

湘中坳陷下石炭统孟公坳段页岩气成藏条件及勘探前景

曹清古¹, 韦庆亮¹, 肖秋苟², 孙庭金², 王津义¹

(1 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所; 2 中国石化勘探南方分公司)

摘要 通过野外地质调查,结合实验测试数据和地震资料,对湘中坳陷下石炭统岩关阶孟公坳段页岩气勘探前景进行了探索。由烃源条件、保存条件、页岩气赋存条件及页岩可压裂性等方面的研究表明,该套泥页岩沉积厚度较大,富含有机质,有机质类型以II型为主,TOC在1.32%~3.10%,镜质组反射率普遍大于2.0%,且处于过成熟演化阶段,具备页岩气成藏的烃源条件。从岩石结构、矿物成分、吸附性能等方面揭示出该套页岩发育良好的天然气赋存空间,且具有良好的吸附性能。黏土矿物含量及较好的顶底板条件决定了该套页岩具有良好的可压裂性。湘中坳陷的构造活动相对较弱,盖层封盖性能良好,有利于页岩气藏的形成和保存。

关键词 湘中坳陷; 早石炭世; 孟公坳段; 页岩气; 油气成藏; 成藏条件

中图分类号: TE122.3¹; TE132.2

文献标识码: A

1 引言

页岩气作为一种重要的非常规天然气资源,有着巨大的勘探潜力。据预测,世界页岩气总资源量为 $456.24 \times 10^{12} \text{ m}^3$,主要分布在北美、中亚、中国、中东、北非、拉丁美洲、前苏联等地区^[1-4]。至2010年,美国页岩气年产量超过 $1\ 379 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国天然气总产量的23%^[5],产气层位主要集中在泥盆系、石炭系及下白垩统^[6-8]。2012年我国国土资源部首次公布了全国陆域页岩气资源量为 $134.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中可采资源量为 $25.08 \times 10^{12} \text{ m}^3$,显示了我国巨大的页岩气资源潜力^[5]。但在中国南方勘探区域,目前已取得页岩气突破性进展的仅有四川盆地,层位上也仅局限于下古生界的下寒武统和上奥陶统—下志留统^[9-11]。

湘中坳陷作为南方未来页岩气勘探的后备区块之一,能否实现同样的“突破性进展”,这是值得勘探决策者和油气勘探研究工作者关注和期待的。湘中坳陷在常规油气勘探的过程中,大量钻井

出现的不同级别油气显示(气浸、气涌甚至井喷),已经证实本区具有良好的天然气勘探前景,如在新1井、湘中1井、湘冷1井(井位见图1)的下石炭统大塘阶石磴子段致密储层中已经获低产工业气流。对于湘中坳陷上古生界页岩气前景的研究,前人多着重于整体评价,即纵向上对中上泥盆统一石炭统、上二叠统的泥页岩发育段进行整体考察^[12-14],但针对具体某一层系的研究尚少。同时,在湘中坳陷下石炭统烃源岩的研究中,前人较多地关注大塘阶测水段煤系烃源岩,而对于岩关阶泥页岩的研究程度较低。通过多年来对中国南方各地区的研究表明,在早石炭世岩关期,中国南方发生了一次广泛海侵,造就了不同地区(包括湘中坳陷)泥页岩烃源层的普遍发育。因此,本次研究期望通过野外地质调查,并结合实验测试结果及相关地震资料等,先行从页岩气成藏的各个方面,对湘中坳陷下石炭统岩关阶孟公坳段泥页岩发育段进行细致全面的研究,以推进湘中地区页岩气的勘探进程。

收稿日期: 2014-06-23; 改回日期: 2015-01-07

本文受中国石化股份公司油田部科研项目“南方外围探区选区评价与勘探部署研究”(编号: G0800-12-KK-074)资助

曹清古: 1976年生,工程师。2003年毕业于中国地质大学(北京)岩石学、矿物及矿床学专业,获硕士学位。现主要从事石油地质与勘探方面的研究工作。通讯地址: 214126 江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道2060号; E-mail: caoqg.syky@sinopec.com

