

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

郭旭升^{1,2},周德华¹,赵培荣¹,刘曾勤²,张殿伟²,冯动军²,邢凤存^{3,4},杜伟²,
陈刚²,杨帆²,孙川翔²

(1. 中国石油化工股份有限公司,北京 100728; 2. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 102206; 3. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610059; 4. 成都理工大学沉积地质研究院,四川 成都 610059)

摘要:随着非常规天然气甜点评价、水平井分段压裂及多层立体开发等技术的发展,非常规天然气勘探开发对象逐渐由单一型向复合型转变,海-陆过渡相复合型煤系非常规气共探合采有望成为中国页岩油气后的“新非常规革命”。石炭系-二叠系是鄂尔多斯盆地重要的烃源岩层系,非常规天然气资源潜力巨大,但尚处在勘探开发初级阶段。基于“十三五”勘探进展和攻关认识,总结出鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系具有“两源、三高、三气”的非常规天然气地质特征。石炭系-二叠系发育多种岩性/岩性组合类型,其中富煤岩性组合和富有机质页岩岩性组合(“两源”)是勘探潜力比较大的主体类型,烃源岩有机显微组分以镜质组为主,储集空间以有机孔和微裂缝为主,具有高有机碳含量、高热演化程度和高含气量的“三高”特点;气体赋存状态深、浅层分异明显,浅层煤层以吸附气为主,深层煤层存在游离气,形成了煤层气、页岩气、致密砂岩气“三气”共存的多种组合类型。聚焦煤系储层致密、甜点识别难度大、应力大等挑战,初步形成了“长水平段、大排量、大液量、大砂量”钻完井工艺,有效支撑了深层煤系非常规天然气勘探突破。“十四五”期间将进一步加强煤系烃源岩及岩性组合综合研究,建立地质-工程甜点综合评价理论与技术,形成立体勘探开发与工程配套技术,助力鄂尔多斯盆地非常规天然气高质量发展。

关键词:岩性组合;含气性;非常规天然气;石炭系;二叠系;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE132.2 **文献标识码:**A

Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata, Ordos Basin

Guo Xusheng^{1,2}, Zhou Dehua¹, Zhao Peirong¹, Liu Zengqin², Zhang Dianwei², Feng Dongjun², Xing Fengcun^{3,4}, Du Wei²,
Chen Gang², Yang Fan², Sun Chuanxiang²

(1. China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 4. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: With the development and breakthroughs made in sweet spot assessment of unconventional gas, multi-stage hydraulic fracturing in horizontal wells, and simultaneous development of multiple pay zones, the exploration and development paradigm of unconventional gas has shifted from single mode to composite mode. The joint exploration and commingled production of unconventional gases from coal measure strata of marine-to-continental transitional facies is expected to become a new “unconventional revolution” following the shale revolution. The Carboniferous-Permian is of the most important source rock sequences in the Ordos Basin, featuring huge potential in unconventional gas resources, though at the initial stages of exploration and development. Based on exploration progresses made and research results achieved during the 13th Five-Year Plan period, we summarize the geological features of the Carboniferous-Permian coal-

收稿日期:2022-02-17;修订日期:2022-07-09。

第一作者简介:郭旭升(1965—),男,中国工程院院士,油气勘探研究。E-mail: guoxs_syky@sinopec.com。

基金项目:中国石化基础性前瞻性项目(P21085-14);中国石化油田部先导项目(YTBXD-FCZY-2022-1-05-001-SKY);中国石化科技部项目(P21086-5)。

measure unconventional gas in the Ordos Basin, that is, “two sources, three highs, and three gases”. The Carboniferous-Permian is dominated by multiple types of lithology or lithological components, and the coal-rich components (“two sources”) are major targets in exploration, among others. The organic macerals of the source rocks are dominated by vitrinite, and organic pores and micro-fractures are the main reservoir spaces, characterized by high total organic carbon content, high thermal maturity, and high gas content (“three highs”). The gas occurrence is markedly differentiated between deep and shallow layers, with adsorbed gases dominating the shallow coal seams, and free gases occurring in the deep coal seams, resulting in the coexistence of coalbed methane, shale gas and tight sand gas (“three gases”), and the existence of their various combinations. Regarding challenges such as tightness of reservoirs, large difficulty in sweet spot identification, and relatively high stresses, we have developed drilling and completion technique of “long lateral, large pumping rate, large liquid volume and high sand load”, which could be of effective supports to breakthroughs made in unconventional gas exploration in deep coal-measure reservoirs. It is suggested to further strengthen the comprehensive research on coal-measure source rocks and lithological assemblages, establish theory and technology for integrated evaluation of geological and engineering sweet spots, and develop supporting technologies in exploration, development, and engineering, in an effort to accelerate high-quality development of unconventional gas in the Ordos Basin during the 14th Five-Year Plan period.

Key words: lithological assemblage, gas-bearing potential, unconventional natural gas, Carboniferous, Permian, Ordos Basin

引用格式: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. DOI:10.11743/ogg20220501.

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. DOI: 10.11743/ogg20220501.

非常规天然气(以下简称“非常规气”)勘探突破不断,已成为中国天然气增储上产的重要领域之一。目前,逐渐由早期单一型向复合型非常规气勘探开发转变,海-陆过渡相煤系地层中多类型非常规气的勘探与开发评价及工程技术等问题成为聚焦点^[1-4]。煤系气系指由煤系生烃母质在地质演化过程中生成的以甲烷为主要成分的各类天然气^[2,5],通常将煤层气、页岩气和邻近烃源岩的薄夹层致密砂岩气统称为“煤系非常规气”,其成因上具有“同源共生”的特点,主要形成于海-陆交互相或陆相沉积环境中,在鄂尔多斯、沁水、滇东-黔西、黔北-川南等石炭系-二叠系含煤盆地中普遍发育。中国煤系非常规气具有煤层时代众多、沉积环境多样、岩性类型多样、时空变化明显、储-盖组合多样、成因类型多样、赋存类型及共生成藏多样、天然气资源丰富等特点,其勘探潜力巨大^[2,5-10]。中国煤层气资源动态专项评价结果显示,中国煤层气资源量在2 000 m深度以浅为 $30.05 \times 10^{12} \text{ m}^3$,鄂尔多斯盆地占比24%^[11];海-陆过渡相页岩气资源量在4 500 m深度以浅为 $25.33 \times 10^{12} \text{ m}^3$,鄂尔多斯盆地占比10%^[12]。

鄂尔多斯盆地是煤系非常规气勘探开发的主战场之一,煤系烃源岩分布广,非常规气资源潜力大。中国石化、中国石油和中国地质调查局在煤系非常规气领域取得了一系列勘探进展^[13-16]。中国石化针对石炭

系-二叠系埋深较大、储层致密、非均质性强、甜点识别难度大等挑战,进行了一系列技术攻关,取得了初步认识。本文以石炭系和二叠系煤系地层为重点层系,针对鄂尔多斯盆地非常规气勘探开发进展及攻关方向进行梳理,以期“十四五”期间鄂尔多斯盆地乃至中国含煤盆地非常规气勘探开发提供参考。

