

顾志翔, 彭勇民, 何幼斌, 等. 湘中坳陷二叠系海陆过渡相页岩气地质条件[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 288-299.

Gu Zhixiang, Peng Yongmin, He Youbin, et al. Geological conditions of Permian sea-land transitional facies shale gas in the Xiangzhong depression[J]. *Geology in China*, 2015, 42(1): 288-299(in Chinese with English abstract).

湘中坳陷二叠系海陆过渡相页岩气地质条件

顾志翔^{1,2} 彭勇民² 何幼斌¹ 胡宗全² 翟羽佳^{2,3}

(1. 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083)

摘要:根据湘中坳陷二叠系黑色页岩的露头及岩心观测、含气量、地化和物性资料,以及等温吸附、氩离子抛光+扫描电镜等方法所获数据,探讨了页岩气地质条件。研究认为二叠系龙潭组、大隆组海陆过渡相页岩具备良好的页岩气地质条件。有机碳含量在2%以上;成熟度分布于1.2%~1.6%;储集类型主要为残留粒间孔、粒内孔、溶蚀孔等矿物质孔和少量有机质孔,孔隙度在0.54%~5.15%,等温吸附实验测试平均含气能力在5.488~6.905 m³/t。热演化史分析表明二叠系页岩在沉积之后经历了两次抬升剥蚀,第二次沉降没有达到第一次的最大埋深且没有二次生烃,这可能是导致研究区页岩总体含气量低的原因之一。构造分析表明,印支期和燕山期改造作用,对油气破坏明显,恶化了保存条件增加勘探风险。运用叠合法预测页岩气有利区为湘中涟源—娄底—双峰区、邵阳—邵东区,采用体积法计算页岩气总资源量为(127~425)×10⁸ m³(中值254×10⁸ m³),显示一定的页岩气资源潜力。综合分析认为保存条件是该区页岩气成藏的关键因素,也是勘探成功与否的首要因素。

关键词:湘中坳陷;二叠系;页岩气;保存条件

中图分类号: TE132.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2015) 01-0288-12

Geological conditions of Permian sea-land transitional facies shale gas in the Xiangzhong depression

GU Zhi-xiang^{1,2}, PENG Yong-min², HE You-bin¹, HU Zong-quan², ZHAI Yu-jia^{2,3}

(1. College of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China; 2. Petroleum Exploration and Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. College of Geosciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on such analytical methods as outcrop core observation, gas content, geochemical and physical property data and isothermal adsorption as well as argon ion polishing plus scanning electron microscopy of Permian black shale in the center of Hunan depression, the authors investigated the geological conditions of shale gas. The results show that the geological conditions of shale in Permian Longtan Formation and Dalong Formation of sea-land transitional facies are beneficial to gas accumulation. The

收稿日期: 2014-04-25; 改回日期: 2014-08-07

基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX05004-001-004)资助。

作者简介: 顾志翔, 男, 1989年生, 硕士生, 从事沉积学与石油地质学研究, E-mail: gu_zhixiang@126.com。

通讯作者: 何幼斌, 男, 1964年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学的教学和研究工作; E-mail: heyoubin@yangtzeu.edu.cn。

organic carbon content is high than 2%, the grade of maturity distribution is between 1.2% and 1.6%, the main reservoir types are mineral holes with minor organic holes such as residual intergranular pores, intragranular pores and corrosion holes. The porosity is between 0.54% and 5.15%, the average gas content capacity of isothermal adsorption test is between 5.488 and 6.905 m³/t. The thermal evolution analysis shows that Permian shale experienced two times of uplift and denudation, and the second denudation didn't reach the maximum depth of the first time and there was no secondary hydrocarbon. This might have been the reason which led to the low gas content in the study area. Structural analysis shows that the modification effect of Indo-Chinese epoch and Yanshanian period resulted in the poor preservation conditions that damaged the oil gas obviously and increased the risk of exploration. Using the method of superposition to predict the areas, the authors reveal that Lianyuan-Loudi-Shuangfeng area and Shaoyang-Shaodong area are favorable shale gas areas. The volume method was used to calculate the total quantity of shale gas resource, which yielded (127-425)×10⁸ m³, (the medium value being 254×10⁸ m³), suggesting a certain potential of shale gas resources. The comprehensive analysis shows that the preservation condition is the key factor for shale gas accumulation in this area, and is also the principal factor for successful exploration.

Key words: central Hunan depression; Permian; shale gas; preservation conditions

About the first author: GU Zhi-xiang, male, born in 1989, master, mainly engages in the study of sedimentology and petroleum geology; E-mail: gu_zhixiang@126.com.

1 前言

伴随着美国页岩气勘探的巨大成功^[1-3]和中国海相页岩气勘探的大突破^[4],页岩气勘探被日益重视^[5]。湘中坳陷二叠系海陆过渡相有关页岩气形成条件,如沉积相^[6-7]、厚度^[8]、地化特征^[9-10]、生烃能力^[11]、矿物组成^[6]和含气量^[11]等方面获得不少进展,但是对页岩气评价存在争议,主要有2种观点:一是较多学者认为页岩气成藏的地质条件有利。湘中坳陷二叠系龙潭组和大隆组具有分布广、埋藏浅、厚度大、有机质丰度高和成熟度高的特点^[12-14]。湘页1井也证明了二叠系具有一定的勘探潜力^[15-16];二是页岩气保存条件变差是湘中油气勘探始终难以获得重大突破的重要因素,因为热演化史表明其生烃早及长期散失可能是湘页1井含气量较低的主要因素^①;类似地,聂海宽^[17-18]、汪凯明^[19]等主张应加强保存条件研究。

湘中坳陷位于湖南省中部地区,面积约2.25×10⁴ km²。位于华南褶皱系的北部、雪峰隆起西南缘、衡山凸起之西、桂中坳陷之北^[20-24]。早古生代属于扬子大陆边缘斜坡沉积,晚古生代为陆表海沉积。湘中坳陷具有“三坳两凸”的构造格局,龙山凸起将北部涟源凹陷和邵阳凹陷分割,南部关帝庙凸起将邵阳凹陷和零陵凹陷分开(图1)。其中上二叠统大隆组(P₃d)与龙潭组(P₃l)发育一套黑色页岩。

针对上述页岩气评价存在的问题,本文在对页岩的沉积相、厚度及分布、有机地化、热演化史、孔隙度和含气量等页岩气地质条件研究的基础上,对页岩气的保存条件进行分析,进而为湘中坳陷页岩气有利区预测提供依据。

2 页岩分布与有机地化特征

研究表明形成页岩气的有利沉积相为潟湖—沼泽相^[26],湘中坳陷主要沉积相有潟湖—沼泽相、滨海—沼泽相和潟湖相等,总体上表现为台盆相。均为页岩气发育的有利相带。研究区形成涟源和邵阳2个有机碳高值区,有机碳含量超过2%;成熟度分布于1.2%~1.6%,页岩气形成条件优越。

2.1 页岩沉积相展布

沉积相对富有机质页岩具有决定性的内在的控制作用^[25],上二叠统海陆过渡相沉积环境有利于形成页岩气^[26]。研究区有利相带位于新华—宁乡一线、邵阳—下花桥一线、洞口—资源一线(图2-a)。湘中坳陷二叠系为一套海陆过渡相沉积。其中,栖霞组沉积时期海侵达到高潮,沉积了一套碳酸盐岩;至早二叠世茅口期抬升,海退后部分遭受剥蚀。至龙潭早期海水已大部分退出,结束了准地台发展阶段的最大一次海侵^[22]。

晚二叠世龙潭期早期(P₃l'),因东吴运动导致湘中全区出现整体均衡抬升,使北区的灰岩带上升为

①胡宗全,聂海宽,高波,等. 中下扬子重点地区二叠系油气资源前景调查[R]. 北京:中国石化石油勘探开发研究院,2013:94-96.

