

2-25-2024

Geological characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Wangfu fault depression, southern Songliao Basin

SHEN Xia

Research Institute of Exploration and Development, Jilin Oilfield Company, Songyuan 131200, China, shenx-01@petrochina.com.cn

GONG Haitao

School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China, h1876715189@163.com

SHAO Mingli

Research Institute of Exploration and Development, Jilin Oilfield Company, Songyuan 131200, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

Recommended Citation

SHEN Xia, GONG Haitao, SHAO Mingli, et al. (2024) "Geological characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Wangfu fault depression, southern Songliao Basin," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 52: Iss. 2, Article 13.

DOI: 10.12363/issn.1001-1986.23.08.0517

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol52/iss2/13>

This Foundational Theory and Evaluation is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact 380940179@qq.com.

Geological characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Wangfu fault depression, southern Songliao Basin

Authors

SHEN Xia, GONG Haitao, SHAO Mingli, YANG Minfang, and HUO Wanguo



移动阅读

沈霞, 公海涛, 邵明礼, 等. 松辽盆地南部王府断陷深部煤层气地质特征及有利区评价[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(2): 113–121. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.08.0517

SHEN Xia, GONG Haitao, SHAO Mingli, et al. Geological characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Wangfu fault depression, southern Songliao Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(2): 113–121. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.08.0517

松辽盆地南部王府断陷深部煤层气地质特征及 有利区评价

沈霞¹, 公海涛^{2,*}, 邵明礼¹, 杨敏芳³, 霍万国⁴

(1. 吉林油田勘探开发研究院, 吉林 松原 131200; 2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083;
3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石油渤海钻探井下作业公司, 河北 廊坊 065007)

摘要: 松辽盆地南部王府断陷煤层气资源量丰富, 但深部煤层气勘探程度较低, 在煤层气地质特征、富集成藏主控因素及有利目标优选等方面缺乏系统研究, 制约了该区煤层气勘探进程。为此, 在系统分析煤系地质特征的基础上, 明确深部煤层气成藏主控因素, 建立有利区优选指标体系, 预测煤层气富集有利区。结果表明: (1) 王府断陷火石岭组宏观煤岩类型以光亮煤、半亮煤为主, 具有低水分、低挥发分、低灰分的特征, 镜质体最大反射率大于 1.8%, 孔隙率平均 5.01%, CS38 井计算的平均含气量为 21.80 m³/t。(2) 王府断陷火石岭组火山喷发填平补齐沉积环境利于煤层发育, 煤层主要发育于断陷双陡坡带之间与断陷中、东部的火山喷发的填平补齐效应形成的浅水区, 形成了“填平补齐成煤模式”。此外, 区内发育的大面积巨厚泥岩顶板与封闭断层使得煤层气得以富集保存。(3) 王府断陷 I 类有利区主要发育在断陷中部, 煤层厚度大于 5 m, 断层断距 < 50 m, 盖层厚度 > 80 m, 气测全烃值 > 15%, 具有较大勘探开发潜力; II、III 类有利区主要发育在断陷的北部和南部, 煤层厚度一般 < 5 m, 盖层厚度 < 80 m, 气测全烃值 < 15%, 断层封闭性弱或不封闭, 盖层厚度差异大, 勘探开发风险较大。

关键词: 松辽盆地; 王府断陷; 深部煤层气; 地质特征; 有利区评价

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)02-0113-09

Geological characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Wangfu fault depression, southern Songliao Basin

SHEN Xia¹, GONG Haitao^{2,*}, SHAO Mingli¹, YANG Minfang³, HUO Wanguo⁴

(1. Research Institute of Exploration and Development, Jilin Oilfield Company, Songyuan 131200, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 4. PetroChina Bohai Drilling Downhole Operation Company, Langfang 065007, China)

Abstract: The Wangfu fault depression in the southern Songliao Basin is rich in coalbed methane (CBM) resources. However, CBM exploration in this area has been restricted by the low-level exploration of deep CBM and a lack of systematic studies on the geological characteristics of CBM, primary factors controlling CBM enrichment and accumulation, and the selection of favorable targets. Therefore, based on the systematical analysis of the geological characteristics of coal-bearing strata, this study identified the major factors controlling deep CBM accumulation, established the index system for favorable area selection, and predicted the favorable areas of CBM enrichment. The results show that: (1) Macroscopically, coals in the Huoshiling Formation in the Wangfu fault depression can be primarily categorized into

收稿日期: 2023-08-29; 接收日期: 2024-01-30

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项项目(2023ZZ18)

第一作者: 沈霞, 1982 年生, 女, 湖北黄冈人, 高级工程师, 从事勘探地质综合研究工作. E-mail: shenx-01@petrochina.com.cn

*通信作者: 公海涛, 1996 年生, 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向为地质工程. E-mail: h1876715189@163.com

bright and semi-bright coals, possessing the characteristics of low moisture, low volatile constituents, and low ash content. They exhibit vitrinite reflectance > 1.8%, average porosity of 5.01%, and average gas content of 21.80 m³/t (calculated based on well CS38). (2) The sedimentary environment, filled and leveled through volcanic eruption, of the Huoshiling Formation in the Wangfu fault depression is conducive to the formation of coal seams. Specifically, coal seams primarily occur between the double steep slope zones and in the shallow water areas of the central and eastern Wangfu fault depression, which were formed by the filling and leveling effects of volcanic eruption. In this manner, the coal formation mode featuring filling and leveling is formed. Additionally, the presence of large-area thick mudstone roofs and closed faults allow for CBM enrichment and preservation in the fault depression. (3) Class I favorable areas in the Wangfu fault depression predominantly occur in the northern and central parts of the fault depression, with coal seam thicknesses > 5m, fault throw < 50 m, cover thicknesses > 80 m, and gas logging-derived total hydrocarbon values > 15%. These suggest great potential for exploration and exploitation. Classes II and III favorable areas are mainly found in the northern and southern parts of the fault depression, with coal seam thicknesses < 5m, cover thicknesses < 80 m, and gas logging-derived total hydrocarbon values < 15%. Weak-sealing or open faults and greatly different cover thicknesses pose risks to CBM exploration and exploitation in these areas.

