

海拉尔盆地呼和湖凹陷深层煤岩气赋存条件及勘探方向

白雪峰^{1,2}, 高庚^{1,3}, 王彪^{1,3}, 李敬生^{1,3}, 李军辉^{1,3}, 徐慧⁴, 马文娟^{1,3}, 刘璐^{1,3}

(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. 大庆油田有限责任公司, 黑龙江大庆 163458; 3. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江大庆 163712; 4. 常州大学, 江苏常州 213164)

摘要:海拉尔盆地呼和湖凹陷白垩系南屯组二段(南二段)已发现油气藏,但对其中的深层煤岩气赋存条件及勘探方向研究较少。分析了烃源岩、沉积和构造等油气成藏基础条件,研究了深层煤储层发育特征及含气规律,探讨了呼和湖凹陷深层煤岩气赋存条件,提出了下一步勘探方向。研究结果表明:①南屯组发育泥岩及煤岩2套成熟源岩,深层煤岩气具有良好的气源物质基础。②断陷湖盆沼泽发育,成煤环境优越,初始期煤岩厚度大,煤-泥共生;稳定期和萎缩期煤岩厚度小,砂-煤共生。③缓坡断阶带煤岩厚度小,含气量低;注槽带及陡坡带煤岩厚度大,割理裂隙发育,微裂隙沟通有机孔,连通性好,孔-缝体系发育,富游离气。④早期断裂体系为深层煤岩气垂向与侧向运移提供通道。⑤呼和湖凹陷预测深层煤岩气资源量 $1.79 \times 10^{12} \text{ m}^3$,勘探潜力大,将成为断陷盆地重要风险勘探新领域,注槽带和陡坡带是深层煤岩气最有利的勘探方向。

关键词:风险勘探;注槽带;陡坡带;深层煤岩气;南屯组二段;呼和湖凹陷;海拉尔盆地

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Occurrence conditions and exploration targets of deep coal-rock gas in the Huhehu Sag, Hailar Basin

BAI Xuefeng^{1,2}, GAO Geng^{1,3}, WANG Biao^{1,3}, LI Jingsheng^{1,3}, LI Junhui^{1,3}, XU Hui⁴, MA Wenjuan^{1,3}, LIU Lu^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Daqing, Heilongjiang 163712, China; 2. Daqing Oilfield Limited Company, Daqing, Heilongjiang 163458, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Daqing Oilfield Limited Company, Daqing, Heilongjiang 163712, China; 4. Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China)

Abstract: Hydrocarbon reservoirs have been identified in the 2nd member of the Cretaceous Nantun Formation (also referred to as the Nan 2 Member) in the Huhehu Sag, Hailar Basin. However, limited studies have been conducted on the occurrence conditions and exploration targets of deep coal-rock gas therein. In this study, we analyze the fundamental conditions for hydrocarbon accumulation, including source rocks, deposits, and structures, in the Huhehu Sag and examine the developmental characteristics and gas-bearing features of deep coal reservoirs. Accordingly, we explore the occurrence conditions of deep coal-rock gas in the sag and propose potential exploration targets. The findings reveal that in Nantun Formation there are two suites of mature source rocks in the mudstones and coals, which provide a favorable material basis for the deep coal-rock gas generation and accumulation. During the deposition of the Nan 2 Member, Hailar Basin, a faulted lacustrine basin, exhibits swamps, which create a favorable coal-forming setting. The initial extension stage of the basin witnessed the formation of thick coals and coal-mudstone coexistence, while its stable extension and contraction stages featured thin coals and sandstone-coal coexistence. The ramp-faulted terrace zone exhibits thin coals and low gas content. In contrast, the trough and steep slope zones are characterized by thick coal rocks and well-developed cleats, with organic pores interconnected by microfractures, contributing to high connectivity and a well-developed pore-fracture system. So it is rich in free gas. The fault system formed in the early extension stage provides pathways for the vertical and lateral migration of deep coal-rock gas. The Huhehu Sag exhibits deep coal-rock

收稿日期:2024-06-08;修回日期:2024-10-26。

第一作者简介:白雪峰(1979—),男,博士、教授级高级工程师,油气勘探开发与管理。E-mail: bxf@petrochina.com.cn。

通信作者简介:高庚(1979—),男,高级工程师,油气勘探与新能源。E-mail: ggao_njucsu@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX0504);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2017E-14和2019E-25);大庆油田有限责任公司科研项目(202121KT002)。

gas resources predicted at $1.79 \times 10^{12} \text{ m}^3$, suggesting considerable exploration potential and establishing this sag as an important new risk exploration target in the faulted lacustrine basin. Additionally, the trough and steep-slope zones are identified as the most favorable exploration targets for deep coal-rock gas.

Key words: risk exploration, trough zone, steep-slope zone, deep coal-rock gas, the 2nd member of the Nantun Formation (Nan 2 Member), Huhehu Sag, Hailar Basin

引用格式: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. DOI: 10.11743/ogg20240618.

BAI Xuefeng, GAO Geng, WANG Biao, et al. Occurrence conditions and exploration targets of deep coal-rock gas in the Huhehu Sag, Hailar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1736–1754. DOI: 10.11743/ogg20240618.

深层煤岩气既有别于浅层煤层气,也有别于常规天然气,属于一种新型源内非常规天然气资源类型,于2021年11月首次提出^[1]。深层煤岩气一般埋藏深度大于1 500 m,具有常规储层和非常规储层共存、游离气与吸附气共生、自源气与他源气互补聚集的特征。中国深层煤岩气资源丰富,勘探前景广阔,埋深大于1 500 m的深层煤岩气资源量可达 $50 \times 10^{12} \text{ m}^3$,近年来成为继致密油气和页岩油气之后的非常规油气勘探开发新热点^[2-3]。准噶尔盆地中央坳陷白家海凸起探索深层煤岩气勘探新领域^[4-6],2020年部署实施风险探井CT1H井,排采快速见气,采用冻胶造长缝+细分切割实现体积改造,12 mm直径油嘴最高日产气 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,8 mm直径油嘴稳产气 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块部署的吉深6-7平01井获 $10.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流,中国石油2022年在鄂尔多斯盆地部署实施的风险探井NL1H, JN1H和SD1H井,日产气量在 $(5.0 \sim 8.2) \times 10^4 \text{ m}^3$,周边在神府区块、临兴区块和大牛地区块^[7]提交探明储量和预测储量均超千亿方,深层煤岩气实现战略性突破^[8-14]。

海拉尔盆地隶属于东北亚裂谷系的一部分,是在古生代兴蒙造山带基础上发育的中、新生代陆相含油气断陷盆地^[15],先后经历了盆地区域勘探油气发现阶段、构造油藏勘探突破阶段、断块—岩性油藏勘探增储阶段和多类型油藏勘探扩展阶段,已提交石油探明储量 $1.54 \times 10^8 \text{ t}$ ^[16],是大庆油田未来油气增储上产的重要潜力领域^[17]。当前,海拉尔盆地油气勘探主要集中于中部断陷带乌尔逊凹陷和贝尔凹陷,是油气勘探的主要领域和主战场^[18-19]。随着海拉尔盆地勘探程度的深入^[20],深层煤岩气、致密油和页岩油等非常规油气藏将成为重要的接替领域,也是重要的风险勘探新领域。海拉尔盆地呼和湖凹陷已发现油气藏主要赋存于南屯组二段(南二段)砂岩储层中,西部缓坡断阶带的H10井已获得工业油气流,东部陡坡带H17井已获得工业气流,仅把煤岩当做源岩,为砂岩油气成藏提供物

质来源和气源,未把煤岩当做储层来对待。前人针对呼和湖凹陷主要从层序地层^[21-22]、聚煤规律^[15, 21-22]、成煤环境^[23]、源岩^[24-27]、沉积演化^[28-30]、断裂^[31-32]、构造特征与演化^[33]、致密砂岩气^[34]、热演化史^[35]、成藏期次^[36-37]、原油和天然气地球化学与油气源对比^[38-39]、地震相^[40]及天然气成因类型^[41]等方面进行过系统研究,对大磨拐河组二段(大二段)和南二段煤层气地质条件、资源潜力及有利勘探区预测^[42-46]和煤成气资源潜力^[47]做过初步研究,对南二段深层煤岩气赋存条件及勘探方向系统研究较少,制约了断陷盆地深层煤岩气的勘探发现^[48-50]。为此,本文从系统分析呼和湖凹陷源岩、沉积和构造等油气成藏基础条件入手,结合深层煤储层发育特征及含气规律,探讨海拉尔盆地呼和湖凹陷深层煤岩气的赋存条件,明确下一步勘探方向,以期指导呼和湖凹陷深层煤岩气勘探部署,并启发中国其他陆相断陷盆地深层煤岩气的勘探工作。

1 区域地质概况

呼和湖凹陷位于海拉尔盆地东部断陷带南部,是海拉尔盆地的二级构造单元^[20],呈北东向展布,东与锡林贝尔凸起相邻,西与巴彦山隆起相接,北部与伊敏凹陷相连,向南延伸出国界与蒙古相连(图1a),面积约 $2\,500 \text{ km}^2$ ^[15, 20, 28-29, 32, 40, 47],沉积岩最大埋深约 $4\,600 \text{ m}$ ^[20, 28, 32, 40]。呼和湖凹陷经历了3期构造演化阶段,分别为早期伸展断陷阶段、中期热沉降断—拗阶段和晚期拗陷阶段^[51],具有“东西分带、南北分区”的构造格局^[41],总体上划分为呼南和呼北2个次凹,自西向东发育西部斜坡带、西部缓坡断阶带、东部洼槽带和东部陡坡带4个三级构造单元,并可进一步细分为北部斜坡区、中部斜坡区、南部斜坡区,北部缓坡区、中部缓坡区、南部缓坡断阶区,北部洼槽区、中部洼槽区、南部洼槽区,北部陡坡区和南部陡坡区11个四级构造单元(图1b)。

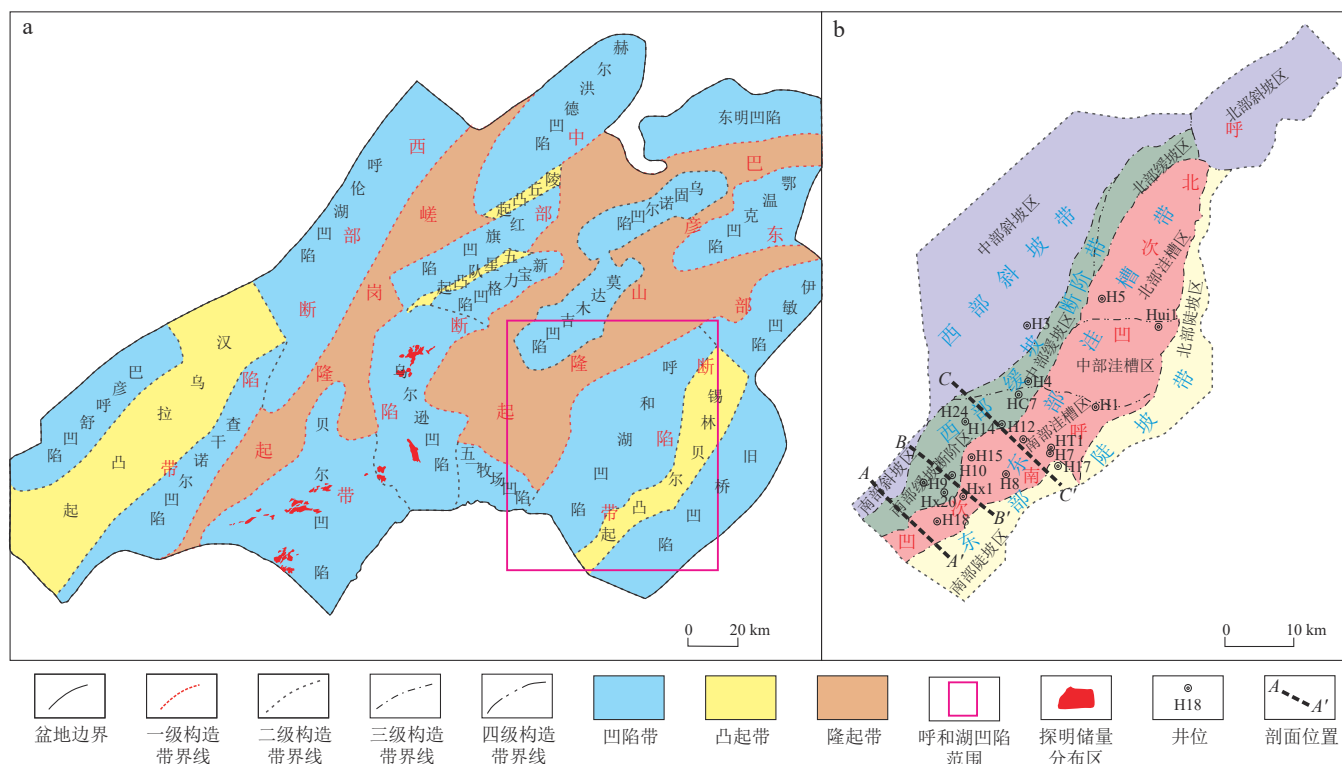


图1 海拉尔盆地构造格局与呼和湖凹陷构造分带-分区特征

Fig. 1 Structural framework of the Hailar Basin and structural zonation of the Huhehu Sag in the basin

a. 海拉尔盆地构造格局, 据文献[16-17]修改; b. 呼和湖凹陷构造分带-分区, 据文献[46]修改

呼和湖凹陷地层以白垩系为主, 自下而上划分为下白垩统铜钵庙组、南屯组、大磨拐河组、伊敏组以及上白垩统青元岗组^[24-25, 28-29]。其中南屯组是最主要目的层, 自下而上分为南一段和南二段。南一段总体为灰黑-深灰色泥岩、灰色粉砂岩和灰白-杂色砂砾岩等互层, 夹灰色粗砂岩和细砂岩。南二段则主要为一套灰色粉砂岩和厚层深灰色泥岩, 局部夹灰色砾岩、灰白色细砂岩和黑色煤^[30]。呼和湖凹陷油气勘探主要目的层为下白垩统南屯组和铜钵庙组, 南一段裂陷期形成的半深湖-深湖暗色泥岩^[2]和南二段沼泽化时期形成的暗色泥岩、炭质泥岩和煤岩是主要的源岩, 扇三角洲和辫状河三角洲沉积体系形成的砂岩、砂砾岩和煤岩是主要的油气储集层, 油气圈闭类型以断块、断背斜和断鼻为主^[52-54]。

