

上扬子地区下寒武统页岩气资源潜力

陈 波

(油气资源与勘探技术教育部重点实验室(长江大学), 湖北省荆州市 434023)

兰正凯

(长江大学地球科学学院, 湖北省荆州市 434023)

摘 要: 上扬子地区下寒武统普遍发育黑色泥页岩, 这套黑色泥页岩是早寒武世早期全球性海平面上升时, 在上扬子地区形成区域性深水滞留缺氧的陆棚到斜坡环境沉积的, 其岩性为黑色碳质页岩、黑色硅质页岩、石煤及深灰色粉砂质页岩。泥页岩有机碳含量高, 最高达到12%, 在剖面上有机碳含量由下向上逐渐减小, 高有机质含量泥页岩主要分布在剖面下部。在空间上富含有机质的厚层泥页岩分布在川西南—黔北、渝东—湘鄂西和川东北, 为泥页岩勘探最有潜力的地区。

关键词: 上扬子地区; 下寒武统; 页岩气; 资源潜力

中图分类号: TE112 **文献标识码:** A

1 地质背景

上扬子地区下寒武统底部普遍发育一套厚度不等的黑色岩系, 特征典型, 分布广泛。根据上扬子地区地层划分(表1), 黑色岩系主要发育在梅树村阶和筇竹

寺阶, 不同地区组名有所不同。上扬子地区从震旦纪晚期开始, 逐步进入稳定的热沉降阶段, 并形成“两盆夹一台”的构造格局, 扬子地台主体克拉通盆地, 台地北部为活动大陆边缘, 南部为被动大陆边缘。早寒武世初, 上扬子地区整体下沉, 大部分地区演变为陆棚沉积

表1 上扬子地区下寒武统分区表
Table 1 Zoning of the Lower Cambrian in the Upper Yangtze Region

统	阶	上扬子地区				
		黔 北	川中—川西南	川东南—湘西	川东北	湘鄂西
上覆地层		高台组	陡坡寺组	高台组	陡坡寺组	谭家庙组
下寒武统	龙王庙阶	清虚洞组	龙王庙组	清虚洞组	石龙洞组	石龙洞组
	沧浪铺阶	金顶山组	沧浪铺组	金顶山组	天河板/石牌组	天河板/石牌组
		明心寺组		明心寺组	仙女洞组	水井沱组
	筇竹寺阶	牛蹄塘组	筇竹寺组	牛蹄塘组	筇竹寺组	天柱山组
	梅树村阶					
下伏地层		灯影峡组	灯影峡组	灯影峡组	灯影峡组	灯影峡组

第一作者简介: 陈波, 男, 教授, 1989年本科毕业于江汉石油学院地质系, 2007年博士毕业于中国地质大学(武汉)石油系, 主要从事层序地层学与油藏描述研究工作。

收稿日期: 2009-03-25

环境,此时沉积格局北西高、南东低,自西向东南分别由古陆、滨岸、浅水陆棚、深水陆棚、斜坡及盆地组成。下寒武统总体在早期短暂的快速海进和缓慢海退的沉积背景下沉积,早期为深水陆棚,后期沉积环境逐渐变浅,由早期深水陆棚逐渐向浅水陆棚及潮坪演化,在早期深水陆棚沉积期沉积了一套黑色泥页岩建造,为南方海相的主力烃源岩层之一,有机碳含量(TOC)达到12%以上,烃源岩演化程度高,具有潜在的页岩气勘探潜力。

2 岩性、岩相特征

在上扬子地区下寒武统黑色岩系主要由黑色页岩、石煤、硅质页岩、硅岩、粉砂岩、磷块岩、重晶石岩等组成。黑色岩系颜色随着成分的变化,特别是碳质、钙质和硅质成分的变化,而呈深灰色、浅灰色。硅质含量较低时,硬度变小,均匀性变差。主要矿物组合为石英、伊利石和黄铁矿以及少量重晶石、磷灰石和方解石。