1 地质概况

鄂尔多斯盆地上古生界石炭系和二叠系是重要的非常规气发育层位。在晚加里东运动之后,晚石炭世-二叠纪末期处于加里东-海西构造运动转换阶段^[17],形成了石炭系与奥陶系之间的平行或角度不整合^[18]。在周缘裂解背景下^[19],沉积环境具有多样性,石炭纪-早二叠世早期(本溪期-太原期)盆地的北部三角洲沉积进入陆表海的障壁岛-潟湖环境中,形成海-陆交错的沉积格局。太原组总体古地理格局在盆地北部为三角洲沉积,东部为浅水陆棚,南部为障壁岛-潟湖沉积体系。早二叠世晚期(山西期),华北板块再次抬升,海水开始由中央向两侧倒退。北部阴山物源区的持续抬升致使鄂尔多斯盆地的沉积格局由南北物源向中央古隆起交汇,形成河流-三角洲-湖泊沉积体系。在这个沉积过程中,从太原组-石盒子组沉积期开始,

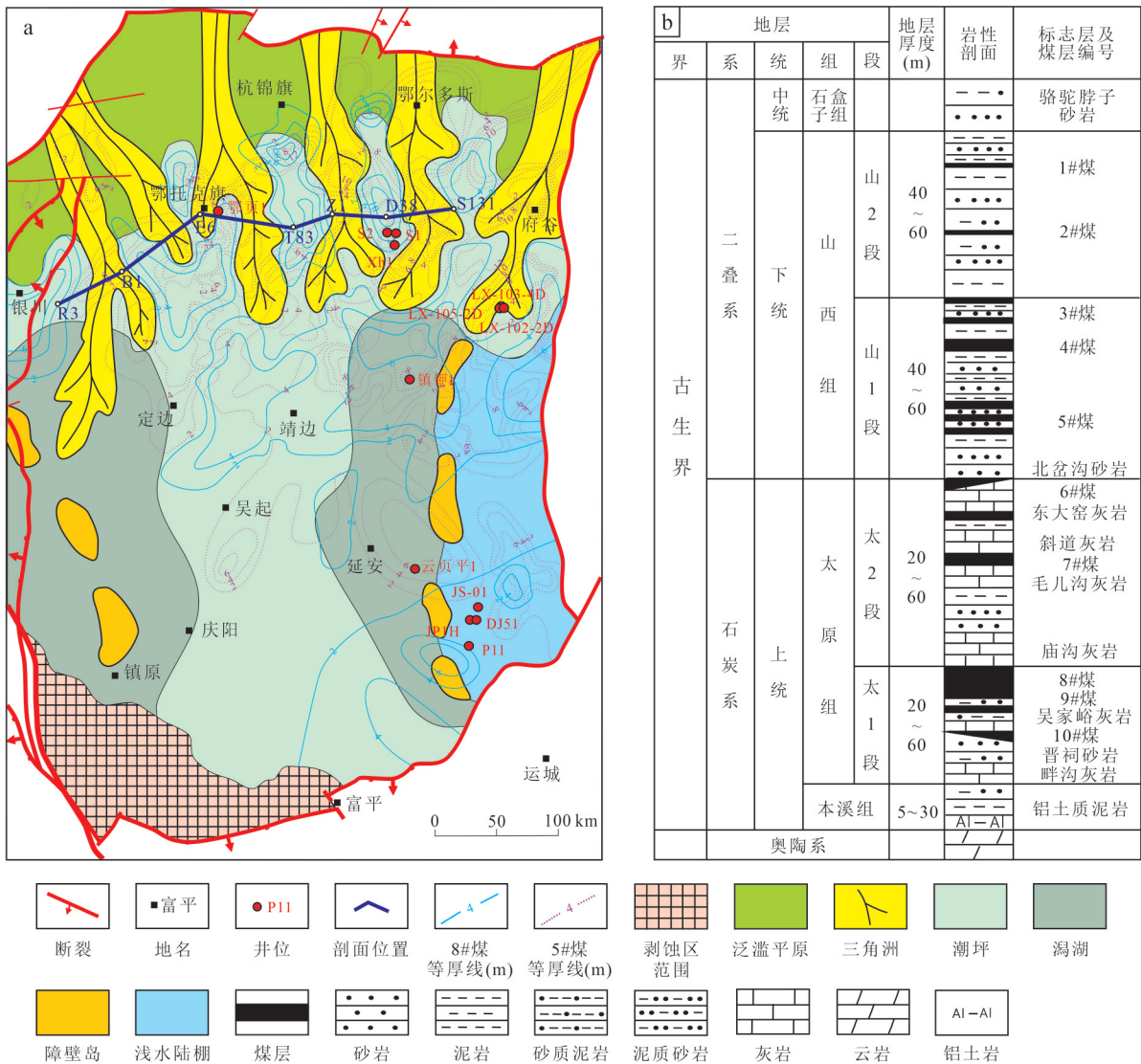
北部物源逐渐增强,水体变浅,砂体分布范围逐渐向南扩大,并逐渐形成了“满盆砂”的分布格局。石炭系-二叠系沉积之后,经历了中生代大型陆内拗陷、陆内前陆盆地及新生代周缘断陷等演化阶段,并最终定型^[20-22]。

受对冲挤压、隆升和冲断作用影响,石炭系和二叠系煤系地层遭受剥蚀和构造改造,盆地周缘含煤层系遭受明显剥蚀破坏,盆地内部煤层保存完整,且形成了北西高、南东低的构造格局^[23-24]。盆地内石炭系-二叠系烃源岩主要为煤层、炭质页岩和暗色泥页岩,平面上具有东北部厚度大、向南部逐渐减薄的特点(图1)。其中,煤层在太原组和山西组内均有发育,厚度总体上具有向上减薄的趋势。与之相对应,煤层横向连续性逐渐变差,受到河道切割和分隔的现象更为明显(图2),随着可容纳空间变小和物源供应增强,三角洲砂体向盆地中心推进明显,造成了煤层逐渐向

盆地方向推进的特点。总体上煤层厚度在0~30 m,但是由于沉积环境的变化,也导致了不同地区的煤层分布具有差异性。主力煤层8#煤和5#煤分布稳定,8#煤厚度较大的区域主要位于盆地的东北部、东部和东南部地区,厚度介于0~12 m;5#煤在盆地中分布稳定,厚度介于0~8 m(图1)。盆地东部地区本溪组、太原组和山西组泥页岩厚度一般都超过10 m,本溪组最厚可达40 m,太原组可达60 m,山西组则可达100 m以上^[25]。