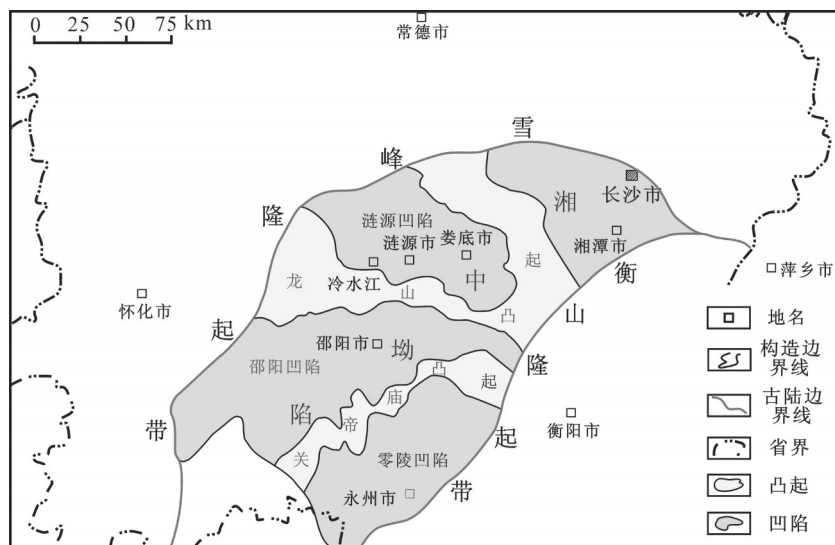


图1 湘中坳陷构造分区图(据文献[22],略有修改)

Fig.1 Geographical divisions of Xiangzhong depression (modified after reference [22])

陆,经历了古喀斯特风化淋滤阶段;与此同时,也使南区的硅质沉积的台槽相间环境转变为碎屑浅海环境,在龙潭组下段发育了一套不含煤的页岩夹砂岩沉积,属于填平补齐式的沉积层序。晚二叠世龙潭组晚期(P_3f),当南区的填平补齐式的沉积结束后,同时北区也结束了整体的抬升运动且转变为缓慢的沉降,使南北两区合二为一,形成统一的沼泽环境,发育含煤碎屑岩沉积层序^[22]。总体上龙潭组上部沉积末期,全区发生大规模海侵,发育灰色钙质泥岩为主的滨外陆棚相沉积。龙潭组上段底部为残积平原、下部发育潟湖相、中上部发育潮坪相、顶部为滨外陆棚相,反映了一个海平面持续抬升、向上变深的沉积过程。在邵东保和堂地区沉积相由西北古陆边缘的三角洲河流沼泽相向东南过渡到海湾潟湖相或滨海沼泽相,主要沉积相有潟湖—沼泽相、障壁岛、滨海—沼泽相和潟湖相等,形成了一套滨海含煤建造和硅质岩沉积以及浅海薄层灰岩、泥灰岩(图2-a)。至晚二叠世大隆期(P_3d),本区整体沉降速度加快,坳陷加剧,骤然出现特大海浸,水体迅速变深,出现了凹槽相间的台盆相泥质岩、硅质岩及碳酸盐岩沉积,在涟源凹陷和邵阳凹陷主要沉积了硅质页岩、硅质灰岩,底部和顶部发育少量钙质页岩和碎屑灰岩,总体上表现为台盆相(图2-b)。

龙潭组残留地层在平面上仅分布在涟源凹陷、

邵阳凹陷等凹陷区,纵向上与下伏茅口组、上覆大隆组呈整合接触,北区的龙潭组上段只有60 m左右,而南区的许多地方该地层可厚逾300 m,可见南区的沉降幅度远大于北区^[8]。按岩性可将龙潭组分为下、中、上3部分:下部为黄、灰黄色粉砂岩和长石砂岩;中部为灰黄色砂岩夹煤层;上部为灰黑色中层—厚层状泥页岩。泥页岩主要集中分布在龙潭组上部,根据湘煤2井、湘煤1井、涟6井、涟5井钻井资料以及涟源县七星街镇铁轨东、涟源市龙塘乡裤脚塘龙潭组野外露头剖面显示,龙潭组上部灰黑色泥页岩厚达50余米,其中在涟源市七星街镇火车道东龙潭组剖面厚达180 m。

大隆组纵向上与下伏龙潭组以及上覆大冶组均呈整合接触。主要由含泥硅质页岩、硅质泥岩、硅质灰岩组成,岩石颜色较深,为黑色、深灰色—灰黑色,泥页岩最厚的地方在涟源凹陷桥头河向斜及其附近,最厚可达100余 m,分布面积相对较小,主要分布在桥头河向斜南部和恩口—斗笠山向斜内,研究区大部分地区的泥页岩厚度都在20 m以下,分布面积较大。

2.2 页岩有机地球化学特征

对于页岩气藏来说,总有机碳含量是评价烃源岩丰度的重要指标,高有机质丰度既是成烃的物质基础,也是页岩气吸附的重要载体^[19-20]。研究区有

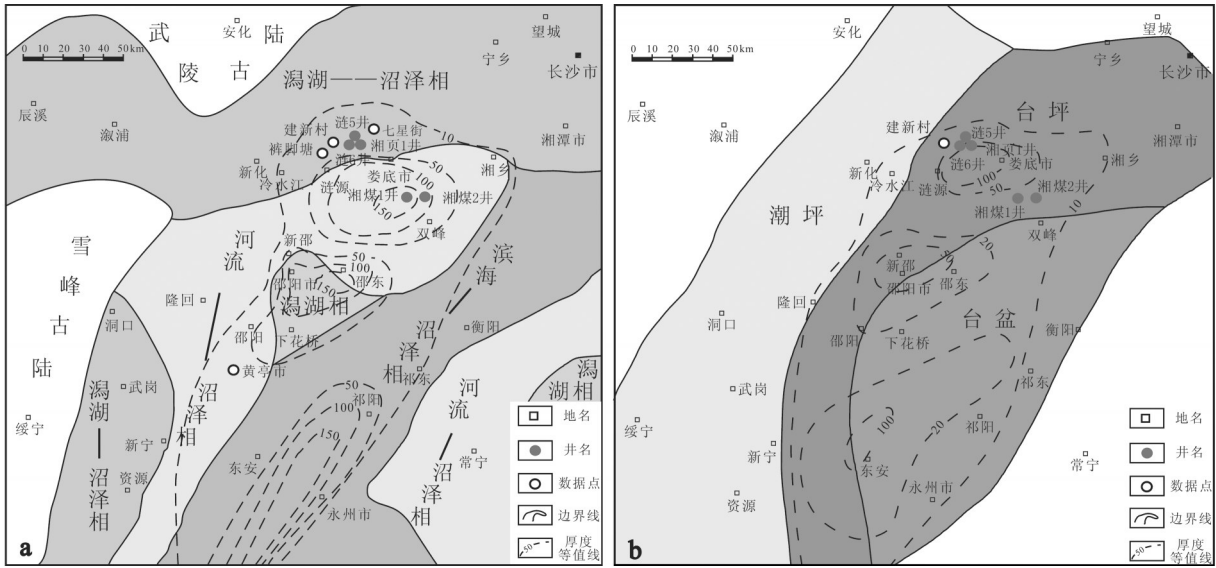


图2 湘中坳陷晚二叠世龙潭组(a)和大隆组(b)沉积相图

Fig.2 Map of sedimentary facies of late Permian Longtan Formation (a) and Dalong Formation (b) in Xiangzhong depression

