

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.208>



鄂尔多斯盆地大吉 70 井“铁柱子”建立及其地质意义

张伟^{1,2}, 陈东^{1,2}, 丁蓉^{1,2}, 边利恒^{1,2}, 申建³, 胡明卿^{1,2}, 李树新^{1,2},
李星涛^{1,2}, 吴鹏¹, 朱文涛², 孙雪冬^{1,2}, 马壮^{1,2}, 杨海星^{1,2}

1. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095

2. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028

3. 中国矿业大学煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏徐州 221008

摘要: 为建立石炭-二叠系地层剖面“铁柱子”, 在鄂尔多斯盆地东缘大吉地区部署实施大吉 70 井. 该井取心井段 1 843.27~2 032.27 m 共 189 m, 岩心收获率 100%. 通过厘米级岩心精细描述、多尺度 CT 扫描、地球化学测试与分析等工作, 结合地球物理响应特征, 构建了鄂尔多斯盆地东南缘晚石炭世-早二叠世等时地层格架, 厘清了沉积体系空间配置关系, 为沉积环境研究奠定基础. 揭示出 5#、8# 煤层以及 4#、6# 等薄煤层以半亮-光亮煤为主且天然裂缝网络高度发育(裂隙孔隙度为 1.17%~1.19%), 有效支撑“高含气、高饱和、高游离”的成藏认识; 本溪组-山西组发育 5 套优质页岩段, 为海陆过渡相页岩气的突破提供了直接地质依据. 大吉 70 井“铁柱子”标准剖面的建立, 不仅直接验证并支撑了大吉区块深层煤层气的勘探突破, 还发现了多套页岩气接替层系, 为鄂尔多斯盆地高效勘探开发提供了关键地质证据和决策依据.

关键词: 鄂尔多斯盆地; “铁柱子”工程; 连续取心; 煤层气; 页岩气; 地质意义; 石油地质学.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2026)07-2445-17

收稿日期: 2025-01-23

Establishment of “Iron Pillar” of Well Daji 70 in Ordos Basin and Its Geological Significance

Zhang Wei^{1,2}, Chen Dong^{1,2}, Ding Rong^{1,2}, Bian Liheng^{1,2}, Shen Jian³, Hu Mingqing^{1,2}, Li Shuxin^{1,2},
Li Xingtao^{1,2}, Wu Peng¹, Zhu Wentao², Sun Xuedong^{1,2}, Ma Zhuang^{1,2}, Yang Haixing^{1,2}

1. China United Coalbed Methane National Engineering Research Center Co., Ltd., Beijing 100095, China

2. PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100028, China

3. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources and Reservoir Formation Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China

Abstract: To establish a stratigraphic benchmark for the Carboniferous-Permian formation, Well Daji 70 was deployed and drilled in the Daji area on the eastern margin of the Ordos Basin. This well cored a total of 189 m from 1 843.27 m to 2 032.27 m, achieving a 100% core recovery rate. Through centimeter-scale detailed core description, multi-scale CT scanning, geochemical testing and analysis, combined with geophysical response characteristics, an isochronous stratigraphic

基金项目: 中石油煤层气有限责任公司科技项目(No. 25MQCTSG011).

作者简介: 张伟(1981—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事煤层气勘探开发研究. ORCID: 0000-0002-2302-3980. E-mail: zhangwei2010@petrochina.com.cn

引用格式: 张伟, 陈东, 丁蓉, 边利恒, 申建, 胡明卿, 李树新, 李星涛, 吴鹏, 朱文涛, 孙雪冬, 马壮, 杨海星, 2026. 鄂尔多斯盆地大吉 70 井“铁柱子”建立及其地质意义. 地球科学, 51(7): 2445–2461.

Citation: Zhang Wei, Chen Dong, Ding Rong, Bian Liheng, Shen Jian, Hu Mingqing, Li Shuxin, Li Xingtao, Wu Peng, Zhu Wentao, Sun Xuedong, Ma Zhuang, Yang Haixing, 2026. Establishment of “Iron Pillar” of Well Daji 70 in Ordos Basin and Its Geological Significance. *Earth Science*, 51(7): 2445–2461.

framework for the Late Carboniferous to Early Permian on the southeastern margin of the Ordos Basin was constructed. This clarified the spatial configuration of sedimentary systems, laying the foundation for sedimentary environment research. It revealed that the No. 5 and No. 8 coal seams, as well as thin coal seams such as No. 4 and No. 6, are dominated by semi-bright to bright coal with a highly developed natural fracture network (fracture porosity 1.17%–1.19%), effectively supporting the understanding of reservoir formation characterized by “high gas content, high saturation, and high free gas.” Additionally, five sets of high-quality shale intervals were identified in the Benxi Formation to Shanxi Formation, providing direct geological evidence for breakthroughs in transitional marine-terrestrial shale gas exploration. The establishment of the “Iron Pillar” in Well Daji 70 not only directly verified and supported the exploration breakthrough of deep coalbed gas in the Daji block but also revealed multiple shale gas replacement layers, offering critical geological evidence and decision-making support for efficient exploration and development in the Ordos Basin.

Key words: Ordos Basin; “Iron Pillar” project; continuous coring; coalbed methane; shale gas; geological significance; petroleum geology.

煤系气泛指赋存在煤系储集体中的各类天然气,在美国圣胡安盆地和黑勇士盆地、澳大利亚苏拉特与博文盆地、中国的鄂尔多斯盆地、四川盆地等多个盆地内广泛富集,引起了国内外产业与学术界高度关注(Castro-Alvarez *et al.*, 2018; 秦勇等, 2019; Shen *et al.*, 2021; 刘翰林等, 2024; 李熹微等, 2025). 近十年来,依托鄂尔多斯盆地东缘丰富的煤系气资源及相对优良的地质条件、科技创新(熊先钺等, 2023; 闫霞等, 2025; 徐凤银等, 2025)(图 1),煤岩气勘探开发取得重要突破(牛小兵等, 2024; 孙粉锦等, 2024; 周立宏等, 2025; 邹才能等, 2025),同时煤系天然气勘探开发也从“单一层系、单井评价、浅部层系”向“立体开发、协同动用、深部层系”逐渐转变(秦勇等, 2022; 秦勇, 2025).

总体来看,勘探实践可划分为 3 个阶段(杨秀春等, 2022; 徐长贵等, 2024):早期浅层煤层气勘探(埋深<800 m)阶段,聚焦构造高点富集

区,发现了韩城 WL1 井区气田;中期浅-中深层勘探(800~1 500 m)阶段,在“水动力控气-构造调整-缓坡单斜”理论指导下,相继成功开发了保德、临汾煤层气田,并突破了韩城构造煤增产改造技术瓶颈;近年深层勘探(>2 000 m)突破阶段,创新提出“深煤吸附气-游离气二元富集”成藏认识,实现大宁-吉县等区块的商业开发. 这一历程记录了我国煤系非常规天然气产业从无到有、由浅入深的完整路径.

然而,随着勘探向纵深推进、层系增多,传统以单一煤层为目标的开发方式暴露出“资源动用率低、层间干扰强、薄层改造难”三大技术瓶颈. 从地层结构上看,煤系普遍呈现“煤层-页岩-致密砂岩”纵向薄互层叠置的“三明治”结构,主力煤层厚度通常不足 10 m,页岩气层厚度多为 5~15 m,致密砂岩气层呈分散状分布,这使得传统单一层系开发模式面临严峻挑战. 资源利用率低下导致开发成

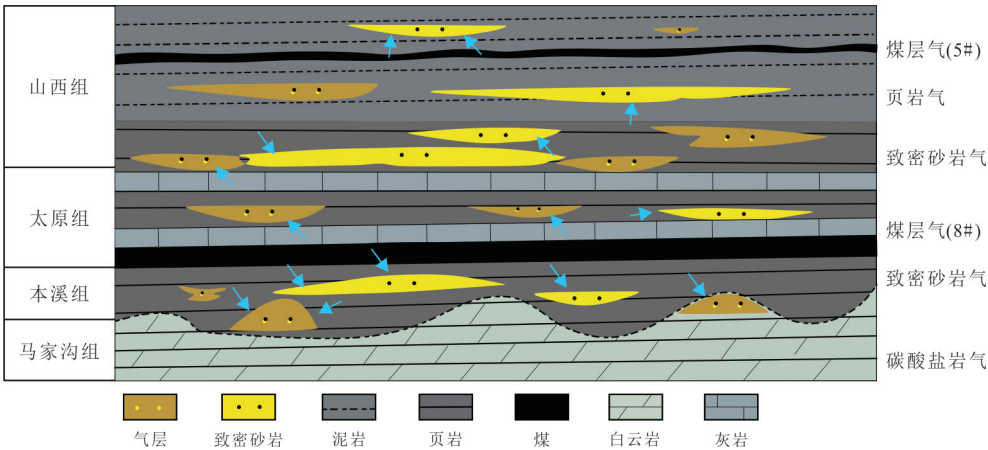


图 1 大古地区煤系非常规天然气立体成藏模式示意图(据杨华等,2015修改)

Fig.1 Schematic diagram of three-dimensional accumulation model for unconventional natural gas in coal measures of eastern Ordos Basin (modified after Yang *et al.*, 2015)

本激增,层间压力系统差异引发合采干扰,薄互层特性制约压裂缝网有效性,均会导致单井产能低,经济效益不高(秦勇等,2016;李勇等,2023)(图1)。同时,早期勘探资料呈碎片化特征,煤层气研究侧重煤和气测试、页岩气聚焦有机地球化学、致密气评价关注储层物性,数据体系彼此独立,缺乏“全层系、连续、系统”的高精度地质-工程一体化数据,难以支撑目标层系精细表征或协同开发。

