

下扬子地区五峰组-高家边组页岩气形成条件

宋宁¹, 杨帅帅¹, 侯鹏飞¹, 郭海莹¹, 王广利²

1. 常州大学石油工程学院, 江苏常州 213016
2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

摘要 页岩气是一种清洁、高效的非常规能源。通过露头观测、钻井资料、有机地化与储集物性等资料, 分析了下扬子地区上奥陶统五峰组一下志留统高家边组页岩的沉积环境、厚度、分布、埋深、有机质丰度、类型、热演化程度、孔缝特征及岩石矿物组成等。研究表明, 该页岩主体为陆棚沉积, 沉积厚度大, 主要分布在 300~400m 之间、埋深适中; 页岩有机碳含量主要分布在 0.5%~1.0% 之间, 有机质类型为 I 型和 II 型, 镜质组反射率主体分布在 1.5%~2.5% 之间, 处于高成熟-过成熟阶段; 页岩石英含量较高, 普遍分布在 34.2%~55.1% 之间, 微裂缝发育, 有利于压裂改造。研究表明页岩气形成的有利区分布在苏北高邮-海安-句容、皖南泾县-宁国和浙西临安等地区。

关键词 页岩; 有机地球化学; 页岩气; 五峰组; 高家边组; 下扬子地区

中图分类号 TE132.2

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.33.006

Geological Conditions of Shale Gas in the Wufeng-Gaojiabian Formations in Lower Yangtze Area

SONG Ning¹, YANG Shuaishuai¹, HOU Pengfei¹, GUO Haiying¹, WANG Guangli²

1. School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, Jiangsu Province, China
2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract Shale gas is a clean, efficient unconventional energy resource, therefore, it is of great significance to accelerate the shale gas exploration in Lower Yangtze Area to adjust the energy structure in China. Based on the outcrop, the well data, the geochemical and reservoir property in Lower Yangtze Area, this paper analyses the sedimentary environment, the thickness, distribution, the buried depth, the organic matter contents and types, the maturity and the reservoir characteristics of shale in Wufeng-Gaojiabian Formations of Upper Ordovician to Lower Silurian. It is shown that the Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Gaojiabian Formation of Lower Yangtze Area is formed in shelf sedimentary environments with a thickness of 300-400m in a moderate depth. Wufeng-Gaojiabian Formations contain 0.5% to 1.0% of organic carbon, consistent with type I and II kerogen. The vitrinite reflection values R_o are in the range of 1.5%-2.5%, indicating a high mature to over mature stage for gas generation. The quartz content in the mineral ranges from 34.2% to 55.1% in this set of shale with rich micro-fracture, which is good for fracturing. The thickness of shale, the buried depth, the organic carbon and the maturity show that Gaoyou-Haian-Jurong of Northern Jiangsu, Jingxian-Ningguo of Southern Anhui, Linan of Western Zhejiang areas are considered favorable zones for the shale gas formation.

Keywords shale; organic geochemistry; shale gas; Wufeng Formation; Gaojiabian Formation; Lower Yangtze Area

0 引言

页岩气指滞留在页岩及其夹层中的天然气, 赋存形式主要为游离态和吸附态^[1-3]。美国页岩气成功开发表明页岩储层

可形成具有开采价值的页岩气藏。气体成因类型、沉积环境、有机质丰度与类型、热演化程度、储层特征是影响页岩气聚集和开采的重要因素, 埋深、厚度与分布、可采储量是控制经

收稿日期: 2013-06-15; 修回日期: 2013-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172126)

作者简介: 宋宁, 高级工程师, 研究方向为油气田地质, 电子邮箱: songni@sohu.com

济效益的关键因素^[4]。

下扬子地区下古生界页岩具有分布范围广、厚度大、有机碳含量高、热演化程度较高等特点^[5-12]。潘继平等^[13]分析下扬子古生界页岩的地质和地球化学特征等,认为具备页岩气发育条件。陈桂华等^[14]对下扬子地区下寒武统页岩进行评价,认为东南部和东北部是有利勘探区域。严德天等^[15]认为扬子地区上奥陶统—下志留统页岩的沉积环境有利于有机质的保存。通过野外地质调查与常规石油勘探积累的资料,对下扬子地区上奥陶统五峰组—下志留统高家边组页岩的地质特征、有机地球化学特征及储层特性等进行研究,揭示页岩气形成条件,并初步探讨页岩气的有利区。