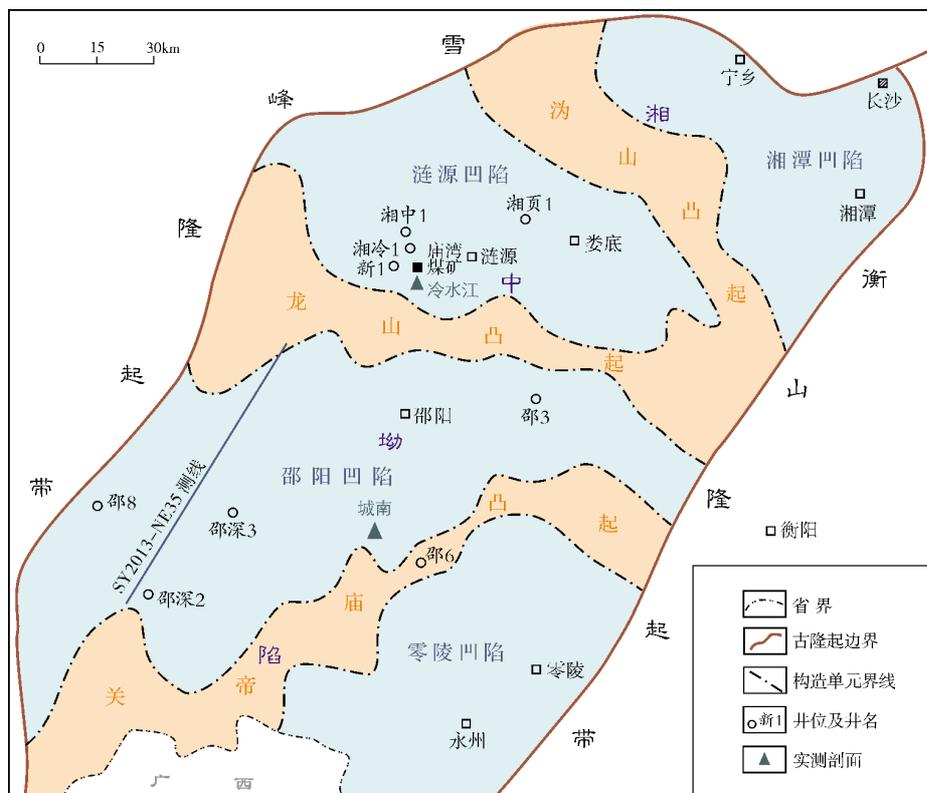


图1 湘中坳陷构造单元划分及样品点分布

2 区域地质概况

湘中坳陷的大地构造位置处于华南褶皱系以北、雪峰古陆以南的雪峰推覆体后缘滑覆构造带部位,它是在以下古生界浅变质岩系为基底的基础上发展起来的晚古生代—中生代的准地台型陆表海沉积坳陷区^[15-16]。坳陷内可划分出“三凸四凹”共7个三级构造单元(图1)。区内由一系列NE—NEE向展布的复背斜和复向斜组成,具隔档式构造样式。

该区地层发育齐全,元古界—中生界均有不同程度的出露。元古界—下古生界主要出露在坳陷周围隆起带及坳陷中的凸起带上;泥盆系—三叠系沉积以碳酸盐岩夹碎屑岩为主,总厚度大于5000m,主要分布在涟源、邵阳、零陵等三个凹陷中。本次研究的下石炭统孟公坳段分布较广,区域上以广泛发育碳酸盐岩为特征,但空间上的岩性、厚度变化较大,厚度一般在50~500m之间。在早石炭世岩关期,湘中地区发生陆内裂陷,形成了“台-盆相间”的裂陷盆地格局(图2)。由于涟源、邵阳、武岗等地区的

裂陷沉降,形成了三个深水台盆,零陵地区则形成一个次深水台内洼地。在广阔的湘中台地上主要发育大套浅色厚层状的碳酸盐岩沉积,台间盆地内则发育暗色碎屑岩夹碳酸盐岩沉积,过渡相区(台内洼地)则发育厚层状碳酸盐岩夹薄层泥页岩。伴随着裂陷盆地的形成,本区发生大规模海侵,随着海平面的逐渐上升,孟公坳时在深水台盆相区沉积了一套暗色富有机质的泥页岩。

3 页岩气成藏条件

页岩气是以自生自储为主的非常规天然气,与常规天然气藏相比,页岩气藏有着独特的地质特征与成藏模式,因此页岩气的评价方法与常规天然气相比具有一定的特殊性。本文从烃源条件、保存条件、泥页岩储集物性特征以及工程可压裂性等方面,展开对湘中坳陷下石炭统岩关阶孟公坳段页岩气勘探这一新领域进行研究和探索。