“铁柱子”概念的引入为破解上述瓶颈提供了关键路径。该理念源于石油地质-工程领域,指通过对目标层系连续完整取心并开展厘米级精细分析,构建能真实反映地质-工程特征的综合数据体(周立宏等,2020;赵贤正等,2022)。大港油田在页岩油勘探领域率先开展实践创新,G108-8井对孔店组二段495 m页岩层系实施系统取心,创国内单井连续取心纪录,并形成“岩心处理-厘米级精细描述-分析联测实验”的技术体系。通过对9 255块样品开展7大项52小项系统分析,建立了页岩油综合评价“铁柱子”,实证了烃源岩层内具备有效储集空间,颠覆了“烃源岩只能生油不能储油”的传统认识,为页岩油商业开发奠定了科学基础(赵贤正等,2019;周立宏等,2023)。类似地,渤海油田长筒取心(500~600 m)实践亦证明了该技术在提升取心效率、缩短钻井周期方面的显著优势。这些成功实践为煤系“铁柱子”构建提供了重要的方法论借鉴与技术支持。

聚焦鄂尔多斯盆地东缘大吉等深层区块,尽管煤层气勘探已取得重要进展并证实具备规模化资源基础,但4个关键地质问题仍严重制约立体高效开发(申建等,2018;史锐等,2025)。其一,理论认识缺乏实物验证,关于深层煤岩天然裂缝发育模式、游离气赋存机制的认识,缺乏高精度、连续性的地质剖面直接实证。传统测井与离散取心数据难以系统刻画裂缝网络空间展布与游离气分布规律,制约了富集理论的完善与勘探部署的精准性。其二,储层评价精度不足,主力煤层(如8#煤)甜点主控因素不明,煤岩组分(镜煤/亮煤)与裂缝发育关联性、夹研生烃潜力、顶底板封盖效应等关键参数亟待深化研究。其三,薄煤层资源潜力被低估,受“厚度小则潜力差”观念束缚,4#、6#等厚度仅0.5~1.5 m的薄煤层长期未被有效评价,其资源贡献亟待重新审视。其四,勘探接替层位方向不明,山²下部海陆过渡相页岩气前期探索因产量低且不稳受阻,优质层系分布与资源规模均不明

确,亟需明确新的接替方向以保障可持续开发。

因此,借鉴页岩油“铁柱子”的成功经验,在鄂尔多斯盆地东缘深层煤系构建覆盖煤层气、页岩气、致密砂岩气等全层系连续取心的“铁柱子”,整合岩性、储集能力、含气性、地应力等多维参数,形成“地质-地球物理-工程”一体化评价体系,破解深层煤层气地质难题,对推动煤系气资源立体高效开发具有重要意义。

1 “铁柱子”构建与层序格架划分

1.1 大吉70井概况

大吉70井位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡东部,山西省临汾市大宁县(图2)。该井完钻层位为奥陶系马家沟组(未穿),完钻井深2 087 m。大吉70井连续取心12筒次,取心进尺189 m,心长189 m,收获率100%。大吉70井钻遇多套煤层(4#煤、5#煤、6#煤、7#煤、8#煤、9#煤)、北岔沟砂岩及四套太原组灰岩,特别是钻遇5套优质页岩段(图3)。统计显示,砂岩和泥岩厚度占比最高,灰岩和页岩占比较低,分别为13.7%和10.3%。煤层占比仅为6.8%,但其稳定发育反映了良好的成煤环境。

1.2 “铁柱子”构建方法

针对大吉70井,研发了一套高度系统化、信息化的“铁柱子”构建方法,致力于实现从煤系岩层到数字化地质模型的精准转化。其核心在于对全井段连续取心的深度利用:岩心出筒后,立即启动标准化岩心整理流程,包括精细清洗、定向复位、密集编号与高分辨率拍照、CT全尺寸扫描,确保原始信息无遗漏。随后进入关键的科学切割环节,依据岩性突变、沉积旋回及构造特征以及测试分析方案,在纵向上切割剖面,揭示储层内部非均质性三维细节。厘米级精描是地质信息深度挖掘的核心,借助观察描述设备与标准图版,对每一厘米岩心进行沉积构造(如纹层类型、生物扰动强度)、矿物组分、成岩现象(胶结、溶蚀)、裂缝产状与充填物等十余项属性的定量-半定量描述与编码,构建微观尺度的地质档案。

为延伸观测维度并实现无损存档,应用多尺度扫描技术,如高光谱扫描揭示矿物分布,微CT扫描透视岩性组成与裂缝三维网络。基于上述精细成果以及亟需解决的关键问题,确定了“铁柱子”构建对象以“煤层和页岩为主、砂岩为辅”,制定了“密集取样、系统取样、控制取样、特殊取样、一致测试”5项取样测试原则。在精细描述与扫描圈定的关键目标

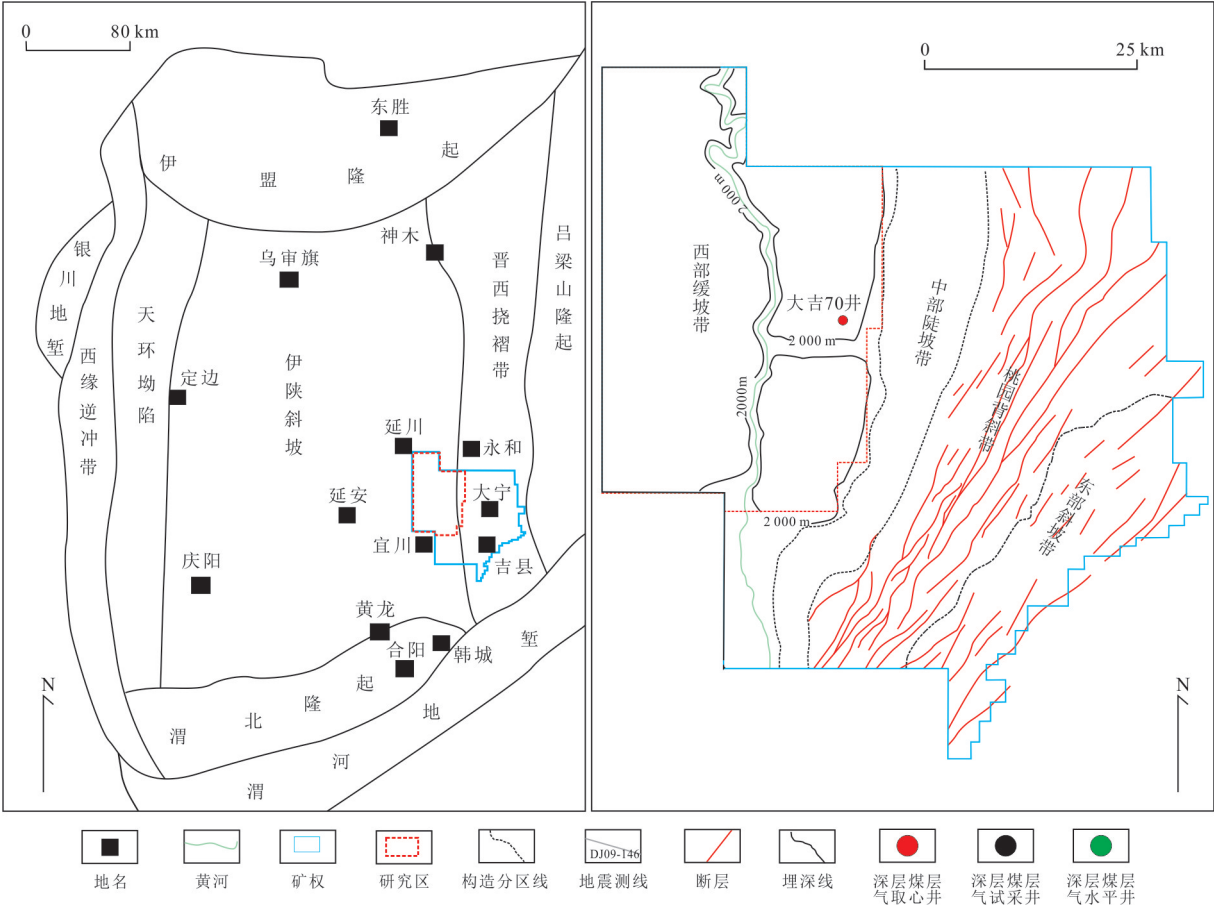


图2 大吉70井位置
Fig.2 Location of Well Daji 70

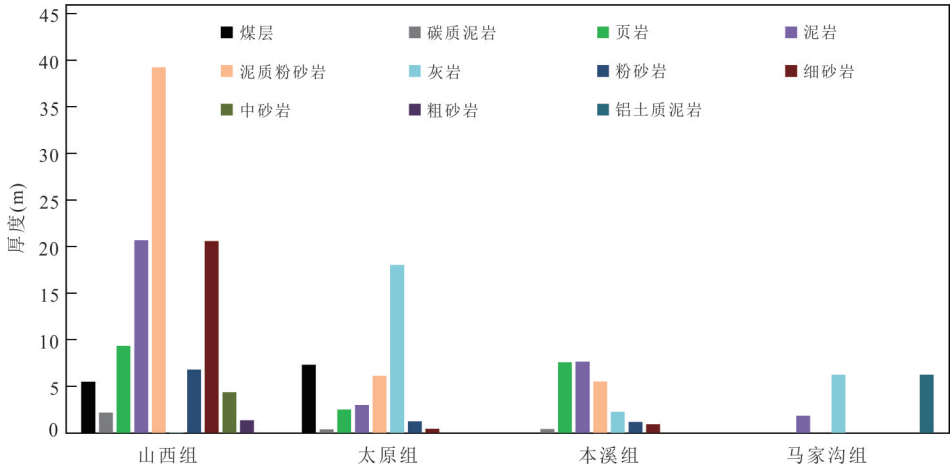


图3 大吉70井取心不同岩性厚度
Fig.3 Thicknesses of different lithologies in the coring results of Well Daji 70

