



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405171

引用格式:张海锋,张兵,魏超,等.鄂尔多斯盆地东缘杨家坡区块煤层气开发潜力评价及开发地质单元划分[J].科学技术与工程,2025,25(19):7920-7929.

Zhang Haifeng, Zhang Bing, Wei Chao, et al. Evaluation of CBM development potential and division of development geological units in Yangjiapo block, eastern margin of Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(19): 7920-7929.

天文学、地球科学

鄂尔多斯盆地东缘杨家坡区块煤层气开发潜力 评价及开发地质单元划分

张海锋¹, 张兵¹, 魏超², 杜丰丰^{3*}, 冯冬⁴

(1. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100011; 2. 中海艾普油气测试(天津)有限公司, 天津 300452;
3. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 4. 河南理工大学能源科学与工程学院, 焦作 454000)

摘要 为评价鄂尔多斯盆地东缘杨家坡区块煤层气开发潜力,优化其开发地质单元划分方法,采用储层精细描述技术、类比法与多层次模糊综合评价法,对区块4+5号与8+9号煤层地质、资源、储层、水文及合采地质条件进行描述,开展与北部保德区块地质条件对比,剖析总结杨家坡区块煤层气开发难点,优化煤层气开发潜力评价与开发地质单元划分方法。结果表明:杨家坡区块单煤层资源条件较差,两煤层累计资源丰度为 $1.08 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。储层渗透性较好,层间物性差异较小,具备合层开发潜力。断层对300 m范围内煤储层含气量、渗透率具有重要影响,同时增加沟通顶板含水层的风险。应用煤层气开发地质单元划分方法,评价了杨家坡区块煤层气开发潜力与合采兼容性,划分了3个级别潜力区6个开发地质单元,指出杨家坡区块中部适合合层开发,西北部的部分区域适合合层开发,东北部适合接替开发。

关键词 煤层气; 开发潜力评价; 开发地质单元; 类比法; 多层次模糊综合评价; 杨家坡区块
中图分类号 P618.13; **文献标志码** A

Evaluation of CBM Development Potential and Division of Development Geological Units in Yangjiapo Block, Eastern Margin of Ordos Basin

ZHANG Hai-feng¹, ZHANG Bing¹, WEI Chao², DU Feng-feng^{3*}, FENG Dong⁴

(1. China United Coalbed Methane Corporation Ltd, Beijing 100011, China;
2. COSL-EXPRO Testing Services(Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300452, China;
3. School of Energy Resources, China University of Geoscience (Beijing), Beijing 100083, China;
4. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

[Abstract] In order to evaluate the development potential of coalbed methane in Yangjiapo block on the eastern margin of Ordos Basin and optimize the division method of its development geological units, the geological, resource, reservoir, hydrological and commingled production geological conditions of No. 4 + 5 and No. 8 + 9 coal seams in the block were described by reservoir fine description technology. By using the analogy method and multi-level fuzzy comprehensive evaluation method, the geological conditions of the Baode block in the north were compared, the difficulties of CBM development in the Yangjiapo block were analyzed and summarized, and the evaluation of CBM development potential and division method of development geological units were optimized. The results show that the resource conditions of a single coal seam in the Yangjiapo block are poor, and the cumulative resource abundance of the two coal seams is $1.08 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$. The reservoir permeability is good, the difference in physical properties between the layers is small, and it has the potential for combined layer development. Faults have an important influence on the gas content and permeability of coal reservoirs within 300 m, and increase the risk of communicating with roof aquifers. The geological unit division method of coalbed methane development was applied to evaluate the development potential and commingled production compatibility of coalbed methane in the Yangjiapo Block. The six geological development units were divided into three levels of potential areas. It is pointed out that the middle part of Yangjiapo block is suitable for commingled development, some areas in the northwest are suitable for commingled development,

收稿日期: 2024-07-10 修订日期: 2024-12-23

基金项目: “十四五”重大科技项目(KJGG2021-1000)

第一作者: 张海锋(1981—),男,汉族,四川广安人,高级工程师。研究方向:煤层气地质与开发。E-mail: zhanghf5@cnoc.com.cn。

*通信作者: 杜丰丰(1998—),男,汉族,河南焦作人,博士研究生。研究方向:煤层气地质与开发。E-mail: dff9803@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

and the northeast is suitable for replacement development.

[**Keywords**] coalbed methane; development potential evaluation; development geological unit; analogical method; multilevel fuzzy comprehensive evaluation; Yangjiapo block

杨家坡区块位于鄂尔多斯盆地东缘,主力煤层为山西组4+5号与太原组8+9号煤层,探明储量为 $101.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[1],展现出较大的开发潜力。前期布置了几口生产试验井平均产水量20.85~52.99 m^3/d ,产水量大;产气不稳定,稳产气量552~1 744 m^3/d ,产气效果一般。由于该区储层非均质性强,勘探开发程度低,地质认识不详尽,开发难点不明,甜点区界限不明确,亟需明确煤储层地质特征,开展影响煤层气井产量的地质因素分析,指导后期勘探开发工程优化。

文献[2-4]基于地震、钻井、完井、测井、录井、注入压降试井、压裂、排采及实验室测试等获取的数据和资料,通过观测、数据分析与解释等手段,查明煤储层特征。文献[5-8]采用生产数据分析、主成分分析法、灰色关联分析以及多种方法相结合,剖析煤层气井产能主控因素,揭示了煤层含气量、渗透率、临储比等是影响煤层气井产能的主控因素。文献[9-10]采用层次分析、多层次模糊综合评价、数值模拟等一种或多种方法组合,评价煤层开发潜力,确定开发有利区。这些研究对煤层气储层描述与开发潜力评价均有一定指导意义。然而煤层气开发受多因素耦合作用,不同区块煤储层存在较大的差异,开发潜力评价与开发地质单元划分不能完全参照其他区块评价标准,且杨家坡区块煤层生产井资料较少,使得上述方法存在一定的局限性。保德区块位于杨家坡区块北部,两区块地理位置相近,构造演化、煤系地层分布等条件相似,年产气量超过 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[2],产气效果大相径庭。充分借鉴开发保德区块开发成功经验,剖析杨家坡区块开发难点,是提高开发经济效益、加快地质工程一体化进程的准确、有效措施手段之一,然而相关研究尚未开展。

鉴于此,以杨家坡区块4+5号与8+9号煤层为研究对象,采用储层精细描述技术,从地质、资源、产出、可改造性、水文及合采地质条件等六方面,查明区块煤层气藏特征;类比保德区块开发潜力,剖析杨家坡区块煤层气开发难点;采用多层次模糊综合评价法,优化煤层气开发地质单元划分方法,划分了煤层气开发地质单元,为杨家坡区块下一步煤层气井的部署与施工提供参考。

1 区块地质与生产概况

杨家坡区块位于鄂尔多斯盆地东缘北部临兴

东区,属于晋西挠褶带北段。构造东北高、西南低,为简单的西倾单斜构造[图1(a)]^[11]。依据地层变形强度与断层发育特点,临兴东区自东向西依次为剥蚀带、断阶带、平缓带。杨家坡区块整体位于断阶带内,地层总体为向NW倾的单斜构造。区内构造条件复杂,发育多条NNW向与SW向高陡逆断层,断距规模不大,中部存在部分隆起[图1(b)]。

