

松辽盆地北部白垩系沙河子组煤岩气成藏条件及勘探潜力

白雪峰^{1,2}, 陆加敏^{1,2}, 李军辉^{1,2}, 孙立东^{1,2}, 杨亮^{1,2}, 刘家军^{1,2}, 许金双^{1,2}, 周翔^{1,2}, 李笑梅^{1,2}, 李国政^{1,2}

(1. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 黑龙江大庆 163712; 2. 中国石油大庆油田分公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712)

摘要:松辽盆地深层白垩系沙河子组煤岩厚度大、煤岩气资源丰富,是盆地北部深部煤岩气重要的勘探领域。通过地震、地质和地球化学等多种资料分析,研究了成煤环境、成烃演化、成储机制以及煤岩气聚集条件和成藏模式,提出了断陷盆地煤岩气富集模式和未来煤岩气勘探方向。研究表明:①沙河子组沉积时期多个断陷发育大面积泥炭沼泽,沉积的巨厚煤岩是煤岩气形成的物质基础。②沙河子组具有高丰度和高成熟度的泥、煤双源生烃、供气。③沙河子组煤岩气中游离气和吸附气共存,其中游离气占34.80%~43.30%,吸附气占56.70%~65.20%。深部无烟煤含气量为33.83~36.56 cm³/t。④沙河子组煤岩有机质孔与裂隙形成的“孔缝体”,是煤岩气聚集的有利空间。⑤沙河子组煤-泥型储-盖组合突破压力高,与煤层内部超压流体一起,为煤岩气保存提供有利条件。⑥初步估算松辽盆地北部沙河子组煤岩气资源量约1.260×10¹² m³,其中徐家围子断陷沙河子组煤岩气资源量0.853×10¹² m³。徐家围子断陷宋站洼槽东侧缓坡带和徐西洼槽为松辽盆地北部煤岩气勘探的首选靶区。

关键词:勘探潜力;突破方向;成藏条件;煤岩气;沙河子组;白垩系;松辽盆地北部

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Accumulation conditions and exploration potential of coal-rock gas (CRG) in the Cretaceous Shahezi Formation, northern Songliao Basin

BAI Xuefeng^{1,2}, LU Jiamin^{1,2}, LI Junhui^{1,2}, SUN Lidong^{1,2}, YANG Liang^{1,2}, LIU Jiajun^{1,2}, XU Jinshuang^{1,2}, ZHOU Xiang^{1,2}, LI Xiaomei^{1,2}, LI Guozheng^{1,2}

(1. National Key Laboratory for Green Mining of Multi-resource Collaborative Continental Shale Oil, Daqing, Heilongjiang 163712, China;
2. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield of CNPC, Daqing, Heilongjiang 163712, China)

Abstract: The deeply buried Shahezi Formation in the Songliao Basin exhibits considerable coal-bearing rock thickness and abundant coal-rock gas (CRG) resources, establishing itself as an important CRG exploration target in the northern Songliao Basin. Based on the analyses of seismic, geological, and geochemical data, we investigate the coal-forming environment, hydrocarbon generation and evolution, reservoir-forming mechanisms, and CRG accumulation conditions and patterns in the formation. Accordingly, the enrichment patterns and future exploration targets of CRG are proposed in the downfaulted Songliao Basin. The results indicate the presence of extensive peat swamps in multiple downfaulted sediments during the deposition of the Shahezi Formation, with the significantly thick coal seams developed within providing a sound material basis for generating the CRG. Both the coal and mudstone characterized by high abundance and high maturity in the Shahezi Formation serve as source rocks for the enrichment and accumulation of CRG. The CRG in the Shahezi Formation features the coexistence of free and adsorbed gas, with the former accounting for 34.8 % to 43.3 % and the latter for 56.7 % to 65.2 %, as well as the deep anthracite exhibiting a gas content range of 33.83 ~ 36.56 cm³/t. The coal-bearing rocks in the Shahezi Formation contain a pore-fracture system consisting of organic pores and fractures, which provides effective spaces for CRG accumulation. The high breakthrough pressures of the reservoir-cap rock assemblages, consisting of coals and mudstones, and overpressured fluids within coal seams create favorable conditions for CRG preservation. Preliminary

收稿日期:2024-04-22;修回日期:2024-07-19。

第一作者简介:白雪峰(1979—),男,博士、教授级高级工程师,油气勘探部署与地质综合研究。E-mail: bxf@petrochina.com.cn。

通信作者简介:周翔(1988—),男,博士、高级工程师,非常规油气成藏机理与勘探。E-mail: zhouxian2206@163.com。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2016E-01);中国石油天然气股份有限公司前瞻性 & 基础型重大科技项目(2021DJ0205)。

estimates suggest that the Shahezi Formation in the northern Songliao Basin boasts CRG resources of approximately $1.260 \times 10^{12} \text{ m}^3$, including $0.853 \times 10^{12} \text{ m}^3$ in the Xujiaweizi Fault Depression, and both the gentle slope zone on the east side of the Songzhan trough and the Xuxi trough are identified as the preferred targets for CRG exploration in the fault depression.

Key words: exploration potential, potential exploration target, accumulation condition, coal-rock gas (CRG), Shahezi Formation, Cretaceous, northern Songliao Basin

引用格式:白雪峰,陆加敏,李军辉,等. 松辽盆地北部白垩系沙河子组煤岩气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 47-61. DOI: 10.11743/ogg20250104.

BAI Xuefeng, LU Jiamin, LI Junhui, et al. Accumulation conditions and exploration potential of coal-rock gas (CRG) in the Cretaceous Shahezi Formation, northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 47-61. DOI: 10.11743/ogg20250104.

近年来,随着全球能源格局快速变化,中国也在能源需求持续攀升和环保要求不断强化的背景下,加快以天然气和风能为代表的清洁能源的开发利用。中国每年面临 $(2\,000 \sim 3\,000) \times 10^8 \text{ m}^3$ 天然气供给缺口,天然气对外依存度长期维持在40%~50%的高位,严重威胁着中国能源安全和国民经济的稳定^[1]。中国石油大庆油田公司通过不断创新地质理论认识,加大对新领域和新类型油气资源的研究力度,通过对多类型源岩、盆地深部的持续攻关,新层系和非常规等领域的油气勘探取得了重要进展。煤岩气是由中-高阶煤岩自身生成或从其他气源运移而赋存于煤岩储层中以烃类气体为主的天然气,通过对煤岩储层压裂改造可快速产气并能规模开采^[2-5]。有别于浅部煤层气,深部煤岩气埋藏深度普遍超过2 000 m,具有地层温度和压力高、含气饱和度以及钻井全烃气测异常明显等特征,相应地煤层含气性、地层能量及供气能力也明显高于浅部煤层气^[6-10],近两年,中国海油和中国石油在鄂尔多斯分别提交了千亿方煤岩气探明储量,推动了深部煤岩气快速发展。大庆油田也有多口探井在松辽盆地深部沙河子组煤岩中发现气测全烃异常,研究表明白垩系沙河子组煤层普遍具有超压、含气量高、产气量大和“砂-页-煤”一体的成藏特点,是大庆油田近期规模增储的重要领域。

本文在前人研究的基础上,系统梳理松辽盆地北部深部白垩系沙河子组沉积期成煤环境、烃源岩地化特征、成储机理和储层特征等有利于煤岩气成藏的地质条件,通过松辽盆地北部煤岩气资源特征的系统研究,建立了断陷型超压煤岩气成藏模式,指出了徐家围子断陷为松辽盆地北部深部沙河子组煤岩气的有利勘探区域,为松辽盆地深部煤岩气的勘探提供地质依据。

1 区域地质概况

松辽盆地是一个叠合在古生代基底之上的中-新

生代盆地,经历了早白垩世断陷、晚白垩世拗陷和古近纪挤压反转等多个演化阶段,形成“下断上拗”的二元结构。其中早白垩世断陷盆地发育阶段,基底在近NS向挤压应力作用下产生NNE向和NNW向共轭断裂,将松辽盆地分隔成33个大小不等的断陷群,是盆地深部天然气勘探的主力目标区(图1)。盆地深部地层自下而上依次为火石岭组、沙河子组、营城组、登娄库组和泉头组。沙河子组是盆地强烈断陷期沉积的一套湖相碎屑岩,为粗砂岩与煤岩、暗色泥岩混杂的碎屑岩沉积,分布广泛、厚度稳定,是盆地深部最主要的烃源岩层位和深部煤岩气勘探最重要的目的层。

长期以来,松辽盆地北部深部天然气勘探主要集中在营城组火山岩,近年来在沙河子组致密砂岩中连续获得高产工业气流,地化分析证实为典型煤型气,同时宋深4井、宋深3井和达深28井相继钻遇厚度超6 m的连续煤层,尤其是宋深9H井以12.7 mm直径油嘴试气时获得日产气 $208 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产工业气流,不仅极大地扩展了松辽盆地深部非常规天然气勘探领域,也拉开了松辽盆地深部煤岩气大规模勘探的序幕。沙河子组沉积期,在古地貌和断裂活动联合控制下,各深部断陷中均发育大规模远源的辫状河三角洲,在三角洲前缘和水分流间湾泥炭沼泽中沉积了多套巨厚的稳定煤层,是深部煤岩气勘探的有利目标。

2 深部煤岩气成藏条件

2.1 大面积分布的沼泽煤岩为煤岩气形成奠定了物质基础

松辽盆地北部沙河子组发育于断陷期末的构造反转阶段,也是断陷湖盆发育的鼎盛时期,尤其是沙河子组沉积中-晚期,水体深度适中,气候湿润,松辽盆地北部多个断陷缓坡带发育大面积的辫状河三角洲前缘泥炭沼泽相,沉积了巨厚的稳定煤层,为深部煤岩气的形