段精准定位,针对煤、砂岩、页岩、碳酸盐段开展30大类2 657样次高密度全方位多角度分析测试,支撑地质工程一体化评价,厘清纵向目标靶体,助力气田高效建产.如图4所示,针对煤层开展12类共1 069样次分析化验测试,包括含气性、煤岩煤质、储层物性、微观孔隙结构、岩石力学性质等;砂岩段4类232样次分析化验测试,包括沉积环境、储集物性、孔喉特征、成岩演化及储层敏感性等;页岩段6类1 280样次分析测试,包括岩性、物性、含气性、烃源岩特性、岩石力学等实验.最终成果通过多维集成展示:构建包

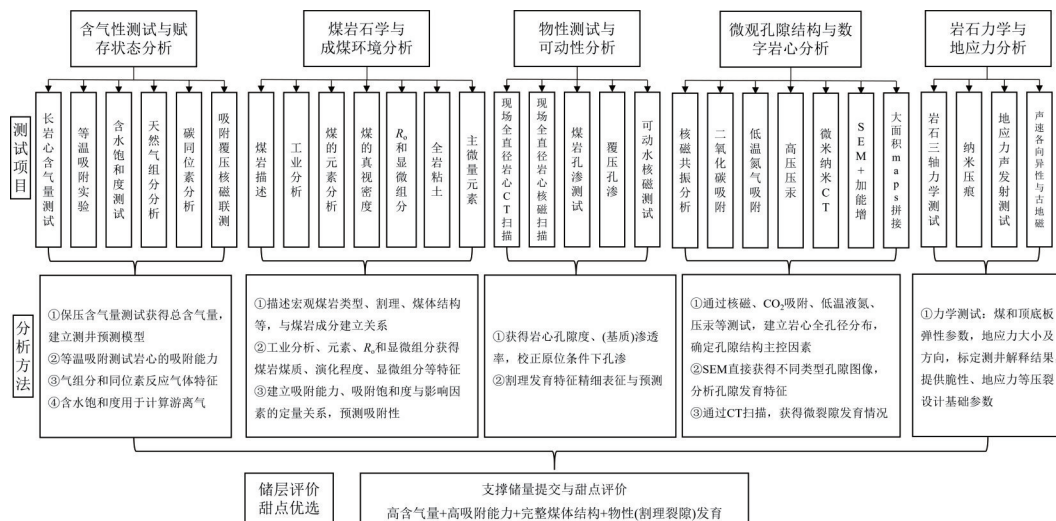


图 4 大吉 70“铁柱子”建设技术路线图

Fig.4 Technical roadmap for the construction of the Daji 70 “Iron Pillar”

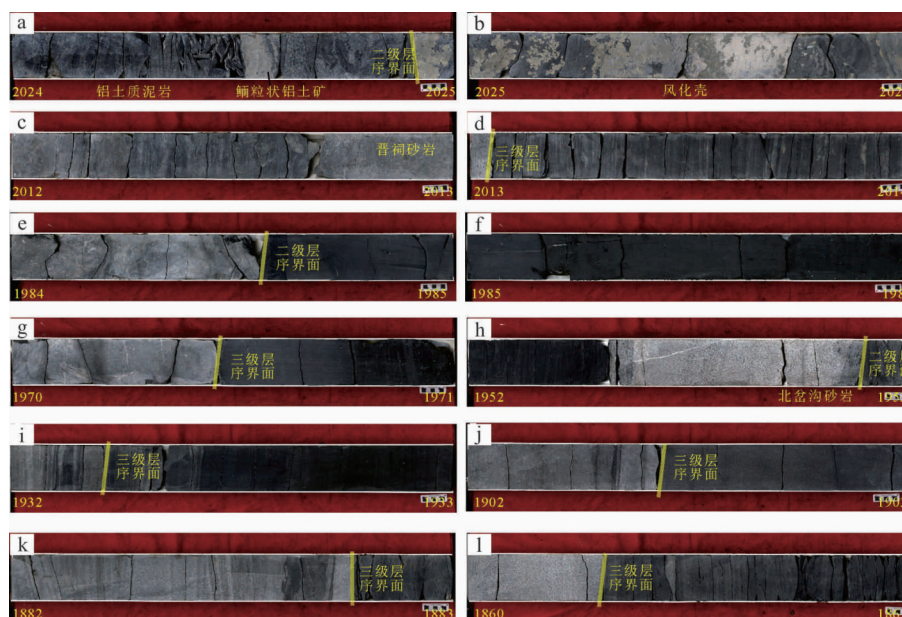


图 5 二级和三级层序界面特征

Fig.5 Characteristics of second- and third-order sequence boundaries

a. 本溪组与马家沟组界线特征; b. 马家沟组岩性特征; c. 晋祠砂岩及上覆深灰色页岩; d. 晋祠砂岩与下伏地层分界特征; e. 8#煤与顶部灰岩接触特征; f. 8#煤层特征; g. 7#煤层与顶部灰岩接触特征; h. 北岔沟砂岩与下伏地层接触特征; i~l. 山西组泥岩-砂岩突变接触面

含厘米级描述属性、扫描图像、实验数据的数字化岩心数据库,并以此为基础生成高分辨率岩心“铁柱子”综合图件,直观展示岩性序列、沉积演化、烃源岩分布、储集能力变化、含气性特征及甜点分布,实现岩心信息的永久保存、便捷查询与深度挖掘.

1.3 层序格架划分

层序界面精准识别是划分层序地层格架的重要前提.本文依据前人的成果识别层序界面(郭英海等,2004),基于大吉 70 井连续取心

资料,通过区域性不整合面、沉积间断面、沉积体系转换面、岩性/岩相突变面、冲刷面、侵蚀/暴露面等关键界面特征,结合最大海泛面,大吉 70 井共识别出 3 个二级层序界面、6 个三级层序界面(图 5、图 6).

本溪组与下伏奥陶系马家沟组的不整合界面为二级层序界面,华北盆地稳定发育.此界面之上为本溪组细粒碎屑岩沉积(图 5a),之下的马家沟组灰岩内部可见明显的塌陷构造及灰岩风化后的残

余角砾(图5b).太原组8#煤层顶部的灰岩接触面为第二个二级层序界面,表现为障壁砂坝-潟湖向碳酸盐潮坪沉积体系的转换(图5e、5f).受海西运动第一幕影响,古构造格局由南隆北倾转变为北隆南倾(尚冠雄,1997).太原组顶部灰岩与山西组砂泥岩之间的岩性突变面为第三个二级层序界面,表现为区域海退及沉积间断形成的不整合界面(图5h).山西组底部发育北岔沟灰色-灰白色石英砂岩,在区域上稳定发育且厚度较大,而太原组顶部也为区域上较为稳定的东大窑灰岩(图5h).此界面以下为障壁-潟湖环境,岩性以灰色-灰黑色泥页岩为主,向上海水退去,沉积环境转变为浅水三角洲环境.

三级层序界面主要为区域沉积间断面、岩性突变面和最大海侵面(图5c、5d、5f、5g、5i~5l).SQ2底部界面为区域标志层晋祠砂岩,反映陆源碎屑输入,为区域不整合面(图5c、5d,图6).SQ4底界为斜道灰岩底面,代表沉积环境转化和晚古生代最大海侵,直接终止了7#煤层发育.其余三级层序界面主要发育于山西组内部,主要为砂岩直接覆盖于泥岩之上,代表了岩性突变和冲刷面(图5i~5l),反映了山西组多期次沉积旋回变化.

基于二级及三级层序界面识别,二级层序界面同样为三级层序界面,共计划分出3个二级层序和9个三级层序(图6).本溪组底到8#煤层顶部为第一个二级层序,包含2个三级层序.沉积环境主体以障壁-潟湖为主,煤层主要发育在潮坪亚相的泥炭沼泽微相中.晚石炭世早期受南北两侧板块挤压影响,海水逐渐侵入,垂向发育2个海退旋回(郭英海等,2004).第二个二级层序共发育2个三级层序,为灰岩-泥岩的沉积序列,体现多次海侵海退旋回.沉积环境为障壁-潟湖及碳酸盐潮坪.山西组共发育3个三级层序,表现为多个砂泥旋回.其中,SQ5~7层序为水下分流河道、分流间湾及泥炭沼泽沉积,发育全区稳定分布的5#和4#煤层.泥页岩主要形成于海平面较高时期,煤层主要聚集在海平面下降或较低阶段.山1段沉积期,海水逐渐退出,发育三角洲平原.以河道冲刷面作为三级层序界面,可划分为层序特征相似的2个三级层序.