机碳含量超过2%的区域是涟源凹陷和邵阳凹陷;且这两地区成熟度大部分超过1.5%,呈现由北向南增加的趋势,均在生气窗内。

通过野外观察、剖面实测和实验分析,建立了研究区二叠系龙潭组和大隆组页岩综合柱状图(图

3),从剖面底部向上,随着缺氧环境的破坏,这些指标在剖面上呈有规律的变化,涟源市七星街镇铁轨东龙潭组剖面上部有机碳含量整体较高,明显高于中下部(0.14%~4.67%,平均2.09%);孔隙度中下部较高,上部明显小于下部,呈现由小变大再变小的

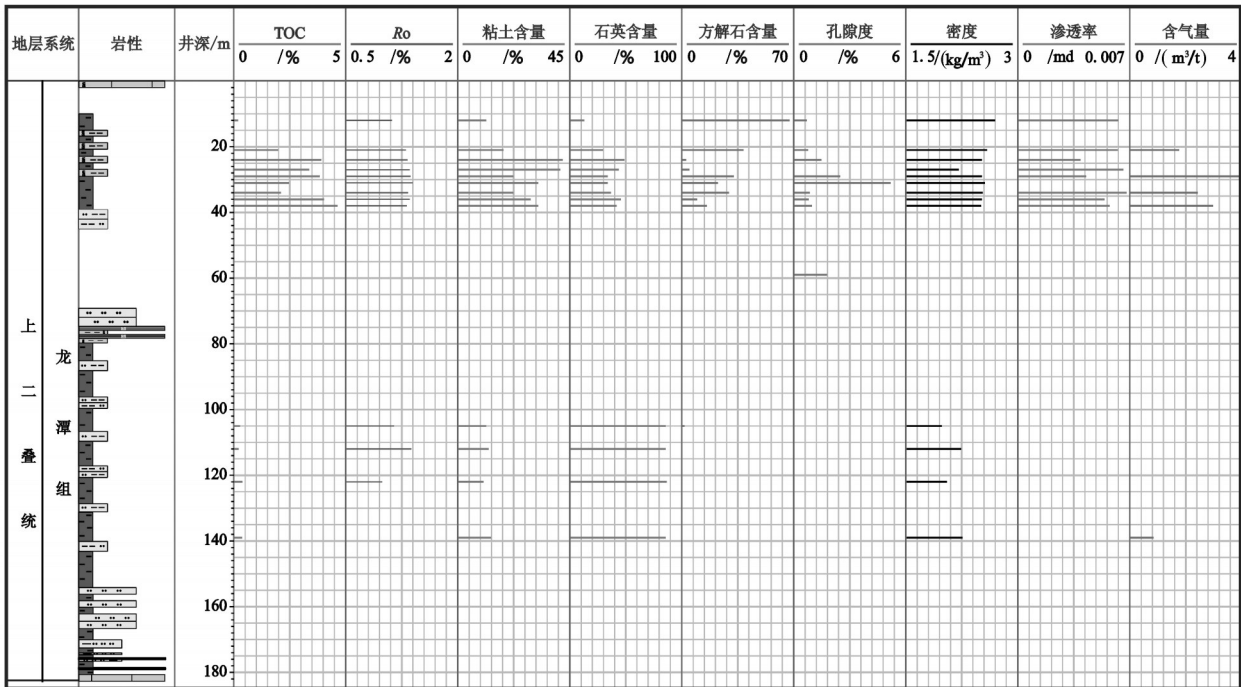


图3 湘中坳陷涟源七星街铁轨东龙潭组页岩综合柱状图

Fig.3 Shale comprehensive columnar section of Longtan Formation in East Lianyuan Qixing Street Track, Xiangzhong depression

趋势;石英含量和粘土矿物含量总体上变化不大。涟源市龙场乡建新村大隆组剖面有机碳含量总体上有变小的趋势,底部明显高于中上部地层(0.06%~8.7%,平均2.7%);石英含量变小、孔隙度变大等特征。此外,龙潭组和大隆组在研究区内大部分地区的热演化程度相对较高,干酪根镜质体反射率Ro值分布在1.1%~2.22%,平均1.42%,其中大部分样品的成熟度分布在1.2%~1.6%。

龙潭组在平面上,由于沉积环境是控制有机碳含量的主要因素,有机碳含量最高的区域通常为页岩的沉积中心,形成涟源和邵阳两个有机碳高值区,有机碳含量超过2%^[9],其中在桥头河向斜、恩口—斗笠山向斜和邵东县附近有机碳含量超过3.0%,向凹陷外降低,零陵凹陷最低,有机碳含量基本小于2%。由于大隆组沉积时期填平补齐的影响,有机碳含量在平面上不像龙潭组的分带性那么明显,总体来说,有机碳含量分布在1%以上,在平面上形成涟源、邵阳和零陵3个高值区,高值范围差别不大,均在2%以上(图4)。

湘中凹陷页岩的热演化程度适中,处在成熟—高成熟阶段,平均1.42%,均在生气窗内。不过也有学者提出,从目前勘探开发情况讲,对于热成因的页岩

气藏,成熟度不是制约聚集的主要因素,无论成熟度高低,在页岩层中,均有天然气赋存^[27],如李建忠等^[28]研究表明,黔中隆起方深1井下寒武统牛蹄塘组,成熟度(Ro)高达5.5%,有机碳含量高达8.02%,对牛蹄塘组黑色页岩的压裂测试表明,仍有天然气产出。研究区海陆过渡相页岩经历了长期的构造和热演化,具有构造演化历史复杂、热成熟度较高、生烃时间早等特征。龙潭组和大隆组页岩的热演化程度相对较高,其中大部分样品的成熟度分布在1.2%~1.6%,平均1.42%。总体来说,二叠系龙潭组和大隆组页岩处在成熟—高成熟阶段。在平面上,成熟度由北向南呈现增加的趋势,零陵凹陷最高,平均超过1.5%,大部分区域超过2%,涟源凹陷最低,平均超过1%,大部分区域超过1.5%,邵阳凹陷基本大于1.5%。大隆组在邵阳凹陷和零陵凹陷中心干酪根镜质体反射率在2.0%以上。在湘中凹陷的西南部和东北部的大部分地区,干酪根镜质体反射率都较小,热演化程度较低^[22]。

整体来看,研究区龙潭组和大隆组泥岩有机质丰度较高,演化程度适中,具备良好的生烃潜力。因此,在结合美国主要产页岩气井剖面特征和龙潭组—大隆组综合剖面特征,认为大隆组下部—龙潭组上部这套厚约80 m的优质泥岩是页岩气发育