Keywords: Songliao Basin; Wangfu fault depression; deep coalbed methane; geological characteristic; favorable area evaluation

我国深部煤层气资源丰富, 全国第四轮煤层气资源评价结果显示, 我国埋深在 2 000 m 以浅的煤层气资源量 $29.82 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1-2], 2 000 m 以深煤层气资源量 $40.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[3-4]。近年来, 国内 2 000 m 以深煤层气勘探开发不断取得突破, 2005 年, 新疆油田在 2 500 m 深层煤层段试气, 日产气量达 7 000 m³。2018 年, 华北地区大城凸起大平 7 井煤层埋深超过 1 900 m, 日产气量超过 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 为我国第一口深部煤层气水平井。2019 年以来, 鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县区块吉深 6-7 平 01 水平井, 日产气量达 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[5-7], 成为我国首个突破 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的煤层气井, 目前 29 口先导试验水平井前 3 个月平均单井日产气量超过 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。鄂尔多斯盆地佳县南区块 JN1H 井和 JM2H 井相继获得最高日产气量 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $12.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 盆地腹部纳林河地区 NL1H 井煤层埋深 3 250 m, 初期日产气量突破 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 是首口煤层埋深超过 3 000 m 的高产井。准噶尔盆地东部白家海凸起彩探 1H 水平井最高日产气量超过 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 稳定日产气量 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$, 深部煤层气勘探均取得突破^[8-9], 以上表明我国深部煤层气勘探开发呈现可喜的发展形势。

松辽盆地南部王府断陷发育有白垩系火石岭组、沙河子组、营城组 3 套含煤地层, 厚煤层主要发育于火石岭组顶部, 煤层埋深普遍大于 2 000 m, 是目前深部煤层气的有利勘探区带。但前期主要针对中浅层致密气和火山岩气藏开展研究^[10-12], 深部煤层气勘探程度较低, 无含气量实测资料, 在煤层气地质特征、富集成藏主控因素及有利区优选等方面缺乏系统研究, 有利勘探方向不明, 制约了该区煤层气勘探进程。为此, 在梳理松辽盆地南部王府断陷煤层气地质特征的基础上, 通过系统评价煤层分布、盖层特征、断层封闭性等关键地质

条件, 明确深部煤层气成藏主控因素, 建立有利区优选指标体系, 优选深部煤层气富集有利区, 优选勘探有利区, 以促进研究区深部煤层气的勘探开发进程。

1 煤层气地质特征

1.1 含煤地层特征

1.1.1 充填演化史

白垩纪初期, 松辽盆地发生大规模火山喷发和断裂活动, 形成诸多小型的地堑或半地堑, 这些地堑中沉积了以火山岩、火山碎屑岩、碎屑岩为主的火石岭组, 此后受燕山运动第 II、第 III 幕影响, 强烈的隆起作用造成区域性拉张破裂, 派生出一系列 NNW 向的张性断裂, 形成“东断西超”的箕状断陷构造格局, 断陷内沉积了多套沉积旋回的碎屑岩层系, 构成了巨厚的沙河子组与营城组^[13]。其中, 王府断陷火石岭组岩性主要为下部大套中性火山岩, 中部大套泥岩和砂砾岩、火山角砾岩、凝灰岩互层, 上部为泥岩、流纹质火山岩, 顶部煤层。沙河子组时期由于盆地快速沉降, 水体快速变深, 早期火山岩在风化作用下转而成为沉积物质重要来源, 加上新喷出火山物质的不断加入, 沉积了一套深湖—半深湖相背景下的扇三角洲、火山沉积相地层^[14], 其岩性主要为底部泥岩, 局部地区为沉火山角砾岩, 中部为深灰色、黑色泥岩, 上部为灰色砂砾岩与深灰色泥岩互层。营城组沉积组合特征对沙河子组有较强的继承性, 主要发育滨浅湖相沉积^[15], 岩性主要为灰色砾岩、砂砾岩夹灰色泥岩。研究区白垩系为主要煤层气赋存层位。