1 区域地质特征

下扬子地区位于长江下游,一般指被郯庐断裂和江绍断裂所分割组成的大型沉积盆地^[6],面积 $22.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在构造上属于扬子板块的一部分,东北部为南黄海,西南部和中扬子地区相连,西北部与华北板块相连,东南部与华南板块相邻,构造单元由南东向北西划分为钱塘拗陷、江南隆起、南京拗陷、苏北斜坡,主要构造线呈北东向展布(图1)。

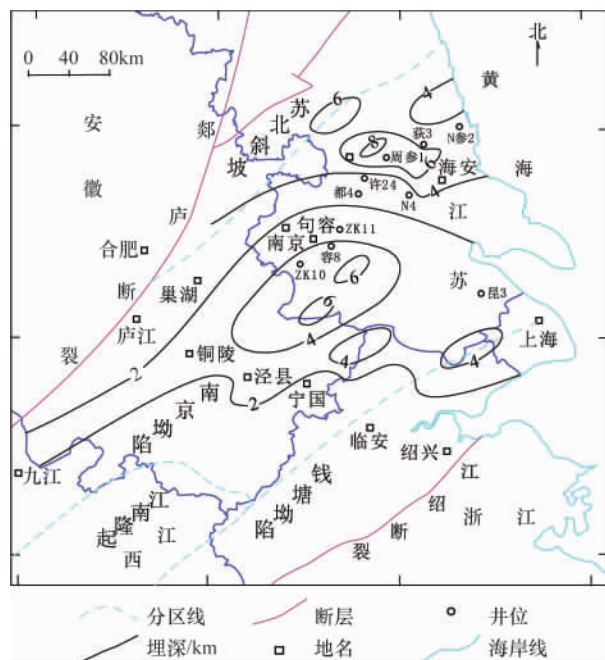


图1 下扬子地区构造单元与五峰组—高家边组页岩底埋深
Fig. 1 Structure unit and buried depth of Wufeng-Gaojiabian Formation shale in Lower Yangtze Area

1.1 地层与沉积

下扬子地区上奥陶统—下志留统页岩分布较广。上奥陶统暗色页岩主要分布于五峰组^[13],以黑色硅质页岩、碳质页岩为主,厚度一般小于30m;下志留统高家边组暗色页岩主要分布在中下部^[8],以深灰色泥页岩、硅质页岩为主,厚度一般

为50-200m。

晚奥陶世下扬子地区在半封闭海盆还原环境中沉积了黑色硅质页岩、黑色泥岩与泥质粉砂岩互层^[9],与上覆下志留统高家边组假整合接触。晚奥陶世—早志留世下扬子地区海侵由北西向南东逐渐扩大^[10],主体演变为陆棚沉积环境。位于南京拗陷的句容—海安、泾县—宁国一带为深水陆棚区,沉积了厚度大、有机质丰度高的暗色页岩。

1.2 构造演化

震旦纪—三叠纪下扬子地区构造环境比较稳定^[11],除早、中泥盆世地层存在微角度不整合外,其余时期均以假整合、整合为主,属于连续沉积的陆缘海和陆表海盆地。三叠纪末扬子板块与华北板块拼接^[7],区域挤压应力使下扬子地区形成北西和南东对冲推覆构造,同时伴生北东向断层。晚白垩世—古近纪,区域应力由原来的挤压转变为南东和北西向的拉张^[8],进一步改造古生界对冲褶皱,北西向走滑活动较强,发育北东向—北西向断裂,主体断层断距较大、延伸较远。

2 页岩地质特征

2.1 页岩厚度与分布

受江南隆起、郯庐断裂和江绍断裂的影响,下扬子地区五峰组—高家边组暗色页岩整体呈北东向带状展布,厚度集中分布在200-500m之间(图2)。南京拗陷深水陆棚区暗色页岩厚度较大,泾县—宁国—临安一带沉积厚度为400-500m,最大厚度798m;高邮—海安—句容一带沉积厚度为300-400m,最大厚度664m。浅水陆棚区暗色页岩厚度相对较小,沉积厚度一般小于300m。