3.1 烃源条件

湘中地区上古生界发育中上泥盆统棋子桥组和

余田桥组、下石炭统岩关阶孟公坳段和大塘阶测水段、以及上二叠统龙潭组等多套烃源岩。对于石炭系烃源岩,前人更多地关注测水段煤系烃源岩^[16-17],然而通过本次野外露头及室内测试资料的研究后发现,湘中地区下石炭统除测水段之外,还发育一套相对更为有利的烃源岩,即孟公坳段泥页岩。

裂陷槽盆相沉积的孟公坳段黑色泥页岩主要分布于涟源凹陷中部和邵阳凹陷中西部。本次研究分别对位于涟源凹陷的冷水江剖面(冷水江城区东南郊约1 km处)和位于邵阳凹陷的城南剖面(邵阳城区南郊约3.5 km处)的孟公坳段进行了野外实测分析(剖面位置见图2)。

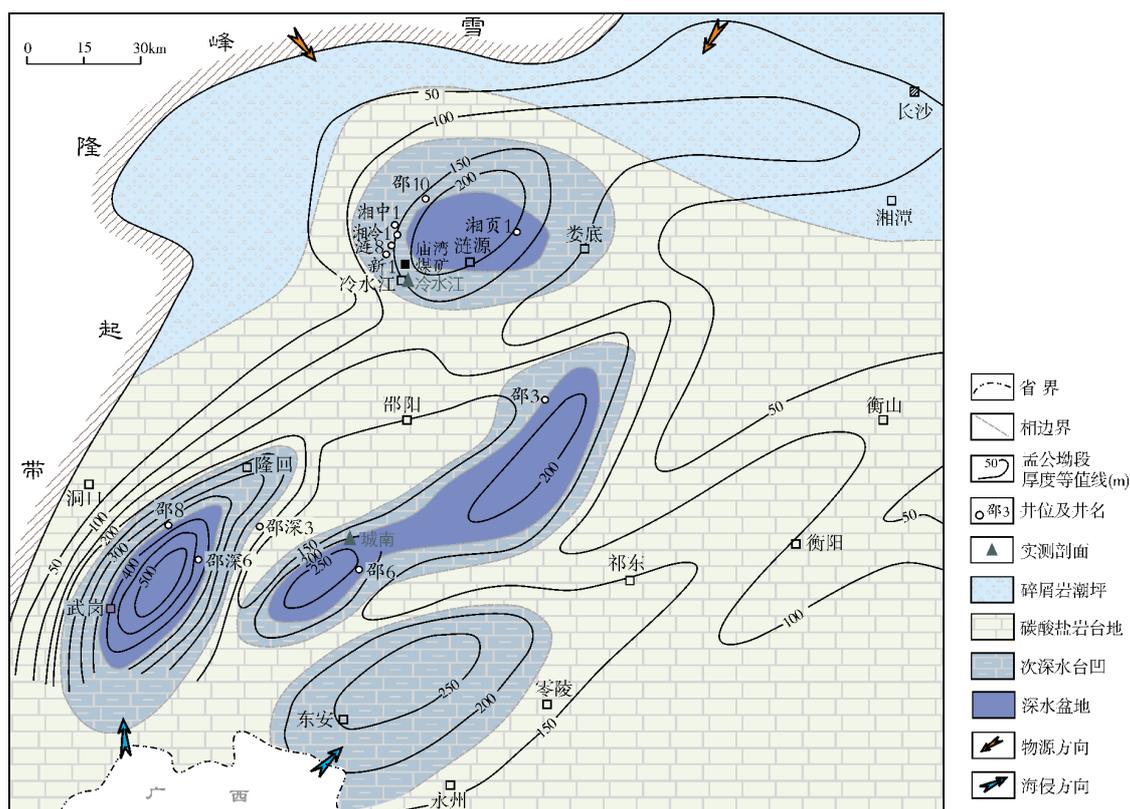


图2 湘中地区早石炭世岩关期岩相古地理图

(1)冷水江剖面孟公坳段地层的三分性比较明显,中下部为泥页岩夹薄层泥灰岩,地层厚76.5m,泥页岩段累计厚约65.0m;中部为中层状石灰岩、泥灰岩夹薄层粉砂岩,厚17m;上部以泥页岩为主,夹多层粉砂岩、粉砂质泥岩,地层厚113m,累计泥页岩厚约55m。对野外露头剖面的泥页岩发育段进行了系统采样,33个样品的测试结果显示TOC含量为0.57%~4.19%,平均1.32%,属极好烃源岩(表1),其中TOC含量0.5%~1.0%的样品10个,占比30.30%,TOC含量