2 呼和湖凹陷深层煤岩气赋存条件

海拉尔盆地呼和湖凹陷1987年开始勘探, 经历了盆地评价探索(1987—2000年)、常规油气发现(2001—2009年)和油气预探评价(2010年至今)3个阶段。目前发现的油气藏主要富集于南二段构造圈闭内, 勘探程度较高, 主要分布于西部缓坡断阶带, 剩余

目标多为具有“小、低、深、隐”特点^[16]的复合油气藏和岩性油气藏; 东部洼槽带和东部陡坡带面积大, 分布范围广, 已发现常规油气藏较少, 仅局部构造高部位见常规砂岩气藏发现, 其中H17井试气获工业气流, H18井和HX1井试气获低产气流, 整体勘探程度较低。资源评价结果显示, 呼和湖凹陷石油总资源量为 0.46×10^8 t, 轻质油薄层与煤岩伴生, 砂岩见较好油气显示, 煤岩多套叠置发育, 油气显示活跃^[55], 预测非常规深层煤岩气具有相当大的勘探潜力。因此, 在深入挖潜已知常规砂岩油气资源的同时, 亟需加大对呼和湖凹陷新领域、新类型深层煤岩气资源赋存条件的研究力度, 搞清深层煤岩气源岩、沉积和构造赋存条件, 明确深层煤储层储集条件及含气性, 落实深层煤岩气运移保存条件, 以便指明下一步勘探方向。

2.1 源岩与气源条件

2.1.1 源岩有机地球化学特征

呼和湖凹陷南二段泥岩总有机碳含量(TOC)普遍大于2.00%, 最高达29.40%, 生烃潜量(S_1+S_2)普遍大于2.50 mg/g, 最高达96.70 mg/g, 有机质成熟度(镜质体反射率 R_o)普遍大于0.75%, 最高达1.39%; 南一段

泥岩 TOC 普遍大于 1.00 %,最高达 26.22 %, S_1+S_2 普遍大于 1.50 mg/g,最高达 61.93 mg/g, R_o 普遍大于 1.00 %,实测最高达 1.63 % (表 1),预测最大可达 2.20 % (图 2a)。南二段与南一段泥岩有机质丰度高,成熟度高,整体处于中-高成熟阶段,综合评价为优质源岩^[20],生气强度普遍大于 $5.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,最高达 $30.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,生、排烃能力强^[26-27]。

南二段煤岩 TOC 普遍大于 30.00 %,最高达 77.10 %, S_1+S_2 普遍大于 50.00 mg/g,最高达 362.21 mg/g, R_o 普遍大于 0.75 %,最高达 1.45 %。东部洼槽带与东

部陡坡带主要发育中-高阶煤(图 2b;表 1),生气强度普遍大于 $30.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,最高达 $150.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,煤岩品质优,热演化程度高,生气能力强。

2.1.2 源岩发育特征

从南二段煤岩及泥岩厚度分布(图 3)来看,煤岩累计厚度普遍大于 50.0 m,最大达 150.0 m(图 3a),有机质成熟度(R_o)大于 1.20 %的面积可达 670.0 km^2 (图 2b)。泥岩厚度普遍大于 200.0 m,最大达 500.0 m(图 3b),有机质成熟度(R_o)大于 1.20 %的面积达 650.0 km^2

表 1 呼和湖凹陷南二段-南一段泥岩与南二段煤岩生烃指标特征

Table 1 Hydrocarbon generation indices for mudstones in the Nan 2 to Nan 1 members and coal rocks in the Nan 2 Member in the Huhehu Sag

源岩	总有机碳含量/%	生烃潜力/(mg/g)	氢指数	氯仿沥青“A”含量/%	镜质体反射率/%	综合评价
南二段泥岩	1.07 ~ 29.40/ 7.15(170)	1.05 ~ 96.70/ 13.17(170)	101.00 ~ 412.00/ 186.00(155)	0.025 6 ~ 0.846 5/ 0.161 9(47)	0.65 ~ 1.39/0.98(39)	优质源岩
南一段泥岩	1.00 ~ 26.22/ 4.69(151)	1.00 ~ 61.93/ 8.12(127)	102.00 ~ 645.00/ 169.00(95)	0.007 7 ~ 0.284 1/ 0.113 2(15)	0.87 ~ 1.63/1.41(9)	优质源岩
南二段煤岩	30.0 ~ 77.10/ 55.70(120)	30.28 ~ 362.21/ 107.36(107)	104.00 ~ 533.00/ 251.00(88)	0.131 0 ~ 2.403 0/ 0.758 3(32)	0.55 ~ 1.45/1.13(35)	优质源岩

注:表中数据为最小值~最大值/平均值(样品数)。

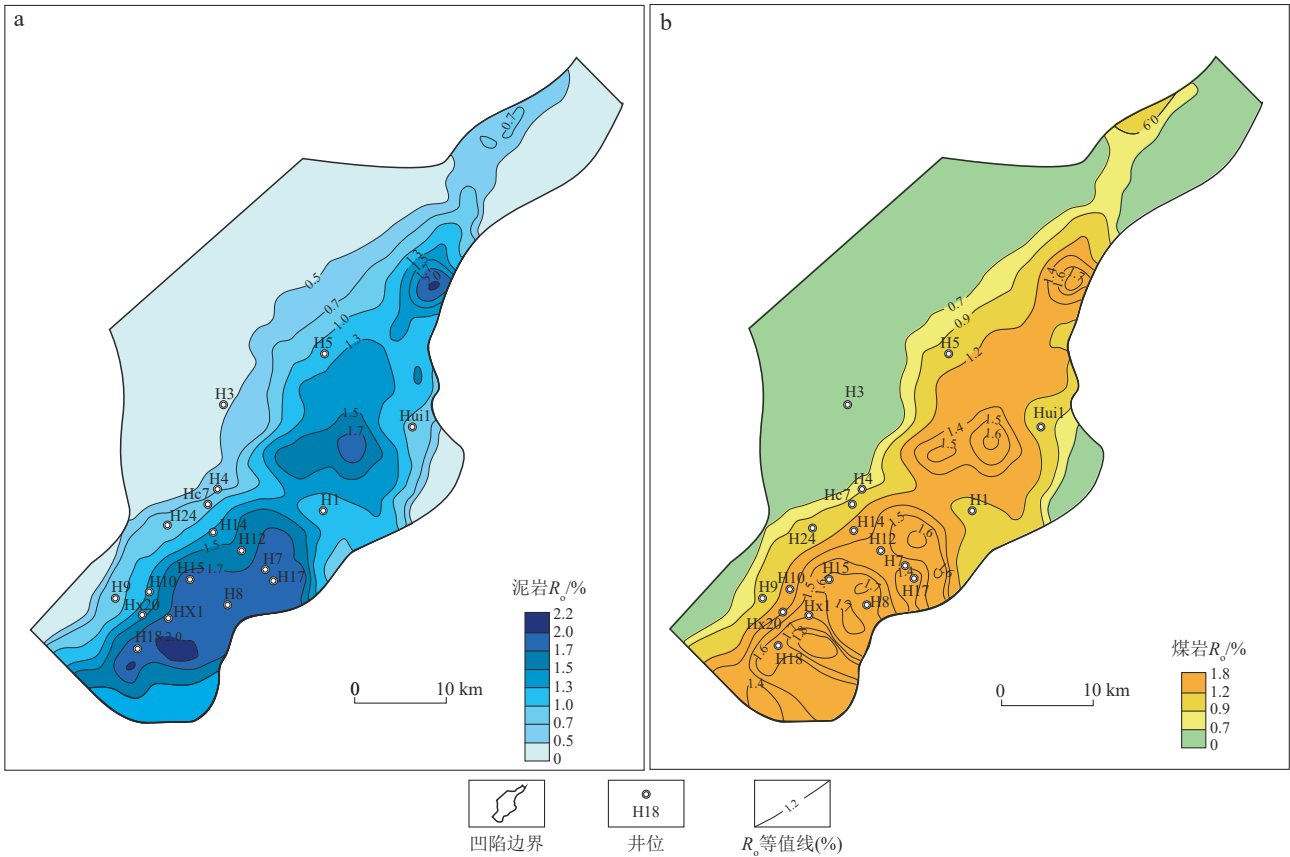


图 2 呼和湖凹陷南二段泥岩(a)与煤岩(b)有机质成熟度(R_o)等值线图

Fig. 2 Contour maps showing the organic matter maturity of mudstones (a) and coal rocks (b) of the Nan 2 Member, Huhehu Sag

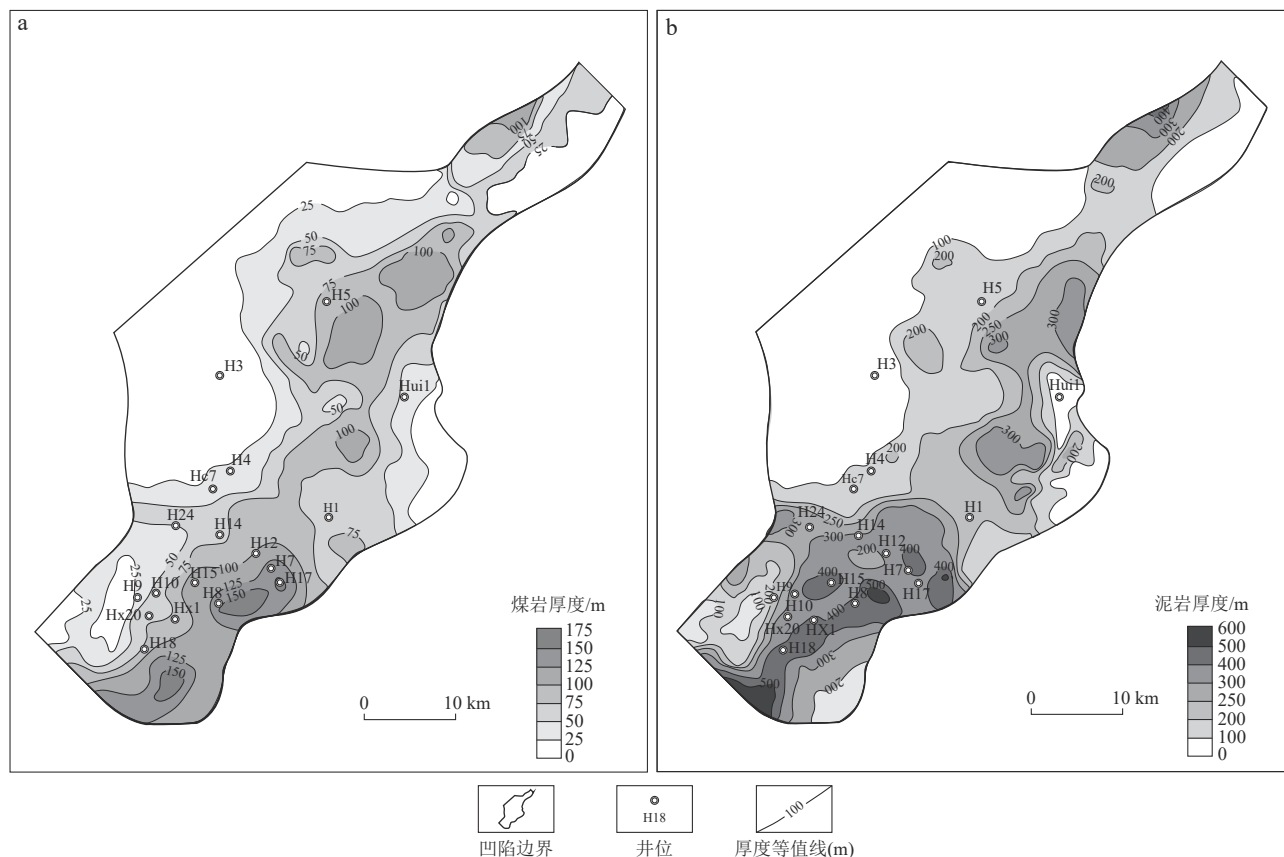


图3 呼和湖凹陷南二段煤岩(a)与泥岩(b)厚度等值线图

Fig. 3 Isopach maps of coal rocks (a) and mudstones (b) in the Nan 2 Member, Huhehu Sag

(图2a),主要分布于东部洼槽带和东部陡坡带。南一段泥岩厚度普遍大于100.0 m,最大达600.0 m,有机质成熟度(R_o)大于1.20%的面积达600.0 km²。总体上,呼和湖凹陷2套成熟源岩厚度大、分布广,具备形成深层煤岩气的物质基础^[56-58],估算生气量达 3.23×10^{12} m³。

2.1.3 气源特征

呼和湖凹陷南二段煤岩气测显示活跃。近期针对H14井南二段煤岩埋深2 045.00~2 095.80 m井段试气,射开厚度15.00 m/(2层),压后抽汲获17.10 m³/d的少量气流,其天然气相对密度0.679 7,成分以甲烷为主,含量81.05%,其次为乙烷,含量5.55%,丙烷含量2.77%,丁烷含量0.83%,戊烷含量0.14%。从南二段泥岩、南一段泥岩和南二段煤岩酸解烃实验与H14井南二段煤岩气甲烷—戊烷碳同位素对比(图4a)来看,H14井甲烷—戊烷碳同位素值介于南一段泥岩和南二段泥岩碳同位素值之间。通过H14井煤岩试气气样C₅₋₇与C₇轻烃组成三角图^[59](图4b,c)来看,H14井深层煤岩气C₅₋₇轻烃和C₇轻烃以异构烷烃+正构烷烃为主,证实为混合型母质来源,偏向油型气,也说明南二段深层煤岩气具有部分南一段腐泥型湖相泥岩贡献。上

