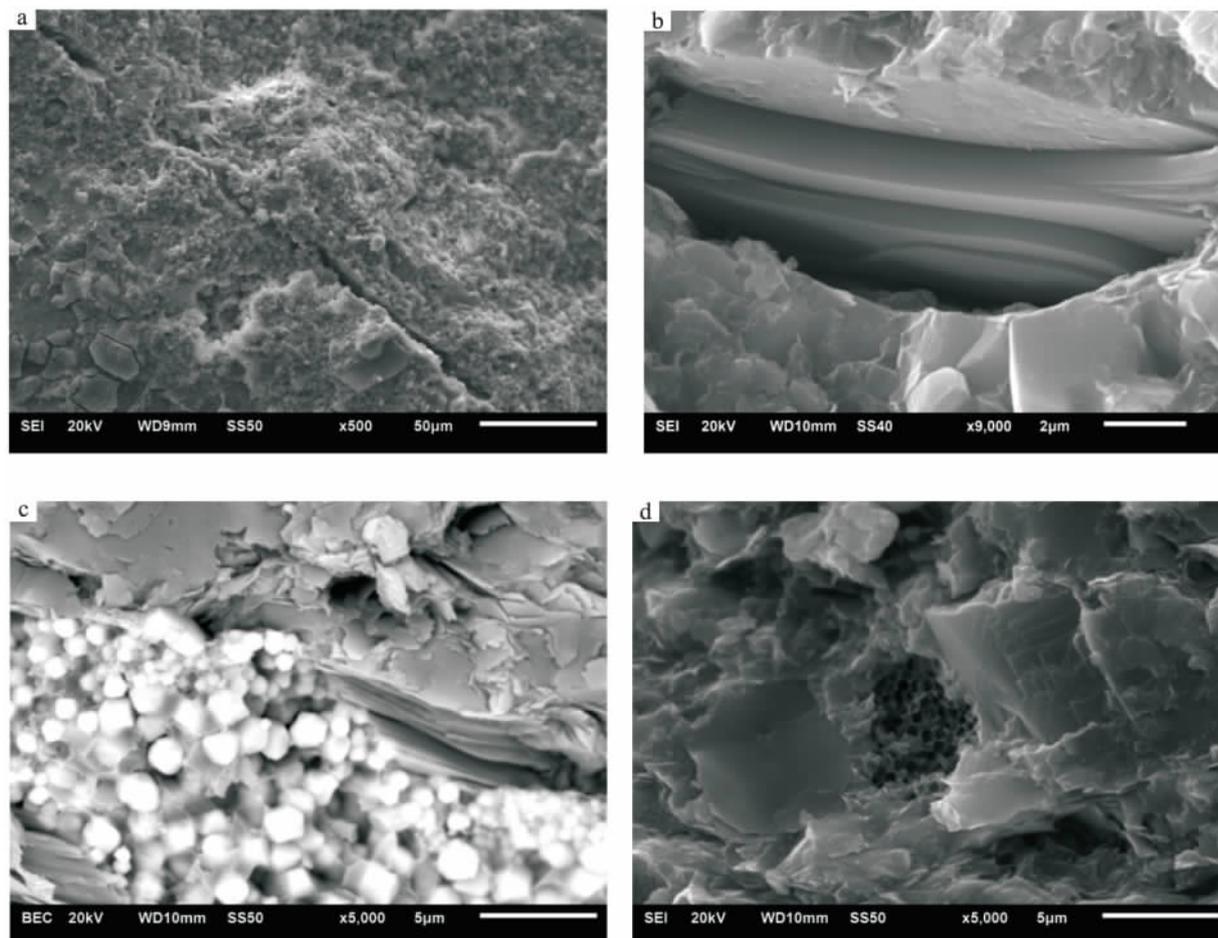


图3 渝东北地区五峰组-龙马溪组孔隙、裂缝发育特征

a. 微裂缝,未充填,缝宽约 $5\mu\text{m}$; b. 伊利石矿物粒间孔隙 $d.368\sim0.467\mu\text{m}$; c. 黄铁矿颗粒内晶间孔隙 $10\sim100\text{nm}$; d. 有机质孔隙 $10\sim10\text{nm}$

Fig. 3 Pores and cracks in the Wufeng and Longmaxi Formations in northeastern Chongqing

屑矿物以及重晶石等自生矿物。石英含量最高,为 $7\%\sim89\%$,平均达 56.6% ;其次为黏土矿物,为 $9\%\sim49\%$,平均达 26.3% ;长石含量较少,为 $0\%\sim13\%$,平均达 7% 。黏土矿物主要以伊利石和伊利石-蒙脱石间层为主,含少量的绿泥石和绿泥石-蒙脱石间层。

