

doi:10.3799/dqkx.2017.087

页岩油气富集的主控因素及误辩： 以美国、阿根廷和中国典型页岩为例

蒋 恳^{1,2,3,4}, 唐相路³, Steve Osborne¹, Thomas Anderson¹

1. 犹他大学能源与地球科学学院, 美国 盐湖城 84108

2. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074

3. 中国石油大学非常规天然气研究院, 北京 102249

4. 中国石油大学非常规油气与新能源研究院, 山东 青岛 266580

摘要: 页岩气富集不均匀,无论对于不同页岩油气藏还是同一页岩油气藏不同地方,产量都是有高有低。有必要系统分析和对比全球不同页岩油气的地质、石油系统与油气富集的关系,总结页岩油气富集的主控因素,从而采取合理的勘探和开发技术。以美国、阿根廷和中国典型页岩为例,基于野外和岩心观察、样品属性测试分析、储层表征、石油系统分析及油气测试,探究了页岩油气富集的主控因素及存在的认识误区。结果表明,富含有机质和脆性矿物的页岩主要分布于远离造山带物源的非深水的沉积和构造背景,富含石英和高伽马页岩并非判断优质储层的矿物和岩石物理标准,优质碳酸盐页岩应以富含碳酸盐和低伽马值为标准。“页岩油气藏”实际是细粒富含有机质的自生自储或与富含有机质烃源岩相邻的贫有机质细粒沉积储层。天然裂缝对页岩油气富集具有有利和不利的双重作用。因此,页岩油气富集同时受到沉积和构造环境、岩相及矿物组成、天然裂缝的耦合影响,且对不同沉积盆地、不同属性页岩的影响差异明显。

关键词: 页岩油气; 富集; 沉积背景; 构造; 岩相; 矿物组成; 天然裂缝; 石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2017)07-1083-09

收稿日期: 2017-05-11

Enrichment Factors and Current Misunderstanding of Shale Oil and Gas: Case Study of Shales in U.S., Argentina and China

Jiang Shu^{1,2,3,4}, Tang Xianglu³, Steve Osborne¹, Thomas Anderson¹

1. Energy & Geoscience Institute, University of Utah, Salt Lake City 84108, U.S.

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Unconventional Natural Gas, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

4. Institute of Unconventional Oil and Gas and New Energy, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: Shale gas enrichment is uneven, and production is different whether for different shale reservoirs or in different shale oil and gas reservoirs. It is necessary to systematically analyze compare the relationship between geology, petroleum system and oil and gas enrichment of different shale oil and gas plays in the world, to find out the main enrichment factors of shale oil and gas for the purpose of best choice of exploration and development technology. Based on the observation and description of outcrop and core, property testing of shale samples, reservoir characterization, petroleum system analysis, and production test, the shale reservoirs in the United States, Argentina, and China were studied. Results show that the organic-rich shale with content of high brittle minerals is mainly distributed in the shallow water sedimentary and tectonic background far away from the orogenic provenance. The high quartz content and high gamma value are not the evaluation criterion of high quality shale reservoir. The high quality carbonate-rich shale reservoir should be rich in carbonate and of low gamma value instead of being rich in

基金项目: 国家科技重大专项(Nos.2017ZX05035-002, 2016ZX05061); 国家自然科学基金项目(No.41472112)。

作者简介: 蒋愷(1976—),男,特聘教授,研究员,主要从事全球非常规及常规油气地质和勘探研究。ORCID: 0000-0003-0207-708X。

E-mail: sjiang@egi.utah.edu

引用格式: 蒋愷, 唐相路, Steve Osborne, 等, 2017. 页岩油气富集的主控因素及误辩: 以美国、阿根廷和中国典型页岩为例. 地球科学, 42(7): 1083-1091.

quartz and high gamma value. The “shale reservoirs” are actually fine grained organic-rich shale reservoirs or the organic-lean fine-grained reservoirs adjacent to the source rocks. The natural fractures have both positive and negative effects on shale oil and gas enrichment. Therefore, the shale oil and gas accumulation is controlled by the coupling of tectonic and sedimentary environment, lithofacies, mineral composition, and natural fracture. These controlling factors vary in different basins and different shales with specific properties.

Key words: shale oil and gas; enrichment; sedimentary settings; tectonics; lithofacies; mineral composition; natural fracture; petroleum geology.

0 引言

1821年美国陆上钻探了第1口页岩气井,1914年美国发现了第1个页岩气田——Big Sandy,1981年被誉为页岩气之父的乔治·米歇尔采用大型水力压裂技术实现了 Barnett 页岩气商业开发,页岩气作为一种天然气资源日益受到重视。2000年开始实现了 Antrim、Barnett 等一批页岩气田的规模开发,2005年开始水平井压裂技术逐渐成熟。2012年至今,中国页岩气勘探取得了显著的成果,在涪陵、威远、长宁等地区实现了页岩气商业开采(郭彤楼和张汉荣,2014;郭旭升,2014;金之钧等,2016)。随着中国和阿根廷页岩油气的初步商业开发,全球非常规油气的理论和技术不断丰富。

