深部煤层游离气富集控制因素与勘探开发意义

郗兆栋[1,2],唐书恒[1,2],段利江[3],张松航[1,2]
(1. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083;2. 山西省煤系矿产综合勘查技术创新中心,山西 太原 030000;
3. 中国石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要: 华北地区深部煤层气勘探近年来取得多项突破,展现出巨大的资源潜力,但游离气差异富集机理不清制约了“甜点”预测与开发部署. 本文以华北典型深部煤层气区块为研究对象,通过地质分析、试验测试与数值模拟相结合,系统阐明了“埋深-保存-储集”三元耦合机制对深部煤层游离气富集的控制作用. 研究结果表明:埋深超过吸附能力临界深度是游离气形成的重要前提,良好的保存条件是游离气滞留成藏的关键,而充足的储集空间则决定了游离气富集规模,三者构成一个缺一不可的有机整体,任一条件缺失均会导致深部煤层游离气的差异富集. 选取宁武盆地、沁水盆地及鄂尔多斯盆地东缘北部典型区块进行研究,发现宁武盆地宁武南区块因煤层埋深未达到吸附能力临界深度而导致游离气不富集;沁水盆地榆社—武乡区块因后期强烈构造改造造成气体大规模逸散;鄂尔多斯盆地东缘临兴—神府区块则以储集能力差异主导了游离气的差异富集. 数值模拟结果进一步表明:游离气富集程度是深部煤层气井产量的关键控制因素,较高的游离气富集程度有利于实现更高产能. 深部煤层气的高效勘探开发需明确“甜点”深度范围,该范围内的煤层应兼具较高含气量和游离气富集程度,以保证良好的资源构成与规模,同时还需综合考量煤层的应力-应变特性与可改造性,以确保压裂效果和经济可采性. 本研究为深部煤层气勘探选区与开发优化提供了重要理论依据,对推动我国煤层气产业规模化发展具有积极意义.

关键词: 煤层气;深部;游离气;宁武盆地;沁水盆地;鄂尔多斯盆地
中图分类号: TE 122;TD 984 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2026)01-0180-13

Controlling factors of free gas enrichment in deep coal seams and their implications for exploration and development

XI Zhaodong[1,2], TANG Shuheng[1,2], DUAN Lijiang[3], ZHANG Songhang[1,2]
(1. School of Energy Resource, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Shanxi Center of Technology Innovation for Coal Measure Mineral Resources Comprehensive Exploration, Taiyuan, Shanxi 030000, China;
3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: In recent years, significant breakthroughs have been made in the exploration of deep coalbed methane (CBM) in North China, revealing substantial resource potential. However, the unclear mechanism governing the differential enrichment of free gas has hindered “sweet spot” prediction and development planning. Focuses on the typical deep CBM blocks in North China, a ternary coupling mechanism of “burial depth-preservation-reservoir capacity” which controlls the enrich-

收稿日期: 2025-02-02 **修回日期:** 2025-09-15 **DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250202
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42430805);国家深地重大专项项目(2024ZD1004204);国家自然科学基金面上项目(42572207)
第一作者: 郗兆栋(1991—),男,河北省任丘市人,副教授,博士生导师.
通信作者: 唐书恒(1965—),男,河北省正定县人,教授,博士生导师. E-mail: tangsh@cugb.edu.cn
引用格式: 郗兆栋,唐书恒,段利江,等.深部煤层游离气富集控制因素与勘探开发意义[J].中国矿业大学学报,2026,55(1):180-192.
XI Zhaodong, TANG Shuheng, DUAN Lijiang, et al. Controlling factors of free gas enrichment in deep coal seams and their implications for exploration and development[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(1): 180-192.

ment of free gas in deep coal seams was elucidated systematically by geological analysis, experimental testing, and numerical simulation. The results shows that burial depth exceeding the critical adsorption depth is a crucial prerequisite for free gas formation, favorable preservation conditions are the key to free gas retention and accumulation, and sufficient reservoir space determines the scale of free gas enrichment. These three factors form an inseparable organic whole, and the absence of any one condition leads to differential enrichment of free gas in deep coal seams. Typical blocks in the southern Ningwu Basin, the Yushe—Wuxiang Block of the Qinshui Basin, and the northern eastern margin of the Ordos Basin were selected for analysis. The results shows that in the southern Ningwu Basin, free gas enrichment is absent because the coal seam burial depth does not reach the critical depth for adsorption capacity. In the Yushe—Wuxiang Block of the Qinshui Basin, intense tectonic modification in later stages caused large-scale gas escape. In the Linxing—Shenfu Block on the northern eastern margin of the Ordos Basin, differences in reservoir capacity primarily governs the differential enrichment of free gas. The results of numerical simulations further indicate that the degree of free gas enrichment is a key controlling factor for the production of deep CBM wells. A higher degree of free gas enrichment is conducive to achieving higher productivity. The efficient exploration and development of deep CBM require defining the optimal "sweet spot" depth window. Within this window, coal seams should possess both high gas content and a significant degree of free gas enrichment to ensure favorable resource composition and scale. Furthermore, it is essential to comprehensively evaluate the stress-strain characteristics and fracability of the coal seams to guarantee effective hydraulic fracturing and economic recoverability. This research provides a crucial theoretical basis for selecting exploration areas and optimizing development strategies for deep CBM. It holds positive significance for promoting the scaled development of China′s CBM industry.

Key words: coalbed methane; deep; free gas; Ningwu Basin; Qinshui Basin; Ordos Basin

中国煤层气资源丰富，陆上煤层气地质资源量超过70万亿 m^3，其中可采资源量达22万亿 m^3[1]，是我国天然气资源的重要组成部分，对保障能源供应、保护环境及推动经济发展具有重要战略意义[2]. 我国煤层气资源结构完整，低、中、高煤阶煤层气均已在勘探中取得突破. 据我国自然资源部2022年统计数据，3类煤阶煤层气地质资源量占比大致相当，各占约1/3. 从埋藏深度分布来看，全国2 000 m以浅煤层气地质资源量为30.05万亿 m^3[3]，1 500～3 500 m埋深的资源量超过40万亿 m^3[4]. 2019年之前，我国煤层气勘探开发主要集中于高瓦斯煤矿区和1 000 m以浅的煤层气资源，并在沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘成功建成两大煤层气产业基地[5-7]. 2019—2020年间，煤层气勘探开发实现重大突破，勘探重点逐渐转向1 500 m以深的深层资源，在准噶尔盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地等多个盆地取得了显著成果，单井日产气量突破1万 m^3，水平井日产气量更是突破10万 m^3，同时发现了探明储量达1千亿 m^3的深部煤层气田[8-12]. 我国煤层气产业开始突破"禁区"，向深部"争气".

近年来，鄂尔多斯盆地东缘相继发现2个探明储量达2 112亿 m^3的深部煤层气田，使该地区成为当前我国深部煤层气勘探开发的主战场[13-17]. 然而，尽管深部煤层气资源潜力巨大，但其在含气性评价、成藏机制、压裂技术和排采方式等方面与中浅层煤层气存在显著差异，难以直接沿用现有理论和技术体系，这一挑战在含气性评价和成藏机制方面尤为突出[18-23]. 随着埋深增加，煤储层温度和压力同步升高. 当超过某一临界深度时，温度对煤层吸附能力的负效应将超过压力的正效应，导致煤层吸附能力降低，从而为游离气的富集创造条件[6, 24]. 研究表明，深部煤层中游离气含量占比变化范围较大，以中、高煤阶为主的深部煤层虽仍以吸附气为主，但游离气含量占比可达30%（如临兴—神府、大宁—吉县地区）[21, 25-28]；而在低煤阶深部煤层中，游离气占比甚至超过60%（如白家海凸起）[29-30]. 因此，与浅层不同，深部煤层气产量通常由吸附气与游离气共同控制. 游离气的富集使得深部煤层气井普遍表现出"开井即见气、峰值产量高、累计产量大"的生产特征，有效缓解了煤层气产业长期面临的单井产量低、增产缓慢的困境.