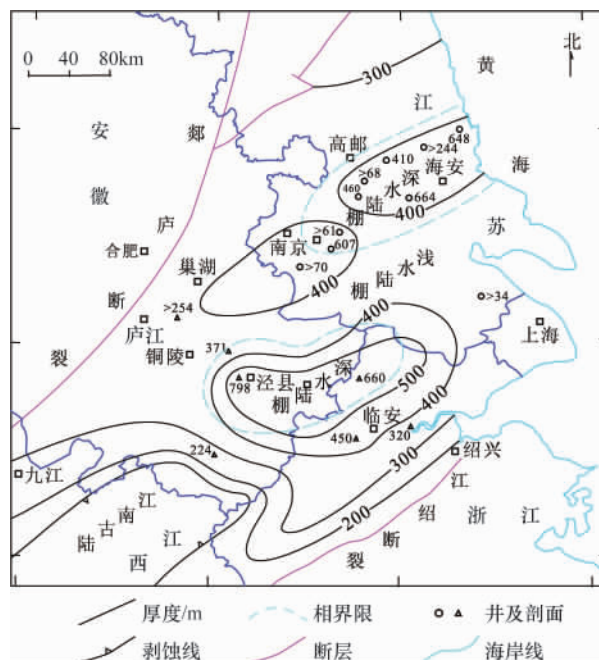
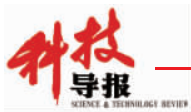


图2 下扬子地区五峰组—高家边组页岩厚度与沉积
Fig. 2 Thickness and sedimentary facies of Wufeng-Gaojiabian Formation shale in Lower Yangtze Area



2.2 埋深

主要受印支后的构造运动影响,五峰组—高家边组埋深变化明显,主体呈现出西浅东深、南浅北深的趋势(图1)。长江沿线两侧的苏南、苏北东部地区五峰组—高家边组底界埋深普遍较大,主体介于4000~6000m,局部地区埋深超过6000m。受江南古陆抬升影响,皖南—浙西北地区五峰组—高家边组底界埋深不大,主体分布在2000~4000m之间,如泾县—宁国—临安等地区底界埋深约2000m。

3 页岩有机地球化学特征

3.1 有机质丰度

有机碳含量常作为评价暗色页岩有机质丰度的指标。高有机碳含量的页岩具有较强的生烃能力和吸附能力^[19-21]。Bustin^[22]总结北美页岩产气盆地特征,认为页岩气形成的有机碳TOC含量下限值为0.5%(质量分数,下同)。

目前钻遇五峰组—高家边组的井主要集中在江苏地区(井位置见图1),N参2井、获3井、周参1井、许24井、都4井、N4井等有机碳含量主要分布在0.29%~2.37%之间。岩心样品分析表明五峰组—高家边组页岩有机碳含量变化范围大,下部总体高于上部。如N4井剖面下部暗色页岩有机碳含量分布在0.57%~2.64%之间,平均值为0.88%;上部有机碳含量较低,分布在0.03%~0.47%之间(图3)。平面上,受沉积相控制有机碳含量高的地区主要分布在页岩的厚度中心。高邮、句容和海安地区页岩有机碳含量主要分布在0.5%~1.0%之间,如周参1、许24和获3井有机碳含量分别为0.99%、0.52%、0.8%;皖南—浙西北地区有机碳含量一般大于1.0%,如泾县、宁国、安吉页岩剖面实测有机碳含量分别为1.01%、1.16%和1.26%(图4)。