非常规油气地质和勘探开发技术的进步给传统的石油与天然气地质学和石油系统及钻完井和油气田开发带来了一系列新的认识(康永尚等,2016;杨永飞等,2016)。美国引领了全球非常规油气的地质理论及勘探和开发,页岩油气储集层的理论研究和水平井大型清水多级压裂技术的成功运用使美国在全球率先实现了能源革命,不仅推动了美国油气再创高峰,打破了哈尔伯特提出的石油产量的峰值理论,而且还向全球输出了一系列的地质理论和勘探开发新技术(Kargbo *et al.*, 2010; 蒋恕,2011)。2015年美国页岩气产量达到 $4\ 250 \times 10^8 \text{ m}^3$,是 2000 年的 20 倍,到 2040 年美国页岩气和致密油中附属气

的产量将达到美国天然气总产量的三分之二(贾承造,2017)。

陈更生等(2009)认为页岩油气勘探开发初期,勘探地质不重要而水平井和压裂工程最重要,因为页岩油气藏不需要常规油气那样的圈闭。但近年来随着勘探开发程度的提高,学者们发现页岩气富集不均匀,无论对于不同页岩油气藏还是同一页岩油气藏不同地方,产量也是有的高产有的低产,如 Haynesville 产量最高,而 Barnett 及 Colony Wash 产量相对较低(图 1a)。对 Fayetteville 页岩气而言,高产井主要来自富含石英的储层,而富含粘土的储层产量较低(图 1b)。纵观全球的页岩油气藏(表 1),不同地区的页岩具有不同的沉积和构造背景,不同的地化、岩矿、岩石物理特征,并且甜点的分布、开发方式和产量或潜在勘探生产潜力均不同(Jiang *et al.*, 2016, 2017)。因此,有必要系统分析和对比全球不同页岩油气的地质、石油系统与油气富集的关系,总结页岩油气富集的主控因素,深入了解页岩油气系统的科学性从而采取合理的勘探和开发技术。

本文从页岩的沉积和构造背景、页岩内在物质组成(岩相和矿物组成)以及外界天然裂缝三个方面,对页岩油气富集的主控因素进行了探讨,并分析了这三个方面目前在认识上存在的误区或容易忽视的地方,以期深入掌握页岩油气地质的本质和指导中国页岩油气的勘探与开发。

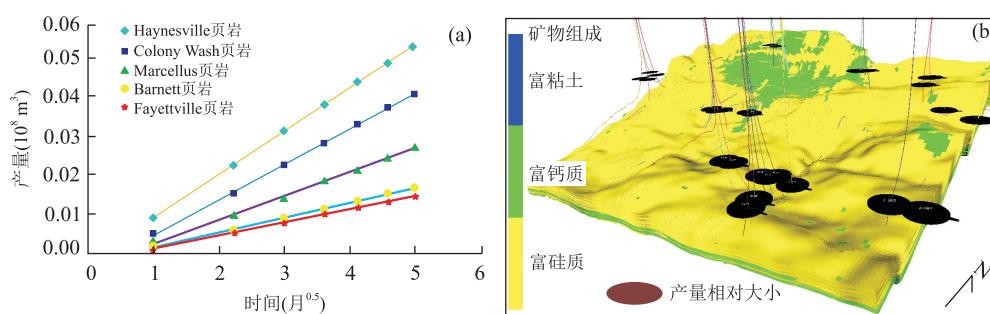


图 1 页岩气产量与时间及页岩矿物组成的关系

Fig.1 Relationship between shale gas production and time and mineral composition

表1 美国、阿根廷和中国主要页岩层位基本特征

Table 1 Basic characteristics of the major shale formations in United States, Argentina and China

国家	页岩	沉积环境	构造背景	主要岩性	吸附气含量(%)	井底温度(℃)	TOC(%)	成熟度(%)	粘土含量(%)	脆性	孔隙度(%)	压力系数
美国	Barnett	海相	前陆盆地	硅质页岩	35	82~98	2~7	2.00	10~30	高	4~9	1.2~1.4
	Marcellus	海相	前陆盆地	富含硅质到富含粘土页岩	40	65~93	3~14	1.60	20~35	低	3~11	0.7~1.3
	Haynesville	海相	被动大陆边缘	硅质和钙质页岩	17	132~177	1~5	2.15	20~35	中	8~15	1.6~2.1
	Antrim	海相	克拉通盆地	硅质页岩	>70	26	0~24	/	/	/	2~10	0.8
	Niobrara	海相	前陆盆地	白垩	油为主,25	93~115	2~10	0.98	<10	高	7~12	1.0~1.4
	Eagle Ford	海相	前陆盆地	钙质页岩	油为主,20	168	2~6	/	15~25	中	4~15	1.2~1.6
	Bakken	海相	克拉通盆地	硅质页岩、白云岩及粉砂岩	油为主,气很少	65~115	10~11	0.75	25	高	5~8	1.3~1.8
阿根廷	Vaca Muerta	海相	前陆盆地	硅质页岩	油气均有,40~55	90	1~7	0.60~2.00	15~20	高	4~14	1.1~1.4
中国	龙马溪组	海相	前陆盆地	硅质页岩	30~45	150	2~10	1.30~3.60	15~45	高	1~8	0.7~1.9
	沙河街组	陆相	断陷盆地	页岩、砂岩和碳酸盐	55	80~138	2~8	0.50~1.70	>40	低	1~4	/