1.0%~2.0%的样品21个,占比63.64%,TOC>2.0%的高丰度烃源岩样品2个,占比6.06%(图3)。

(2)在城南剖面中,孟公坳段地层同样具有明显的三分性,下部为黑色页岩,厚61.7m;中部发育中薄层状石灰岩夹页岩,厚11.5m;上部主要为页岩,厚72m(图4)。对泥页岩段进行系统采样,41个样品的分析结果显示TOC值为0.60%~17.81%,平均3.10%(表1),属于极好烃源岩;其中TOC含量0.5%~1.0%的样品数占总样品数的21.95%,含量为1.0%~

表1 湘中坳陷实测剖面下石炭统岩关阶孟公坳段烃源岩有机质丰度统计表

构造位置	剖面名称	岩性	泥页岩厚度(m)	TOC (%) 分布范围/平均	样品数
涟源凹陷	冷水江	泥页岩	120	(0.57~4.19)/1.32	33
邵阳凹陷	城南	泥页岩	133.7	(0.60~17.81)/3.10	41

2.0%的样品占总样品数的41.46%，含量>2.0%的高丰度烃源岩样品占总样品数的36.59%（图3）。与涟源凹陷对比，邵阳凹陷黑色页岩更发育，有机质丰度更高，单层厚度更大。另外，经野外调查发现，零陵凹陷的孟公坳段泥页岩发育较差，仅局部分布。

通过地化测试分析，孟公坳段泥页岩的有机质类型以II型为主，少量III型。有机显微组分的定量分析结果显示：超微组分26.2%、镜质组40.6%、丝质组33.2%，类型指数12.4。邵阳城南剖面泥页岩样品的干酪根 $\delta^{13}C$ 值为-28.6‰~-23.7‰，平均-25.1‰；而冷水江剖面泥页岩的干酪根碳同位素值稍重， $\delta^{13}C$ 值为-25.6‰~-22.9‰，平均-24.2‰。因此，从有机质丰度、有机质类型来看，本套泥页岩具有良好的生气潜力。从演化程度来看，本套泥页岩处于高一过成熟