区块内主力煤层为山西组的4+5号与太原组的8+9号煤层;4+5号煤层埋深为232~1 543 m,8+9号煤为278~1 632 m,煤层倾角为 $3^\circ \sim 11^\circ$,整体呈由东北向西南逐渐加深的趋势。4+5号煤层厚度介于0.8~6.2 m,平均3.84 m;8+9号煤层厚度介于4.5~13.7 m,平均9.27 m,煤层厚度大且稳定;煤层顶板均以泥岩为主[图1(c)]。

杨家坡区块内采用直井压裂的方法,分别进行了4+5号、8+9号煤单采与两煤层合采试验,共试采了6口井,经过两年时间的排采,整体产气效果一般,产水量均大于 $20 \text{ m}^3/\text{d}$,产水量较大。

2 煤层气藏描述

2.1 地质条件

地质条件反映了煤储层展布规律、开发条件的好坏,包括煤层埋深、构造条件等,影响煤层气的生成、赋存与产出,对煤层气开发潜力评价具有重要影响。微构造对煤层气成藏与产出具有一定的控制作用,表现为富集区、高产区与鼻隆构造具有较好的相关性,相应的低产井与沟槽构造具有较好的对应关系^[12]。构造曲率是表征线或面弯曲程度的量化参数,正值代表平面突起,负值表示平面凹陷,可采用该值分析杨家坡区块微构造发育情况。采用构造曲率公式,结合煤层底板标高,分别获取4+5号与8+9号煤层构造曲率^[13],等值线如图2所示。

由图2可知,4+5号与8+9号煤层构造曲率走势基本一致,平面上存在多个圈闭区,表明存在局部的鼻隆与凹陷。如区块的中部与西部存在局部的鼻隆构造,东南部与西北部存在沟槽构造。

2.2 资源条件

资源条件是煤层气开发的基础,煤层气资源量的多少主要取决于煤层含气量与厚度。杨家坡区块4+5号煤层与8+9号煤层含气量及累计厚度等值线如图3所示。

由图3可知,杨家坡的4+5号煤层含气量介于 $3 \sim 8 \text{ m}^3/\text{t}$,平均为 $4.98 \text{ m}^3/\text{t}$;8+9号煤层含气量介

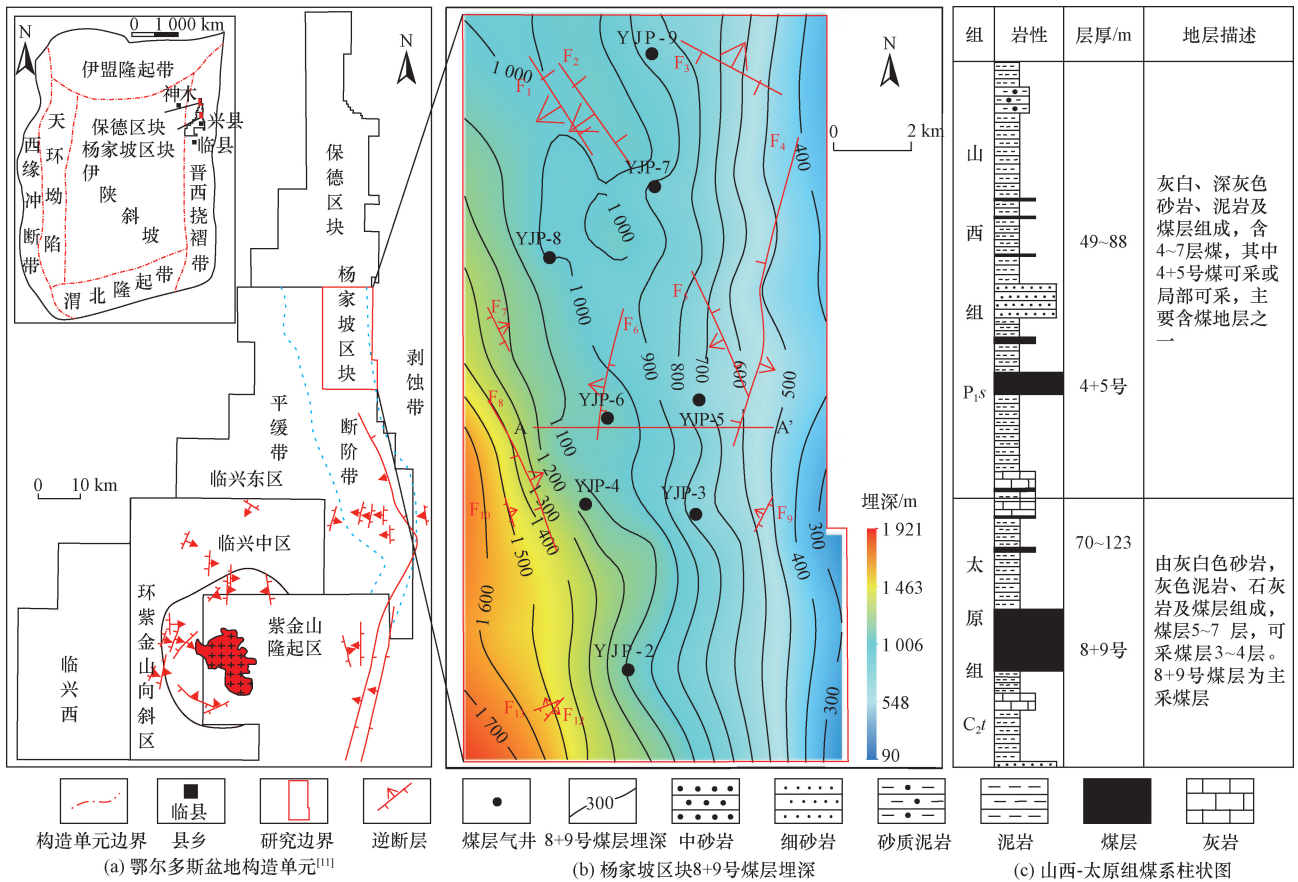


图1 鄂尔多斯盆地杨家坡区块8+9号煤层埋深及山西-太原组煤系柱状图
Fig. 1 Burial depth contours of No. 8+9 coal seams and coal measures histogram of Shanxi-Taiyuan Formation of Yangjiapo blocks in Ordos Basin