2 勘探开发最新进展与启示

随着煤系非常规气理论深化与钻完井技术的进步,鄂尔多斯盆地的煤系非常规气综合勘探开发取得了一系列重要进展。①深层煤层气取得重大突破,延



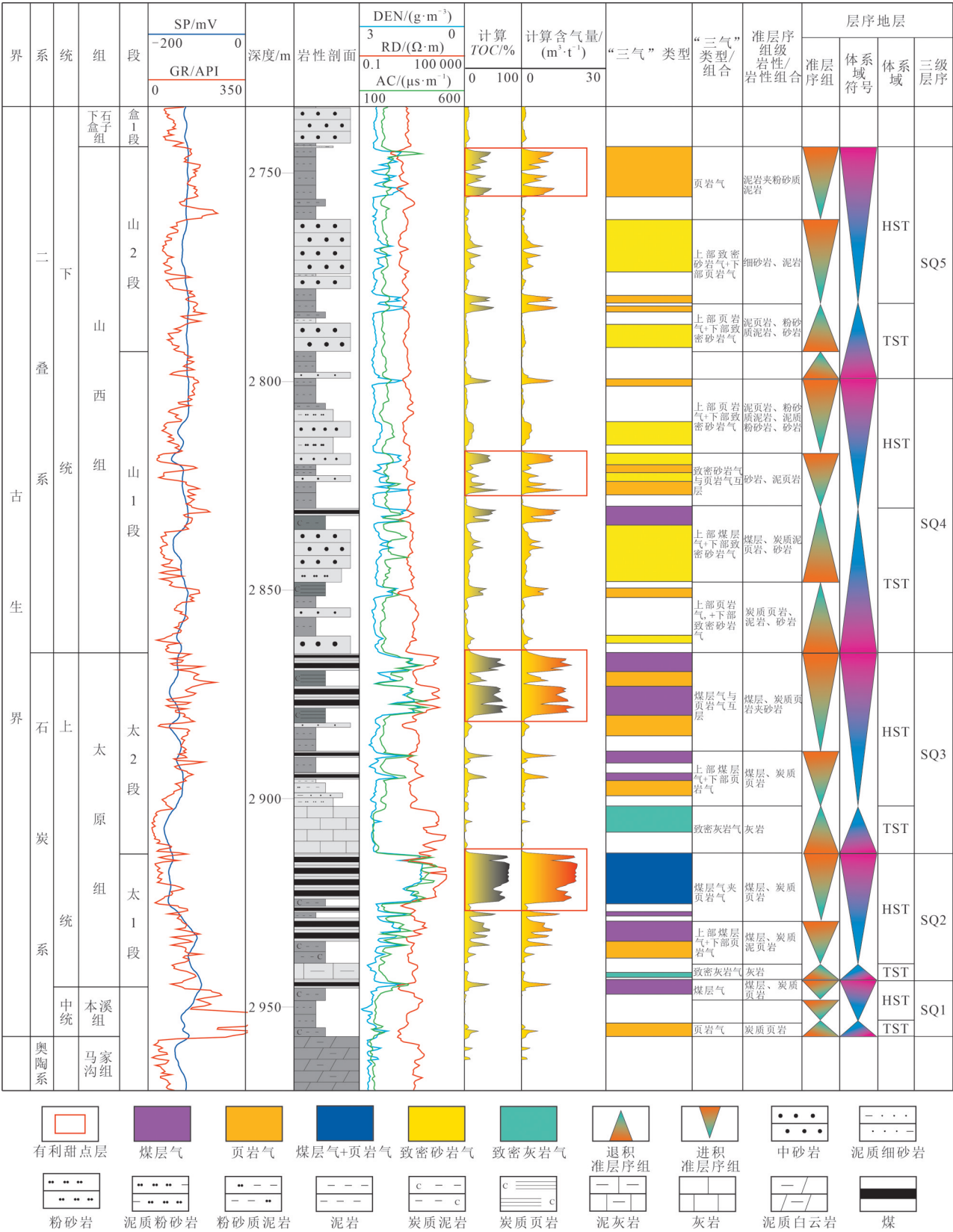


图2 鄂尔多斯盆地东北部D38井本溪组—山西组岩性组合柱状图

Fig. 2 Column showing the lithological assemblages of the Benxi-Shanxi Formations in Well D38 in the northeastern Ordos Basin

川南地区P11井在山西组煤层中试获日产6.00×10⁴ m³的气流,JS-01井在太原组煤层中试获日产10.00×10⁴ m³的气流。②多口页岩气井获得商业气流,鄂页1井在太原组煤系页岩段试获日产1.95×

10^4 m^3 的气流,云页平1井在山西组煤系页岩段试获日产 $2.00 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的气流,JP1H井在山西组煤系页岩段试获日产 $3.70 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的气流,镇钾1井在太原组煤系页岩段试获日产 $5.70 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的气流。③煤系非常规气合采取得积极进展,在盆地东缘临兴、神府、横山堡南等区块取得煤层气和致密砂岩气合采高产,最高日产气量达 $5.30 \times 10^4 \text{ m}^3$;临兴—神府地区煤系地层煤层气、页岩气和致密气试验井LX-102-2D, LX-103-4D和LX-105-2D等煤系气合采稳定,单井日产气近 6000 m^3 [15,26]。上述勘探成果证实石炭系-二叠系煤系地层具有良好非常规气富集条件。

2.1 烃源岩类型多,岩性组合样式丰富

煤系非常规气勘探实践表明,岩性类型及其时空分布特征决定了煤系非常规气的分布规律,因此,岩性组合类型及特征研究至关重要。鄂尔多斯盆地多样性的沉积环境及海平面和湖平面频繁波动形成了煤层、炭质页岩、泥页岩与砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、灰岩等多类型岩性/岩性组合。以鄂尔多斯盆地东北部为例,基于野外露头剖面和井资料开展层序地层、沉积环境类型、岩性及含气量等研究,探讨了不同的岩性/岩性组合类型和煤系气共生组合样式。

研究结果显示,依据准层序组能够有效划分石炭系-二叠系含气单元组合,因此,将准层序组作为基本岩性或岩性组合单元。在准层序组控制下,形成了煤层、炭质页岩、泥页岩、砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、泥灰岩等15种岩性/岩性组合类型,进而发育了页岩气、煤层气、致密砂岩气和致密灰岩气之间的不同组合样式(图2)。基于岩性、总有机碳含量(TOC)及含气性特征,大牛地D38井石炭系-二叠系岩性组合主要为煤层夹炭质页岩、煤层-炭质页岩互层夹砂岩、炭质页岩-泥页岩-粉砂岩、泥页岩夹煤层、泥页岩夹粉砂岩等,形成了富煤和富页岩两大类有利岩性组合。太原组主要为富煤岩性组合,太1段甜点层为煤层夹炭质页岩,太2段甜点层为煤层-炭质页岩互层夹砂岩,TOC高、含气性好、厚度较大。山西组主要为富页岩组合,山1段甜点层为泥页岩夹煤层和砂岩,山2段甜点层为泥页岩夹粉砂质泥岩,TOC较高、含气性较好、单层厚度较薄(图2)。JS-01井和JP1H井的勘探突破表明石炭系-二叠系富煤和富有机质页岩岩性组合的勘探潜力巨大。