2 煤层发育及煤层气评价

2.1 煤层分布及聚煤环境

常规描述中基于含煤岩系钻孔岩心描述(DZ/T 0002)、烟煤的宏观煤岩类型分类(GB/T 18023)、

煤裂隙描述方法(MT/T 968)等规范,以5~10 cm长的样品为一个描述结果,描述宏观煤岩成分、光泽、结构、裂隙、填充物、割理、结核等.此次大吉70井宏观煤岩厘米级描述,突破常规分层厚度,丈量样品细分镜煤、亮煤条带,直达宏观煤岩成分,最小分层厚度0.3 cm,最后结合CT数据量化出宏观煤岩类型.如表1所示,大吉70井晚古生代煤系自上而下共发育6层主要煤层(编号4#~9#),依据厚度可划分为薄煤层(4#、6#、7#、9#,厚度 ≤ 0.48 m)与厚煤层(5#、8#,厚度4.15~6.22 m).煤体结构以原生结构为主,煤层结构主要为二分型(4#、6#、8#、9#),仅5#为三分型.垂向上含煤序列主要包括泥岩-煤-灰岩及泥岩-煤-泥岩的序列组合,表明煤层发育主要受海平面升降和气候波动的控制.沉积环境受海陆交互作用控制,多发育于间湾沼泽或潮坪相,聚煤作用常因海侵事件终止(如6#、7#煤层).煤岩类型以光亮煤和半亮煤主导(5#、8#最典型),裂隙发育具显著层间差异:5#、8#煤层中-小型网状裂隙密集(裂缝率0.98%~1.22%),方解石充填常见;顶底板岩性组合直接影响封盖能力,其中5#(碳质泥岩-粉砂岩)、8#(灰岩-泥岩)封隔性最优.含气性初步显示4#、8#具勘探潜力(4#全烃 $>10\%$,8#-1储集条件突出).

晚石炭世到早二叠世气候和沉积环境演化控制了聚煤过程(郭英海等,2004).本溪组时期气候炎热潮湿,大量陆源碎屑输入且利于植物繁盛,发育富有机质页岩.至太原组时期海平面持续升高,发育碳酸盐潮坪及障壁潟湖环境,在高位和海退时期发育煤层及页岩.随后到山西组时期气候逐渐向干旱演化,沉积环境向三角洲前缘到三角洲平原发育,植物逐渐由蕨类向裸子植物演化.山西组内部发育多个短期旋回,反映沉积环境变化频繁(图6),不利于有机质积累.晚石炭世到早二叠世早期气候逐渐由炎热潮湿向温暖湿润演化,在气候波动和海平面变化共同作用下发育厚度大和品质好的煤层.随后至山西组时期气候逐渐向干旱演化,海平面逐渐下降,聚煤较不稳定.

大吉70井揭示大吉地区聚煤作用总体呈现出“海侵-海退旋回控制下的间歇性聚煤”模式,表现出典型的旋回控制下多煤层叠置聚煤特点.根据沉积环境和煤层发育分析结果总结了聚煤模式(图7).煤层主要集中发育于湿热、稳定的气候阶段,沉积环境为三角洲平原或潮坪-潟湖体系.在海平面变

表 1 大吉 70 井煤层发育特征

Table 1 The development characteristics of the coal seam in Well Daji 70

煤层 编号	厚度 (m)	煤层结构类型	煤岩类型	裂隙特征	顶底板岩性	沉积环境	各煤层关键差异点
4#	0.47	二分型	光亮煤	层状裂隙	顶板:泥岩;底板: 炭质泥岩	间湾沼泽	横向稳定性差,含气性高 (全烃>10%)
5#	3.88	三分型	光亮煤+半亮煤	中型网状裂隙, 方解石充填	顶板:碳质泥岩→ 粉砂岩(过渡)	泥炭沼泽	最优封盖条件,原生结构煤
6#	0.57	二分型	镜煤+亮煤	层状裂隙	顶板:碳酸盐潮坪 (海侵终止)	潮坪沼泽	聚煤作用受海侵中断
7#	0.25	简单结构煤层	光亮煤为主, 次为暗淡煤	大裂隙方解石充填	顶板:碳酸盐潮坪 (海侵终止)	潮坪沼泽	厚度较薄
8#	6.07	二分型	光亮煤+半亮煤	裂隙密度 3.93 条/ cm ³ (网状)	顶板:灰岩→泥岩→ 灰岩(接触)	泥炭沼泽	储集优势段:8#-1
9#	0.44	二分型	镜煤+亮煤	层状裂隙	顶板:灰黑页岩;底板: 粉砂质泥岩	潮坪沼泽	厚度波动大

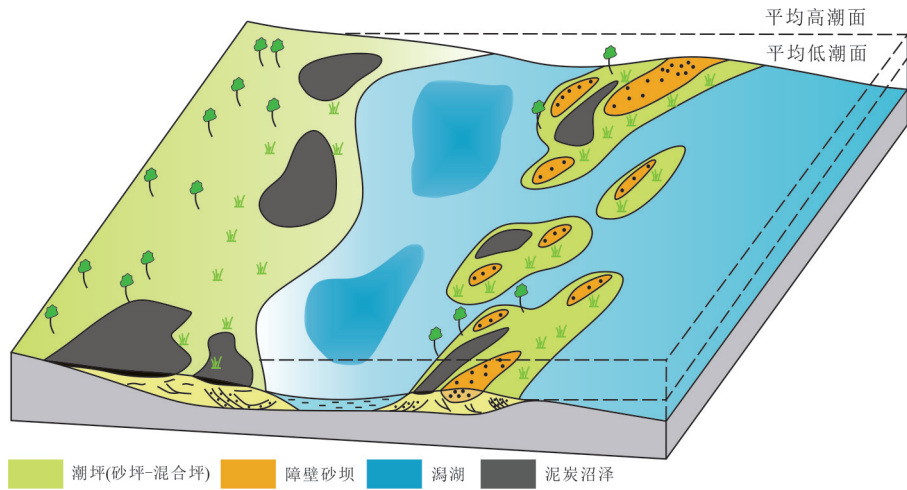


图 7 大吉 70 井聚煤模式

Fig.7 The coal accumulation model diagram of Well Daji 70

化较弱,还原性强的背景下,泥炭保存条件优越,易形成厚度大、分布广、品质好的主力煤层.而在快速海侵阶段,沼泽环境频繁遭受扰动,聚煤作用中断或仅短暂存在,煤层薄、分布不稳定.该井的聚煤规律受气候波动(湿热-干旱)及相对海平面变化(海侵-海退)共同控制.这种“周期性聚煤模式”,在区域对比上与华北板块山西组-太原组煤系的多旋回成煤规律高度一致(郭英海等,2004).

2.2 煤层裂缝特征

煤储层作为典型的双重孔隙介质,发育多尺度裂隙系统.常规裂隙描述手段仅能识别毫米级宏观裂隙,难以对跨尺度裂隙网络进行定量刻画.采用白光扫描、多尺度 CT 扫描技术(工业 CT+微米 CT)对大吉区块煤心裂隙系统开展

三维数字化解析(图 8),揭示出以下关键特征.

4#煤层镜煤和亮煤的含量达 84%,为光亮煤.4#煤层裂隙整体较为发育,以水平方向和近垂直方向发育为主.水平方向上长裂隙相互交错,构成复杂网络;垂直方向上顶部见较大裂隙,底部以分层短状小裂隙为主.充填裂隙多在镜煤条带中呈网状分布,在煤层中广泛分布.平均裂缝密度为 2.08 条/cm³,平均裂缝率为 1.28%.

5#煤层镜煤和亮煤的含量介于 64%~91%,以半亮煤-光亮煤为主.5#煤层裂隙整体较发育,以低角度裂隙为主,兼有部分高角度裂隙.水平方向上多发育纵横交错的裂隙网络,矿物充填裂隙分布广泛;垂直方向上发育高角度贯穿大裂隙,部分裂隙被矿物充填.平均裂缝密度为 4.03 条/cm³,平均裂

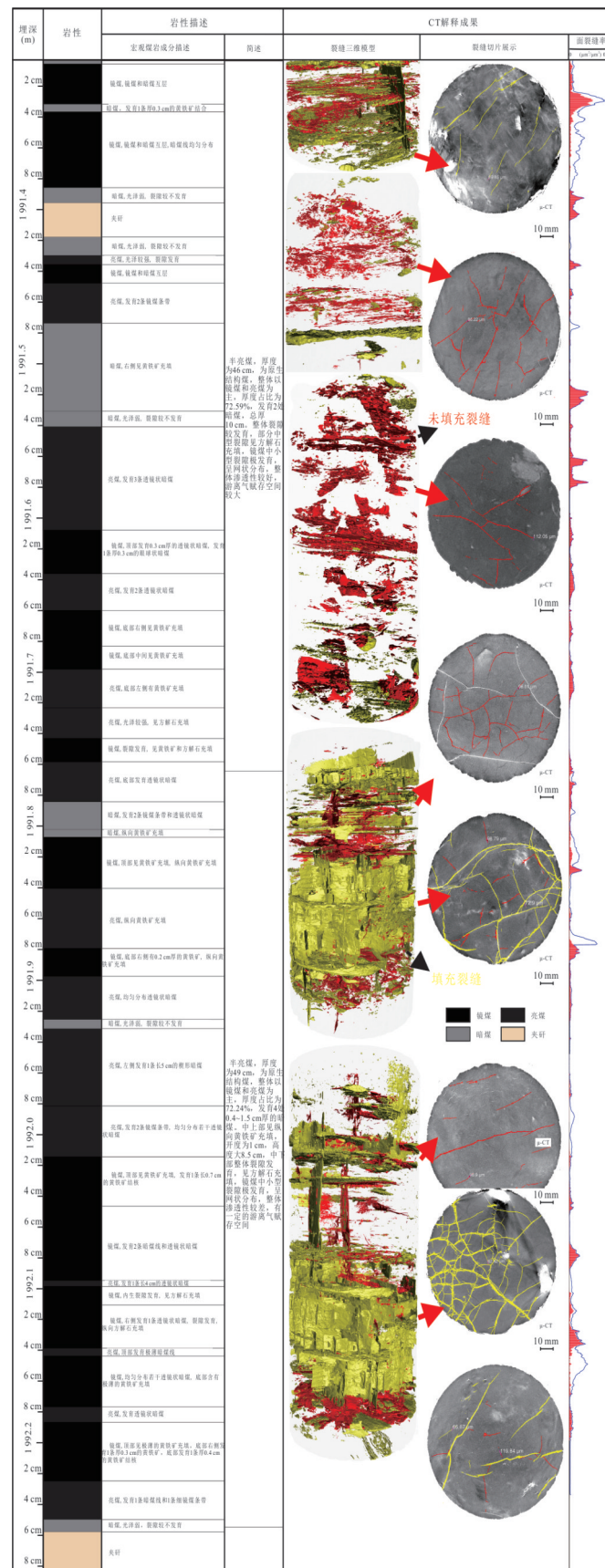


图 8 大吉 70 井裂隙系统精细描述

Fig.8 Fine characterization of multi-scale pore-fracture systems in Well Daji 70
8-2#煤层, 1 991.30~1 991.95 m