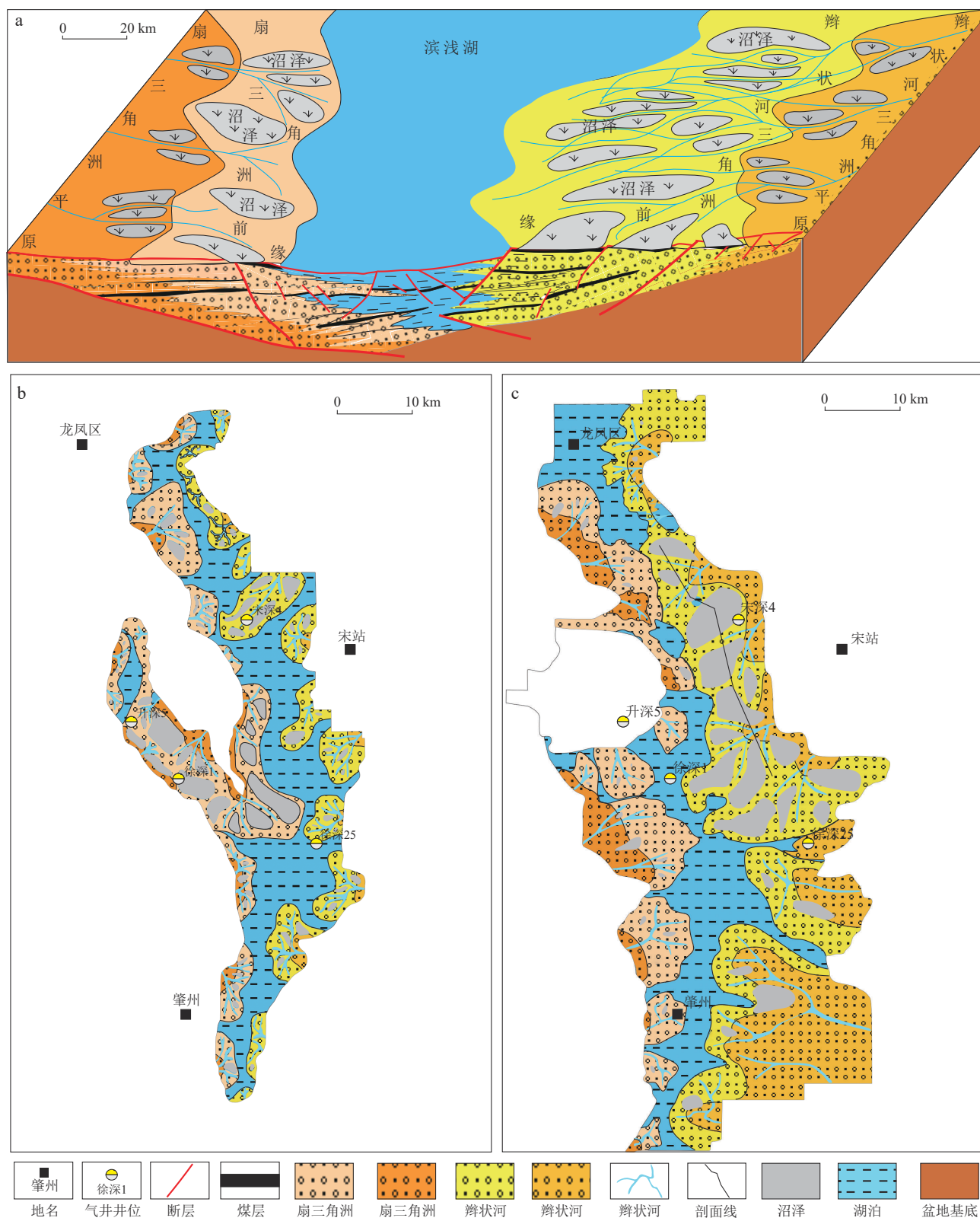


图2 松辽盆地北部徐家围子断陷沙河子组沉积模式

Fig. 2 Sedimentary model of the Shahezi Formation, Xujiaweizi Fault Depression, northern Songliao Basin

a. 沙河子组沉积模式; b. 沙河子组SQ2沉积相图; c. 沙河子组SQ4沉积相图

上,沙河子组煤岩集中在SQ2和SQ4层序的高位体系域晚期。沉积岩中元素组成及相对含量记录了水体环境

的变化,可以提供古气候、古盐度、古生产力和氧化-还原条件等环境变迁的信息。潮湿气候条件下,沉积岩中

Fe, Mn, Cr, V, Ni 和 Co 等喜湿型元素富集, 气候干燥、水分蒸发时喜干型元素 Ca, Mg, K, Na, Sr 和 Ba 析出沉淀, 二者含量之比即为气候指数 C , 其中 $0.60 \leq C < 1.00$ 时指示温暖和潮湿气候, 而 $0.20 \leq C < 0.60$ 则反映半潮湿-半干燥气候, 干燥气候条件下 $C < 0.20$ (图3)。沙河子组大部分样品气候指数 C 大于 0.20, 仅少数样品介于 0.02 ~ 0.20, 垂向上气候指数 C 变化较小, 表明沙河子组沉积期松辽盆地为半潮湿-半干燥气候, 有利于高等植物生长和煤岩的形成。不同水体深度下元素的富集呈现规律性变化, Fe, K 和 Al 易与黏土矿物结合在滨岸带富集, 而 Mn, Ca 和 Mg 则吸附于黏土矿物中, 经长距离搬运到湖盆中部沉淀, 因此随水体加深, 元素含量比值 $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ 和 Rb/Al 迅速减小。沙河子组元素含量比值 $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ 分布在 1.37 ~ 9.13, Rb/Al 则集中在 35.00 ~ 46.00, 平均值分别为 7.02 和 41.30, 其中 SQ4-HST 和 SQ2-HST 等主要成煤期, $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ 和

Rb/Al 明显偏高, 指示此时水体变浅, 有利于三角洲前缘沉积物大面积淤积形成泥炭沼泽。沉积物中元素含量比值 Sr/Ba 和 Sr 含量与古盐度正相关, 沙河子组 Sr/Ba 和 Sr 含量分别为 0.02 ~ 0.66 和 165.00 ~ 762.00 mg, 平均值分别为 0.21 和 369.00 mg, 为半咸水-咸水环境, 部分达到盐湖环境标准。SQ4-HST 和 SQ2-HST 时 Sr/Ba 明显降低, Sr 含量迅速增高, 分别为 0.04 ~ 0.42 和 352 ~ 512 mg, 指示其为浅水的半咸水-咸水环境。贫氧强还原环境是有机质保存的必要条件, 通常元素含量比值 $V/Cr \leq 2.00$ 是强厌氧环境的标志, 而 $2.00 < V/Cr < 4.25$ 则为贫氧的弱还原环境。沙河子组泥岩中 V/Cr 变化较大, 0.23 ~ 3.64 区间内均有分布, 但 SQ4-HST 和 SQ2-HST 时 V/Cr 普遍小于 3.00, 集中在 0.58 ~ 2.02, 指示其为厌氧的还原环境, 这进一步证实 SQ4-HST 和 SQ2-HST 时盆地北部浅水泥炭沼泽沉积环境的盐度高、还原性强, 有利于有机质的堆积和保存。

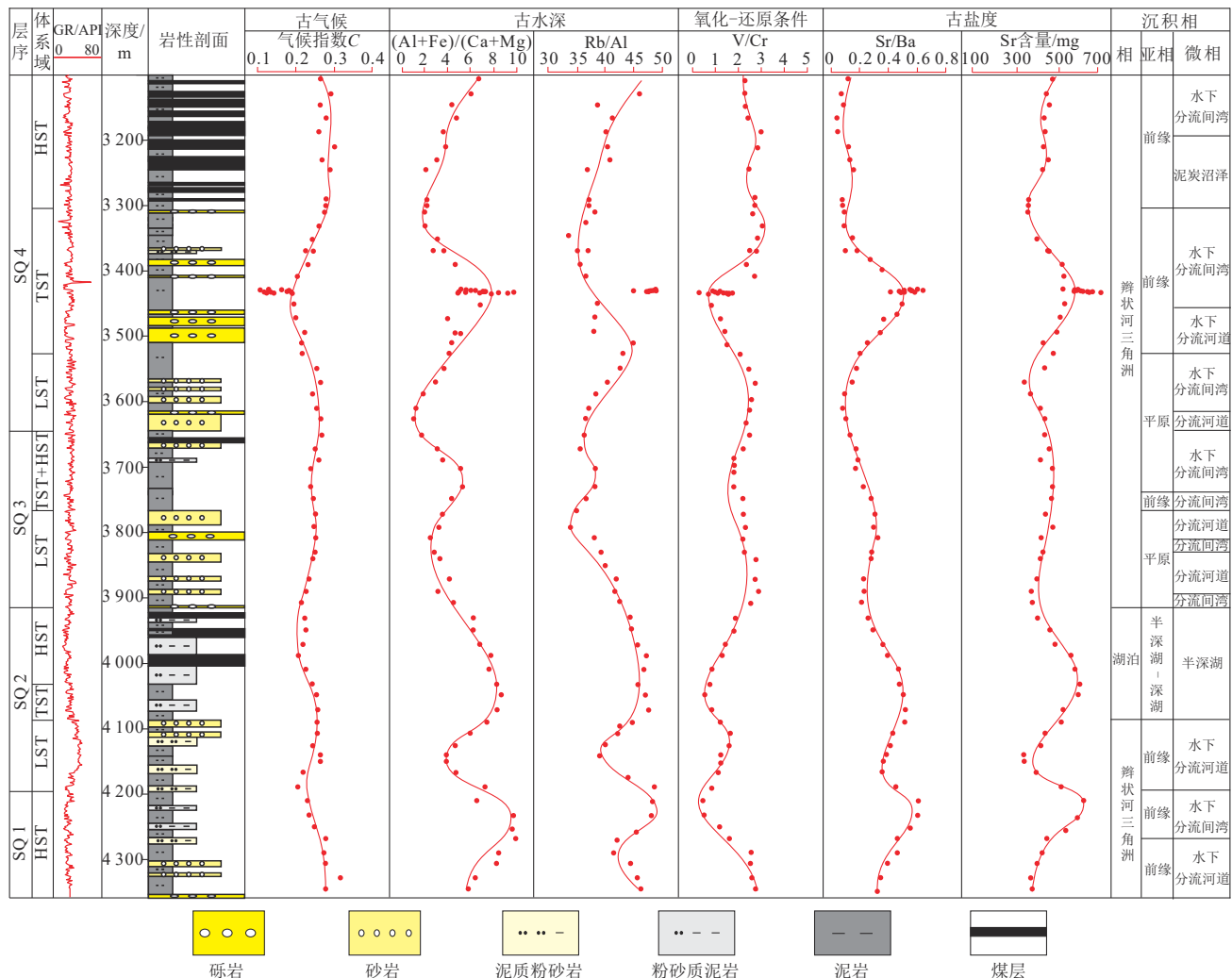


图3 松辽盆地北部沙河子组微量元素丰度垂向变化曲线

Fig. 3 Curves showing the vertical changes in the trace element abundance in the Shahezi Formation, northern Songliao Basin