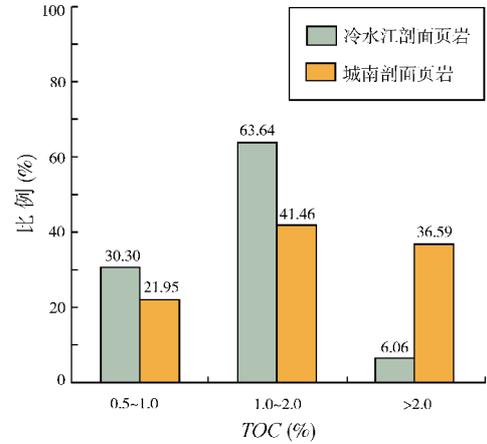


图3 湘中坳陷野外实测剖面下石炭统孟公坳段页岩样品有机质丰度统计图

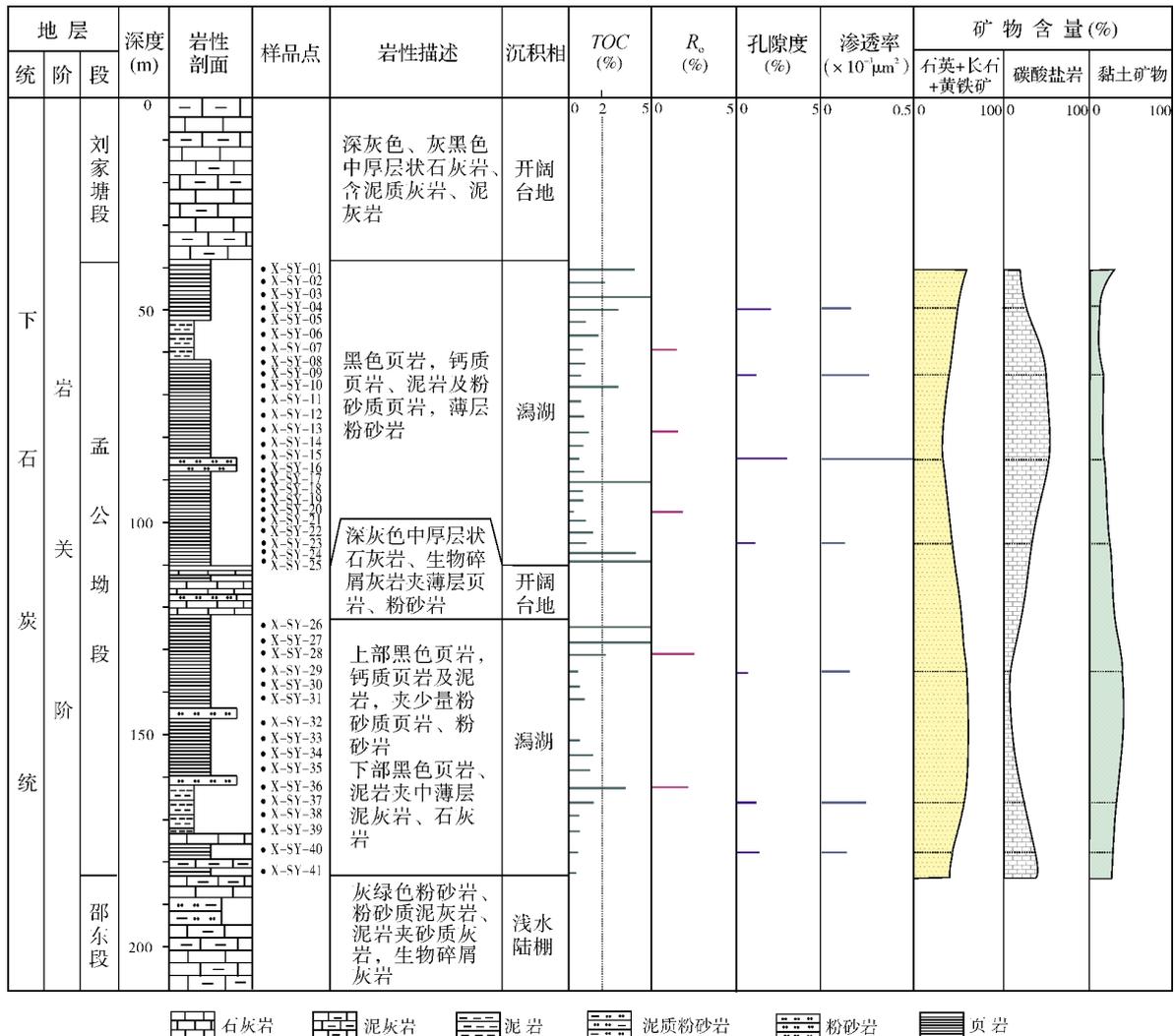


图4 湘中坳陷邵阳城南剖面下石炭统页岩气综合地化剖面

阶段, 镜质体反射率 R_o 普遍大于2.0%, 表明烃源岩处于生气高峰。有机质成熟作用过程不仅使泥页岩大量生成天然气, 供泥页岩达到饱和吸附, 而且随着成熟度的增加, 高的热演化可以改善泥页岩的微观孔隙结构, 增加游离气含量, 同时也可增加岩石脆性, 有利于压裂。

3.2 保存条件

湘中坳陷位于衡山隆起带与雪峰隆起带之间的稳定地带, 构造变形相对较弱, 由一系列复向斜和复背斜构成。湘中坳陷内的凹陷区断裂不发育,

岩浆活动一般也只发育在坳陷周缘及坳陷中的部分凸起带上。凹陷内向斜区的地表出露地层较新, 一般为上二叠统一下三叠统, 其下伏地层连续、保存完好。

作为页岩气勘探目的层的孟公坳段, 其上覆盖一套有利的油气盖层, 即下石炭统大塘阶测水段煤系地层^[18], 该套盖层具有良好的油气封盖能力, 有效盖层的厚度约60~130 m, 突破压力值高达18.78~28.19 MPa, 中值半径为3.15~5.38 nm, 封闭气柱高度最高可达2 734 m(表2)。本套盖层空间上主要分布于涟源凹陷及邵阳凹陷。