1.1.2 主力煤层特征

钻井揭示, 王府断陷营城组煤层不发育, 沙河子组不发育厚煤层, 火石岭组顶部煤层在研究区广泛分布, 发育稳定, 煤层埋深普遍大于 2 000 m, 为典型的深部

煤层,煤层单层厚度大且分布稳定,以单层煤为主。厚煤层主要发育在断陷中部,变化均匀,单层厚度 1~12 m,

平均厚度 6 m,整体上呈现出中部厚、南北薄的特征(图 1)。

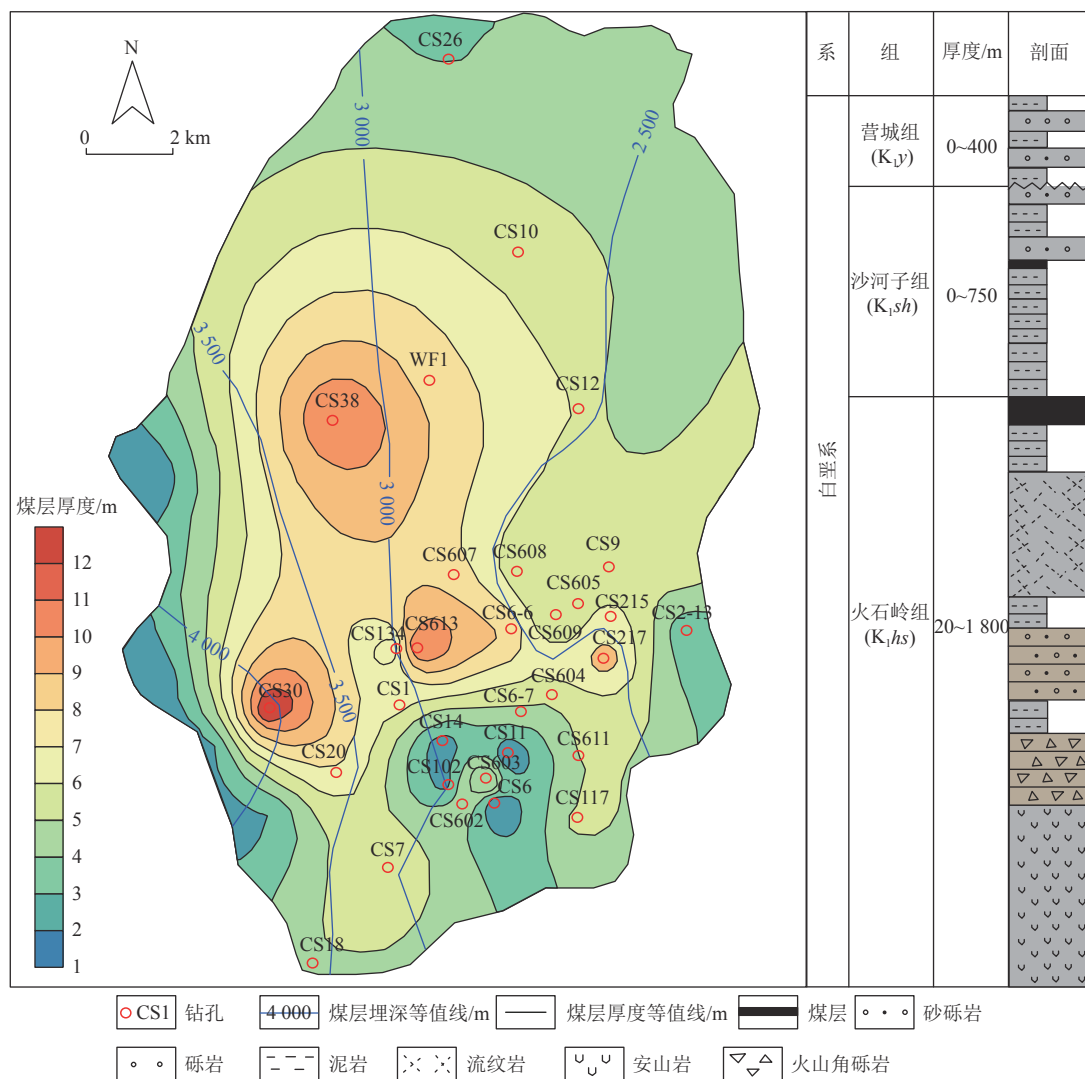


图 1 王府断陷火石岭组煤层厚度分布与地层综合柱状图

Fig.1 Isopach map of coal seams and composite stratigraphic column of the Huoshiling Formation in the Wangfu fault depression

1.2 煤储层特征

1.2.1 煤质特征

王府断陷火石岭组煤的宏观煤岩类型以光亮煤、半亮煤为主,煤体结构好。煤的有机显微组分具有高镜质组、低惰质组、未见壳质组的特征。镜质组体积分数一般可达 90% 及以上,惰质组体积分数一般低于 10%。断陷内煤层埋深普遍大于 2 000 m,煤的镜质体最大反射率(R_{max}) 介于 1.97%~2.29%,处于瘦煤—贫煤阶段。当 $R_{max} \leq 3\%$ 时,煤的热演化程度越高,煤层生成甲烷量及吸附量就越大^[16],预示着王府断陷深部煤层应具备较大生烃潜力。煤中水分(M_{ad}) 质量分数为 0.82%~0.99%,平均 0.92%,属特低水分煤;挥发分(V_{dat}) 产率为 3.89%~19.03%,平均 11.05%,属特低挥发分—低挥发分煤,少量中等挥发分煤;灰分(A_d) 质量分数介于 3.85%~

18.85%,平均 10.94%,属于特低灰—低灰煤,少量中灰煤(表 1)。在通常情况下,低水分、低挥发分、低灰分的煤,其吸附能力相对较强^[17]。

1.2.2 物性特征

煤层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,而且也决定着煤层气的富集及产能^[18]。按照 SY/T 5336—2006《岩心分析方法》,测定王府断陷煤孔隙率介于 4.06%~5.71%,平均 5.01%,属于低孔隙率储层。本文采用霍多特提出的煤孔隙划分方法^[19],将煤孔径划分为微孔(<10 nm)、小孔(10~100 nm)、中孔(100~1 000 nm)和大孔(>1 000 nm)。对研究区样品进行低温氮气吸附实验,根据研究区煤吸附、脱附曲线特征,将研究区煤孔隙结构分为 2 种类型。类型 I 如图 2a 所示,吸附曲线与脱附曲线基本重合,脱附

表 1 松辽盆地王府断陷火石岭组煤层地质特征

Table 1 Geological characteristics of coal seams in the Huoshiling Formation in the Wangfu fault depression, Songliao Basin

样品编号	去矿物基 显微组分体积/%		工业分析w/%			$R_{max}/$ %	孔隙率/ %	Langmuir等温吸附常数		计算的总含气量/ ($m^3 \cdot t^{-1}$)
	镜质组	惰质组	M_{ad}	A_d	V_{daf}			$V_L/(m^3 \cdot t^{-1})$	p_L/MPa	
CS38-1	95.75	1.89	0.95	8.82	8.91	1.97	5.00	18.91	4.01	20.819
CS38-2	98.51		0.96	6.72	6.79	2.18	4.91	19.29	4.01	21.299
CS38-3	77.13	21.08	0.82	5.91	5.96	2.02	5.55	20.60	3.74	23.199
CS38-5	92.89	5.21	0.88	3.85	3.89	2.29	5.55	21.29	4.15	23.676
CS38-6	91.13	5.91	0.93	5.42	5.47	1.99	5.71	20.62	3.83	23.355
CS38-7	86.52	7.83	0.88	11.48	11.58	2.09	4.71	19.41	3.57	21.320
CS38-9	87.83	10.00	0.99	8.51	8.60	2.10	4.06	20.13	3.82	22.529
CS38-11	83.02	8.02	0.95	18.85	19.03	1.99	5.02	16.88	3.66	18.820
CS38-13	87.32	11.27	0.84	15.69	15.83	2.27	5.00	19.25	4.10	21.198

曲线无拐点, 没有明显吸附回环, 此种曲线对应的孔隙主要为一段封闭的不透气孔, 如一段封闭的圆柱形孔, 一段封闭的平板形孔; 类型 II 如图 2b 所示, 脱附曲线存在明显拐点(“G”点), 在相对压力(p/p_0)0.53 处存在明显

滞后环, 此种曲线对应的孔隙主要为细颈瓶状孔, 如一段开口的墨水瓶形孔。低温 CO_2 吸附实验表明(图 2c, 图 2d), 研究区煤主要孔容贡献的孔径范围是 0.6~1.4 nm。