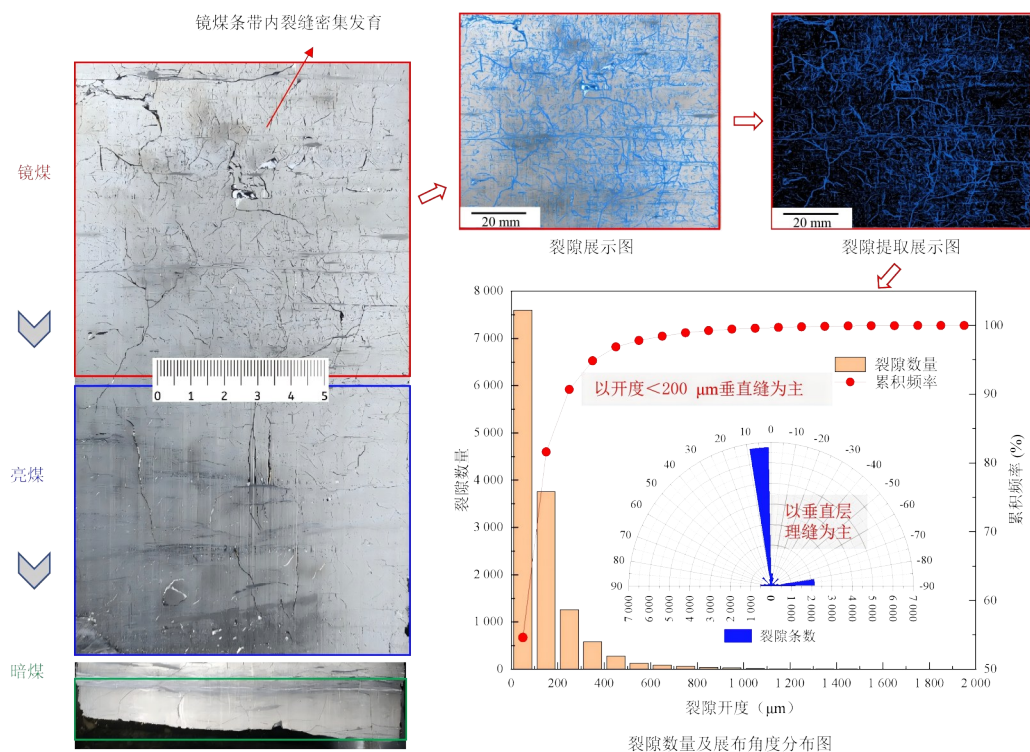


图9 镜煤条带中裂隙发育特征

Fig.9 Fracture development characteristics in vitrain bands

缝率为1.23%，整体渗透性好，游离气赋存空间大。

6#煤层为极薄煤层，镜煤和亮煤含量达89%，为光亮煤。6#煤层裂隙整体发育，镜煤条带中的小型裂隙极为发育。水平方向上呈网状分布，垂直方向上见贯穿性大裂隙，增强了储层的连通性，见矿物充填。平均裂缝密度为4.72条/cm³，平均裂缝率为1.08%。

7#煤层镜煤和亮煤的含量为67%，为半亮煤。7#煤层较于4#、6#薄煤层裂隙发育程度相对较低，镜煤条带中的矿物充填裂隙极为发育，呈网状交错分布，多为高角度充填裂隙。未填充裂隙发育程度较低，底部见水平方向的贯穿大裂隙，顶部多发育高角度短状小裂隙。平均裂缝密度为1.53条/cm³，平均裂缝率为0.90%。

8#煤层镜煤和亮煤的含量介于48%~88%，以半亮煤-光亮煤为主，底部出现半暗煤。8#煤层裂隙整体较为发育，多发育水平和近垂直方向的裂隙。水平方向上发育纵横交错的裂隙网络；垂直方向上发育高角度贯穿大裂隙，部分裂隙被矿物充填。底部宏观煤岩成分复杂，矿物充填程度较高，见少量高角度贯穿裂隙。平均裂缝密度为2.83条/cm³，平均裂缝率为1.19%，整体渗透性较好，有一定的游离气赋存空间。

9#煤层为极薄煤层，镜煤和亮煤含量达92%，为光亮煤。裂隙整体发育，以低角度裂隙为主，发育部分高角度大裂隙，裂隙分层性较强。顶部发育水平方向的大裂隙，分布广泛；底部发育高角度裂隙，部分裂隙被矿物充填。平均裂缝密度为1.97条/cm³，平均裂缝率为2.40%。整体而言，4#、6#、7#、9#薄煤层裂隙发育程度均较好，5#煤层裂隙发育程度优于8#煤。

2.3 裂隙系统的作用

为进一步探究裂缝系统不仅控制了游离气赋存空间，同时也作为渗流通道为煤层气产出发挥了积极作用。基于多尺度CT扫描(工业CT+微米CT)技术进行量化结果显示，研究区煤层裂隙高度发育并构成复杂网络，为游离气提供了优质储集空间与高效运移通道，支撑“高含气、高饱和、高游离”的认识。在样品集内，裂隙条数与镜煤+亮煤含量呈显著正相关：随镜煤与亮煤比例增加，裂隙发育程度明显增强，储层连通性提高，从而为游离气赋存创造更有利的空间条件，提示深层煤层气勘探开发的关键优势与方向(图9)。通过对煤中裂隙观测发现，裂缝条数与镜煤+亮煤成分含量呈现明显正相关关系，随着宏观煤岩成分的逐渐变亮，裂缝发育程度逐渐增强，储层连通性大

幅提升,游离气赋存空间增大.不同宏观煤岩成分中,镜煤因其质地均一、脆性大,内生裂隙(割理)最为发育,常呈密集网状且连通性好,使得其渗透率最高;亮煤裂隙发育中等,受矿物填充影响较大,渗透率介于镜煤和暗煤之间;而暗煤富含杂质、韧性较强,裂隙稀疏且多被填充,导致其渗透率最低.总体而言,煤的渗透率差异主要受裂隙发育程度控制,镜煤最优、亮煤次之、暗煤最差.

3 页岩分布特征及页岩气评价

大吉 70 井揭示鄂东缘斜坡带石炭-二叠系发育本 2 段、本 1 段、太 1 段、山 2³亚段、山 2¹⁺²亚段共 5 套有利泥页岩层段,在层序地层学框架约束下,5 套页岩均发育于四级层序上升半旋回末期至下降半旋回早期,对应水进期的深水静水环境发育,且主要分布在山 2³亚段及本一段(表 2),页岩累计厚度达 50 m.

3.1 页岩矿物组成特征

X 射线衍射(XRD)全岩矿物分析结果显示,大吉 70 井石炭-二叠系页岩储层矿物组成复杂,不同层段矿物组分的含量存在明显差异(表 3),黏土矿物和长英质矿物含量较高,碳酸盐矿物含量较低,具体矿物组分含量特征如下:黏土矿物 30.8%~93.4%,平均值 73.3%;石英 0.3%~60.6%,平均值 21.3%;黄铁矿 0~10.8%,平均值 2.8%;菱铁矿 0~9.1%,平均值 1.2%;斜长石 0~15.2%,平均值 1.6%;方解石 0~1.4%,平均值 0.15%;其他矿物 0.2%~1.2%,平均值 0.7%.

纵向上,不同层段储层矿物含量具有明显的分段特征,本 2 段页岩黏土矿物含量介于 54.5%~66.2%,脆性指数介于 33.8%~45.5%,平均值 39.0%.本 1 段黏土矿物含量 59.2%~69.7%,脆性指数介于 30.3%~40.8%,平均值 33.8%.太 1 段页岩黏土矿物含量 33.1%~55.5%,脆性指数为 44.5%~66.9%,平均值 58.1%.山 2³亚段页岩黏土矿物含量 41.1%~98.0%,脆性指数介于 2.0%~58.9%,平均值 41.7%.山 2¹亚段页岩黏土矿物含量 47.6%~49.3%,脆性指数介于 50.7%~52.4%.

3.2 页岩岩相特征

页岩岩相划分是页岩气储层评价的基础,细粒混合沉积岩的划分方案不同于常规碎屑岩,本研究以黏土矿物、碳酸盐矿物及长英质为 3 个端元,结合矿物含量分析结果进行岩相划分,整体而言,本溪组-山西组页岩以长英质矿物和黏土矿物为主,碳酸盐矿物较少,岩相以黏土质页岩(Ⅲ)和长英质页岩(Ⅰ)为主,含少量混合质页岩(Ⅱ)(图 10).