深部煤层气最显著的特征是"高含气量、高含气

饱和度”的“双高”含气优势. 然而,勘探开发实践表明,不同区块乃至同一区块内部,深部煤层含气性存在显著差异,多处存在游离气并未规模富集的现象. 这种游离气的差异富集直接导致了深部煤层气井产量的显著差异,直井单井日产量从不足1千m^3至超1万m^3均有分布[21,31-32]. 因此,准确评价深部煤层含气性、明确游离气富集的控制因素,是实现深部煤层气产量突破的关键. 本文以宁武盆地、沁水盆地和鄂尔多斯盆地东缘北部的3个典型深部煤层气区块为研究对象,通过集成地质资料、测试数据及数值模拟结果,系统揭示了深部煤层游离气富集的控制因素,并阐明了其勘探开发指导意义. 研究成果旨在为深部煤层气“甜点”区(段)优选提供理论支撑,推动我国深部煤层气勘探开发持续取得突破.

1 区域地质概况

华北地区在早石炭世至晚二叠世期间整体处于海陆交互相沉积环境(图1),沉积体系自滨浅海相逐渐向三角洲相、河流相过渡,该时期聚煤作用广泛发育. 目前,该区主要深部煤层气区块的勘探开发目的层多形成于这一时期,这些煤层通常采用编号方式进行标识. 例如,沁水盆地榆社—武乡区块的主力层为15#煤,宁武盆地宁武南区块为9#煤,鄂尔多斯盆地东缘临兴—神府区块为8#+9#煤,大牛地和大宁—吉县区块则以8#煤为主. 需要说明的是,煤层编号是基于层位自上而下依次确定的,由于不同盆地煤层发育层数存在差异,导致同一地质时代形成的煤层在不同盆地中可能对应不同的编号.

本研究以沁水盆地榆社—武乡区块、宁武盆地宁武南区块及鄂尔多斯盆地东缘北部的临兴—神府区块典型钻井资料为基础(图2),利用自然伽马测井曲线,借助Acycle软件提取天文周期信号,结合已发表的华北地区石炭—二叠系含煤地层锆石年代学测试数据[34-35],建立了研究区石炭—二叠系年代地层格架. 研究结果显示,研究区深部煤层气目标煤层沉积时代均早于298.15 Ma,表明这些深部煤层气主力煤层的成煤期均属于石炭系晚格舍尔阶(图3). 该套形成于晚石炭世格舍尔期的煤层在研究区埋深大多超过1 500 m,煤层厚度一般介于5~25 m之间,为深部煤层气的成藏与富集奠定了良好的地质基础.

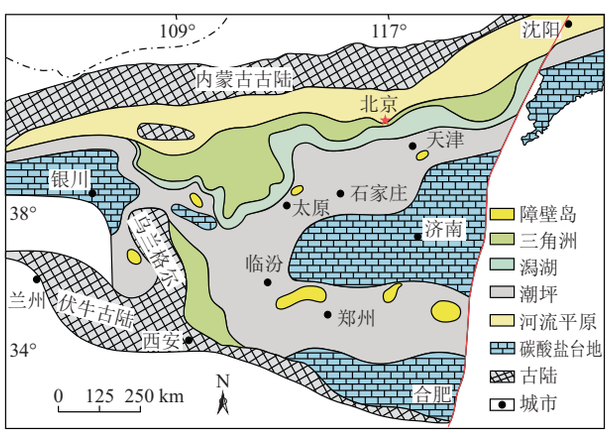


图1 华北盆地晚石炭纪岩相古地理(修改自文献[33])

Fig. 1 Lithofacies paleogeography of the Late Carboniferous in North China Basin

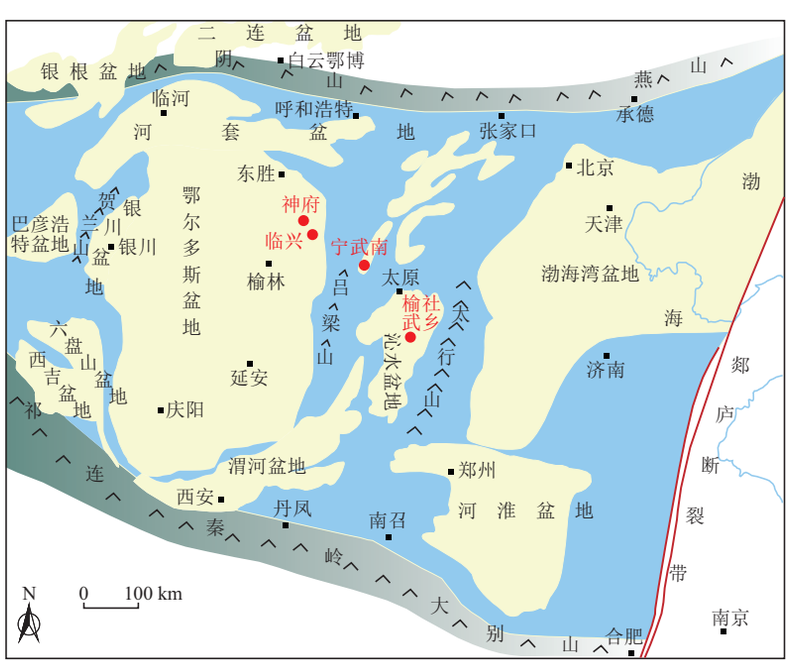


图2 研究区深部煤层气区块分布示意(修改自文献[36-37])

Fig. 2 Schematic distribution map of deep coalbed methane blocks in the study area

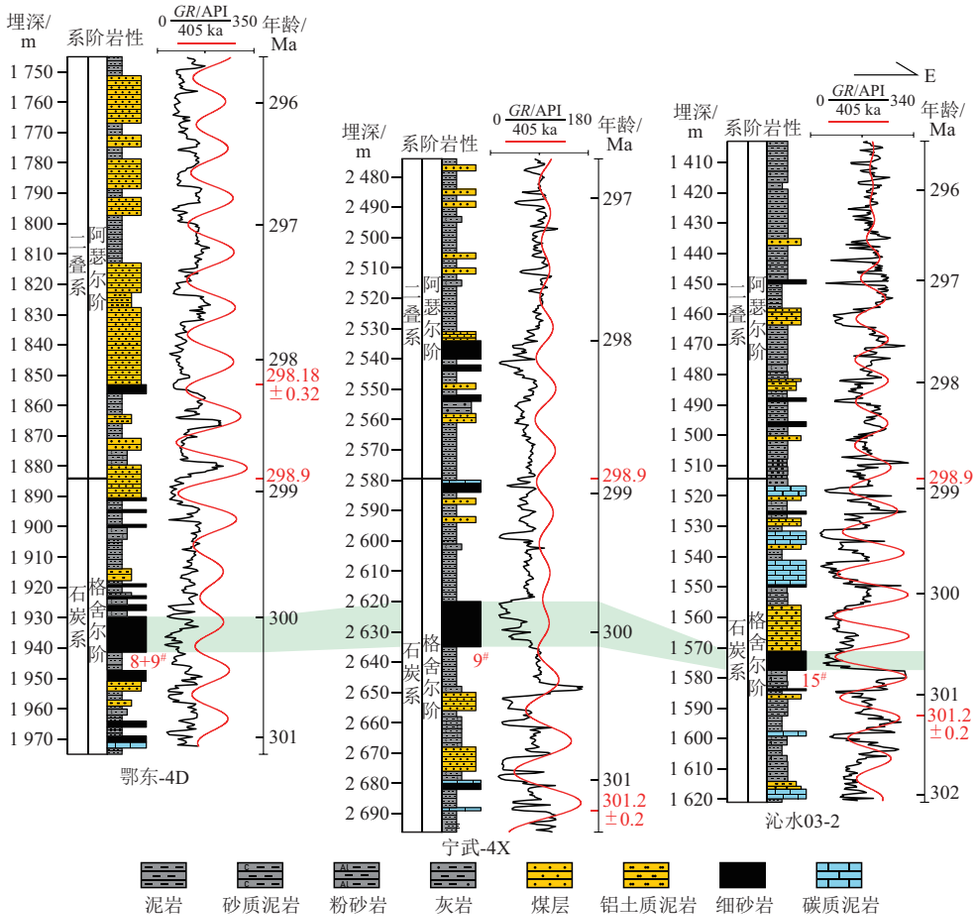


图 3　沁水盆地-宁武盆地-鄂东缘北部典型井石炭系煤层对比

Fig. 3　Correlation of Carboniferous coal seams from typical wells across Qinshui Basin, Ningwu Basin and the northern eastern margin of Ordos Basin