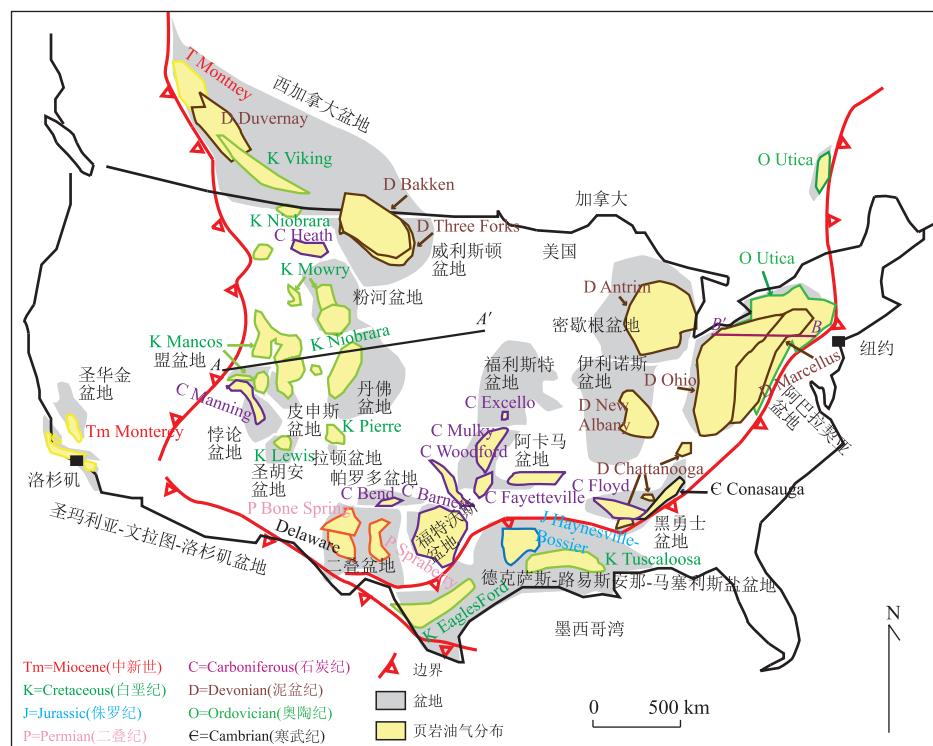


图2 北美页岩油气藏分布

Fig.2 Shale reservoirs distribution in the North American

图中不同颜色的页岩油气分布边界代表不同年代,比如中新世页岩油气边界为橘红色

1 构造与沉积环境对页岩油气富集的控制

1.1 沉积盆地

北美页岩气勘探开发表明,页岩气主要分布于前

陆盆地和克拉通盆地两类盆地中。其中,前陆盆地的页岩气藏埋藏较深,压力和成熟度较高,而位于克拉通盆地的页岩气藏则埋藏较浅,压力和成熟度较低(李新景等,2009; 聂海宽等,2009)。北美典型页岩油气藏均位于东部 Appalachia 造山带古生代前陆盆地和西部洛基山造山带的中生代前陆盆地(图2)。从盆

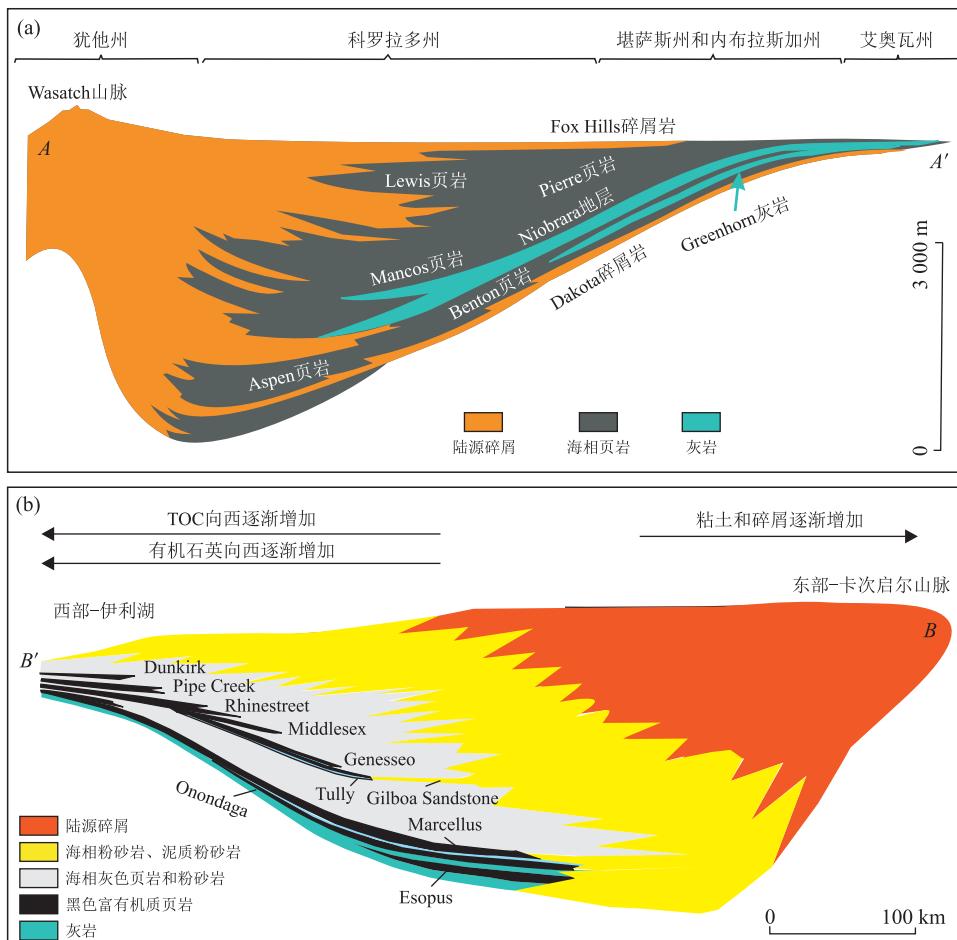


图 3 盆地构造和沉积背景对页岩油气储层分布的控制

Fig.3 Controlling of tectonic and sedimentary settings on the distribution of shale oil and gas reservoir
剖面 AA' 和 BB' 的位置见图 2