述碳同位素实验,选用国际原子能机构IAEA-600为标准物质,数据采用相对国际碳同位素标准VPDB值表示。此外,南二段煤岩气测组分齐全,甲烷含量13.72%~49.60%,乙烷含量0.96%~5.15%,丙烷含量0.13%~1.68%,正丁烷含量0.01%~0.29%,异丁烷含量0.01%~0.45%。因此,南二段深层煤岩气来源于南二段—南一段泥岩和南二段煤岩2套源岩,具备“双源供烃^[60]”的条件,气源充足。

2.2 聚煤环境与富煤特征

2.2.1 聚煤环境

中国陆上主要发育克拉通、断陷和前陆3种成煤沉积环境。克拉通成煤以鄂尔多斯盆地和四川盆地为代表,为海相和海—陆过渡沼泽相成煤环境^[61-62];断陷成煤以松辽、海拉尔、二连和渤海湾盆地为代表,为三角洲—湖泊沼泽相成煤环境;前陆成煤以准噶尔、吐哈和塔里木盆地为代表,为河流—湖泊沼泽相成煤环境。

海拉尔盆地南二段沉积时期,气候温暖湿润,植被发育,东、西部2个断陷带构造相对宽缓平稳,聚煤环境有利,多期煤岩叠置发育。呼和湖凹陷为典型的断

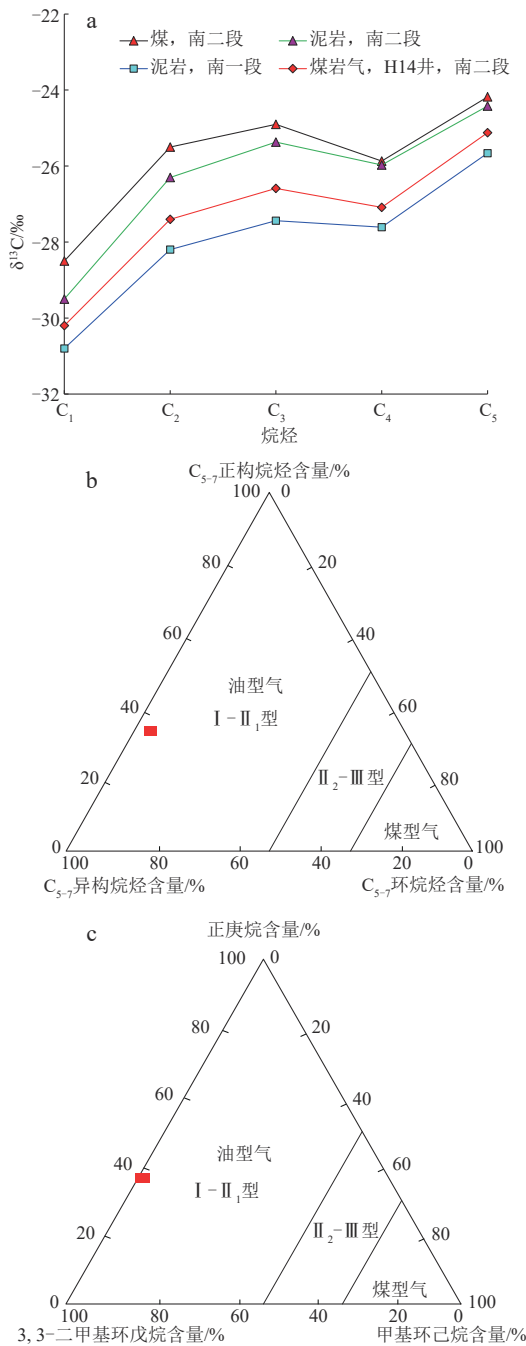


图4 呼和湖凹陷南二段H14井深层煤岩气与煤系源岩碳同位素对比和 C_{5-7} 与 C_7 轻烃组成三角图

Fig. 4 Comparison of carbon isotopes in deep coal-rock gas and coal-measure source rocks, along with ternary plots of C_{5-7} and C_7 light hydrocarbon compositions in well H14 in the Nan 2 Member, Huhehu Sag

a. 深层煤岩气与煤系源岩酸解烃碳同位素值($\delta^{13}C$)对比;b. C_{5-7} 轻烃组分含量三角图,据文献[59]修改;c. C_7 轻烃组分含量三角图,据文献[59]修改

陷扇(辫状河)三角洲-湖泊沼泽化湖盆成煤环境,沼泽化湖盆的广泛分布控制了煤岩大面积发育,尤其在沼泽化湖盆扩张初始期,煤岩厚度大,但受不同沉积时

期湖盆范围变化的影响,煤岩向洼槽带或缓坡断阶带存在减薄或分叉特征(图5)。早白垩世,南二段经历了断陷沼泽化湖盆扩张初始期、沼泽化湖盆扩张稳定期和扩张萎缩期3个阶段^[15,25,28]。①断陷沼泽化湖盆扩张初始期,湖盆变深、变窄,导致煤岩较薄,南二⁴砂层组沉积时期以薄-中厚煤岩发育为主;随着湖盆变浅、变宽,南二³砂层组沉积时期煤岩最发育,厚度最大,是主力煤岩发育段,沼泽化湖面较大,具有煤-泥共生的特征,为深层煤岩气源-储一体成藏提供了条件。②断陷沼泽化湖盆扩张稳定期(南二²砂层组沉积时期),湖盆继续变浅变宽,以薄-中厚煤岩^[65]为主,沼泽化湖面最大。③断陷沼泽化湖盆扩张萎缩期(南二¹砂层组沉积时期),湖盆萎缩变窄,沼泽化湖面最小,扇(辫状河)三角洲发育,砂-泥-煤频繁互层,以厚层砂岩与薄煤岩为主。

2.2.2 富煤特征

呼和湖凹陷南二段纵向自上而下发育南二¹、南二²、南二³和南二⁴砂层组。钻井揭示南二段煤岩厚度在6.6~134.2 m,一般发育10~25层煤岩,自上而下为1#—9#稳定煤。其中6#煤横向最稳定,厚度最大,可达26.0 m(H7井);其次为5[#],8[#]和7[#]煤。南二¹砂层组单层煤厚度1.5~7.6 m,累计厚度6.0~17.0 m,发育1[#]稳定煤;南二²砂层组单层厚度3.0~13.4 m,累计厚度10.2~52.4 m,发育2[#]—4[#]稳定煤;南二³砂层组单层厚度5.0~30.4 m,累计厚度20.4~80.2 m,发育5[#]—7[#]稳定煤;南二⁴砂层组单层厚度3.0~12.0 m,累计厚度12.5~30.8 m,发育8[#]—9[#]稳定煤。

从呼和湖凹陷南二段煤岩厚度图(图3a)与呼和湖凹陷构造分区(图1b)来看,南二段煤岩厚度整体呈现“东厚西薄、南厚北薄”的特征。西部斜坡带煤岩厚度10.0~25.0 m,西部缓坡断阶带煤岩厚度25.0~50.0 m,具有“贫煤”的特征;而东部洼槽带煤岩厚度75.0~150.0 m,东部陡坡带煤岩厚度100.0~125.0 m,具有“富煤”的特征。其中,呼南次凹1[#]煤单层厚度1.0~3.0 m,最厚达5.0 m;2[#]煤单层厚度3.0~5.0 m,最厚达8.0 m;3[#]煤单层厚度3.0~6.0 m,最厚达10.0 m;4[#]煤单层厚度4.0~6.0 m,最厚达12.0 m;5[#]煤单层厚度6.0~12.0 m,最厚达23.8 m(H17井)(图6a);6[#]煤单层厚度8.0~12.0 m,最厚达26.0 m(H7井)(图6b);7[#]煤单层厚度4.0~10.0 m,最厚达10.2 m(H7井);8[#]煤单层厚度5.0~10.0 m,最厚达16.45 m;9[#]煤单层厚度3.0~5.0 m,最厚达7.0 m,发育H7井与H18井两个富煤中心。

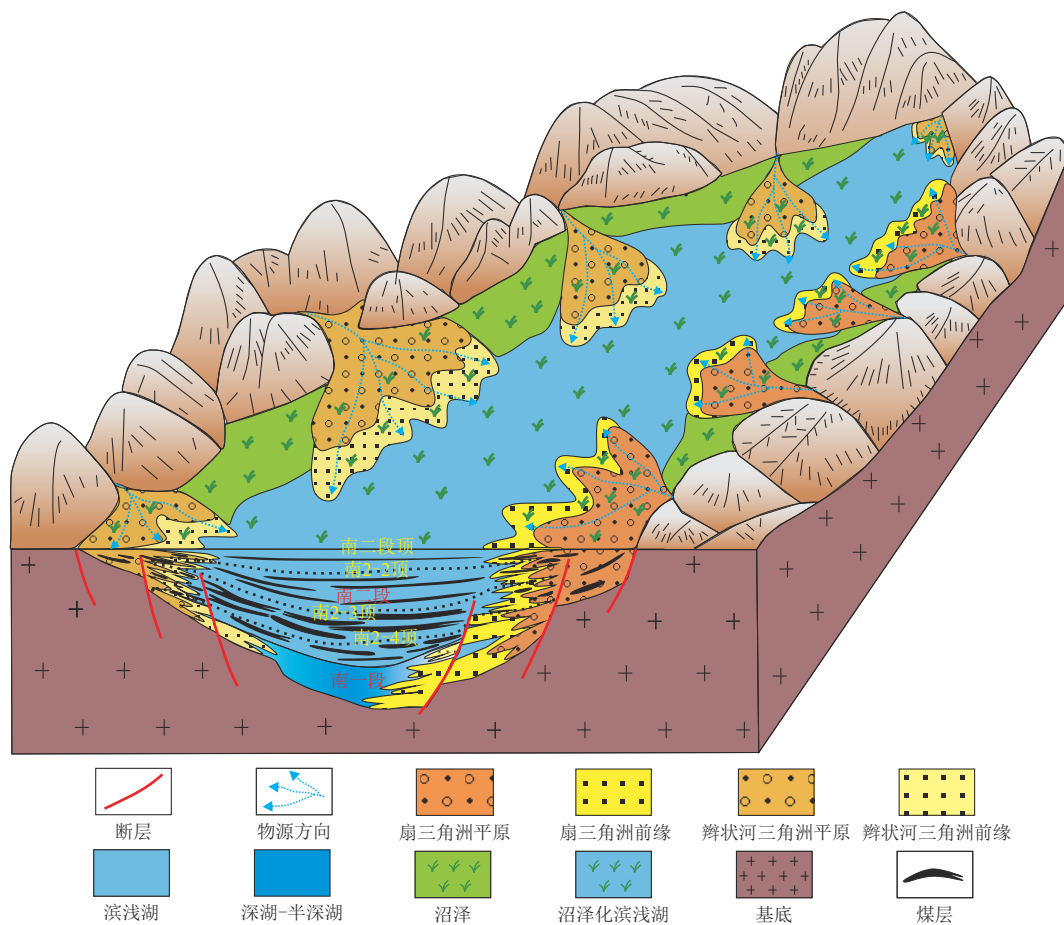


图5 呼河湖凹陷南二段沼泽化滨浅湖相煤发育模式(据文献[63-64]修改)

Fig. 5 Developmental model of swampy shore-shallow lacustrine coals in the Nan 2 Member, Huhehu Sag (modified after references [63-64])

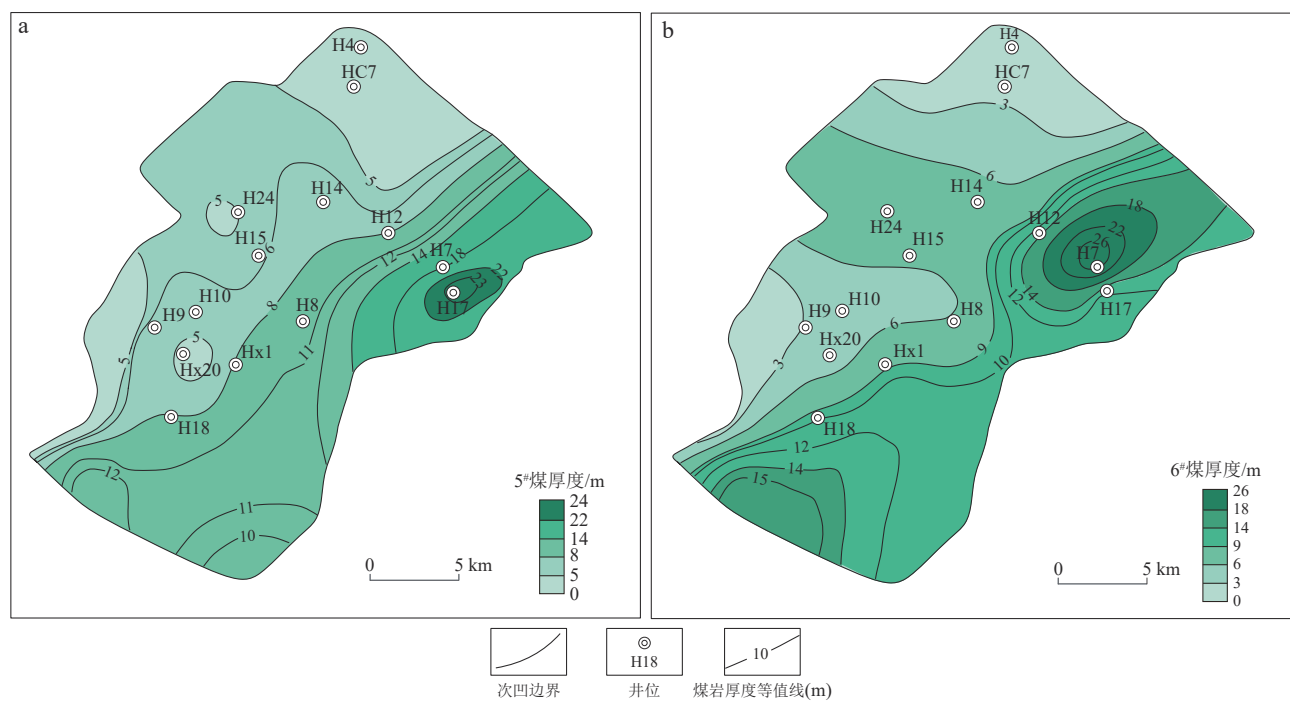


图6 呼河湖凹陷呼南次凹南二段5#(a)和6#(b)煤厚度等值线图

Fig. 6 Isopach maps of No. 5 (a) and No. 6 (b) coal measures in the Nan 2 Member, Hunan sub-sag, Huhehu Sag