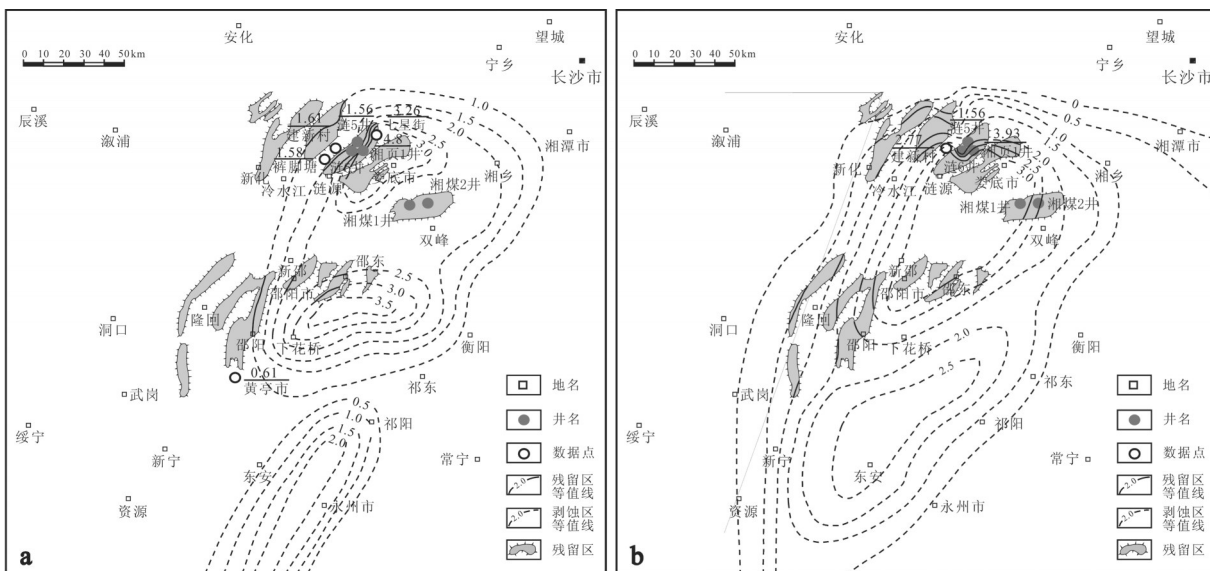


图4 湘中坳陷晚二叠世龙潭组(a)和大隆组(b)泥页岩有机碳含量图

Fig.4 Shale organic carbon content of late Permian Longtan Formation (a) and Dalong Formation (b) in Xiangzhong depression

的有利位置,且具备良好的勘探潜力。

3 储层特征

研究区主要发育残留粒间孔、次生溶蚀孔,有机质孔发育较少。涟源七星街龙潭组页岩的气测孔隙度在 0.54%~5.15%,平均 1.42%,渗透率 0.00387~0.00677 md,平均 0.00538 md。富有机质页岩的孔隙度在 2.44~5.15%,平均 3.79%,渗透率 0.00422~0.00677 md,平均 0.00549 md(表 1)。涟源龙场乡建新村大隆组页岩的气测孔隙度在 0.38%~

3.35%,平均 0.68%,渗透率 0.00429~0.0099 md,平均 0.00652 md。富有机质页岩的孔隙度在 2.04%~3.35%,平均 2.62%,渗透率 0.00632~0.0099 md,平均 0.00749 md(表 1)。压汞分析表明,孔径分布范围宽,以孔隙半径小于 20 nm 的级孔隙为主,大孔隙孔隙发育较少(图 5)。页岩氩离子抛光+扫描电镜观察表明,龙潭组和大隆组页岩压实强烈,主要发育残留粒间、粒内、溶蚀等矿物质孔隙,有机质气孔发育较少。

残留粒间孔是页岩储层主要类型之一,这类孔

表 1 涟源七星街龙潭组富有机质页岩和涟源建新村大隆组富有机质页岩常规岩心分析

Table 1 The conventional core analytical table of Lianyuan Qixing Street Longtan Formation organic-rich shale and Lianyuan Jianxin Village Dalong Formation organic-rich shale

样号	岩性	井号或剖面	层位	孔隙度/%	渗透率/md
QXJ8	灰色页岩	涟源市七星街镇铁轨东	P ₃ l	5.15	0.00677
QXJ9	灰黑色页岩	涟源市七星街镇铁轨东	P ₃ l	2.44	0.00422
JX19	硅质页岩	涟源市龙场乡建新村	P ₃ d	2.3	0.00632
JX25	灰色页岩	涟源市龙场乡建新村	P ₃ d	2.04	0.0099
JX26	灰色页岩	涟源市龙场乡建新村	P ₃ d	2.79	0.00668
JX27	灰色页岩	涟源市龙场乡建新村	P ₃ d	3.35	0.00707

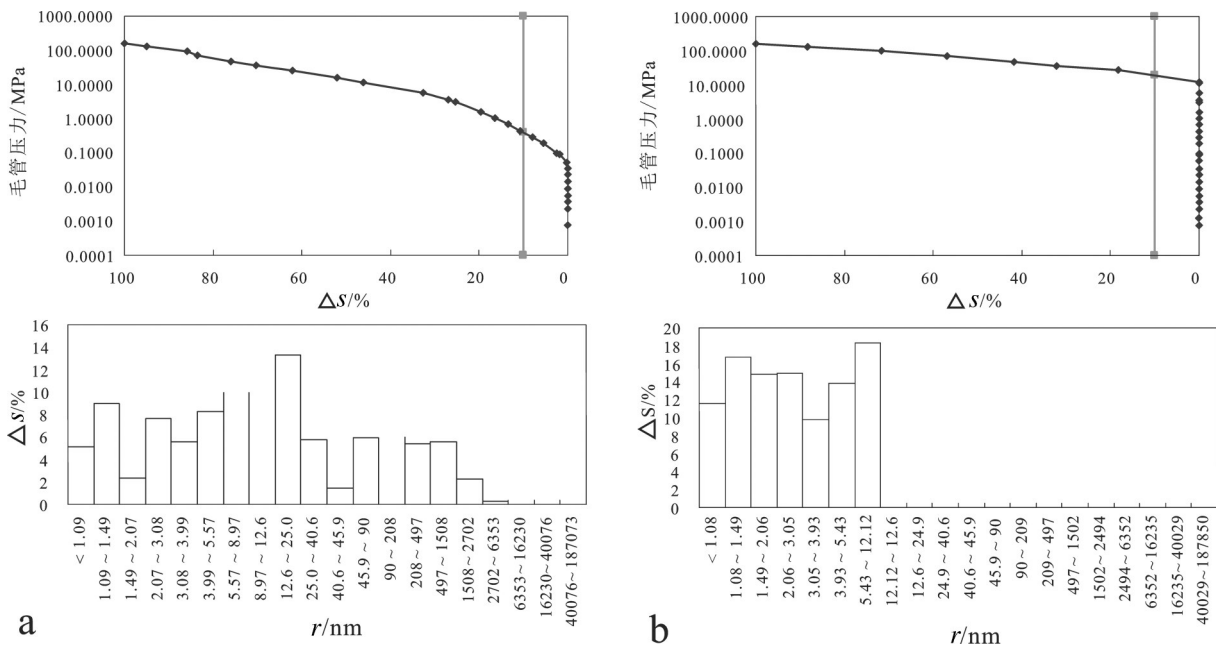


图 5 涟源七星街龙潭组页岩(a)和涟源建新村大隆组页岩(b)毛管力曲线和孔径分布

Fig.5 The distribution of capillary force curve and aperture in Lianyuan Qixing Street Longtan Formation shale (a) and lianyuan Jianxin Village Dalong Formation shale (b)