地尺度而言,前陆盆地中富含有机质的高脆性优质页岩主要位于远离盆地物源区(造山带)的浅水区,而非深水区,主要原因因为前渊深水区沉积富砂的陆源碎屑沉积稀释了有机质含量(图 3).比如洛基山前陆盆地中从墨西哥湾到北极的白垩系海道(Cretaceous Seaway)、从西部近造山带(如犹他州)到远离造山带和物源的浅水区(如怀俄明州和科罗拉多州),有机质含量逐渐增加,矿物脆性增加.犹他州 Mancos 页岩富含粘土,有机质含量大部分小于 2%,而科罗拉多州同时代的 Niobrara 泥灰岩岩相的页岩富含有机质(含量通常大于 2%);邻近的 Niobrara 白垩岩相页岩脆性高,是有利的储层(图 3a);北美东部 Marcellus 富含有机质和富含有机石英的页岩也位于远离造山带和物源的浅水区(图 3b).因此,页岩油气富集的主要部位并非位于盆地沉积中心,而是受盆地构造形态、物源供给等多种因素综合控制,且远离物源区的浅水区通常为较好的页岩油气富集区.

1.2 地层层序

美国白垩系 Mowry、中泥盆系 Marcellus、石炭系/密西西比系 Barnett 和中国志留系龙马溪组等页岩的层序地层研究表明,优质页岩储层垂向上位于富含有机质和石英的海进体系域到早期高位体系域中(Bohacs, 2015; Jiang *et al.*, 2015, 2016, 2017),在最大海泛面处有机质和放射性伽马曲线值最高(图 4a, 4b, 4c).但富含碳酸盐岩页岩(如白垩系 Santonian 时期 Niobrara 及其同时代页岩)的研究表明,最大海泛面位于放射性伽马曲线最低值的层位并对应于白垩等清水灰岩细粒沉积段,而非富含有机质和高伽马值的泥灰岩/页岩段(图 4d).主要因为对富含碳酸盐岩页岩而言,低水位和高水位时期,陆源粘土会随着海平面相对降低大量输入到泥灰岩沉积中;而最大海泛面时期,沉积区远离物源区域、受陆源输入影响小,水体清,沉积细粒的白垩灰岩.因此,层序地层划分时,不宜套用现有的来自碎

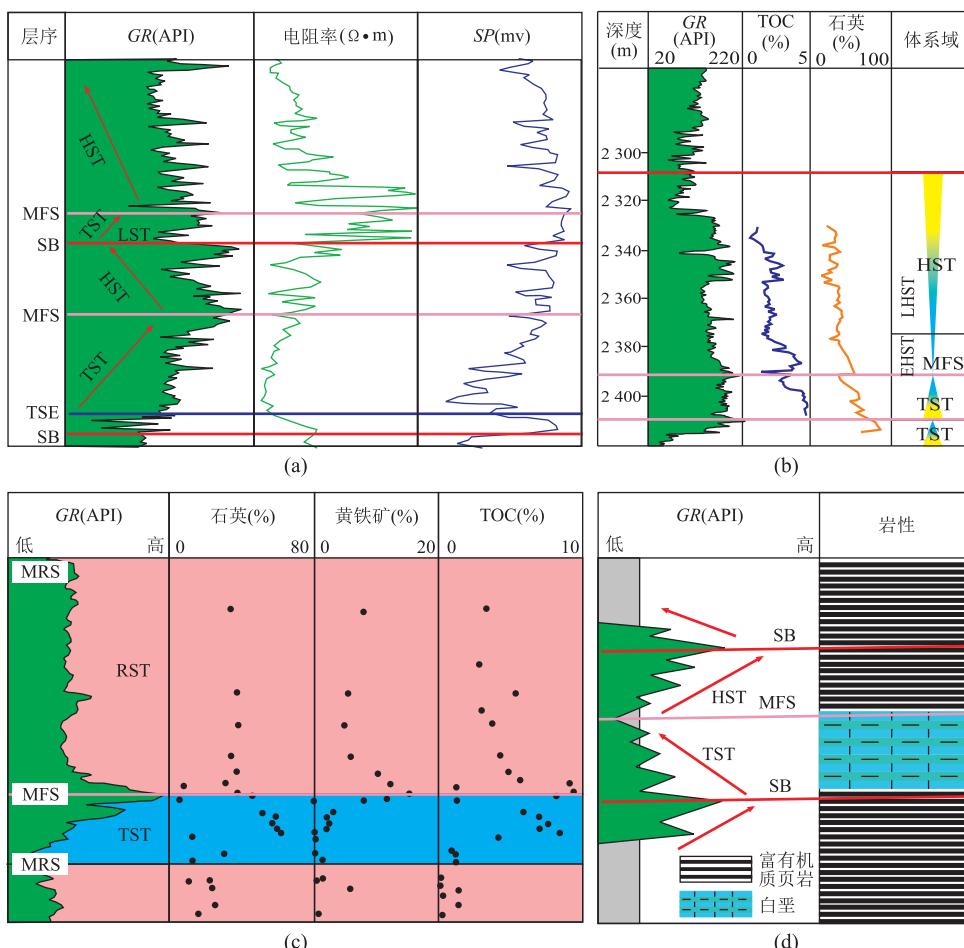


图4 不同页岩层序地层与垂向上富有机质页岩发育的关系

Fig.4 Relationship between different shale sequence stratigraphic framework and organic-rich shales