表2 湘中坳陷下石炭统大塘阶测水段盖层微观特征数据统计表

地点	井深(m)	岩性	比表面积(m ² /g)	孔隙流体势能(J/g)	突破压力(MPa)	突破半径(mm)	突破时间(a/m)	中值半径(mm)	中值压力(MPa)	孔隙集中		气柱高度(m)
										范围(nm)	含量(%)	
庙湾煤矿	200	泥岩	0.92	0.06	28.19	4.97	138.6	3.15	44.4	1.0~10	95.6	2734
涟8井	360	灰黑色泥灰岩	0.95	0.07	22.70	6.17	89.84	4.18	33.48	1.0~10	84.4	2202
邵10井	590	浅灰色泥岩	1.83	0.13	18.78	7.45	61.49	5.38	26.04	分散	—	1822

因此, 综合考虑构造变形特征、岩浆活动程度、以及目的层的上覆盖层等因素, 认为湘中坳陷岩关阶孟公坳段具有较好的页岩气保存条件。

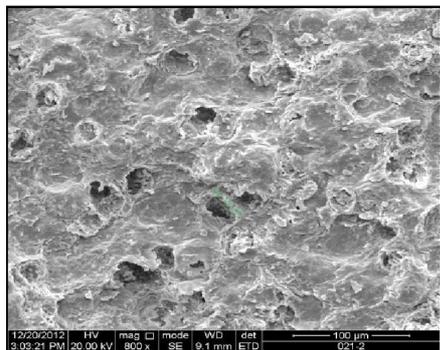
3.3 页岩物性特征

页岩气的赋存状态主体是以吸附态和游离态两种方式存在于泥页岩中, 具有自生自储、吸附成藏、隐蔽聚集等特点^[7]。因而页岩气储层相对于常规储层而言也具有其自身的特殊性, 然而, 对于页岩气储层的评价, 目前则尚没有统一的规范^[5, 19]。通常情况下, 页岩气储层都具有低孔低渗特征, 美国主要产气页岩储层的岩心分析, 总孔隙度分布在2.0%~14.0%之间, 渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[5, 7]。国内学者对上扬子地区下志留统龙马溪组产气页岩的孔隙度进行过测定分析^[5], 总体上孔隙度在0.77%~19.5%之间, 平均为5.05%, 渗透率在 $(0.0013\text{--}0.058) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 平均为 $0.0102 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。湘中坳陷下石炭统岩关阶孟公坳段泥页岩段储层物性的实测数据显示, 涟源凹陷冷水江剖面的页岩孔隙度为0.51%~2.76%, 平均为1.22%, 渗透率为 $(0.16\text{--}0.98) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $0.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 邵阳凹陷城南剖面的页岩孔隙度为0.53%~2.83%, 平均1.57%, 渗透率为 $(0.13\text{--}0.78) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $0.32 \times$

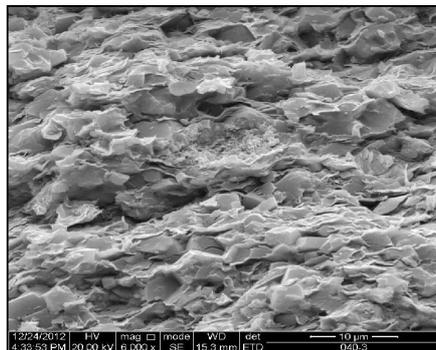
$10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图4)。相比于国内外工业性页岩气储层而言, 湘中坳陷孟公坳段页岩气储层具有较低的孔隙度, 但渗透性明显好于国内外同类储层。因此, 总体来说湘中坳陷孟公坳段仍然具有良好的页岩气赋存能力。

通过页岩样品的扫描电镜分析, 可以看出研究区孟公坳段页岩具备页岩气赋存的储集空间(图5)。页岩中多见溶蚀微孔隙(图5a), 部分样品中发育良好的蜂窝状微孔, 面孔率在2%~4%不等, 孔径多在10~30 μm 间; 大多数样品中可见溶蚀作用或构造作用形成的张裂缝(图5b), 缝宽约10 μm 。由于对泥页岩等温吸附曲线的测定可以在一定程度上用来定量分析泥页岩理论吸附量的大小, 因此通过对邵阳城南剖面地表页岩样品的等温吸附实验表明, 在地表常压下, 孟公坳段页岩的兰格缪尔体积仍可达1.93 m^3/t , 显示出该段页岩良好的天然气吸附性能。

岩石矿物含量分析统计结果表明, 湘中坳陷孟公坳段泥页岩中黏土矿物含量为11%~66%, 平均40%, 碳酸盐岩矿物含量为2%~40%, 平均32%, 碎屑矿物含量为26%~60%, 平均28%(图4)。从其脆性矿物的含量来看, 石英+方解石+黄铁矿等含量超过了30%, 这与目前国内外正在进行页岩气工业开采