泥页岩出现在牛蹄塘组、明心寺组(筇竹寺组)下、中部。页岩有纹层及页理构造,泥岩无纹层和页理构造,常混入钙质、铁质、硅质、碳质等化学成分。泥页岩常与泥质粉砂岩、粉砂岩组成韵律层,岩石中不同组分如黏土矿物、碎屑、硅质、碳质等各自顺纹层状分布,使岩石显示出纹层状构造特征。少量颗粒在岩石中分布不均匀,碎屑颗粒以粉细砂级碎屑为主,呈次棱角状、次圆状,磨圆度中等而分选性极好,其矿物成分为石英、长石、岩屑、云母及其他矿物,矿物成熟度偏低。对于含粉砂质泥岩来说,常见粉砂级碎屑,细砂级碎屑少见。含硅质、粉砂质泥岩、页岩的黏土矿物含量要低一些,碎屑和硅质含量要高一些。

石煤在上扬子地区是中国南方早寒武世形成的重要时期,凡有下寒武统底部黑色页岩发育的地区,或多或少都有石煤层存在。石煤由无机组分和有机组分两部分组成。从整体来看,石煤的有机组分略低于无机组分。无机组分主要为硅质、泥质、粉砂质、钙质等,有机组分都已碳化为碳质物,呈凝胶基质和腐泥基质,其中常见有生物结构的有机形态分子,如藻丝体、菌类体、胶质感、超微生物等。

早寒武世初期是全球海平面快速上升期,上扬子地区沉积的黑色岩系与全球同期发育的黑色岩系具有可比性,早寒武世梅树村期在晚震旦世灯影峡期海退后的一次海侵背景下接受沉积,扬子克拉通主要是由

碳酸盐岩、磷块岩、硅质岩组成的缓坡。筇竹寺期海平面继续上升,使整个南方都遭受海侵,早期普遍沉积了几十米厚的黑色碳质页岩、碳质泥岩、粉砂岩、粉砂质页岩夹碳泥硅质岩以及薄层状磷质岩透镜体,具水平层理,含结核状或星点状黄铁矿(图1)。在最大海侵及高海位之后,沧浪铺期海平面相对下降,沉积了黄绿色泥岩、页岩及部分粉细砂岩,碎屑物质基本上是以悬浮状态搬运,与大量的泥质混杂,使水体浑浊,水平层理发育。产有大量的底栖、半游泳三叶虫及浮游盘虫等化石,多数保存都比较好,说明海水已开始变浅,为适于底栖生物生存的、离岸较远的低能水域浅水陆棚环境。在湘西大庸一带,沧浪铺早期仍然以黑色碳质页岩为主,晚期为含碳质页岩、钙质页岩和粉砂岩、粉砂质页岩、泥灰岩,底栖三叶虫大大减少,而浮游类三叶虫繁盛,表明仍然处于深水陆棚—斜坡相(图2)^[1]。

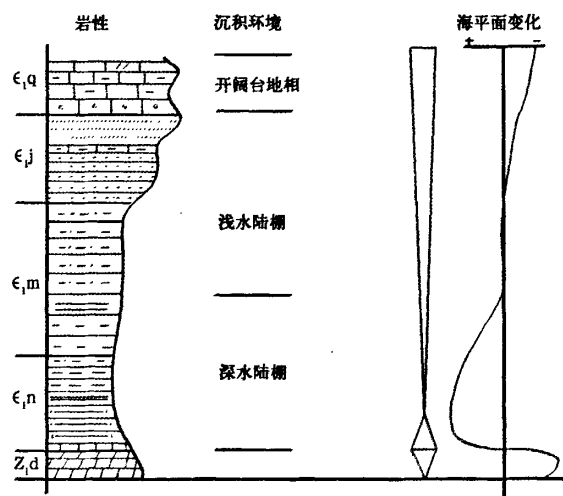


图1 下寒武统沉积环境与海平面变化

Fig.1 Depositional environment and sea-level change of Lower Cambrian

Z_{1d}—灯影组, ε_{1n}—牛蹄塘组, ε_{1m}—明心寺组,
ε_{1j}—金顶山组, ε_{1q}—清虚洞组

3 下寒武统烃源岩特征

下寒武统黑色岩系主要分布筇竹寺组和沧浪铺组,与之相当的还有川黔鄂的牛蹄塘组或水井沱组,层位相当稳定,是南方海相重要的区域性烃源岩。在有机质丰度、类型和成熟度等烃源岩评价方面进行了大量的研究工作^[2-4],认为乐山龙女寺古隆起在早寒武世即已存在,寒武系泥质烃源岩的主要分布区域在乐山龙女