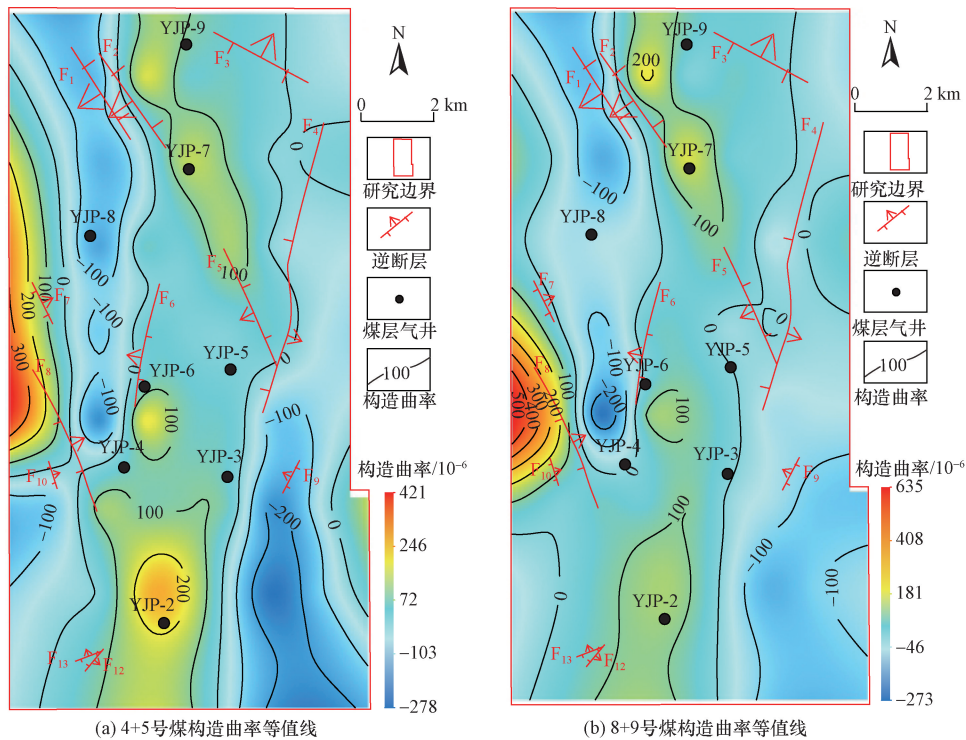


图2 杨家坡区块主力煤层构造曲率等值线
Fig. 2 Contour of structural curvature of main coal seam in Yangjiapo block

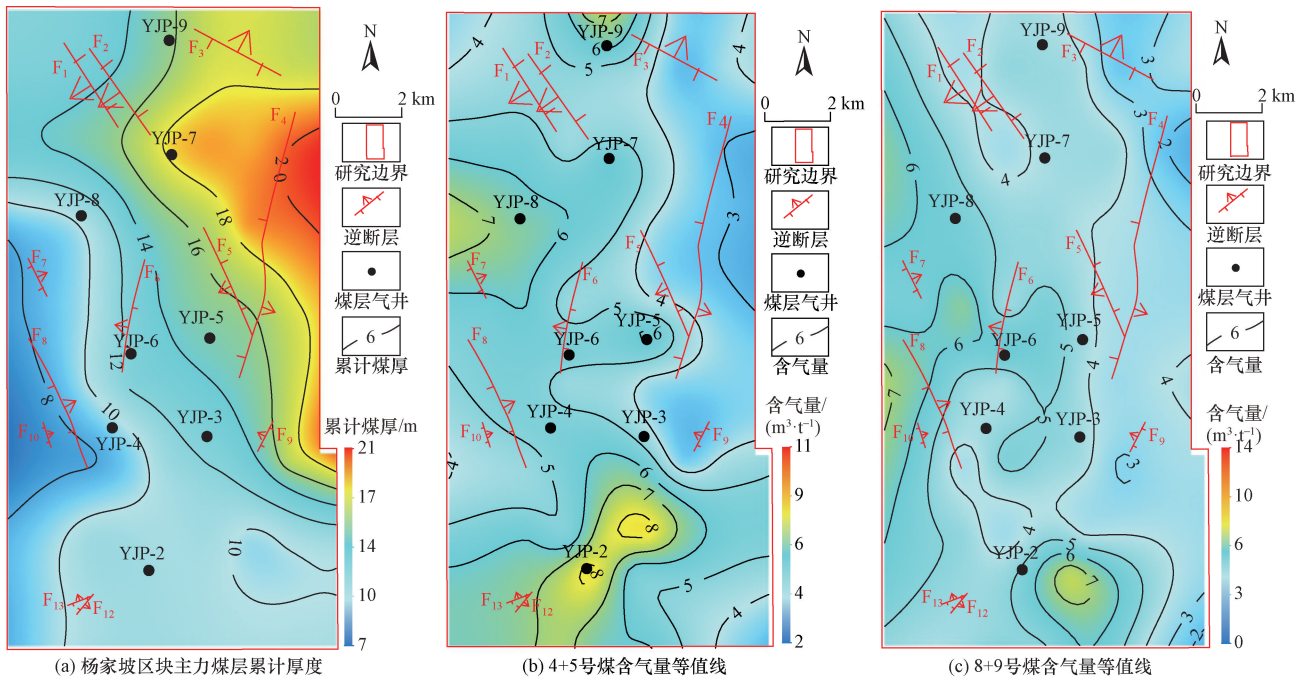


图3 杨家坡区块主力煤层资源潜力参数等值线

Fig. 3 Contour of coal seam resource potential parameters of main coal seams in Yangjiapo block

于 $1.7 \sim 7.54 \text{ m}^3/\text{t}$, 平均为 $4.55 \text{ m}^3/\text{t}$; 两煤层含气量差别不大, 整体均呈现东低西高的分布特点。两煤层累计平均厚度为 13.74 m , 累计厚度呈现北厚南薄的分布特征。

2.3 储层条件

资源条件决定了煤层气开发的资源潜力, 而煤层气能否产出还取决于气水运移产出通道的畅通性、解吸难易程度、解吸量的大小以及能否进行有效改造等。

杨家坡区块 4+5 号煤层渗透率在 $0.13 \times 10^{-15} \sim 2.64 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 平均为 $1.63 \times 10^{-15} \text{ m}^2$; 8+9 号煤层渗透率介于 $0.02 \times 10^{-15} \sim 2.24 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 平均为 $0.83 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。整体渗透率普遍较高, 有利于排水降压与煤层气的运移产出, 断裂构造处煤体结构破碎, 渗透率较低。4+5 号煤层临储比介于 $0.11 \sim 0.79$, 平均为 0.33 , 8+9 号煤层临储比介于 $0.07 \sim 0.56$, 平均为 0.22 。4+5 号煤层含气饱和度介于 $43.81\% \sim 86.29\%$, 平均为 60.38% ; 8+9 号煤层含气饱和度介于 $25.88\% \sim 73.83\%$, 平均为 50.24% 。整体上临储比、含气饱和度较低, 需要经历较长时间的排水降压才能见气, 杨家坡区块煤层气井见套压时间为 $23 \sim 104 \text{ d}$, 有一口井甚至未见套压, 整体见套压时间较长。4+5 号煤层储层压力梯度介于 $0.73 \sim 0.89 \text{ MPa/hm}$, 平均为 0.8 MPa/hm ; 8+9 号煤层储层压力梯度介于 $0.61 \sim 0.93 \text{ MPa/hm}$, 平均为 0.80 MPa/hm , 均为欠压储层。

