

复杂断陷盆地深层煤岩气地质特征、有利成藏因素及发育模式

——以渤海湾盆地大港探区为例

周立宏¹, 陈长伟¹, 韩国猛¹, 李宏军¹, 崔宇^{1,2}, 董晓伟¹, 宋舜尧¹, 蒲秀刚¹, 刘国全¹, 甘华军²

[1. 中国石油大港油田分公司, 天津 300280; 2. 中国地质大学(武汉) 高等研究院, 湖北 武汉 430074]

摘要:近年来, 深层煤岩气勘探逐渐成为热门的非常规勘探领域, 中国深层煤岩气的勘探主要集中在鄂尔多斯盆地, 勘探与开发先导试验取得了重要突破, 渤海湾盆地深层煤岩气勘探尚处于起步阶段。通过煤层岩心、测井和录井等地质资料, 系统分析了大港探区上古生界深层煤层特征和有利成藏因素等, 剖析了深层煤层生气、存储和保存机制, 明确了上古生界深层煤岩气的发育模式。研究认为: ①大港探区上古生界深层煤岩气发育多套有利的甜点层段, 煤层有机质丰度高, 演化程度中等, 生气强度较大。②煤层具有多尺度孔缝结构, 密集微裂缝规模发育提供了有效的储集空间。③煤层顶、底板以泥岩为主, 保存条件较好。④受多期构造运动影响, 煤层两次规模生气, 复杂断陷背景下存在煤层风化-降解带、饱和吸附带和构造成藏带, 深层煤层具有“超饱和”含气特征, 煤层吸附气与游离气并存。据此建立了复杂断陷盆地深层煤岩气复式聚集发育模式, 大港探区上古生界深层煤岩气理论研究与勘探实践对于渤海湾盆地深层煤岩气的勘探开发具有重要的指导与借鉴意义。

关键词:地质特征; 有利成藏因素; 发育模式; 深层煤岩气; 上古生界; 大港探区; 渤海湾盆地

中图分类号: TE132.2

文献标识码: A

Geological characteristics, favorable accumulation factors, and developmental models of deep coal-rock gas in complex fault-bounded basins: A case study of the Dagang exploration area in the Bohai Bay Basin

ZHOU Lihong¹, CHEN Changwei¹, HAN Guomeng¹, LI Hongjun¹, CUI Yu^{1,2}, DONG Xiaowei¹, SONG Shuniao¹, PU Xiugang¹, LIU Guoquan¹, GAN Huajun²

[1. Dagang Oil Company, PetroChina, Tianjin 300280, China; 2. Institute of Advanced Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China]

Abstract: In recent years, deep coal-rock gas has gradually become a popular target for the exploration of unconventional hydrocarbons. In China, the deep coal-rock gas exploration is concentrated in the Ordos Basin, where breakthroughs in the exploration and production pilot tests have been achieved. In contrast, the exploration of deep coal-rock gas in the Bohai Bay Basin remains in its initial stage. Using geologic data of coal seams obtained from core observations and well logging, we systematically analyze the characteristics and favorable accumulation factors of the deep Upper Paleozoic coal seams in the Dagang exploration area. Furthermore, the mechanisms underlying the gas generation, storage, and preservation in deep coal seams are explored and the developmental model of the deep Upper Paleozoic coal-rock gas is thereby clarified. The results indicate that the Dagang exploration area contains multiple favorable sweet spot intervals for the deep Upper Paleozoic coal-rock gas occurrence, where the coal seams exhibit high organic matter abundance, moderate thermal maturity, and high gas-generating intensity. In terms of pore structure, these coal seams manifest multi-scale pores and fractures, with the large-scale, intensively distributed microfractures providing effective storage spaces. The roofs and floors of the coal seams are

收稿日期: 2024-04-18; 修回日期: 2024-11-04。

第一作者简介: 周立宏(1968—), 男, 博士、教授级高级工程师, 油气勘探研究与生产管理。E-mail: zhouli@petrochina.com.cn。

通信作者简介: 崔宇(1988—), 男, 博士研究生、高级工程师, 油气成藏综合研究。E-mail: dg_cuiyu@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油油气与新能源分公司重点科技项目(2023YQX10103)。

composed predominately of mudstones, creating favorable preservation conditions. The coal seams experienced two large-scale gas-generating processes under the influence of multistage tectonic movements. Against the backdrop of complex fault-bounded depressions, the coal seams exhibit weathering-degradation zones, saturated adsorption zones, and structural hydrocarbon accumulation zones, with its deep parts characterized by supersaturated gas-bearing properties and coexistence of adsorbed and free gas. Based on these findings, we establish a developmental model for the complex accumulation of deep coal-rock gas in a complex fault-bounded basin. The theoretical research and exploration practices of the deep Upper Paleozoic coal-rock gas in the Dagang exploration area serve as a significant guide and reference for the exploration and development of deep coal-rock gas in the Bohai Bay Basin.

Key words: geological characteristics, favorable accumulation factors, developmental model, deep coal-rock gas, Upper Paleozoic, Dagang exploration area, Bohai Bay Basin

引用格式:周立宏,陈长伟,韩国猛,等.复杂断陷盆地深层煤岩气地质特征、有利成藏因素及发育模式——以渤海湾盆地大港探区为例[J].石油与天然气地质,2024,45(6):1665–1677. DOI:10.11743/ogg20240613.

ZHOU Lihong, CHEN Changwei, HAN Guomeng, et al. Geological characteristics, favorable accumulation factors, and developmental models of deep coal-rock gas in complex fault-bounded basins: A case study of the Dagang exploration area in the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024,45(6):1665–1677. DOI:10.11743/ogg20240613.

中国煤层气勘探开发已进行40余年,中、浅层煤层气勘探已经实现工业化开发,沁水盆地和鄂尔多斯盆地建成了多个煤层气生产中心^[1-2],但随着浅部煤层气资源量和开发有利区数量不断减少,煤层气勘探开发逐渐向深部转移,近年在鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系和新疆白家海地区侏罗系深部煤岩气勘探获得成功^[3-5],成为未来煤岩气勘探的重要方向。深层煤岩气一般指埋藏深度大于2 000 m的煤层所蕴含的甲烷气体。目前对于深部煤岩含气性和富集规律等方面的研究取得了初步的成果,基于高温、高压等温吸附实验,考虑煤阶、温度和压力的影响,初步构建深部低阶煤层吸附-溶解-游离气含量的综合预测模型;借鉴浅部评价体系,建立了深层煤层气成藏耦合效应三元模型,明确了典型盆地深层煤层气赋存模式^[6-8],但对深层煤岩地质特征、富集成藏主控因素等方面研究较少,仍处于起步阶段。

渤海湾盆地和鄂尔多斯盆地同处华北地台,上古生界具有相似的成煤背景^[9-12],发育含煤地层,主要分布在石炭系太原组和二叠系山西组。大港探区目前未对石炭系-二叠系煤层开展针对性钻探工作,只是以奥陶系为目的层探井钻遇过石炭系-二叠系煤层,钻井过程中气测录井指标显示其具有良好的含气性^[13-15],一直以来普遍被视为上古生界区域性烃源岩层,其煤岩气相关方面的研究仍处于空白区。大港探区所覆盖的黄骅坳陷、沧县隆起(部分)和埕宁隆起(部分)是渤海湾盆地发育石炭系-二叠系煤层的典型代表区域,通过解剖其煤层特征,分析其有利成藏因素,构建复杂断陷盆地深层煤岩气的发育模式,对于渤海

湾盆地复杂断陷构造区深层煤岩气的勘探与成藏研究具有重要的指导意义。

1 地质概况

大港探区位于渤海之滨,包含黄骅坳陷、沧县隆起(部分)和埕宁隆起(部分)3个一级构造单元,面积约为 $1.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[16-17]。石炭系-二叠系沉积时期,华北地区自奥陶纪中、后期发生海退上升为陆地之后,至晚石炭世才重新下降接受沉积,期间随着海平面的频繁升降,海-陆变迁明显,陆地森林首次大规模出现,成为中国地史上第一个重要的聚煤期。及至晚二叠世,印支运动时期,黄骅坳陷所处的华北地台再次抬升,历经印支期、燕山期及喜马拉雅期等多期构造运动,石炭系-二叠系多次受到抬升剥蚀影响,形成了现今残余分布的形态格局^[18-21]。综合大港探区内探井和地震等资料分析判断,现存石炭系-二叠系煤系地层面积可达9 600 km²,埋深主要介于2 000~5 000 m,具有较大的深层煤岩气勘探潜力。石炭系-二叠系自下而上发育石炭系本溪组和太原组、二叠系山西组、石盒子组及石千峰组,其中石炭系太原组和二叠系山西组为主要的聚煤期^[22-23](图1)。

