

# 黄骅拗陷中区和北区沙河街组陆相页岩气 形成条件及资源潜力

何建华<sup>1,2,3</sup>, 丁文龙<sup>1,2,3\*</sup>, 李瑞娜<sup>2</sup>, 王濡岳<sup>3</sup>, 赵威<sup>3</sup>

(1.中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083; 2.中国地质大学(北京)海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室,北京 100083; 3.中国地质大学(北京)页岩气资源战略评价国土资源部重点实验室,北京 100083)

**摘要:**以黄骅拗陷中区和北区古近系沙河街组湖相富含有机质泥页岩为重点研究对象,在大量样品实验测试数据深入分析与镜下观察的基础上,从页岩的发育特征、有机质丰度、有机质类型、热演化程度及储集性能等方面出发,明确了研究区沙河街组陆相页岩气形成条件及资源潜力。研究区沙河街组有效生烃泥页岩的累积厚度大(大于1 000 m),有机质丰度高(大于1.0%),有机质类型适中(以II<sub>1</sub>及II<sub>2</sub>型为主),热演化程度以成熟—高熟为主,储集性能较好,具备良好的页岩气成藏条件。通过与美国主要产气页岩、中国陆相和海相页岩层段的主要特征参数指标相比较,建立了以富有机质泥页岩的厚度、有机碳含量、镜质组反射率、埋深及地层压力等参数作为页岩气有利区的评价标准,初步优选歧口凹陷西南部及张巨河一带为页岩气勘探的有利区,且以沙三段为页岩气富集的最有利层段。初步估算黄骅拗陷中区和北区沙河街组陆相泥页岩形成的页岩气总远景资源量约为 $0.46 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,其中沙三段占73%,充分表明了黄骅拗陷中区和北区沙河街组陆相页岩气资源潜力较大。

**关键词:**陆相页岩气 湖相页岩 成藏条件 沙河街组 黄骅拗陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)01-0022-09

## Forming condition of the continental shale gas of Shaheji Formation in the central-north Huanghua depression and its resource prospect

He Jianhua<sup>1,2,3</sup>, Ding Wenlong<sup>1,2,3\*</sup>, Li Ruina<sup>2</sup>, Wang Ruyue<sup>3</sup>, Zhao Wei<sup>3</sup>

(1.School of Energy Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing City, 100083, China; 2.Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, China University of Geosciences(Beijing), Beijing City, 100083, China; 3.Key Laboratory of Strategic Appraisal of Shale Gas, Ministry of Land and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing City, 100083, China)

**Abstract:** Based on a large number of experimental data analysis and microscopic observation, the systemic evaluation of origin-rich lacustrine shale in the Paleogene Shahejie Formation in the central-north area of Huanghua depression was taken to determine the formation condition and resources potential of shale gas in the area through analyzing characteristics of the shale development, organic matter abundance and type, thermal evolution degree, reservoir performance and other aspects. The results show that the cumulative thickness of the effective shale is thick (>1 000 m); the organic matter abundance is high (>1.0%) and the organic type is moderate (mainly II<sub>1</sub> and II<sub>2</sub>); the degree of thermal evolution is mature to

收稿日期:2015-10-23。

作者简介:何建华(1990—),男,湖北荆州人,在读博士研究生,从事石油构造分析、页岩气构造和裂缝及其与含气量关系方面的研究。联系电话:15311685595, E-mail:hejianhuadizhi@163.com。

\*通讯作者:丁文龙(1965—),男,河南南阳人,教授,博士生导师。联系电话:(010)82320629, E-mail:dingwenlong2006@126.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目“渤海湾盆地济阳拗陷古近系陆相富含有机质页岩裂缝研究”(41372139)和“中国南方下古生界海相富含有机质页岩裂缝发育程度与主控因素定量关系研究”(41072098),国家科技重大专项“渤海湾盆地页岩油气资源评价”(2011ZX05018-001-002)和“沾化凹陷罗家地区沙三下亚段泥页岩储层裂缝形成与分布预测”(2011ZX05009-002-205)。

higher mature, and the reservoir properties are good; these conditions are favorable for shale gas formation. The parameters of thickness of shale with rich organic matter, organic carbon content, vitrinite reflectance, buried depth and formation pressure were taken as the evaluation standards for target optimization in the area through the comparison of the main features of the shale gas in America, Chinese continent and marine. The southwest of Qikou sag and the Zhangjuhe area were selected initially as favorable areas for shale gas exploration, especially  $E_{s3}$  the most favorable interval for shale gas formation. The total amount of prospective resource of shale oil and gas generated from the Shahejie Formation in the central-north area of Huanghua depression is  $0.46 \times 10^{12} \text{ m}^3$ , of which  $E_{s3}$  occupies 73%. It shows enormous potential of the shale gas resources there.

**Key words:** continental shale gas; lacustrine shale; reservoir forming condition; Shahejie Formation; Huanghua depression