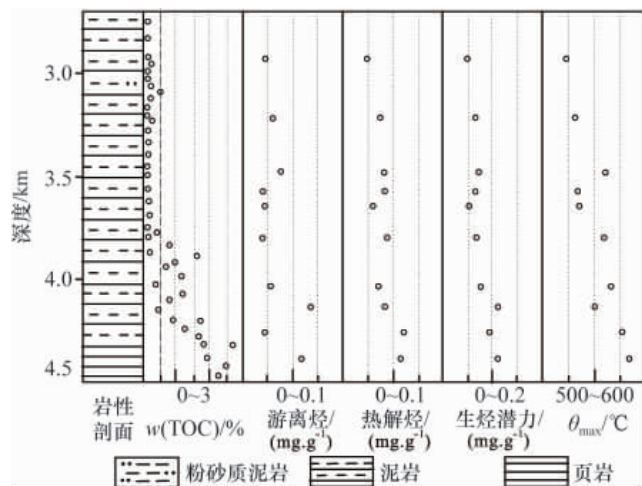


图3 N4井高家边组TOC剖面

Fig. 3 TOC section of the Gaojiabian Formation in N4 well

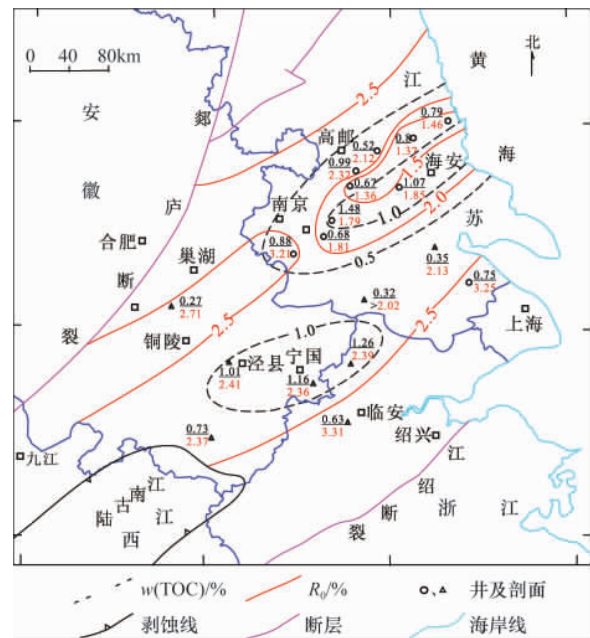


图4 下扬子地区五峰组—高家边组页岩有机碳与成熟度
Fig. 4 Organic carbon and thermal maturity of Wufeng-Gaojiabian Formation shale in Lower Yangtze Area

3.2 有机质类型

根据美国的勘探经验,产气页岩盆地中有机质类型以I型和II型为主^[23],具有较强的吸附能力。下扬子地区五峰组—高家边组干酪根显微组分以腐泥组和壳质组为主,显示出较好的生烃能力。页岩腐泥组含量(体积分数,下同)主要分布在34.67%~92.33%之间,平均为64.69%;壳质组含量分布在1.00%~53.33%之间,平均为18.80%;镜质组+惰质组含量相对较少,分布在4.00%~44.67%之间(图5)。族组成中饱芳比值和干酪根碳同位素可划分有机质的类型^[6],饱芳比值大于3.0,干酪根碳同位素小于-2.9‰为I型;饱芳比值在0.8~3.0之间,

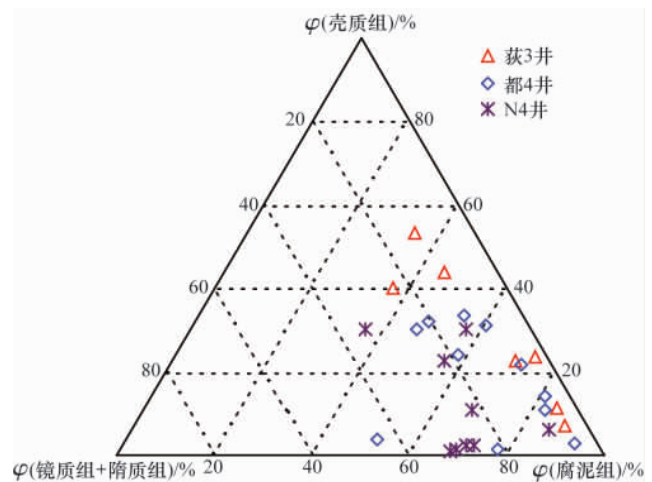


图5 下扬子地区五峰组—高家边组页岩有机显微组分

Fig. 5 Organic macerals of Wufeng-Gaojiabian Formation shale in Lower Yangtze Area

干酪根碳同位素分布在-2.9%~-2.6%之间为 II 型。五峰组—高家边组页岩饱芳比值分布在 2.3~38.1 之间,干酪根碳同位素值小于-2.943%。综合干酪根显微组分组成、饱芳比值和干酪根碳同位素值的分布等信息,认为五峰组—高家边组页岩有机质类型为 I-II 型。