2 煤层地质特征

2.1 沉积环境特征

山西组和太原组主要发育陆表海背景下的三角洲相沉积和碳酸盐台地-障壁岛体系沉积,岩性以灰色、

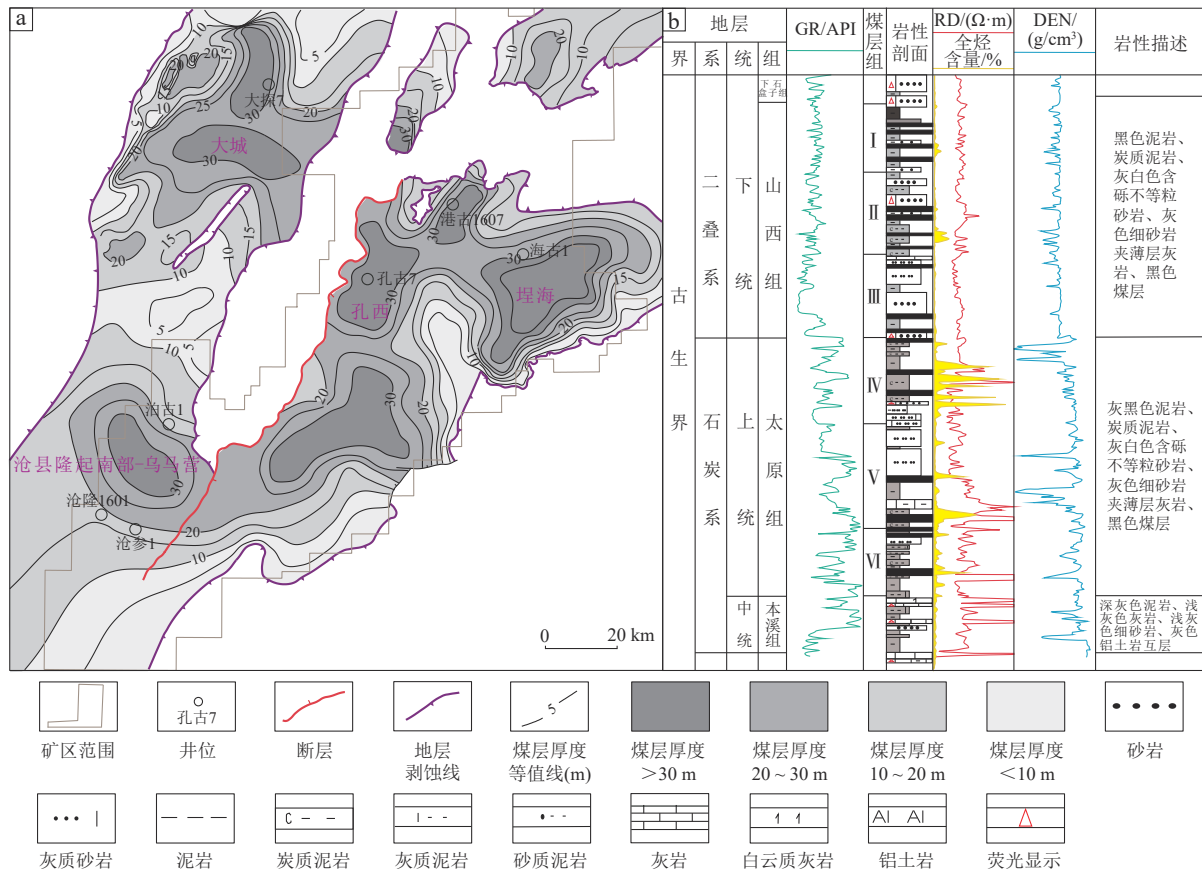


图1 渤海湾盆地大港探区石炭系-二叠系煤层总厚度等值线图(a)和煤系地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Isopach map of the Carboniferous-Permian coal seams (a) and composite stratigraphic column of coal measures (b) in the Dagang exploration area in the Bohai Bay Basin

灰白色中-细砂岩、灰-灰黑色泥岩、黑色炭质泥岩及煤层为主,部分井可见薄层灰岩。

太原组整体为障壁岛-潟湖沉积体系,在纵向上,底部主要发潮道相和潟湖相,上部主要发育潮坪相,局部层位发育潟湖相及潮道相,煤层主要发育于潟湖、泥炭坪和潮坪泥炭坪环境中。潟湖泥炭坪分布较广泛,可与岛后泥炭坪和潮坪泥炭坪连接,而且受海水进退及水深的影响,泥炭坪可与潮坪泥炭坪连接,因此,障壁海岸成煤环境可形成大面积分布、层位稳定和厚度较大的煤层(图2a)。

石炭纪末,受海西运动的影响,华北板块整体抬升,海水沿东南方向退出,大港探区结束了海相沉积,进入陆相沉积阶段,山西组主要发育三角洲相沉积,在纵向上,中、下部主要发育三角洲前缘的水下分流河道和分流间湾沉积,上部主要发育三角洲平原的分流河道和泛滥平原沉积,其中泛滥平原泥炭沼泽是煤层主要发育部位,形成三角洲平原泥炭沼泽成煤模式,由于泛滥平原沼泽受水上分流河道及决口扇的影响,煤层厚度相对较薄,分布相对局限,稳定性较差(图2b)。

2.2 煤层空间分布特征

在山西组和太原组煤层沉积模式指导下,同时运用测井手段系统开展大港探区内上古生界煤层识别,精细落实煤层空间展布。煤层在测井曲线上具有高声波时差(AC)、高补偿中子孔隙度(CN)、高电阻率(RT)、低自然伽马值(GR)、低补偿密度(DEN)和低光电吸收截面指数(PE)的特征,GR值介于15~35 API,声波时差介于300~450 μs/m,补偿中子孔隙度大于50%,补偿密度介于1.20~1.80 g/cm³,光电吸收截面指数介于0.15~0.20 b/e,电阻率大于100 Ω·m,与同层系的炭质泥岩、泥岩和砂岩有明显不同(表1)。

2.2.1 煤层纵向分布特征

井间对比揭示太原组及山西组发育多套煤层,可划分为6个煤组。其中太原组自上而下发育3个煤组,煤层数量10~15层,单层厚度2.0~6.5 m,累计厚度25.0~35.0 m;山西组自上而下发育3个煤组,煤层数量8~10层,单层厚度1.0~4.0 m,累计厚度15.0~20.0 m,单层厚度及累计厚度均小于太原组。与鄂尔

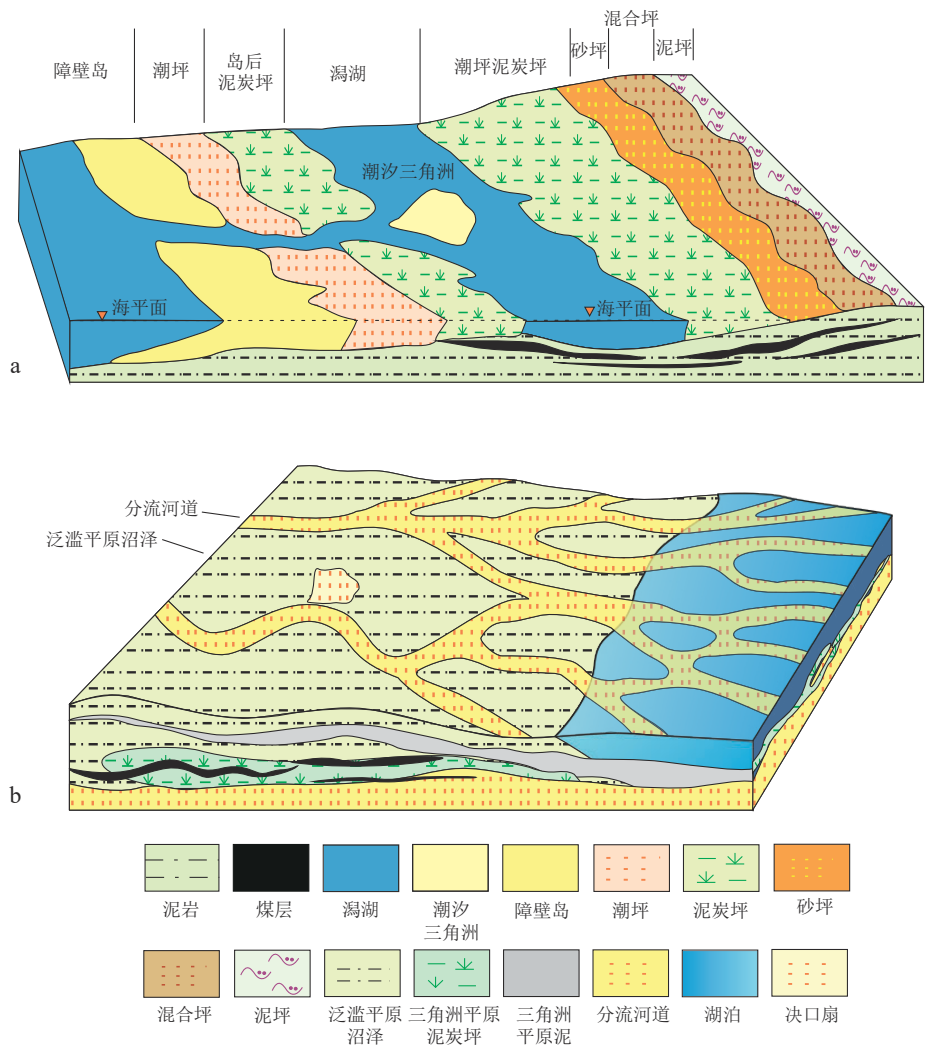


图2 大港探区上古生界碳酸盐岩台地-障壁岛体系(a)和三角洲相(b)煤层发育模式

Fig. 2 Developmental models of coal seams in the Upper Paleozoic carbonate platform-barrier island system (a) and of the deltaic facies (b) in the Dagang exploration area