隙随着页岩的埋深和成岩作用生成,主要发育在石英、长石、黄铁矿和方解石等脆性较好的矿物中,具有一定的抗压实作用,呈三角形、长条形和不规则形等,孔隙直径多分布在20~500 nm,长条形残留粒间孔的长度可达微米级(图6-a);粒间溶蚀孔主要发育在方解石、长石等溶蚀性较强的矿物颗粒间,孔隙呈圆形、椭圆形、长条形、三角形和不规则形等,孔隙直径一般为纳米级,少数可达数微米,甚至毫米级(图6-b),这类的形成时间对作为源储一体的非常规页岩气藏形成和富集至关重要;微裂缝主要发育在脆性矿物晶体间、晶体内和粘土矿物颗粒内,宽度一般仅为几十nm,长度一般为数 μm (图6-c),晶间微裂缝由脆性矿物颗粒的抗压实形成,发育程度随压实作用的增强而减弱,虽然微裂缝只占页

岩储层微观类型的一小部分,并且发育具有局限性,但对页岩气藏具有重要意义,尤其是那些没有被充填的微裂缝,对页岩气藏的聚集和产出具有重要作用;有机质孔的单个气孔以圆形为主,其次为椭圆形、长条形和不规则形等,边缘较光滑,轮廓清晰,有些气孔边缘弯曲,有些相邻气孔彼此连通,有些较大的椭圆形、长条形或不规则形气孔由多个气孔破裂连通而成,该类孔隙以纳米级为主,孔隙直径为10~500 nm(图6-d)^[17]。

4 保存条件

湘中页岩气形成条件优越,但是受多期构造演化和抬升剥蚀的影响,使保存条件变差导致页岩气散失。热演化史分析表明二叠系页岩主要成藏期

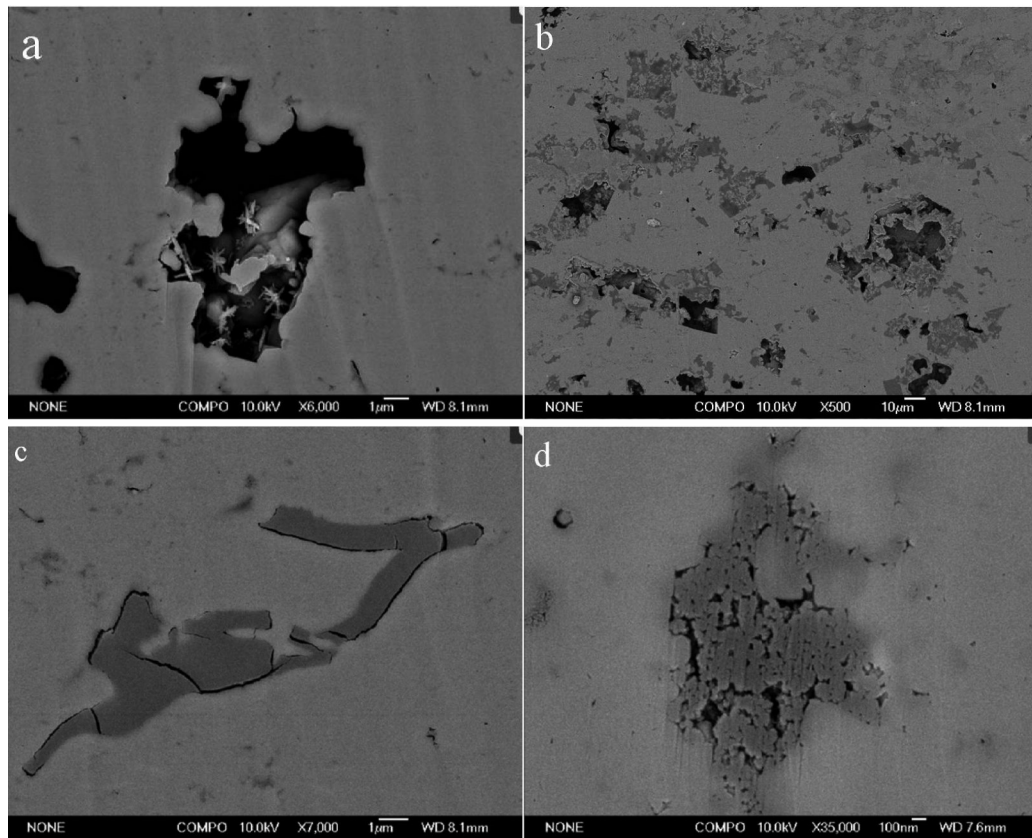


图6 湘中坳陷二叠系龙潭组电镜扫描照片

a—页岩矿物质残留粒间孔(被粘土矿物充填)(七星街二叠系龙潭组7号样);b—页岩矿物质残留粒间和溶蚀孔隙(七星街二叠系龙潭组4号样);c—页岩微裂缝(被粘土矿物充填)(七星街二叠系龙潭组7号样);d—页岩有机质气孔(七星街二叠系龙潭组10号样)

Fig.6 Scanning electron microscope photograph of Permian Longtan Formation in Xiangzhong depression

a—Shale mineral residual intergranular pores (filled with clay minerals) (No. 7 sample of Qixing Street Permian Longtan Formation); b— Residual intergranular pores and vuggy pores in shale mineral hole (No. 4 sample of Qixing Street Permian Longtan Formation); c— Shale microcrack (filled with clay minerals) (No. 7 sample of Qixing Street Permian Longtan Formation); d— Shale organic matter blowhole (No. 10 sample of Qixing Street Permian Longtan Formation)

是中侏罗世,且没有二次生烃条件,成藏早及长期散失导致页岩气难以保留。

研究区构造复杂,通天断层密集发育(2~3条/km),且强烈切割地层,容易破坏页岩气藏。本区经历了多期强烈的构造运动,刘喜顺^[29]在常规油气勘探中提出印支运动主幕使研究区在此之前稳定沉降的中泥盆统一下三叠统海相盖层褶皱隆起,形成一系列北东向宽缓背斜,并最终形成油气藏。这些油气藏在早燕山期持续埋藏后,大都演化为气藏。到晚侏罗世,印支期褶皱在燕山运动的强烈改造下进一步发育,形成线型紧闭褶皱,同时产生一系列逆掩断层,将背斜分割成数个断背斜或使背斜轴部遭受剥蚀,印支期油气藏遭受破坏,形成次生气藏;燕山—喜山运动导致湘中坳陷遭受强烈剥蚀,个别地区已剥至泥盆系,二叠系仅在涟源和邵阳个别凹陷分布。使整个零陵凹陷、邵阳凹陷西部及涟源凹陷边缘的油气失去了这一区域性盖层的封盖。受各期构造运动影响,湘中坳陷主要发育以NE—NNE向为主的压性断裂和少量的NE向正断层^[30]。从涟源区块LY-04-116测线的二维地震剖面也可看到,密集发育的大断裂已穿过了湘页1井(图7),大量的

压性断层主要形成于印支—早燕山期,而少量的NE向正断层主要是早白垩世晚燕山运动的产物,它们的形成时间基本是与油气的主要运移时期同步。但断层的研究资料表明,无论是逆断层还是正断层,断层在活动时都具开启性,是油气运移和扩散的通道,断裂活动一旦停止,对油气具封堵性。但值得注意的是,本区发育于高陡背斜带的断裂往往都通达地表,这为大气淡水的下渗创造了条件,大气淡水沿断裂或断裂附近的裂缝向下渗透,对形成的油气进行破坏与改造^①。

根据对湘页1井二叠系龙潭组和大隆组烃源岩的埋藏史与热演化史分析表明,二叠系烃源岩埋藏史和热演化史属于反复沉降抬升型,在早中三叠世达到成熟,即第一次生排烃,此时成熟度较低,主要生成液态油,产油量有限;中侏罗世达到最大生排烃期,即第二次生排烃,这一时期是主要的生排烃时期;二叠系页岩在中晚白垩世埋深时,并没有达到早中侏罗世的最大埋深,由于地温梯度和大地热流值的下降,并达到中侏罗世埋深时的最大温度和压力,即没有三次生烃,该套页岩生成的页岩气在三次抬升剥蚀的情况下,遭到一定程度的破坏,这