自从美国的“非常规油气革命”席卷整个世界以来,非常规油气的地位越来越为人们所重视,而页岩气作为非常规油气类型中的一种,更是目前研究的热点与亮点<sup>[1-2]</sup>。中国处在特殊的大地构造位置,形成了复杂的地质背景及多种类型的含油气盆地,决定了中国页岩气类型多样,资源丰富。中国存在海相、海陆过渡相及陆相页岩气,海相页岩气已经在南方取得了重大突破<sup>[3-4]</sup>,而海陆过渡相、陆相页岩气正处于起步阶段,自中国第1口陆相页岩气直井——柳坪177井压裂产气以来<sup>[5]</sup>,陆相页岩油气也正在受到广泛关注<sup>[6-7]</sup>,如中国石化2011年在泌阳凹陷安深1井核桃园组三段取得重大突破,获得最高产油量达 $4.68 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业油气流<sup>[8]</sup>,之后在济阳拗陷、辽河拗陷沙河街组三段也获得较好的油气显示<sup>[9]</sup>,中国东部陆相断陷盆地已然成为陆相页岩油气勘探开发的重点领域。在此背景下,笔者通过大量的地球化学、全岩矿物含量分析及扫描电镜等基础资料,着重研究黄骅拗陷中区和北区沙河街组陆相页岩气形成条件,并与美国主要的页岩气产层及中国海相和陆相富有机质页岩层的主要参数进行对比,选取黄骅拗陷中区和北区沙河街组页岩气形成的有利区及层段,并根据地质统计学方法计算黄骅拗陷中区和北区沙河街组页岩气远景资源量,以期为以后中国东部页岩油气勘探提供基础数据支撑。

## 1 区域地质背景

黄骅拗陷位于渤海湾盆地中部,是古近纪以来形成的新生代陆内伸展型盆地,以海河—海港断裂和羊三木断裂为界将拗陷分为北、中、南三区<sup>[10]</sup>。中区与北区主要包含黄骅拗陷重要的四大富油气凹陷及塘北凸起、北大港凸起、孔店凸起等构造单元(图1)。根据岩石学和古生物特征,古近系分为孔店组、沙河街组及东营组<sup>[11]</sup>,从始新世孔店组沉

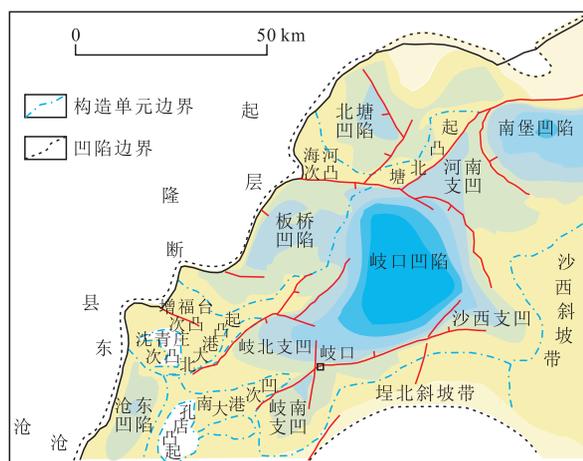


图1 黄骅拗陷中区和北区构造单元划分

Fig.1 Apartment partition map of the central-north Huanghua depression

积时期开始,古黄骅湖盆进入初始断陷发展期,之后在早渐新世沙三段沉积时期湖盆进一步扩大,并在渐新世中期(沙二段、沙一段沉积时期)稳定发展为开阔湖盆,到渐新世末期断陷活动减弱,湖盆开始萎缩,整体由断陷向拗陷转变<sup>[12]</sup>,其中在沙三段、沙一段沉积时期,湖盆断陷活动强烈,尤以沙三段沉积时期最为强烈,盆地沉积速率较快,发育了半深湖—深湖相的富有机质暗色泥页岩。这使得沙三段及沙一段成为研究区重要的烃源岩之一,本次研究以沙三段与沙一段为评价目的层,并以沙三段为主。

## 2 陆相页岩气形成条件

### 2.1 页岩厚度展布特征

广泛且稳定分布并具有一定厚度的暗色泥页岩是形成页岩气(油)藏的物质基础,也会影响页岩气形成有利区的选取及资源丰度的高低。黄骅拗陷中区和北区古近系暗色泥页岩主要分布在板桥及岐口凹陷,总厚度为700~2 500 m,其中沙三段、沙一段厚度最大,分布范围广。沙三段泥页岩在板桥、岐口凹陷的总厚度最大为1 600 m,富有机质泥

页岩厚度为10~300 m,且北厚南薄(图2),分布面积为3 439 km<sup>2</sup>,岩性为深色及褐灰色泥岩、钙质页岩、油页岩夹砂质条带等<sup>[13]</sup>,为页岩气(油)的形成奠定了深厚的物质基础。

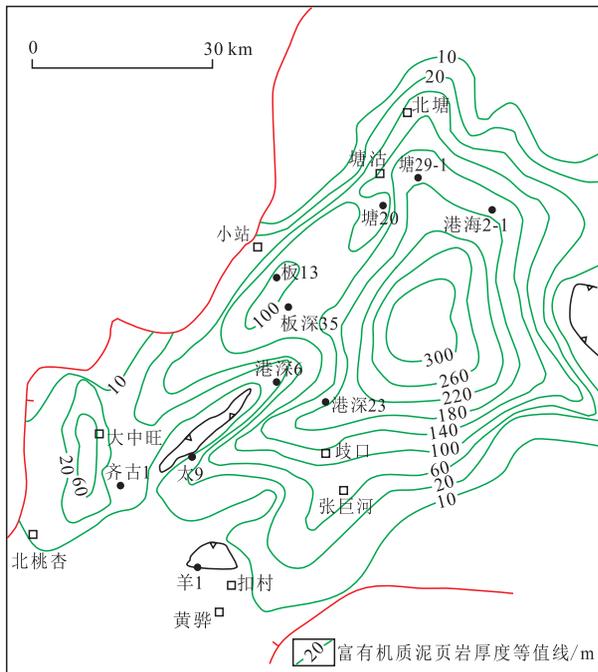


图2 黄骅拗陷中区和北区沙三段富有机质泥页岩厚度  
Fig.2 Isopach map of the organic-rich shale of Es<sub>3</sub> in the central-north Huanghua depression