表1 大港探区石炭系-二叠系不同岩性测井解释识别标志数据

Table 1 Log interpretation of varying Carboniferous-Permian lithologies in the Dagang exploration area

岩性	自然伽马值/API	声波时差/(μ s/m)	补偿中子孔隙度/%	补偿密度/(g/cm ³)	光电吸收截面指数/(b/e)	电阻率/(Ω ·m)
煤	15 ~ 35	300 ~ 450	>50	1.20 ~ 1.80	0.15 ~ 0.20	>100.0
炭质泥岩	60 ~ 140	250 ~ 450	>40	1.80 ~ 2.30	2.00 ~ 3.45	0.3 ~ 10.0
泥岩	70 ~ 140	240 ~ 350	30 ~ 80	2.25 ~ 2.65	3.40 ~ 3.45	0.3 ~ 10.0
砂岩	30 ~ 85	175 ~ 280	10 ~ 35	2.40 ~ 2.80	1.80 ~ 1.84	10.0 ~ 200.0

多斯盆地相比,大港探区煤单层厚度较薄(一般1.0 ~ 2.0 m),但煤层数多(10 ~ 13层),累计厚度大(20.0 ~ 30.0 m)。

2.2.2 煤层横向分布特征

大港探区内石炭系-二叠系残余地层分布总体具有北薄、南厚的特征,北区残余地层厚度总体在200 m以下;在中区的埕海地区上古生界保存较为完整,大部

分地区的残余地层厚度在600 m以上,而在海古1、海古101和埕海1井地区,上古生界基本未遭受剥蚀,地层厚度最厚可达900 m以上;南区上古生界地层厚度区连片发育,孔店、王官屯、徐黑、乌马营和沧县隆起地区均发育有残余地层厚度在800 m以上的区域,其中乌马营地区为最厚地层的发育区,厚度在1 000 m以上,向埕宁隆起和沧县隆起方向,地层剥蚀程度不断增加,残余地层厚度逐渐减小。煤层分布与石炭系-二叠系分布具有

一致性,存在埕海和沧南-乌马营2个聚煤中心。埕海聚煤中心煤层累计厚度26.0~32.0 m,主要在太原组集中发育,累计厚度20.0 m,其中六煤组煤层横向分布最为稳定,厚度最大,最大单煤层厚度6.2 m(图3);沧南-乌马营煤层累计厚度15.0~27.0 m,太原组四煤组较为集中发育,煤层分布稳定,最大单煤层厚度5.2 m(图4)。总体上,太原组煤层横向分布连续性优于山西组煤层。

2.3 煤系气成藏特征

大港探区前期没有专门针对上古生界煤层进行过钻井活动,但已发现规模源外煤成气藏和少量煤岩气藏。

2.3.1 源外煤成气藏

源外煤成气藏是指上古生界煤系烃源岩生成的煤成气运移出源岩在附近的储层中聚集形成的气藏。早在1999年,乌马营潜山乌深1井就发现奥陶系风化壳潜山气藏,奥陶系峰峰组埋深5 460~5 496 m,测试日产气 $13.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,天然气以甲烷为主,占比超过98%,同位素证实天然气源自煤系烃源岩,后又陆续发现王官屯潜山奥陶系气藏、埕海潜山奥陶系气藏、乌马营潜山二叠系砂岩气藏和歧北潜山奥陶系气藏等多个煤层

天然气藏,累计发现储量 $952 \times 10^8 \text{ m}^3$,展现了煤系烃源岩良好的生气能力^[11]。生气模拟表明,黄骅坳陷上古生界煤系烃源岩总生气量约为 $42 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中煤层贡献最大,总生气量约为 $19 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其次为炭质泥岩和暗色泥岩^[12]。

2.3.2 煤岩气藏

20世纪90年代于沧县隆起钻探沧参1井,钻遇山西组和太原组煤系地层165.0 m,钻遇煤层共计9层,累计厚度达18.2 m,单层最大厚度4.0 m,煤层见明显气测异常,气测全烃含量最高值23%。针对太原组埋深1734.6~1742.1 m煤层进行小型压裂试验,压裂液量 305.0 m^3 ,加砂量 6.9 m^3 ,共排液量 136.0 m^3 ,最高日产气量 683.0 m^3 ,全部为甲烷气。由于当时条件限制,并没有进行深度排液;2015年,在北大港潜山构造带探索奥陶系含油气性,钻探港古1507井,受断层影响仅钻遇太原组80 m,未钻遇山西组。累计钻遇太原组煤层6层,累计厚度9.4 m,单层最大厚度3.0 m。针对太原组埋深2 079.9~2 105.9 m煤层进行试油,日产油量可达33.1 t,日产气量 $3 730 \text{ m}^3$,油气地化分析表明天然气源自石炭系-二叠系^[21]。沧参1井和港古1507井两口井的成功表明黄

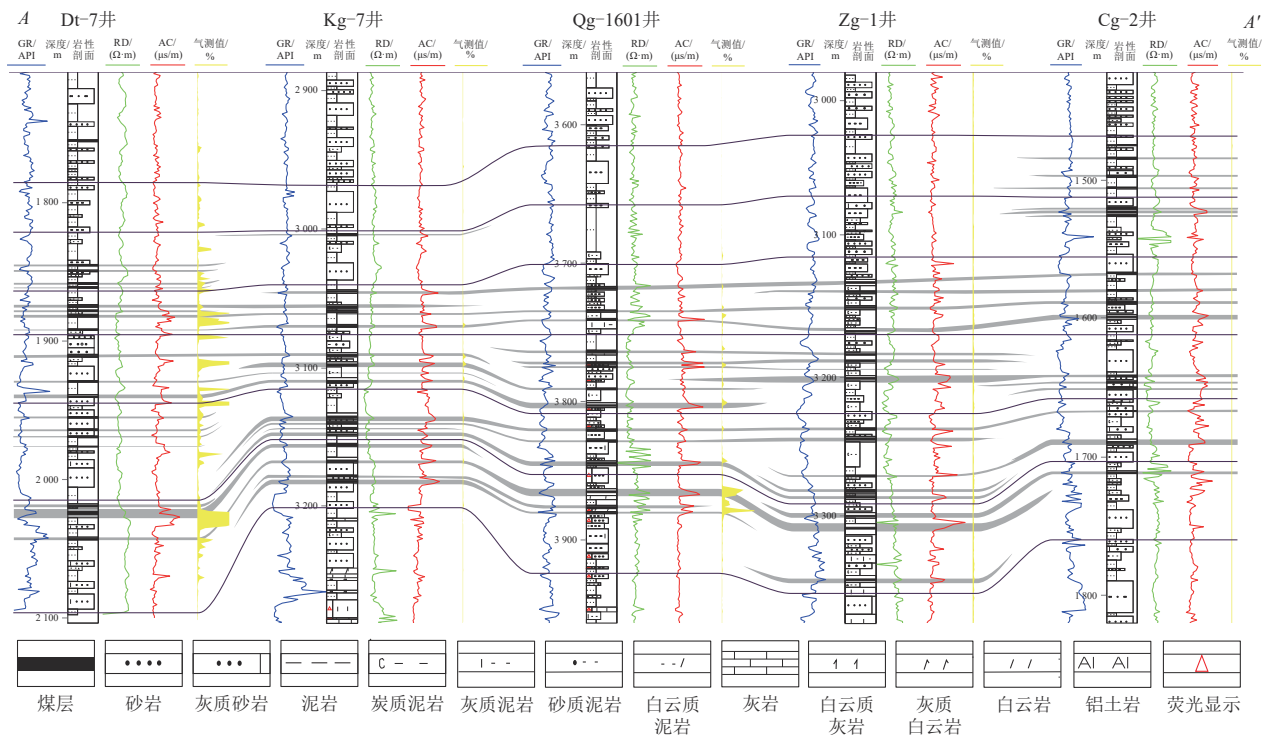


图3 大港探区埕海聚煤中心山西组和太原组煤层横向对比剖面

Fig. 3 Well-correlation section showing coal seams in the Shanxi and Taiyuan formations within the Chenghai coal accumulation center in the Dagang exploration area