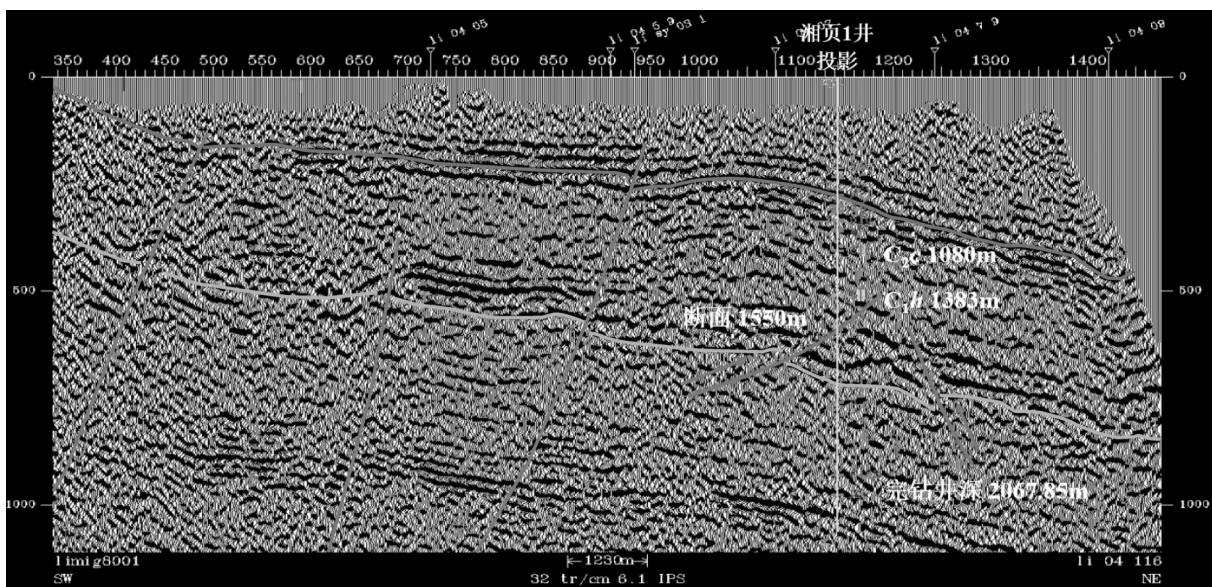


图7 涟源区块LY-04-116测线二维地震剖面解释图(据文献^②,有修改)

Fig.7 Two-dimensional seismic profile along LY-04-116 survey line in Lianyuan area (modified after reference ^②)

①胡宗全,聂海宽,高波,等. 中下扬子重点地区二叠系油气资源前景调查[R]. 北京:中国石化石油勘探开发研究院,2013:108-110.

②胡宗全,聂海宽,高波,等. 中下扬子重点地区二叠系油气资源前景调查[R]. 北京:中国石化石油勘探开发研究院,2013:27-29.

可能是导致现场解析气含量低的原因。包裹体均一温度测定结果,涟源凹陷二叠系包裹体均一温度测定结果为 135.0~141.5 °C^[31],二叠系包裹体证据表明中侏罗世是主要成藏期(图 8),生气早,再加上通天断层切割,不利于页岩气保留。对比美国页岩气勘探开发经验判断,生气高峰越晚越好,对页岩气保存有利,如美国页岩气勘探开发最成功的福特沃

斯盆地 Barnett 页岩气藏。因此,研究区生气高峰早,可能是导致页岩总体含气量低的原因。

5 有利区预测及资源潜力分析

综合以上研究成果,运用叠合法,认为研究区龙潭组页岩气藏发育的有利区主要位于涟源凹陷和邵阳凹陷的东部,前者有利区主要位于桥头河向

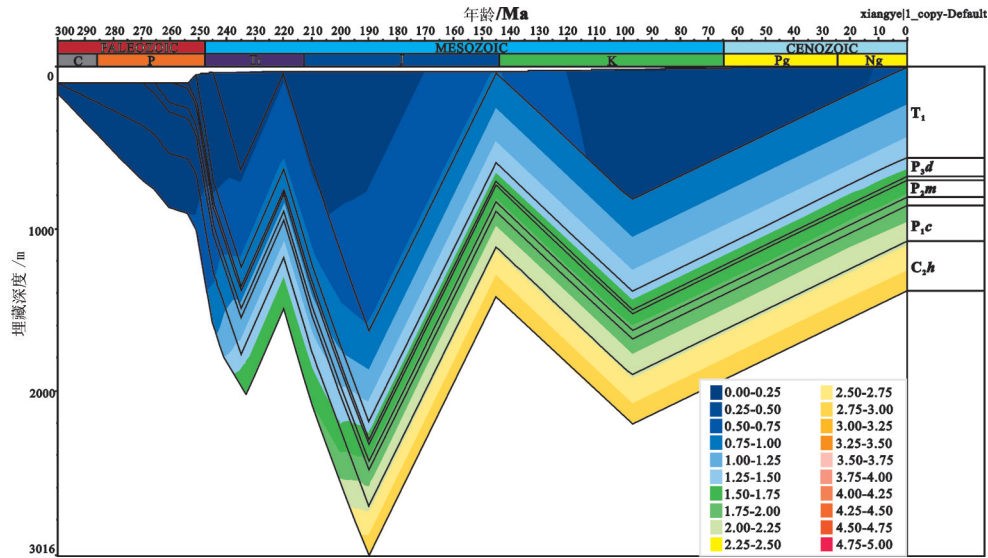


图 8 湘页 1 井埋藏史和热演化史(叠加 Ro)图

Fig.8 The burial history and thermal evolution process of well XY-1 (superposition Ro)

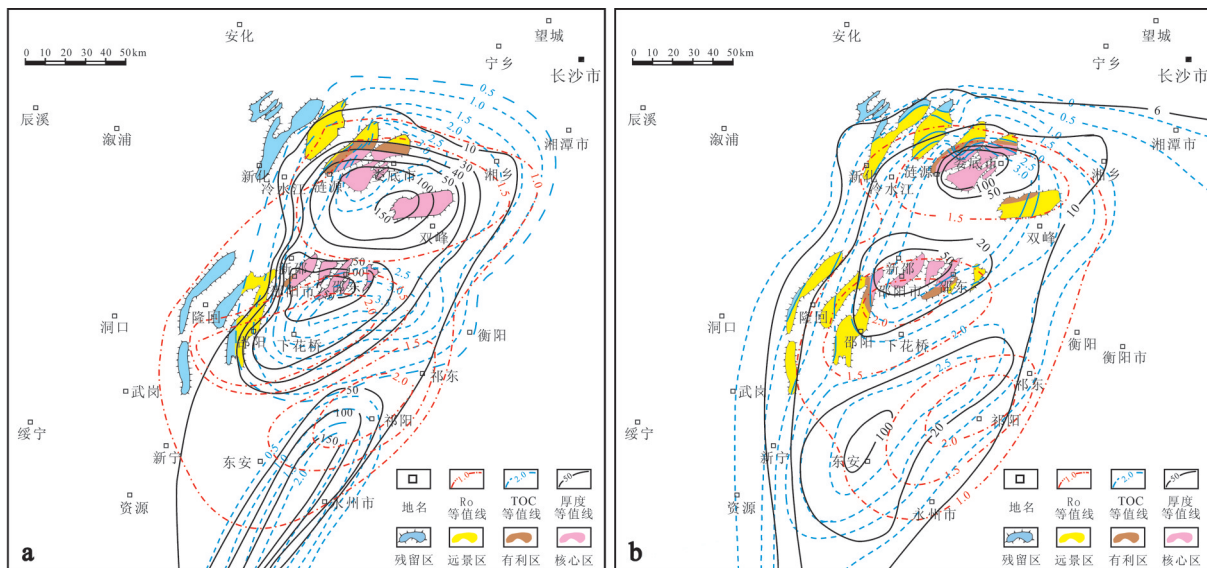


图 9 湘中地区上二叠统龙潭组(a)和大隆组(b)页岩气发育远景区、有利区和核心区

Fig.9 Upper Permian Longtan Formation (a) and Dalong Formation (b) shale gas development prospective area, favorable area and core area in Xiangzhong region