杨家坡区块 4+5 号煤层宏观煤岩类型主要为

亮煤与暗淡煤, 8+9 号煤主要为亮煤。割理较发育, 4+5 号煤 9~22 条/5 cm, 8+9 号煤 4~19 条/5 cm; 内生裂隙普遍发育, 外生裂隙则不甚发育。煤体结构以碎裂结构煤为主, 碎粒、糜棱煤次之; 垂向上, 由上到下煤体结构呈现变差的趋势。

2.4 水文条件

水文条件主要通过影响煤层气生成、运移、富集及地层供液能力大小影响煤层气开发, 水动力分区与含水层富集水丰度能直观反映水文条件复杂程度。

地下水矿化度是判识水动力强弱与封闭性的重要参数指标^[14]。一般情况下, 矿化度越低, 则水动力越强, 越靠近氧化区; 反之水动力越弱, 靠近还原区。根据杨家坡区块煤层气井口水样测试结果, 排采水矿化度介于 $783 \sim 1868 \text{ mg/L}$, 平面上, 呈现由 NE 向 SW 逐渐增大的趋势, 表明东部水动力强, 向西水动力逐渐减弱。结合区块地下水势, 自东向西可划分为补给区、径流区、弱径流区与滞流区。

4+5 号与 8+9 号煤层顶底板局部发育砂岩, 与煤层距离较近, 是煤层气井高产水的主要来源。4+5 号煤层顶底板含水层富水丰度介于 $0 \sim 0.27 \text{ m}^3/\text{m}^2$, 平均 $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^2$; 8+9 号煤层顶底板含水层富水丰度介于 $0.02 \sim 0.76 \text{ m}^3/\text{m}^2$, 平均 $0.20 \text{ m}^3/\text{m}^2$, 整体富水性较弱; 若裂隙沟通含水层, 易造成煤层气井产水量增大, 排水降压困难。

2.5 合采地质条件

储层导流能力差与能量差是影响煤层气合层

开发的主要因素,包括渗透率差、储层压力差、临界解吸压力差、层间距等,合采储层参数差异越小越有利于合层开发^[15-16]。

杨家坡区块两主力煤层渗透率差介于 $0.03 \times 10^{-13} \sim 2.26 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 储层压力差介于 $0 \sim 1.10 \text{ MPa}$, 临界解吸压力差介于 $0.08 \sim 2.68 \text{ MPa}$, 层间距介于 $14 \sim 99 \text{ m}$, 平均 54 m , 结合保德区块合层开发经验, 当渗透率差小于 $2 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, 储层压力差小于 0.6 MPa , 临界解吸压力小于 0.4 MPa 时, 合层开发效果好^[17]。可见杨家坡区块具有较好的合层开发潜力, 合层开发是煤层气经济开发的有效方法。

3 杨家坡区块煤层气开发难点

与开发成功的区块进行潜力对比, 分析控制因素, 能够明确开发难点, 为优化开发地质单元划分方法奠定基础。

3.1 与保德区块潜力对比

杨家坡区块 4+5 号和 8+9 号煤层的资源丰度分别为 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 和 $0.83 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$; 保德区块 4+5 号和 8+9 号煤的资源丰度分别为 $0.66 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 和 $0.91 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 杨家坡两层煤的资源丰度不及保德区块 8+9 号煤层的煤层气资源丰度。

煤层气资源丰度表征储层地质储量的大小。能否有效产出还需考虑解吸潜力。采用有效解吸量获取煤储层临界解吸压力与废弃压力对应的含气量的差值, 评价煤储层的解吸潜力。煤层有效解吸量越大, 吸附气释放量越大, 煤层气井累计产气量也就越大。以井控范围 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 估算煤层气井单井可采量, 计算公式为

$$V_{\text{解}} = V_{\text{实}} - V_{\text{废}} \quad (1)$$

$$V_{\text{废}} = \frac{V_L P_{\text{废}}}{P_L + P_{\text{废}}} \quad (2)$$

$$Q = V_{\text{解}} h \times 300 \times 300 \rho \quad (3)$$

式中: $V_{\text{解}}$ 为有效解吸量, m^3/t ; $V_{\text{实}}$ 为实际含气量, m^3/t ; $V_{\text{废}}$ 为废弃压力对应的含气量, m^3/t ; V_L 为兰氏体积, MPa ; P_L 为兰氏压力, m^3/t ; $P_{\text{废}}$ 为废弃压力, 取 0.5 MPa ; Q 为单井可采量, m^3 ; h 为煤层厚度, m ; ρ 为煤层密度, m^3/t 。

采用式(1)~式(3)分别计算了杨家坡与保德区块 4+5 号和 8+9 号煤的有效解吸量与单井可采量, 结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 杨家坡区块 4+5 号和 8+9 号煤的有效解吸量平均值分别为 $3.87 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $2.89 \text{ m}^3/\text{t}$, 保德区块为 $6.4 \text{ m}^3/\text{t}$ 和 $5.73 \text{ m}^3/\text{t}$, 杨家坡区块有效解吸量较小。保德区块平均单煤层单井可采量超过 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$, 杨家坡区块需两煤合层开发, 单井平均总产气量才能超过 $500 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

3.2 断层对煤储层参数的影响

杨家坡区块与保德区块地质条件相比, 发育更多的断层构造。断层对煤储层含气量、渗透率及煤层气开发均有影响^[18]。依据杨家坡区块煤储层特征, 分别剖析断层对煤层含气量、渗透率的影响。

3.2.1 断层对含气量的影响

杨家坡区块断层附近含气量随距离断层距离的变化规律如图 4 所示。

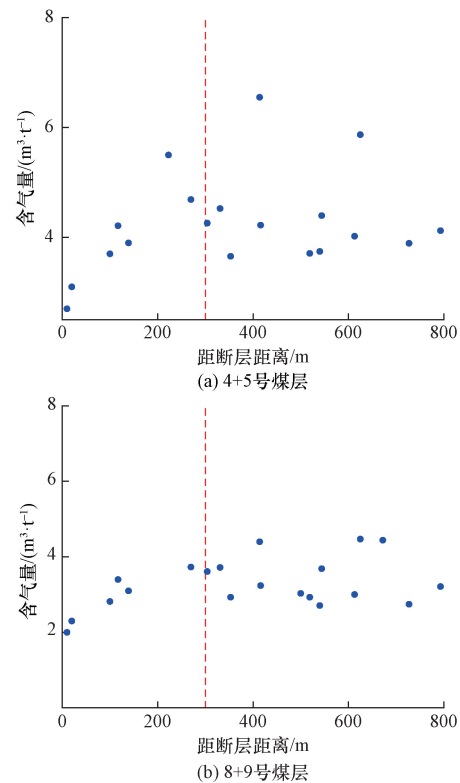


图 4 距断层距离与含气量的关系

Fig. 4 Distance from fault vs the gas content

表 1 两个区块储层条件参数与解吸潜力

Table 1 Reservoir condition parameters and desorption potential of two blocks

区块	煤层	资源丰度/ $(10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	有效解吸量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	单井可采量/ 10^4 m^3
杨家坡	4+5 号	0.25	2.15 ~ 6.14(3.87)	53.04 ~ 352.19(188.05)
	8+9 号	0.83	1.92 ~ 4.91(2.89)	199.42 ~ 644.97(371.72)
保德	4+5 号	0.66	3.10 ~ 9.10(6.40)	255.51 ~ 750.10(527.54)
	8+9 号	0.91	2.43 ~ 8.43(5.73)	284.11 ~ 986.49(670.42)