### 2.2 页岩地球化学特征

黄骅断陷湖盆由于构造和沉积演化阶段较短,横向上相变较明显,有机质丰富且类型较复杂,腐泥、混合、腐殖型有机质常混合出现,横向上由半深湖—深湖相暗色泥页岩向沼泽、三角洲平原相泥页岩过渡,有机质类型也由I型、II<sub>1</sub>型向II<sub>2</sub>型、III型转变。沙河街组暗色泥页岩的有机质类型以II<sub>2</sub>型为主,次为II<sub>1</sub>型,其中歧口凹陷沙三段有机质类型最好,以I型为主,次为II<sub>1</sub>型;而板桥凹陷沙三段以III型为主,沙一段以II<sub>1</sub>型为主;北塘凹陷沙三段、沙一段属II<sub>2</sub>—III型;南堡凹陷沙三段、沙一段以II<sub>1</sub>型为主(图3),以歧口凹陷沙三段有机质类型最好,成烃质量最高。

较高的有机质丰度是暗色泥页岩能够成为优质气源岩的先决条件,也在一定程度上影响页岩吸附气的含量。沙河街组各层段中以歧口凹陷沙一段有机质丰度最高,有机碳含量(TOC)为0.5%~5.0%,氯仿沥青“A”含量平均为0.26%,生烃潜量平均为9.86 mg/g。沙三段有机质丰度稍次之,有机碳含量为2.0%~2.5%,并也以歧口凹陷居优,板桥、南堡及北塘凹陷依序次之,为0.5%~2.5%,属较好—好烃源岩,并且分布也较稳定(图4a);氯仿沥青“A”含

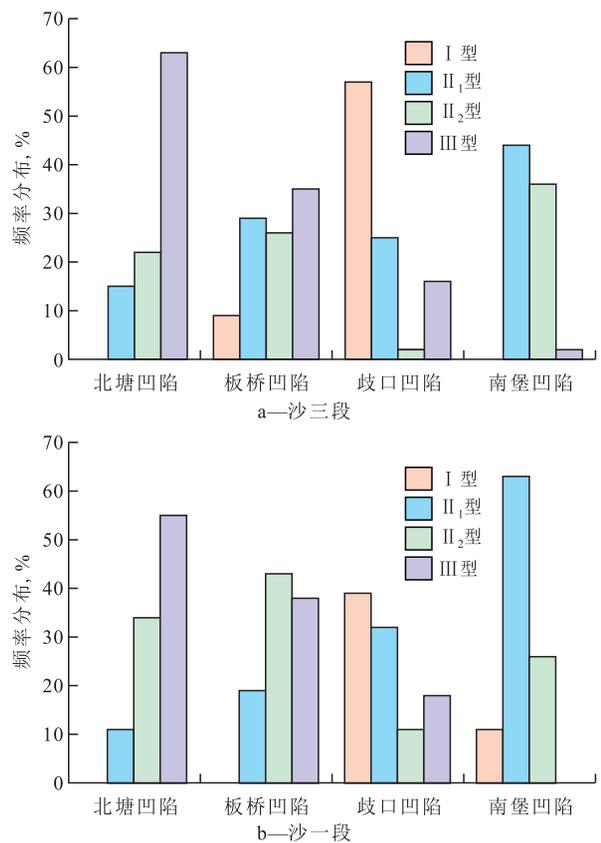


图3 黄骅拗陷中区和北区沙三段、沙一段有机质类型统计  
Fig.3 Statistics of organic matter type in Es<sub>3</sub> and Es<sub>1</sub> in the central-north Huanghua depression

量平均为0.14%,生烃潜量平均为13.32 mg/g,生烃潜力较沙一段高。

断陷盆地由于构造演化阶段较短,各个次级断陷发育时期差异性明显,且同一凹陷在不同部位沉降速率也有差别,这就导致了各个次级断陷中发育的暗色泥页岩的演化程度也存在差别。平面上,歧口与板桥凹陷暗色泥页岩的演化程度较高,沙三段泥页岩段镜质组反射率(R<sub>o</sub>)为0.5%~2.5%,凹陷主体部分R<sub>o</sub>值大于1.2%,普遍进入高成熟阶段。而北塘及南堡凹陷沙三段暗色泥页岩的演化程度较低,R<sub>o</sub>值为0.5%~0.8%,处在低熟—成熟阶段(图4b);纵向上,以板桥凹陷板深35井有机地球化学剖面为例(图5),从镜质组反射率、有机碳含量及生烃潜量等方面分析,沙三段各项指标达到最佳标准,而沙一段、沙二段依序次之。另外,沙三段下亚段泥页岩有机质热演化程度普遍达到0.9%以上,已经进入大量生气阶段。依据第3次油气资源评价结果<sup>[13]</sup>,沙三段生气强度大于50×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>,更加证实了沙三段巨大的页岩气勘探潜力,相比之下,沙二段、沙一段富有机质泥页岩的R<sub>o</sub>值主要为0.5%~0.8%,以生油为主,表现出了“油气共生、上油下气、高油低气”的关系。