本溪组主要发育黏土质页岩相和混合质页岩相,其中本 2 段页岩发育黏土质页岩相,岩心观察页理缝密度较大,可见明显的粉砂纹层及生物扰动发育,且含海相生物化石,属于典型的潟湖相海陆交互沉积,页岩 TOC 介于 2.22%~4.81%,平均值 3.04%,本 1 段主要发育混合质页岩和黏土质页岩,断面染手,页理缝发育程度较高,且粉砂质纹层连续发育,纹层平均厚度<0.2 cm,含海相生物化石及陆源植物碎屑,页岩 TOC 介于 1.39%~3.96%,平均值 2.40%.

太原组以长英质页岩相为主,发育大量钙质纹层与少量硅质粉砂纹层、层状黄铁矿,可见海相化石与少量碳化植物碎屑,为碳酸盐岩滩坝间泥沉积.太原组页岩 TOC 介于 0.23%~10.57%,平均值 2.40%.

山西组山 2³亚段灰黑色、深灰色页岩,长英质页岩与黏土质页岩相均发育,表面砂/粉砂纹层发育,其中山 2³亚段底部含海相生物化石,向上植物碎屑增多(图 13),该套页岩 TOC 介于 0.31%~10.71%,平均值 3.12%,目前已证实是鄂东缘石炭-二叠系勘探开发潜力最大的一套页岩层段.山 2¹亚段泥页岩颜色较浅,内部长英质矿物较高,以长英质页岩相为主,见大量粉砂薄层/纹层,陆相植物碎屑发育,页岩 TOC 平均值 1.12%.

3.3 页岩物性特征

大吉 70 井揭示 5 套页岩层系的储集性能整体呈现出低孔、低渗特征.本溪组-山西组页岩孔隙度介于 0.3%~7.9%,平均值为 2.3%,渗透率介于 0.001~0.125 μm²,平均值为 0.022 μm².其中,本 2 段页岩孔隙度介于 0.4%~3.00%,平均值为 2.2%,渗

表 2 大吉 70 井泥页岩段厚度分布

Table 2 Distribution layers and thickness of shale in Well Daji 70

发育层段	本二段	本一段	太 1+太 2 段	山 2 ³ 亚段	山 2 ¹⁺² 亚段
具体井段埋深(m)	2 012.87~2 018.90	1 996.48~2 004.97	1 956.23~1 982.20	1 933.20~1 956.23	1 898.65~1 904.37
页岩厚度(m)	6.03	8.49	6.53	19.16	6.70

表3 大吉70井页岩矿物组成(%)及总有机碳(TOC)含量(%)

Table 3 Mineral composition (%) and total organic carbon (TOC, %) of shales from Well Daji 70

校正岩心深度 (m)	层位	编号	石英 (%)	斜长石 (%)	方解石 (%)	菱铁矿 (%)	黄铁矿 (%)	锐钛矿 (%)	金红石 (%)	黏土矿物 (%)	TOC (%)	平均 TOC (%)
1 883.87	山 2 ¹	1	44.3	4.4	0.0	1.2	0.0	0.8	0.0	49.3	0.55	0.43
1 887.97		2	36.4	15.2	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0	47.6	0.30	
1 918.07	山 2 ³	3	34.8	1.8	0.0	1.9	0.0	0.7	0.0	60.8	2.86	4.02
1 919.27		4	22.4	0.6	0.0	0.4	4.6	0.4	0.0	71.6	8.68	
1 919.67		5	26.6	0.8	0.0	0.4	5.0	0.6	0.0	66.6	9.63	
1 927.47		6	46.3	1.2	0.0	0.4	2.9	0.7	0.0	48.5	1.64	
1 927.87		7	54.4	0.9	0.0	2.7	0.6	0.3	0.0	41.1	1.63	
1 934.97		8	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2	98.0	2.36	
1 935.77		9	1.0	0.0	0.0	0.0	2.3	0.6	0.2	95.9	0.74	
1 952.30		10	33.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	66.1	4.66	
1 955.47	太 1 段	11	37.4	0	0	0	11.3	0	0	51.3	4.25	1.68
1 957.40		12	42.6	0	0	0	1.9	0	0	55.5	0.18	
1 961.43		13	52.1	0	0	0	0	0	0	45.6	0.29	
1 971.83		14	63	0	0	0	3.9	0	0	33.1	1.24	
1 973.57		15	39.1	0	0	1.6	8.4	0	0	50.9	2.48	
1 994.35	本 1 段	16	11.7	0.7	0	9.1	1	0	0	77.5	1.41	2.40
1 995.49		17	12.5	0	8.4	6.6	2.8	0	0	69.7	2.22	
2 000.29		18	19.5	1.3	0	0	10.2	0	0	67.8	1.39	
2 000.56		19	14.9	0	0	0	9.9	0	0	74.1	3.58	
2 000.99		20	18.6	1.1	0	0	12.5	0	0	66.5	3.96	
2 005.07		21	31.5	0	0	4.3	2.8	0	0	59.2	1.35	
2 013.04	本 2 段	22	29.4	2.2	0	1.6	6.7	0	0	59.6	2.91	3.04
2 013.82		23	31.2	2.9	0	8.6	0.9	0	0	55.5	4.81	
2 014.40		24	31.4	3.8	0	8	1.4	0	0	54.5	3.14	
2 015.06		25	22.2	2.6	0	7.2	1.2	0	0	66.2	2.22	
2 015.60		26	28	2.1	0	5.7	1.2	0	0	62.6	2.41	
2 016.29		27	22.2	2.6	0	7.2	1.2	0	0	66.2	2.63	

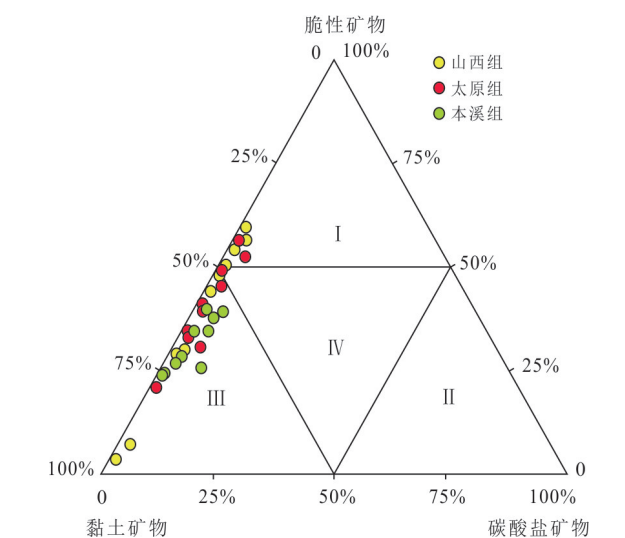


图 10 大吉70井本溪组、太原组、山西组页岩岩相划分图版

Fig.10 Shale facies classification chart for the Benxi, Taiyuan, and Shanxi formations of Well Daji 70

透率介于0.002~0.125 μm², 平均0.0275 μm²; 本1段页岩孔隙度介于1.0%~5.5%, 平均值为3.1%, 渗透率介于0.001~0.107 μm², 平均0.034 μm²; 太1段页岩孔隙度介于0.4%~6.5%, 平均值为3.6%, 渗透率介于0.002~0.052 μm², 平均0.014 μm²; 山2³亚段页岩孔隙度介于2.2%~7.9%, 平均值为3.5%, 渗透率介于0.001~0.022 μm², 平均0.006 μm²; 山2¹⁺²亚段页岩孔隙度介于0.3%~3.2%, 平均值为1.4%, 渗透率平均0.006 3 μm². 5套页岩层系孔隙度、渗透率存在较强的非均质性, 本1段呈现最好的储集物性, 孔隙度、渗透率均高于其他层系.