2　深部煤层游离气富集控制因素

华北地区典型区块煤层含气性数据综合显示(图 4a),浅部煤层普遍表现为吸附含气饱和度低于 100%,反映其处于吸附欠饱和状态,随着埋深增加,深部煤层中开始出现吸附含气饱和度大于 100% 的现象,表明煤层进入吸附过饱和状态. 值得注意的是,即使在深部煤层中,仍存在部分区域吸附含气饱和度低于 100% 的现象. 具体数据显示,宁武南区块深部煤层平均吸附含气饱和度为 73.1%,榆社—武乡区块为 60.1%,而临兴—神府区块则高达 123.2%(表 1). 其中,榆社—武乡和宁武南区块的深部煤层均未表现出明显的游离气富集特征. 相比之下,鄂尔多斯盆地东缘深部煤层普遍具有游离气富集特征,但其吸附含气饱和度变化范围较大,显示出该区游离气富集程度存在显著空间差异.

煤层中游离气的富集受内部因素和外部地质条件的共同控制(图 4b). 内部因素主要包括煤层的吸附能力与储集空间,外部因素则涉及温压环境和保存条件. 煤层吸附能力与温压条件共同决定了吸附能力的临界深度,当埋深超过该临界深度时,煤层才具备富集游离气的潜在条件. 然而,即使在临界深度以下,游离气的实际富集仍受保存条件和储集空间的显著制约. 保存条件差会导致气体大量逸散,难以形成有效富集;而在保存条件良好的情况下,储集空间的大小则成为游离气富集程度的关键控制因素.

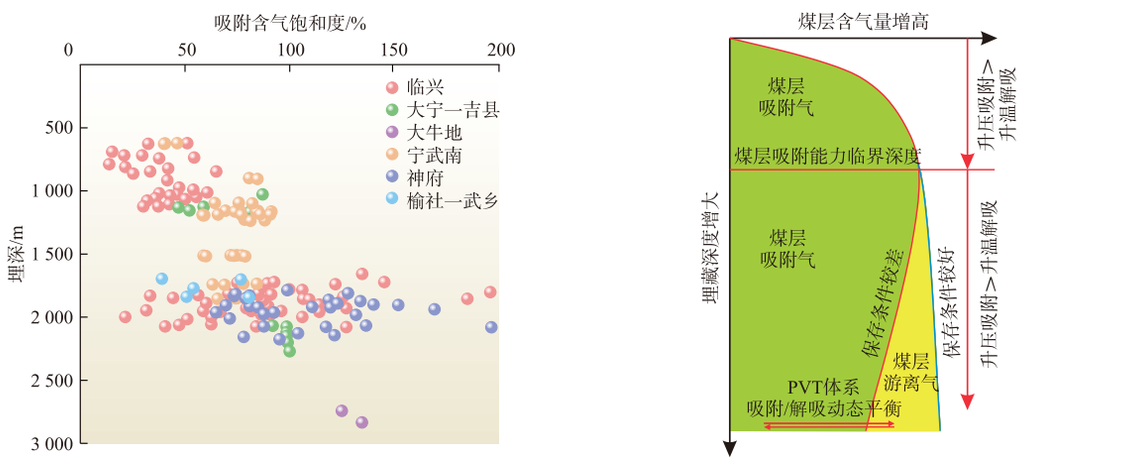
因此,煤层中富集游离气需同时满足以下 3 个基本条件,才能构成缺一不可的“三元控游离气”富集体系. 1)埋深超过吸附能力临界深度:这是发生吸附气向游离气转化的相态转变门槛. 只有当埋深达到临界深度以下,温度对吸附能力的负效应才会超越压力的正效应,导致煤层吸附能力下降,从而为游离气富集创造必要的温压环境. 2)具备良好的保存条件:这是维持游离气得以长期滞留成藏的关键约束. 良好的保存条件可有效抑制气体逸散,是游离气从“动态散失”走向“静态富集”的封存保障. 强烈的后期构造运动、地层抬升或断裂发育,都会破坏封存体系,导致储层压力降

低和气体大规模逸散，从而造成“有气但难存”的局面．3)具有充足的储集空间：这是决定游离气富集规模和资源丰度的物质基础．较高的有效储气空间直接控制着游离气的最大赋存潜力．即便埋深足够且保存条件良好，若储层致密、储集空间有限，游离气也难以实现具有经济价值的规模富集．上述3个条件构成一个逻辑递进、协同控制的“门槛”序列：临界深度是前提，保存条件是枢纽，储集空间是基础．任一条件的缺失或不足，均会导致深部煤层游离气富集程度的显著差异．基于上述认识，本文选取宁武盆地宁武南区块、沁水盆地榆社—武乡区块及鄂尔多斯盆地东缘临兴—神府区块作为典型案例，深入剖析深部煤层游离气富集的地质控因．

表 1　研究区深部煤层含气性特征

Table 1　Characteristics of gas content in deep coal seams in the study area

区块	埋深/m	含气量/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	吸附含气饱和度/%	游离气富集程度
宁武南	1 500～2 700	4.1～22.0，均值为 13.4	50.1～93.7，均值为 73.1	不富集游离气
榆社—武乡	1 500～2 000	7.3～28.9，均值为 16.9	29.2～80.7，均值为 60.1	不富集游离气
鄂东缘北部	1 700～2 200	7.1～24.3，均值为 14.1	24.1～196.2，均值为 123.2	富集游离气



(a) 华北地区典型深部煤层气区块吸附含气饱和度与埋深的耦合关系　(b) 吸附气和游离气含量随埋深增加的变化趋势(修改自文献[6])

图 4　煤层含气量和赋存相态与深度的耦合关系

Fig. 4　Coupling relationships between coal seam gas content, occurrence state and depth

2.1　吸附性的深度效应——宁武南区块

宁武南区块位于宁武盆地南部(图2)，石炭系9#煤层埋深普遍超过1 500 m[16-18]．该区块煤层吸附含气饱和度普遍低于100%，表明煤层中未富集游离气．研究表明，较低的地温梯度(1.5 ℃/hm)导致宁武南区块煤层吸附能力临界深度较大[17]，而现有煤层气井深度大多尚未达到临界深度，是造成该区块石炭系深部煤层气仍未取得突破的重要原因．

本次研究采集了宁武南区块2块不同煤阶的钻井煤芯样品，开展了多温度条件下的等温吸附试验，结果如图5a～5b所示．试验结果表明，在不同温度条件下，热演化程度较高的样品(煤层镜质组反射率R_o=1.42%，埋深为1 714 m)的吸附能力均显著高于热演化程度较低的样品(R_o=1.16%，埋深为1 310 m)．这一现象与煤层中小孔径孔隙随热演化程度增加而增多的特征密切相关，孔隙结构的改变显著增强了煤层的吸附能力[40]．此外，2块煤样的兰氏体积均随试验温度升高呈现下降趋势(见图5c)，充分体现了温度对煤层吸附能力的负效应．为进一步建立R_o与吸附能力临界深度的定量关系，还采集了宁武盆地北部安太堡露天煤矿的低煤阶样品(R_o=0.65%)，并采用相同试验方法进行了对比分析．