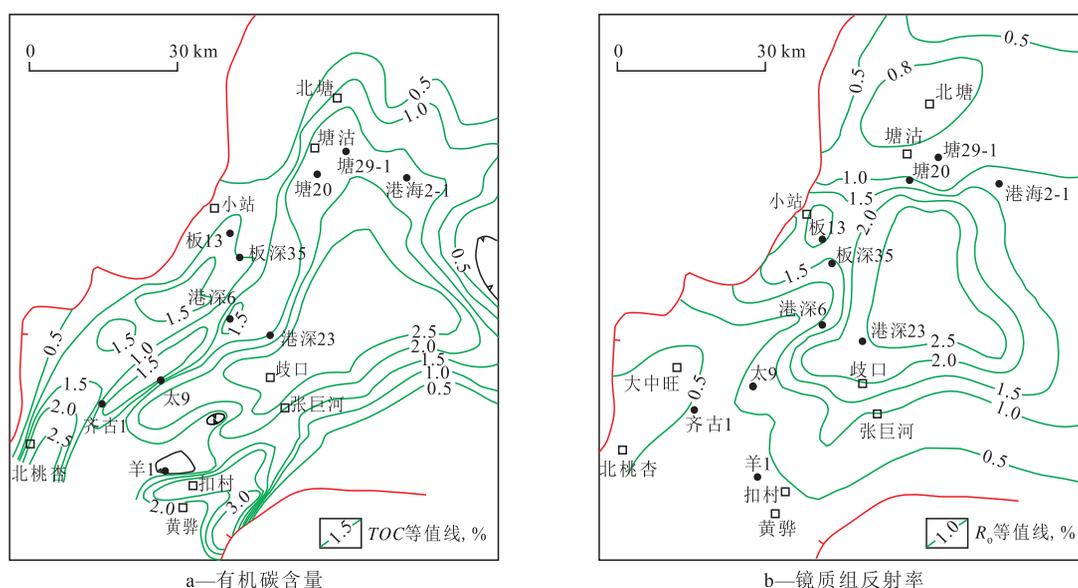


图4 黄骅坳陷中区和北区沙三段有机碳含量与镜质组反射率等值线

Fig.4 Contour maps of TOC content and  $R_o$  value of  $E_{s3}$  in the central-north Huanghua depression

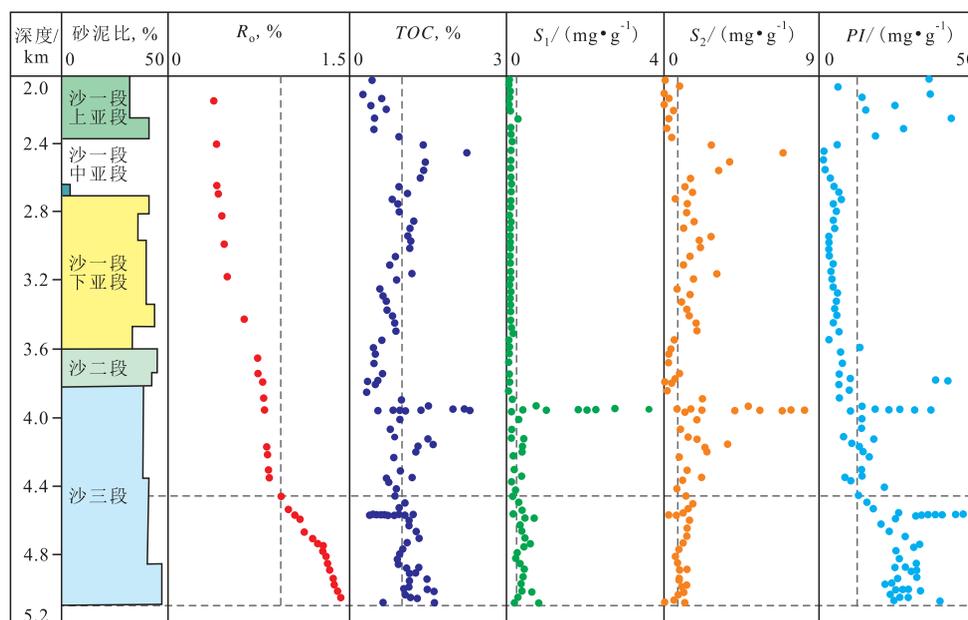


图5 板桥凹陷板深35井沙河街组有机地球化学剖面图(据李会军等<sup>[14]</sup>,有修改)

Fig.5 Organic geochemical cross sections of the Shahejie Formation in Well Banshen35, Banqiao sag (according to Li Huijun<sup>[14]</sup> et al, modified)

### 2.3 页岩储集性能

页岩气作为连续型油气中的一种,表现为储源一体,常形成自生自储型天然气藏<sup>[15]</sup>,其中页岩储集性能的评价,除了要考虑常规油气储层参数(孔隙度、渗透率及储集空间类型等)外,更为重要的是对其可压裂性、裂缝发育特征及吸附性能的评估。

页岩中脆性矿物含量高,粘土矿物含量适中,则容易产生裂缝并可防范其水敏性与塑性,便于后期水力压裂的实施<sup>[16]</sup>。歧口凹陷沙河街组泥页岩段岩心矿物含量分析结果表明,其主要由碎屑矿物

(石英、长石)、碳酸盐矿物(方解石、白云石)及粘土矿物(伊利石与伊/蒙混层,少见绿泥石及蒙脱石)组成。其中石英含量为13%~36%,平均为25%;长石和黄铁矿含量较少,平均分别为2.2%和3.7%;而碳酸盐矿物含量较高,为17%~45%,平均为30%;这与邻区的沾化凹陷及东营凹陷沙三段泥页岩的矿物含量特征相似,也是碳酸盐矿物含量明显多于石英等硅质矿物含量,而这刚好与北美主要产页岩油气的泥页岩段矿物含量特征相反(图6),表现出了海相页岩与陆相页岩岩石矿物学特征差异性。石