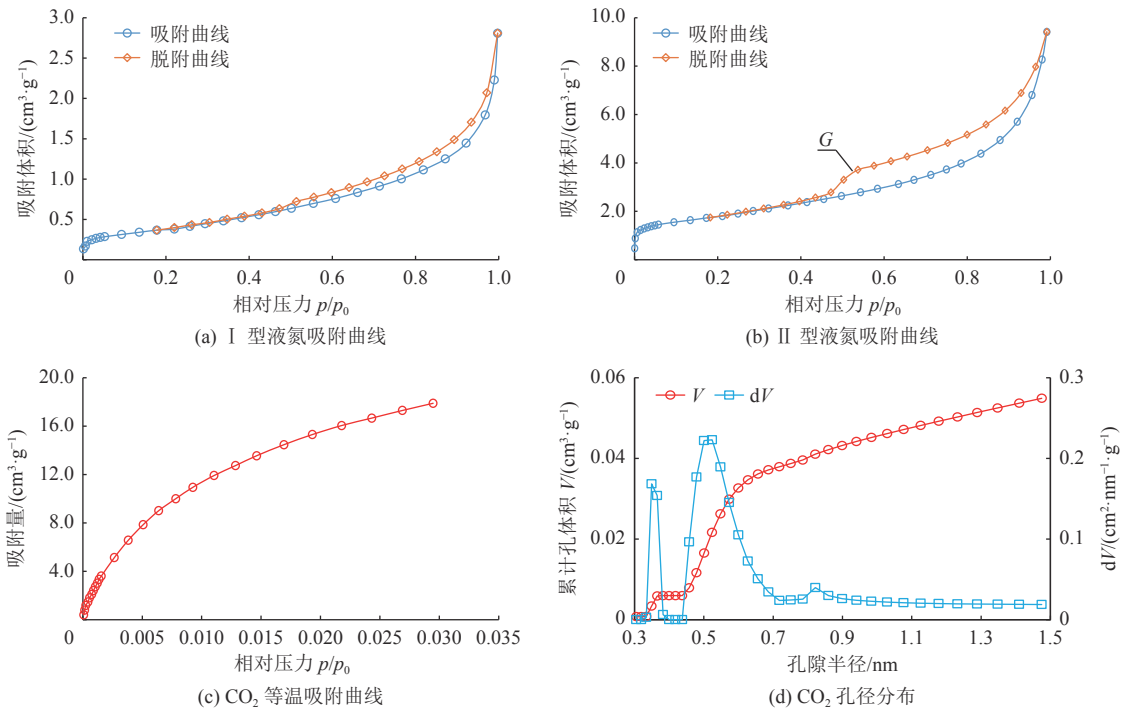


图 2 王府断陷 CS38 井煤低温液氮与二氧化碳吸附曲线

Fig.2 Curves from low-temperature liquid-nitrogen and carbon dioxide adsorption experiments of coals in well CS38 in the Wangfu fault depression

1.3 煤层含气特征

1.3.1 等温吸附特征

Langmuir 体积与 Langmuir 压力是评价储层吸附能力的重要参数, Langmuir 体积越大, 说明煤储层吸附能力越强。按照原位地层条件开展等吸附实验, 温度为 70℃。实验结果见表 1 和图 3。

1.3.2 气测值分布特征

气测录井数据是目前录井综合解释的主要基础资料, 可较好反映储层真实含气量^[20]。王府断陷气测全烃值介于 1.47%~37.53%, 平均 10.36%, 高值区主要分布于断陷中部(图 4)。

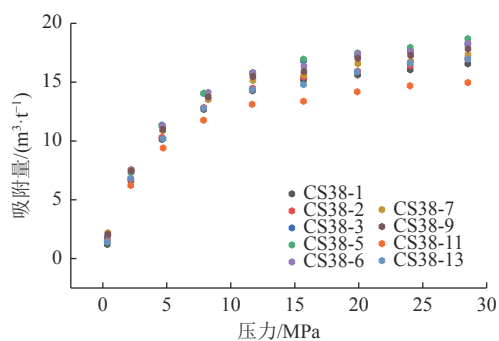


图3 王府断陷煤等温吸附曲线

Fig.3 Isothermal adsorption curves of coals in the Wangfu fault depression

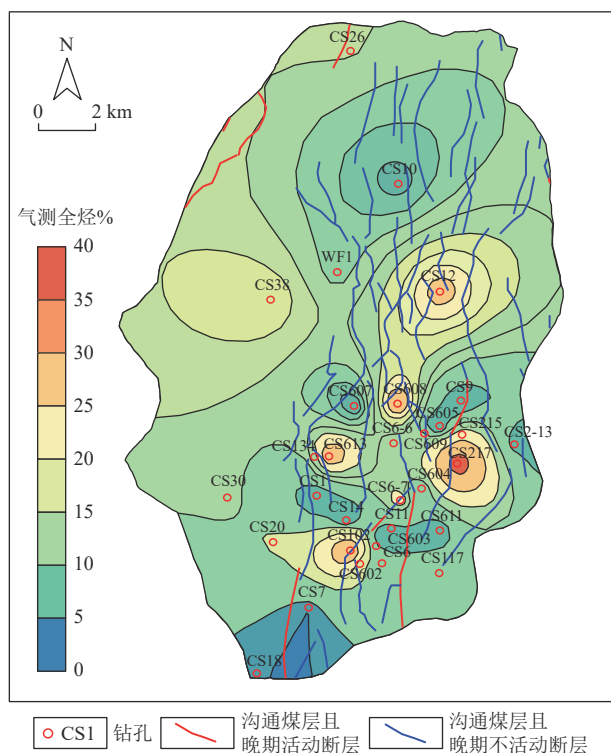


图4 王府断陷气测全烃平面分布

Fig.4 Planar distribution of gas logging-derived total hydrocarbon values of the Wangfu fault depression

1.3.3 含气量预测

王府断陷深部煤层气勘探程度较低,目前仅有少量等温吸附实验资料。为评估煤层含气性,假定煤层处于饱和吸附状态,并存在游离气,利用 Langmuir 方程可以估算煤理论饱和吸附气量,再利用实验测得的孔隙率和含气饱和度,结合储层温度、压力,利用游离气计算模型^[21]估算游离气含量,吸附气和游离气相加得到总含气量。

$$V_s = \frac{pV_L}{p + p_L} \quad (1)$$

$$V_f = \frac{\phi S_g}{B_g \rho_c} - \frac{1.318 \times 10^{-6} \times M}{B_g \rho_s} \times V_s \quad (2)$$

$$B_g = \frac{\rho_b}{\rho_d} \quad (3)$$

经计算,研究区 CS38 井煤层总含气量介于 18.820~23.676 m³/t,平均 21.80 m³/t(表 1),游离气含量介于 3.05~4.77 m³/t,平均 4.05 m³/t。

2 煤层气富集主控因素

2.1 火山岩分布

盆地的聚煤作用或煤层发育受沉积相控制,而沉积相则受构造控制,这一点在断陷盆地尤为明显。纵向上,王府断陷的煤层集中发育在火石岭组顶部,平面上,煤层主要分布在断陷的中部及中东部。由火石岭组聚煤期沉积相分布显示(图 5),断陷的东西两侧都因为边界断层的发育,出现了半深湖-深湖的相对深水环境,因水体深而没有聚煤作用发生。而断陷的双陡坡带之间为浅湖相和浅水三角洲相,是本区煤层发育的主要沉积环境。