地震上,沙河子组煤层表现为强振幅、强相位、同相轴连续稳定的反射特征(图4a)。平面上,断陷两侧煤岩分布受三角洲前缘沼泽和滨浅湖等沉积相制约明显,其中西部煤层呈团块状集中于升深5井—徐深1井等前缘沼泽相。地震剖面上,该煤层南北长约38.6 km,宽度20.0~25.0 km,面积约584.0 km²,为一套连续的强振幅反射,可连续追踪对比。东部煤岩也具有类似特征,呈带状自宋深4井延伸至徐深25井,南北长达50.0 km

(图4b),东西宽度22.0~28.5 km,面积达736.0 km²,地震响应特征明显,为一套稳定的强相位反射,厚度稳定、分布连续。

沙河子组煤岩与鄂尔多斯盆地山西组、太原组和准噶尔盆地西山窑组、八道湾组煤层相似,均具有低伽马值、低密度、高电阻率、高声波时差、高中子孔隙度和高气测含量的“两低四高”特征。通过岩心样品岩性-电性实验,结合沙河子组煤岩、炭质泥岩和泥岩等不同类型烃

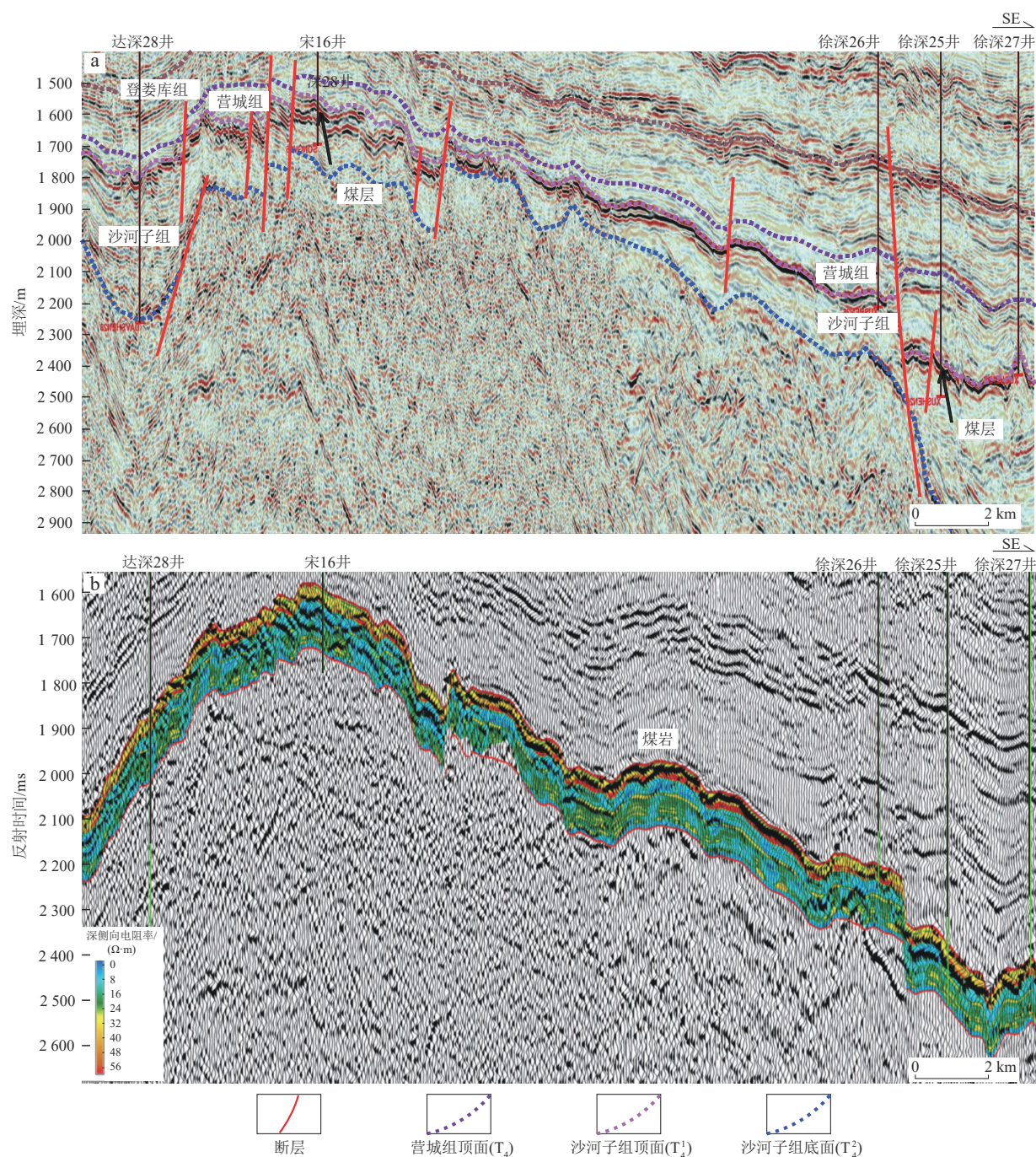


图4 松辽盆地北部达深28井—徐深27井沙河子组地震剖面(a)与反演剖面(b)(剖面位置见图2c)

Fig. 4 Seismic profile crossing wells Dashen 28 to Xushen 27 (a) and the inversion profile of the Shahezi Formation (b) in the northern Songliao Basin (see Fig. 2c for the profile location)

源岩的常规测井响应特征,建立深部煤岩电性图版。深部煤岩的密度最低,普遍小于 1.6 g/cm^3 ,主体位于 $1.2\sim 1.6\text{ g/cm}^3$ (图5a);炭质泥岩次之,岩石密度为 $1.6\sim 2.3\text{ g/cm}^3$;泥岩密度较高,普遍大于 2.4 g/cm^3 。在岩心资料的约束下,以密度和中子孔隙度等煤岩测井识别标准为依据,开展单井煤层识别和厚度划分。沙河子组不同岩性的地层速度、波阻抗和纵波阻抗(Z_p)等地震响应特征差异显著(图5b),是进行岩性预测的基础。针对沙河子组煤层薄、分布局限的特点,在井-震标定和测井解释煤层厚度的约束下,利用三维地震资料的融频波阻抗反演技术分别对徐家围子断陷、古龙断陷和莺山断陷等沙河子组较发育的深部断陷开展煤岩预测。结果表明,松辽盆地北部沙河子组煤层累计厚度一般为 $10\sim 40\text{ m}$,主要集中在古龙断陷南部、徐家围子断陷中部和莺山断陷北部,全区共识别煤层面积 $5\,859\text{ km}^2$ (图5)。

2.2 高丰度、高成熟度的泥、煤双源供烃为煤岩气富集的资源前提

松辽盆地北部沙河子组主要发育煤层和暗色泥岩2种烃源岩类型^[11],烃源岩大部分处于过成熟演化阶段,为煤岩气形成提供了丰富的物质基础。沙河子组

烃源岩分布较为集中,主要分布在古龙、徐家围子和莺山双城断陷,沙河子组泥岩和煤岩叠置发育,双源供烃,形成良好的匹配关系。

岩石热解分析表明,沙河子组暗色泥岩烃源岩有机质丰度较高,总有机碳含量(TOC)在 $0.42\%\sim 11.89\%$,平均值为 2.43% ;煤的 TOC 明显高于暗色泥岩,分布在 $70.00\%\sim 85.00\%$,平均值为 76.20% ;暗色泥岩的生烃潜量(S_1+S_2)分布在 $0.52\sim 65.00\text{ mg/g}$,平均值为 12.60 mg/g ,煤岩的 S_1+S_2 从 $1.17\sim 129.40\text{ mg/g}$ 均有分布,平均值为 36.47 mg/g ,这也表明煤岩的有机质丰度高于暗色泥岩(表1)。从有机质类型来看,沙河子组煤岩全部为Ⅲ型干酪根,显微组分中镜质组含量最高,平均约 87% ,暗色泥岩有机质类型多样,以Ⅲ型和Ⅱ型为主,部分为Ⅰ型(图6)。相对于煤岩,暗色泥岩有机组分中腐泥组和丝质组含量明显增加,平均值分别为 35.2% 和 12.3% ,惰质组和镜质组含量较少。沙河子组暗色泥岩镜质体反射率(R_o)为 $1.39\%\sim 3.46\%$,平均值为 2.30% ,氯仿沥青“A”含量一般为 $0.01\%\sim 6.98\%$,平均值为 1.21% ;煤岩 R_o 为 $1.50\%\sim 3.56\%$,平均值为 2.67% ,氯仿沥青“A”含量一般为 $0.03\%\sim 2.13\%$,平均值为 0.70% 。表明沙河子组煤