2.2 煤岩和炭质页岩以有机孔缝为主,深层储层致密

煤系非常规气储层孔隙主要类型为有机孔和微裂

缝。扫描电镜观察结果显示,煤岩储集空间以有机孔和微裂缝为主,可见割理(图3a)和胞腔孔(图3b),含少量有机质内微孔隙(图3c)。炭质页岩和页岩储集空间存在多种孔隙类型,常见有机孔(图3d,g,h),可见微裂缝(图3e)、黄铁矿边缘孔(图3f)、高岭石层间缝(图3i)等。

煤岩和页岩的孔径大小具有差异性。煤系页岩的孔径主要集中在50 nm以下,平均占比超过80%,其中孔径小于2 nm的孔隙平均占比近20%,最大孔孔径普遍在1000 nm以下 [27-28]。煤岩孔径主要分布在100 nm以下,平均占比86%,其中大于10 nm的孔平均占比达到45%,部分大孔孔径可达1000 nm以上,大孔最大占比可达11% [29],煤岩孔径整体大于页岩,最大孔径更大,具有较好的储集能力。

鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤系烃源岩的实验室测试渗透率随着埋深增大而减小,埋深超过1000 m时其渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。东南部延川南地区的煤系烃源岩埋深超过1000 m,渗透率为 $(0.0580 \sim 0.0465) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。东部大宁—吉县地区的煤系烃源岩埋深超过2000 m,渗透率为 $(0.0133 \sim 0.0598) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,东北部大牛地地区的煤系烃源岩埋深为2795~2916 m,渗透率为 $(0.0003 \sim 0.8900) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2.3 深层煤层和炭质页岩含气量大,富含游离气

煤系非常规气潜力在构造、沉积和水文地质条件约束下,主要受烃源岩含气性影响,关键因素包括显微组分类型、TOC、 R_o (镜质体反射率)、温度、压力等 [30-32]。鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤系气有机地球化学特征差异明显,主力煤层和炭质页岩有机显微组分以镜质组为主,垂向上含量变化小,平面上中-东部镜质组含量在75%~94%,西部镜质组含量在45%~88% [30,33]。煤岩和炭质页岩TOC、氯仿沥青“A”含量和总烃含量均表现为高值,生烃潜力大,干酪根类型以Ⅲ型为主,TOC介于0.06%~55.49% [23,34],总体上TOC自西向东具有增大趋势。不同区域烃源岩演化程度具有差异性, R_o 介于0.63%~3.23%,山西组 R_o 平均为2.66%,太原组 R_o 平均为3.22% [35-36],有机质热演化进入成熟-高成熟阶段。整体上,煤系地层煤层含气量最大,炭质页岩次之,泥页岩最小。以鄂尔多斯盆地东北部大牛地地区为例,太原组和山西组煤层平均含气量为 $17.46 \text{ m}^3/\text{t}$,炭质页岩含气量为 $6.54 \text{ m}^3/\text{t}$,泥页岩含气量为 $1.62 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

煤层的吸附气量和总含气量主要受温度、压力和煤阶等影响。吸附气量随压力增大而增高,随温度升

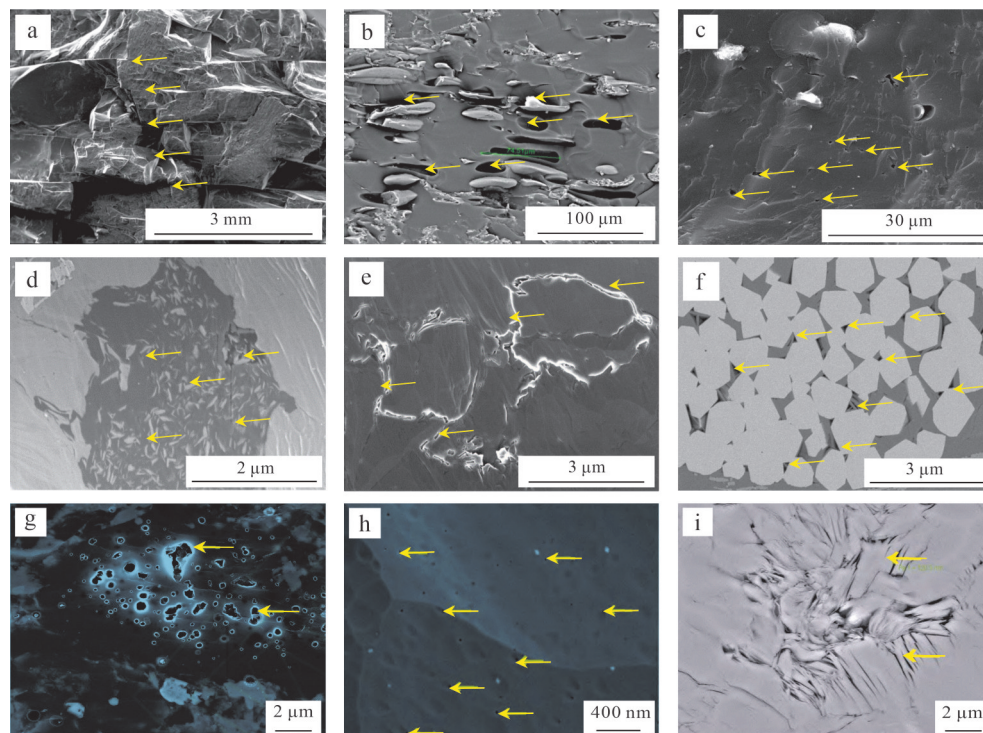


图3 鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤岩、炭质页岩和页岩扫描电镜照片

Fig. 3 SEM images of coals, carbonaceous shales and shales in the Carboniferous-Permian, Ordos Basin

a. S2井,埋深2 914.88 m,煤岩,割理; b. S1井,埋深2 890.16 m,煤岩,植物胞腔孔; c. XH1井,埋深2 804.24 m,煤岩,有机质内微孔隙; d. XH1井,埋深2 802.19 m,炭质页岩,团块状有机质发育少量气孔; e. XH1井,埋深2 802.19 m,炭质页岩,粘土矿物边缘微裂缝发育; f. XH1井,埋深2 818.90 m,炭质页岩,黄铁矿边缘发育微孔隙; g. DJ51井,埋深2 296.60 m,页岩,填隙状有机质发育粒间孔^[28]; h. DJ51井,埋深2 142.00 m,页岩,条块状有机质发育气孔^[28]; i. DJ51井,埋深2 267.00 m,页岩,片状高岭石集合体发育层间缝^[28]

高而降低。随埋深变大,压力和温度增大,浅层以压力效应为主,吸附气含量高,深层以温度效应为主,吸附气含量变低,从而导致不同煤阶存在最大吸附气量临界深度带(1 400~1 800 m),高煤阶煤层的吸附临界深度最大。深度小于1 800 m时,压力的影响占主导,吸附气含量随深度增加逐渐增高;深度大于1 800 m时,温度的影响占主导,吸附气含量随深度增加逐渐降低,气体开始解吸,游离气含量逐渐增高(图4)。鄂尔多斯盆地东缘浅层煤层含气量远小于兰氏体积,主要为吸附气;中部煤层含气量和兰氏体积接近,气体处于吸附饱和状态;大牛地深层煤层含气量大于兰氏体积,表明深层煤层富含游离气(图4)。延川南和大宁一吉县等地区深层煤层气井具有产水少、见气早、增长快、产量高等生产特点,表明深层煤层含气量高和游离气资源丰富。