(a) 页岩。蜂窝状溶蚀微孔, 孔径 $30\mu\text{m}$ 左右, 似“孤孔”; 面孔率 $3\%\sim 4\%$ 。样品号X-LS-13, 冷水江剖面孟公坳段。电镜扫描



(b) 页岩。黏土矿物定向排列, 发育溶蚀微孔隙和张开缝, 缝宽 $10\mu\text{m}$; 面孔率 $2\%\sim 3\%$ 。样品号X-SY-20, 邵阳城南剖面孟公坳段。电镜扫描

图5 湘中坳陷下石炭统页岩孔隙结构特征

的泥页岩储层具有较好的相似性, 因此, 可以预计孟公坳页岩具有良好的可压裂性。

另外, 本套泥页岩的上覆地层与下伏地层均具有良好的顶、底板条件。其上覆地层刘家塘段—石碛子段, 岩性为一套深灰色—灰色的石灰岩、泥灰岩等, 区域上厚度在 $50\sim 275\text{m}$ 之间, 其下伏地层邵东段, 岩性为一套浅灰色、灰色的石灰岩、生物碎屑灰岩以及含泥质灰岩等, 区域上厚度在 $30\sim 207\text{m}$ 之间。本套泥页岩在区域上埋深相对较浅, 一般为 $500\sim 2000\text{m}$, 适宜于当前技术条件下的页岩气开发。

4 页岩气勘探前景

通过对湘中坳陷下石炭统页岩气成藏条件的

初步研究分析后认为, 湘中地区下石炭统岩关阶孟公坳段泥页岩具有良好的页岩气勘探前景。区域上以邵阳凹陷最为有利, 其次为涟源凹陷, 零陵凹陷本套页岩发育较差, 潜力较小。其中, 邵阳凹陷下石炭统岩关阶孟公坳段泥页岩厚度约 $50\sim 150\text{m}$, 最大单层厚度可达 40m , 在凹陷内的向斜区普遍发育, 具有较大规模; TOC含量为 $0.40\%\sim 11.87\%$, 具有较高的有机质丰度, 且高丰度泥页岩段相对集中发育; 有机质类型主体为 II_1 型, 部分为 $\text{II}_2\text{—III}$ 型, R_o 值普遍大于 2.0% , 具有较好的生气潜力; 地震解释资料(图6)显示, 邵阳凹陷内地层保存完好、岩浆及断裂活动不发育, 有利于油气藏的保存。因此, 加强对湘中坳陷下石炭统孟公坳段页岩气潜力评价具有现实意义。

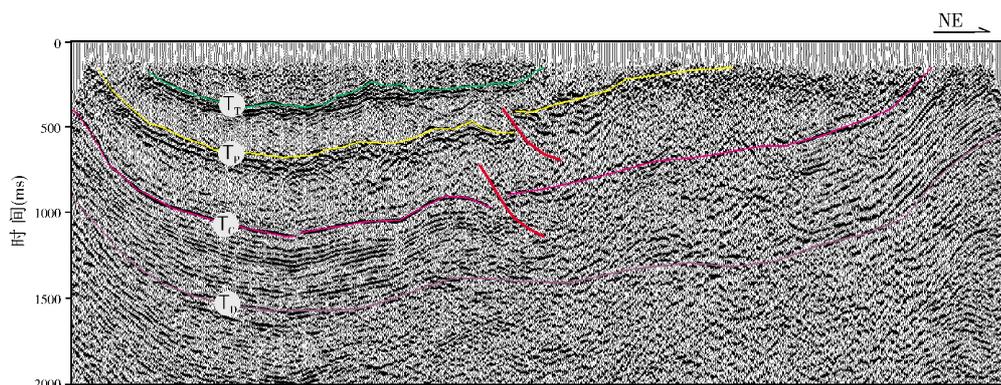


图6 湘中邵阳凹陷SY2013-NE35线地震地质解释剖面
地震反射层: T_1 三叠系底界; T_2 二叠系底界; T_3 石炭系底界; T_4 泥盆系底界。
地震测线剖面位置见图1

5 结论

湘中坳陷下石炭统岩关阶孟公坳段泥页岩, 是一

套前人未予充分关注、研究程度极低的地层, 本文通过页岩气成藏的各项关键条件, 即烃源条件、保存条件、页岩气赋存条件及页岩可压裂性等的分析, 综合

认为孟公坳段泥页岩具有良好的页岩气勘探前景:

(1)孟公坳段泥页岩是本区一套有利的烃源岩,具有较高的有机质丰度,有机质类型较好,处于过成熟演化阶段($R_o > 2.0\%$),具备良好的页岩气成藏物质基础;

(2)孟公坳段泥页岩发育页岩气赋存空间,且具有良好的吸附性能。岩石矿物含量特征以及良好的顶底板条件为页岩压裂改造提供了优越的条件;

(3)坳陷内构造活动相对较弱,加上良好的盖层条件,有利于页岩气藏的形成和保存。

参考文献

- [1] Perry K, Lee J. Unconventional gas reservoirs-Tight gas, coal seams, and shale[R]. NPC Global Oil and Gas Study, 2007.
- [2] 张田,张建培,张绍亮,等.页岩气勘探现状与成藏机理[J].海洋地质前沿,2013,29(5):28-35.
- [3] 张金川,徐波,聂海宽,等.中国页岩气资源勘探潜力[J].天然气工业,2008,28(6):136-140.
- [4] 刘洪林,王红岩,刘人和,等.中国页岩气资源及其勘探潜力分析[J].地质学报,2010,84(9):1374-1378.
- [5] 于炳松.页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J].地学前缘,2012,19(3):252-258.
- [6] 姜福杰,庞雄奇,欧阳学成,等.世界页岩气研究概况及中国页岩气资源潜力分析[J].地学前缘,2012,19(2):198-211.
- [7] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002,86(11):1921-1938.
- [8] Hill D G, Nelson C R. Gas productive fractured shales: An overview and update[J]. Gas TIPS, 2000,6(2):4-13.
- [9] 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.
- [10] 李建忠,董大忠,陈更生,等.中国页岩气资源前景与战略地位[J].天然气工业,2009,29(5):11-16.
- [11] 金之钧,蔡立国.中国海相油气勘探前景、主要问题与对策[J].石油与天然气地质,2006,27(6):722-730.
- [12] 马少妍,徐猛,甘丽丽,等.湘中地区页岩气勘探潜力与地化特征评价[J].油气地球物理,2013,11(2):56-59.
- [13] 罗小平,刘军,徐国盛,等.湘中坳陷泥盆—石炭系海相泥页岩地球化学特征及等温吸附性能[J].成都理工大学学报:自然科学版,2012,39(2):206-214.
- [14] 殷红,潘泽雄.湘中坳陷非常规及常规资源勘探潜力分析[J].天然气技术与经济,2012,6(1):37-40,43.
- [15] 刘喜顺.湘中坳陷上古生界碳酸盐岩烃源岩特征及生烃模式[J].海相油气地质,2008,13(1):13-17.
- [16] 王明艳,郭建华,旷理雄,等.湘中坳陷涟源凹陷烃源岩油气地球化学特征[J].天然气地球科学,2010,21(5):721-726.
- [17] 王朝晖,肖正辉,杨荣丰,等.湘中地区石炭系测水组页岩气生气物质基础研究[J].中国煤炭地质,2013,25(5):19-21,31.
- [18] 徐言岗,祁开令.湘中坳陷海相油气勘探前景再认识[J].石油实验地质,2005,27(6):594-596,600.
- [19] Ross D J K, Bustin R M. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009,26(6):916-927.

编辑:黄革萍

Gas Accumulation and Exploration Prospect of Lower Carboniferous Menggongao Shale in Xiangzhong Depression

Cao Qinggu, Wei Qingliang, Xiao Qiugou, Sun Tingjin, Wang Jinyi

Abstract: Based on investigation and analysis of outcrop, experimental and seismic data, thick organic-rich Lower Carboniferous Menggongao shale develops in Xiangzhong Depression, Hunan. Result of geochemical analysis indicates that the general kerogen is commonly Type-II and the average value of R_o is commonly $>2.0\%$ in the shale with overmature evolution, which means abundant source of hydrocarbon. It is shown that this shale has good conditions of gas accumulation and preservation because of weak tectonic activities and good gas-sealing capacity.

Key words: Early Carboniferous; Menggongao Member; Shale gas; Hydrocarbon accumulation condition; Xiangzhong Depression

Cao Qinggu: MSc., Petroleum Geology Engineer. Add: SINOPEC Wuxi Institute of Petroleum Geology, 2060 Lihu Av., Wuxi, Jiangsu, 214126, China