a.Mowry页岩;b.龙马溪组页岩;c.Marcellus页岩;d.Santonian页岩

屑岩页岩的模式,需根据实际的沉积环境等其他影响沉积的因素进行判定。尽管垂向上优质储层均位于最大海泛面附近,但地层层序和岩相类型不同会导致页岩油气储层成因不同。

2 岩相及矿物组成对页岩油气富集的控制

2.1 岩相类型

美国 Barnett、Antrim、Haynesville、Marcellus 等页岩气的成功开发导致了天然气价格的降低,但油价相对更有吸引力从而导致了“页岩油”开始大规模开发,代表性的有美国 Eagle Ford、Wood Ford、Niobrara、Bakken、Cardium、Viking、Duvernay 等“页岩”油气藏(Zhang et al., 2016)。实际上,很多所谓的“页岩”油气藏并非真正的含粘土或者富含硅质的细粒页岩。由于储层主要由细粒的碳酸盐或粉砂

岩等构成,加上储层可能含有黑色有机质,因此通常称为“页岩”。

关于页岩的定义存在很多误区。以往学者们通常认为页岩就是粘土岩,实际上页岩是根据颗粒的大小来定义的,与矿物类型及岩相类型无关,半径小于 0.0625 mm 的细粒沉积都称为页岩。北美页岩中,典型页岩为 Barnett 硅质页岩。Eagle Ford 为富含碳酸盐的页岩(有时含碳酸盐岩夹层)。Green River 富含有机质页岩中夹细粒的介形虫颗粒灰岩为目前主要的储层。Niobrara 页岩包括贫有机质的白垩和富有机质的泥灰岩,均为细粒沉积,加上均含有黑色有机质,肉眼难以分辨,富含有机质和粘土的泥灰岩为主要烃源岩,而主要储层为相对贫有机质的高孔高渗的白垩(图 5 和图 6)。Bakken 页岩主要包括上下 Bakken 富含有机质页岩和中 Bakken 细粒的白云岩或粉砂岩,细粒的白云岩和粉砂岩为主要储层。中国龙马溪组底部主要为富有机质硅质页

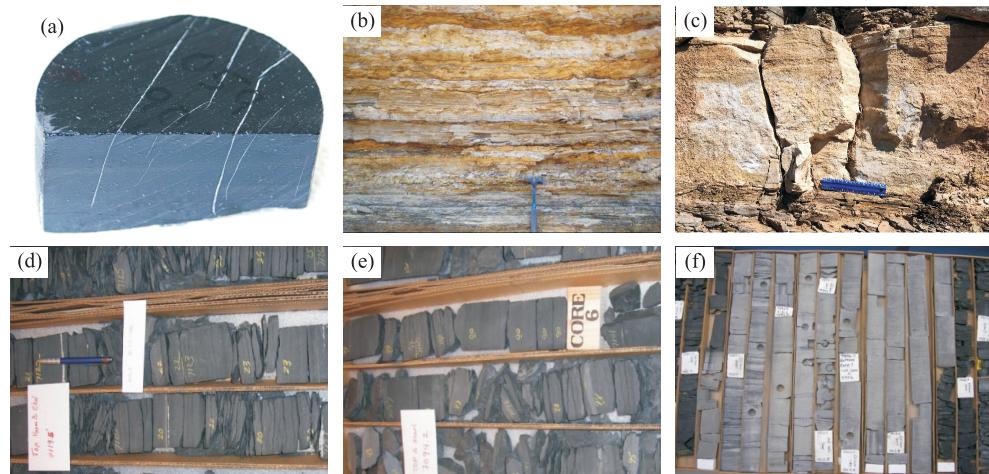


图 5 北美“页岩”油气储层的岩相

Fig.5 Facies of shale oil and gas reservoirs in the North America

a.Barnett 硅质页岩;b.Eagle Ford 富含碳酸盐岩页岩;c.Green River 页岩夹细粒介形虫灰岩;d.Niobrara 页岩(白垩, 储层);e.Niobrara 页岩(泥灰岩, 烃源岩);f.Bakken 富有机质页岩夹白云岩储层; Barnett 页岩照片据 Bowker(2007)修改