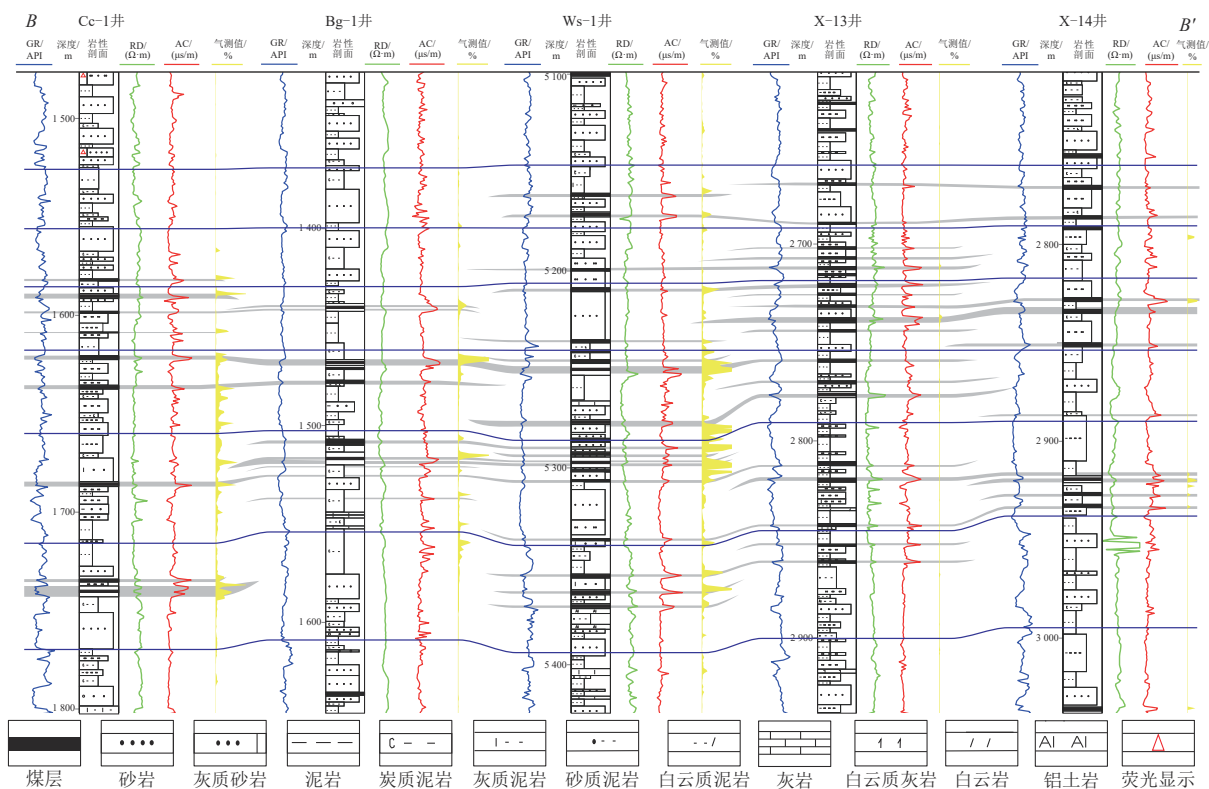


图4 大港探区沧南-乌马营聚煤中心山西组和太原组煤层横向对比剖面

Fig. 4 Well-correlation section showing coal seams in the Shanxi and Taiyuan formations within the Cangnan-Wumaying coal accumulation center in the Dagang exploration area

骅坳陷煤岩气已成藏,只是当时认识有限,并未引起足够的重视。

3 煤岩气有利成藏条件

3.1 煤层源岩品质好,生气能力强

大港探区石炭系-二叠系煤层形成于咸化-还原环境,岩心观察主要以暗煤、半暗煤和半亮煤为主(图5a,b),有机质类型以Ⅱ₂-Ⅲ型为主,部分为Ⅱ₁-Ⅰ型,煤层显微组分以镜质组为主(图5c-f),含量68.45%~85.82%;含少量壳质组,含量1.94%~2.13%,与鄂尔多斯盆地相当(表2)。镜质组主要为结构镜质体、均质镜质体和基质镜质体,其中均质镜质体占比最高,达到51%,有利于生气。煤层总有机碳含量(TOC)平均值为56.5%,生烃潜量(S_1+S_2)平均值为107.2 mg/g、氯仿沥青“A”含量平均值为0.9825 mg/g,总烃含量为 $(134 \sim 856) \times 10^{-6}$,具有高TOC和高生烃潜量等特征,根据1996年黄第藩含煤地层烃源岩有机质丰度评价标准,评价为好-极好烃源岩,具有较强的生气能力。黄骅坳陷大规模源外煤成气藏的发现为煤

层生气能力强最有力的证据。

钻井过程中,气测显示可以在一定程度上反映煤层的含气性。煤岩的气测值高低与煤层的厚度和演化程度有关。煤层厚度越大,其气测全烃含量异常值通常越高;而煤层演化程度越高,气测全烃含量异常值亦随之升高。根据钻井过程中气测录井数据的分析,大港探区石炭系-二叠系煤层普遍表现出气测异常,异常值介于0.5%~83.0%。相较于邻近的泥岩或者炭质泥岩,基峰比一般可达3或更高。研究还发现,存在埕海中-低断阶、沧县隆起南段-乌马营和北大港3个气测高值区。统计分析显示,煤层埋深每增加1 000 m,录井气测值可提升10%,如乌深1井太原组上段埋深5 000 m,气测值高达83%(图3)。

3.2 煤层具有多尺度孔缝结构,密集微裂缝规模发育

煤层在煤化作用过程中,总体以微孔和介孔的增加为主,同时发育割理和裂缝。因此,深部煤层储层发育典型的多重孔-缝系统,具有极强的非均质性,且不同变质程度煤层储层的孔、缝发育差异较大^[25-26]。通过岩心观察、全直径CT扫描、微米CT扫描、扫描电镜和核磁共振等技术手段,明确大港探区石炭系-二叠

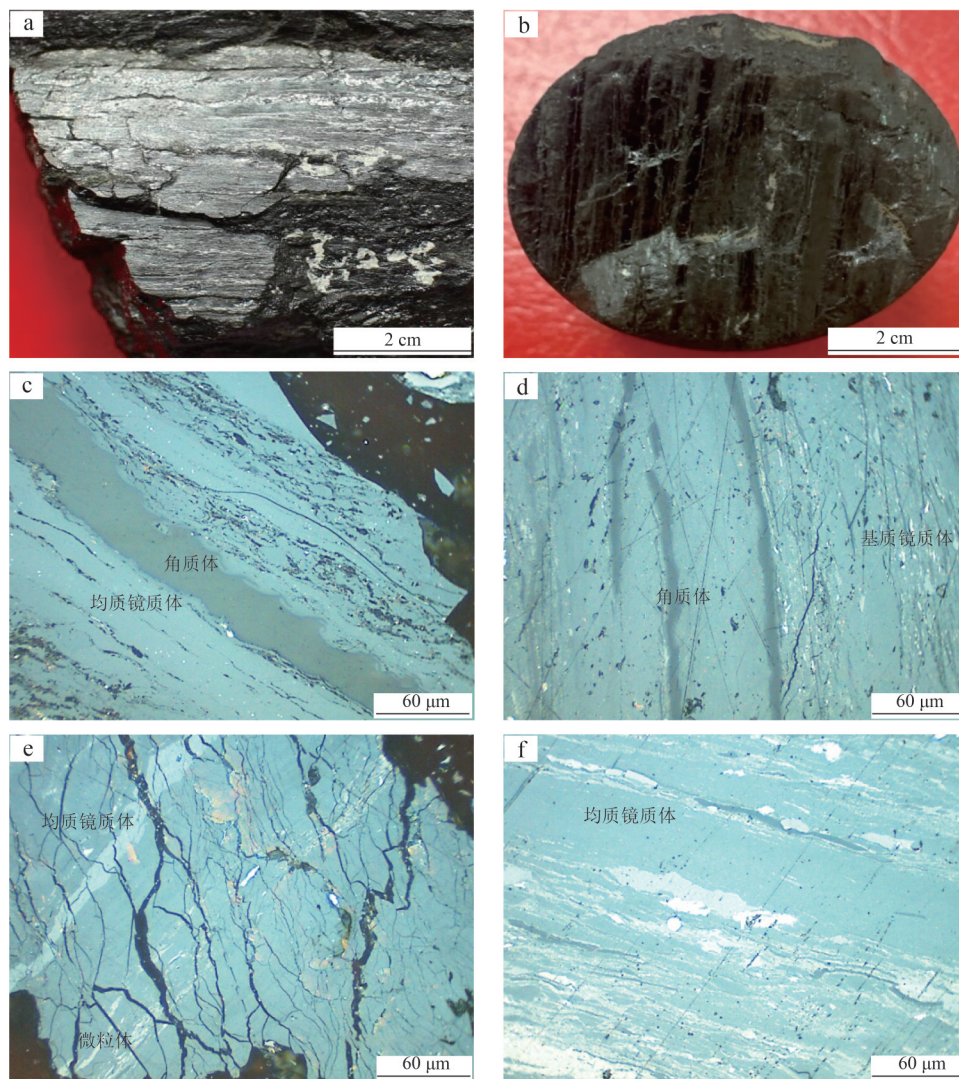


图5 大港探区石炭系煤层品质特征照片

Fig. 5 Images showing the quality characteristics of the Carboniferous coal seams in the Dagang exploration area

a. 港古16102井,六煤组,埋深2 223.89 m,半亮煤,岩心;b. 官探1H井,二煤组,埋深3 654.00 m,半暗煤,岩心;c. 官探1H井,二煤组,埋深3 655.40 m,均质镜质体、角质体,普通薄片;d. 官探1H井,四煤组,埋深3 711.00 m,基质镜质体、角质体,普通薄片;e. 官探1H井,四煤组,埋深3 711.00 m,均质镜质体、微粒体,普通薄片;f. 官探1H井,六煤组,埋深3 818.00 m,均质镜质体、微粒体,普通薄片