王府断陷火石岭组较厚煤层的分布与其下的火山岩的分布密切相关(图 5、图 6),断陷中部及东部由于火山喷发的充填效应加速了浅湖区的填平补齐,环境水体因此淤浅有利于聚煤作用发生(图 5)。在王府断陷,聚煤期沉积相的配置除了断陷湖常见的沉积相配置以外,火山岩的发育是其重要的典型沉积特征。

在上述认识的基础上,本文提出了针对王府断陷火石岭组的成煤模式即“填平补齐成煤模式”(图 6):聚煤作用发生之前,断陷湖区除了常见三角洲-扇三角洲、半深湖-深湖、浅湖、浅湖三角洲碎屑岩沉积外,断陷中部与东部的大量火山喷发造成对盆地的充填作用,加速了断陷湖区的填平补齐、水体变浅,有利于聚煤作用发生。按照断陷盆地演化规律,煤层所在的火石岭组顶部即火石岭组末期,构造趋于稳定,有利于泥炭沼泽的持续发育,最终形成了分布范围广、厚度较稳定的厚煤层,厚煤层的分布特征与火山岩的分布呈相关性的独特现象,即王府断陷的聚煤作用在一定程度上受到火山喷发的“正面”影响。

2.2 煤层顶板岩性及厚度

煤层顶底板的封闭性取决于其岩性和厚度。砂岩类顶板相对疏松,透气性较好,不利于煤层气封闭;泥岩类顶板致密,空隙小,透气性较差,对煤层气封闭程度高^[22],此外,当上覆泥岩盖层存在进入生烃门限的烃源岩时,可以起到烃浓度和压力双重封闭^[23]。王府断陷内煤层顶底板组合类型以泥岩-煤层-泥岩为主,利用测井、地震双重约束,读取煤层顶部区域泥岩厚度作为盖层厚度。研究区泥岩盖层厚度 7.00~195.72 m,平均 69.50 m(图 7)。通过统计王府断陷 30 口井,发现盖层厚度与气测值有良好的正相关关系,盖层厚度 < 40 m,气测值一般低于 5%;盖层厚度 40~80 m,气测值介于 5%~15%;盖层厚

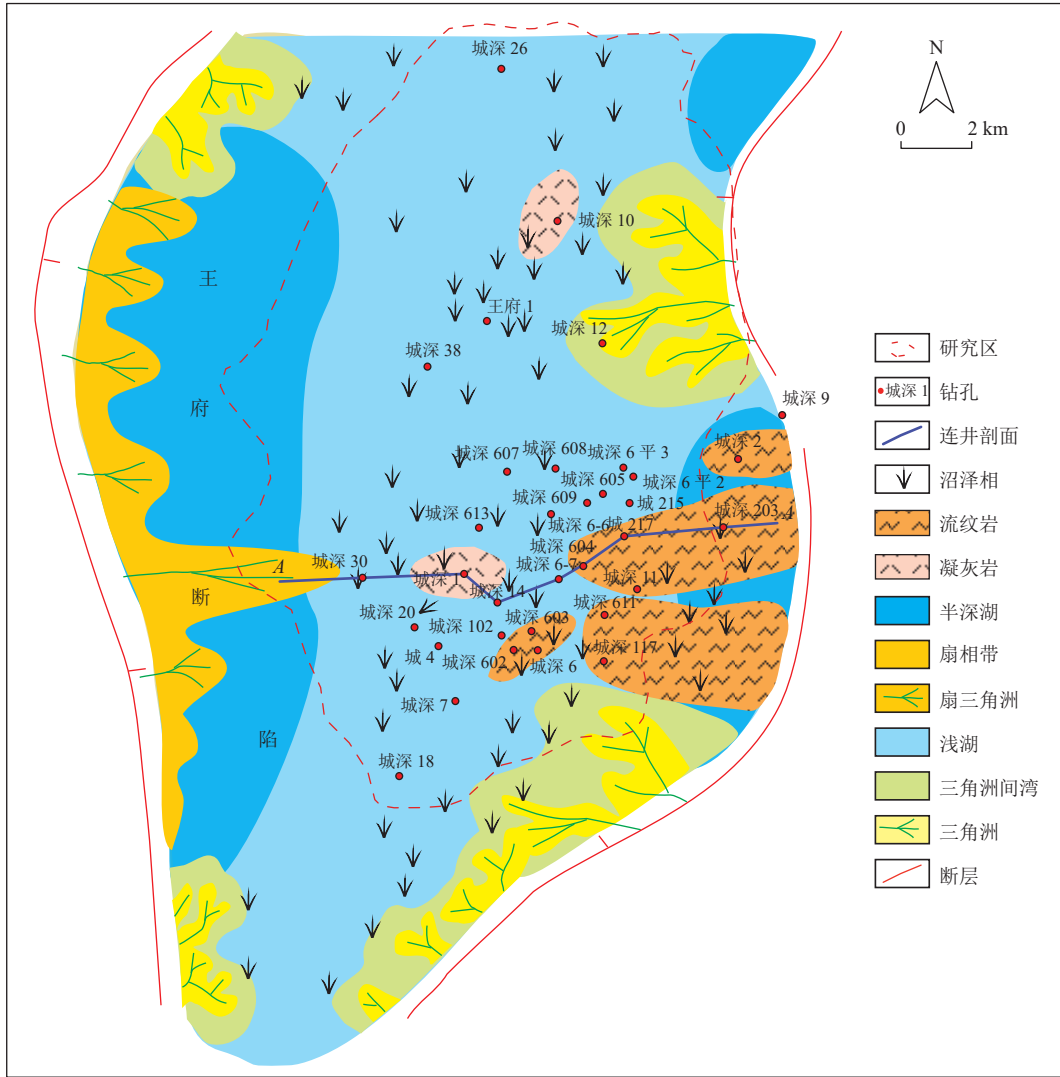


图 5 王府断陷火石岭组聚煤期沉积相

Fig.5 Sedimentary facies of the Huoshiling Formation in the Wangfu fault depression during coal accumulation

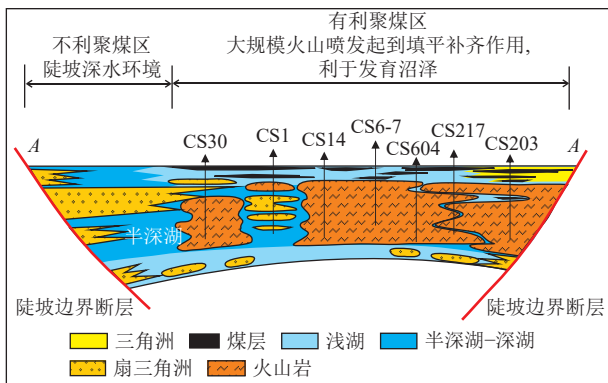


图 6 王府断陷火石岭组聚煤模式

Fig.6 Coal accumulation mode of the Huoshiling Formation in the Wangfu fault depression