3.3 有机质成熟度

页岩中丰富的有机质是生成油气的物质基础^[29],有机质达到一定的热演化程度才能开始大量生烃。所有类型的有机质在高温演化条件下均可生成天然气,因此热成熟度是页岩气生成的控制因素。美国含气页岩有机质热成熟度值一般分布在 0.4%~3.0%之间^[31]。

下扬子地区五峰组—高家边组暗色页岩由于褶皱和冲断推覆构造作用,热演化程度存在差异。五峰组—高家边组页岩镜质体反射比 R_o 主体分布在 1.5%~2.5% 之间,干酪根元素分析 H/C 值多数处于 0.2~0.6 之间,页岩 θ_{max} 的值介于 528~587°C 之间,处于高早期成熟—过成熟阶段。平面上,皖

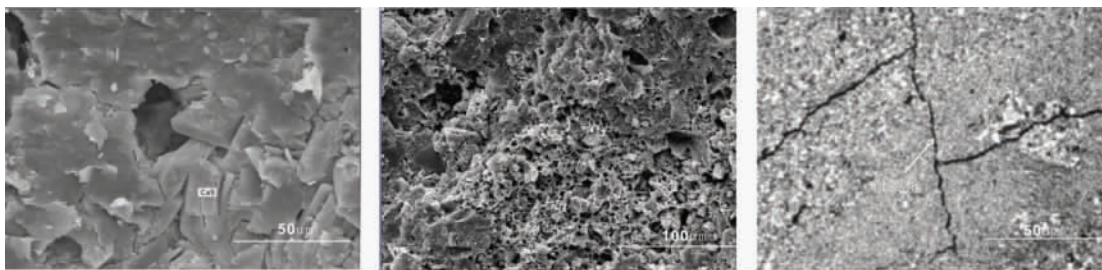
南—浙西北地区 R_o 值一般分布在 2.0%~2.5% 之间,如泾县、宁国剖面暗色页岩的实测 R_o 值分别为 2.41%、2.32%;钱塘坳陷 R_o 值超过 2.5%,如临安剖面 R_o 值为 3.21%,处于过成熟阶段;苏北的句容—海安一带 R_o 值低于 2.0%,如周参 1、获 3、都 4 和 N4 井的 R_o 值分布在 1.32%~1.85% 之间(图 4),处于高成熟早期生气阶段。

下扬子地区五峰组—高家边组页岩具有沉积厚度大、有机碳含量高、有机质类型好、热演化程度高等特点,与美国含气页岩具有相似的特征,初步认为具备形成页岩气的条件。

4 储层特性

4.1 孔缝特征

下扬子地区五峰组—高家边组页岩岩心测试的孔隙度一般分布在 0.27%~1.28% 之间,平均孔隙度为 1.02%,渗透率为 $0.0037 \times 10^{-3} \sim 0.318 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。扫描电镜显示五峰组—高家边组页岩中微空隙和微裂缝发育良好(图 6)。残



(a) 黑色硅质泥岩残余原生孔,含石膏孔径 1~20 μm ,汤山镇剖面
(a) Black siliceous mudstone of primary Intergranular pore with gypsum aperture 1~20 μm
(b) 黑色碳质页岩发育的微孔隙孔径 1~15 μm ,汤山镇剖面
(b) Black carbonaceous shale of micropore aperture 1~15 μm , Tangshan town section
(c) 黑色页岩中微裂缝线,扫描电镜,狮子口剖面
(c) Black shale of micro cracks scanning electron microscopes Shizikou section

图 6 下扬子地区五峰组—高家边组页岩微孔隙与微裂缝扫描电镜照片

Fig. 6 Stereoscan photograph of micro-pores and micro-fractures of Wufeng-Gaojiabian Formation shale in Lower Yangtze Area

余原生孔隙主要分散在片状黏土中的粉砂质颗粒之间,孔隙孔径为 1~20 μm 不等,孔隙边缘不规则,为页岩气的聚集提供储存空间。微裂缝发育情况良好,裂缝宽度为 10~100 μm ,有利于页岩的压裂改造。