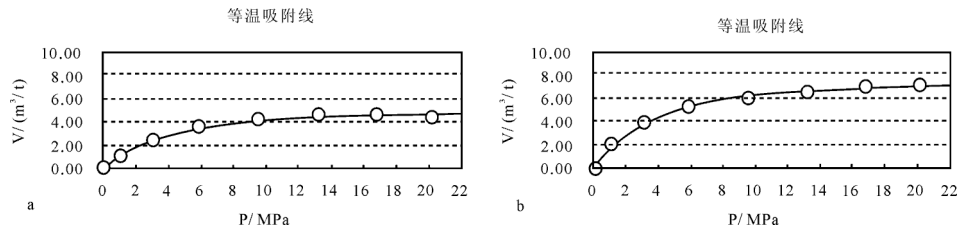


图10 湘中坳陷涟源七星街龙潭组(a)和涟源建新村大隆组(b)页岩等温吸附线图

Fig.10 Shale isothermal adsorption of Lianyuan Qixing Street Longtan Formation (a) and Lianyuan Jianxin Village Dalong Formation (b) in Xiangzhong depression

斜、恩口—斗笠山向斜中南部和洪山殿向斜(图9-a);后者有利区主要发育在邵阳市以东的凹陷区(图9-a)。研究区大隆组页岩气发育有利区与龙潭组类似,范围较龙潭组稍小,大隆组页岩气发育的有利区在涟源凹陷仅发育在桥头河向斜、恩口—斗笠山向斜南部,在邵阳凹陷仅发育在邵阳市和邵东县夹持的凹陷区(图9-b)。

在页岩气有利区预测基础上本次采用体积法^[32]计算了湘中凹陷页岩气资源量。其中(1)页岩分布面积:龙潭组、大隆组页岩气发育有利区面积分别为320 km²和300 km²; (2)页岩厚度:根据起算条件,并结合岩性—岩矿—地化—物性—含气性综合剖面 and 有利区内龙潭组、大隆组分布范围分析,可知龙潭组、大隆组平均厚度为40~80 m; (3)页岩密度:根据湘页1井岩石物性分析测试数据,本区页岩密度的取值密度介于2.62~2.78 t/m³,平均密度为2.62 t/m³; (4)含气量:本次研究采用等温吸附法、现场解析和类比等多种方法综合分析求得。龙潭组6个页岩样品的等温吸附的含气量0.817~4.665 m³/t,平均2.744 m³/t;大隆组4个页岩样品的等温吸附的含气量0.545~6.727 m³/t,平均3.452 m³/t(图10),按照美国吸附气含量约占总含气量一半的经验推断^[1,33],龙潭组的含气量为1.634~9.33 m³/t,平均5.488 m³/t;大隆组的含气量为1.09~13.454 m³/t,平均6.905 m³/t。综合页岩等温吸附含气量和结合湘页1井含气量分析,认为该区页岩气的含气能力较大,但由于保存条件和取心方式(非密闭取心)的影响,导致现今页岩含气量不高,但其较强的含气能力说明在保存条件较好的区域,页岩可能具有较高的含气量。在资源计算时,我们要考虑湘页1井的现场解析含气量,也要考虑页岩的实际含气能力和保存条件,因此,有利区内二叠系页岩的含气量在0.25~0.60 m³/t,按

概率分布取值。

在确定以上参数的基础上,得出大隆组页岩气总资源量为(60~193)×10⁸ m³(中值116×10⁸ m³);龙潭组页岩气总资源量为(67~232)×10⁸ m³(中值138×10⁸ m³)。上二叠统富有机质页岩显示一定的页岩气勘探潜力。

6 结 论

(1)二叠系大隆组下部—龙潭组上部在湘中坳陷的涟源凹和邵阳发育一套潟湖—沼泽相、滨海—沼泽相和潟湖相优质泥页岩。这套厚约80 m的优质泥页岩的有机碳含量均在2%以上, Ro 值都在1.5%以上。具备良好的页岩气勘探潜力。

(2)研究区页岩主要发育残留粒间孔、次生溶蚀孔,有机质孔发育较少,富有机质页岩孔隙度在2.44%~5.15%,平均3.79%,渗透率0.00632~0.0099 md,平均0.00749 md。

(3)热演化史分析表明二叠系页岩没有二次生烃条件,因此,现今的页岩残余气为第一次生成的热成因气和可能的现今生物成因气的混合,这可能是导致研究区页岩总体含气量低的原因。

(4)湘中页岩气形成条件优越,但是受多期构造演化和抬升剥蚀的影响,使保存条件变差导致页岩气散失。综合分析认为保存条件是该区页岩气成藏的关键因素,也是勘探成功的首要因素。

参考文献(References):

- [1] Hill D G, Nelson C R. Reservoir properties of the Upper Cretaceous Lewis Shale, a new natural gas play in the San Juan Basin[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(8): 1240.
- [2] Curtis J B. Fractured shale—gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921–1938.
- [3] Chalmers G R L, Bustin R M. Lower Cretaceous gas shale of