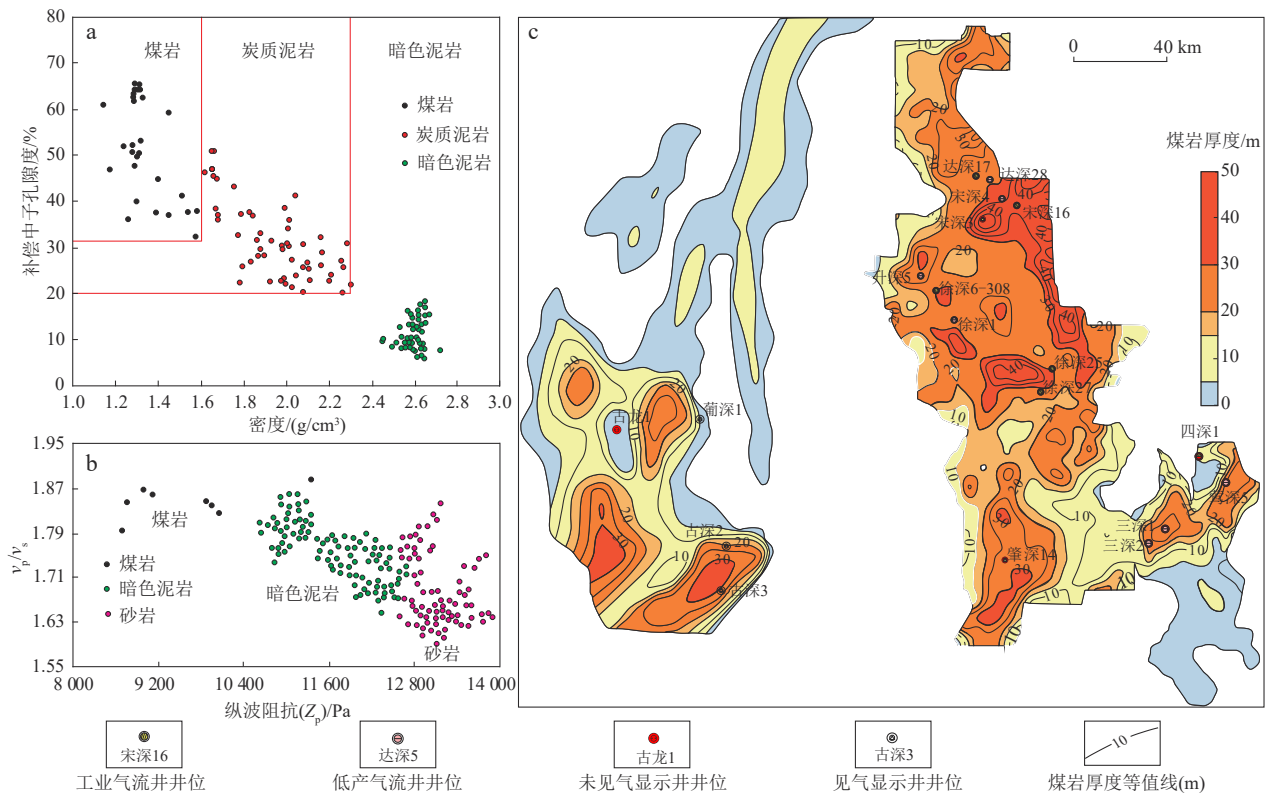


图5 松辽盆地北部沙河子组不同类型烃源岩测井响应特征(a)、地震响应特征(b)和煤岩厚度分布(c)

Fig. 5 Logging responses(a) and seismic responses(b) of different source rock types and isopach map of coal-bearing rocks(c) in the Shahezi Formation, northern Songliao Basin

岩和暗色泥岩均已处于 R_o 大于2.00%的过成熟演化阶段。钻井揭示,沙河子组暗色泥岩和煤岩烃源岩厚度大、分布面积广,整体发育较好,不同类型烃源岩有机质丰度和热演化程度高,生烃潜力大,具备双源供烃的特征,是深部煤岩气富集必要的资源前提。

2.3 有机孔+微裂隙的“孔缝体”是煤岩内天然气聚集的有利空间

煤岩作为一种特殊的储层,其储集性能不仅决定着吸附气和游离气的比例,而且也决定着煤岩气的富集及产能^[12-13]。场发射扫描电子显微镜(SEM)图像显

示沙河子组煤岩孔隙类型多样,包括原生植物组织孔和气孔等有机质孔和少量张性微裂隙、矿物质孔等无机孔(图7)。煤岩中气孔密集排列形成气孔群,气孔群之间以微裂隙为桥梁相互连通形成良好的孔隙裂隙网络(图7a—d),不仅是煤岩气运移和聚集的重要渗流通道,也是其聚集的主要储集空间。沙河子组煤岩孔隙度为4.09%~5.55%,平均值为4.74%,氦气渗透率分布在 $(0.10 \sim 0.50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,微裂缝发育的样品渗透率最高可达 $4.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,这表明沙河子组煤岩孔隙性好,是深部煤岩气有利储层。

岩心观察表明徐家围子地区沙河子组煤岩以光亮型煤为主,煤岩中层理清晰,煤体结构完整,多为原生结构煤;煤岩内部割理发育,面割理线密度为0.5~1.0条/cm,端割理线密度为1.2~1.5条/cm(图8);煤岩中广泛发育的裂缝与各类有机质孔一起组成“孔缝体”型储层,是深部煤岩气有利的储集空间。根据孔隙半径将沙河子组煤岩内孔隙分为微孔、小孔、中孔和大孔等不同类型。其中微孔(孔径<10 nm)构成煤的吸附容积,小孔(孔径10~100 nm)则作为煤岩气的毛细管凝结和扩散区域,中孔(孔径100~1 000 nm)构成煤岩气缓慢层流渗透区域,而大孔(孔径>1 000 nm)组成气

表1 松辽盆地北部沙河子组烃源岩地球化学评价

Table 1 Assessment results of source rocks of the Shahezi Formation, northern Songliao Basin

类型	成熟度	残余有机质丰度		
	R_o /%	TOC/%	氯仿沥青“A”含量/%	$(S_1+S_2)/(mg/g)$
煤岩	1.50~3.56 (2.67)	9.78~84.44 (40.16)	0.03~2.13 (0.70)	1.17~129.40 (36.47)
暗色泥岩	1.39~3.46 (2.30)	0.42~11.89 (2.43)	0.01~6.98 (1.21)	0.52~65.00 (12.60)

注:表中数据格式为:最小值~最大值(平均值)。

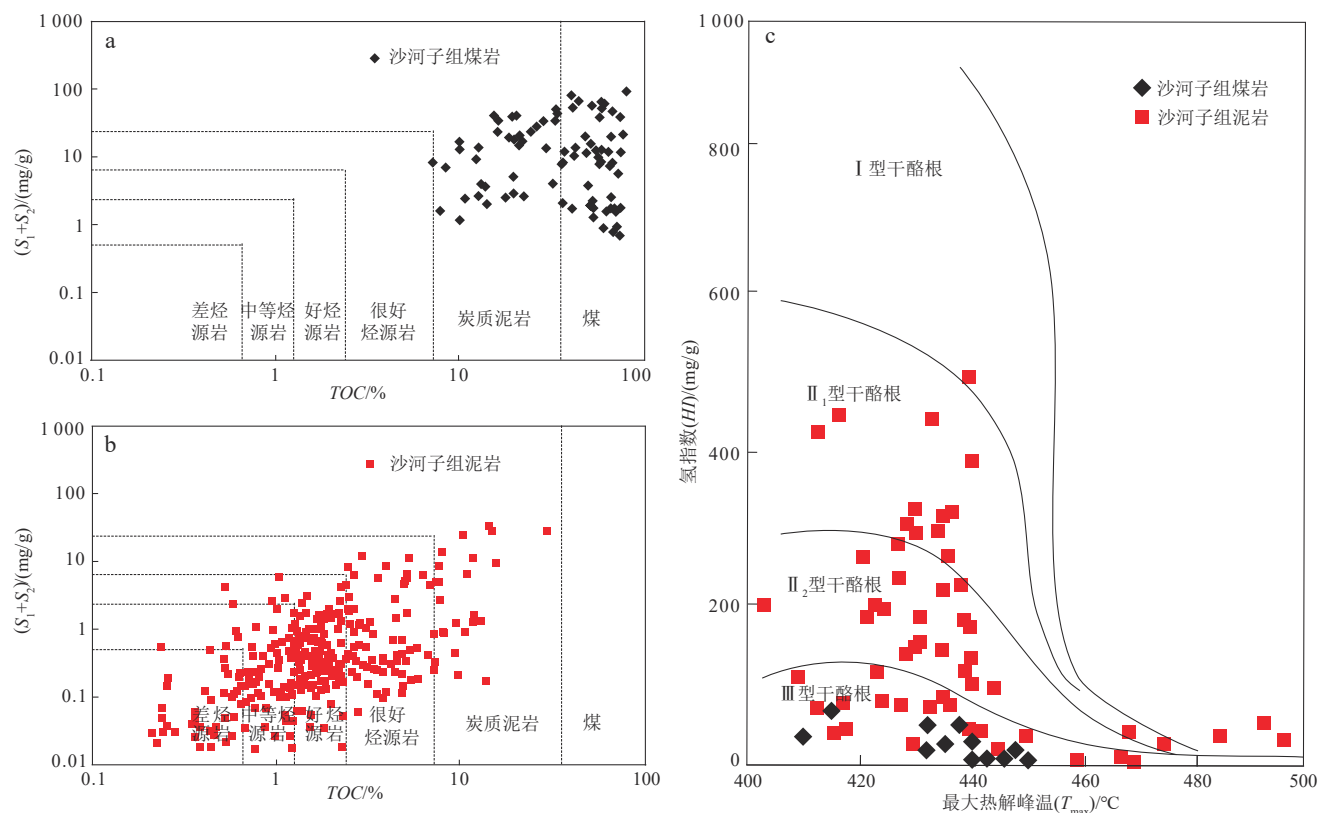


图6 松辽盆地北部沙河子组烃源岩地球化学特征

Fig. 6 Geochemical characteristics of source rocks in the Shahezi Formation, northern Songliao Basin