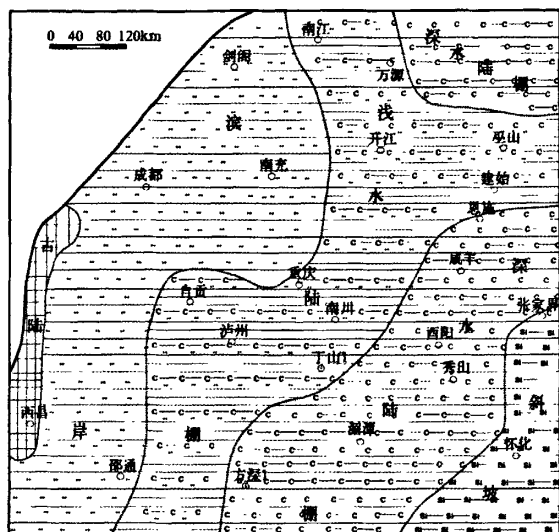


图2 四川盆地筇竹寺期沉积岩相古地理图

Fig.2 Sedimentary facies and palaeogeographic map of Qiongzhusi Formation in Sichuan Basin

寺古隆起南北两侧斜坡及川东斜坡地区。在川北南江一带厚达180~200m,川中资阳—内江一带厚达300m,川南绥江—宜宾—自贡一带厚达300~400m。陕西镇坪—巫溪—湖北咸丰地区深灰色和黑色泥岩、含硅质泥岩、粉砂质泥岩或泥质粉砂岩厚度达100~500m。从页岩气潜力评价的角度,只有具有一定有机质丰度的泥页岩才是有效的。

3.1 烃源岩丰度

对页岩气的潜力而言,有机碳含量是一项重要指标,根据梁狄刚等^[5,6]、陈兰^[11]对川北、川南、黔北等地区的研究,在川北南江剖面(图3)^[5],总有机碳含量最大达到4.8%,有机碳含量大于2.0%的泥页岩厚度超过40m,以有机碳含量大于1.0%为限,有效厚度接近60m。在黔北遵义地区黄家湾剖面,最大有机碳含量达到7.91%,有机碳含量大于1%的累计厚度超过60m(图4)^[11]。在湘西张家界柑子坪,最大有机碳含量达到12.31%,最小为0.27%,平均为7.41%,但厚度不超过25m(图5)^[11]。

从上述剖面烃源岩厚度与有机碳含量看,明显受到沉积环境的控制,川北南江剖面与黔北遵义剖面处于台内陆棚沉积,烃源岩厚度大、有机碳含量相对低,反映水浅、沉积速度快的特点;张家界柑子坪剖面处于外陆棚—斜坡带沉积,水体较深、沉积速度慢,泥页岩

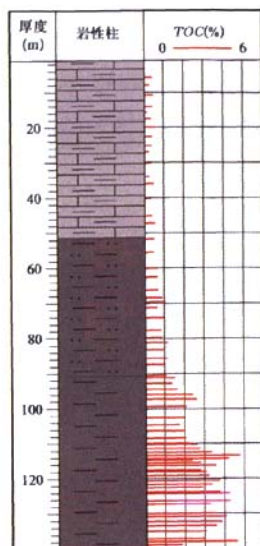


图3 川北南江下寒武统牛蹄塘组 TOC 剖面

Fig.3 TOC section of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Nanjiang, northern Sichuan Province



图4 黔北遵义黄家湾下寒武统牛蹄塘组 TOC 剖面

Fig.4 TOC section of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Huangjiawan, Zunyi, northern Guizhou Province