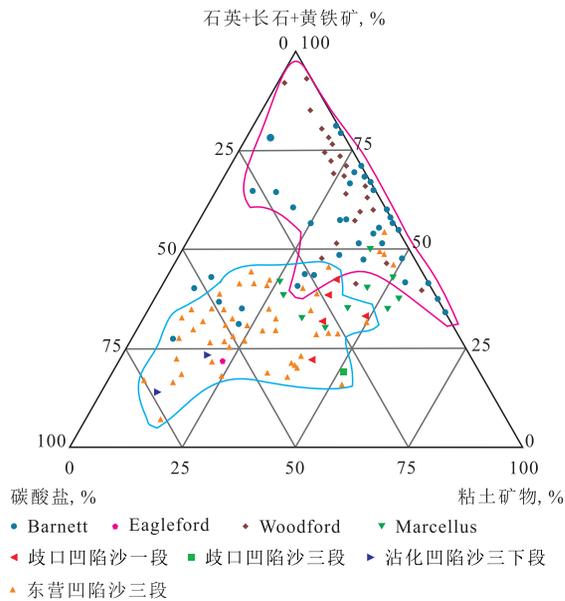


图6 黄骅拗陷中区和北区沙河街组泥页岩与北美页岩主要矿物含量对比 (部分数据来源于文献[17-19])

Fig.6 Comparison of main mineral composition between the Shahejie Formation shales in the central-north Huanghua depression and shales in the northern USA

(A part of data coming from the references[17-19])

英、长石及碳酸盐等脆性矿物含量平均达到了40%以上,粘土矿物含量平均为38%左右,以伊利石及伊/蒙混层为主,相对含量达到了70%以上,这些都优于一般对页岩可压裂性的评价标准(脆性矿物含量大于40%,粘土矿物含量小于40%),从而充分表明了沙河街组页岩具有较好的可压裂性。

沙河街组泥页岩整体储集物性较差,沙三段下亚段泥页岩物性分析资料表明,其孔隙度为0.9%~13.5%,平均为5.8%,渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为 $2.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属低孔低渗透储集体。但富有机质泥页岩段中发育各种微观孔隙类型,如矿物质孔、有机孔及晶间孔等(图7a,7b),而矿物质孔中较常见的是粘土矿物间孔,伊利石常呈凝絮状或毛绒状分布于粒间(图7a),孔径为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ ,这种孔隙对某些有机碳含量较低的陆相页岩来说至关重要<sup>[20-21]</sup>,由于它具有较高的微孔隙体积和比表面积,对气体的吸附能力非常强,能够增加页岩中吸附气的含量。除了孔隙以外,对页岩气富集更为重要的一种储集空间类型是微裂缝,它不但可以成为游离气富集的储渗空间,增加页岩气中游离气所占的比例,而且微裂缝有助于吸附态页岩气的解吸,成为页岩气运移及开采的通道<sup>[22]</sup>。页岩中发育的裂缝分为构造裂缝及非构造裂缝<sup>[23]</sup>,研究区以构造裂缝为主,从镜下观察到沙河街组泥页岩段中发育

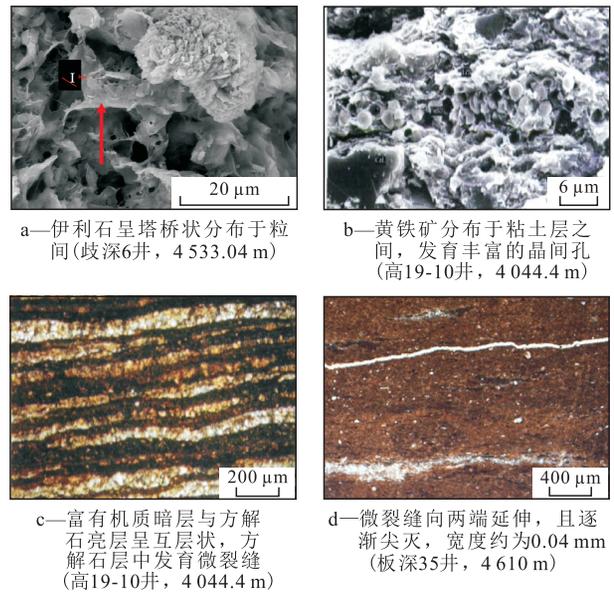


图7 黄骅拗陷中区和北区沙三段页岩气储集空间类型

Fig.7 Reservoir space types of E<sub>3</sub> shale gas in the central-north Huanghua depression

微裂缝(图7c,7d),这些裂缝必将在改善页岩储集物性及后期压裂改造过程中发挥重要作用。

### 2.4 保存条件

页岩超低的孔渗性使得页岩气对于盖层封闭性的要求不像常规气藏那么苛刻,对于美国,保存条件并不是页岩气勘探评价的重点,而对于多陆块、地块拼合形成的中国大陆,具有多期构造运动叠加改造、隆升剥蚀强烈、断裂极其发育、热演化程度高、保存条件复杂的特点,这就决定了对页岩气保存条件的研究尤为重要。尤其对于存在多断裂的陆相断陷黄骅湖盆,本身单层纯泥页岩厚度较海相地层薄,对保存条件的研究就更是不可忽视。页岩气的保存条件评价主要从水文地质条件、地层压力、封盖层条件及其微观性质、构造条件以及岩浆活动等方面综合评价<sup>[24]</sup>。

黄骅拗陷中区和北区虽然断裂较发育,但在湖盆深凹陷区,构造相对稳定,区域大断裂并不发育,在此构造背景下,沙河街组湖相暗色泥页岩与灰岩及致密砂岩常形成不等厚互层,形成储盖双重阻挡,有利于页岩气的保存。据统计,板桥凹陷沙一段中部泥页岩单层厚度为0.5~400 m,泥地比为60%~80%,排替压力约为10 MPa<sup>[25]</sup>,是区域内质量较好的盖层。另外,在地层水性质方面,表现为异常高的矿化度,水型为重碳酸钠型与氯化钙型<sup>[26]</sup>,中区(歧口凹陷、板桥凹陷)沙一段地层水矿化度大于20 g/L,水型为重碳酸钠型,反映出深部地层较好的封闭性,相比之下北区(南堡凹陷)矿化度整体小于6 g/L,Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup>值为2~4,这些都反映出北区封闭性