a. 煤岩 TOC 与 S_1+S_2 关系; b. 泥岩 TOC 与 S_1+S_2 关系; c. 烃源岩有机质类型

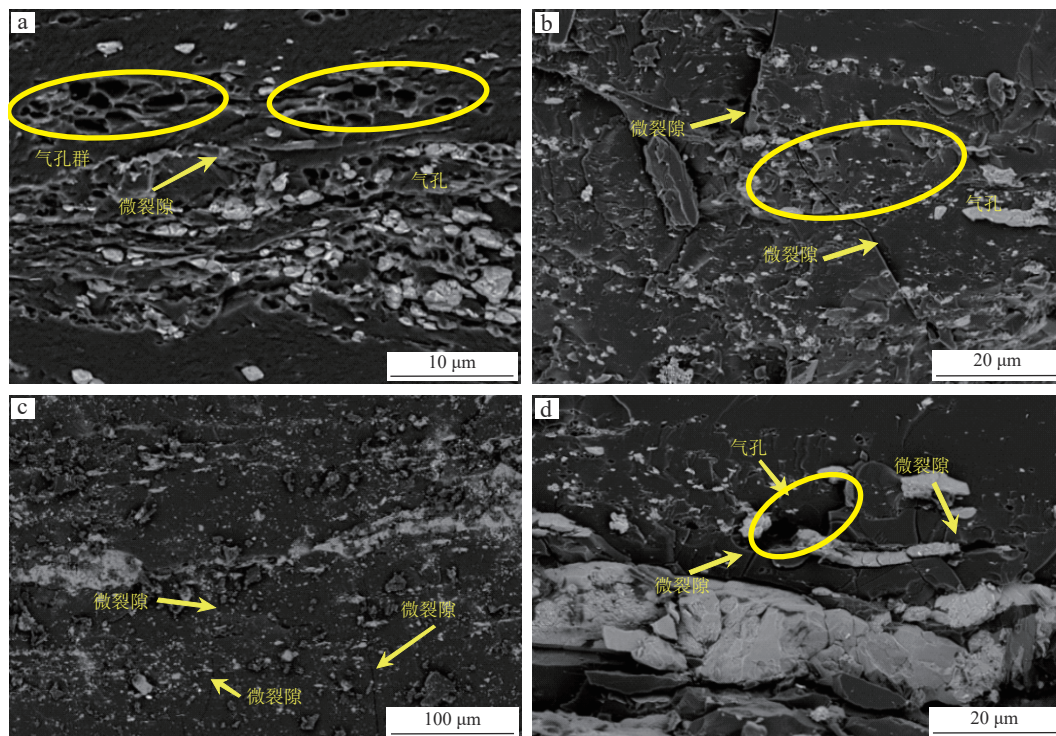


图7 松辽盆地北部沙河子组煤岩样品扫描电镜照片

Fig. 7 Scanning electron microscopy (SEM) images of coal rock samples from the Shahezi Formation, northern Songliao Basin

a. 徐深25井,不同尺寸气孔和微裂隙相互连通,埋深4 217 m;b. 宋深16井,微裂隙、气孔、矿物质孔相互连通,埋深2 995 m;c. 徐深25井,不同级别微裂隙相互连通,埋深4 270 m;d. 徐深16井,不同级别微裂隙和气孔相互沟通,埋深2 995 m

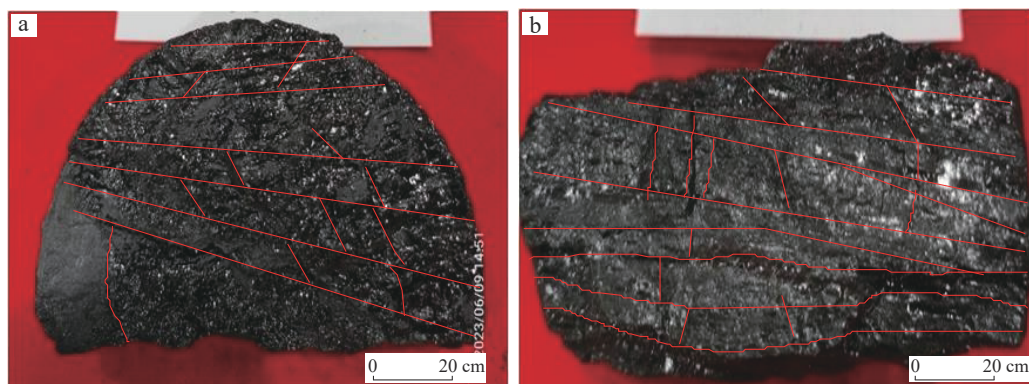


图8 松辽盆地北部沙河子组煤岩样品岩心照片

Fig. 8 Core photos of coal rock samples from the Shahezi Formation, northern Songliao Basin

a. 宋深16井,沙河子组,割理发育,埋深2 995.30 m;b. 徐深25井,沙河子组,割理发育,埋深4 217.64 m

体剧烈层流和渗透区域^[14]。高压压汞实验表明沙河子组煤岩孔隙形态多为半封闭型孔,孔径分布以小于10 nm的微孔为主(含量69.93%~85.05%),但排驱压力低(0.110~0.675 MPa),同时含有部分大孔和裂隙,占比7.56%~18.74%,这进一步证实沙河子组煤岩储层孔、渗较高,储集性能好,是盆地深部有利储层类型。沙河子组煤样水分低(含量0.45%~1.32%)、灰分中等(含量19.43%~23.80%)、挥发分低-中等(含量5.75%~15.14%),与国内典型煤岩气储层相

比,煤阶为气煤-无烟煤,沙河子组煤层脆性高、储层物性好,有利于深部煤岩气的形成和富集。

对宋深16井的1个焦煤样品和徐深25井的2个无烟煤样品进行了重量法高压CH₄等温吸附实验(实验温度126℃,最大吸附平衡压力34 MPa),测试沙河子组煤岩CH₄吸附能力。结果表明,在吸附平衡压力(0~34 MPa)范围内,所有样品的CH₄吸附速率都在吸附压力小于10 MPa时增长迅速,在10~34 MPa之间时CH₄吸附速率变缓,其等温吸附曲线均为典型的I型等温线(图9)。通

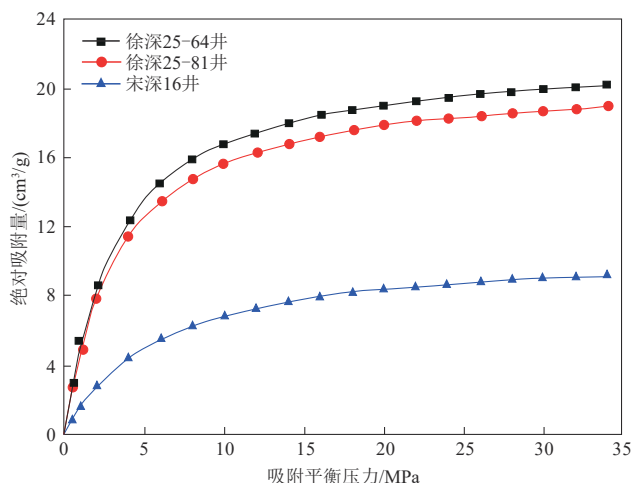


图9 松辽盆地北部沙河子组煤岩高压CH₄等温吸附曲线

Fig. 9 High-pressure CH₄ adsorption isotherms of coal-bearing rock samples from the Shahezi Formation, northern Songliao Basin

常,焦煤的CH₄理论吸附量为10.70 cm³/t,无烟煤的CH₄理论吸附量约为焦煤的2倍(20.73~22.06 cm³/t)。松辽盆地深部沙河子组无烟煤的吸附气量为20.89 cm³/t,焦煤吸附气含量为9.20 cm³/t,这与国内其他含煤盆地典型煤岩样品的吸附气量基本一致。

基于低场核磁共振(NMR)实验分析了徐深25井深部无烟煤在2~28 MPa的CH₄吸附压力范围内吸附气和游离气的比例(图10)。深部无烟煤的NMR-T₂(弛豫时间)谱呈“双峰”状,峰值对应的T₂分别为0.16 ms和4.00 ms,且吸附气谱峰面积大于游离气谱峰面积。NMR-T₂谱的数据显示随着吸附压力的增加,游离气谱峰强度持续升高,游离气量逐渐增多。相反的是,吸附气谱峰强度在2~12 MPa的吸附压力范围内显著增

强,但之后随着吸附压力的增加,增量逐步变小,吸附峰逐渐重合,与重量法高压等温吸附实验曲线相符合。等温吸附-低场核磁共振联测实验揭示沙河子组煤岩气中吸附气占比为56.7%~65.2%,平均值约为61.3%,游离气占比为34.8%~43.3%,平均值约38.7%,深部无烟煤储层总含气量为33.83~36.56 cm³/t。

2.4 煤-泥型储-盖组合和煤岩内超压封存箱是气藏保存的必要条件

深部煤岩气能否聚集成藏,不仅取决于煤岩储集性能,也取决于煤岩储-盖组合^[15]。钻井和岩心资料表明,沙河子组发育泥岩和砂岩等2种盖层,与煤层一起组成顶-底泥岩型、顶砂-底砂型和顶泥-底砂型等3种储-盖组合,不同储-盖组合形成的沉积环境、岩石类型及岩石类型组合存在差异。①顶-底泥岩型储-盖组合形成于滨浅湖和三角洲前缘泥炭沼泽环境中,滨浅湖泥岩覆盖在煤岩之上,泥岩厚度20~150 m,分布范围广,底板则为三角洲前缘分流间湾泥岩,厚度较小,为50~200 m,二者共同构成煤岩区域性盖层,封盖保存条件最好,气测结果显示也最好(图11a)。②顶泥-底砂型储-盖组合在三角洲前缘的泥炭沼泽和下水分流间湾最常见,顶板为沼泽泥岩和分流间湾泥岩,厚度10~60 m,分布稳定,底板则为0~20 m厚的分流间湾泥质粉砂岩和粉砂岩,顶板泥岩与煤岩间物性差异大,为深部煤岩气提供了良好的封盖和保存条件,使其成为理想的区域盖层。然而,底板封盖条件较差,相对于顶-底泥岩型储-盖组合,气测结果显示明显变差(图11b)。③顶砂-底砂型储-盖组合是沼泽煤岩被两套厚度0~