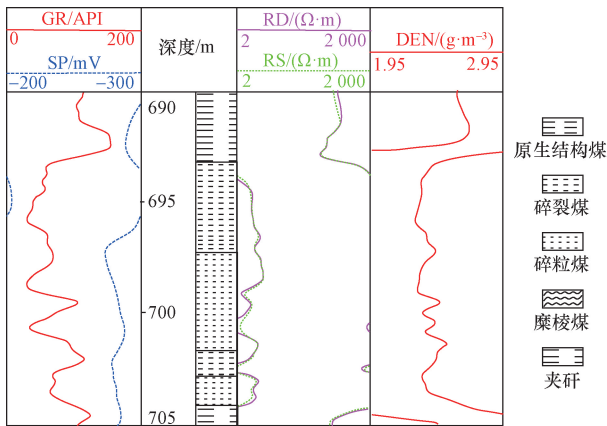
注: 0.7 ~ 7.12(3.16) 表示最小值 ~ 最大值(平均值)。

由图4可知,整体上随着与断层距离的增大,煤层含气量逐渐增大。当距离断层300 m后,断层对含气量的影响较小,可忽略不计。这是由于靠近断裂破碎中心,煤层顶底板封闭性变差,在地下水运移携带作用下逸散;随着距离的增大,封闭性逐渐变好,煤层含气量趋向于正常值。

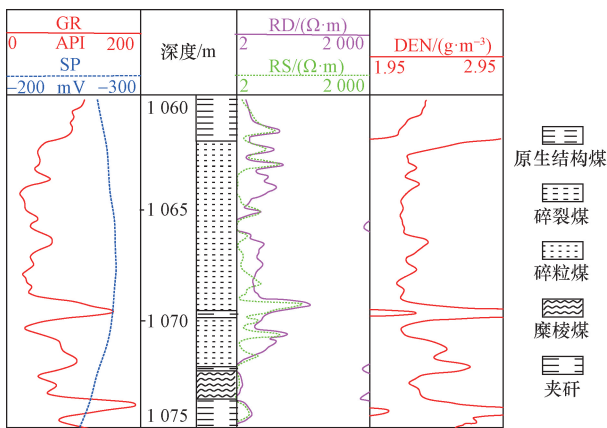
3.2.2 断层对煤体结构的影响

杨家坡区块两口距离断层不同距离的煤层气井8+9号煤层煤体结构判识结果如图5所示。

由图5可知,YJP-06井较YJP-05井8+9号煤层煤体结构破碎,8+9号煤层上部煤体结构好于下部。其中,YJP-6井距F₆断层40 m,YJP-5井距F₅断层较远,分析认为在断层构造的挤压、揉搓作用下煤体结构破碎,随着距离的增大,断层的影响逐渐减弱,直至消失。



(a) YJP-05井8+9号煤层煤体结构



(b) YJP-06井8+9号煤层煤体结构

GR为自然伽玛;SP为自然电位;RD、RS分别为深、浅侧向电阻率;DEN为密度

图5 杨家坡区块典型井煤体结构判识结果

Fig. 5 Coal structure identification results of typical wells in Yangjiapo block

3.2.3 断层对渗透率的影响

杨家坡区块煤储层渗透率随距离断层距离的变化规律如图6所示。

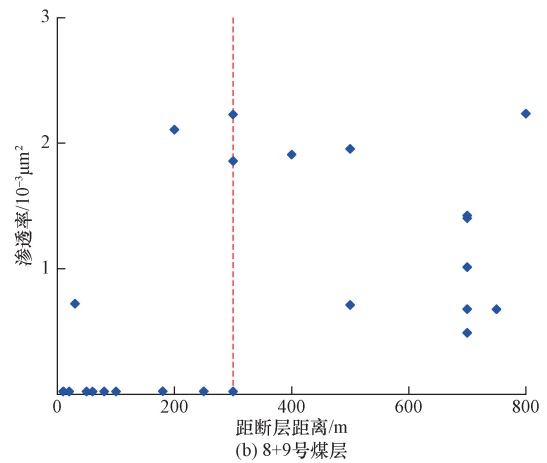
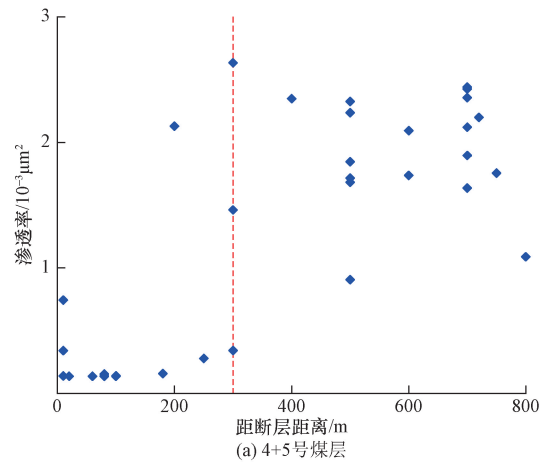


图6 渗透率与距断层距离关系

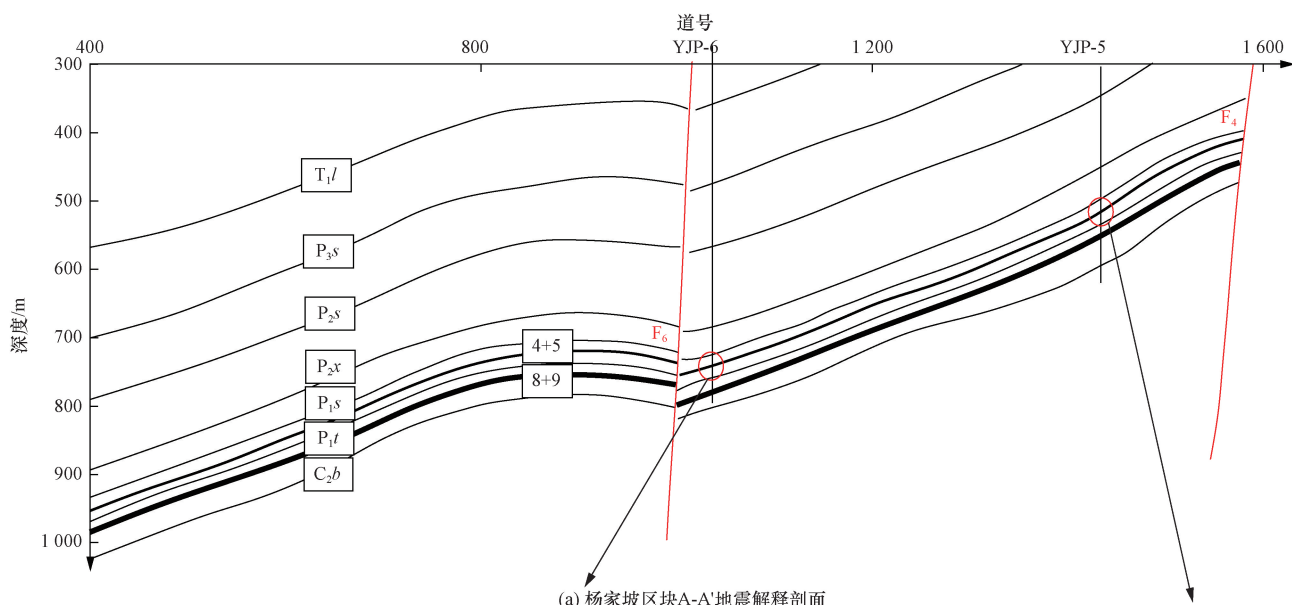
Fig. 6 Distance from fault vs permeability