2.3 煤岩储集条件与含气性

2.3.1 煤岩储集条件

呼和湖凹陷呼南次凹发育南部斜坡区、南部缓坡断阶区、南部洼槽区和南部陡坡区4个四级构造单元(图1b)。呼南次凹断陷沼泽化湖盆煤岩发育整体受构造控制明显,南二段早期伸展断陷主要扩张期煤岩发育,呈现“西薄东厚、西浅东深”的特征,即南部斜坡区和南部缓坡断阶区煤岩埋藏浅、成熟度低、厚度小,南部洼槽区和南部陡坡区煤岩埋藏深、成熟度高、厚度大。

南部缓坡断阶区煤岩割理裂隙较发育,以半亮型和半暗型原生结构煤^[66-67]为主(图7a,d),有机孔孔径小,发育少,微裂隙连通有机孔差。其中,缓坡断阶带下带的HX20井南二段3#煤 R_o 为0.79%,煤岩面割理线密度0.6~1.2条/cm,端割理线密度1.0~2.0条/cm,斜交裂隙发育,线密度可达0.6~1.0条/cm,斜交裂隙发育程度整体受断裂控制明显,延伸较长(图7a)。镜下可见10~15条微裂隙(图7c),发育少量有机孔,可见有机孔部分被黏土矿物充填(图7b),孔径20~30 μm 。煤储层核磁孔隙度6.6%,核磁渗透率 $0.470 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (覆压孔、渗,温度80.1 $^{\circ}\text{C}$,压力22.6 MPa)。此外,南部缓坡断阶带H24井南二段6#煤以半暗型煤

为主,含少量半亮型煤,镜下植物组织孔、微裂隙发育(图7f),可见钠长石粒内孔(图7e), R_o 达0.63%,面割理线密度0.4~1.0条/cm,端割理线密度0.8~1.2条/cm,煤储层核磁孔隙度7.6%,核磁渗透率 $0.064 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (覆压孔、渗,温度61.3 $^{\circ}\text{C}$,压力16.5 MPa)。

呼南次凹南部洼槽区与南部陡坡区煤岩以光亮型和半亮型原生结构煤为主,割理裂隙发育(图8a,d),微裂隙^[68]和有机孔发育,微裂隙沟通有机孔,孔-缝体系发育(图8c),储集条件优越。其中,南部洼槽区的HX1井南二段7#煤 R_o 达1.50%,面割理线密度0.6~1.0条/cm,端割理线密度0.8~1.6条/cm,镜下可见微裂隙19~23条(图8c),可见有机孔和石英粒间孔(图8b),孔径最大达75~350 μm 。煤储层核磁孔隙度4.9%,核磁渗透率 $0.930 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (覆压孔、渗,温度101.0 $^{\circ}\text{C}$,压力28.5 MPa)。南部陡坡区的H17井南二段4#煤 R_o 达0.84%,面割理线密度0.4~0.8条/cm,端割理线密度0.6~1.2条/cm,镜下可见微裂隙14~16条(图8f),发育有机质裂缝和黏土晶间孔(图8e),孔径最大达60~120 μm 。煤储层核磁孔隙度6.2%,核磁渗透率 $0.740 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (覆压孔、渗,温度82.2 $^{\circ}\text{C}$,压力23.2 MPa)。X-射线衍射分析结果表明,HX1井与H17井黏土矿物主要为高岭石,含量达37.01%~38.10%;脆性矿物主要为石英及钠长石,含量

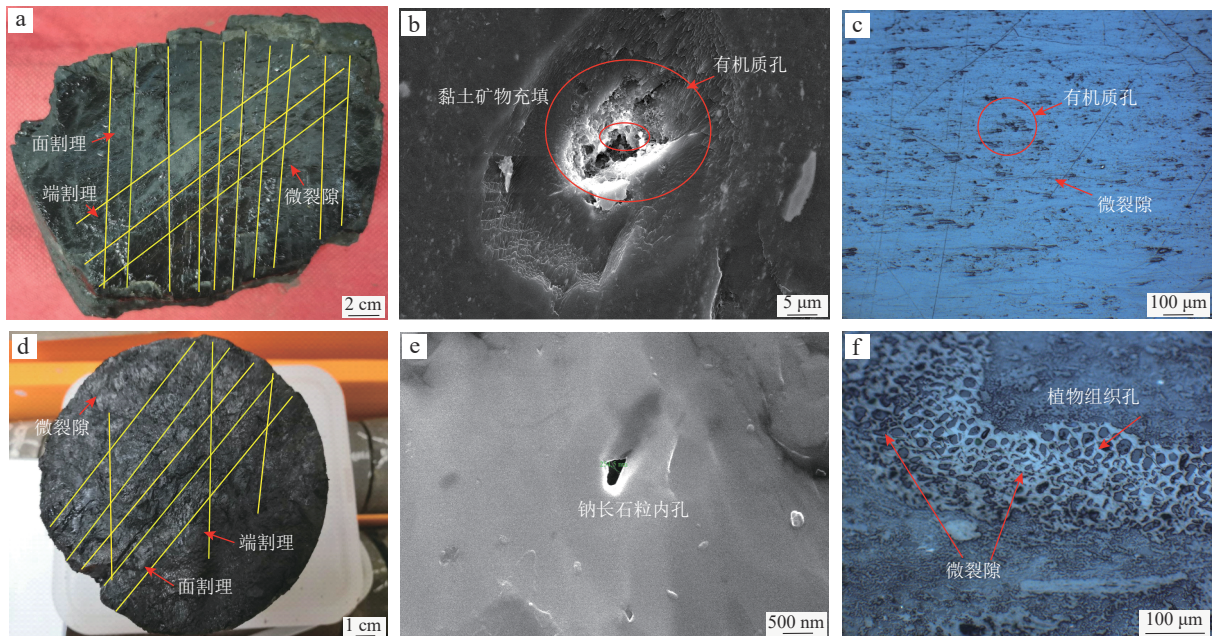


图7 呼和湖凹陷缓坡断阶带煤储层宏观与微观特征照片

Fig. 7 Macroscopic and microscopic characteristics of coal reservoirs in the ramp-faulted terrace zone of the Huhehu Sag

a. 割理和微裂隙发育,半亮型原生结构煤,HX20井,埋深2 053.10 m,岩心截面;b. 有机质孔,见黏土矿物充填,HX20井,埋深2 053.10 m,扫描电镜;c. 见17条微裂隙,有机质孔发育,HX20井,埋深2 053.10 m,铸体薄片;d. 割理和微裂隙较发育,半暗型原生结构煤,H24井,埋深1 572.25 m,岩心截面;e. 见钠长石粒内孔,H24井,埋深1 572.25 m,扫描电镜;f. 植物组织孔、微裂隙发育,H24井,埋深1 572.25 m,铸体薄片

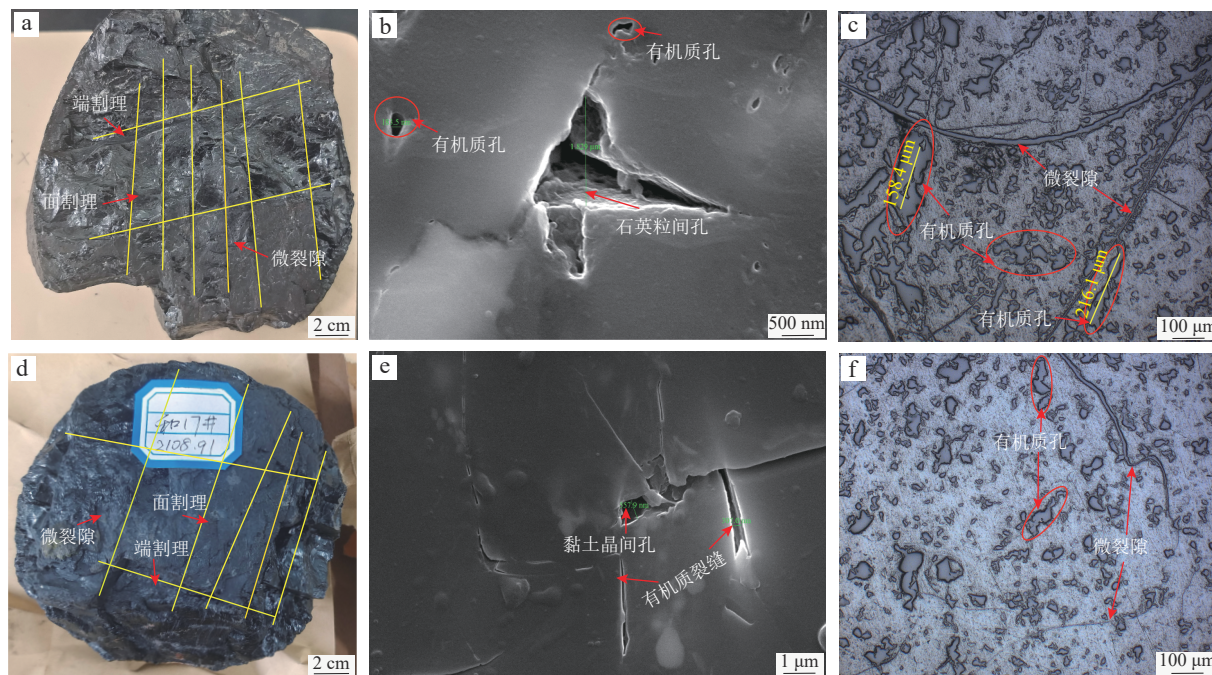


图8 呼河湖凹陷洼槽带与陡坡带煤储层宏观与微观特征照片

Fig. 8 Macroscopic and microscopic characteristics of coal reservoirs in the trough and steep-slope zones of the Huhehu Sag

a. 割理和微裂隙发育, 半亮型原生结构煤, HX1井, 埋深2 726.35 m, 岩心截面; b. 见石英粒间孔、有机质孔, HX1井, 埋深2 726.35 m, 扫描电镜; c. 微裂隙、有机质孔发育, HX1井, 埋深2 726.35 m, 铸体薄片; d. 割理和微裂隙发育, 光亮型原生结构煤, H17井, 埋深2 108.91 m, 岩心截面; e. 见黏土晶间孔、有机质裂缝, H17井, 埋深2 108.91 m, 扫描电镜; f. 微裂隙、有机质孔发育, H17井, 埋深2 108.91 m, 铸体薄片

47.01 % ~ 49.01 %; 含少量伊利石、方解石和黄铁矿, 含量一般3.00 % ~ 5.00 %, 最高可达7.08 %。总体上, 洼槽带和陡坡带煤岩储集条件优越, 物性好, 有利于深层煤岩气赋存和压裂改造。

2.3.2 煤储层含气性

从呼南次凹6[#]煤气测全烃含量峰值分布特征(图9)来看, 呼河湖凹陷煤岩气测显示活跃: 缓坡断阶带H14井气测全烃含量峰值最大为3.0 %, HX20井为28.3 %; 洼槽带HX1井气测全烃含量峰值最大为52.4 %, H7井为33.6 %, H18井为41.2 %; 陡坡带H17井气测全烃含量峰值最大为39.0 %, 证实从缓坡断阶带到洼槽带和陡坡带, 随着埋深的加大, 煤岩气测显示明显增高。缓坡断阶带气测全烃含量峰值一般为5 % ~ 10 %, 最高达30 %; 洼槽带一般为30 % ~ 40 %, 最高达55 %; 陡坡带一般为15 % ~ 30 %, 最高达50 %。气测全烃含量峰值整体呈现“东高西低, 南高北低”的特征, 洼槽带和陡坡带气测全烃含量峰值明显高于缓坡断阶带。

已钻井南二段6[#]煤保压取心实测含气量16.94 ~ 21.41 m³/t, 平均值为19.72 m³/t; 绳索取心实测含气量11.09 ~ 13.44 m³/t, 平均值为12.27 m³/t。游离气逸散

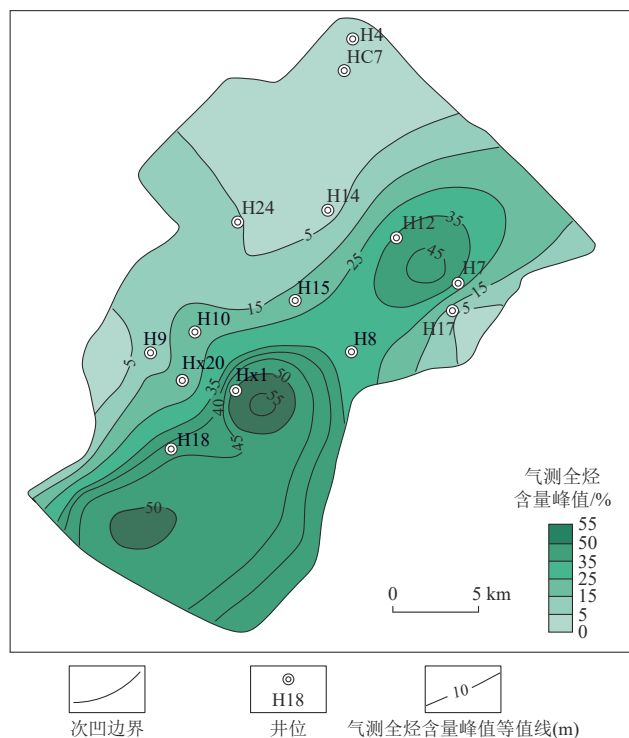


图9 呼河湖凹陷南次凹6[#]煤气测全烃含量峰值等值线图

Fig. 9 Contour map showing gas log-derived peaks of total hydrocarbon of the No. 6 coal measure in the Hunan sub-sag, Huhehu Sag

快,是绳索取心和保压取心含气量数据差异的主要原因。依据现有数据,绳索取心与保压取心平均含气量差值为 $7.45 \text{ m}^3/\text{t}$,可初步认为是游离气含气量。