基于图5c和图5d中兰氏体积(V_L)和兰氏压力(P_L)与温度的线性关系，结合朗格缪尔方程(式(1)～(2))以及温度、压力与埋深的线性关系(式(3)～(4))，建立了研究区深部煤层吸附能力与埋深的定量关系，如图6所示．

$$V_{R_o=1.16\%}=\frac{87.99\exp(-0.005T)P}{P+0.226\exp(-0.008T)}, \quad (1)$$

$$V_{R_o=1.42\%}=\frac{77.31\exp(-0.004T)P}{P+0.064\exp(-0.011T)}, \quad (2)$$

$$P=H\cdot G_p, \quad (3)$$

$$T=T_0+(H-H_0)G_T, \tag{4}$$

式中：$V_{R_o=1.16\%}$为镜质组反射率为1.16%的样品的吸附气含量，cm³/g；$V_{R_o=1.42\%}$为镜质组反射率为1.42%的样品的吸附气含量，cm³/g；P为煤储层压力，MPa；G_p为压力梯度，9.5 MPa/km；H为煤层埋深，m；T为煤储层温度，℃；T_0为恒温带温度，其值为8 ℃；H_0为恒温带厚度，其值为30 m；G_T为地温梯度，其值为1.5 ℃/hm.

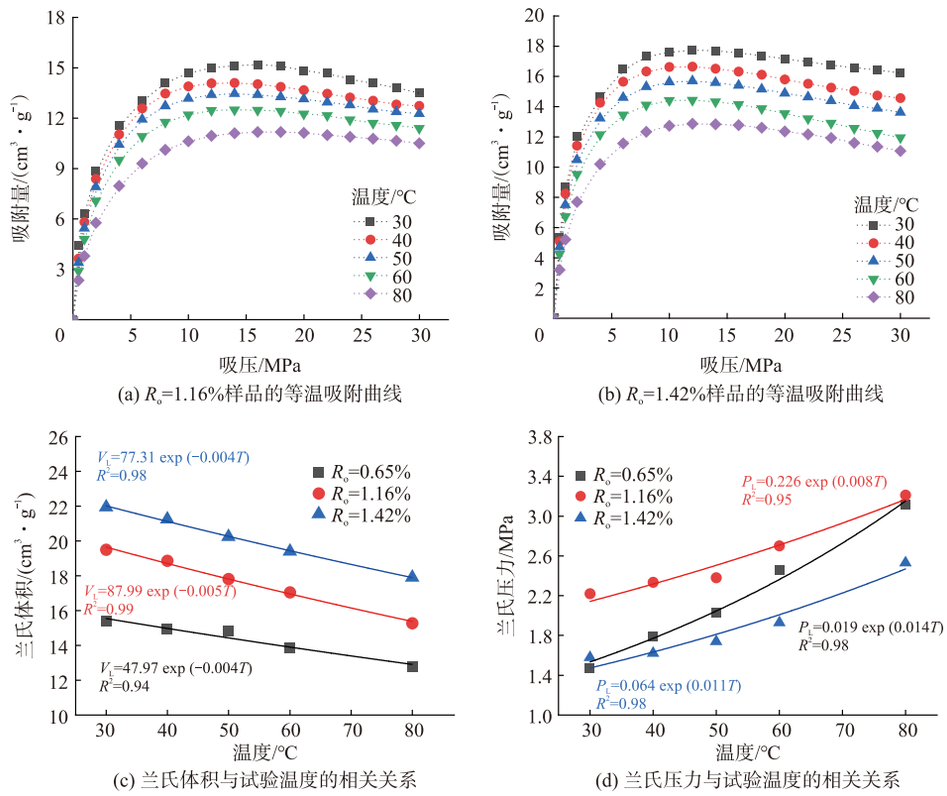


图5　不同试验温度-不同煤阶煤的吸附能力

Fig. 5　Adsorption capacity of coals with different ranks under various experimental temperatures

宁武南区块煤层吸附能力随着埋深增大呈现先增大后减小的变化趋势，R_o分别为0.65%，1.16%，1.42%的样品的吸附能力临界深度分别为1 120，1 515，1 761 m（图6），均大于其现今埋深，因此这些样品的现今埋藏深度不利于游离气的富集. 热演化程度更高的煤样，吸附能力更强，吸附能力临界深度更深，热演化程度与吸附能力临界深度呈现正相关性. 基于图6数据，建立了宁武盆地煤层R_o与吸附能力临界深度的定量关系，如式(5)所示：

$$H_a=824.44R_o+577.69, \tag{5}$$

式中　H_a为吸附能力临界深度，m.

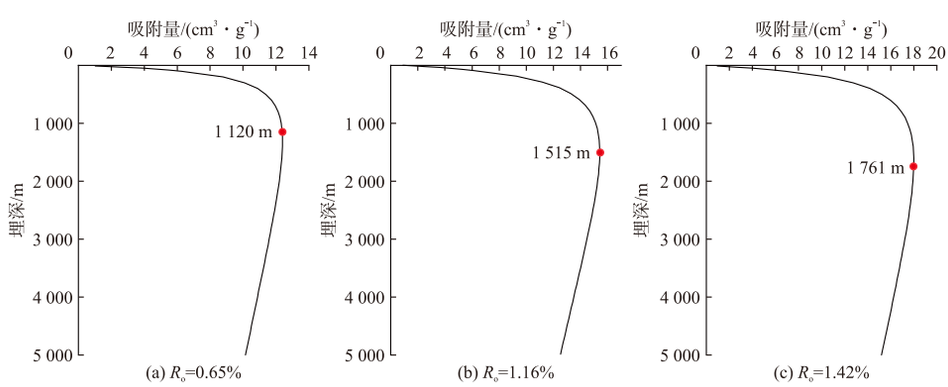


图6　宁武盆地不同煤阶煤吸附能力随埋深变化的演化特征

Fig. 6　Evolutionary characteristics of adsorption capacity with burial depth for coals of different ranks in Ningwu Basin

宁武南区块北部(宁武盆地核部)9#煤层样品的R_o=1.82%,现今埋深接近2 500 m[17],根据式(5)计算可知,R_o=1.82%的煤样对应的吸附能力临界深度为2 078 m. 据此可推测,由于宁武盆地核部煤层埋深已超过其吸附能力临界深度(详见文献[17]),在埋藏深度上已具备富集游离气的条件. 此外,该区域构造整体较为平缓,断层发育较少[16-17],具有良好的保存条件. 因此,宁武盆地核部可作为该区块深部煤层气勘探开发的有利区带,具有勘探潜力.

2.2 压力演化对游离气富集的指示意义——榆社—武乡区块

榆社—武乡区块位于沁水盆地中东部,石炭系15#煤层埋深普遍超过1 500 m,且显著大于其吸附能力临界深度(其值小于1 000 m)[38],是沁水盆地深部煤层气勘探开发的主力层位. 然而,当前勘探开发实践表明,该区块深部煤层普遍未富集游离气. 华北地区主要含煤盆地自西向东受构造影响程度逐渐增强,沁水盆地整体处于中部过渡区,构造改造作用较为显著(图7). 研究表明,压力系数是评价煤层气保存条件的有效参数[39-40],其与煤层含气性,特别是与游离气富集程度具有一定相关关系.

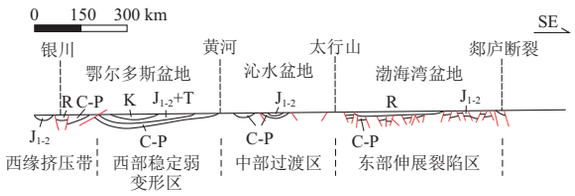


图7 华北地区由西向东主要含煤盆地石炭—二叠系地层构造剖面图(修改自文献[43])

Fig. 7 Structural cross-section of Carboniferous—Permian strata across major coal-bearing basins from west to east in North China

针对榆社—武乡区块典型井开展了流体包裹体分析(显微观测、显微测温和激光拉曼测试)[41],结合试井资料实测的储层压力,采用PetroMod软件重建了榆社—武乡区块煤储层压力演化史(图8),与前人针对该区块的盆地模拟结果基本一致[41].