4 大吉70井“铁柱子”建立的地质意义

大吉70井“铁柱子”作为鄂尔多斯盆地首口

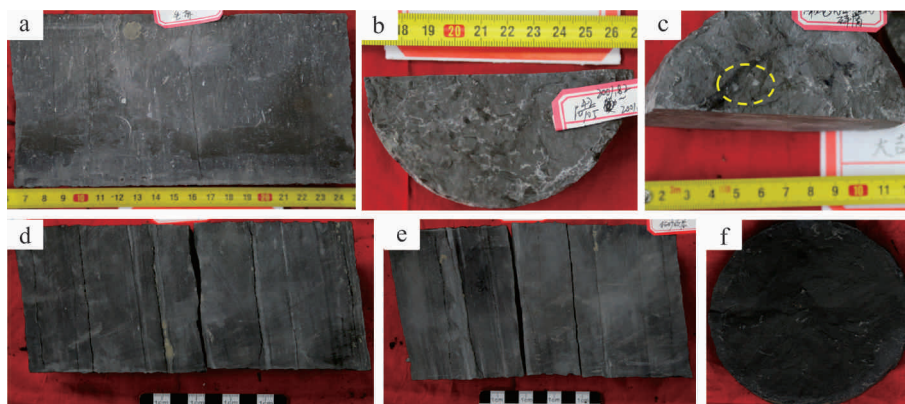


图 11 本溪组岩心特征

Fig.11 Core characteristics of the Benxi Formation

a~c. 大吉 70 井, 本 1 段深水潟湖相页岩, 双壳类生屑发育; d~f. 大吉 70 井, 本 2 段深水潟湖相页岩, 发育硅质粉砂纹层、层状黄铁矿

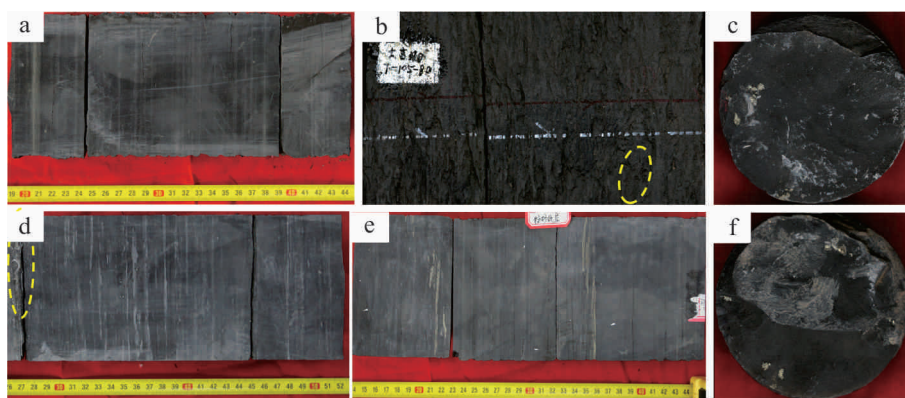


图 12 太原组岩心特征

Fig.12 Core characteristics of the Taiyuan Formation

a~c. 大吉 70 井, 太 1 段深水潟湖相页岩, 端面见碳化植物碎屑; d~f. 大吉 70 井, 太 2 段深水潟湖相页岩, 硅质粉砂纹层发育

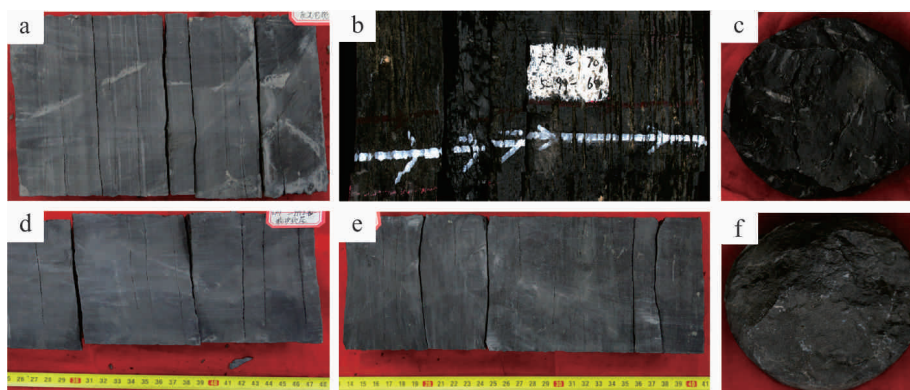


图 13 山西组岩心特征

Fig.13 Core characteristics of the Shanxi Formation

a~c. 大吉 70 井, 山 2³ 亚段 2~3 小层 (1 915.94~1 920.20 m), 深水潟湖相富含有机质页岩; d~f. 大吉 70 井, 山 2³ 亚段 1 小层 (1 934.37~1 939.65 m) 海湾相富含有机质页岩

石炭-二叠系系统取心井, 对深化煤系沉积体系地质认识、评价深层煤层气与页岩气资源潜力具有重要战略意义. 通过对该井重点层段的系统分

析化验, 开展一系列微观机理研究, 围绕煤层气与页岩气开发的关键科学问题给出直接证据, 为决策提供“铁证”. 大吉 70 井作为鄂尔多斯盆地

首口以系统验证深层煤层气富集机理为核心目标的“铁柱子”工程井,被赋予三大战略使命。

(1)构建出深层煤层气勘探高精度地质标尺。基于系统的工程实践本井所获岩心完整囊括了研究区关键的 4#、5#、6#、7#、8#、9#煤层及其顶底板的各类储层岩性,包括富有机质页岩、灰岩、砂岩等。详尽的岩性统计表明,岩性构成以泥岩、砂岩(35.6%)为主,灰岩(13.7%)、页岩(10.3%)次之,煤层占 6.8%,局部可见铝土岩及角砾岩。这套高完整性、高连续性的岩心柱清晰揭示海陆过渡相沉积序列的连续-稳定特征,获取了煤层分布精细评价结果,为储层精细评价与地质建模提供高精度标尺。

(2)突破煤岩多尺度精细表征技术,揭示深层富集机制与资源潜力。依托上述获取的珍贵岩心样本,融合厘米级(0.5 cm)高分辨率煤岩精细描述:用于精细刻画宏观沉积构造、裂隙系统发育特征及煤岩结构;工业 CT-微米 CT 多尺度联合扫描成像技术:实现从宏观岩心结构到微观孔隙(达微米级)的无损、连续观测。在深层煤层气领域实现:裂缝/裂隙网络(类型、密度、方位、开度)发育规律的定量表征;游离气储集空间的三维可视化与精确量化;页岩品质关键参数(如 TOC 含量、矿物组分、脆性指数等)的高效、系统分析。上述高精度数据直接验证“优势岩性组合控储-多尺度裂隙网络疏导-游离气与吸附气共富集”的认识,并精细揭示薄煤层的储集空间与游离气赋存量,从而重估并提升其资源潜力与开发价值。

(3)揭示出本溪组-山西组发育 5 套优质页岩段。大吉 70 井在鄂东缘斜坡带石炭-二叠系本溪组-山西组中识别出本二段、本一段、太原组太 1 段、山西组山 2 下段和山 2 上段共 5 套优质页岩段,累计厚度约 40 m,其中以本一段和山 2 下段最为发育。各层段页岩以深水潟湖相-滩坝间泥沉积为主,普遍发育粉砂纹层和生物化石,具有较高有机质丰度和一定脆性特征。其中山 2 下段 TOC 最高、综合品质最好,被证实为区域内页岩气勘探开发潜力最大的有利层段,整体揭示出本溪组-山西组多套优质页岩叠置发育的特征。

基于此认识开展的海陆过渡相页岩气勘探实现重要突破,山西组吉页平 03 井台实现稳定日产气 8.23 万方并持续稳产超 6 个月,本溪组大吉 5-4 向 4 井日产气量达 6 000 方,且仍保持稳步上升趋势,彰显出页岩气领域巨大的产能潜力。

(4)对整个地质勘探的指导意义。“铁柱子”系列成果推动了煤系气勘探理念的深度变革,突破传统针对“单一主力煤层”(如 8#煤)模式向“煤-页多套源岩体系”模式的跨越。首先创新勘探理念,摒弃单层评价思维,秉持系统资源观,将煤系整体视为复杂含气系统,涵盖主力煤层气、薄煤层气、页岩气的资源单元,从而系统挖掘煤系地层的整体资源禀赋。其次,通过创新煤层气-页岩气立体开发模式,构建“一井多层、合采联输、立体勘探开发”工程体系,激活薄煤层(4#、6#煤)与页岩层(TOC>3%层段)等边际资源,提升区块可动用资源丰度。这一协同作业可显著提升单井产能与区块最终采收率(EUR),有效降低单位资源勘探-开发成本,实现资源效益与经济性同步提升,是提升我国煤系气产业综合竞争力与资源保障能力的重要路径。最后,构建“主力煤层-薄煤层-页岩”的三级资源接替序列,形成“短近期保产、近中期增长、中远期储备”的勘探开发战略架构。短近期,巩固并深化主力煤层(8#、5#)的精细开发,筑牢稳产根基;加速薄煤层(4#、6#等)的潜力评价与关键技术攻关,培育近中期产能增长点;着重探索高潜力页岩层系的含气性与工业价值,为未来储备战略。

这些进展共同推动了地质勘探向整体化、协同化和可持续方向的转型,对我国煤层气产业高质量发展具有重要指导意义。综上,“铁柱子”核心价值为构建直观标准地质剖面,通过技术创新直接验证深层煤岩裂缝发育规律与游离气赋存空间,精细评价主力与非主力层位(含页岩)资源潜力,为破解勘探难题、明确接替方向提供坚实地质依据。

5 结论

(1)大吉 70 井“铁柱子”作为鄂尔多斯盆地东缘首口深层煤系全层段连续取心战略验证井,构建了厘米级分辨率地质实体剖面。该工程填补了盆地深层煤层气/煤层气高精度实证的空白。

(2)确立区域乃至华北板块上石炭统-下二叠统标志性剖面,构建了鄂尔多斯盆地东南缘高精度等时地层格架。该格架有效支撑煤层和页岩空间分布预测与对比,明确沉积体系配置关系,进而为优质烃源岩与(区域性)盖层分布分析、含气系统划分及天然气勘探与开发提供关键地质依据。

(3)原位实证深层半亮-光亮煤中天然裂缝网络对游离气的高效储集作用,发现 4#、6#

薄煤层因其高镜亮煤含量及可观的裂缝发育程度,其含气性、渗透性及资源潜力不亚于甚至局部优于传统主力煤层,是重要的勘探接替目标;系统发现本溪组-山西组5套页岩气接替层系,可作为后续页岩气突破的靶层。

(4)通过对煤系页岩发育特征系统的再认识,发现煤系5套页岩气资源;推动理念由“主力煤层单层突进”向“页岩-薄煤-致密气立体协同开发”转型,促成“纵向含气层系全动用、横向甜点区连片开发”的产业布局。

致谢:特别感谢中石油煤层气有限责任公司周立宏、熊先钺两位领导,从“铁柱子”部署、构建到论文修改定稿,都倾注了大量心血,悉心指点。再次致以最崇高的敬意与感谢!