表2 渤海湾盆地与鄂尔多斯盆地煤层显微组成数据对比

Table 2 Comparison of data on the compositions of coal seams between the Bohai Bay and Ordos basins

盆地	区块	显微组分含量/%			
		镜质组	惰质组	壳质组	矿物质
渤海湾	黄骅	68.45 ~ 85.82/78.30	2.00 ~ 28.79/13.50	1.94 ~ 2.13/2.04	0.42 ~ 3.60/2.80
	冀中	72.63 ~ 81.00/76.50	7.54 ~ 21.60/16.20	0.80 ~ 13.64/7.30	1.20 ~ 6.80/3.80
	保德	67.30	9.50	21.30	1.90
鄂尔多斯	大宁—吉县	43.70 ~ 86.80/64.00	11.20 ~ 40.40/19.41	—	10.60 ~ 32.00/18.57
	韩城	46.47 ~ 87.54/76.94	6.54 ~ 35.21/15.39	—	1.15 ~ 18.32/7.38
	柳林	77.30 ~ 77.70	17.80 ~ 21.20	<1.00	—
	临兴—神府	52.90 ~ 86.20/67.80	8.80 ~ 37.60/23.10	0.80 ~ 12.00/4.30	0.80 ~ 12.00/4.10
	石楼南	74.90 ~ 84.90/80.50	15.10 ~ 25.20/19.20	—	6.20 ~ 22.80/14.80

系煤层储集空间以孔、缝为主,纳米级分子间孔、组织孔及气孔是气体主要的赋存空间,微米级和毫米级裂

缝为气体运移提供了重要的渗流通道。

岩心观察煤层微裂缝、割理发育,港古16102井镜

煤条带断面内可见面割理,线密度约1.2条/cm,端割理较发育,线密度约6条/cm(图6a,b);官探1H井山西组二煤组全直径CT扫描煤层开放裂缝率可达0.97%,太原组四煤组微米CT扫描裂缝宽度1~200 μm 、裂缝率0.40%~2.00%,孔隙以组织孔和气孔发育为主,孔宽几十纳米到微米级(图6c—h)。

煤层测井孔隙度主要位于3%~5%区间内。沧隆1601煤样核磁共振谱峰呈双峰形态,表明煤储层以发育基质孔及缝洞为主;埕古2井和港古16102井液氮吸附-脱附曲线表明,孔隙形态以开放性透气孔及半封闭的透气孔为主,中孔部分发育,利于煤储层中流体流动,可动流体饱和度均值可达46%,煤储层物性条件较好(图7)。

3.3 煤层顶、底板以泥岩为主,保存条件较好

大港探区上古生界煤层与盖层存在煤层-泥岩、煤层-砂岩、煤层-碳酸盐岩3种组合类型(图8),其中煤层-泥岩组合主要发育于潟湖泥炭坪,煤层顶板以泥岩为主,底板以泥岩和粉砂岩为主,地震相以强振幅中频、连续性好为主要特征,分布广泛。系统开展了官探1H井太原组四煤组泥岩顶板孔渗和力学研究,明确其具有良好的封挡及工程实施和改造条件。官探1H井太原组四煤组泥岩顶板平均孔隙度为3.42%、平均渗透率为 $0.0259 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,顶板物性差,封闭性好;三轴应力实验分析,顶板泥岩抗压强度268 Mpa、弹性

模量49.7 GPa、泊松比0.22,顶板抗压强度高,与煤层段力学性质差异大,有助于在力学脆弱面形成压裂裂缝。

煤层-碳酸盐岩组合主要发育于局限台地,煤层顶板以灰岩和泥质灰岩为主,底板以粉砂岩和泥岩为主,地震相以弱振幅低频、连续性差为主要特征,分布较为局限,保存条件次之;煤层-砂岩组合主要发育于障壁岛砂坝,煤层顶板以中砂岩和粉砂岩为主,底板以泥岩和粉砂岩为主,地震相以强振幅高频、连续性较好为主要特征,分布范围最小,保存条件最差。

北部埕海聚煤中心太原组主要以煤-泥组合为主,其中五煤组顶板泥岩厚度10~25 m,底板泥岩厚度10~30 m,横向分布稳定,形成良好储-盖组合;南部乌马营-沧南聚煤中心,煤-砂组合较为发育,泊头斜坡五煤组和沧县斜坡六煤组发育煤-泥组合,五煤组顶板泥岩厚度25 m、底板泥岩厚度10 m,六煤组顶板泥岩厚度5~25 m、底板泥岩厚度5~10 m,保存条件相对较好。

3.4 煤层两次规模生气,吸附气与游离气并存,构造高点富集

研究表明煤在热成因变质阶段具有持续生烃能力,并且镜质体反射率(R_o)介于1.2%~1.9%时生烃量大幅增加^[27]。大港探区煤层经过二叠纪—中生代的上覆地层持续压实和沉降,煤层持续热解生烃,演化程度随

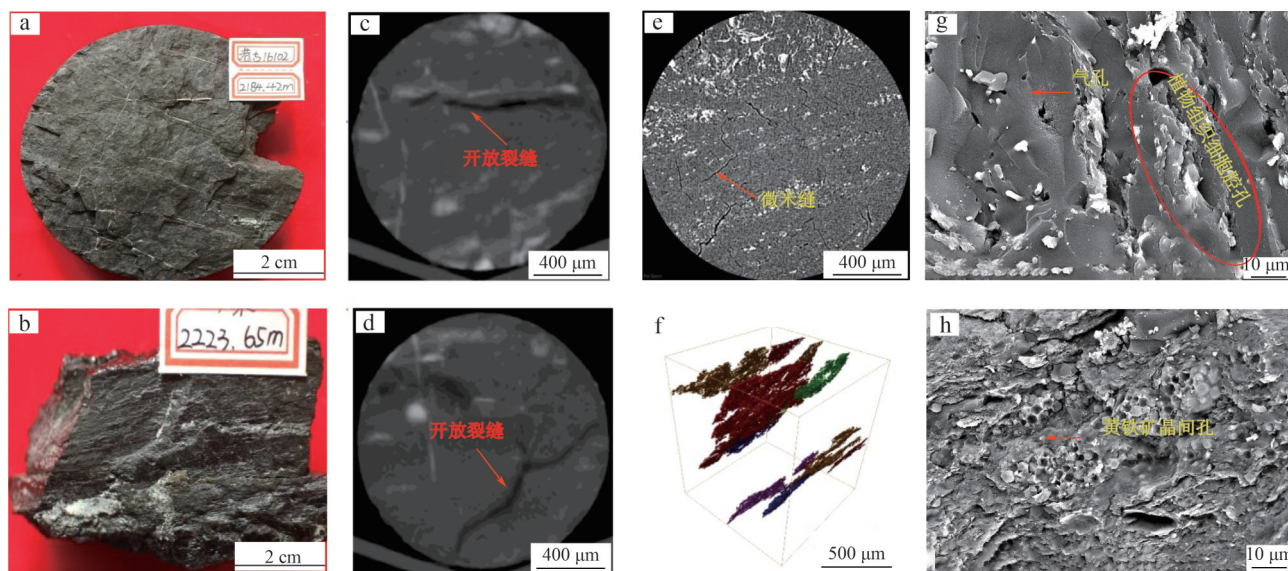


图6 大港探区石炭系煤层储集特征显微照片

Fig. 6 Images showing the storage characteristics of the Carboniferous coal seams in the Dagang exploration area

a. 港古16102井,五煤组,埋深2 184.42 m,割理发育,岩心;b. 港古16102井,六煤组,埋深2 223.65 m,微裂缝,方解石充填,岩心;c,d. 官探1H井,二煤组,埋深3 654.76~3 655.51 m,开放裂缝,岩心;e. 官探1H井,四煤组,埋深3 708.00 m,微米缝,微米CT扫描横截面;f. 官探1H井,四煤组,埋深3 709.00 m,微米缝,微米CT扫描立体图;g,h. 官探1H井,四煤组,埋深3 710.00 m,纳米孔,扫描电镜