4.2 矿物成分

下扬子地区五峰组—高家边组富有机质页岩主要由石英和黏土组成,石英含量主要集中在 34.2%~55.1% 之间,平均含量为 38.7%,黏土含量主要分布在 43.2%~68.6% 之间,平均含量为 56.4%(图 7, Barnett 页岩数据源自文献[4])。黏土矿物中伊利石含量较高,分布在 60%~99% 之间,平均为 76.4%;伊蒙混层含量分布在 6%~29% 之间,平均为 20.2%;绿泥石含量相对较少,平均为 3.4%。美国 Barnett 页岩石英含量主要分布在 35%~55% 之间,从矿物成分看,下扬子地区五峰组—高家边组富有机质页岩系的硅质含量与美国 Barnett 页岩相当,有利于压裂过程中诱导裂缝的形成。

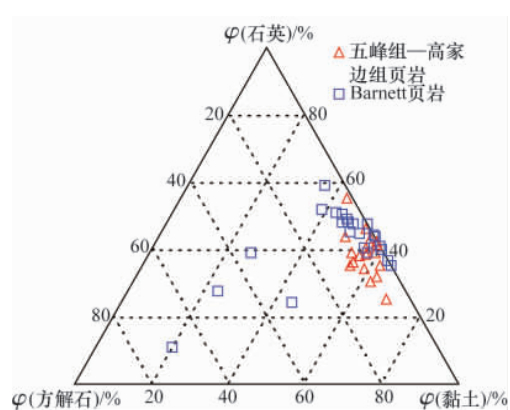


图 7 下扬子地区五峰组—高家边组页岩与美国 Barnett 页岩矿物组成含量

Fig. 7 Mineralogical composition of Wufeng-Gaojiabian Formation shale in Lower Yangtze Area and Barnett shale in US

5 有利区评价

目前,关于下扬子地区页岩气的研究处于初步阶段,可供分析的资料较少。根据页岩气形成的主控因素,主要选取页岩的厚度、埋深、有机碳含量、成熟度等指标,初步探讨页岩气的有利区。

(1) 高邮—句容—海安一带。其五峰组—高家边组页岩形成于深水陆棚环境,沉积厚度主体分布在300~400m之间,埋深适中;有机碳含量分布在0.5%~1.0%之间;热演化程度适中, R_o 值主要分布在1.5%~2.0%之间,处于高成熟早期生气阶段,尚具有生气潜力,是值得关注的区域。

(2) 泾县—宁国—临安一带。其位于深水陆棚区的页岩沉积厚度较大,分布在400~500m之间,埋深适中;有机碳含量普遍大于1%;页岩热演化程度较高, R_o 值主要分布在2.0%~2.5%之间,处于过成熟生气阶段,是页岩气形成的有利区域。

6 结论

(1) 下扬子地区五峰组—高家边组页岩形成于浅水—深水陆棚环境,沉积厚度大,分布广,有机质含量丰富,有机质类型主要为I-II型,热演化程度主体处于高成熟—过成熟阶段,具备页岩气发育条件。

(2) 下扬子地区五峰组—高家边组页岩微裂缝发育,具有一定聚气空间。页岩矿物成分中石英含量较高,有利于后期压裂过程中微裂缝的产生,增加页岩气的渗流能力。

(3) 综合下扬子地区五峰组—高家边组页岩厚度、埋深、有机碳含量、成熟度等信息,认为下扬子地区页岩气形成的有利区大致分布在苏北高邮—句容—海安、皖南泾县—宁国、浙西临安地区。

参考文献 (References)

[1] Arangundate O, Sohrabi M. A review of recent developments and challenges in shale gas recovery[C]. Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Saudi Arabia: 8–11 April, 2012.

[2] 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业, 2009(5): 27–32.
Li Xinjing, Lü Zonggang, Dong Dazhong, et al. Natural Gas Industry, 2009(5): 27–32.

[3] 王道福, 高世葵, 董大忠, 等. 中国页岩气资源勘探开发挑战初论[J]. 天然气工业, 2013, 33(1): 1–10.
Wang Daofu, Gao Shikui, Dong Dazhong, et al. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 1–10.