考虑到取心过程中的气体逸散,现场获取吸附气和游离气真实含气量难度大。本文利用核磁共振分析测定吸附气和游离气占比,与实测占比相对误差小于 5% ^[69-75]。具体实验流程如下:①连接实验装置,进行气密性检查,利用氦孔隙度测量仪测量实验装置各部分的自由空间体积;将样品缸抽真空后注入甲烷气体,分别测量不同压力下甲烷信号量,根据甲烷实际气量(体积),对甲烷信号进行标定。②将煤岩岩心彻底干燥后,放入特制的岩心夹持器,置于核磁共振检测系统中,加围压至设定压力值,密封后抽真空 24 h 以上。③利用CPMG脉冲序列对煤岩岩心进行核磁共振测量,反演得到干燥样品的核磁共振 T_2 (弛豫时间)谱。④将甲烷气体注入岩心中,加压至地层压力,充分饱和 24 d 以模拟甲烷吸附气的原始赋存状态,饱和过程中实时检测岩心中甲烷气体信号量的变化。⑤打开岩心夹持器的出口,进行衰竭式开发模拟实验,记录入口压力和出口流量。在整个实验过程中,需实时监测岩心中甲烷气体信号量的变化。缓坡断阶带H14井南二段煤岩 $2\,045.00 \sim 2\,095.80 \text{ m}$ 深度段试气,压后抽汲获 $17.10 \text{ m}^3/\text{d}$ 的少量气流,返排率 26.34% ,证实煤岩不产水,因此,在核磁共振分析南二段煤岩气赋存状态中,样品并未进行饱水实验。

实验原理:吸附态甲烷主要赋存于煤岩纳米孔隙的表面,由于受到表面弛豫控制,弛豫时间较短,对应 T_2 谱上的左峰,弛豫时间介于 $0.1 \sim 1.0 \text{ ms}$;游离态甲烷则赋存于较大的煤岩孔隙中,不受孔隙壁面的束缚,弛豫时间较长,对应 T_2 谱上的右峰,弛豫时间介于 $1.0 \sim 100.0 \text{ ms}$ 。

本文针对不同构造带、不同位置、不同深度系统开展了西部缓坡断阶带上断阶的H24井6#煤(深度 $1\,572.25 \text{ m}$)、中断阶的H14井7#煤(深度 $2\,156.70 \text{ m}$)、下断阶的HX20井3#煤(深度 $2\,053.10 \text{ m}$)、东部洼槽带的HX1井7#煤(深度 $2\,726.35 \text{ m}$)和东部陡坡带的H17

井4#煤(深度 $2\,108.91 \text{ m}$)的基于核磁共振的煤岩 CH_4 吸附-解吸动态模拟实验(表2),来验证游离气与吸附气占比关系。结果表明,从缓坡断阶带H24、H14、HX20井到洼槽带HX1井与陡坡带H17井,吸附气占比降低,游离气^[67]占比增高,吸附气占比从 97.09% 降低到 55.60% ,游离气占比从 2.91% 增加到 44.40% ,更富“游离气”。

2.4 运移和保存条件

2.4.1 断裂体系

白垩纪,呼和湖凹陷经历了早期伸展断陷期、中期裂后热沉降断-拗期和晚期拗陷期3期构造演化阶段^[22],形成了3套构造层,依次为下部伸展断陷构造层、中部断-拗构造层和上部拗陷构造层^[31],进而控制3期大规模的构造变形,即铜钵庙组底界面(对应 T_5 反射界面)、南屯组(南二段)顶界面(对应 T_2^* 反射界面)及伊敏组顶界面(对应 T_0^* 反射界面)的构造变形^[18,32],进而为形成2套断裂体系提供了良好的构造背景。2套断裂体系以 T_2^* 反射层为界,划分为早期下部伸展断裂体系和晚期上部走滑断裂体系(图10)。下部伸展断裂体系走向主要为北东向,控制了呼和湖凹陷的沉积展布,为形成呼和湖凹陷“东西分带、南北分区”的构造格局奠定了基础条件。南屯组末期为早期下部断裂体系的强烈活动时期,此时断裂开启,于大(大磨拐河组)一段中终止消失,对南二段深层煤岩气保存有利。

呼和湖凹陷缓坡断阶带南二段砂岩发育,从缓坡断阶带H10井南二¹砂层组砂岩试气,气测全烃含量峰值为 14.27% ,基值为 0.63% ,两者比值为 22.60 ,压后放喷求产,日产油 2.71 t ,日产气 $40\,721 \text{ m}^3$;HX20井南二¹砂层组砂岩试油,气测全烃含量峰值为 1.39% ,基值为 0.76% ,两者比值为 1.80 ,压后水力泵求产,日产油 1.16 t ;陡坡带H17井南二¹砂层组砂岩试气,气测全烃含量峰值为 11.12% ,基值为 0.83% ,两者比值为 13.40 ,压后自喷求产,日产气 $14\,036 \text{ m}^3$ 。通过油气-源对比^[39,41],砂岩储层中的气主要来自于煤岩与泥岩

表2 呼和湖凹陷南二段不同构造带煤吸附气与游离气占比特征

Table 2 Proportions of adsorbed and free gas in coals across various structural zones of the Nan 2 Member, Huhehu Sag

井号	构造带	深度/m	吸附气占比/%	游离气占比/%
H24	西部缓坡断阶带上断阶	1 572.25	97.09	2.91
H14	西部缓坡断阶带中断阶	2 156.70	92.80	7.23
HX20	西部缓坡断阶带下断阶	2 053.10	69.60	30.40
HX1	东部洼槽带	2 726.35	55.60	44.40
H17	东部陡坡带	2 108.91	62.50	37.50

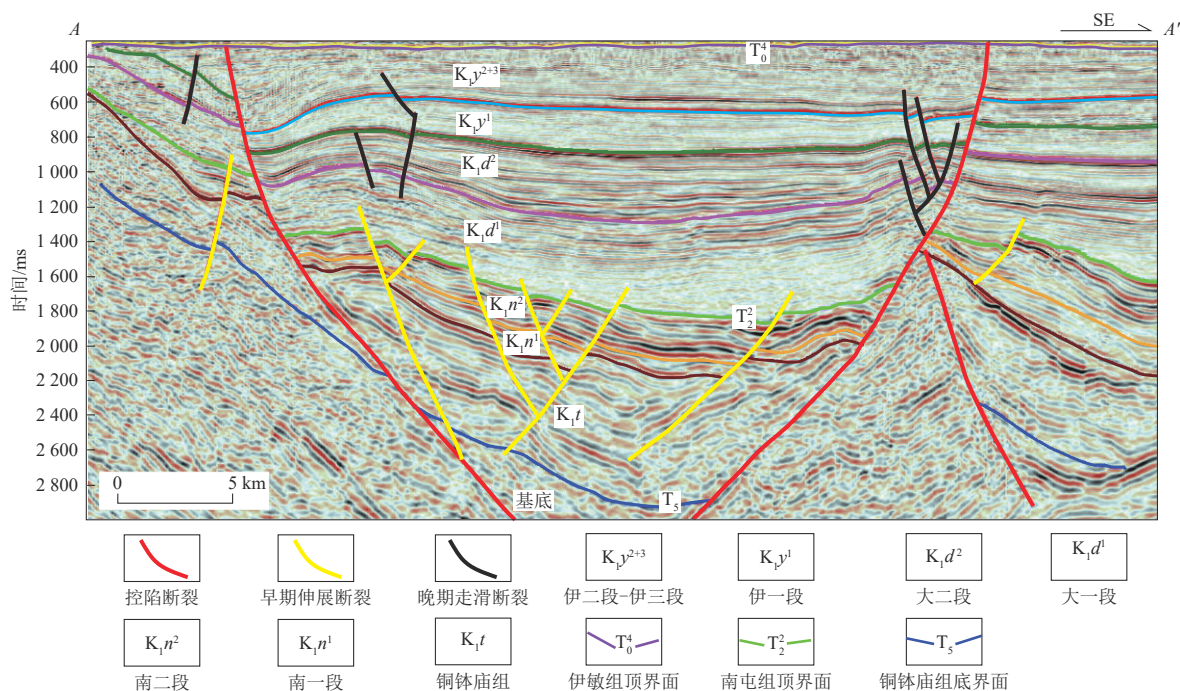


图10 呼和湖凹陷断裂体系分布特征(剖面位置见图1b)

Fig. 10 Distribution section of the fault system in the Huhehu Sag (see Fig. 1b for the section location)

双源供给,属于混合气,也证实洼槽带与陡坡带南二段-南一段泥岩与南二段煤岩生成的油气可通过早期断裂体系侧向和垂向运移到缓坡断阶带南二¹砂层组砂岩中成藏。此外,洼槽带与陡坡带南二段砂岩不发育,主要以泥岩与煤岩互层为主,可形成源-储一体的深层煤岩气藏。

2.4.2 保存条件

从Line624测线构造发育史(图11a)来看,呼南次凹南部发育断阶型陡坡带、洼槽带和断阶型缓坡带。南二段沉积时期,受断陷期伸展构造控制,呼南次凹南部持续沉降;南屯组沉积末期构造定型;伊敏组沉积末期断阶型陡坡带改造弱,断阶型缓坡带受断裂发育影响被复杂化,洼槽带构造稳定,受早期伸展断裂体系影响小,为深层煤岩气连续广覆式大面积成藏提供了赋存空间。从Line1409测线构造发育史(图11b)来看,呼南次凹北部发育背斜型陡坡带、洼槽带和断阶型缓坡带。南屯组沉积末期,背斜型陡坡带未受边界断裂体系活动影响,形成滚动背斜;伊敏组沉积末期呼南次凹北部未受改造,为深层煤岩气成藏富集提供了构造背景,也成为游离气运移聚集的主要构造位置和优势运移通道,更有利于深层煤岩气的富集高产。因此,呼和湖凹陷南屯组沉积末期构造定型,伊敏组沉积末期未受改造或改造弱,保存条件优越。

此外,呼和湖凹陷大一段沉积了大段厚层泥岩^[13],为深层煤岩气的成藏提供了良好的区域稳定盖层。泥岩厚度在500~1200 m^[13],厚值区主要分布在东部洼槽带和东部陡坡带(图1b),面积达670 km²。

呼和湖凹陷生烃史^[31-32]表明,伊敏组沉积中、晚期(125~110 Ma),凹陷开始大规模生烃,是主要的生烃高峰期。热史模拟^[24]和埋藏史表明,伊敏组沉积末期(90 Ma),温度最高,是呼和湖凹陷主要的排烃高峰期,此时南屯组埋藏最深,是主要的成藏高峰期。呼和湖凹陷伊敏组沉积末期与南二段煤岩、南屯组泥岩生、排烃高峰期匹配,深层煤岩气成藏条件优越。

2.4.3 储-盖组合与油气成藏

南二段沉积时期为早期伸展断陷主要扩张期,具有多旋回、震荡性沉降的特点,沼泽化湖盆范围大。缓坡断阶带发育辫状河三角洲沉积体系,陡坡带发育扇三角洲沉积体系,延伸短、变化快,局部可形成有利砂岩储集体,缓坡断阶带发育的辫状河三角洲沉积体系和陡坡带发育的扇三角洲沉积体系与下部煤岩伴生,可构成砂岩-煤岩散气组合(图12c),煤岩与泥岩生成的油气可向邻近的上部砂岩储集体运移,形成下生上储型砂岩油气藏。洼槽带发育大面积分布的沼泽化滨浅湖沉积体系,扇三角洲与辫状河三角洲沉积体系不发育,煤岩与厚层泥岩共生,可构成煤岩-泥岩聚气组

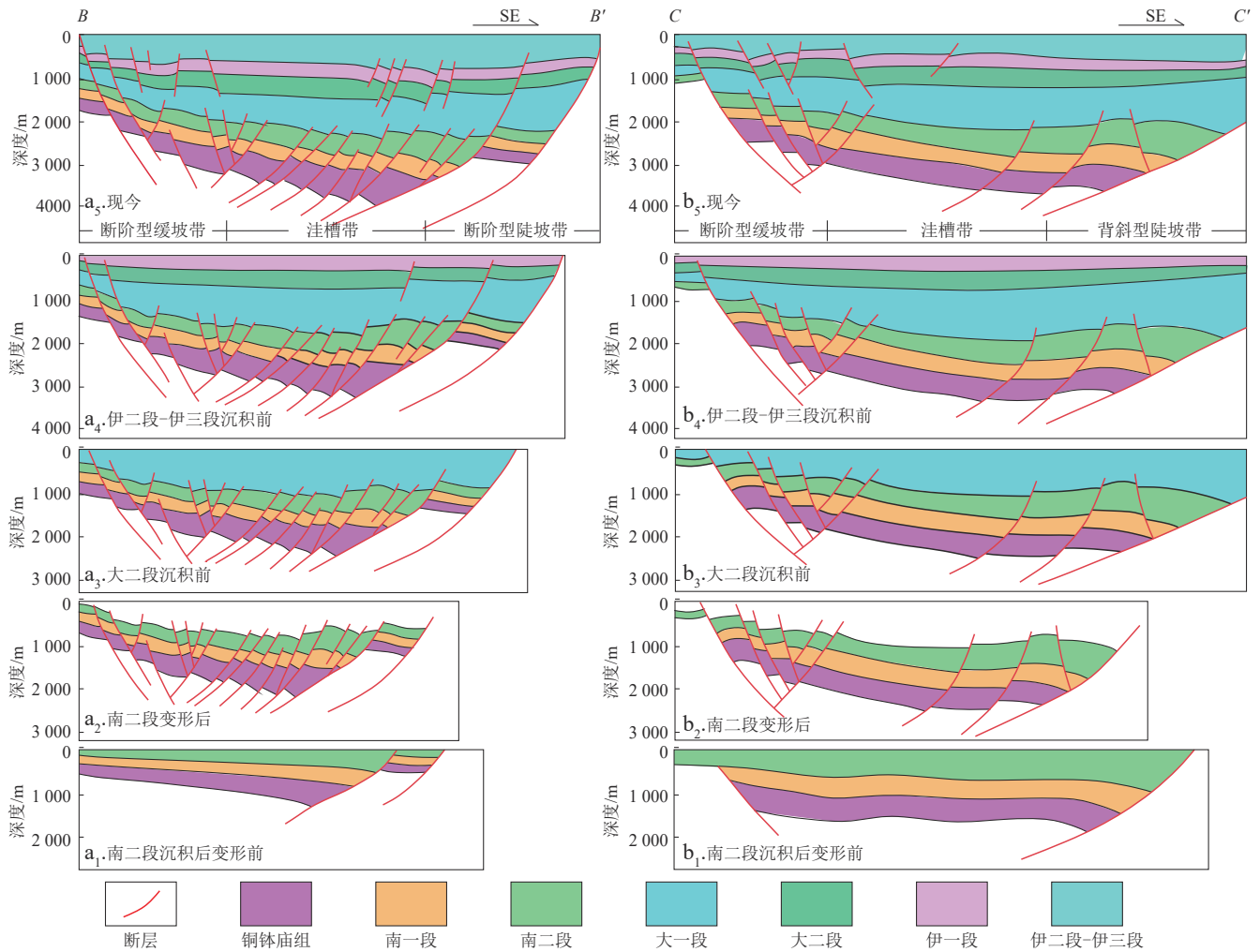


图11 呼和湖凹陷构造发育史剖面特征(剖面位置见图1b)