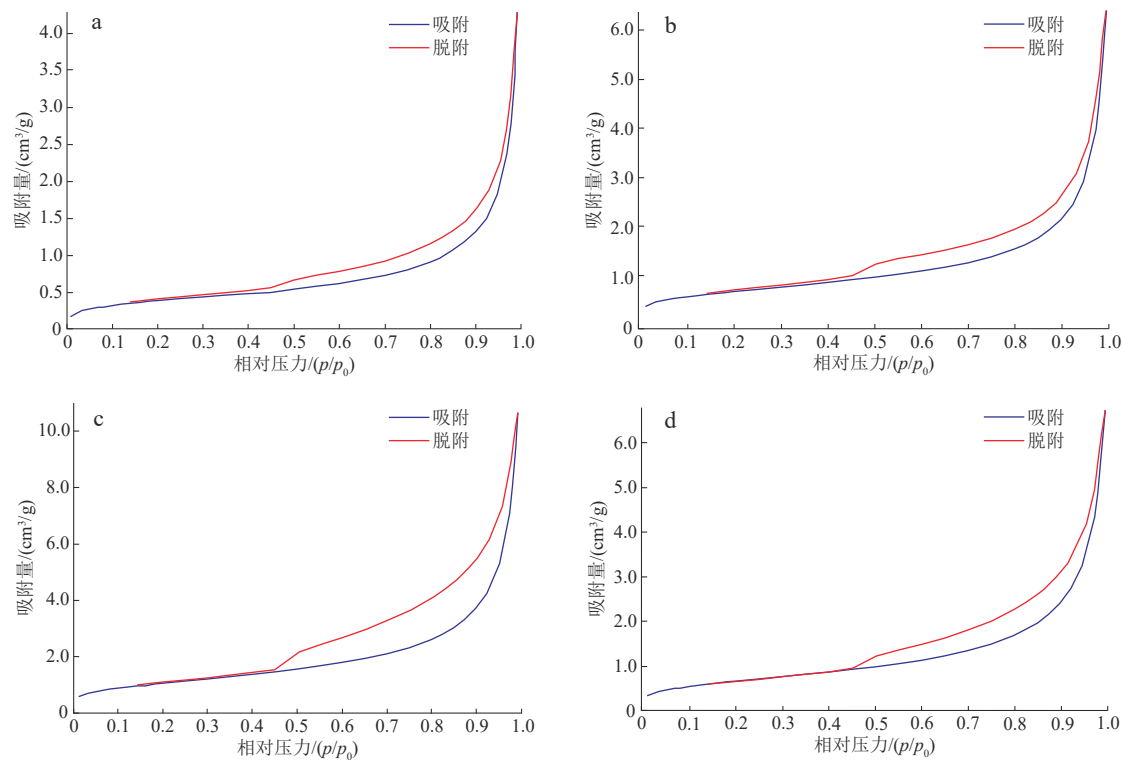


图7 大港探区标准状态(STP)下石炭系煤层岩心样品液氮吸附-脱附曲线

Fig. 7 Liquid-nitrogen adsorption-desorption curves of the Carboniferous coal seams in the Dagang exploration area
a. 埕古2井,埋深1 598.5 m;b. 埕古2井,埋深1 690.0 m;c. 港古16102井,埋深2 184.4 m;d. 港古16102井,埋深2 224.5 m,

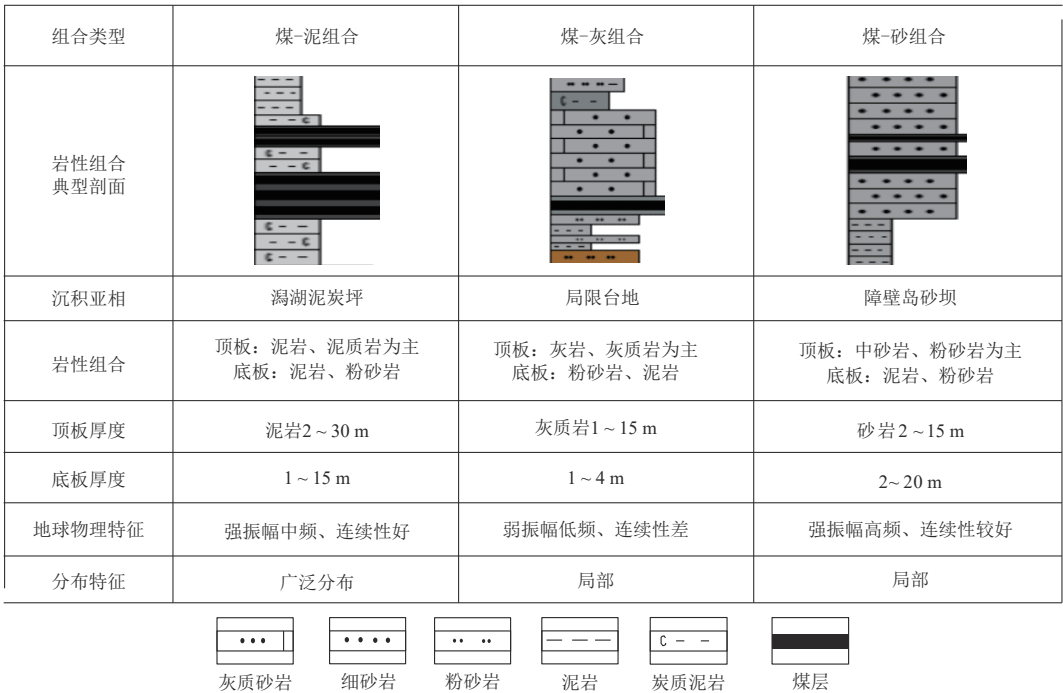


图8 大港探区上古生界煤层顶底板岩性组合

Fig. 8 Lithologic assemblages of the roofs and floors of the Upper Paleozoic coal seams in the Dagang exploration area

埋深增大呈逐渐增大趋势,后受中生代晚期构造抬升及新生代快速断陷影响,部分地区存在二次规模生气过程, R_o 介于0.7~1.3%,同时受到中、新生代火成岩热作

用促进烃源岩热演化,局部地区 R_o 超过2.0%(图9a)。

煤层埋藏史和热史表明,大港探区石炭系-二叠系煤层沉积后,煤系地层早期深埋,及至中生代晚期埋

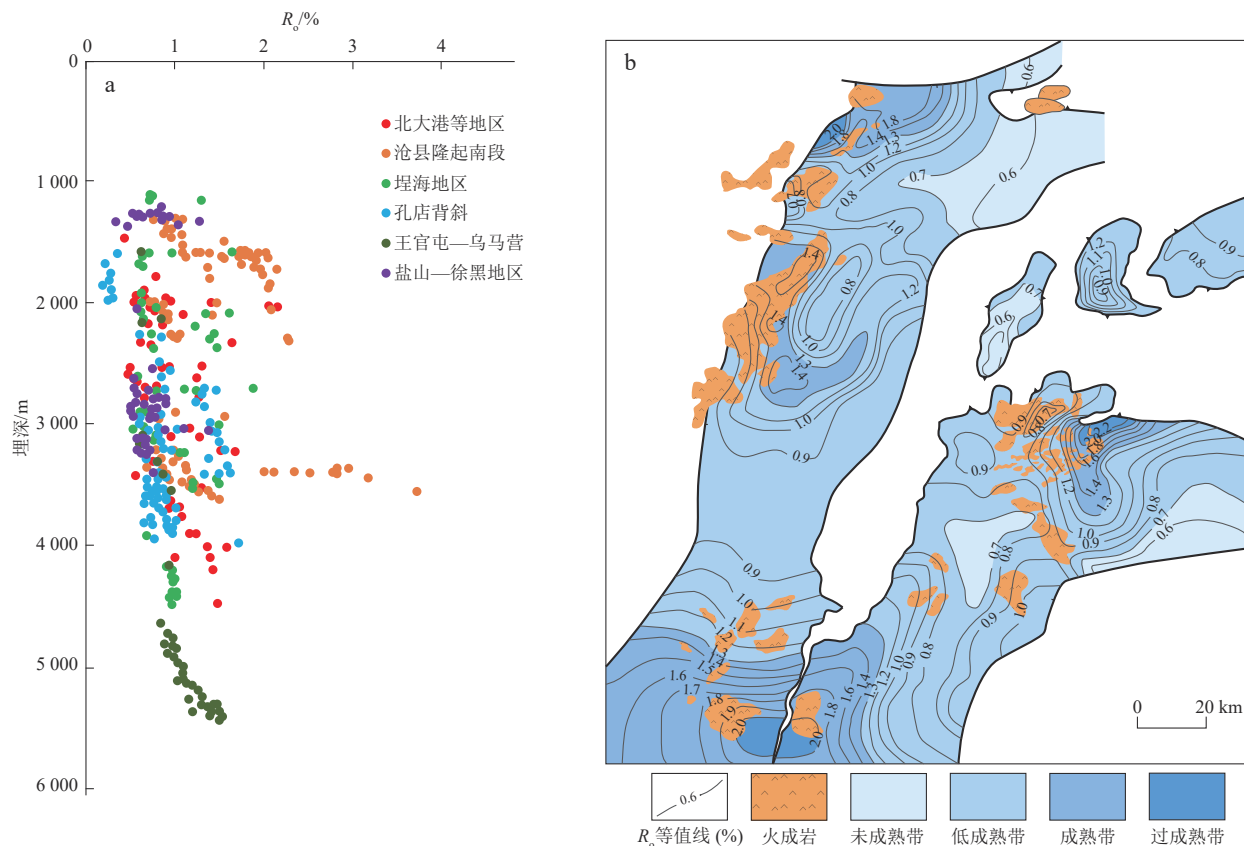


图9 大港探区石炭系—二叠系煤层岩心样品 R_o 随埋深变化趋势(a)及煤层 R_o 等值线图(b)

Fig. 9 The vitrinite reflectance (R_o) vs. burial depth trend (a) and R_o contour map (b) of the Carboniferous-Permian coal seams in the Dagang exploration area