较差,地层水渗滤严重。而中区沙三段地层水矿化度大于 20 g/L,水型为氯化物重碳酸盐钠水及重碳酸盐氯化物钠水,反映出更好的封闭性条件,与沙一段相同,北区沙三段地层水矿化度也较低,为2~4 g/L。对页岩气保存影响较大的还有地层压力,据相关文献报道<sup>[27]</sup>,沙河街组整体处于超压状态,以歧口凹陷为例,沙一段中、上亚段地层压力系数最大,平均压力系数最高达 1.45 以上,沙一段下亚段次之,最高达 1.30 以上,沙二段和沙三段压力系数较低,最高为 1.25。可以看出,沙一段可以较有效地对沙三段形成的页岩气构成封堵。

综合来看,平面上,黄骅坳陷中区的保存条件较北区好,且以歧口凹陷的保存条件最佳;纵向上,沙一段的超高压及较高排替压力可以对沙三段形成良好的封盖。

### 2.5 页岩含气量分析

含气量是衡量页岩气是否具有经济开采价值和资源潜力评价的重要指标,页岩气包括游离气、吸附气及溶解气等,其中吸附气含量受有机碳含

量、压力、成熟度、温度、厚度、面积等因素控制;游离气含量主要受地层压力、孔隙度、含气饱和度、温度、厚度、面积等因素控制<sup>[28]</sup>。黄骅坳陷页岩气的研究尚处于起步阶段,还没有针对页岩气的钻探井,无法得到其准确的含气量,但据现有钻井资料,在沙河街组泥页岩段的气测、录井、岩心及测井都显示出一定程度的异常,如张海5井在沙一段泥页岩层段明显表现出高伽马、高声波时差、中低电阻率,局部出现周波跳跃等特征,气测全烃含量达到 4%~15%(图8)。除了测井显示异常外,在钻井过程中沙河街组泥页岩层段也呈现了良好的油气显示,如在歧口凹陷中心地区的新港57井揭示了沙三段非常好的天然气前景,射开 4 314.0~4 326.4 m 井段,8 mm 油嘴求产获得天然气产量 13.7×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,凝析油产量 3.5 t/d,气油比高,井口压力约为 8.7~17.0 MPa,已具有工业开采价值。而且沙三段富有机质泥页岩段普遍处于异常高压带,而异常高压带的形成与烃源岩大量生烃增压有密切的关系。这些都说明研究区沙河街组富有机质泥页岩的含气量高,

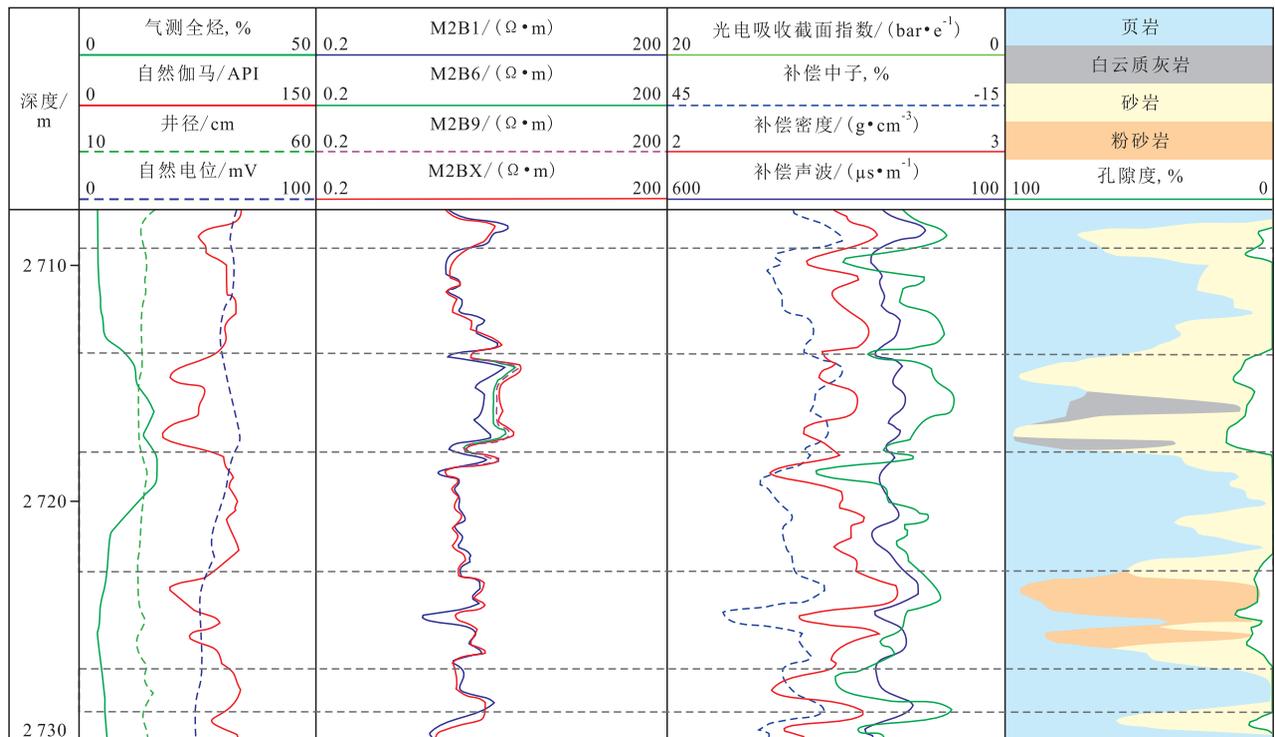


图8 歧口凹陷张海5井沙一段含油气页岩层段的典型测井响应特征(据贾丽等<sup>[29]</sup>,有修改)