煤系地层页岩的吸附气量和总含气量主要受温度、压力和TOC等影响。以鄂尔多斯盆地东北部石炭系-二叠系页岩为例,随着埋深增加,温度和压力增大,在浅层以压力效应为主,吸附气量增大;深层温度效应超过压力效应,吸附气量逐渐变小,造成不同TOC

页岩存在最大吸附气量临界深度带(680~880 m)(图5)。进一步来看,吸附气量与TOC成正比,表现为TOC越高,最大吸附气量临界深度越大。总含气量随着埋深和TOC增加而增大,导致深层页岩总含气量高于吸附气量,在孔隙和裂缝中产生游离气。

2.4 压裂工艺不断升级优化,有望实现煤系非常规气规模性开发

煤系地层可压裂性在本质上是不同岩性或岩性组合的综合反映。煤系地层的岩性复杂、非均质性强,不同岩性的岩石力学参数差异对人工裂缝起裂和延伸影响大,适应性压裂工艺是煤系非常规气高效开发的关键^[39]。煤系地层中煤层的塑性最强,具有低杨氏模量、高泊松比和低抗压强度等特点,在压裂段簇位置选择、立体缝网参数设计,尤其是体积压裂工艺实施和压裂液体系研发中需要重点考虑。

近年来,中国石化借鉴页岩气钻完井策略,不断迭代升级煤层气钻完井参数,实现了气井的高产稳产。延川南地区,煤层气井型从以直井为主逐渐变为以水平井为主,水平段长度从几百米增加到上千米;压裂工

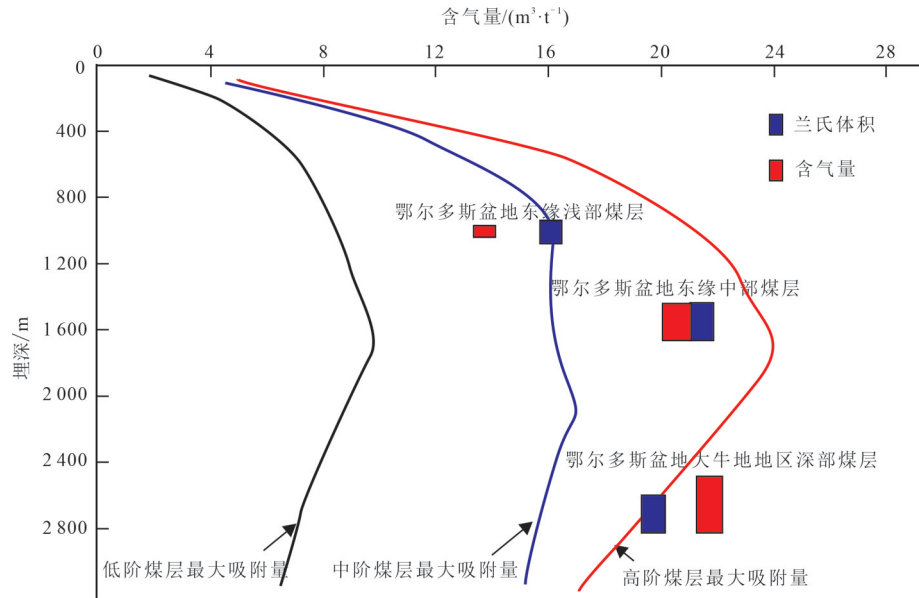


图4 鄂尔多斯盆地不同煤阶和地区煤层含气量随埋深变化曲线(修改自文献[37])

Fig. 4 Gas content vs. burial depth for different coal ranks and areas in the Ordos Basin (modified from reference [37])

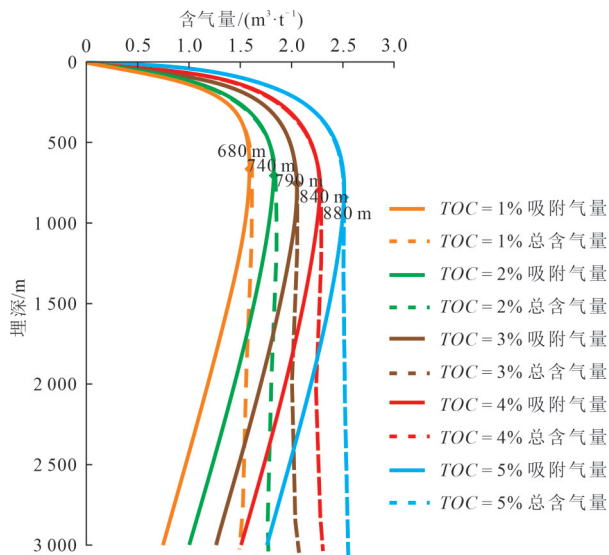


图5 鄂尔多斯盆地东北部页岩含气量随埋深变化曲线
(修改自文献[38])

Fig. 5 Gas content of shales vs. burial depth in the northeastern Ordos Basin (modified from reference[38])

艺上形成了以“远支撑”为核心理念的“大排量、大液量、大砂量”高效支撑压裂工艺,砂液用量从百万方砂、千方液增加至千方砂、万方液。以延川南煤层气为例,早期单井产量不足4 000 m³/d,针对裂缝延伸长度短、支撑剂近井筒堆积、支撑效果不理想等问题,以提升单井EUR(评估最终可采储量)为目的,采取了逐级提排量(12—14—18 m³/min)的措施,实现缝内净压力和远端铺砂浓度的有效增加;提升单井总砂量(150—500—1 000 m³)和总液量(2 000—4 000—10 000 m³),实现远距离支撑

和裂缝的充分延伸。在压裂液体系方面,优化提升氮气泡沫、低伤害高粘液等携砂能力,研发低密度远运移的支撑剂,实现压得开、撑得住的高效储层改造。煤层气P11井的压裂强度和规模甚至超过涪陵焦石坝主体区页岩气井JY162-1,相比使用传统工艺的老井,新井产量得到大幅提升(图6)。

3 勘探开发思路与技术攻关方向

尽管前人对鄂尔多斯盆地致密砂岩气和浅层煤层气勘探开展了相关研究工作,但针对煤系地层中烃源岩层系岩性组合气的综合评价、立体勘探、甜点识别、地质-工程一体化等方面研究仍然比较薄弱。