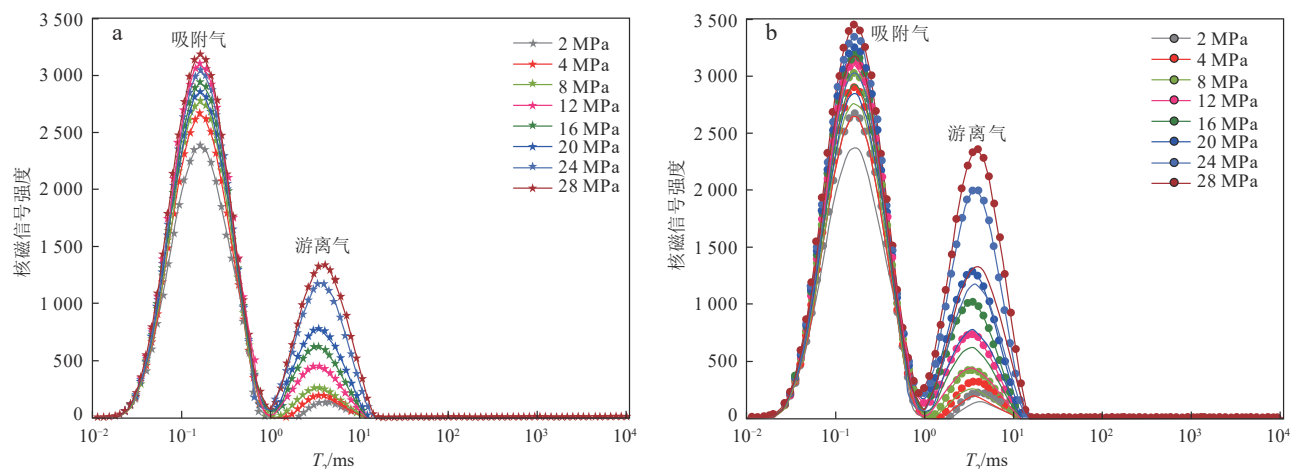


图10 松辽盆地北部徐深25井无烟煤样品吸附气/游离气比的低场核磁共振测试曲线

Fig. 10 Curves showing the adsorbed/free gas ratios of anthracite samples from well Xushen 25 in the northern Songliao Basin obtained using low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) experiments

a. 样品 xs25-1 核磁共振曲线,埋深4 217.64 m; b. 样品 xs25-2 核磁共振曲线,埋深4 270.81 m

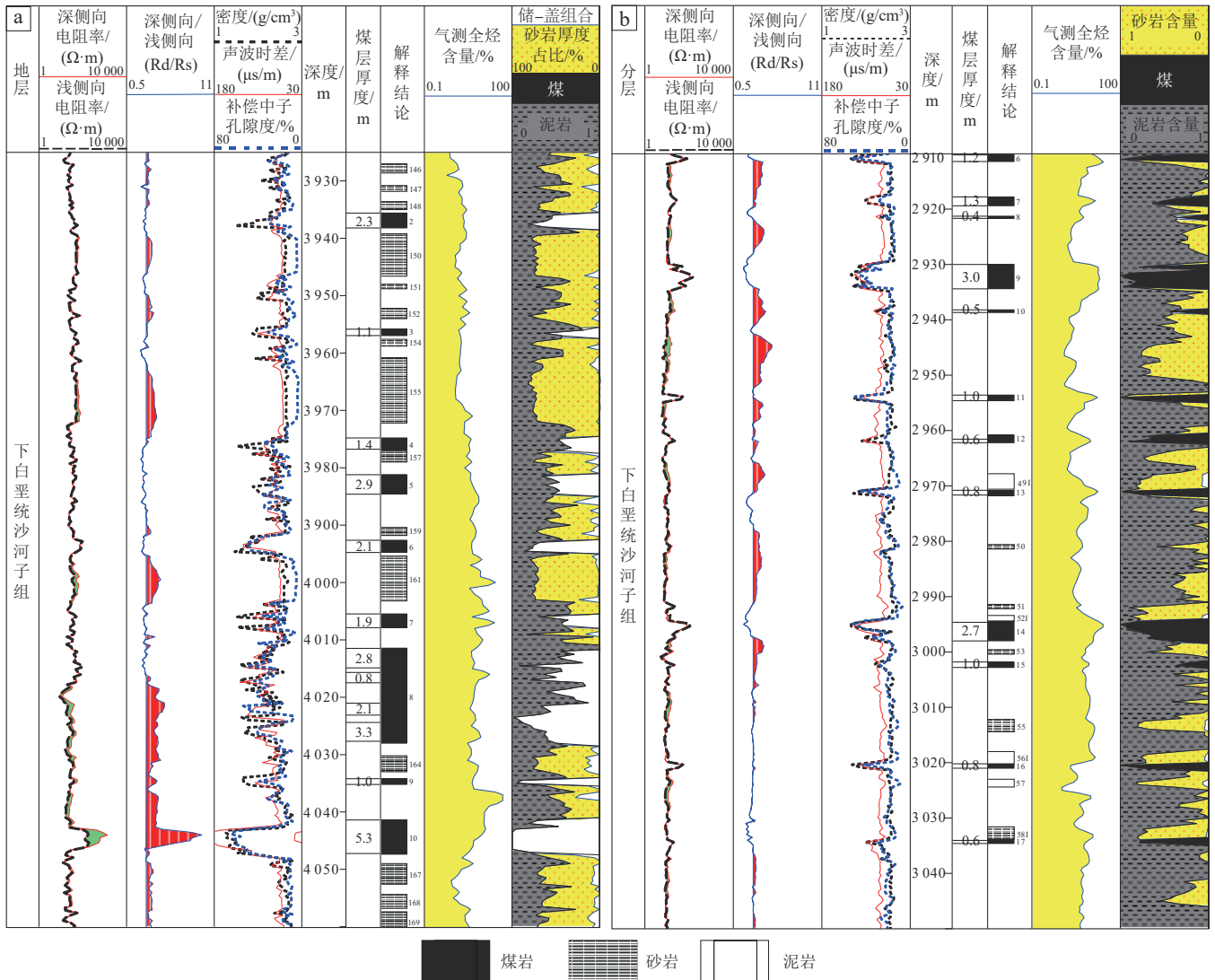


图11 松辽盆地北部升深5井(a)和达深28井(b)沙河子组煤层储-盖组合

Fig. 11 Reservoir-cap rock assemblages of coal seams in the Shahezi Formation in wells Shengshen 5 (a) and Dashen 28 (b) in the northern Songliao Basin

10 m的水下分流河道细砂岩夹持形成的,由于水下分流河道细砂岩物性好、毛细管阻力小,对煤岩气的封盖能力较弱,且砂体相变快、分布面积小,不利于煤岩气藏的封闭和保存,相应的气测显示也明显变差。地震反演和沉积相研究表明,徐家围子断陷东北部宋站洼槽,发育顶-底泥岩型和顶泥-底砂型储-盖组合,西部徐西洼槽则以顶砂-底砂型储-盖组合最为常见。

地层压力是地下流体能量大小的度量,异常高压段不仅为油气产出提供源源不断的动力,同时也为油气的保存创造了良好的条件。在异常高压发育层段,油气向上逸散不仅要突破储层与盖层间物性差异形成的毛细管阻力,同时还要克服上覆异常高压层的阻隔作用。松辽盆地北部钻杆测试(DST)数据揭示,沙河子组地层压力为40~80 MPa,压力系数1.2~1.8,对78口井声波时

差和密度测井数据进行Eaton法分析,结果显示沙河子组压力异常明显,为弱超压-超压,为煤岩气的保存提供了有利条件。30余口井的热史、生烃史和包裹体压力模拟表明,生烃增压是沙河子组形成异常高压的主要原因,沙河子组在晚白垩世达到成熟并开始大量生烃(图12),在封闭体系中通过有机质生烃,形成9~15 MPa的生烃增压,使地层压力达到48~55 MPa,压力系数普遍大于1.2,为异常压力封存箱的形成创造了有利条件。

平面上,沙河子组煤层和泥层两类优质烃源岩广覆式发育,源岩厚度大,大面积稳定分布,供烃充足。在实测地层压力的约束下,通过地震开展地层压力系数模拟,结果表明徐家围子断陷徐中凹陷中部生烃洼槽处烃源岩厚度大,由生烃增压形成的异常压力系数普遍大于1.6,沙河子组泥岩和煤岩等多类型烃源岩与上覆致密的营城