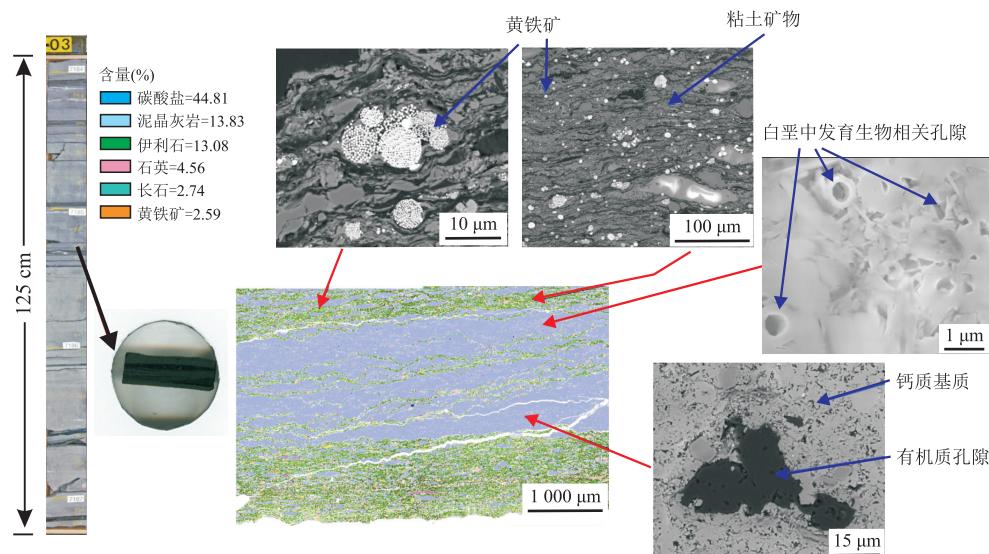


图 6 Niobrara 页岩岩性特征

Fig.6 Lithologic characteristics of the Niobrara shale

浅蓝色为贫有机质但高孔渗的白垩, 绿色部分为富含有机质和低孔的泥灰岩

岩, 中上部主要为粉砂质泥岩(Tang *et al.*, 2016)。因此, 很多所谓的“页岩”从岩相角度而言实际不是页岩, 在页岩油气勘探开发中不能将页岩勘探层位限定得过于狭义, 只要是细粒的富含有机质或者与富有机质页岩邻近的岩石均可广义上被称为页岩。

2.2 矿物组成

一般而言, 富含有机质和富含脆性可压裂石英和长石的页岩为有利的页岩储层, 而陆相和海陆过渡相页岩由于粘土含量高而被认为是较差的储层, 因此页岩中是否富含石英和长石被作为评价页岩气储层的一个标准(Chalmers *et al.*, 2012)。这对北美

Barnett、Marcellus 和中国龙马溪组等页岩确实是较好的储层识别标志。但南美洲阿根廷 Neuquen 盆地的 Vaca Muerta 和 Los Molles 等页岩的研究表明, 如果根据矿物标准判断, 富含石英和长石的 Los Molles 页岩比富含碳酸盐岩的 VacaMuerta 页岩好(图 7)。但通过分析有机质含量和粘土关系及孔隙发育特征, 笔者发现 VacaMuerta 页岩有机质含量高且粘土矿物含量低, 同时有机孔隙和无机孔隙(特别与碳酸盐生物相关的孔隙)非常发育, 是更加有利的页岩储层(图 8)。因此, 不同地区不同层位的页岩储层矿物组成与有机质含量和孔隙并非具有相同的关系。

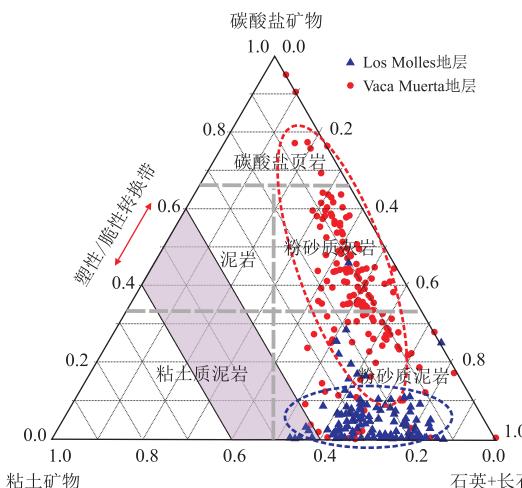


图7 南美洲阿根廷 Neuquen 盆地 Vaca Muerta 和 Los Molles 页岩的矿物组成

Fig.7 Mineral composition of the Vaca Muerta and Los Molles shales in the Neuquen basin, Argentina, South America

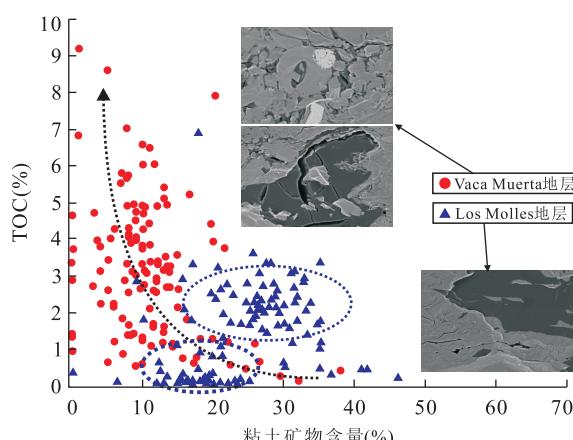


图8 南美洲阿根廷 Neuquen 盆地的 Vaca Muerta 和 Los Molles 页岩的 TOC 与粘土矿物含量及孔隙发育特征的关系

Fig.8 Relationship between TOC and clay mineral contents, and pore characteristics of the Vaca Muerta and Los Molles shales in the Neuquen basin, Argentina, South America