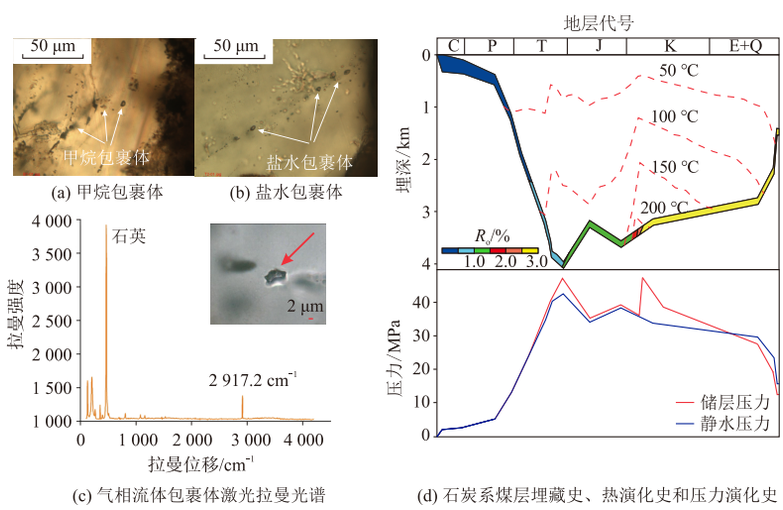


图8 榆社—武乡区块Y10井流体包裹体分析及压力演化史

Fig. 8 Fluid inclusion analysis and pressure evolution history of Well Y10 in Yushe—Wuxiang Block

研究区石炭系煤储层在晚三叠世和晚侏罗—早白垩世均表现为超压特征,分别对应2次生烃期,煤储层超压主要由生烃增压造成. 其中晚侏罗—早白垩世的燕山期构造热事件导致有机质在短时间内成熟度迅速增加(R_o>2.0%),生成大量烃类气体,使得该时期地层虽处于整体抬升形势但储层压力反而迅速升高,在距今110 Ma时压力系数达到1.22(图8d). 晚白垩世至第四纪,在燕山运动与喜马拉雅运动的共同作用下发生大规模构造隆升,该时期由于煤层温度降低、孔隙回弹和气体逸散使得煤储层压力逐渐降低,降低至现今储层压力系数为0.79,呈欠压状态. 基于文献[42]提出的公式,定量计算结果(见表2)表明气体逸散导致的压力损失达11.7 MPa. 基于榆社—武乡区块煤层超固结比的演化特征进一步明确[18],煤层可能在20~5 Ma期间发生破裂,导致气体大量逸散,从而引起储层压力快速降低. 煤层压力演化史显示,在距今110~20 Ma期间,压力呈缓慢下降趋势,这主要归因于温度降低和孔隙回弹导致的泄压;而在距今20 Ma以后,压力呈现显著降低特征,这主要

与气体逸散有关(图 8d). 20～5 Ma期间,中国境内以喜马拉雅运动为主导,沁水盆地榆社—武乡区块煤层气藏经历了强烈的构造改造,煤层破裂导致游离气大量逸散,最终造成该区深部煤层基本不富集游离气.

表 2　榆社—武乡区块 Y10 井煤层构造抬升阶段泄压机制及泄压量

Table 2　Pressure release mechanisms and magnitudes during tectonic uplift stages in coal seams of Well Y10, Yushe—Wuxiang Block

构造抬升阶段泄压机制	泄压量/MPa	占比/%
温度降低	13.3	47
孔隙回弹	3.5	12
气体逸散	11.7	41

2.3　游离气储集能力的深度效应——临兴—神府区块

鄂尔多斯盆地是目前深部煤层气勘探开发取得重大突破的重点盆地之一,其东缘的临兴—神府和大宁—吉县等区块已成为深部煤层气勘探开发的重要区域. 其中,临兴—神府区块的主力煤层为 $8^{\#}+9^{\#}$煤层,埋深主要分布在 1 700～2 200 m 之间. 临兴区块的保压取芯测试结果表明,该区煤层中游离气含量占比接近 20%. 此外,鄂东缘深部煤层气井普遍表现出见气快、峰值产量高的生产特征,进一步证实了该区深部 $8^{\#}+9^{\#}$煤层普遍富集游离气的特点.

临兴—神府区块煤层气试井资料显示,现今煤储层压力系数介于 0.9～1.3 之间,平均压力系数超过 1.0,呈现常压-弱超压特征,表明该区煤层气保存条件良好,且临兴—神府区块 $8^{\#}+9^{\#}$煤层埋深普遍超过吸附能力临界深度[44]. 因此,深部煤层普遍具有游离气相对富集的特征. 然而,研究区深部煤层游离气含量存在明显的空间差异,且与埋深呈现一定的相关性. 通过对 30 口钻井实测含气量数据的统计分析发现,埋深为 2 000 m 以浅的煤层游离气含量平均低于埋深为 2 000 m 以深的煤层(见图 9),两者平均差值约为 1.4 cm^3/g.

本文采用联合气体状态方程及马略特定律定量表征煤层中理论游离气含量,即煤层游离气储集能力[45],表达式如下:

$$V_f=\frac{\varphi(1-S_w)}{\rho_w B_g}, \tag{6}$$

$$B_g=\frac{P_{sc}ZT}{PT_{sc}}, \tag{7}$$

$$V_f=\frac{\varphi(1-S_w)PT_{sc}}{\rho_b P_{sc}ZT}, \tag{8}$$

$$S_w=\frac{m_{ar}\rho_b}{\varphi\rho_w}, \tag{9}$$

式中:V_f为游离气含量,cm^3/g;φ为孔隙度,%;S_w为含水饱和度,基于煤样工业分析含水率进行计算[50];ρ_b为煤的视密度,g/cm^3;ρ_w为水的密度,g/cm^3;B_g为甲烷气体体积系数,无量纲;P_{sc}为标准状态下的游离气体压力,其值为 0.101 MPa;Z为气体压缩因子,无量纲;T_{sc}为绝对温度,其值为 273.15 K;m_{ar}为煤的工业分析含水率,%.

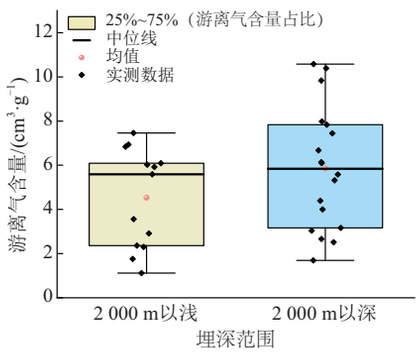


图 9　临兴—神府区块不同埋深范围内深部煤层游离气含量分布特征

Fig. 9　Distribution characteristics of free gas content in deep coal seams across different burial depth intervals in the Linxing—Shenfu area

深部煤层的游离气储集能力主要受孔隙度、储层压力、储层温度和气体压缩因子的共同影响. 具体而言,高孔隙度、较高储层压力、较低储层温度的煤层通常具有更强的游离气储集能力. 然而,随着埋深增加,煤层孔隙度通常呈现逐渐减小的趋势,而储层压力和温度则逐渐升高,气体压缩因子则表现为先减小后增大的特征. 因此,煤层游离气储集能力随埋深的变化是多因素耦合作用的结果. 已有研究基于不同理论公式的计算均表明,煤层游离气储集能力随埋深增加整体呈现先增大后趋于稳定的特征[23].