References

- Castro-Alvarez, F., Marsters, P., Ponce de León Barido, D., et al., 2018. Sustainability Lessons from Shale Development in the United States for Mexico and Other Emerging Unconventional Oil and Gas Developers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82: 1320—1332.
- Guo, Y. H., Liu, H. J., Chen, M. J., 2004. Late Paleozoic Sedimentary Evolution in the Ordos Region. China University of Mining and Technology Press, Xuzhou (in Chinese).
- Li, X. W., Liu, H. T., Ning, C. B., et al., 2025. The Hydrocarbon Generation Characteristics of the Upper Paleozoic Coaly Bearing Source Rocks and Its Main Controlling Factors in the North of the Jizhong Depression. *Earth Science*, 50(5): 1917—1932 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Xu, L. F., Zhang, S. R., et al., 2023. Gas Bearing System Difference in Deep Coal Seams and Corresponded Development Strategy. *Journal of China Coal Society*, 48(2): 900—917 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. L., Zou, C. N., Yin, S., et al., 2024. Formation, Distribution, Sweet Spot Evaluation and Development Prospect of Coal-Measure Gas in China. *Natural Gas Industry*, 44(10): 1—21 (in Chinese with English abstract).
- Niu, X. B., Yu, J., Xu, W. L., et al., 2024. Reservoir-Forming Geological Conditions and Exploration Directions of Upper Paleozoic Coal-Rock Gas in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(10): 33—50 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., 2025. Advances and Trends of Modern and Contemporary Research on the Geology of Coal-Measure Minerals in China. *Coal Geology & Exploration*, 53(1): 12—35 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Shen, J., Shen, Y. L., 2016. Joint Mining Compatibility of Superposed Gas-Bearing Systems: A General Geological Problem for Extraction of Three Natural Gases and Deep CBM in Coal Series. *Journal of China Coal Society*, 41(1): 14—23 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Shen, J., Shen, Y. L., et al., 2019. Geological Causes of High Production of Coal-Measure Gas in the Surat Basin and Its Implications. *Acta Petrolei Sinica*, 40(10): 1147—1157 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y., Shen, J., Shi, R., 2022. Strategic Value and Choice on Construction of Large CMG Industry in China. *Journal of China Coal Society*, 47(1): 371—387 (in Chinese with English abstract).
- Shang, G. X., 1997. Study on Late Paleozoic Coal Geology of the North China Platform. Shanxi Science and Technology Press, Taiyuan (in Chinese).
- Shen, J., Li, K. X., Zhang, H. W., et al., 2021. The Geochemical Characteristics, Origin, Migration and Accumulation Modes of Deep Coal-Measure Gas in the West of Linxing Block at the Eastern Margin of Ordos Basin. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 91: 103965. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103965>
- Shen, J., Qin, Y., Zhang, B., et al., 2018. Superimposing Gas-Bearing System in Coal Measures and Its Compatibility in Linxing Block, East Ordos Basin. *Journal of China Coal Society*, 43(6): 1614—1619 (in Chinese with English abstract).
- Shi, R., Bian, L. H., Zhang, W., et al., 2025. Prediction Model of Free Gas Content in Deep Coal Seams Based on Effective Porosity. *Journal of China University of Mining & Technology*, 54(1): 161—171 (in Chinese with English abstract).
- Sun, F. J., Zhou, G. X., Tian, W. G., et al., 2024. Definition, Connotation, Formation and Application of Coalbed Methane System: A Case Study on the Carboniferous-Permian Coal Seams in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(7): 42—53 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, X. Y., Yan, X., Xu, F. Y., et al., 2023. Analysis of Multi-Factor Coupling Control Mechanism, Desorption Law and Development Effect of Deep Coalbed Methane. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1812—1826, 1853 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. G., Ji, H. Q., Wang, C. W., et al., 2024. En-

- richment Patterns and Exploration Countermeasures of Deep Coalbed Methane in the Linxing-Shenfu Block on the Eastern Margin of the Ordos Basin. *Coal Geology & Exploration*, 52(8): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F. Y., Xiong, X. Y., Hou, W., et al., 2025. Upgrading of Deep Coalbed Methane Industry and Establishment of the “Eight-in-One” System. *Acta Petrolei Sinica*, 46(2): 289–305 (in Chinese with English abstract).
- Yan, X., Xu, F. Y., Xiong, X. Y., et al., 2025. Key Experimental Technologies and Development Directions for Deep Coalbed Methane Exploration and Development. *Coal Geology & Exploration*, 53(1): 128–141 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Liu, X. S., Yan, X. X., et al., 2015. The Shenmu Gas Field in the Ordos Basin: Its Discovery and Reservoir - Forming Geological Characteristics. *Natural Gas Industry*, 35(6): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. C., Xu, F. Y., Wang, H. Y., et al., 2022. Exploration and Development Process of Coalbed Methane in Eastern Margin of Ordos Basin and Its Enlightenment. *Coal Geology & Exploration*, 50(3): 30–41 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. Z., Jin, F. M., Zhou, L. H., et al., 2022. Breakthrough and Significance of Shale Oil Exploration in Member 1 of the Shahejie Formation of Risk Exploratory Well Qiye 1H in the Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 43(10): 1369–1382 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X. Z., Zhou, L. H., Zhao, M., et al., 2019. Breakthrough and Practice of Industrial Development on Continental Shale Oil: A Case Study on Kong-2 Member in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin. *China Petroleum Exploration*, 24(5): 589–600 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. H., Chen, C. W., Yang, F., et al., 2023. Research and Breakthrough of Benefit Shale Oil Development in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin. *China Petroleum Exploration*, 28(4): 24–33 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. H., Xiong, X. Y., Li, Y., et al., 2025. Revolutionary Breakthroughs and Key Theories and Technologies in Deep Coalbed Methane Development. *Natural Gas Industry*, 45(5): 17–30 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L. H., Zhao, X. Z., Chai, G. Q., et al., 2020. Key Exploration & Development Technologies and Engineering Practice of Continental Shale Oil: A Case Study of Member 2 of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, East China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(5): 1059–1066 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhao, Q., Liu, H. L., et al., 2025. China's Breakthrough in Coal-Rock Gas and Its Significance. *Natural Gas Industry*, 45(4): 1–18 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 郭英海, 刘焕杰, 陈孟晋, 2004. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积演化. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 李熹微, 刘海涛, 宁才倍, 等, 2025. 冀中坳陷北部上古生界煤系烃源岩生烃特征及发育的主控因素. 地球科学, 50(5): 1917–1932.
- 李勇, 徐立富, 张守仁, 等, 2023. 深煤层含气系统差异及开发对策. 煤炭学报, 48(2): 900–917.
- 刘翰林, 邹才能, 尹帅, 等, 2024. 中国煤系气形成分布、甜点评价与展望. 天然气工业, 44(10): 1–21.
- 牛小兵, 喻健, 徐旺林, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地上古生界煤岩气成藏地质条件及勘探方向. 天然气工业, 44(10): 33–50.
- 秦勇, 2025. 中国煤系矿产近现代地质研究进展与走向. 煤田地质与勘探, 53(1): 12–35.
- 秦勇, 申建, 沈玉林, 等, 2019. 苏拉特盆地煤系气高产地质原因及启示. 石油学报, 40(10): 1147–1157.
- 秦勇, 申建, 沈玉林, 2016. 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. 煤炭学报, 41(1): 14–23.
- 秦勇, 申建, 史锐, 2022. 中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择. 煤炭学报, 47(1): 371–387.
- 尚冠雄, 1997. 华北地台晚古生代煤地质学研究. 太原: 山西科学技术出版社.
- 申建, 秦勇, 张兵, 等, 2018. 鄂尔多斯盆地东缘临兴区块煤系叠置含气系统及其兼容性. 煤炭学报, 43(6): 1614–1619.
- 史锐, 边利恒, 张伟, 等, 2025. 基于有效孔隙度的深部煤层游离气含量预测模型. 中国矿业大学学报, 54(1): 161–171.
- 孙粉锦, 周国晓, 田文广, 等, 2024. 煤层气系统的定义、内涵、形成及应用——以鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系煤层为例. 天然气工业, 44(7): 42–53.
- 熊先钺, 闫霞, 徐凤银, 等, 2023. 深部煤层气多要素耦合控制机理、解吸规律与开发效果剖析. 石油学报, 44(11): 1812–1826, 1853.
- 徐长贵, 季洪泉, 王存武, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地东缘临兴—神府区块深部煤层气富集规律与勘探对策. 煤田地

- 质与勘探, 52(8): 1—11.
- 徐凤银, 熊先钺, 侯伟, 等, 2025. 深部煤层气产业升级与“八个一体化”体系的建立. 石油学报, 46(2): 289—305.
- 闫霞, 徐凤银, 熊先钺, 等, 2025. 深部煤层气勘探开发关键实验技术及发展方向. 煤田地质与勘探, 53(1): 128—141.
- 杨华, 刘新社, 闫小雄, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地神木气田的发现与天然气成藏地质特征. 天然气工业, 35(6): 1—13.
- 杨秀春, 徐凤银, 王虹雅, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发历程与启示. 煤田地质与勘探, 50(3): 30—41.
- 赵贤正, 金凤鸣, 周立宏, 等, 2022. 渤海湾盆地风险探井歧页1H井沙河街组一段页岩油勘探突破及其意义. 石油学报, 43(10): 1369—1382.
- 赵贤正, 周立宏, 赵敏, 等, 2019. 陆相页岩油工业化开发突破与实践——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例. 中国石油勘探, 24(5): 589—600.
- 周立宏, 陈长伟, 杨飞, 等, 2023. 渤海湾盆地沧东凹陷页岩油效益开发探索与突破. 中国石油勘探, 28(4): 24—33.
- 周立宏, 熊先钺, 李勇, 等, 2025. 深层煤层(岩)气革命性突破及关键理论与技术. 天然气工业, 45(5): 17—30.
- 周立宏, 赵贤正, 柴公权, 等, 2020. 陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例. 石油勘探与开发, 47(5): 1059—1066.
- 邹才能, 赵群, 刘翰林, 等, 2025. 中国煤岩气突破及意义. 天然气工业, 45(4): 1—18.