由图6可知,断层附近煤储层渗透率较低。当距离断层距离大于300 m时,断层对煤储层渗透率影响较小,可忽略不计。分析认为,断层破坏带附近煤体破碎,应力集中,裂隙闭合,储层渗透性差。

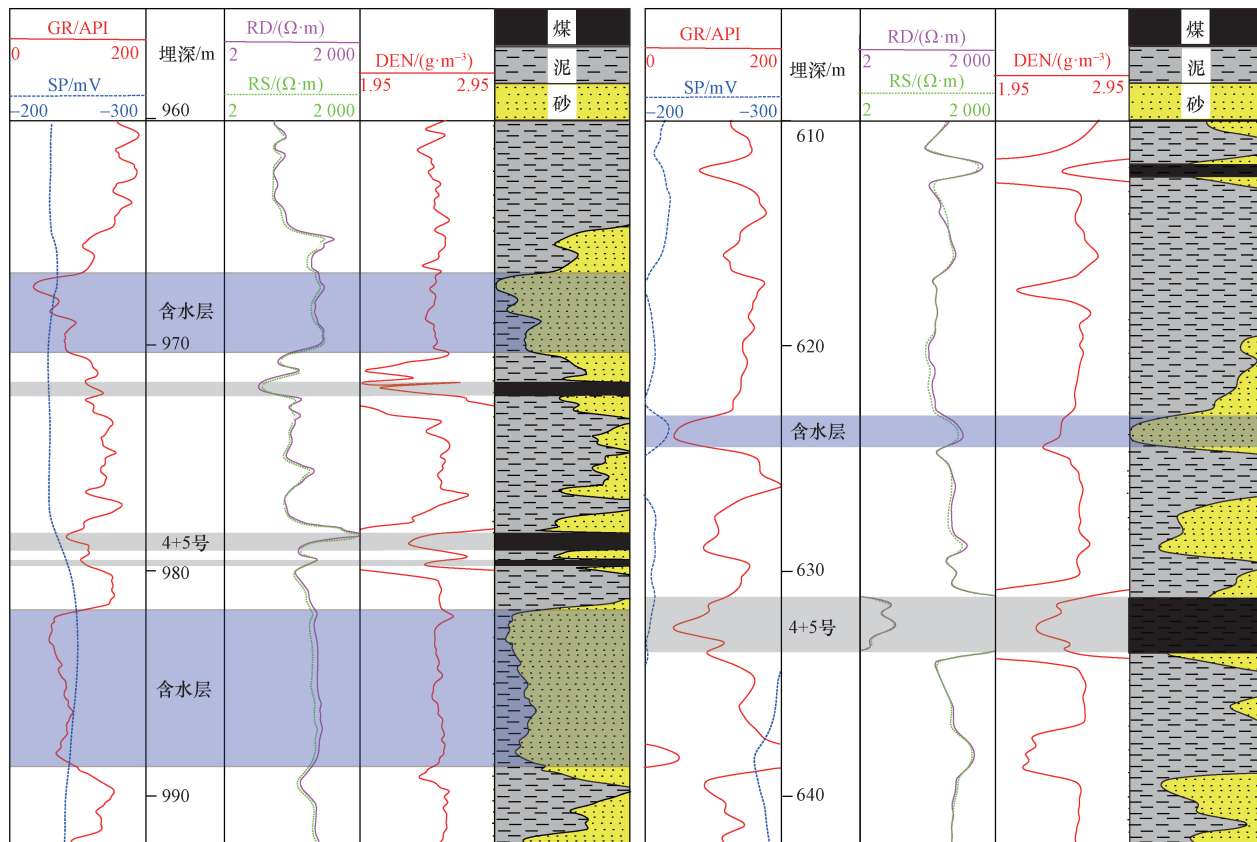
3.3 煤层气井高产水成因

保德区块煤层气井排采水来源为煤层水、压裂液及含水层补给,含水层突破补给与侧向补给是高产水的主要原因^[19]。杨家坡区块目前的煤层气排采井日产水量普遍大于20 m³/d。类比保德区块煤层气井高产水成因,沿剖面A-A'对杨家坡区块煤层气井产水成因进行分析,剖面与排采煤层气井煤层顶底板含水层判识结果如图7所示。

由图7可知,YJP-6井为单采4+5号煤层,距离F₆断层40 m,存在断层沟通含水层的风险,且4+5号煤层顶底板含水层厚度大富水性好,断层沟通含水层向煤层补给,平均产水量为52.99 m³/d,基本不产气。YJP-5井为4+5号与8+9号煤合层排采,距离F₅与F₄断层较远,不存在断层沟通含水层风险,4+5号煤层上部发育较薄的砂岩含水层,8+9号煤层顶板以含水性弱的砂质泥岩,补给能力弱,平均产



(a) 杨家坡区块A-A'地震解释剖面



(b) YJP-6井含水层测井解释结果

(c) YJP-5井含水层测井解释结果

图7 杨家坡区块A-A'地震解释剖面及含水层判识结果

Fig. 7 A-A' seismic interpretation profile and aquifer identification results in Yangjiapo block

水量为 $28.45 \text{ m}^3/\text{d}$, 稳产气量 $1\ 159 \text{ m}^3/\text{d}$ 。杨家坡区块未进行区域排水, 整体产水量较大。煤层顶板砂岩含水层、凹槽区、断层发育区是煤层气井主要的高产水区。

综合以上分析结果, 合层开发是杨家坡区块煤层气增储提产的有效措施手段; 构造与水文条件是

进行煤层气开发地质单元划分方法优化的重点。

4 煤层气开发地质单元划分

4.1 开发地质单元划分方法

煤层气开发地质单元是指三维空间中具有相似地质、资源、储层和开发条件的煤层气地质单元,

可采用类似的工程技术进行开发^[19]。依据上述杨家坡区块煤层气开发难点,优化开发潜力评价体系,叠加合采兼容性评价结果,优化煤层气开发地质单元划分方法,具体方法步骤如图8所示。

(1)评价参数指标体系建立。煤层气产气潜力受多方面因素影响,包括地质条件、资源条件、储层条件、水文条件及合采地质条件等,共同决定了煤层气产出潜力、产出条件、开发条件的相对优劣^[8,13]。基于上述煤层气藏描述结果,分别建立开发潜力与合采兼容性评价体系,如图8所示。