Fig.8 Well logging responses characteristics of Es<sub>1</sub> gas shale in Well Zhanghai5, Qikou sag (according to Jia Li<sup>[29]</sup> et al, modified)

含气条件优越,具有很好的勘探前景。

## 3 页岩气资源潜力

页岩气藏作为一种典型的非常规气藏类型,其

影响因素较多,诸如含气量、吸游比、有机碳含量、类型及成熟度、孔渗条件、裂缝、埋深等主要参数的变化,都会对其产生很大影响。中外页岩气学者对页岩气藏评价的参数选取及赋值标准并不一致,如 Hill 等认为有机碳含量、热成熟度、厚度、吸游比等



## 4 结论

黄骅坳陷发育沙三段和沙一段2套半深湖—深湖相的暗色泥页岩层段,沙河街组泥页岩有效厚度大且分布稳定、有机质丰度高、类型适中、成熟度较高,具备形成页岩气的良好物质基础。在储集性能方面,孔渗条件一般,脆性矿物含量高,可压裂性较好,还发育丰富的微观孔隙类型,为页岩气的储集提供了良好的空间保证。更重要的是沙河街组页岩气保存条件良好,沙一段厚层泥页岩与局部灰岩互层形成的超压为沙三段页岩气的形成提供了天然的盖层条件,并且据现有勘探资料,充分显示沙河街组较好的含气性,具备一定的工业开采价值。

以厚度、有机质丰度、有机质类型、成熟度、埋深、保存条件及地层压力参数为选区标准,认为沙河街组页岩气形成的有利区位于歧口凹陷西南部及张巨河一带;采用概率统计学方法,初步估算了研究区沙河街组泥页岩形成的页岩气的总远景资源量约为 $0.46 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,并且大部分集中于沙三段,资源潜力较大,应优先开展歧口凹陷沙三段页岩气成藏条件的进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 邹才能,张国生,杨智,等.非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质[J].石油勘探与开发,2013,40(4):385-399.  
Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 385-399.
- [2] 闫存章,黄玉珍,葛春梅,等.页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J].天然气工业,2009,29(5):1-6.  
Yan Cunzhang, Huang Yuzhen, Ge Chunmei, et al. Shale gas: Enormous potential of unconventional natural gas resources [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 1-6.
- [3] 郭彤楼,张汉荣.四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J].石油勘探与开发,2014,41(1):28-36.  
Guo Tonglou, Zhang Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiiba shale gas field, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 28-36.
- [4] 王南,裴玲,雷丹凤,等.中国非常规天然气资源分布及开发现状[J].油气地质与采收率,2015,22(1):26-31.  
Wang Nan, Pei Ling, Lei Danfeng, et al. Analysis of unconventional gas resources distribution and development status in China [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(1): 26-31.
- [5] 天工.鄂尔多斯盆地第一口陆相页岩气水平井完钻[J].地质装备,2012,13(3):8-9.  
Tian Gong. The first continental shale gas horizontal well was completed in Ordos Basin [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2012, 13(3): 8-9.
- [6] 宁方兴.济阳坳陷不同类型页岩油差异性分析[J].油气地质与采收率,2014,21(6):6-9.  
Ning Fangxing. Difference analysis on different types of shale oils in Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(6): 6-9.
- [7] 林腊梅,张金川,唐玄,等.中国陆相页岩气的形成条件[J].天然气工业,2013,33(1):35-44.  
Lin Lamei, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, et al. Conditions of continental shale gas accumulation in China [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(1): 35-44.
- [8] 陈祥,严永新,章新文,等.南襄盆地泌阳凹陷陆相页岩气形成条件研究[J].石油实验地质,2011,33(2):137-141.  
Chen Xiang, Yan Yongxin, Zhang Xinwen, et al. Generation conditions of continental shale gas in Biyang Sag, Nanxiang Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(2): 137-141.
- [9] 武晓玲,高波,叶欣,等.中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力[J].石油与天然气地质,2013,34(4):455-462.  
Wu Xiaoling, Gao Bo, Ye Xin, et al. Shale oil accumulation conditions and exploration potential of faulted basins in the east of China [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 455-462.
- [10] 张福利.黄骅坳陷中、北区构造特征与油气分布规律[D].青岛:中国石油大学(华东),2007:7-10.  
Zhang Fuli. Structural feature and the law of oil-gas reservoir distribution in middle-north area of Huanghua Depression [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2007: 7-10.
- [11] 严德天,王华,王家豪,等.黄骅坳陷沙河街组层序地层样式及隐蔽圈闭预测[J].中国矿业大学学报,2008,37(1):30-36.  
Yan Detian, Wang Hua, Wang Jiahao, et al. Sequence stratigraphic pattern and forecast of subtle reservoir of the Shahejie formation in Huanghua depression [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 30-36.
- [12] 李秀芬.黄骅坳陷中北区浅层天然气和原油解析气地球化学特征与成因[D].兰州:中国科学院研究生院,2004:7-13.  
Li Xiufen. Geochemical characteristics and original of shallow reservoir natural gas and dissolved gas of crude oil in the central-north area in Huanghua depression [D]. Lanzhou: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004: 7-13.
- [13] 于学敏,何咏梅,姜文亚,等.黄骅坳陷歧口凹陷古近系烃源岩主要生烃特点[J].天然气地球科学,2011,22(6):1 001-1 008.  
Yu Xuemin, He Yongmei, Jiang Wenya, et al. Hydrocarbon generation of Paleocene source rocks in Qikou sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 1 001-1 008.
- [14] 李会军,吴泰然,马宗晋,等.黄骅坳陷古近系深层烃源岩成烃演化特征[J].石油勘探与开发,2004,31(6):40-43.  
Li Huijun, Wu Tairan, Ma Zongjin, et al. Hydrocarbon generation from Paleocene deep source rocks in Huanghua Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(6): 40-43.
- [15] 胡明毅,邱小松,胡忠贵,等.页岩气储层研究现状及存在问题探讨[J].特种油气藏,2015,22(2):1-7.