1)煤系烃源岩层系岩性组合综合评价是推进鄂尔多斯盆地非常规气勘探的基础。

鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系发育煤层、炭质页岩、暗色泥页岩、灰岩和砂岩,具有烃源岩类型多和岩性组合样式多的特征,需综合评价不同类型烃源岩及其组合的生烃能力、储集空间、含气性和可压裂性,优选有利的岩性组合。在此基础上,优选有利目标,开展攻关试验,落实资源潜力。基于岩性组合特征及其分布的认识,初步优选出太原组的8#煤系岩性组合为最有利的勘探目标,表现为厚度较大、分布稳定、含气量高等特征。以煤系烃源岩层系岩性组合综合评价参数为选区依据(表1),初步确定鄂尔多斯盆地大牛地地区为煤系非常规气勘探有利区,目标层段埋深在2 500~3 000 m,面积为2 003 km²,煤系非常规气地质资源量

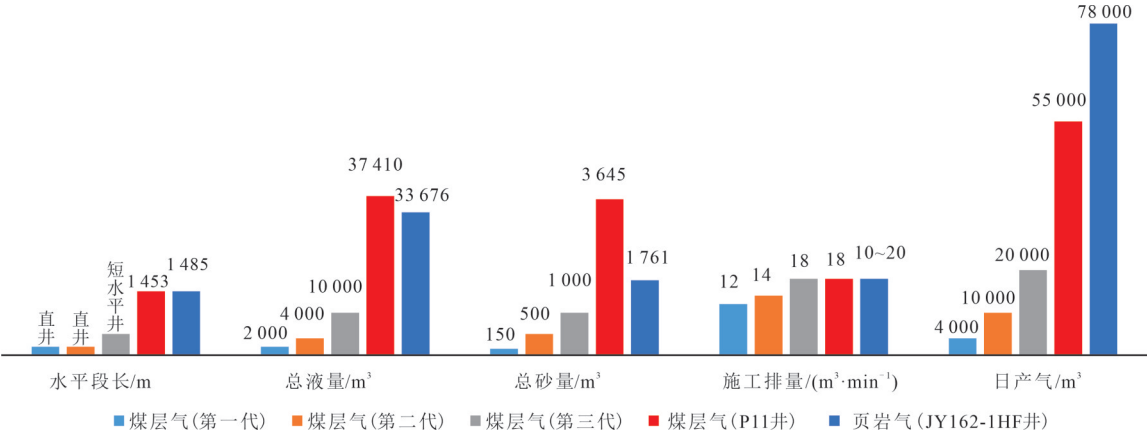


图6 鄂尔多斯盆地不同类型钻完井工艺参数对比

Fig. 6 Comparison of technological parameters of different types of drilling and completion in the Ordos Basin

为 $10\,530 \times 10^8\text{ m}^3$ 。

2) 多层系、多类型立体勘探开发是鄂尔多斯盆地煤系非常规气勘探开发实现突破的重要途径。

鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系沉积环境类型多、

表1 鄂尔多斯盆地煤系非常规气综合评价参数体系

Table 1 Major parameters for comprehensive evaluation of coal-measure unconventional gases in the Ordos Basin

非常规气类型	主要评价参数
煤层气	埋深、煤阶、煤层厚度、含气量、渗透率、地下水矿化度
页岩气	TOC、R _o 、优质页岩厚度、孔隙度、含气量、压力系数、顶底板岩性、构造复杂程度
致密砂岩气	砂岩厚度、孔隙度、渗透率、含气饱和度

岩性复杂、非均质性强,面临单一资源动用难、单井递减快、稳产期短等问题,煤层气、页岩气和致密砂岩气的共探合采成为天然气资源有效动用的一种途径。鄂尔多斯盆地太原组下部页岩气、中部煤层气和上部煤层气-页岩气,山西组下部页岩气-致密砂岩气、中部煤层气-页岩气-致密砂岩气和上部页岩气-致密砂岩气,形成了多层系、多类型的立体勘探组合(图7)。不同类型非常规气共存情况下的储层质量、含气性评价思路与方法有待深入研究,富集主控因素和立体勘探开发技术研究还比较薄弱,制约了非常规气的大规模商业开发。因此,需根据煤系地层的沉积和岩性特征,进一步加强岩性组合类型、时空分布规律、储

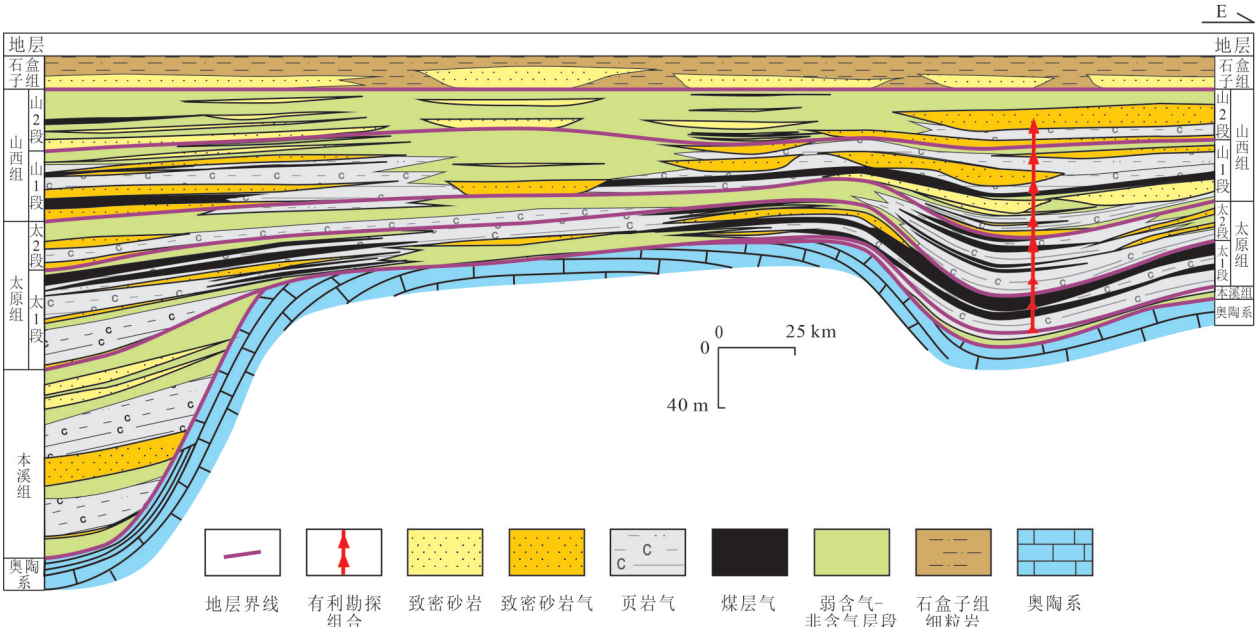


图7 鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系非常规气立体勘探示意图(剖面位置见图1)

Fig. 7 Schematic diagram showing joint exploration of different types of unconventional gas in the Carboniferous-Permian in the Ordos Basin (see Fig. 1 for the profile location)