Fig. 11 Sections showing the structural evolutionary history of the Huhehu Sag (see Fig. 1b for the section locations)

a₁—a₅. 过Line624测线; b₁—b₅. 过Line1409测线

合(图12a),形成源-储一体的深层煤岩气藏,为深层煤岩气成藏提供了物源及储集空间。此外,H18井区局部可发育上部煤岩与下部砂岩的煤岩-砂岩聚气组合(图12b),砂岩试气获低产气流,自顶板泥岩到底板泥岩可构成完整的泥岩-煤岩-砂岩-煤岩-泥岩的煤岩-泥岩聚气组合。总体上,缓坡断阶带、陡坡带与注槽带可构成辫状河三角洲、扇三角洲与沼泽化滨浅湖的沉积体系组合,形成砂岩-煤岩、煤岩-泥岩和煤岩-砂岩3种深层煤岩气聚气与散气组合(俗称聚散组合^[76]),为海拉尔盆地断陷深层煤岩气成藏提供了良好的储-盖组合。

煤岩-泥岩和煤岩-砂岩聚气组合主要分布于注槽带和陡坡带,煤岩气测显示活跃,气测全烃含量峰值可达30%~55%,煤岩以光亮型和半亮型煤为主(图8a,d),顶板均为大套泥岩,封盖条件俱佳,富含游离气,占比可达35%~45%(表2),有利于深层煤岩气

成藏(图12a,b)。煤岩-泥岩聚气组合大面积分布,煤岩-砂岩聚气组合则主要分布于H18井区。

砂岩-煤岩散气组合主要分布于缓坡断阶带及陡坡带近物源砂体相对发育区。缓坡断阶带发育辫状河三角洲沉积体系,砂体相对发育,形成砂岩-煤岩散气组合,砂岩物性好,煤岩和泥岩生成的油气可向邻近的砂岩运移成藏,煤岩成熟度低,以半暗型煤或半亮型煤为主(图7a,d);煤岩气测显示较差,气测全烃含量峰值为5%~10%,不利于深层煤岩气成藏;以吸附气为主,游离气占比小于10%,一般为2%~5%(表2),可形成下生上储型常规砂岩油气藏。H10井南二段试气获工业油气流^[43-44]就是最典型的证据。

呼和湖凹陷西部斜坡带和西部缓坡断阶带普遍发育构造-地层型圈闭类型,为深层煤岩气构造-地层型油气成藏提供了条件。构造-地层型深层煤岩气成藏整体不受构造控制,自成圈闭,大面积成藏,主要发育

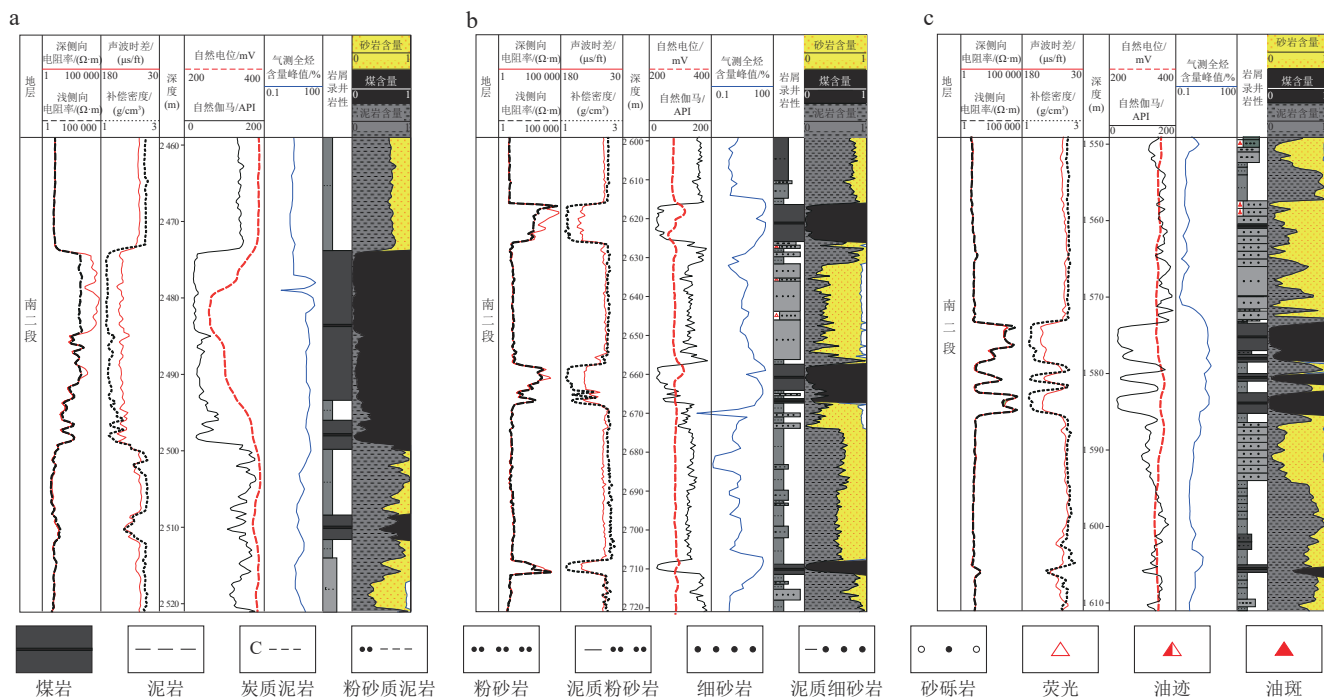


图12 呼河湖凹陷煤岩-泥岩聚气组合、煤岩-砂岩聚气组合与砂岩-煤岩散气组合岩-电特征

Fig. 12 Litho-electric properties of the coal rock-mudstone and coal rock-sandstone assemblages for gas accumulation and sandstone-coal rock assemblage for gas dissipation in the Huhehu Sag

a. 煤岩-泥岩聚气组合, H7井; b. 煤岩-砂岩聚气组合, H18井; c. 砂岩-煤岩散气组合, H24井

于构造相对稳定区,持续沉降,断裂欠发育,广泛分布于缓坡断阶带相对稳定区。陡坡带受断陷层控制明显,易于形成断鼻、断背斜圈闭,可为深层煤岩气构造型油气藏提供构造背景,煤岩成熟高、厚度大,游离气占比较高,尤其是构造高部位,是深层煤岩气富集的有力指向区。东部洼槽带煤岩广泛分布,煤岩成熟度高、厚度大,游离气占比高,可形成连续广覆式分布的深层煤岩气成藏新类型。

3 勘探方向

3.1 资源潜力

前人对呼河湖凹陷煤层气资源进行过多次评估^[42-45],主要以中-浅层的伊敏组和大二段为主,而对凹陷2 000 m埋深以深的南二段深层煤岩气资源仅做了初步评价,可靠性和落实程度低。本次研究对呼河湖凹陷深层煤岩气资源进行初步估算,目的是梳理整个凹陷的深层煤岩气资源潜力与分布,为进一步勘探开发提供参考。由于目前对深层煤岩气尚无相关的资源和储量计算标准,本次研究以呼河湖凹陷已钻井资料为基础,主要依据煤岩厚度、煤岩热演化程度、含煤面积、煤岩密度以及煤岩含气量等资料,采用体积法进

行资源量估算,整体按一个计算单元估算,具体计算公式如下:

$$G=0.01AHDC \quad (1)$$

式中: G 为计算单元的深层煤岩气资源量, 10^8 m^3 ; A 为计算单元的面积, km^2 ; H 为煤岩有效厚度, m ; D 为煤岩密度, t/m^3 ; C 为煤岩空气干燥基含气量, m^3/t 。

计算单元面积依据南二段煤岩累计厚度图范围确定(图3a),取2 324 km^2 ;煤岩有效厚度依据图3a面积权衡煤岩平均厚度确定,取38 m;参考已有钻、测井及分析化验资料,确定南二段煤岩密度,取1.35 t/m^3 ;煤岩空气干燥基含气量依据南二段煤岩的煤阶、 R_o 值和埋深等信息,并结合实测含气量加权平均值确定,取15 m^3/t 。以上各项参数中,由于钻井控制程度较低,采用初步估计值存在一定的误差,需要在今后的工作中逐步修正完善。

依据上述方法,初步估算海拉尔盆地呼河湖凹陷南二段深层煤岩气资源量为1.79 $\times 10^{12} \text{ m}^3$,资源丰度约为7.70 $\times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,属于典型的“小而肥”深层煤岩气资源类型,勘探潜力大^[77-78]。

3.2 勘探方向

上述分析表明,海拉尔盆地呼河湖凹陷发育泥岩和煤岩2套成熟源岩,热演化程度高,生、排烃能力

强,成熟源岩厚度大、分布广,南二段煤岩与南二段-南一段泥岩“双源供烃”,气源充足。发育断陷沼泽化湖盆,聚煤环境优越,有利于富煤。不同构造带构造演化和沉积环境差异导致煤岩厚度、成熟度、煤储层含气性、热演化程度及煤岩煤质差异,从而决定了不同构造带的深层煤岩气赋存条件差异。从缓坡断阶带到洼槽带和陡坡带,深层煤岩气具有连续广覆式成藏、差异富集的含油气系统,进而形成了缓坡断阶带与洼槽带和陡坡带2种不同的深层煤岩气成藏差异和勘探方向^[78-79]。

3.2.1 缓坡断阶带

海拉尔盆地呼和湖凹陷西部缓坡断阶带断裂发育,易于形成构造圈闭和构造-岩性圈闭。煤岩整体埋藏较浅,热演化程度低,有机质成熟度低(图2b);物源供给较充分,总体上以辫状河三角洲平原和辫状河三角洲前缘砂体为主,砂岩发育(图5)。煤岩单层与累计厚度薄(图3a),处于相对“贫煤”区,形成上部厚层砂岩与下部中厚煤岩“砂-煤共生”的结构,具有轻质油薄层与煤岩伴生的特征,发育砂岩-煤岩散气组合(图12c)。煤岩以半亮型和半暗型原生结构煤为主,割理、有机孔较发育,斜交裂隙发育,微裂隙连通有机孔差,气测全烃峰值、游离气含量及占比低,以吸附气为主。南二段-南一段泥岩和南二段煤岩生成的油气通过早期下部断裂体系发生垂向和侧向运移,并与煤岩邻近的上部砂岩优势储层里优先成藏,形成下生上储型构造型油气藏,为西部缓坡断阶带砂岩油气成藏提供了构造条件。目前缓坡断阶带已发现的油气藏均为下生上储型构造油气藏,是构造型和构造-地层型砂岩油气藏最有利的勘探方向。

3.2.2 洼槽带和陡坡带

海拉尔盆地呼和湖凹陷东部洼槽带和陡坡带总体处于大面积沼泽化滨浅湖发育区(图5),大套厚层泥岩与厚层煤岩互层发育,煤-泥共生,顶底板条件优越,埋藏深,洼槽带断裂不发育,易于煤岩大面积广覆式发育,陡坡带局部断裂较发育,易于形成大型宽缓的断背斜型构造圈闭,热演化程度高,有机质成熟度高(图2b),煤岩纵向叠置发育,单层及累计厚度大(图3a),处于相对“富煤”区,发育H7与H18两个富煤中心,易于形成煤岩-泥岩聚气组合(图12a),局部H18井区可形成煤岩-砂岩聚气组合(图12b),煤岩以光亮型煤、半亮型原生结构煤为主,割理裂隙发育,微裂隙沟通有机孔,连通性好,孔-缝体系发育,

气测全烃峰值、含气量高,富游离气,游离气占比可达30%~45%,洼槽带可形成源-储一体的大面积广覆式深层煤岩气藏,陡坡带可形成源-储一体的构造型深层煤岩气藏,是断陷盆地深层煤岩气藏最有利的勘探方向。

因此,洼槽带和陡坡带是呼和湖凹陷深层煤岩气最有利的勘探方向和勘探领域^[80],也是海拉尔盆地断陷深层煤岩气最有利的勘探突破方向,亟需加大对海拉尔盆地断陷深层煤岩气新领域、新类型油气资源的风险探索力度,转变勘探思路与勘探策略,常规-非常规油气勘探并重,实现断陷深层煤岩气勘探大突破,解放呼和湖断陷深层煤岩气万亿方资源,拓展陆相断陷盆地勘探新领域,开辟海拉尔盆地稳油增气的新阵地。

4 结论

1) 呼和湖凹陷煤岩多套叠置发育,发育泥岩及煤岩2套成熟源岩,气源充足,断陷沼泽化湖盆发育,聚煤环境优越,煤岩厚度大。割理裂隙发育,微裂隙沟通有机孔,连通性好,孔-缝体系发育,富游离气,早期断裂体系沟通源岩及煤储层,为深层煤岩气提供了良好的赋存空间和运移通道,预测深层煤岩气资源量 $1.79 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