- Northeastern Britain[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2008, 56(1): 22–61
- [4] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(4): 392–400.
Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(4): 392–400(in Chinese with English abstract).
- [5] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国天然气勘探的两个重要领域[J]. *天然气工业*, 2007, 27(11): 1–6.
Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. Two essential gas accumulations for natural gas exploration in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(11): 1–6(in Chinese with English abstract).
- [6] 吉丛伟, 李志能, 彭正奇, 等. 湘中龙潭组北型沉积相及聚煤特征[J]. *中国煤炭地质*, 2009, 21(1): 9–12.
Ji Congwei, Li Zhineng, Peng Zhengqi, et al. Sedimentary facies and coal accumulation of northern type Longtan Formation in central Hunan[J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(1): 9–12(in Chinese with English abstract).
- [7] 敬乐, 潘继平, 徐国盛, 等. 湘中坳陷海相页岩层系岩相古地理特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(2): 215–222.
Jing Le, Pan Jiping, Xu Guosheng, et al. Lithofacies–paleogeography characteristics of the marine shale series of strata in the Xiangzhou depression, Hunan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2012, 39(2): 215–222(in Chinese with English abstract).
- [8] 柳祖汉. 湘中—南地区二叠系沉积相的分异及成因[J]. *地质科学*, 2005, 40(4): 510–517.
Liu Zuhan. Sedimentary facies differentiation and its mechanism during Permian in central–southern Hunan [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(4): 510–517(in Chinese with English abstract).
- [9] 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.
Ma Shaoyan, Xu Meng, Gan Lili, et al. Evaluation on the exploration prospect and geochemical characteristics of shale gas in the centre of Hunan[J]. *Petroleum Geophysics*, 2013, 11(2): 56–59(in Chinese with English abstract).
- [10] 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.
Wang Mingyan, Guo Jianhua, Kuang Lixiong, et al. Geochemical characteristics and evolution of the hydrocarbon source rocks from Lianyuan depression in the middle of Hunan Province[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(5): 721–726(in Chinese with English abstract).
- [11] 殷虹, 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): 37–43.
Yin Hong, Pan Zexiong. Exploration potential of both conventional and unconventional resources in the middle Hunan depression[J]. *Natural Gas Technology and Economy*, 2012, 6(1): 37–43(in Chinese with English abstract).
- [12] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源量勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2008, 28(6): 136–140.
Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(6): 136–140(in Chinese with English abstract).
- [13] 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. Controlling factors for shale gas accumulation and prediction of potential development area in shale gas reservoir of South China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(4): 484–491(in Chinese with English abstract).
- [14] 姜文斌, 陈永进, 李敏. 页岩气成藏特征研究[J]. *复杂油气藏*, 2011, 4(3): 1–5.
Jiang Wenbin, Chen Yongjin, Li Min. The research of accumulation characteristics of shale gas[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2011, 4(3): 1–5(in Chinese with English abstract).
- [15] 徐政语, 姚根顺, 黄玲, 等. 中国南方海相残留盆地勘探风险分析与选区评价[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(1): 9–16.
Xu Zhengyu, Yao Genshun, Huang Ling, et al. Risk analysis and play evaluation of marine residual basins in South China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(1): 9–16(in Chinese with English abstract).
- [16] 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.
Luo Xiaoping, Liu Jun, Xu Guosheng, et al. Geochemical characteristics and isothermal adsorption properties of the Devonian–Carboniferous marine mud shale in the Xiangzhou depression, Hunan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2012, 39(2): 206–214(in Chinese with English abstract).
- [17] 聂海宽, 边瑞康, 张培先, 等. 川东南地区下古生界页岩气储层围岩类型与特征及其对含气量的影响[J]. *地学前缘*, 2014, 21(4): 331–343.
Nie Haikuan, Bian Ruikang, Zhang Peixian, et al. Micro–types and characteristics of shale reservoir of the Lower Paleozoic in Southeast Sichuan Basin, and their effects on the gas content [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(4): 331–343(in Chinese with English abstract).
- [18] 聂海宽, 包书景, 高波, 等. 四川盆地及其周缘下古生界页岩气保存条件研究[J]. *地学前缘*, 2012, 19(3): 280–294.
Nie Haikuan, Bao Shujing, Gao Bo, et al. A study of shale gas preservation conditions for the Lower Paleozoic in Basin and its periphery[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3): 280–294(in Chinese with English abstract).
- [19] 汪凯明. 桂中坳陷泥盆系页岩气成藏条件浅析[J]. *中国地质*,

- 2013, 40(2): 430–438.
- Wang Kaiming. Shale gas accumulation conditions of Devonian strata in Guizhong depression[J]. *Geology in China*, 2013, 40 (2): 430–438(in Chinese with English abstract).
- [20] 姜呈馥, 王香增, 张丽霞, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段陆相页岩气地质特征及勘探潜力评价[J]. *中国地质*, 2013, 40 (6): 1880–1888.
- Jiang Chenfu, Wang Xiangzeng, Zhang Lixia, et al. Geological characteristics of shale and exploration potential of continental shale gas in 7th member of Yanchang Formation, southeast Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1880–1888(in Chinese with English abstract).
- [21] 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质上册[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1–200.
- Ma Li, Chen Huanjiang, Gan Kewen, et al. *Geostructure and Marine Facies Hydrocarbon Geology of South China: (Volume one)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1–200(in Chinese with English abstract).
- [22] 徐元刚. 湘中地区海相泥页岩层系沉积相及有利区预测[D]. 成都: 成都理工大学, 2012: 26–31.
- Xu Yuangang. *The Sedimentary Facies and Favourable Area Forecast of the Marine Shale Formations in Xiangzhong Area*[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012: 26–31(in Chinese with English abstract).
- [23] 庞维华, 丁孝忠, 高林志, 等. 湖南下寒武统层序地层特征与古环境演化变迁[J]. *中国地质*, 2011, 38(3): 560–576.
- Pang Weihua, Ding Xiaozhong, Gao Linzhi, et al. Characteristics of Sequence Stratigraphy and Palaeoenvironmental Evolution of Lower Cambrian strata in Hunan Province[J]. *Geology in China*, 2011, 38(3): 560–576(in Chinese with English abstract).
- [24] 葛祥英, 牟传龙, 周昱昱, 等. 湖南奥陶纪沉积演化特征[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1829–1841.
- Ge Xiangying, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, et al. Characteristics of Ordovician sedimentary evolution in Hunan Province[J]. *Geology in China*, 2013, 40(6): 1829–1841(in Chinese with English abstract).
- [25] 郑和荣, 高波, 彭勇民, 等. 中上扬子地区下志留统沉积演化与页岩气勘探方向[J]. *古地理学报*, 2013, 15(5): 645–656.
- Zheng Herong, Gao Bo, Peng Yongmin, et al. Sedimentary evolution and shale gas exploration direction of the Lower Silurian in Middle–Upper Yangtze area[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(5): 645–656(in Chinese with English abstract).
- [26] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 128–130.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. *Unconventional Petroleum Geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 128–130(in Chinese with English abstract).
- [27] 聂海宽, 张金川, 李玉喜. 四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件[J]. *石油学报*, 2011, 32(6): 959–967.
- Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Li Yuxi. Accumulation conditions of the Lower Cambrian shale gas in the Sichuan Basin and its periphery[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(6): 959–967(in Chinese with English abstract).
- [28] 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.
- Li Jianzhong, Dong Dazhong, Chen Gengsheng, et al. Prospects and strategic position of shale gas resources in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(5): 11–16(in Chinese with English abstract).
- [29] 刘喜顺. 湘中坳陷含油气保存条件研究[J]. *新疆石油天然气*, 2008, 4(2): 15–20.
- Liu Xishun. Study on tectonic evolution and hydrocarbon reservoir forming rules in Xiangzhong depression [J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2008, 4(2): 15–20(in Chinese with English abstract).
- [30] 刘磊. 湘桂地区构造运动对油气藏破坏作用研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2010: 8–13.
- Liu Lei. *Research on Destruction of Tectonic Movements on Oil and Gas Reservoirs in Xianggui area*[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2010: 8–13(in Chinese with English abstract).
- [31] 旷理雄, 郭建华, 朱锐, 等. 涟源凹陷流体包裹体特征与天然气成藏[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(2): 251–256.
- Kuang Lixiong, Guo Jianhua, Zhu Rui, et al. Characteristics of fluid inclusions and formation process of natural gas reservoirs in Lianyuan SAG[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(2): 251–256(in Chinese with English abstract).
- [32] 步少峰, 马若龙, 袁海锋, 等. 湘中地区海相页岩气资源潜力评价方法及参数选取[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(2): 223–230.
- Bu Shaofeng, Ma Ruolong, Yuan Haifeng, et al. Evaluation methods of shale gas resource potential and selection of parameters in Central Hunan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2012, 39(2): 223–230(in Chinese with English abstract).
- [33] Daniel J K, Marc B. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian–Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. *AAPG*, 2008, 92(1): 87–125.