[4] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale gas systems: The mississippian Barnett shale of north-central texas as one model for thermogenic shale gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475–499.

[5] 聂海宽, 唐玄, 边瑞康, 等. 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, et al. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(4): 484–491.

[6] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(二): 南方四套区域性海相烃源岩的地球化学特征[J]. 海相油气地质, 2009, 14(1): 1–15.
Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, et al. Marine Origin

Petroleum Geology, 2009, 14(1): 1–15.

[7] 张淮, 周荔青, 李建青, 等. 下扬子地区海相组合油气勘探潜力分析[J]. 石油实验地质, 2006, 28(1): 15–20.
Zhang Huai, Zhou Liqing, Li Jianqing, et al. Experimental Petroleum Geology, 2006, 28(1): 15–20.

[8] 王清晨, 严德天, 李双建, 等. 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.
Wang Qingchen, Yan Detian, Li Shuangjian, et al. Acta Petrolei Sinica, 2008, 82(3): 289–297.

[9] 胡书毅, 文玲, 田海芹, 等. 扬子地区奥陶纪古地理与石油地质条件[J]. 中国海上油气: 地质, 2001, 15(5): 317–321, 334.
Hu Shuyi, Wen Ling, Tian Haiqin, et al. China Offshore Oil and Gas: Geology, 2001, 15(5): 317–321, 334.

[10] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三): 南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J]. 海相油气地质, 2009, 14(2): 1–19.
Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, et al. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(2): 1–19.

[11] 刘小平, 潘继平, 董清源, 等. 苏北地区古生界页岩气形成地质条件[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 1100–1108.
Liu Xiaoping, Pan Jiping, Dong Qingyuan, et al. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 1100–1108.

[12] 刘石磊. 下扬子地区下志留统页岩气资源分布[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
Liu Shilei. The distribution of shale gas resource in the Lower Yangtze Region at Lower Silurian[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.

[13] 潘继平, 乔德武, 李世臻, 等. 下扬子地区古生界页岩气地质条件与勘探前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2): 337–343.
Pan Jiping, Qiao Dewu, Li Shizhen, et al. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2): 337–343.

[14] 陈桂华, 祝彦贺, 徐强, 等. 页岩气成藏的四性特征及对下扬子地区页岩气勘探的启示[J]. 中国石油勘探, 2012, 17(5): 63–70.
Chen Guihua, Zhu Yanhe, Xu Qiang, et al. China Petroleum Exploration, 2012, 17(5): 63–70.

[15] 严德天, 王清晨, 陈代钊, 等. 扬子及周缘地区上奥陶统—下志留统烃源岩发育环境及其控制因素[J]. 地质学报, 2008, 82(3): 321–327.
Yan Detian, Wang Qingchen, Chen Daizhao, et al. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(3): 321–327.

[16] 郭念发, 刘德法, 尤效忠. 下扬子区古生界油气地质条件及勘探选区[J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(1): 1–7.
Guo Nianfa, Liu Defa, You Xiaozhong. China Petroleum Exploration, 1998, 25(1): 1–7.

[17] 张建球. 下扬子区中、古生界构造演化与油气藏形成史[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(2): 146–149.
Zhang Jianqiu. Oil & Gas Geology, 1996, 17(2): 146–149.

[18] 谈迎, 邱旭明, 李亚辉, 等. 下扬子区中、古生界变形结构分区[J]. 复杂油气藏, 2011, 4(1): 14–18.
Tan Ying, Qiu Xuming, Li Yahui, et al. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2011, 4(1): 14–18.

[19] Bowker K A. Barnett shale gas production, Fort worth basin: issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 523–533.

[20] Slat R M. Important geological properties of unconventional resource shales[J]. Central European Journal of Geosciences, 2011, 3(4): 435–448.

[21] Shirley K. Shale gas exciting again[J]. AAPG Explorer, 2001, 22(3): 24–25.

[22] Bustin R M. Gas shale tapped for big pay[J]. AAPG Explorer, 2005, 26(2): 5–7.

[23] Hill R J, Zhang E, Katz B J, et al. Modeling of gas generation from the barnett shale fort worth basin texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 501–521.

[24] Curtis J B. Fractured shale gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921–1938.

(责任编辑 赵业玲)