2) 呼和湖凹陷发育煤岩-泥岩、煤岩-砂岩和砂岩-煤岩3种深层煤岩气聚-散组合,形成构造-地层型和构造型2种深层煤岩气成藏新类型,从缓坡断阶带到洼槽带和陡坡带,深层煤岩气可形成连续广覆式成藏、差异富集的含油气系统,勘探潜力大,将成为断陷盆地重要风险勘探新领域,洼槽带和陡坡带是最有利的勘探方向。

3) 呼和湖凹陷煤岩-砂岩-泥岩交替互层,储层横向变化快,预测难度大,高品质地震资料和高精度测井资料是实现断陷深层煤岩气风险勘探新领域油气勘探突破的关键。

致谢:本文相关认识得到郭绪杰、杨帆、易士威、赵振宇、王居峰、吴财芳、段天宏和李伟等专家的悉心指导与帮助,审稿专家对文章修改提出宝贵意见,谨此表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] 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, et al. Discovery and

- significance of coal measure gas in Junggar Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(6): 38–49.
- [2] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气成藏演化规律与勘探开发实践[J]. *石油学报*, 2023, 44(11): 1764–1780.
- XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Evolution law of deep coalbed methane reservoir formation and exploration and development practice in the eastern margin of Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(11): 1764–1780.
- [3] 陈朝兵, 赵振宇, 付玲, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组6段深水致密砂岩填隙物特征及对储层发育的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1098–1111.
- CHEN Chaobing, ZHAO Zhenyu, FU Ling, et al. Interstitial matter and its impact on reservoir development in Chang 6 deepwater tight sandstone in Huaqing area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1098–1111.
- [4] 侯明才, 何小胡, 金秋月, 等. 琼东南盆地中生代潜山成储主控因素及分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 637–650.
- HOU Mingcai, HE Xiaohu, JIN Qiuyue, et al. Factors controlling the formation and distribution of Mesozoic buried hill reservoirs in the Qiongdongnan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 637–650.
- [5] 刘雨晴, 邓尚, 张荣, 等. 深层火成岩侵入体和相关构造发育特征及其石油地质意义——以塔里木盆地顺北地区为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 105–117.
- LIU Yuqing, DENG Shang, ZHANG Rong, et al. Characterization and petroleum geological significance of deep igneous intrusions and related structures in the Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 105–117.
- [6] 李相博, 王宏波, 黄军平, 等. 鄂尔多斯盆地怀远运动不整合面特征及油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1043–1055.
- LI Xiangbo, WANG Hongbo, HUANG Junping, et al. Characteristics of unconformity resulted from Huaiyuan Movement in Ordos Basin and its significance for oil and gas exploration [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1043–1055.
- [7] 吴裕根, 门相勇, 姜钰. 我国“十四五”煤层气勘探开发新进展与前景展望[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(1): 1–13.
- WU Yugen, MEN Xiangyong, LOU Yu. New progress and prospect of coalbed methane exploration and development in China during the 14th Five-Year Plan period [J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(1): 1–13.
- [8] 徐凤银, 闫霞, 李曙光, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 115–130.
- XU Fengyin, YAN Xia, LI Shuguang, et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 115–130.
- [9] 周德华, 陈刚, 陈贞龙, 等. 中国深层煤层气勘探开发进展、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 CBM in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(6): 43–51.
- [10] 赵景辉. 埋深对深部煤层气储层物性及开发效果的影响——以鄂尔多斯盆地东南缘延川南区块为例[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(3): 62–67.
- ZHAO Jinghui. Effect of burial depth on reservoir petrophysical properties and development performance of deep coalbed methane reservoirs: A case of Yanchuannan Block in southeastern margin of Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(3): 62–67.
- [11] 徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 1–14.
- XU Fengyin, YAN Xia, LIN Zhenpan, et al. Research progress and development direction of key technologies for efficient coalbed methane development in China [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 1–14.
- [12] 孙钦平, 赵群, 姜馨淳, 等. 新形势下中国煤层气勘探开发前景与对策思考[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 65–76.
- SUN Qinpeng, ZHAO Qun, JIANG Xinchun, et al. Prospects and strategies of CBM exploration and development in China under the new situation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 65–76.
- [13] 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 深部(层)煤层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.
- [14] 何治亮, 聂海宽, 李双建, 等. 特提斯域板块构造约束下上扬子地区二叠系龙潭组页岩气的差异性赋存[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(1): 1–15.
- HE Zhiliang, NIE Haikuan, LI Shuangjian, et al. Differential occurrence of shale gas in the Permian Longtan Formation of Upper Yangtze region constrained by plate tectonics in the Tethyan domain [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 1–15.
- [15] 陈学海, 薛海涛, 卢双舫, 等. 呼和湖凹陷南屯组二段煤系层序特征及其聚煤规律研究[J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 268–276.
- CHEN Xuehai, XUE Haitao, LU Shuangfang, et al. Sequence stratigraphy and coal accumulation law of the 2nd member of the Nantun Formation coal measures in the Huhehu Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 268–276.
- [16] 王小军, 蒙启安, 李跃, 等. 海拉尔盆地油气勘探开发新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 99–114.

- WANG Xiaojun, MENG Qi'an, LI Yue, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration and development in Hailaer Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 99-114.
- [17] 李春柏. 海拉尔盆地油气勘探历程与启示[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(3): 374-380.
- LI Chunbai. Petroleum exploration history and enlightenment in Hailaer Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(3): 374-380.
- [18] 吴河勇, 李子顺, 冯子辉, 等. 海拉尔盆地乌尔逊-贝尔凹陷构造特征与油气成藏过程分析[J]. *石油学报*, 2006, 27(增刊1): 1-6.
- WU Heyong, LI Zishun, FENG Zihui, et al. Analysis on structural features and reservoir-forming process of Wuerxun and Beier sags in Hailaer Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(S1): 1-6.
- [19] 侯启军, 冯子辉, 霍秋立. 海拉尔盆地乌尔逊凹陷石油运移模式与成藏期[J]. *地球科学*, 2004, 29(4): 397-403.
- HOU Qijun, FENG Zihui, HUO Qiuli. Oil migration model and entrapment Epoch of North Wuerxun Depression in Hailaer Basin [J]. *Earth Science*, 2004, 29(4): 397-403.
- [20] 李军辉. 海拉尔盆地呼和湖凹陷下白垩统层序构成样式及油气成藏模式[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(4): 961-969.
- LI Junhui. Sequence architecture pattern and pool-forming pattern of Lower Cretaceous in Huhehu Depression [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(4): 961-969.
- [21] 郭彪, 邵龙义, 张强, 等. 内蒙古海拉尔盆地早白垩世含煤岩系层序地层与聚煤规律[J]. *古地理学报*, 2014, 16(5): 631-640.
- GUO Biao, SHAO Longyi, ZHANG Qiang, et al. Sequence stratigraphy and coal accumulation pattern of the Early Cretaceous coal measures in Hailaer Basin, Inner Mongolia [J]. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 2014, 16(5): 631-640.
- [22] 陈浩. 呼和湖凹陷南部南屯组高分辨层序与聚煤规律[J]. *大庆石油地质与开发*, 2013, 32(4): 15-19.
- CHEN Hao. High-resolution sequences and coal accumulating laws in Nantun Formation of Huhe lake sag [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2013, 32(4): 15-19.
- [23] 刘秋宏. 海拉尔盆地呼和湖凹陷下白垩统成煤环境[J]. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(4): 38-43.
- LIU QiuHong. Lower Cretaceous coal-forming environment in Huhehu Depression in Hailaer Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2017, 45(4): 38-43.
- [24] 曹瑞成, 王伟明, 尚教辉, 等. 应用层序地层地球化学方法研究呼和湖凹陷烃源岩[J]. *大庆石油学院学报*, 2010, 34(4): 18-22.
- CAO Ruicheng, WANG Weiming, SHANG Jiaohui, et al. Research into hydrocarbon source rocks in Huhehu depression by application of sequence stratigraphic geochemistry method [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 34(4): 18-22.
- [25] 吴海波, 李军辉. 层序地层地球化学在海拉尔盆地呼和湖凹陷烃源岩评价中的应用[J]. *地质学报*, 2012, 86(4): 661-670.
- WU Haibo, LI Junhui. Sequence stratigraphic geochemistry and its application to the evaluation of source rocks of Huhehu Sag in Hailaer Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(4): 661-670.
- [26] 刘晓艳, 卢双舫, 衣英杰. 海拉尔盆地煤及煤系泥岩生排烃定量评价[J]. *煤田地质与勘探*, 2000, 28(6): 17-20.
- LIU Xiaoyan, LU Shuangfang, YI Yingjie. Quantitative evaluation of hydrocarbon generation and expulsion in coal bearing measures in Hailaer Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2000, 28(6): 17-20.
- [27] 张帆. 呼和湖凹陷中低煤阶煤系烃源岩地球化学特征及生烃潜力评价[J]. *天然气勘探与开发*, 2014, 37(2): 19-23.
- ZHANG Fan. Geochemical characteristics and hydrocarbon-generating potential of coal-bearing source rock with middle to low coal rank, Huhehu Depression [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2014, 37(2): 19-23.
- [28] 曹瑞成, 李军辉, 卢双舫, 等. 海拉尔盆地呼和湖凹陷白垩系层序地层特征及沉积演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(3): 535-541.
- CAO Ruicheng, LI Junhui, LU Shuangfang, et al. Sequence stratigraphic character and sedimentary evolution in Cretaceous in Huhehu Depression in Hailaer Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2010, 40(3): 535-541.
- [29] 曹瑞成, 李军辉, 卢双舫, 等. 海拉尔盆地呼和湖凹陷白垩系层序地层特征及沉积体系分布[J]. *地层学杂志*, 2011, 35(2): 139-146.
- CAO Ruicheng, LI Junhui, LU Shuangfang, et al. Cretaceous sequence stratigraphy and sedimentary system in Huhehu Depression, Hailaer Basin [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2011, 35(2): 139-146.
- [30] 刘秋宏, 卢双舫, 李军辉, 等. 海拉尔盆地呼和湖凹陷南屯组层序地层与沉积体系分析[J]. *沉积学报*, 2010, 28(2): 227-234.
- LIU QiuHong, LU Shuangfang, LI Junhui, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary system analysis of Nantun Group in Huhehu Depression in Hailaer Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 227-234.
- [31] 胡寿梅, 卢双舫, 李军辉, 等. 呼和湖凹陷断裂特征及其对油气成藏的影响[J]. *地质科学*, 2010, 45(4): 1180-1190.
- HU Shoumei, LU Shuangfang, LI Junhui, et al. Characteristics of fault and its impacts on hydrocarbon accumulation in Huhehu Depression [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2010, 45(4): 1180-1190.
- [32] 李军辉, 卢双舫, 蒙启安, 等. 海拉尔盆地呼和湖凹陷断裂形成演化及其对油气的控制作用[J]. *地质科学*, 2011, 46(4): 929-941.
- LI Junhui, LU Shuangfang, MENG Qian, et al. Tectonic evolution and its controlling on hydrocarbon of Huhehu Depression in Hailaer Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2011, 46(4): 929-941.

- 929-941.
- [33] 王培俊, 钟建华, 牛永斌. 海拉尔盆地呼和湖凹陷构造特征与演化[J]. 特种油气藏, 2009, 16(5): 25-27.
WANG Peijun, ZHONG Jianhua, NIU Yongbin. Tectonic feature and evolution of Huhehu Depression in Hailar Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2009, 16(5): 25-27.
- [34] 刘志文. 海拉尔盆地呼和湖凹陷致密砂岩气成藏特征[J]. 世界地质, 2016, 35(3): 831-839.
LIU Zhiwen. Accumulation characteristics of tight sandstone gas in Huhehu Depression of Hailar Basin [J]. Global Geology, 2016, 35(3): 831-839.
- [35] 崔军平, 任战利, 肖晖. 海拉尔盆地呼和湖凹陷热演化史与油气关系[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 522-527.
CUI Junping, REN Zhanli, XIAO Hui. Relations between the thermal history and petroleum generation in the Huh Lake Depression, Hailar Basin [J]. Geology in China, 2007, 34(3): 522-527.
- [36] 刘志文. 海拉尔盆地呼和湖凹陷南屯组油气成藏期次分析[J]. 西部探矿工程, 2019, 31(8): 73-76.
LIU Zhiwen. Hydrocarbon accumulation stages of Nantun Formation in Huhehu Sag, Hailar Basin [J]. West-China Exploration Engineering, 2019, 31(8): 73-76.
- [37] 董立, 王伟明, 余学兵, 等. 海拉尔盆地呼和湖凹陷南屯组油气成藏期次研究[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 20-23.
DONG Li, WANG Weiming, YU Xuebing, et al. Study on hydrocarbon accumulation stages in Nantun Formation, Huhehu Depression, Hailar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(3): 20-23.
- [38] 鹿坤, 侯读杰, 洪海峰, 等. 呼和湖凹陷原油地球化学特征及油源对比[J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(1): 28-32.
LU Kun, HOU Dujie, HONG Haifeng, et al. Geochemical characteristics of crude oil and correlation of oil source in Huhehu Sag [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2010, 30(1): 28-32.
- [39] 申文静. 海拉尔盆地呼和湖凹陷和10井天然气地球化学特征及成因分析[J]. 天然气勘探与开发, 2010, 33(3): 22-25.
SHEN Wenjing. Geochemical characteristics and the origin of gas from He 10 Well, Huhehu Depression in Hailar Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2010, 33(3): 22-25.
- [40] 陈学海, 卢双舫, 薛海涛, 等. 海拉尔盆地呼和湖凹陷白垩系地震相[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 321-327, 335.
CHEN Xuehai, LU Shuangfang, XUE Haitao, et al. Seismic facies of the Cretaceous in the Huhehu Depression, Hailar Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(3): 321-327, 335.
- [41] 关大伟. 海拉尔呼和湖凹陷和10井天然气成因类型评价[J]. 当代化工, 2014, 43(11): 2291-2292, 2296.
GUAN Dawei. Evaluation on natural gas genetic types of He10 well in Huhehu Depression of Hailar [J]. Contemporary Chemical Industry, 2014, 43(11): 2291-2292, 2296.
- [42] 杨子荣, 张艳飞, 姚远. 海拉尔盆地呼和湖凹陷煤层气资源潜力分析[J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(2): 15-18.
YANG Zirong, ZHANG Yanfei, YAO Yuan. Potential analysis of coalbed gas resources in Huhehu Depression, Hailar Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(2): 15-18.
- [43] 慕喜文, 曲国娜. 海拉尔盆地呼和湖凹陷煤层气储量预测[J]. 西部探矿工程, 2010, 22(11): 169-170, 172.
MU Xiwen, QU Guona. Prediction of coalbed methane reserves in Huhehu Depression, Hailar Basin [J]. West-China Exploration Engineering, 2010, 22(11): 169-170, 172.
- [44] 冯翠荣, 马海军, 李彦朋. 呼和湖凹陷煤层气地质条件及资源潜力分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(26): 17-24.
FENG Cuirong, MA Haijun, LI Yanpeng. Geological conditions and resource potential analysis of coalbed methane in the Huhehu Depression [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(26): 17-24.
- [45] 曲国娜, 滕玉洪. 呼和湖凹陷煤层气储量及有利勘探区预测[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(增刊1): 68-69.
QU Guona, TENG Yuhong. Forecasting coalbed gas' s reserve and favorable exploration plot in Huhehu Depression [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2009, 28(S1): 68-69.
- [46] 马文娟. 海拉尔盆地呼和湖凹陷大二段低煤阶煤层气成藏条件及有利勘探区预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(1): 33-40.
MA Wenjuan. Accumulation conditions and favorable exploration areas prediction of lowrank coalbed methane in Member K₁d₂ of Huhehu Sag in Hailar Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(1): 33-40.
- [47] 李松, 毛小平, 汤达祯, 等. 海拉尔盆地呼和湖凹陷煤成气资源潜力评价[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1350-1358.
LI Song, MAO Xiaoping, TANG Dazhen, et al. Resource assessment of coal-derived gas in Huhehu Depression, Hailar Basin [J]. Geology in China, 2009, 36(6): 1350-1358.
- [48] 叶玥豪, 陈伟, 汪华, 等. 四川盆地上二叠统大隆组页岩储层特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 979-991.
YE Yuehao, CHEN Wei, WANG Hua, et al. Characteristics and determinants of shale reservoirs in the Upper Permian Dalong Formation, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 979-991.
- [49] 范建平, 宋金民, 江青春, 等. 川东地区中二叠统茅口组一段储层特征与形成模式[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1413-1430.
FAN Jianping, SONG Jinmin, JIANG Qingchun, et al. Reservoir characteristics and development model of the Middle Permian Mao-1 Member in eastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(6): 1413-1430.
- [50] 唐勇, 宋永, 何文军, 等. 准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 132-148.