选取煤层地质参数相似但埋深具有明显差异的典型井数据并结合式(8)进行计算可得,临兴—神府区块埋深为 1 900 和 2 100 m 的煤层中理论游离气含量分别为 2.7 和 3.9 cm^3/g(见表 3). 理论计算结果与实际含气量测试数据均表明,研究区埋深较大的煤层游离气更为富集,且理论游离气含量差值(1.2 cm^3/g)与实际测试结果差值(1.4 cm^3/g)具有良好的一致性. 鄂东缘 $8^{\#}+9^{\#}$深部煤层气藏整体保存条件较好,且埋深普遍超过吸附能力临界深度,因此该区游离气含量与游离气储集能力呈现显著的相关性. 根据式(8)的计算结果,埋深越大的煤层

游离气储集能力越强，这解释了临兴—神府区块埋深较大的煤层游离气含量整体较高的现象.

表3 临兴—神府区块典型井不同埋深8#+9#煤层地质参数

Table 3 Geological parameters of coal seams 8#+9# with different burial depths in typical wells in the Linxing—Shenfu

埋深/m	孔隙度/%	含水饱和度/%	储层温度/K	储层压力/MPa	压缩因子	游离气含量/($cm^3 \cdot g^{-1}$)
1 900 m	4.1	42	330.15	19	0.89	2.7
2 100 m	3.9	34	332.15	25	0.92	3.9

3 深部煤层游离气富集的勘探开发意义

前文对宁武盆地、沁水盆地及临兴—神府区块煤层游离气富集控制因素的分析表明，煤层中游离气的规模富集需要同时满足3个基本条件：埋深超过吸附能力临界深度、具备良好的保存条件及充足的储集空间. 因此，深埋藏仅是煤层富集游离气的必要不充分条件. 与浅部煤层相比，深部煤层总体上更易富集游离气，这主要是因为较大的埋深通常能够满足超越临界深度的要求，且其所经历的构造改造强度往往较弱(表现为抬升时间晚或剥蚀厚度小)，有利于气体保存. 此外，随着埋深增加，深部煤层的游离气储集能力通常呈现先增强后趋于稳定的特征[23]. 由此可见，较大埋深有助于使游离气富集的各项地质条件形成有效匹配，从而使“深部”煤层在整体上呈现出游离气富集的特点. 当前，仅以吸附气为主导的含气性评价方法、成藏模式分析、“甜点”区预测及资源量估算技术已难以满足深部煤层气勘探开发的需要. 深化对游离气富集控制机制的地质认识具有重要意义，例如，文献[25]提出了吸附气和游离气共存的微幅构造和鼻状构造2类深部煤层气成藏模式；文献[14]提出了束缚动力场、局限动力场、自由动力场“三场”和“源-储-保”三端元耦合控制下的深部煤系地层成藏模式.

深部煤层中游离气的富集通常使气井表现出“双高”生产特征，即峰值产量高、累计产量大，与浅部煤层气井见气时间长、单井产量低的特点形成鲜明对比. 前人基于大宁—吉县区块深部气井实际生产数据，通过数值模拟发现：在保持兰氏体积(反映吸附能力)不变的条件下，仅提高初始游离气饱和度即可显著改善产能——游离气饱和度越高，单井日产气量和累计产气量也相应提高[46]. 由于该研究未改变兰氏体积，吸附气含量保持稳定，因此随着游离气饱和度上升，煤层总含气(吸附气+游离气)量增加. 然而，一般情况下，深部煤层游离气储集能力随埋深增加而增大，而吸附气储集能力则随埋深增加而减小. 当吸附能力的降低程度超过游离气储集能力的增加幅度时，煤层总含气量可能不增反降.

为进一步揭示深部煤层含气性特征与产能的耦合关系，本研究采用广泛应用且技术成熟的煤层气产能预测商业软件COMET3(“双孔单渗”模型)，以鄂东缘北部石炭系深部煤层气井的实际生产数据为基础(采用统一排采制度)，通过同步调整总含气量与兰氏体积(见表4)，开展了情景模拟分析. 模拟结果(见图10)表明：1)在总含气量相同的情况下，吸附含气饱和度较高的气井产能更高(如情形2与情形3对比，生产3 000 d)；2)吸附含气饱和度一定时，总含气量较高的气井产能更高(如情形1与情形3对比，生产3 000 d)；3)总含气量较低但吸附含气饱和度较高的气井(情形1)，其产能表现优于总含气量高但吸附含气饱和度较低的气井(情形2). 由此可见，高含气量且富集游离气的深部煤层气井产能最优，且游离气富集程度对产能的影响甚至超过总含气量. 因此，较高的游离气富集程度是实现煤层气井高产的关键控制因素. 鄂东缘北部埋深超过2 000 m的煤层游离气含量普遍高于浅于2 000 m的煤层，但总含气量却表现为浅部更高(表5). 这一现象说明，该区深部煤层具有“深部游离气更富集，但总含气量较低”的特征. 同时，2 000 m以深煤层气井的平均日产气量也总体高于2 000 m以浅的气井. 排除其他因素的干扰(采用相似工程措施和排采制度)，游离气富集程度更高的气井产能更优，与上述数值模拟结论一致.

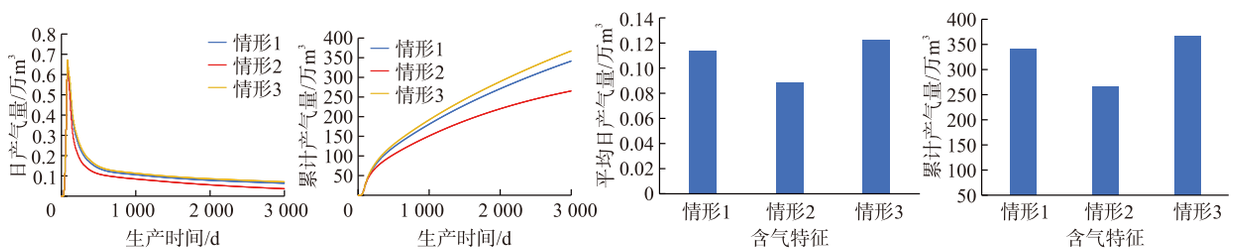
然而需注意的是，尽管随埋深增加游离气含量趋于上升，但总含气量反而下降，意味着当超过某一深度后，煤层气资源丰度将逐渐受限. 此外，随埋深增加，煤层所受地应力显著增强，储层塑性增大，可改造性明显变差. 有研究结果表明，当煤层埋深超过3 000 m时[18]，压裂过程中煤岩易发生塑性变形，导致裂缝扩展受限，压裂效果下降. 因此，煤层气富集并不等同于高产，例如，部分浅部煤层总含气量较高，但由于游离气比例低，产能仍然偏低. 同样地，即使深部煤层富集游离气，也需同时满足以下2个条件才能实现高产：1)游离气富

集程度达到一定阈值；2）总含气量保持在较高水平．综上所述，确定深部煤层气的最佳“甜点”深度是勘探部署中的关键任务．该深度范围内的煤层应兼具较高的总含气量和显著的游离气富集程度，以保证良好的资源禀赋与开发潜力．此外，在“甜点”区优选过程中还需综合考虑地应力状态、岩石力学性质及储层可改造性，以确保压裂施工效果和经济效益．

表 4　临兴—神府区块深部煤层含气性与产能关系

Table 4　The relationship between gas content and production capacity of deep coal seams in the Linxing—Shenfu

含气特征	含气量/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	兰氏体积/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	吸附含气饱和度/%	平均日产量/m^3	3 000 d 累计产气量/万 m^3
情形 1	10	7.0	142	1 138	340
情形 2	15	12.0	125	884	270
情形 3	15	10.5	142	1 224	370



(a) 生产时间与日产气量　(b) 生产时间与累计产气量　(c) 不同含气情形下平均日产气量　(d) 不同含气情形下累计产气量

图 10　临兴—神府区块不同含气性特征下的深部煤层气井生产动态

Fig. 10　Production performance of deep coalbed methane wells under different gas bearing characteristics in the Linxing—Shenfu