系,在各个沉积盆地中发育的富有机质页岩的成因也更加多样化。

3 天然裂缝对页岩油气富集的控制

20世纪70年代美国东部页岩气实验项目针对 Marcellus 页岩开启的天然裂缝进行了研究,Soeder (2010)发现天然裂缝对页岩油气聚集和开发总是有

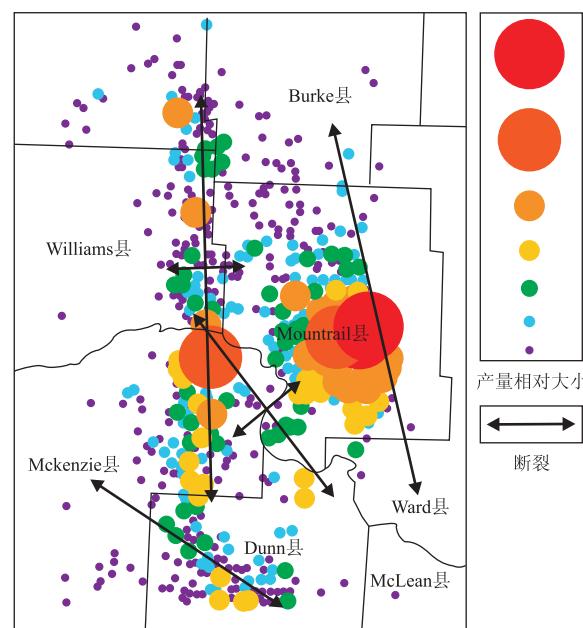


图9 北美 Williston 盆地 Bakken 页岩油产量与受基底断裂控制的天然裂缝的关系

Fig.9 Relationship between shale oil production and natural fracture associated with basement fault in the Bakken shale in the Williston basin, North America

利的;但在 Barnett 页岩勘探中,Ding *et al.* (2013)发现在开启的天然裂缝发育区勘探效果并不好,页岩储层含气量低、产量低;而在其他被方解石充填天然裂缝发育区或者天然裂缝不发育区勘探效果反而好.Gale *et al.* (2007)分析认为开启的天然裂缝会导致 Barnett 页岩中页岩气运移散失,而天然裂缝不发育区或者方解石充填天然裂缝发育页岩区,尽管天然裂缝对储层和储量没有贡献,但由于含气量不损失而且压力高,加上 Barnett 页岩各方面地应力差别不大,并且 Barnett 页岩是可压裂的富含硅质页岩,因此这些地方是十分有利的储层和产区.总之,开启的天然裂缝对 Barnett 页岩气的富集和生产是不利因素,闭合的天然裂缝对该页岩气开发也没有不利影响.但 Williston Basin(威利斯顿)盆地 Bakken 页岩油勘探证明,高产井位于受基底断裂控制的开启的天然裂缝发育区,这些天然裂缝可以储集大量页岩油,对生产贡献较大(图 9).

4 结论

(1)页岩的构造和沉积背景控制了页岩有机质富集程度和储层分布.优质页岩储层和页岩油气富集的主要部位并非位于盆地沉积中心,而是受盆地

构造形态、物源供给等多种因素综合控制,且远离物源区的浅水区通常为较好的页岩储层和页岩油气富集区。

(2)层序地层划分时,不宜套用现有的碎屑岩页岩模式,需根据实际的沉积环境进行判定。尽管优质储层都是位于最大海泛面附近,但地层层序和岩相类型不同,导致了页岩油气储层成因不同和岩矿、地化及岩石物理响应特征不同。如优质碎屑岩页岩最大海泛面附近凝缩段表现为富含有机质、富含石英及高放射性伽马特征,而优质碳酸盐页岩最大海泛面附近凝缩段表现为贫有机质、富含细粒度碳酸盐岩和低放射性伽马特征。

(3)大部分所谓的页岩油气主要富集和产于细粒沉积,岩相变化大,只有一部分油气产于真正的富有机质页岩中。不同地区不同层位的页岩储层矿物组成与有机质含量和孔隙发育并非具有相同的关系,富有机质页岩发育在各个沉积盆地中的成因也更加多样化。天然裂缝对页岩油气具有有利和不利的双重作用,尽管开启的裂缝对油气富集和开发有时候有利,但过于发育的天然裂缝有时候可能不利于油气的保存。