度>80 m, 气测值大于 15%, 此时盖层封闭性能良好, 利于煤层气的保存。

2.3 断层垂向封闭性

断层是否沟通, 使深部煤层气向浅部运移是深部煤层气富集保存的关键, 因此气源断层的厘定尤为重要。

王府断陷内沟通煤层和浅部地层(登娄库组)且在成藏期(泉头组末-青山口组早期)活动的断层是主要的气源断层(图 4)。王府断陷火石岭组顶部煤层在同种顶底板类型下, 煤层气测值具有强烈非均质性, 说明除岩性组合和厚度分布外, 煤层气富集性还受到错断盖层的断层的垂向封闭能力控制。断层垂向封闭能力越强, 油气越难沿着断层发生垂向运移, 越有利于煤层气保存^[24]。断层在脆性盖层段发生破裂作用^[25], 在脆-韧性盖层段发育泥岩涂抹结构^[26], 王府断陷内煤层顶底板埋深在 2 500~3 000 m 内, 以脆-韧性变形为主, 因此, 采用泥岩涂抹系数(SSF)来表征断层垂向封闭性^[27], SSF 即为断层断距与盖层厚度的比值, SSF 值越小, 垂向封闭能力越好。

采用三维地震数据计算王府断陷 30 口气测井相邻断层在 T42 反射层(煤层顶界)上下盘垂向差值, 经过时深转换得到断层断距, 结合气测值分布, 以气测值 15% 为分隔点, 厘定煤层气顶板断层垂向封闭性临界断距为 90 m, 对应 SSF 值为 1.1。利用煤层顶板垂向封闭

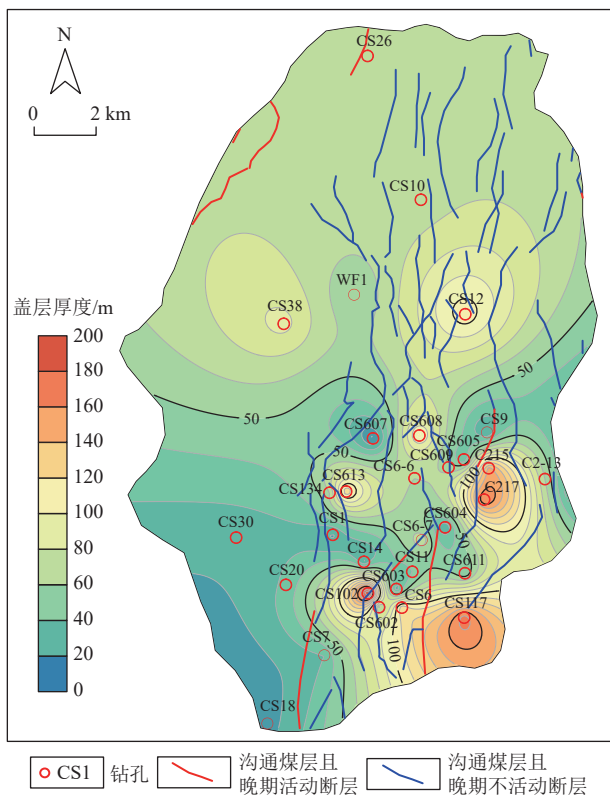


图 7 王府断陷盖层厚度等值线

Fig.7 Isopach map of covers in Wangfu fault depression

SSF 临界值评价煤层顶面含气范围内气源断层封闭性。结果表明,中部和北部 SSF 值均低于临界值,断层垂向封闭性强;西南地区局部断层在中段 SSF 值高于临界值,封闭性差,存在煤层气逸散风险。

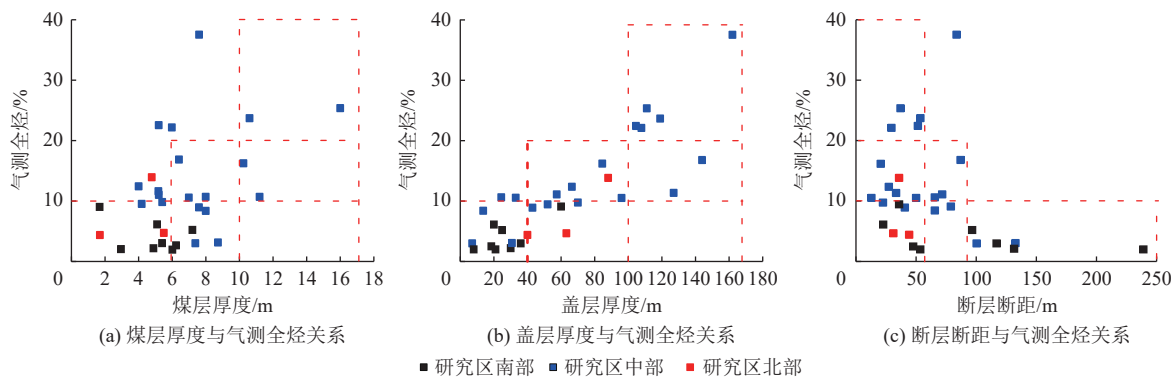


图 8 王府断陷煤层厚度、盖层厚度、断层断距与气测全烃关系

Fig.8 Gas logging-derived total hydrocarbon values vs. coal seam thickness, cover thickness, and fault throw in the Wangfu fault depression

4 结论

a. 王府断陷火石岭组煤类型以光亮煤、半亮煤为主,具有低水分、低挥发分、低灰分的特征,镜质体最大反射率大于 1.8%,孔隙率平均 5.01%,CS38 井计算含气量平均为 21.80 m³/t。

b. 王府断陷煤层发育程度受古沉积环境控制,煤层主要发育于断陷双陡坡带之间与断陷中、东部的火

3 煤层气有利区评价

建立煤层气物质基础、聚集空间与保存条件三项组合评价体系,优选煤层厚度、气测全烃值、盖层厚度、断层封闭性等四要素评价参数。参考鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县区块深部煤层气先导试验效果,煤层厚度大于 3 m 具有一定的开发效益,而煤层厚度大于 5 m 则具有较好的开发效益。此外,研究区煤层厚度和盖层厚度与气测全烃值均呈正相关关系(图 8a、图 8b),断层断距与气测全烃值呈负相关性(图 8c)。