表 5　临兴—神府区块不同深度煤层含气性及生产特征

Table 5　Gas bearing properties and production characteristics of coal seams at different depths in the Linxing—Shenfu

埋深	含气量/($cm^3 \cdot g^{-1}$)	吸附含气饱和度/%	平均日产气量/m^3
2 000 m 以浅	15.7	115	2 600
2 000 m 以深	13.1	131	3 100

4　结　论

1）本研究系统阐述了以“埋深-保存-储集”为核心要素的三元耦合控制体系，揭示了深部煤层游离气规模富集的内在逻辑与必要条件．该体系强调，游离气的有效富集并非单一地质因素作用的结果，而是需要 3 个关键条件有序衔接、协同控制：埋深超越吸附能力临界深度是发生相态转化的前提，保存条件是气体得以滞留成藏的关键，而储集空间则最终控制富集规模与资源潜力．任一条件的缺失都将导致游离气的差异富集，这一认识为深部煤层气富集规律研究提供了理论分析框架．

2）基于典型区块地质实证，明确了不同地质背景下游离气富集的控制因素．宁武南区块的游离气未富集的核心限制在于埋深未达吸附能力临界深度，揭示了相态转化门槛的基础性控制作用；榆社—武乡区块的关键问题在于后期构造改造导致保存条件破坏，凸显了保存条件在游离气富集中的决定性作用；而临兴—神府区块在满足前 2 项条件的基础上，其游离气差异富集则主要受储集空间的非均质性控制．

3）高含气饱和度是深部煤层气井高产的关键控制因素，其对产量的影响程度可能高于含气量．深部煤层气存在最佳深度“甜点”段，该深度范围内的煤层既具有较高的含气量，又相对富集游离气，从而确保深部煤层气兼具良好的资源构成和较大的资源规模．在确定“甜点”深度范围时，还需综合考虑煤层的应力-应变效应及可改造性，以确保深部煤层的压裂效果和经济可采性．

参考文献：

[1] 秦　勇，申　建，史　锐．中国煤系气大产业建设战略价值与战略选择[J]．煤炭学报，2022，47(1)：371-387．
QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 371-387.

[2] 郭旭升，赵培荣，申宝剑，等．中国深层煤层气地质特征与勘探实践[J]．石油与天然气地质，2024，45(6)：1511-1523．
GUO Xusheng, ZHAO Peirong, SHEN Baojian, et al. Geological features and exploration practices of deep

coalbed methane in China [J]. Oil &Gas Geology, 2024,45(6):1511-1523.

[3] 张道勇,朱 杰,赵先良,等.全国煤层气资源动态评价与可利用性分析[J].煤炭学报,2018,43(6):1598-1604.
ZHANG Daoyong, ZHU Jie, ZHAO Xianliang, et al. Dynamic assessment of coalbed methane resources and availability in China [J].Journal of China Coal Society,2018,43(6):1598-1604.

[4] 赵文智,曹正林,黄福喜,等.中国深层煤岩气成藏特征与发展前景展望[J].中国石油勘探,2025,30(4):27-43.
ZHAO Wenzhi, CAO Zhenglin, HUANG Fuxi, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and development prospects of deep coal-rock gas in China [J]. China Petroleum Exploration,2025,30(4) :27-43.

[5] 秦 勇,申 建,李小刚.中国煤层气资源控制程度及可靠性分析[J].天然气工业,2022,42(6):19-32.
QIN Yong, SHEN Jian, LI Xiaogang.Control degree and reliability of CBM resources in China [J].Natural Gas Industry,2022,42(6):19-32.

[6] 秦 勇.中国深部煤层气地质研究进展[J].石油学报,2023,44(11):1791-1811.
QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023,44(11):1791-1811.

[7] 霍 超,郭海晓,王 蕾,等.双碳背景下中国深部煤层气勘探开发研究进展[J].科学技术与工程,2025,25(14):5705-5720.
HUO Chao, GUO Haixiao, WANG Lei, et al. Reaserch progress of deep coalbed methane exploration and development in China under the dual carbon background[J].Science Technology and Engineering, 2025,25(14):5705-5720.

[8] 赵 喆,徐旺林,赵振宇,等.鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破[J].石油勘探与开发,2024,51(2):234-247.
ZHAO Zhe, XU Wanglin, ZHAO Zhenyu, et al.Geological characteristics and exploration breakthroughs of coal rock gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China [J].Petroleum Exploration and Development,2024,51(2):234-247.

[9] 米洪刚,朱光辉,吴 见,等.鄂东缘临兴地区深层煤层气成藏条件及主控因素[J].天然气地球科学,2025, 36(9):1603-1617.
MI Honggang, ZHU Guanghui, WU Jian, et al.Accumulation conditions and controlling factors of deep coalbed methane in the Linxing area, Easternmargin of the Ordos Basin[J].Natural Gas Geoscience, 2025, 36 (9):1603-1617.

[10] 鞠 玮,陶 树,杨兆彪,等.中国深部煤层气研究与勘探开发现状及其发展趋势[J].石油实验地质,2025,47(1):9-16.
JU Wei, TAO Shu, YANG Zhaobiao, et al.Current status and development trends of deep coalbed methane research in China[J].Petroleum Geology & Experiment,2025,47(1):9-16.

[11] 罗平亚,朱苏阳.中国建立千亿立方米级煤层气大产业的理论与技术基础[J].石油学报,2023,44(11):1755-1763.
LUO Yaping, ZHU Suyang. Theoretical and technical fundamentals of a 100 billion-cubic-meter-scale large industry of coalbed methane in China [J].Acta Petrolei Sinica,2023,44(11):1755-1763.

[12] 蒋曙鸿,师素珍,赵 康,等.深部煤及煤层气勘探前景及发展方向[J].科技导报,2023,41(7):106-113.
JIANG Shuhong, SHI Suzhen, ZHAO Kang, et al. Prospect and development direction of deep coal and coalbedmethane exploration[J].Science & Technology Review,2023,41(7):106-113.

[13] SU X B, LIN X Y, LIU S B, et al.Geology of coalbed methane reservoirs in the Southeast Qinshui basin of China[J].International Journal of Coal Geology,2005,62(4):197-210.

[14] 李国欣,贾承造,赵 群,等.煤岩气成藏机理与煤系全油气系统[J].石油勘探与开发,2025,52(1):29-43.
LI Guoxin, JIA Chengzao, ZHAO Qun, et al.Coal-rock gas accumulation mechanism and the whole petroleum system of coal measures [J].Petroleum Exploration and Development,2025,52(1):29-43.

[15] 何发岐,董昭雄,赵 兰,等.深部煤层游离气形成机理及资源意义[J].断块油气田,2021,28(5):604-608.
HE Faqi, DONG Zhaoxiong, ZHAO Lan, et al.Formation mechanism and resource significance of free gas in deep coalbed[J].Fault-Block Oil & Gas Field, 2021,28(5):604-608.

[16] 郗兆栋,唐书恒,刘 忠,等.宁武盆地南部深部煤层气临界深度与成藏特征[J].天然气工业,2024,44(1):108-118.
XI Zhaodong, TANG Shuheng, LIU Zhong, et al. Critical depth and accumulation characteristics of deep coalbed methane in the southern Ningwu Basin [J].Natural Gas Industry,2024,44(1):108-118.

[17] 贾慧敏,胡秋嘉,张 聪,等.宁武盆地南部深部煤层气储层特征及开发实践[J].中国矿业大学学报,2025,54(1):149-160.
JIA Huimin, HU Qiujia, ZHANG Cong, et al.Characteristics and development practice of deep coalbed methane reservoir in southern Ningwu Basin[J].Jour-

nal of China University of Mining & Technology, 2025,54(1):149-160.