References

- Bohacs, K.M., 2015. RE Sheriff Lecture: Order from Chaos—Mudstones as Hydrocarbon Sources, Reservoirs, and Seals: Their Common Characteristics and Genetics, Essential Differences, and Recognition Criteria. *Houston Geological Society Bulletin*, 58(3): 17–21.
- Bowker, K. A., 2007. Barnett Shale Gas Production, Fort Worth Basin: Issues and Discussion. *AAPG Bulletin*, 91(4): 523–533. doi:10.1306/06190606018
- Chalmers, G.R., Bustin, R. M., Power, I. M., 2012. Characterization of Gas Shale Pore Systems by Porosimetry, Pycnometry, Surface Area, and Field Emission Scanning Electron Microscopy/Transmission Electron Microscopy Image Analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig Units. *AAPG Bulletin*, 96(6): 1099–1119. doi:10.1306/10171111052
- Chen, G.S., Dong, D.Z., Wang, S.Q., et al., 2009. A Preliminary Study on Accumulation Mechanism and Enrichment Pattern of Shale Gas. *Natural Gas Industry*, 29(5): 17–21 (in Chinese with English abstract).
- Ding, W.L., Zhu, D.W., Cai, J.J., et al., 2013. Analysis of the Developmental Characteristics and Major Regulating Factors of Fractures in Marine-continental Transitional Shale-Gas Reservoirs: A Case Study of the Carboniferous-Permian Strata in the Southeastern Ordos Basin, Central China. *Marine and Petroleum Geology*, 45: 121–133. doi:10.1016/j.marpetgeo.2013.04.022
- Gale, J.F.W., Reed, R. M., Holder, J., 2007. Natural Fractures in the Barnett Shale and Their Importance for Hydraulic Fracture Treatments. *AAPG Bulletin*, 91(4): 603–622. doi:10.1306/11010606061
- Guo, T. L., Zhang, H. R., 2014. Formation and Enrichment Mode of Jiaoshiba Shale Gas Field, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41(1): 28–36 (in Chinese with English abstract).
- Guo, X., 2014. Rules of Two-Factor Enrichment for Marine Shale Gas in Southern China—Understanding from the Longmaxi Formation Shale Gas in Sichuan Basin and Its Surrounding Area. *Acta Geologica Sinica*, 88(7): 1209–1218 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C.Z., 2017. Breakthrough and Significance of Unconventional Oil and Gas to Classical Petroleum Geology Theory. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S., 2011. Geological Theory Innovations and Advances in Drilling and Completion Technology for Shale Gas Development. *Drilling Petroleum Techniques*, 39(3): 17–23 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S., Tang, X. L., Cai, D. S., et al., 2017. Comparison of Marine, Transitional, and Lacustrine Shales: A Case Study from the Sichuan Basin in China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 150: 334–347. doi:10.1016/j.petrol.2016.12.014
- Jiang, S., Xu, Z. Y., Feng, Y. L., et al., 2016. Geologic Characteristics of Hydrocarbon-Bearing Marine, Transitional and Lacustrine Shales in China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 115: 404–418. doi:10.1016/j.jseae.2015.10.016
- Jiang, S., Zhang, J. C., Jiang, Z. Q., et al., 2015. Geology, Resource Potentials, and Properties of Emerging and Potential China Shale Gas and Shale Oil Plays. *Interpretation*, 3(2): SJ1–SJ13. doi:10.1190/int-2014-0142.1
- Jin, Z.J., Hu, Z.Q., Gao, B., et al., 2016. Controlling Factors on the Enrichment and High Productivity of Shale Gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, Southeastern Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 23(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Kang, Y. S., Deng, Z., Wang, H. Y., et al., 2016. Fluid-Solid Coupling Physical Experiments and Their Implications for Fracturing Stimulations of Shale Gas Reservoirs. *Earth Science*, 41(8): 1376–1383 (in Chinese with English abstract).
- Kargbo, D. M., Wilhelm, R. G., Campbell, D. J., 2010. Natural

- Gas Plays in the Marcellus Shale: Challenges and Potential Opportunities. *Environmental Science & Technology*, 44(15): 5679—5684. doi: 10.1021/es903811p
- Li, X.J., Lu, Z.G., Dong, D.Z., et al., 2009. Geologic Controls on Accumulation of Shale Gas in North America. *Natural Gas Industry*, 29(5): 27—32 (in Chinese with English abstract).
- Nie, H.K., Zhang, J.C., Zhang, P.X., et al., 2009. Shale Gas Reservoir Characteristics of Barnett Shale Gas Reservoir in Fort Worth Basin. *Geological Science and Technology Information*, 28(2): 87—93 (in Chinese with English abstract).
- Soeder, D.J., 2010. The Marcellus Shale: Resources and Reservations. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 91(32): 277—278. doi: 10.1029/2010eo320001
- Tang, X.L., Jiang, Z.X., Huang, H.X., et al., 2016. Lithofacies Characteristics and its Effect on Gas Storage of the Silurian Longmaxi Marine Shale in the Southeast Sichuan Basin, China. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28: 338—346. doi: 10.1016/j.jngse.2015.12.026
- Yang, Y.F., Wang, C.C., Yao, J., et al., 2016. A New Method for Microscopic Pore Structure Analysis in Shale Matrix. *Earth Science*, 41(6): 1067—1073 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.S., Wang, H.J., Ma, F., et al., 2016. Classification and Characteristics of Tight Oil Plays. *Petroleum Science*, 13(1): 18—33. doi: 10.1007/s12182-015-0075-0
- ### 附中文参考文献
- 陈更生,董大忠,王世谦,等,2009.页岩气藏形成机理与富集规律初探.天然气工业,29(5): 17—21.
- 郭彤楼,张汉荣,2014.四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式.石油勘探与开发,41(1): 28—36.
- 郭旭升,2014.南方海相页岩气“二元富集”规律——四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识.地质学报,88(7): 1209—1218.
- 贾承造,2017.论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义.石油勘探与开发,44(1): 1—11.
- 蒋恕,2011.页岩气开发地质理论创新与钻完井技术进步.石油钻探技术,39(3): 17—23.
- 金之钧,胡宗全,高波,等,2016.川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素.地学前缘,23(1): 1—10.
- 康永尚,邓泽,王红岩,等,2016.流—固耦合物理模拟实验及其对页岩压裂改造的启示.地球科学,41(8): 1376—1383.
- 李新景,吕宗刚,董大忠,等,2009.北美页岩气资源形成的地质条件.天然气工业,29(5): 27—32.
- 聂海宽,张金川,张培先,等,2009.福特沃斯盆地 Barnett 页岩气藏特征及启示.地质科技情报,28(2): 87—93.
- 杨永飞,王晨晨,姚军,等,2016.页岩基质微观孔隙结构分析新方法.地球科学,41(6): 1067—1073.