以气测全烃值 5%、15% 为界,厘定盖层临界厚度为 40、80 m,临界断距为 50、90 m,以此建立深部煤层气勘探开发有利区评价体系(表 2),评价出王府断陷内深部煤层气勘探开发有利区。

对研究区内各井数据进行分析处理,结合表 2,绘制了松辽盆地南部王府断陷区块深部煤层气勘探开发有利区(图 9),其中 I 类有利区主要发育在王府断陷中部,煤层厚度>5 m,断层断距 50 m,盖层厚度>80 m,气测全烃值>15%,一方面厚煤层具有较好的生气潜力,另一方面顶底板组合类型与断裂垂向封闭可确保生成的气体有效富集在顶板盖层下,不易散失。II、III 类有利区主要发育在王府断陷北部和南部,II 类有利区煤层厚度一般 3~5 m,盖层厚度 40~80 m,气测全烃值 5%~15%,断层封闭性弱。III 类有利区煤层厚度一般<3 m,盖层厚度<40 m,气测全烃值<5%,断层不封闭。

山喷发的填平补齐效应形成的浅水区,为火山岩“填平补齐成煤模式”。此外,区内发育的大面积巨厚泥岩顶底板与封闭断层使得煤层气得以富集、保存。

c. 王府断陷 I 类煤层气富集有利区主要发育在断陷中部,煤层厚度>5 m,断层断距 50 m,盖层厚度>80 m,气测全烃值>15%,具有较大勘探开发潜力;II、III 类有利区主要发育在断陷的北部和南部,煤层厚度一般<5 m,盖层厚度<80 m,气测全烃值<15%,断层封闭

表 2 王府断陷深部煤层气勘探开发有利区评价体系
Table 2 Evaluation system of favorable areas for deep coalbed methane exploration and exploitation in the Wangfu fault depression

评价指标	评价等级			
	I类	II类	III类	
物质基础	煤层厚度/m	>5	3~5	<3
聚气能力	气测全烃值/%	>15	5~15	<5
保存条件	盖层厚度/m	>80	40~80	<40
	断层断距/m	强封闭<50	弱封闭50~90	不封闭>90

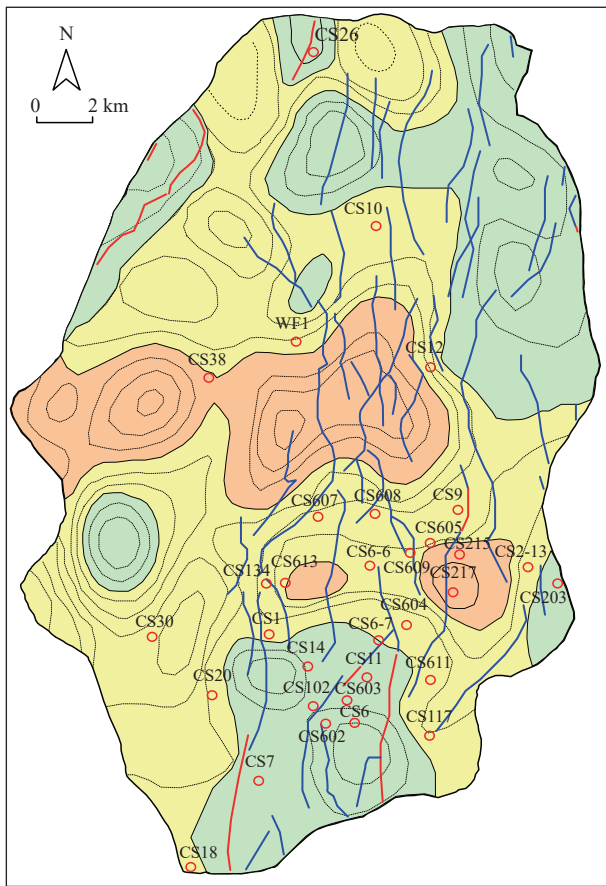


图 9 王府断陷有利区预测评价结果

Fig.9 Prediction and evaluation results of favorable areas for deep coalbed methane exploration and exploitation in the Wangfu fault depression

性弱或不封闭,盖层厚度差异大,勘探开发风险较大。

符号注释

B_g 为天然气体积系数, m^3/m^3 ; M 为甲烷摩尔质量, g/mol ; p 为煤储层压力, MPa , 基于压力梯度计算; p_L 为 Langmuir 压力, MPa ; S_g 为含气饱和度; V_f 为游离气含量, m^3/t ; V_L 为 Langmuir 体积, m^3/t ; V_s 为吸附气含量, m^3/t ; ρ_0 为甲烷标况下密度, $0.00071 g/cm^3$; ρ_c 为煤层视

密度, g/cm^3 ; ρ_d 为地层条件甲烷密度, g/cm^3 , 根据储层温压条件查询 REFPROP 获得; ρ_s 为吸附相密度, 根据前人模拟, 取 $0.34 g/cm^3$; ϕ 为孔隙率, %。

参考文献(References)

- [1] 聂志宏, 时小松, 孙伟, 等. 大宁-吉县区块深层煤层气生产特征与开发技术对策[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 193-200.
NIE Zhihong, SHI Xiaosong, SUN Wei, et al. Production characteristics of deep coalbed methane gas reservoirs in Daning-Jixian Block and its development technology countermeasures[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 193-200.
- [2] 庚劼, 陈浩, 陈艳鹏, 等. 第 4 轮全国煤层气资源评价方法及结果[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 64-68.
GENG Meng, CHEN Hao, CHEN Yanpeng, et al. Methods and results of the fourth round national CBM resources evaluation[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 64-68.
- [3] 张道勇, 朱杰, 赵先良, 等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1598-1604.
ZHANG Daoyong, ZHU Jie, ZHAO Xianliang, et al. Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1598-1604.
- [4] 杨兆彪, 高为, 秦勇, 等. 贵州深部煤层气地质特征及其资源潜力[J/OL]. 煤炭学报, 2023: 1-15 [2023-09-01]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0465>.
YANG Zhaobiao, GAO Wei, QIN Yong, et al. Geological characteristics and resource potential of deep coalbed methane in Guizhou[J/OL]. Journal of China Coal Society, 2023: 1-15 [2023-09-01]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0465>.
- [5] 李曙光, 王成旺, 王红娜, 等. 大宁-吉县区块深层煤层气成藏特征及有利区评价[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 59-67.
LI Shuguang, WANG Chengwang, WANG Hongna, et al. Reservoir forming characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Daning-Jixian Block[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 59-67.
- [6] 杨秀春, 徐凤银, 王虹雅, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 叶建平, 侯淞译, 张守仁. “十三五”期间我国煤层气勘探开发进