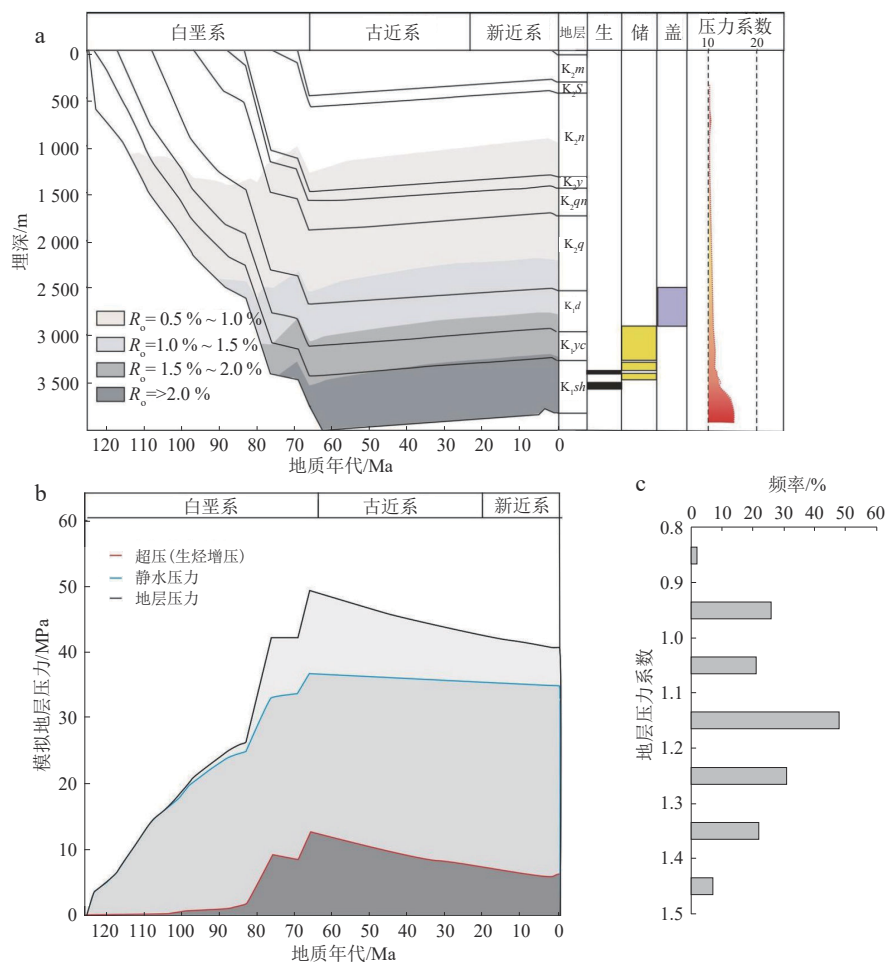


图12 松辽盆地北部沙河子组热史模拟和包裹体压力模拟

Fig. 12 Thermal maturity history and inclusion pressure simulation of the Shahezi Formation, northern Songliao Basin

a. 埋藏史与热史模拟; b. 包裹体压力模拟; c. 地层压力系数

组火山岩一起形成多个超压流体封存箱(图13a)。超压封存箱内,低渗透性储层在较高的压力条件下也能够富集天然气,从常压到超高压,凹槽区储层渗流能力异常增大,且发育裂缝,为高产创造条件(图13b)。

3 深部煤岩气资源潜力及有利勘探目标

3.1 深部煤岩气资源量计算

目前煤岩气尚无资源/储量规范(标准),资源量估算方法参考致密气和页岩气方法^[16]。本次研究煤岩气资源量采用体积法计算,分别估算沙河子组煤岩中吸附气和游离气资源量,如公式(1)和(2)所示:

$$G_1 = 0.01AhDC_1 \quad (1)$$

$$G_2 = 0.01AhDC_2 \quad (2)$$

式中: G_1 为煤岩气中吸附气地质资源量, 10^8 m^3 ; G_2 为煤

岩气中游离气地质资源量, 10^8 m^3 ; A 为煤岩含气面积, km^2 ; h 为煤岩有效厚度, m ; D 为煤的空气干燥基密度, t/m^3 ; C_1 为沙河子组煤岩吸附气含量, m^3/t , 取样品测试的平均值 $20.89 \text{ m}^3/\text{t}$; C_2 为沙河子组煤岩游离气含量, m^3/t , 取样品测试的平均值 $13.18 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

体积法估算松辽盆地北部深部煤岩气资源量 $1.260 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 其中吸附气资源量约 $0.772 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 游离气资源量约 $0.488 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 资源丰度 $2.15 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。其中徐家围子断陷沙河子组煤岩气资源量 $0.8530 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 按30%的采收率, 估算可采资源量 $0.2559 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 资源丰度 $2.46 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 勘探潜力和资源规模巨大, 也是松辽盆地深部煤岩气勘探的主战场。

3.2 深部煤岩气有利勘探目标和勘探方向

综合考虑松辽盆地北部沙河子组煤层分布的构造背景、烃源岩展布、超压分布和热演化程度, 以及烃源岩的分布特征, 特别是稳定厚煤层的分布范围, 开展松

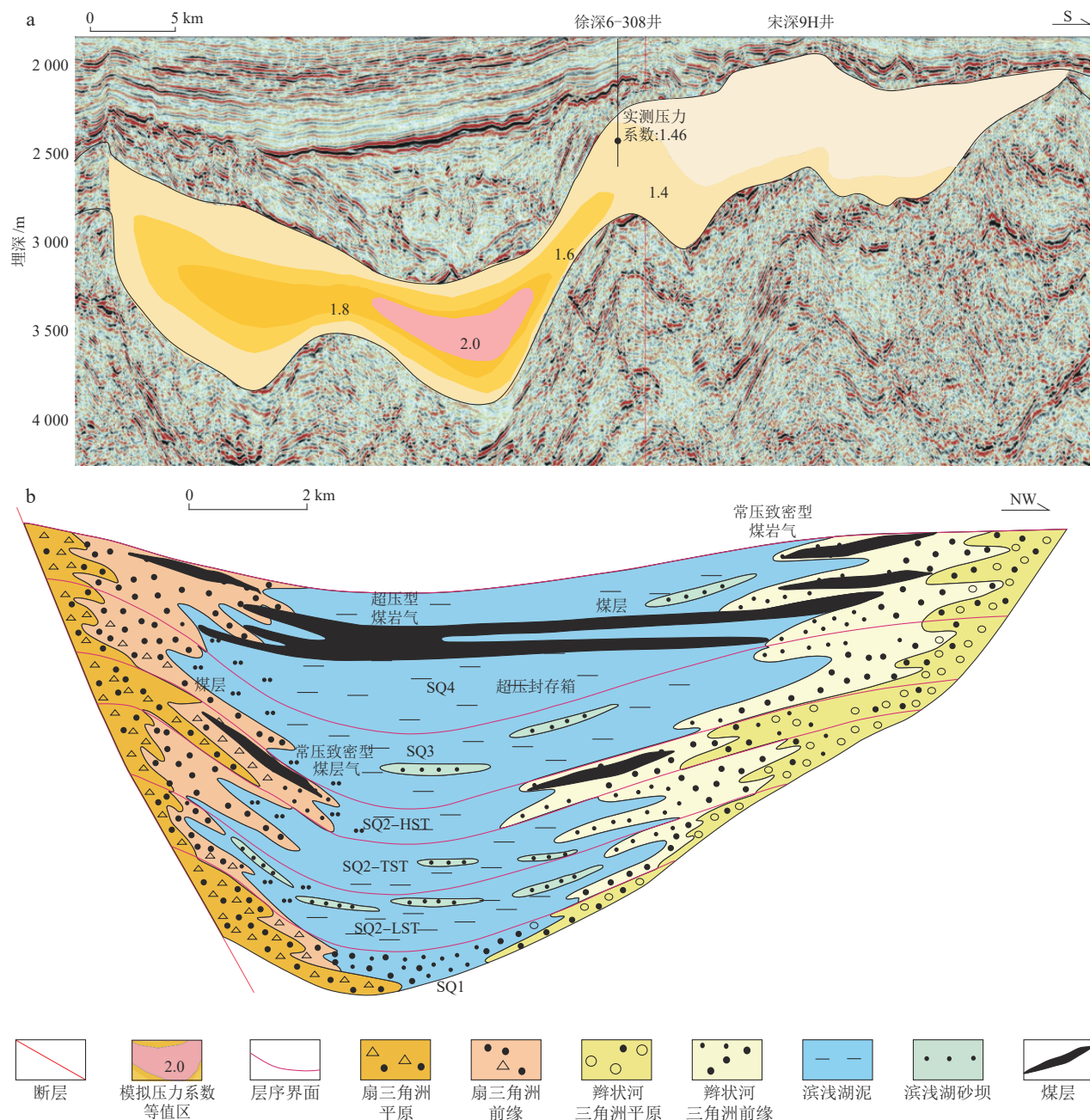


图13 松辽盆地北部沙河子组超压封存箱成藏模式

Fig. 13 Diagrams showing the CRG accumulation patterns in the overpressure compartment within the Shahezi Formation, northern Songliao Basin

a. 南北向压力系数剖面位置; b. 超压封存箱成藏模式

辽盆地北部深部煤岩气有利勘探目标优选。沙河子组地层普遍存在异常高压(图14),尤其古龙断陷和徐家围子断陷,地层压力普遍大于40 MPa,为深部超压煤岩气富集奠定了基础。松辽盆地北部沙河子组 R_o 普遍大于2%,煤岩热演化程度高,处于中-高煤阶,割理、裂隙与热演化程度关系分析表明,随着热演化程度增加,割理、裂隙越发育,渗透率相对也越高,天然气的可动性更好。以已钻井揭示的煤岩单层厚度特征为依

据,结合地震预测的煤岩厚度、煤层埋深、储层物性和盆地模拟获得的煤岩热演化程度和超压发育特征,对松辽盆地北部各次级断陷开展深部煤岩气有利区优选,其中古龙断陷和徐家围子断陷沙河子组沉积范围广、煤岩厚度大,且煤岩均有超压、高煤阶和高含气量的特点。尤其是徐家围子断陷煤岩单层厚度更大、埋藏适中、超压更发育,优选徐家围子断陷宋站洼槽东侧缓坡带和徐西洼槽为煤岩气首选靶区。