有机碳含量高,但烃源岩厚度小。从剖面有机碳含量的垂向变化看,高有机碳含量的泥页岩段集中在底部,向

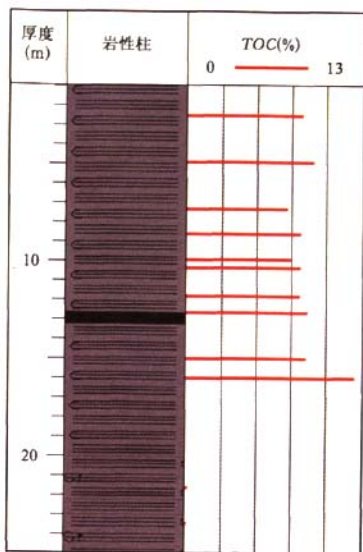


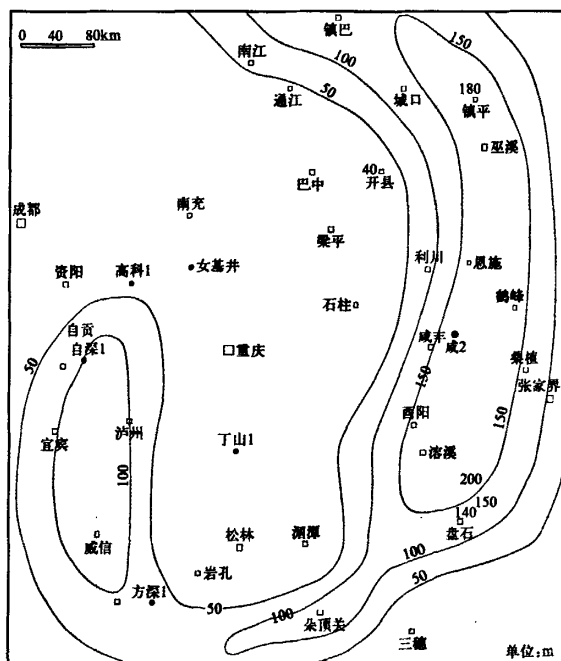
图5 湘西张家界柑子坪下寒武统牛蹄塘组 TOC 剖面
Fig.5 TOC section of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Ganziping, Zhangjiajie, western Hunan Province

上有机碳含量逐渐减小,并以南江剖面最典型,而南部的黄家湾剖面有机碳含量总体向上减小外,在下部出现两个高峰段。对于这种特征不同研究者存在不同解释,梁狄刚认为^[5],下寒武统是在一次快速海进与缓慢海退过程中形成的,体现在有机碳含量的垂向变化为早期海进时水体较深,有利于有机质的保存,随着水体变浅,有机碳含量逐渐减小,而南部出现两次峰值,与南缘的热水事件有关。另一种观点^[11]认为是在南缘出现两次海平面的升降形成的,并有地球化学元素证据。总体而言,早寒武世,川北地区受秦岭洋的影响,而川南、黔北和湘鄂西受华南洋的影响,由于华南洋正处于逐渐关闭期,两者对台地沉积环境的影响不同造成了这种差异。

3.2 烃源岩分布

在上扬子地区,对下寒武统烃源岩的分布认识基本一致,下寒武统烃源岩围绕川中古隆起分布,主要发育在川东北—鄂西—湘西—黔西北—黔中及川南一带。但对烃源岩厚度的统计标准不同,早期可能把下寒武统暗色泥页岩全部当作烃源岩统计,其厚度都在50~500m之间^[2]。近年来梁狄刚等^[5]在对一些剖面 and 井进行系统的 TOC 标定后发现,其有效厚度大幅度减小,如丁山1井泥页岩厚195m,总有机碳含量大于0.5%的

泥页岩厚度只有2m;高科1井泥页岩厚170m,总有机碳含量大于0.5%的泥页岩厚度只有80m,总有机碳含量大于1.0%的泥页岩厚度只有40m。这些数据说明,由于受海平面变化的控制和沉积环境的影响,下寒武统泥页岩的优质烃源岩主要集中在剖面的下部,并表现出越接近台地南北缘,其泥页岩的厚度越接近烃源岩的厚度。根据前人编制烃源岩分布规律,按照页岩气层有机碳含量大于1.0%的标准编制了上扬子地区潜在页岩气层的厚度分布(图6)。



厚度可在50~150m以上;黔东北—黔中厚30~100m,黔西北厚30~100m;川南厚40~150m;川西成都—广元一带厚度小于20m。川中南充—重庆—石柱区域内没有较厚寒武系烃源岩分布。