深普遍超过2 800 m,约153~132 Ma大港探区全区煤层均进入生烃门限,开始一次生烃。随后,沧县隆起、埕宁隆起和徐黑—盐山地区等区域稳定抬升,煤系源岩热演化中止,只存在一次生烃过程,主要以煤层吸附气为主。2016年于沧县隆起钻探埕隆1601井,钻遇石炭系煤层厚度25 m/13层,据煤层取心测试,煤层含气量7.54~13.8 m³/t。

乌马营、王官屯、埕海等地区,虽然也经历了中生代构造抬升和煤系源岩热演化中止,但新生代以来快速沉积了巨厚的古近系与新近系,煤系烃源岩埋深超过一次生烃深度后进入二次生烃过程,该期生烃时间为约55 Ma(孔店组沉积期)至今,而烃源岩主生烃期($R_o > 0.7\%$)则为约40 Ma(沙河街组三段沉积晚期)至今(图10),发育形成乌马营—王官屯和埕海2个高成熟发育区,即二次生气中心(图9b),生气强度大于60 × 10⁸ m³/km²。

在二次生气中心内,煤层吸附气与游离气共存,并且构造高部位煤岩气测、录井异常值较高,具有明显构造高点富气特征。如乌深1井处于乌马营潜山构造高部位,圈闭坡度19.0°~25.0°,太原组煤岩气测全烃含

量可达83.5%,而处于同样深度的营古3井太原组煤层,由于所处位置构造幅度较缓,圈闭坡度5.0°~8.9°,煤岩气测全烃含量仅为43.9%。2024年风险探井官探1H导眼井在山西组及太原组均钻遇煤层,该井位于王官屯潜山北侧构造高点,圈闭坡度14.0°~18.0°,太原组四煤组6.3 m厚主力煤岩气测全烃含量录井值50.45%,测井计算含气量21.00 m³/t。

4 煤岩气发育模式

大港探区新生代以来,受喜马拉雅运动的影响,经历古近纪断陷和新近纪拗陷2个演化阶段,上古生界煤层被第三世晚期断层分割,形成了复杂断陷盆地上古生界煤层复杂断块群。据此建立了复杂断陷盆地深层煤层复式聚集发育模式(图11),明确上古生界煤层发育风化—降解带、饱和吸附带和构造成藏带,其中深层煤层处于饱和吸附带和构造成藏带,构造成藏带煤层具有“超饱和”含气特征,吸附气与游离气并存,构造高点富集。

处于风化—降解带煤层往往埋深较浅,易受风化淋滤及生物降解作用影响,煤层含气量较低,一般小于

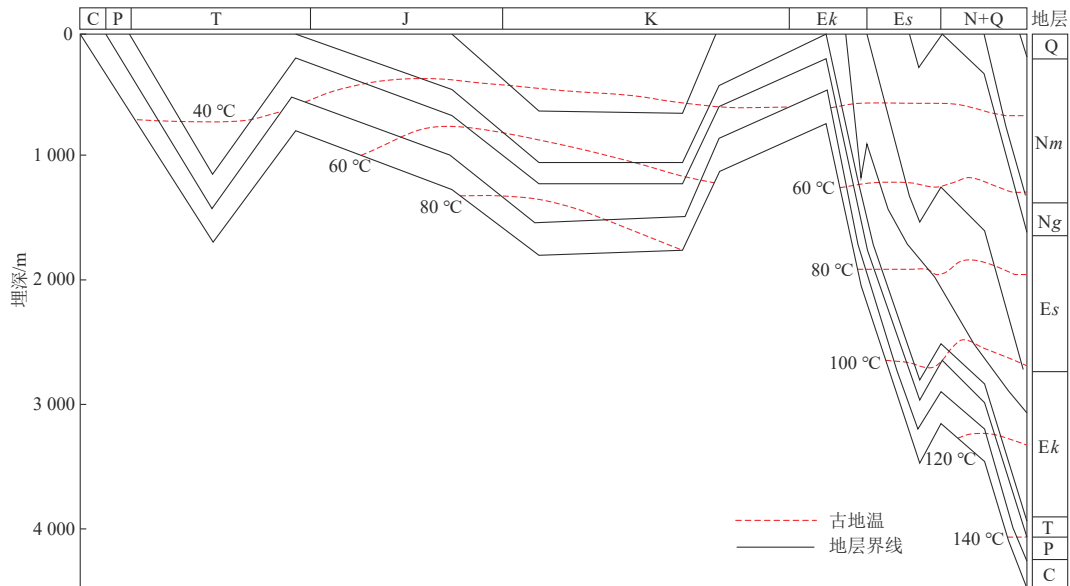


图10 大港探区乌马营潜山煤系地层埋藏演化史

Fig. 10 Burial evolutionary history of coal measure in the Wumaying buried hill in the Dagang exploration area

C. 石炭系;P. 二叠系;T. 三叠系;J. 侏罗系;K. 白垩系;Ek. 孔店组;Es. 沙河街组;N+Q. 新近系+第四系

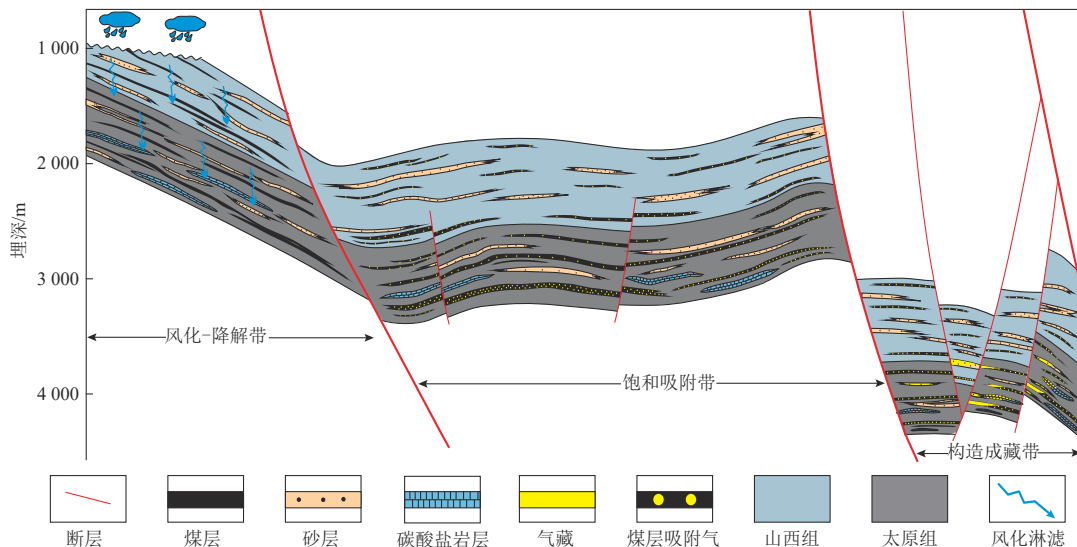


图11 大港探区上古生界深层煤岩气发育模式(据文献[32])

Fig. 11 Developmental model of the deep Upper Paleozoic coal-rock gas in the Dagang exploration area (after reference [32])

5 m³/t,水型以NaHCO₃型为主,矿化度较低,钻遇井气测全烃含量一般小于0.1%。

处于煤层饱和吸附带的煤层,煤岩气发育程度主要受煤层厚度、储-盖组合及构造稳定性影响,煤层以吸附气为主。煤层含气量较高,一般介于5~15 m³/t,水型以NaHCO₃型为主,矿化度较风化-降解带高,可达25 g/L,钻遇井气测全烃含量一般大于1%。如处于沧南-乌马营煤层厚值中心的沧隆1601井,绳索取心实测煤层含气饱和度可达70%~80%。

处于构造成藏带的煤层埋深往往超过3 000 m,煤层的演化程度明显提高,含气量也明显增加,一般大于

15 m³/t。此类煤层的水型以CaCl₂型为主,矿化度大于30 g/L,气测全烃含量最高可达99%,游离气的占比大幅提升,如乌深1井太原组上段埋深5 000 m,气测全烃含量高达83%。此时煤层具有构造成藏的特征,含气面积和高度受保存条件影响。

5 结论

1) 大港探区上古生界山西组-太原组发育陆表海背景下的三角洲和障壁岛-潟湖沉积体系,纵向上发育6个煤组,横向上存在埕海和沧南-乌马营2个聚煤

中心,煤层厚度大,分布范围广,具备良好的煤岩气生成条件。

2) 上古生界煤层显微组分以均质镜质组为主,源岩品质好,生气能力强,受印支期以来多期构造运动及中生代火成岩作用影响,煤层两次规模生气,已发现规模源外煤成气藏和少量煤岩气藏。

3) 上古生界煤层具有多尺度孔缝结构,密集微裂缝规模发育,为天然气提供了良好的储集空间及渗流通道;煤层顶、底板以泥岩为主,物性差、抗压强度较高,具有良好的封挡及工程实施和改造条件。

4) 上古生界煤层存在风化-降解带、饱和吸附带和构造成藏带,深层煤层处于饱和吸附带及构造成藏带,其中构造成藏带煤层具有“超饱和”含气特征,吸附气与游离气并存,构造高点富集。