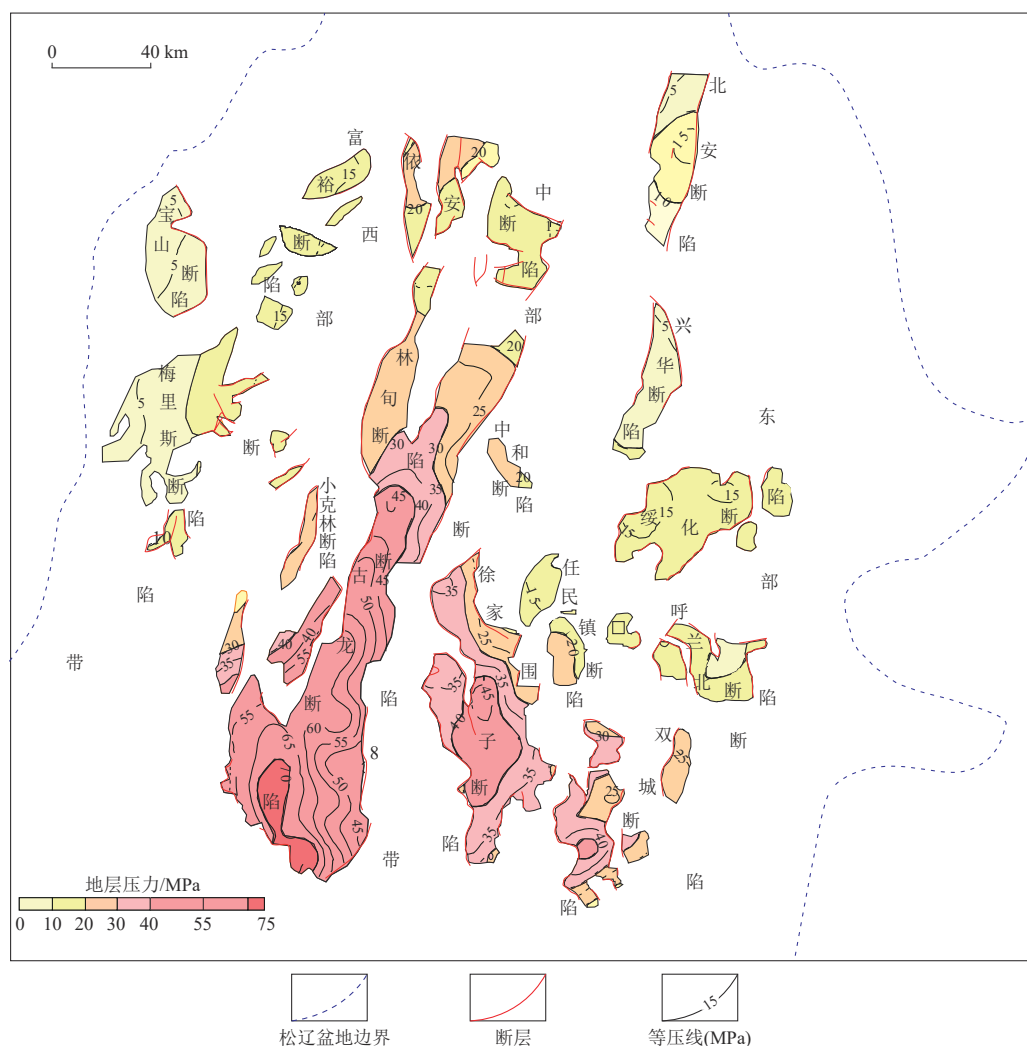


图14 松辽盆地北部沙河子组压力分布

Fig. 14 Contour map showing pressure distribution in the Shahezi Formation, northern Songliao Basin

宋站洼槽东侧缓坡带为一大型鼻状构造背景,临近沙河子组最好的烃源岩发育区,煤层埋深2 000~3 000 m,主要发育沙(沙河子组)四段上部1#稳定厚煤层,其 R_o 一般为1.5%~2.0%,煤岩为中-高阶煤。达深28井、宋深17井、宋深16井和宋深3井等多口钻井揭示煤岩段最大气测全烃含量异常高值,一般大于10%,宋深16井、宋深4井和宋深3井等单层煤层厚度可达6~10 m,结合地震反演预测单层厚度大于4 m的煤岩面积可达706 km²,预测吸附气+游离气资源量 0.1384×10^{12} m³,资源丰度 1.96×10^8 m³/km²。

徐西洼槽临近沙河子组徐东烃源岩发育区,供烃充足,煤层埋深较大,一般在4 000~6 000 m,主要发育沙二段上部2#稳定厚煤层,其 R_o 一般为2.0%~3.0%,煤岩热演化程度较高,为高阶煤。升深5井、徐深1井和徐深6-308井等钻井揭示煤岩段最大气测全烃含量异常高值,一般大于20%,其中徐深1井煤层单

层厚度6.2 m,叠加厚度可达9.8 m,升深5井和徐深6-308井煤层厚度分别为4.9 m和5.6 m,地震反演预测的单层厚度大于4 m的煤岩面积可达836 km²,预测吸附气+游离气资源量为 0.2346×10^{12} m³,资源丰度 2.81×10^8 m³/km²。

4 结论

1) 松辽盆地北部沙河子组煤岩热演化程度高,煤阶高,割理和裂缝更发育,裂隙与有机气孔相互连通,渗透率高、储集条件好,且镜质体含量高,煤岩的脆性强,更易于压裂,天然气可动性好。

2) 松辽盆地北部沙河子组地层压力系数高,封闭条件好,存在超压流体封存箱,煤岩气原位成藏,顶、底板岩性封闭,保存条件好。地层超压,煤岩储层物性好,煤岩气作为沙河子组源内致密气又一新领域,将成

为继松辽盆地北部沙河子组超压致密砂岩气之后,又一重要、现实的天然气增储上产新领域。

3) 徐家围子断陷沙河子组煤岩气受构造和沉积环境控制,稳定的厚煤层(单层厚度>4 m)广泛分布,有机质丰度高,煤岩品质好。高丰度和高成熟度的泥岩、煤岩双源供烃,生烃量大,为煤岩气的富集提供充足的物质基础,估算煤岩气资源潜力 $0.853 \times 10^{12} \text{ m}^3$,是深部煤岩气最有利勘探区域,值得加快探索。

参 考 文 献

- [1] 罗平亚,朱苏阳. 中国建立千亿立方米级煤岩气大产业的理论与技术基础[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1755-1763.
LUO Pingya, ZHU Suyang. Theoretical and technical fundamentals of a 100 billion-cubic-meter-scale large industry of coalbed methane in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44 (11): 1755-1763.
- [2] 秦勇. 中国深部煤岩气地质研究进展[J]. 石油学报, 2023, 44 (11): 1791-1811.
QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44 (11): 1791-1811.
- [3] 席胜利,闫伟,刘新社,等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 33-51, 132.
XI Shengli, YAN Wei, LIU Xinshe, et al. New fields, new types and resource potentials of natural gas exploration in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 33-51, 132.
- [4] 白雪峰,高庚,王彪,等. 海拉尔盆地呼和湖凹陷深层煤岩气赋存条件及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1736-1754.
BAI Xuefeng, GAO Geng, WANG Biao, et al. Deep Coalbed Methane (CBM) Occurrence Conditions and Exploration Directions in the Hulun Lake Sag of the Hailar Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2024, 45(6): 1736-1754.
- [5] 李鹭光. 中国天然气工业发展回顾与前景展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 1-11.
LI Luguang. Development of natural gas industry in China: Review and prospect [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 1-11.
- [6] 李启晖,任大忠,甯波,等. 鄂尔多斯盆地神木地区侏罗系延安组煤层微观孔隙结构特征[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(2): 76-88.
LI Qihui, REN Dazhong, NING Bo, et al. Micro-pore structure characteristics of coal seams of Jurassic Yan'an Formation in Shenmu area, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36 (2): 76-88.
- [7] 周德华,陈刚,陈贞龙,等. 中国深层煤岩气勘探开发进展、关键评价参数与前景展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(6): 43-51.
ZHOU Dehua, CHEN Gang, CHEN Zhenlong, et al. Exploration and development progress, key evaluation parameters and prospect of deep CRG in China [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(6): 43-51.
- [8] 邹才能,杨智,黄士鹏,等. 煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 433-442.
ZOU Caineng, YANG Zhi, HUANG Shipeng, et al. Resource types, formation, distribution and prospects of coal-measure gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 433-442.
- [9] 邹才能,林敏捷,马锋,等. 碳中和目标下中国天然气工业进展、挑战及对策[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 418-435.
ZOU Caineng, LIN Minjie, MA Feng, et al. Development, challenges and strategies of natural gas industry under carbon neutral target in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 418-435.
- [10] 沈柏坪,李荣相,白洪涛,等. 鄂尔多斯盆地宜川地区本溪组8号煤岩特征及成煤环境分析[J]. 特种油气藏, 2024, 31(6): 32-38.
SHEN Baiping, LI Rongxiang, BAI Hongtao, et al. Characteristics of No. 8 Coal in the Benxi Formation and Coal-forming Environment in Yichuan Area, Ordos Basin [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2024, 31(6): 32-38.
- [11] 印长海,杨亮,杨步增. 松辽盆地北部沙河子组致密气勘探及下一步攻关方向[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 135-142.
YIN Changhai, YANG Liang, YANG Buzeng. Tight gas exploration and the next research direction for Shahezi Formation in North Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5): 135-142.
- [12] 汤达祯,王生维. 煤储层物性控制机理及有利储层预测方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 12-15.
TANG Dazhen, WANG Shengwei. Control mechanism of coal reservoir physical properties and prediction method of favorable reservoir [M]. Beijing: Science Press, 2010: 12-15.
- [13] 杨甫,贺丹,马东民,等. 低阶煤储层微观孔隙结构多尺度联合表征[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(3): 14-23.
YANG Fu, HE Dan, MA Dongmin, et al. Multi-scale joint characterization of micro-pore structure of low-rank coal reservoir [J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(3): 14-23.
- [14] 郭绪杰,支东明,毛新军,等. 准噶尔盆地煤岩气的勘探发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 38-49.
GUO Xujie, ZHI Dongming, MAO Xinjun. Discovery and significance of coal measure gas in Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 38-49.
- [15] 杨秀春,徐凤银,王虹雅,等. 鄂尔多斯盆地东缘煤岩气勘探开发历程与启示[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 30-41.
YANG Xiuchun, XU Fengyin, WANG Hongya, et al. Exploration and development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos Basin and its enlightenment [J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 30-41.
- [16] 徐凤银,王成旺,熊先钺,等. 深部(层)煤岩气成藏模式与关键技术对策——以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 30-42.
XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Deep (layer) coalbed methane reservoir forming modes and key technical countermeasures: Taking the eastern margin of Ordos Basin as an example [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 30-42.

(编辑 刘格云)