4 资源潜力

下寒武统黑色岩系主要为含碳质或含硅质泥页岩,局部夹薄层粉砂质泥页岩,在空间上分布稳定,从储层的角度属于均质单一厚层或厚层夹薄隔层,属于非常有利的一类页岩气储层。黑色岩系有机质丰度高,特别是在相对发育的地区,剖面下部有机碳含量超过2.0%的厚度一般不少于30m,显示单位体积的有机质丰度高。

在上扬子地区,以总有机碳含量大于1.0%作为有效页岩气储层的标准,初步推算厚度超过50m的气合层分布范围接近 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$,主要分布在川西南—黔北、川东北、鄂西渝东及湘西地区。

如果从储层性质、有机质生烃潜力及有效储层厚度等影响页岩气资源总量和开发潜力的角度分析,下寒武统页岩气资源潜力巨大,有利于页岩气开发,但还有一些控制页岩气储量及影响开发效率的关键因素尚不清楚:

(1) 下寒武统黑色泥岩以I—II型干酪根为主,有机质演化程度过高, $R_o < 2.5\%$,虽然有机质的高成熟度部分弥补了有机质生气能力偏低的影响,但过高的成熟度是否影响有机质吸附气体的能力,根据目前测定的有机质成熟度推算,有机质曾经经历300~400℃的高温,是否会导致泥页岩的吸附气体能力降低?由于目前没有实际测得页岩含气饱和度,还无法得知其影响程度。特别是有机质油气生成之后经历多次构造抬升改造,是否会导致泥页岩出现脱吸现象,降低含气饱和度。

(2) 根据对Fort Worth盆地Barnett泥岩研究^[8~11],泥页岩中泥质成分在50%左右,厚层状连续分布且裂缝发育的储层最有利于页岩气开发,从下寒武统泥页岩特征看,无论是岩性还是泥页岩的单层厚度、裂缝发育程度都有利于页岩气的开发。目前缺乏一些实验室关于孔隙度、渗透率方面的测试数据支撑。

5 认识

从上述分析可以得出如下认识:

(1) 上扬子地区下寒武统有利页岩气层主要发育在筇竹寺组和沧浪铺组,与之相当的还有川、黔、鄂的

牛蹄塘组或水井沱组,层位相当稳定,其岩性主要为碳质泥页岩、硅质泥页岩、粉砂质泥页岩等。

(2) 上扬子地区下寒武统烃源岩形成于浅水到深水陆棚环境,是在一次大的海进与海退旋回中形成,高有机碳含量层主要集中在剖面下部,与早期海平面快速上升在沉积古地形相对低洼的区域形成的滞留沉积环境有关。

(3) 受古构造控制,下寒武统烃源岩主要分布在川西南—黔北、川南—湘西—鄂西渝东及川东北地区,厚度稳定,分布面积大,有机质丰度和烃源岩演化程度高。

(4) 从地质背景及条件分析,页岩气勘探潜力大,但受勘探程度的限制,还有一些关键数据没有获得,其潜力的有效性还有待于更深入的研究及开发试验。

参考文献

- [1] 陈兰. 湘黔地区早寒武世黑色岩系沉积学及地球化学研究[D]. 中国科学院博士论文, 2005: 23~29.
- [2] 马力, 陈焕江, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [3] 陈践发, 张水昌, 孙省利, 等. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素[J]. 地质学报, 2006, 80(3): 467~472.
- [4] 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等. 中国早寒武世岩相古地理[J]. 古地理学报, 2002, 4(1): 1~14.
- [5] 梁狄刚, 陈建平. 中国南方高、过成熟区海相烃源岩油源对比问题[J]. 石油勘探开发, 2005, 32(2): 8~14.
- [6] 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 534~547.
- [7] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. 地学前缘, 2005, 12(3): 39~48.
- [8] Robert G Loucks, Stephen C Ruppel. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas, AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579~601.
- [9] Richard M Pollastro, Daniel M Jarvie, Ronald J Hill, et al. Adams, Geologic framework of the Mississippian Barnett Shale, Barnett-Paleozoic total petroleum system, Bendarch-Fort Worth Basin, Texas, AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 405~436.
- [10] David F Martineau. History of the Newark East field and the Barnett Shale as a gas reservoir. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 399~403.
- [11] Daniel J K Ross, R Marc Bustin. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation AAPG Bulletin, 2008, 92(1): 87~125.