(2)多层次模糊综合评价。采用多层次模糊综合评价法,结合保德区块与邻近区块煤层气开发地质单元划分参数权重赋值经验^[15,17],分别进行4+5号、8+9号煤层开发潜力与两煤层合采兼

容性评价,采用的各参数的权重及评分标准如表2所示。

(3)叠加方法。根据计算结果,煤层气开发潜力以 ≥ 70 、 $65 \sim 70$ 、 < 65 划分为有利区、较有利区和后备区;合采兼容性以 ≥ 70 、 $65 \sim 70$ 、 < 65 划分为较好兼容性、一般兼容性和兼容性较差;在此基础上进行组合叠加,划分了3大类6小类煤层气开发地质单元,如图8所示。

4.2 开发地质单元划分

采用上述煤层气开发地质单元划分方法,划分结果如图9所示。

由图9可以看出,杨家坡区块共划分了3个级别潜力区共6个开发地质单元,其中甜点区3个,包括1个“有利区+有利区+较好兼容性”的I₁类开发

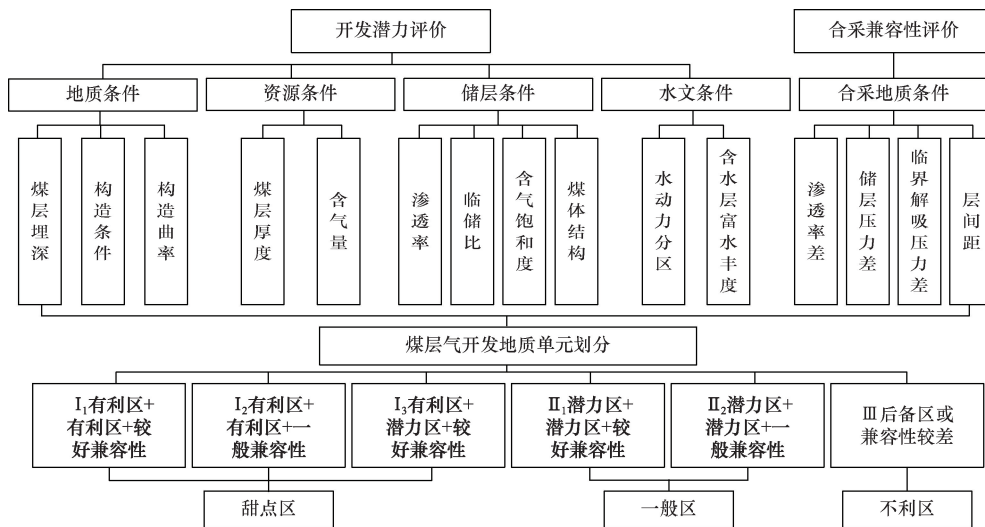


图8 杨家坡区块煤层气开发地质单元划分方法

Fig. 8 Development geological unit division method of coalbed methane in Yangjiapo block

表2 杨家坡区块煤层气开发地质单元参数评分标准

Table 2 Evaluation standard of development geological unit parameters for coalbed methane in Yangjiapo block

评价参数	权重	评价得分				
		100	80	60	40	
地质条件 (0.28)	煤层埋深/m	0.25	>1 100	(900,1 100]	(700,900]	≤700
	构造条件	0.40	构造简单	构造中等	构造较复杂	构造复杂
	构造曲率/10 ⁻⁶	0.35	(-50,50]	(50,200]	>200	≤-50
资源条件 (0.30)	煤层厚度/m	0.40	>8	(5,8]	(3,5]	≤3
	含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	0.60	>7	(5,7]	(3,5]	≤3
储层条件 (0.18)	渗透率/10 ⁻¹⁵ m ²	0.30	>2	(1.50,2]	(1,1.20]	≤1
	临储比	0.30	>0.50	(0.40,0.50]	(0.20,0.40]	≤0.20
	含气饱和度/%	0.20	>70	(60,70]	(50,60]	≤50
水文条件 (0.24)	煤体结构	0.20	原生-碎裂煤	碎裂-碎粒煤	碎粒煤	糜棱煤
	水动力分区	0.60	滞流区	弱径流区	径流区	补给区
合采地质 条件	含水层富水丰度/(m ³ ·m ⁻²)	0.40	≤0.10	(0.10,0.20]	(0.20,0.30]	>0.30
	渗透率差/10 ⁻¹⁵ m ³	0.25	≤0.50	(0.50,1]	(1,1.5]	>1.5
	储层压力差/MPa	0.28	≤0.40	(0.40,0.80]	(0.80,1.20]	>1.20
条件	临界解吸压力差/MPa	0.32	≤0.40	(0.40,0.80]	(0.80,1.20]	>1.20
	层间距/m	0.15	≤50	(50,100]	(100,150]	>150

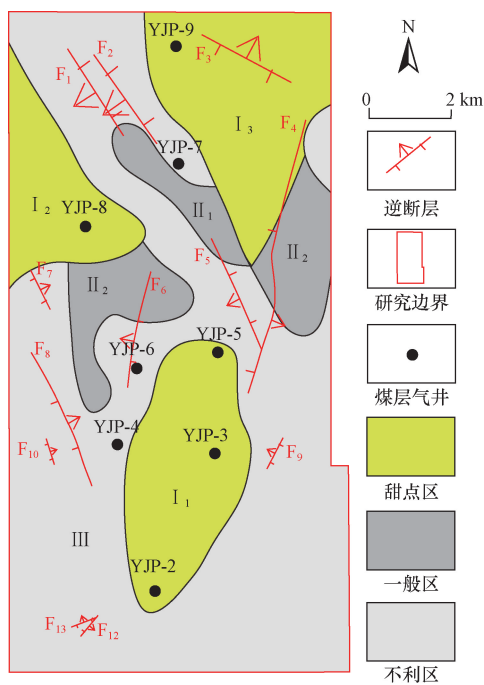


图9 杨家坡区块煤层气开发地质单元划分结果
Fig.9 Development geological unit division results of coalbed methane in Yangjiapo block

地质单元,1个“有利区+有利区+一般兼容性”的I₂类开发地质单元,1个“有利区+潜力区+较好兼容性”的I₃类开发地质单元;“一般区”3个,1个“潜力区+潜力区+较好兼容性”II₁混合的开发地质单元,2个“潜力区+潜力区+一般兼容性”的II₂类开发地质单元;不利区两个,为“后备区或兼容性较差”的III类开发地质单元。可见划分结果反映了杨家坡区块煤层气的产气潜力与合采兼容性,同时为单井施工的开发工艺及开发模式提供了参考,即杨家坡区块中部适合两主力煤层合层开发,西北部的部分区域适合合层开发,东北部则适合采用先开发4+5号煤层再开发8+9号煤层或先开发8+9号煤层,再封堵8+9号煤层开发4+5号煤层的方式进行接替开发。

5 结论

(1)杨家坡区块4+5号与8+9号煤层资源丰度分别为 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 、 $0.83 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,单煤层资源条件较差,部分区域8+9号煤层具备单层开发的资源潜力,主力煤层间合采参数差异较小,具备两煤层合层开发潜力。