参 考 文 献

- [1] 宋岩, 马行陟, 柳少波, 等. 沁水煤层气田成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2019, 40(5): 621-634.
SONG Yan, MA Xingzhi, LIU Shaobo, et al. Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Qinshui coalbed methane field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(5): 621-634.
- [2] 张抗, 张立勤, 刘冬梅. 近年中国油气勘探开发形势及发展建议[J]. 石油学报, 2022, 43(1): 15-28, 111.
ZHANG Kang, ZHANG Liqin, LIU Dongmei. Situation of China's oil and gas exploration and development in recent years and relevant suggestions [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1): 15-28, 111.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 何发岐, 董昭雄. 深部煤层气资源开发潜力——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 277-285.
HE Faqi, DONG Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: A case study in the Daniudi Gas Field, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 277-285.
- [6] 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 Xian Yue, 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.
- [7] HOU Xiaowei, LIU Shimin, ZHU Yanming, et al. Evaluation of gas contents for a multi-seam deep coalbed methane reservoir and their geological controls: In situ direct method versus indirect method [J]. Fuel, 2020, 265: 116917.
- [8] LI Song, TANG Dazhen, PAN Zhejun, et al. Geological conditions of deep coalbed methane in the eastern margin of the Ordos Basin, China: Implications for coalbed methane development [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 53: 394-402.
- [9] 胡见义, 徐树宝, 童晓光. 渤海湾盆地复式油气聚集区(带)的形成和分布[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(1): 1-8.
HU Jianyi, XU Shubao, TONG Xiaoguang. Formation and distribution of complex petroleum accumulation zones in Bohaiwan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(1): 1-8.
- [10] 李传明, 曾溅辉, 刘海涛, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷上古生界暗色泥岩地球化学特征及其发育机制[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(2): 306-321.
LI Chuanming, ZENG Jianhui, LIU Haitao, et al. Geochemical characteristics and development mechanism of Upper Paleozoic dark mudstone in Huanghua depression of Bohai Bay Basin, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(2): 306-321.
- [11] 徐云龙, 张洪安, 李继东, 等. 渤海湾盆地东濮凹陷陆相页岩层系储集特征及其主控因素[J]. 断块油气田, 2022, 29(6): 729-735.
XU Yunlong, ZHANG Hongan, LI Jidong, et al. Reservoir characteristics and its main controlling factors of continental shale strata in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(6): 729-735.
- [12] 赵少泽, 李勇, 程乐利, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷沙河街组烃源岩特征及沉积环境[J]. 断块油气田, 2022, 29(5): 627-632.
ZHAO Shaoze, LI Yong, CHENG Leli, et al. Characteristics and depositional environment of source rocks in Shahejie Formation, Cangdong Depression, Bohai Bay Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(5): 627-632.
- [13] 大港油田石油地质志编辑委员会. 中国石油地质志(卷四)大港油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1991.
Editorial Board of Petroleum Geology of Dagang Oilfield. Petroleum geology of China (Volume 4) of Dagang Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991.
- [14] 郭旭升, 周德华, 赵培荣, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1013-1023.
GUO Xusheng, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1013-1023.
- [15] 赵子丹, 乔向阳, 周进松, 等. 砂岩储层致密化及其与油气充注成藏的耦合关系——以鄂尔多斯盆地延安气田上古生界为例[J]. 断块油气田, 2023, 30(3): 363-371.
ZHAO Zidan, QIAO Xiangyang, ZHOU Jinsong, et al. The densification of sandstone reservoir and its coupling relationship with hydrocarbon charging and accumulation: A case study of the Upper Paleozoic in Yan'an Gas Field, Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023, 30(3): 363-371.

- [16] 赵贤正, 李宏军, 付立新, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷古生界煤成凝析气藏特征、主控因素与发育模式[J]. 石油学报, 2021, 42(12): 1592-1604.
- ZHAO Xianzheng, LI Hongjun, FU Lixin, et al. Characteristics, main controlling factors and development mode of Paleozoic coal-formed condensate gas reservoirs in Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(12): 1592-1604.
- [17] 金凤鸣, 王鑫, 李宏军, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷乌马营潜山内幕原生油气藏形成特征[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(3): 521-529.
- JIN Fengming, WANG Xin, LI Hongjun, et al. Formation of the primary petroleum reservoir in Wumaying inner buried-hill of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 521-529.
- [18] 周立宏, 王鑫, 付立新, 等. 黄骅坳陷乌马营潜山二叠系砂岩凝析气藏的发现及其地质意义[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 431-438.
- ZHOU Lihong, WANG Xin, FU Lixin, et al. Discovery and geological significance of the Permian sandstone condensate gas reservoir in Wumaying buried hill, Huanghua Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 431-438.
- [19] 张津宁, 付立新, 周建生, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷古潜山的宏观展布特征与演化过程[J]. 地质学报, 2019, 93(3): 585-596.
- ZHANG Jinning, FU Lixin, ZHOU Jiansheng, et al. Macroscopic distribution characteristics and evolution process of buried hill in the Huanghua Depression, Bohai Bay basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(3): 585-596.
- [20] 吴永平, 付立新, 杨池银, 等. 黄骅坳陷中生代构造演化对潜山油气成藏的影响[J]. 石油学报, 2002, 23(2): 16-21.
- WU Yongping, FU Lixin, YANG Chiyin, et al. Effect of Mesozoic tectonic evolution on hydrocarbon accumulation in buried hills in Huanghua Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(2): 16-21.
- [21] 李三忠, 索艳慧, 郭玲莉, 等. 渤海湾盆地大歧口凹陷变换构造与板内变形差异[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(4): 98-109.
- LI Sanzhong, SUO Yanhui, GUO Lingli, et al. Transfer zones and differences in intra-plate deformation in great Qikou Sag of the Bohai Bay Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(4): 98-109.
- [22] 李三忠, 索艳慧, 周立宏, 等. 华北克拉通内部的拉分盆地: 渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(5): 1362-1379.
- LI Sanzhong, SUO Yanhui, ZHOU Lihong, et al. Pull-apart basins within the north China craton: Structural pattern and evolution of Huanghua Depression in Bohai Bay Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(5): 1362-1379.
- [23] 王海潮, 王余泉, 秦云龙, 等. 渤海湾盆地沉积斜坡及其含油气性[J]. 地质力学学报, 2006, 12(1): 23-30.
- WANG Haichao, WANG Yuquan, QIN Yunlong, et al. Sedimentary slopes of the Bohai Gulf Basin and their oil potential[J]. Journal of Geomechanics, 2006, 12(1): 23-30.
- [24] 程鑫, 周立宏, 操应长, 等. 黄骅坳陷大港探区下古生界碳酸盐岩潜山差异演化及优质储层成因[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 673-689.
- CHENG Xin, ZHOU Lihong, CAO Yingchang, et al. Differential evolution and origin of high-quality reservoirs in the Lower Paleozoic carbonate buried hills in Dagang prospecting area, Huanghua Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 673-689.
- [25] 韩国猛, 吴雪松, 崔宇, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷二叠系致密砂岩储层特征、主控因素及发育模式[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 509-519.
- HAN Guomeng, WU Xuesong, CUI Yu, et al. Characteristics, control factors and development models of Permian tight sandstone reservoirs in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 509-519.
- [26] 侯中帅, 陈世悦, 鄢继华, 等. 大港探区上古生界沉积特征与控制因素[J]. 地球科学, 2017, 42(11): 2055-2068, 2104.
- HOU Zhongshuai, CHEN Shiyue, YAN Jihua, et al. Sedimentary characteristics and control factors of Upper Palaeozoic in Dagang exploration area[J]. Earth Science, 2017, 42(11): 2055-2068, 2104.
- [27] 高长海, 孟士达, 查明, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷港北多层系潜山结构特征与成藏模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(3): 36-45.
- GAO Changhai, MENG Shida, ZHA Ming, et al. Structural characteristics and hydrocarbon accumulation models of Gangbei multi-layer buried hill in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(3): 36-45.
- [28] 徐二社, 黄娟, 鹿坤, 等. 致密油运聚动力研究——以渤海湾盆地东濮凹陷Wg4井沙三中致密油为例[J]. 断块油气田, 2023, 30(1): 17-24.
- XU Ershe, HUANG Juan, LU Kun, et al. The driving force study of tight oil migration and accumulation: A case study of the tight oil in Es₃ formation in well Wg4 of Dongpu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023, 30(1): 17-24.
- [29] 范楠. 煤孔隙结构多尺度表征及其对瓦斯运移特性影响的实验研究[D]. 阜阳: 辽宁工程技术大学, 2021.
- FAN Nan. Experimental study on multi-scale pore structure characterization of coal and its effect on gas migration characteristics[D]. Fuyang: Liaoning Technical University, 2021.
- [30] 高丽军, 谢英刚, 潘新志, 等. 临深深部煤层气含气性及开发地质模式分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1634-1640.
- GAO Lijun, XIE Yinggang, PAN Xinzh, et al. Gas analysis of deep coalbed methane and its geological model for development in Linxing Block[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6): 1634-1640.
- [31] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 437-452.
- JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 437-452.
- [32] 周立宏, 陈长伟, 崔宇, 等. 渤海湾盆地黄骅坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2160-2178.
- ZHOU Lihong, CHEN Changwei, CUI Yu, et al. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Huanghua Depression of Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2160-2178.