层质量、含气性和富集机理研究,探索立体勘探模式,培育特色的钻完井工艺,实现鄂尔多斯盆地煤系非常规气勘探突破。

3)甜点评价方法与技术及配套压裂工艺是鄂尔多斯盆地深层煤系非常规气重要攻关方向。

在鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤系地层,已有多口深层探井实现勘探突破。因此,深层煤系非常规气是极具发展潜力的现实资源,有望成为非常规气勘探开发的新阵地。鄂尔多斯盆地太原组8#和山西组5#煤系层段分布稳定,含气量大,富含游离气,资源潜力大,但面临埋深较大、储层致密、非均质性强、气-水分异难度大、甜点识别难度大、应力大等挑战,重点攻关方向是地质甜点和工程甜点预测技术方法。因此,需针对山西组、太原组的煤系层段岩性组合及含气性的差异性,探索甜点评价方法,完善压裂工艺,加强排采规律研究,实现深层煤系气高效开发。

4)地质-工程一体化的管理和运行是煤系非常规气高效勘探与开发的有力保障。

煤系非常规气应充分借鉴页岩气地质-工程一体化的实践经验,综合考虑烃源岩品质、储集性能及其工程可压裂性,明确地质、工程双甜点;在此基础上,围绕提高单井产量这个关键问题,基于地质-气藏精细表征、地质建模、地质力学参数等多方向、多尺度、多学科综合评价结果,对钻井、完井、压裂等工程方案的设计和调整提出优化建议,同时根据钻完井和压裂实践中遇到的实际问题开展回顾性分析和系统性总结,反过来完善和修正地质综合评价理论认识和技术发展方向,形成地质与工程高度融合、相互促进的一体化勘探开发管理和作业模式,大力推进中国煤系非常规气规模效益开发。

4 结论

1)鄂尔多斯盆地石炭系太原组及下二叠统山西组是煤系非常规气勘探的目的层段。沉积环境多样,烃源岩类型多,岩性组合类型多,富煤组合和富有机质页岩组合为两大有利非常规岩性组合,具有高 TOC 、高 R_o 和高含气性的特征。

2)煤系非常规气潜力主要受生烃潜力、储层质量和含气性控制。煤系烃源岩有机显微组分中镜质组含量高,演化程度较高,生气潜力大,储集空间以有机孔和微裂缝为主。浅层煤层以吸附气为主,较深层含气量低,深层煤层存在游离气,含气量高,但面临埋深大和储层致密等挑战。

3)聚焦深层煤系储层有效改造体积小和低产等问题,初步形成了“长水平段、大排量、大液量、大砂量”高效钻完井工艺,为延川南地区煤系非常规气的勘探突破提供了有力支撑。

4)鄂尔多斯盆地煤系非常规气资源丰富,但岩性复杂、非均质性强。为了推动煤系非常规气勘探开发,需加强岩性组合、储层质量和含气性等综合评价,探索立体勘探开发技术,优选地质甜点和工程甜点,攻关深层,形成煤系非常规气地质-工程一体化模式。

参 考 文 献

- [1] 戴金星,倪云燕,黄士鹏,等. 煤成气研究对中国天然气工业发展的重要意义[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(1): 1-22.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Huang Shipeng, et al. Significant function of coal-derived gas study for natural gas industry development in China[J]. Natural Gas Geosciences, 2014, 25(1): 1-22.
- [2] 秦勇, 申建, 沈玉林. 叠置含气系统共采兼容性——煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 14-23.
Qin Yong, Shen Jian, Shen Yulin. Mining compatibility of superposed gas-bearing systems: A general geological problem for extraction of three natural gases and deep CBM in coal series [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 11-18.
- [3] 郭旭升, 胡东风, 刘若冰, 等. 四川盆地二叠系海-陆过渡相页岩气地质条件及勘探潜力[J]. 天然气工业, 2018, 38(10): 11-18.
Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Liu Ruobing, et al. Geological conditions and exploration potential of Permian marine-continent transitional facies shale gas in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(10): 11-18.
- [4] 郭旭升, 蔡勋育, 刘金连, 等. 中国石化“十三五”天然气勘探进展与前景展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 12-22.
Guo Xusheng, Cai Xunyu, Liu Jinlian, et al. Natural gas exploration progress of Sinopec during the 13th Five-Year Plan and prospect forecast during the 14th Five-Year Plan [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 12-22.
- [5] 秦勇. 中国煤系气共生藏作用研究进展[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 26-36.
Qin Yong. Research progress of symbiotic accumulation of coal measure gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 26-36.
- [6] 杨兆彪, 秦勇, 陈世悦, 等. 多煤层储层能量垂向分布特征及控制机理[J]. 地质学报, 2013, 87(1): 139-144.
Yang Zhaobiao, Qin Yong, Chen Shiyue, et al. Controlling mechanism and vertical distribution characteristics of reservoir energy of multi-coalbeds [J]. Journal of Geological, 2013, 87(1): 139-144.
- [7] 朱炎铭, 侯晓伟, 崔兆帮, 等. 河北省煤系天然气资源及其成藏作用[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 202-211.
Zhu Yanming, Hou Xiaowei, Cai Zhaobang, et al. Resources and