- TANG Yong, SONG Yong, HE Wenjun, et al. Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin, Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 132-148.
- [51] 陈均亮, 吴河勇, 朱德丰, 等. 海拉尔盆地构造演化及油气勘探前景[J]. *地质科学*, 2007, 42(1): 147-159.
- CHEN Junliang, WU Heyong, ZHU Defeng, et al. Tectonic evolution of the Hailar Basin and its potentials of oil-gas exploration [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42 (1) : 147-159.
- [52] 冯志强, 任延广, 张晓东, 等. 海拉尔盆地油气分布规律及下一步勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 2004, 9(4): 19-22.
- FENG Zhiqiang, REN Yanguang, ZHANG Xiaodong, et al. Law of oil and gas distribution in Hailaer Basin and orientation for exploration at next stage[J]. *China Petroleum Exploration*, 2004, 9(4): 19-22.
- [53] 冯志强, 张晓东, 任延广, 等. 海拉尔盆地油气成藏特征及分布规律[J]. *大庆石油地质与开发*, 2004, 23(5): 16-19.
- FENG Zhiqiang, ZHANG Xiaodong, REN Yanguang, et al. Hydrocarbon reservoir forming characteristics and distribution rule of Hailar Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2004, 23(5): 16-19.
- [54] 陈守田, 刘招君, 崔凤林, 等. 海拉尔盆地含油气系统[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2002, 32(2): 151-154.
- CHEN Shoutian, LIU Zhaojun, CUI Fenglin, et al. Oil-gas bearing system of Hailaer Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2002, 32(2): 151-154.
- [55] 陈智远, 徐志星, 徐国盛, 等. 东海盆地西湖凹陷中央反转构造带异常高压与油气成藏的耦合关系[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(3): 570-581.
- CHEN Zhiyuan, XU Zhixing, XU Guosheng, et al. Coupling relationship between abnormal overpressure and hydrocarbon accumulation in a central overturned structural belt, Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38 (3) : 570-581.
- [56] 何治亮, 杨鑫, 高键, 等. 特提斯洋与古亚洲洋协同演化控制下的塔里木盆地油气富集效应[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(3): 637-657.
- HE Zhiliang, YANG Xin, GAO Jian, et al. Hydrocarbon enrichment effects in the non-foreland area of the Tarim Basin under the coevolution control of the Tethys and Paleo-Asian oceans [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(3): 637-657.
- [57] 张宝收, 张本健, 汪华, 等. 四川盆地金秋气田: 一个典型以中生界沉积岩为氮源岩的含氮-富氮气田[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 185-199.
- ZHANG Baoshou, ZHANG Benjian, WANG Hua, et al. The Jinqiu Gas Field in the Sichuan Basin: A typical helium-bearing to helium-rich gas field with the Mesozoic sedimentary rocks as helium source rocks[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 185-199.
- [58] 王冠民, 庞小军, 黄晓波, 等. 渤海海域辽中凹陷南部古近系东营组三段重力流砂岩优质储层特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 81-95.
- WANG Guanmin, PANG Xiaojun, HUANG Xiaobo, et al. Characteristics and origin of high-quality gravity-flow sandstone reservoirs in the 3rd member of the Dongying Formation, southern Liaozhong Sag, Bohai Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 81-95.
- [59] 胡国艺, 李剑, 李谨, 等. 判识天然气成因的轻烃指标探讨[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2007, 37(增刊2): 111-117.
- HU Guoyi, LI Jian, LI Jin, et al. Discussion on light hydrocarbon index to identify the origin of natural gas[J]. *Science China Earth Sciences*, 2007, 37(S2): 111-117.
- [60] 吴涛涛, 赵靖舟, 蒙启安, 等. 松辽盆地齐家地区高台子油层致密砂岩油成藏机理[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1376-1388.
- WU Weitao, ZHAO Jingzhou, MENG Qi'an, et al. Accumulation mechanism of tight sandstone oil in Gaotaizi reservoir in Qijia area, Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42 (6) : 1376-1388.
- [61] 张功成, 陈莹, 李增学, 等. 中国海域煤型油气成因理论[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 553-565.
- ZHANG Gongcheng, CHEN Ying, LI Zengxue, et al. Theory on genesis of coaliferous petroleum in the China Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 553-565.
- [62] 范立勇, 史云鹤, 董国栋, 等. 鄂尔多斯盆地中东部二叠系山西组深层煤岩地球化学特征及成煤环境[J]. *天然气工业*, 2024, 44(10): 113-125.
- FAN Liyong, SHI Yunhe, DONG Guodong, et al. Geochemical characteristics and coal-forming environments of deep coal rocks of Permian Shanxi Formation in central and eastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(10): 113-125.
- [63] 吴海波, 李军辉, 刘赫. 海拉尔盆地呼和湖凹陷南屯组构造坡折带类型及其对砂体和油气的控制[J]. *沉积学报*, 2013, 31(2): 358-365.
- WU Haibo, LI Junhui, LIU He. Types of structural slope-break zone and its controls on sand bodies and hydrocarbon of Huhehu Depression in Hailar Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(2): 358-365.
- [64] 任朝波, 李军辉. 海拉尔盆地呼和湖凹陷南屯组物源体系分析[J]. *油气藏评价与开发*, 2014, 4(1): 33-38.
- REN Chaobo, LI Junhui. Provenance system analysis of Nantun Formation of Huhehu Depression in Hailar Basin [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2014, 4(1): 33-38.
- [65] 李彬, 邱峰, 张晓洲, 等. 二连盆地巴彦宝力格煤田伊敏组低煤阶煤层气成藏条件及有利区预测[J]. *大庆石油地质与开发*, 2023, 42(4): 20-29.
- LI Bin, QIU Feng, ZHANG Xiaozhou, et al. Accumulation conditions and favorable areas prediction of low-rank CBM in Yimin Formation of Bayanbaolige coalfield in Erlian Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42 (4): 20-29.
- [66] 李伟, 申建, 李超, 等. 沁水盆地榆社-武乡区块深部煤层气赋存条件及开发甜点预测[J]. *大庆石油地质与开发*, 2023, 42

- (4): 9-19.
- LI Wei, SHEN Jian, LI Chao, et al. Occurrence conditions and development sweet spots prediction of deep coalbed methane in Yushe-Wuxiang block of Qinshui Basin [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(4): 9-19.
- [67] 李勇, 徐凤银, 唐书恒, 等. 鄂尔多斯盆地煤层(岩)气勘探开发进展及发展方向[J]. *天然气工业*, 2024, 44(10): 63-79.
- LI Yong, XU Fengyin, TANG Shuheng, et al. Progress and development direction of coalbed methane (coal-rock gas) exploration and development in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(10): 63-79.
- [68] 刘新社, 黄道军, 虎建玲, 等. 鄂尔多斯盆地中东部地区石炭系本溪组煤岩气储层特征[J]. *天然气工业*, 2024, 44(10): 51-62.
- LIU Xinshe, HUANG Daojun, HU Jianling, et al. Reservoir characteristics of Carboniferous Benxi Formation coal-rock gas in the central and eastern Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(10): 51-62.
- [69] 杨正明, 张亚蒲, 李海波, 等. 核磁共振技术在非常规油气藏的应用基础[J]. *地球科学*, 2017, 42(8): 1333-1339.
- YANG Zhengming, ZHANG Yapu, LI Haibo, et al. Application basis of nuclear magnetic resonance technology in the unconventional reservoirs [J]. *Earth Science*, 2017, 42(8): 1333-1339.
- [70] 陆韬杰, 胥蕊娜, 姜培学. 基于低场核磁共振的煤粉动态吸附测量[J]. *化工学报*, 2020, 71(增刊2): 195-200.
- LU Taojie, XU Ruina, JIANG Peixue. Dynamic adsorption measurement of coal particles based on low field NMR [J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(S2): 195-200.
- [71] 彭真, 金武军. 基于核磁共振测量的页岩气游离吸附比例关系确定——以涪陵页岩气储层为例[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(29): 227-232.
- PENG Zhen, JIN Wujun. Determination of proportion of shale free gas and absorbed based on NMR measurements——Taking Fuling shale formation as an example [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(29): 227-232.
- [72] 孙建孟, 刘海山, 宗成林, 等. 利用核磁共振技术评价煤层吸附能力[J]. *测井技术*, 2017, 41(6): 691-695.
- SUN Jianmeng, LIU Haishan, ZONG Chenglin, et al. Evaluation on absorption capacity of coal by NMR [J]. *Well Logging Technology*, 2017, 41(6): 691-695.
- [73] 李军, 武清钊, 路菁, 等. 利用核磁共振技术确定页岩中游离甲烷气与吸附甲烷气含量[J]. *测井技术*, 2018, 42(3): 315-320.
- LI Jun, WU Qingzhao, LU Jing, et al. To quantitatively determine the adsorption and free methane volume content in shale gas core based on NMR technique [J]. *Well Logging Technology*, 2018, 42(3): 315-320.
- [74] 刘佳佳, 贾改妮, 陈守奇, 等. 深部低阶煤瓦斯吸附特性核磁共振试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(9): 68-73.
- LIU Jiajia, JIA Gaini, CHEN Shouqi, et al. Nuclear magnetic resonance experimental study on gas adsorption characteristics of deep low rank coal [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(9): 68-73.
- [75] 端祥刚, 胡志明, 顾兆斌, 等. 应用核磁共振在线检测技术研究不同赋存状态下的页岩气动用规律[J]. *天然气工业*, 2021, 41(5): 76-83.
- DUAN Xianggang, HU Zhiming, GU Zhaobin, et al. Study on the production laws of shale gas in different occurrence states in the use of NMR online detection technology [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(5): 76-83.
- [76] 赵喆, 徐旺林, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 234-247, 259.
- ZHAO Zhe, XU Wanglin, ZHAO Zhenyu, et al. Geological characteristics and exploration breakthroughs of coal rock gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 234-247, 259.
- [77] 文龙, 罗冰, 孙豪飞, 等. 四川盆地上二叠统龙潭组深层煤岩气成藏地质特征及资源潜力[J]. *天然气工业*, 2024, 44(10): 22-32.
- WEN Long, LUO Bing, SUN Haoqi, et al. Geological characteristics and resources potential of deep coal-rock gas reservoir in the Upper Permian Longtan Formation of the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(10): 22-32.
- [78] 王小军, 李敬生, 李军辉, 等. 大庆油田油气勘探进展及方向[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43(3): 26-37.
- WANG Xiaojun, LI Jingsheng, LI Junhui, et al. Oil and gas exploration progress and direction of Daqing Oilfield [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(3): 26-37.
- [79] 牛小兵, 喻健, 徐旺林, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界煤岩气成藏地质条件及勘探方向[J]. *天然气工业*, 2024, 44(10): 33-50.
- NIU Xiaobing, YU Jian, XU Wanglin, et al. Reservoir-forming geological conditions and exploration directions of Upper Paleozoic coal-rock gas in the Ordos Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(10): 33-50.
- [80] 赵喆, 杨威, 赵振宇, 等. 中国煤成气地质理论研究进展与重点勘探领域[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(6): 1240-1253.
- ZHAO Zhe, YANG Wei, ZHAO Zhenyu, et al. Research progresses in geological theory and key exploration areas of coal-formed gas in China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(6): 1240-1253.

(编辑 张玉银)