(3) 还原缺氧环境下沉积的黄铁矿形成的黄铁矿晶间孔、黏土矿物层间微孔隙、有机质生烃形成的微孔隙以及脆性矿物控制形成的微裂缝为页岩气提供了良好的储集空间。

(4) 沉积相对页岩储层的空间分布以及储层特征等因素的控制比较明显。通过对渝东北地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组富有机质页岩层段的厚度、页岩组分、TOC含量以及孔隙、裂隙等的特征对比分析表明,深水陆棚相比浅水陆棚相为更有利的页岩气储层发育的沉积环境。

参考文献:

- [1] 李洋冰,任志勇,谢英刚,等.世界页岩气勘探开发技术对中海油的借鉴作用分析[J].科技视界,2013,(31):330-331.
- [2] 蒋裕强,董大忠,漆麟,等.页岩气储层的基本特征及其评价[J].天然气工业,2010,30(10):7-12.
- [3] 郭岭,姜在兴,姜文利.页岩气储层的形成条件与储层的地质研究内容[J].地质通报,2011,30(2-3):385-392.
- [4] BOWKER K A. Barnett shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523-533.
- [5] 刘树根,徐国盛,徐国强,等.四川盆地天然气成藏动力学初探[J].天然气地球科学,2004,15(4):323-330.
- [6] 魏国齐,刘德来,张林,等.四川盆地天然气分布规律与有利勘探领域[J].天然气地球科学,2005,16(4):437-442.
- [7] 沃玉进,肖开华,周雁,等.中国南方海相层系油气成藏组合类型与勘探前景[J].石油与天然气地质,2006,27(1):11-16.
- [8] 张金川,聂海宽,徐波,等.四川盆地页岩气成藏地质条件[J].天然气工业,2008,28(2):151-156.
- [9] 王阳,陈洁,胡琳,等.沉积环境对页岩气储层的控制作

- 用——以中下扬子区下寒武统筇竹寺组为例[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5):845-850.
- [10] 付小东, 秦建中, 腾格尔, 等. 烃源岩矿物组成特征及油气地质意义——以中上扬子古生界海相优质烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6):671-684.
- [11] 王清晨, 严德天, 李双建. 中国南方志留系底部优质烃源岩发育的构造-环境模式[J]. 地质学报, 2008, 82(3):289-297.
- [12] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义[J]. 石油学报, 2011, 32(5):775-782.
- [13] ROSS D, BUSTIN R M. Impact of mass balance calculations on adsorption capacities in microporous shale gas reservoirs [J]. Fuel, 2007, 86(17/18):2696-2706.
- [14] 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.
- [15] ROSS D, BUSTIN R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, Northeastern British Columbia, Canada [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2007, 55(1):51-75.
- [16] 程晓玲. 黏土矿物转化与储层孔隙演化的规律性研究:以苏北盆地台兴油田阜三段储层为例[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(1):43-45.

Controls of sedimentary environments on shale gas reservoirs: A case study of the Wufeng and Longmaxi Formations in northeastern Chongqing

YANG Yu-ning^{1, 2}, WANG Jian³, XIONG Guo-qing³

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Sichuan Zhongcheng Coalfield Geophysical Exploration Engineering Co., Ltd., Chengdu 610072, Sichuan, China; 3. Key Laboratory of Sedimentary Basins and Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The controls of sedimentary environments on shale gas reservoirs in the Upper Ordovician Wufeng Formation and Lower Silurian Longmaxi Formation in northeastern Chongqing are treated in this study on the basis of field investigation, laboratory data and previous results of research. The organic-rich shales occur mostly in the stagnant neritic shelf environment, and have a thickness of 70-80 m at the depositional center. The organic carbon contents amount to 7.56%, with an average of 3.09%. The rock types in the static anoxic environment include organic-rich carboniferous-silty mudstones and shales, carboniferous-siliceous mudstones and shales, siliceous-bearing mudstones and shales, carboniferous mudstones and shales, silty mudstones and shales, and siliceous mudstones and shales. The mineral compositions in the shales contain quartz (62.76% in average) and clay minerals (22.61% in average). The intergranular pores in pyrite created in the anoxic-reduction environments, interlayer micropores in clay minerals, micropores created by hydrocarbon generation in organic matter, and microcracks created by brittle minerals have provided excellent reservoir spaces for the shale gas. The study of reservoir characteristics in sedimentary environments will offer some thoughts on the shale distribution, organic matter abundance, reservoir spaces and evaluation of favourable areas in future shale gas exploration and development.

Key words: sedimentary environment; shale gas; reservoir characteristics; northeastern Chongqing; Wufeng and Longmaxi Formations