- reservoir formation of unconventional gas in coal measure, Hebei Province[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 202-211.
- [8] 秦勇. 共生理论框架下的煤系气共生体系研究进展与思考[J]. *中国煤炭地质*, 2020, 32(9): 26-32+58.
- Qin Yong. Progress in research and thinking on coal measures gas (CMG) paragenetic system based on paragenesis theory[J]. *Coal Geology of China*, 2020, 32(9): 26-32+58.
- [9] 毕彩芹, 胡志方, 汤达祯, 等. 煤系气研究进展与待解决的重要科学问题[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 402-423.
- Bi Caiqin, Hu Zhifang, Tang Dazhen, et al. Research progress of coal measure gas and some important scientific problems [J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 402-423.
- [10] 邹才能, 杨智, 黄士鹏, 等. 煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(3): 433-442.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Huang Shipeng, et al. Resource types, formation, distribution and prospects of coal-measure gas [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 433-442.
- [11] 张道勇, 朱杰, 赵先良, 等. 中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.
- [12] 国土资源部油气资源战略研究中心. 中国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- Research Center for Oil and Gas Resources Strategy, Ministry of Land and Resources. National shale gas resource potential survey and evaluation and favorable area selection [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [13] 李五忠, 孙斌, 孙钦平, 等. 以煤系天然气开发促进中国煤层气发展的对策分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 67-71.
- Li Wuzhong, Sun Bin, Sun Qiping, et al. Analysis on coal-bed methane development based on coal measure gas in China and its countermeasure [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 67-71.
- [14] 单衍胜, 毕彩芹, 迟焕鹏, 等. 六盘水地区杨梅树向斜煤层气地质特征与有利开发层段优选[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(1): 122-129.
- Shan Yansheng, Bi Caiqin, Chi Huanpeng, et al. Geological characteristics of coalbed methane and optimization for favorable productive intervals of Yangmeishu syncline in Liupanshui area [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(1): 122-129.
- [15] 姜杉钰, 王峰. 中国煤系天然气共探合采的战略选择与发展对策[J]. *天然气工业*, 2020, 40(1): 152-159.
- Jiang Shanyu, Wang Feng. Strategic choice and development countermeasures for the commingled exploration and exploitation of coal measure natural gas in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(1): 152-159.
- [16] 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.
- [17] 王双明. 鄂尔多斯盆地叠合演化及构造对成煤作用的控制[J]. *地学前缘*, 2017, 24(2): 54-63.
- Wang Shuangming. Ordos Basin superposed evolution and structural controls of coal forming activities [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(2): 54-63.
- [18] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地西缘掩冲带构造与油气[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1990: 91-105.
- Yang Junjie. Structures and oil and gas in the thrust zone on the western margin of Ordos Basin [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1990: 91-105.
- [19] 何登发, 包洪平, 开百泽, 等. 鄂尔多斯盆地及其邻区关键构造变革期次及其特征[J]. *石油学报*, 2021, 42(10): 1255-1269.
- He Dengfa, Bao Hongping, Kai Baize, et al. Critical tectonic modification periods and its geologic features of Ordos Basin and adjacent area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(10): 1255-1269.
- [20] 郭英海, 刘焕杰, 权彪, 等. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化[J]. *沉积学报*, 1998, 16(3): 44-51.
- Guo Yinghai, Liu Huanjie, Quan Biao, et al. Late Paleozoic sedimentary system and paleogeographic evolution of Ordos area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 44-51.
- [21] 付金华, 范立勇, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地天然气勘探新进展、前景展望和对策措施[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(4): 418-430.
- Fu Jinhua, Fan Liyong, Liu Xinshe, et al. New progresses, prospects and countermeasures of natural gas exploration in the Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(4): 418-430.
- [22] 李文厚, 张倩, 李克永, 等. 鄂尔多斯盆地及周缘地区晚古生代沉积演化[J]. *古地理学报*, 2021, 23(1): 39-52.
- Li Wenhou, Zhang Qian, Li Keyong, et al. Sedimentary evolution of the late Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas [J]. *Journal of palaeogeography*, 2021, 23(1): 39-52.
- [23] 库细锋. 鄂尔多斯盆地上古生界太原组页岩气资源潜力评价与选区[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- Ku Xifeng. Resource potential evaluation and favorable exploration areas prediction of the shale gas in Upper Paleozoic Taiyuan Formation in Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014.
- [24] 滕吉文, 王玉辰, 司芎, 等. 煤炭、煤层气多元转型是中国化石能源勘探开发与供需之本[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(22): 9169-9193.
- Teng Jiwen, Wang Yuchen, Si Xiang, et al. Diversified transformation of coal and coalbed methane: China's fossil energy exploration, development, supply and demand [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(22): 9169-9193.
- [25] 郭少斌, 郑红梅, 黄家国. 鄂尔多斯盆地上古生界非常规天然气综合勘探前景[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(6): 69-77.
- Guo Shaobin, Zheng Hongmei, Huang Jiaguo. Integrated exploration prospects of unconventional gas of Upper Paleozoic in

- Ordos Basin[J]. Geological Scientific Information, 2014, 33(6): 69-77.
- [26] 李国璋. 煤系气合采层贡献及其预测模型——以鄂尔多斯盆地临兴—神府地区为例[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- Li Guozhang. Contribution and its prediction model of production strata for joint CMG mining: A case from Linxing-Shenfu Area in Ordos Basin, China[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [27] 黄婷. 鄂尔多斯盆地东缘煤系页岩气储层特征评价[J]. 中国煤炭地质, 2020, 32(1):65-72.
- Huang Ting. Assessment of coal measures shale gas reservoir features in Ordos Basin eastern margin[J]. Coal Geology of China, 2020, 32(1):65-72.
- [28] 武瑾, 王红岩, 施振生, 等. 海-陆过渡相黑色页岩优势岩相类型及成因机制——以鄂尔多斯盆地东缘二叠系山西组为例[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1-13.
- Wu Jin, Wang Hongyan, Shi Zhensheng, et al. Favorable lithofacies types and genesis of marine-continental transitional black shale: A case study of Permian Shanxi Formation in the eastern margin of Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1-13.
- [29] 赵丽娟, 秦勇. 鄂尔多斯盆地东部煤岩孔隙特征实验分析[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(1):22-25+33.
- Zhao Lijuan, Qin Yong. Experimental analysis of coal and rock pore characteristics in Eastern Ordos Basin[J]. Coal Geology of China, 2014, 26(1):22-25+33.
- [30] 吴建国, 刘大锰, 姚艳斌. 鄂尔多斯盆地渭北地区页岩纳米孔隙发育特征及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4):542-550.
- Wu Jianguo, Liu Dameng, Yao Yanbin. Characteristics and controlling factors of nanopores in shales in Weibei, Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2014, 35(4):542-550.
- [31] 曹代勇, 刘亢, 刘金城, 等. 鄂尔多斯盆地西缘煤系非常规气共生组合特征[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2):277-285.
- Cao Daiyong, Liu Kang, Liu Jincheng, et al. Combination characteristics of unconventional gas in coal measure in the west margin of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 277-285.
- [32] 陈刚, 胡宗全. 鄂尔多斯盆地东南缘延川南深层煤层气富集高产模式探讨[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6):1572-1579.
- Chen Gang, Hu Zongquan. Discussion on the model of enrichment and high yield of deep coalbed methane in Yanchuannan area at south-eastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6):1572-1579.
- [33] 曹代勇, 聂敬, 王安民, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区煤系气富集的构造-热作用控制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6):1526-1532.
- Cao Daiyong, Nie Jing, Wang Anmin, et al. Structural and thermal control of enrichment conditions of coal measure gases in Linxing block of eastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(6):1526-1532.
- [34] 刘鹏. 鄂尔多斯盆地油气类矿产资源共生富集规律研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- Liu Peng. Research on genetic relationship and enrichment patterns of hydrocarbon resources of Ordos Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [35] 孙寅森. 鄂尔多斯盆地东部山西组页岩孔隙表征及控制因素[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- Sun Yinsen. Pore characterization and control factors of Shanxi shale in eastern Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [36] 郭少斌, 王子龙, 马啸. 中国重点地区二叠系海-陆过渡相页岩气勘探前景[J]. 石油实验地质, 2021, 43(3):377-385+414.
- Guo Shaobin, Wang Zilong, Ma Xiao. Exploration prospect of shale gas with Permian transitional facies of some key areas in China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(3):377-385+414.
- [37] 陈刚, 秦勇, 胡宗全, 等. 不同煤阶深煤层含气量差异及其变化规律[J]. 高校地质学报, 2015, 21(2): 274-279.
- Chen Gang, Qin Yong, Hu Zongquan, et al. Variations of gas content in deep coalbeds of different coal ranks[J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(2): 274-279.
- [38] Wang Feiteng, Guo Shaobin. Shale gas content evolution in the Ordos Basin[J]. International Journal of Coal Geology, 2019, 211:103231.
- [39] 孙晗森. 中国煤层气压裂技术发展现状与展望[J]. 中国海上油气, 2021, 33(4):120-128.
- Sun Hansen. Development status and prospect of CBM fracturing technology in China[J]. China Onshore Oil and Gas, 2021, 33(4):120-128.

(编辑 张玉银)