(2)杨家坡区块构造较发育、高产水是限制煤层气井高产的主要因素。煤层顶板含水层富水性强,含水层补给是煤层气井产水的主要来源;断层构造发育导致杨家坡区块煤层气资源、产出、可改

造性差,同时增加了沟通含水层的风险。

(3)通过煤层气藏描述,与保德区块潜力类比分析,明确了杨家坡区块煤层气开发难点分析,优化了煤层气开发地质单元划分方法。采用该方法划分了3个级别潜力区共6个开发地质单元,指出杨家坡区块中部适合两主力煤层合层开发,西北部的部分区域适合合层开发,东北部适合接替开发。

参 考 文 献

- [1] 付鑫宇. 临兴杨家坡区块煤层气开发地质条件及可采性评价[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
Fu Xinyu. Geological conditions and recoverability evaluation of coalbed methane in Yangjiapo Block, Linxing [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.
- [2] 徐凤银, 张伟, 李子玲, 等. 鄂尔多斯盆地保德区块煤层气藏描述与提高采收率关键技术[J]. 天然气工业, 2023, 43(1): 96-112.
Xu Fengyin, Zhang Wei, Li Ziling, et al. Coalbed methane reservoir description and enhanced recovery technologies in Baode block, Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(1): 96-112.
- [3] 马晓荷, 谭成仟, 郭泽坤. 博湾盆地M煤层气田含气量主控因素分析及预测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4586-4595.
Ma Xiaohe, Tan Chengqian, Guo Zekun. Analysis and prediction of main controlling factors of gas content in coalbed of M coalfield in Bowen Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(11): 4586-4595.
- [4] 邱峰, 刘晋华, 蔡益栋, 等. 基于测井的煤层力学特性评价及煤层气开发有利区预测—以沁南郑庄区块3号煤层为例[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 46-56.
Qiu Feng, Liu Jinhua, Cai Yidong, et al. Mechanical property evaluation of coal bed and favorable area prediction of coalbed methane (CBM) development based on well logging: a case study of No. 3 coalbed in Zhengzhuang Block, southern Qinshui Basin [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(4): 46-56.
- [5] 高玉巧, 李鑫, 何希鹏, 等. 延川南深部煤层气高产主控地质因素研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 21-27.
Gao Yuqiao, Li Xin, He Xipeng, et al. Study on the main controlling geological factors of high yield deep CBM in Southern Yanchuan Block [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 21-27.
- [6] 闵超, 代博仁, 石咏衡, 等. 基于聚类匹配的煤层气压裂效果主控因素识别[J]. 特种油气藏, 2022, 29(4): 135-141.
Min Chao, Dai Boren, Shi Yongheng, et al. Identification of main controlling factors of coalbed methane fracturing effect based on cluster matching [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(4): 135-141.
- [7] 于国栋, 鞠玮, 杨兆彪. 大宁—吉县地区5号煤层现今地应力预测及其对煤层气开发的影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(13): 5286-5295.
Yu Guodong, Ju Wei, Yang Zhaobiao. Prediction of present-day *in-situ* stress in the No. 5 coal seam of Daning-Jixian area: implications for coalbed methane development [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(13): 5286-5295.
- [8] 闫涛滔, 邓志宇, 吴鹏, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴东区杨家

- 坡区块煤层气井产能特征及主控因素[J]. 现代地质, 2024, 38(6): 1545-1556.
- Yan Taotao, Deng Zhiyu, Wu Peng, et al. Characteristics and main control factors of coalbed methane well productivity in Yangjiapo Block of Eastern Linxing district, Eastern Ordos Basin[J]. Geoscience, 2024, 38(6): 1545-1556.
- [9] 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.
- [10] Fu X Y, Meng Y J, Li Z C, et al. Coalbed methane potential evaluation and development sweet spot prediction based on the analysis of development geological conditions in Yangjiapo Block, Eastern Ordos Basin, China[J]. Geofluids, 2021, 2021: 8728005.
- [11] 郭晓娇, 刘之的, 刘桂珍, 等. 鄂东 X 区 8 号煤层构造演化及控藏作用分析[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(29): 12431-12441.
- Guo Xiaojiao, Liu Zhidi, Liu Guizhen, et al. Analysis of structural formation evolution and reservoir control effect of No.8 coal seam in X area, eastern Ordos Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(29): 12431-12441.
- [12] 闫霞, 徐凤银, 张雷, 等. 微构造对煤层气的控藏机理与控产模式[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 893-905.
- Yan Xia, Xu Fengyin, Zhang Lei, et al. Reservoir-controlling mechanism and production-controlling patterns of microstructure to coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(2): 893-905.
- [13] 倪小明, 王延斌, 韩文龙, 等. 煤层气开发地质单元划分与应用实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2562-2574.
- Ni Xiaoming, Wang Yanbin, Han Wenlong, et al. Division and application of development geological units for coalbed methane[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2562-2574.
- [14] 杜丰丰, 倪小明, 张亚飞, 等. 寿阳区块煤层气田的水文控藏模式及控产特征[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 177-188.
- Du Fengfeng, Ni Xiaoming, Zhang Yafei, et al. Hydrological control mode and production characteristics of coalbed methane field in Shouyang Block[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(10): 177-188.
- [15] 郭晨, 秦勇, 易同生, 等. 煤层气合采地质研究进展述评[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 42-57.
- Guo Chen, Qin Yong, Yi Tongsheng, et al. Review of the progress of geological research on coalbed methane co-production[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 42-57.
- [16] 韦波, 马君慧, 胡永, 等. 大倾角储层煤层气多层合采产量控制地质与工程因素[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13350-13360.
- Wei Bo, Ma Junhui, Hu Yong, et al. Geological and engineering controlling factors of multi-layer combined production capacity of steeply inclined coal reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(31): 13350-13360.
- [17] 张雷, 徐凤银, 李子玲, 等. 煤层气田单/合层开发影响因素分析及应用——以保德区块为例[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 68-77.
- Zhang Lei, Xu Fengyin, Li Ziling, et al. Analysis on influencing factors of single/multi-layer development of coalbed methane field: a case study of Baode Block[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 68-77.
- [18] 韩文龙, 王延斌, 倪小明, 等. 正断层发育特征对煤层气直井开发的影响——以沁水盆地南部柿庄南区块为例[J]. 煤炭学报, 2020, 45(10): 3522-3532.
- Han Wenlong, Wang Yanbin, Ni Xiaoming, et al. Influence of normal development faults characteristics on the exploitation of vertical coal-bed methane wells: a case study of the Shizhuang Block in the south of Qinshui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(10): 3522-3532.
- [19] 张庆丰, 张继坤, 李子玲, 等. 煤系含水层及多煤层合采水来源判别方法——以山西保德区块为例[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(1): 115-126.
- Zhang Qingfeng, Zhang Jikun, Li Ziling, et al. Identifying methods for coal measure aquifers and multi-coal seam commingled drainage water sources: a case study of the Baode block in Shanxi Province[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 115-126.