- 展及下一步勘探方向[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(3): 15–22.
YE Jianping, HOU Songyi, ZHANG Shouren. Progress of coalbed methane exploration and development in China during the 13th Five-Year Plan period and the next exploration direction[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(3): 15–22.
- [10] 齐东岩. 王府断陷火山岩储层分布规律及预测研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
QI Dongyan. The distribution and prediction of volcanic rocks reservoir in Huoshiling Formation of Wangfu Fault Depression, northeast China[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [11] 孙文铁, 李忠慧, 李忠诚, 等. 断陷盆地次生气藏成藏主控因素及成藏模式: 以王府断陷泉一段-登娄库组碎屑岩气藏为例[J]. 东北石油大学学报, 2020, 44(6): 94–102.
SUN Wentie, LI Zhonghui, LI Zhongcheng, et al. Main controlling factors and accumulation model of secondary gas reservoirs in faulted basins: Taking the clastic gas reservoir from Quan 1 member to Denglouku Formation in Wangfu Fault Depression as an example[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44(6): 94–102.
- [12] 韩青林. 王府断陷小城子洼槽火山岩致密储层特征[J]. 石油知识, 2021(5): 60–61.
HAN Qinglin. Tight reservoir characteristics of Huoshiling Formation in Xiaochengzi subsag of Wangfu Fault Depression[J]. *Petroleum Knowledge*, 2021(5): 60–61.
- [13] 王宏语, 李瑞磊, 朱建峰, 等. 陆相裂谷盆地构造沉积学特征: 以松辽盆地伏龙泉断陷为例[J]. 现代地质, 2019, 33(6): 1151–1162.
WANG Hongyu, LI Ruilei, ZHU Jianfeng, et al. Tectonic sedimentology characteristics of continental rift basin: Case study from Fulongquan Fault Depression of Songliao Basin[J]. *Geoscience*, 2019, 33(6): 1151–1162.
- [14] 曾凡成, 张昌民, 李忠诚, 等. 断块型沉火山碎屑岩致密气藏有效储层控制因素及分布规律: 以松辽盆地南部王府气田白垩系沙河子组为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 481–493.
ZENG Fancheng, ZHANG Changmin, LI Zhongcheng, et al. Controlling factors and distribution pattern of effective tight gas pools in blocky pyroclastic rocks in the Cretaceous Shahezi Formation in Wangfu gas field, southern Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(2): 481–493.
- [15] 杨丽, 林荣达, 李向宜. 松辽盆地东部构造带白垩系沉积演化特征研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(27): 6544–6549.
YANG Li, LIN Rongda, LI Xiangyi. Research of the sedimentary evolutionary characteristic in Cretaceous of eastern tectonic zone in Songliao Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(27): 6544–6549.
- [16] 马行陟, 宋岩, 柳少波, 等. 中高煤阶煤储层吸附能力演化历史定量恢复: 以鄂尔多斯盆地韩城地区为例[J]. 石油学报, 2014, 35(6): 1080–1086.
MA Xingzhi, SONG Yan, LIU Shaobo, et al. Quantitative research on adsorption capacity evolution of middle–high rank coal reservoirs in geological history: A case study from Hancheng area in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2014, 35(6): 1080–1086.
- [17] 孙宪航, 陈保东, 张莉莉, 等. 液化天然气 BOG 的计算方法与处理工艺[J]. 油气储运, 2012, 31(12): 931–933.
SUN Xianhang, CHEN Baodong, ZHANG Lili, et al. BOG calculation method and processing technique of liquefied natural gas[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2012, 31(12): 931–933.
- [18] 余琪祥, 罗宇, 曹倩, 等. 准噶尔盆地东北缘深层煤层气勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(5): 888–899.
YU Qixiang, LUO Yu, CAO Qian, et al. Exploration prospect of deep coalbed methane in the northeastern margin of Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(5): 888–899.
- [19] 曲浩鑫, 许浩, 汤达祯, 等. 基于低温氮吸附法的海拉尔盆地褐煤孔隙特征研究[J]. 中国煤炭, 2018, 44(10): 52–59.
QU Haoxin, XU Hao, TANG Dazhen, et al. Study on pore characteristics of lignite in Hailar Basin based on low-temperature nitrogen adsorption method[J]. *China Coal*, 2018, 44(10): 52–59.
- [20] 俞秋明. 利用气测录井对含气显示层进行定量评价的方法探讨[J]. 科技情报开发与经济, 2012, 22(22): 145–147.
YU Qiuming. Probe into the methods for conducting quantitative assessment on gas-bearing presentation layers by using gas-logging[J]. *Sci-Tech Information Development and Economy*, 2012, 22(22): 145–147.
- [21] 胡晓兵. 榆社武乡区块深部煤层气地质特征与有利区评价[D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
HU Xiaobing. Geological characteristics and favorable area evaluation of deep coalbed methane in Yushe–Wuxiang Block[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.
- [22] 徐德信, 李乐, 程政. 黔西北某区块煤层气赋存规律影响因素分析[J]. 石化技术, 2017, 24(7): 172–173.
XU Dexin, LI Le, CHENG Zheng. Analysis of influencing factors of coalbed methane occurrence law in a block in northwest Guizhou[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2017, 24(7): 172–173.
- [23] 黄一鹏. 天然气藏泥岩盖层封闭性研究现状[J]. 石化技术, 2019, 26(12): 341.
HUANG Yipeng. Research status of sealing property of mudstone caprock in natural gas reservoir[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2019, 26(12): 341.
- [24] INGRAM G M, URAI J L. Top-seal leakage through faults and fractures: The role of mudrock properties[J]. *Geological Society*, 1999, 158(1): 125–135.
- [25] WELSH K E, DEARING J A, CHIVERRELL R C, et al. Testing a cellular modelling approach to simulating late-Holocene sediment and water transfer from catchment to lake in the French Alps since 1826[J]. *Holocene*, 2009, 19(5): 785–798.
- [26] FOSSEN H. Structural geology[M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [27] 吕延防, 万军, 沙子莹, 等. 被断裂破坏的盖层封闭能力评价方法及其应用[J]. 地质科学, 2008, 43(1): 162–174.
LYU Yanfang, WAN Jun, SHA Zixuan, et al. Evaluation method for seal ability of cap rock destructed by faulting and its application[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2008, 43(1): 162–174.

(责任编辑 范章群)