- Hu Mingyi, Qiu Xiaosong, Hu Zhonggui, et al. Current researches on shale gas reservoirs and existing problems [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(2): 1-7.
- [16] 任闽燕, 姜汉桥, 李爱山, 等. 非常规天然气增产改造技术研究进展及其发展方向[J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(2): 103-107.
- Ren Minyan, Jiang Hanqiao, Li Aishan, et al. Review on study progress of unconventional gas stimulation technology [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(2): 103-107.
- [17] 张善文, 张林晔, 李政, 等. 济阳坳陷古近系页岩油气形成条件[J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(6): 1-5.
- Zhang Shanwen, Zhang Linye, Li Zheng, et al. Formation conditions of Paleogene shale oil and gas in Jiyang depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(6): 1-5.
- [18] 张有瑜, 王彪, 孙国忠, 等. 泥页岩组构 X 射线衍射定量分析方法[J]. *现代地质*, 1997, 11(1): 29-35.
- Zhang Youyu, Wang Biao, Sun Guozhong, et al. A quantitative description technique for orientation analysis of argillaceous rock fabric by X-ray diffraction [J]. *Geoscience*, 1997, 11(1): 29-35.
- [19] 李政. 东营凹陷页岩气勘探潜力初步评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2011: 30-31.
- Li Zheng. Exploration potential analysis of the shale gas in Dongying depression [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011: 30-31.
- [20] Ross D J K. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin, Application of an integrated formation evaluation [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(1): 87-125.
- [21] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 579-601.
- [22] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价[J]. *天然气工业*, 2010, 30(10): 7-12.
- Jiang Yuqiang, Dong Dazhong, Qi Lin, et al. Basic features and evaluation of shale gas reservoirs [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(10): 7-12.
- [23] 张琴, 刘畅, 梅啸寒, 等. 页岩气储层微观储集空间研究现状及展望[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(4): 666-674.
- Zhang Qin, Liu Chang, Mei Xiaohan, et al. Status and prospect of research on microscopic shale gas reservoir space [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 666-674.
- [24] 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]. *地质学前沿*, 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 Sichuan Basin and its periphery [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3): 280-294.
- [25] 朱娜娜. 歧口凹陷沙河街组一段中部泥岩盖层封闭性综合评价[D]. 大庆: 东北石油大学, 2012: 18-29.
- Zhu Nana. Comprehensive evaluation of mudstone caprocks in the middle of the first member of Shahejie Formation in the Qikou Sag [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2012: 18-29.
- [26] 大港油田石油地质志编写组. 中国石油地质志·卷四[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991: 225-241.
- Composing group of petroleum geology in Dagang oil field. *Petroleum geology of China (Vol.4)* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 225-241.
- [27] 柳广第, 王德强. 黄骅坳陷歧口凹陷深层异常压力特征[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(3): 22-24.
- Liu Guangdi, Wang Deqiang. The characteristics of abnormal pressure in deep formations in Qikou sag, Huanghua depression, Bohai Bay basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(3): 22-24.
- [28] 李建青, 高玉巧, 花彩霞, 等. 北美页岩气勘探经验对建立中国南方海相页岩气选区评价体系的启示[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(4): 23-27, 32.
- Li Jianqing, Gao Yuqiao, Hua Caixia, et al. Marine shale gas evaluation system of regional selection in South China: enlightenment from North American exploration experience [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(4): 23-27, 32.
- [29] 贾丽, 肖敦清, 刘国全, 等. 黄骅坳陷歧口凹陷西斜坡带泥晶灰质白云岩油层评价方法及应用[J]. *中国石油勘探*, 2007, 28(5): 55-61.
- Jia Li, Xiao Dunqing, Liu Guoquan, et al. Method evaluating micritic calcite dolomite reservoirs in west slope of Qikou Sag of Huanghua Depression and its application [J]. *China Petroleum Exploration*, 2007, 28(5): 55-61.
- [30] Hill R J, Jarvie D M, Zumberge J. Oil and gas geochemistry and petroleum systems of the Fort Worth Basin [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 445-473.
- [31] 何发岐, 朱彤. 陆相页岩气突破和建产的有利目标——以四川盆地地下侏罗统为例[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(3): 246-251.
- He Faqi, Zhu Tong. Favorable targets of breakthrough and built-up of shale gas in continental facies in Lower Jurassic, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(3): 246-251.
- [32] 王敏, 陈祥, 严永新, 等. 南襄盆地泌阳凹陷陆相页岩油地质特征与评价[J]. *古地理学报*, 2013, 15(5): 663-671.
- Wang Min, Chen Xiang, Yan Yongxin, et al. Geological characteristics and evaluation of continental shale oil in Biyang sag of Nanxiang Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(5): 663-671.
- [33] 王庆波, 刘若冰, 魏祥峰, 等. 陆相页岩气成藏地质条件及富集高产主控因素分析——以元坝地区为例[J]. *断块油气藏*, 2013, 20(6): 698-703.
- Wang Qingbo, Liu Ruobing, Wei Xiangfeng, et al. Geologic condition of shale gas accumulation in continental facies and main controlling factors of enrichment and high production: Taking Yuanba District as an example [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(6): 698-703.
- [34] 朱彤, 曹艳, 张快. 美国典型页岩气藏类型及勘探开发启示[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(6): 718-724.
- Zhu Tong, Cao Yan, Zhang Kuai. Typical shale gas reservoirs in USA and enlightenment to exploration and development [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(6): 718-724.