[18] 郗兆栋,唐书恒,杨文府,等.煤层自封闭性对深层煤岩气的富集与改造意义[J].天然气工业,2024,44(10):105-112.
XI Zhaodong, TANG Shuheng, YANG Wenfu, et al. Implications of coal reservoir self-sealing for the enrichment and stimulation of deep coal-rock gas[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 105-112.

[19] LIU D M, JIA Q F, CAI Y D, et al. A new insight into coalbed methane occurrence and accumulation in the Qinshui Basin, China [J]. Gondwana Research, 2022, 111: 280-297.

[20] LI S, QIN Y, TANG D Z, et al. A comprehensive review of deep coalbed methane and recent developments in China [J]. International Journal of Coal Geology, 2023, 279: 104369.

[21] 桑树勋,郑司建,刘世奇,等.煤系气及深部煤层气高效勘探开发若干研究进展[J].中国矿业大学学报,2025,54(1):1-25.
SANG Shuxun, ZHENG Sijian, LIU Shiqi, et al. Research advances in efficient exploration and development of coal measure gases and deep coalbed methane [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 1-25.

[22] YAN T T, HE S, ZHENG S, et al. Critical tectonic events and their geological controls on deep buried coalbed methane accumulation in Daning—Jixian Block, eastern Ordos Basin [J]. Frontiers of Earth Science, 2023, 17(1): 197-217.

[23] 史　锐,边利恒,张　伟,等.基于有效孔隙度的深部煤层游离气含量预测模型[J].中国矿业大学学报,2025,54(1):161-171.
SHI Rui, BIAN Liheng, ZHANG Wei, et al. Prediction model for free gas content in deep coal seams based on effective porosity [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 161-171.

[24] 秦　勇,申　建.论深部煤层气基本地质问题[J].石油学报,2016,37(1):125-136.
QIN Yong, SHEN Jian. On the fundamental issues of deep coalbed methane geology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(1): 125-136.

[25] 徐凤银,王成旺,熊先钺,等.深部(层)煤层气成藏模式与关键技术对策:以鄂尔多斯盆地东缘为例[J].中国海上油气,2022,34(4):30-42.
XU Fengyin, WANG Chengwang, XIONG Xianyue, et al. Deep (layer) coalbed methane reservoir forming modes and key technical countermeasures: Taking the eastern margin of Ordos Basin as an example [J]. China offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 30-42.

[26] 杨焦生,冯　鹏,唐淑玲,等.大宁—吉县区块深部煤层气相态控制因素及含量预测模型[J].石油学报,2023,44(11):1879-1891.
YANG Jiaosheng, FENG Peng, TANG Shuling, et al. Phase control factors and content prediction model of deep coalbed methane in Daning—Jixian block [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1879-1891.

[27] WU J, ZHANG S H, CHAO W W, et al. Quantitative analysis of gas occurrence states and its controlling factors in deep CBM Reservoirs: An integrated model with application in Linxing Block [J]. Geofluids, 2025, 1: 5449100.

[28] ZHAO F P, HAN S J, SANG S X., et al. Modified method for calculating saturation gas content in deep coal and the pore size effect of methane adsorption on Guizhou middle-and high-rank coals [J]. Natural Resources Research, 2023, 32(3), 1215-1233.

[29] 杨兆彪,李存磊,郭巧珍,等.新疆准噶尔盆地白家海凸起深部煤层气不同赋存态分配规律[J].中国矿业大学学报,2025,54(1):127-137.
YANG Zhaobiao, LI Cunlei, GUO Qiaozhen, et al. Distribution patterns of various occurrence states of deep coalbed methane in the Baijiahai Uplift, Junggar Basin, Xinjiang [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 127-137

[30] ZHANG B, TAO S, SUN B, et al. Genesis and accumulation mechanism of external gas in deep coal seams of the Baijiahai Uplift, Junggar Basin, China [J]. International Journal of Coal Geology, 2024, 286: 104506.

[31] 闫　霞,熊先钺,李曙光,等.深部煤层气水平井各段产出贡献及其主控因:以鄂尔多斯盆地东缘大宁—吉县区块为例[J].天然气工业,2024,44(10):80-92
YAN Xia, XIONG Xianyue, LI Shuguang, et al. Production contributions of deep CBM horizontal well sections and their controlling factors: A case study of Daning—Jixian area, eastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(10): 80-92.

[32] 熊先钺,闫　霞,徐凤银,等.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[J].石油学报,2023,44(11):1812-1826.
XIONG Xianyue, YAN Xia, XU Fengyin, et al. Analysis of multi-factor coupling control mechanism, desorption law and development effect of deep coalbed methane [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1812-1826.

[33] 邵龙义,董大啸,李明培,等.华北石炭—二叠纪层

序-古地理及聚煤规律[J].煤炭学报,2014,39(8):1725-1734.
SHAO Longyi,DONG Daxiao,LI Mingpei,et al.Sequence-paleogeography and coal accumulation of the Carboniferous—Permian in the North China Basin [J].Journal of China Coal Society,2014,39(8):1725-1734.

[34] 申博恒,沈树忠,吴 琼,等.华北板块石炭纪—二叠纪地层时间框架[J].中国科学:地球科学,2022,52(7):1181-1212.
SHEN Boheng,SHEN Shuzhong,WU Qiong,et al. Integrative stratigraphy and timescale of the Carboniferous—Permian in the North China Block [J].Science China: Earth Sciences, 2022, 52(7): 1181-1212.

[35] WU Q,RAMEZANI J,ZHANG H,et al.High-precision U-Pb age constraints on the Permian floral turnovers, paleoclimate change, and tectonics of the North China block[J].Geology,2021,49:677-681.

[36] 姜福杰,贾承造,庞雄奇,等.鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征与天然气富集地质模式[J].石油勘探与开发,2023,50(2):250-261.
JIANG Fujie,JIA Chengzao,PANG Xiongqi,et al. Upper Paleozoic total petroleum system and geological model of natural gas enrichment in Ordos Basin, NW China [J].Petroleum Exploration and Development,2023,50(2):250-261.

[37] 刘池洋,王建强,张东东,等.鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存-成藏特点[J].石油与天然气地质,2021,42(5):1011-1029.
LIU Chiyang, WANG Jianqiang, ZHANG Dongdong,et al.Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin [J].Oil & Gas Geology, 2021, 42(5):1011-1029.

[38] 申 建,秦 勇,傅雪海,等.深部煤层气成藏条件特殊性及其临界深度探讨[J].天然气地球科学,2014,25(9):1470-1476.
SHEN Jian,QIN Yong,FU Xuehai,et al.Properties of deep coalbed methane reservoir-forming conditions and critical depth discussion[J].Natural Gas Geoscience,2014,25(9):1470-1476.

[39] WANG T,TIAN F,DENG Z,et al.The characteristic development of micropores in deep coal and its relationship with adsorption capacity on the eastern margin of the Ordos Basin,China[J].Minerals,2023,13(3):302.

[40] 李国欣,张水昌,何海清,等.煤岩气:概念、内涵与分类标准[J].石油勘探与开发,2024,51(4):783-795.
LI Guoxin, ZHANG Shuichang, HE Haiqing, et al. Coal-rock gas: Concept, connotation and classification criteria [J].Petroleum Exploration and Development,2024,51(4):783-795.

[41] YANG X X,TANG S H,XI Z D,et al.Dynamic evolution and differential enrichment of deep coalbed methane: A case study in Qinshui Basin[J].International Journal of Coal Geology,2025,299:104696.

[42] LI S,SHI Z,LIU X,et al.Quantitative analysis of the Mesozoic abnormal low pressure in Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5):528-533.

[43] 周晓刚.宁武盆地构造演化及其对页岩气成藏的控制[D].徐州:中国矿业大学,2016.
ZHOU Xiaogang.Structural evolution and its control on accumulation of shale gas in Ningwu Basin [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2016.

[44] 徐长贵,季洪泉,王存武,等.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[J].煤田地质与勘探,2024,52(8):1-12.
XU Changgui, JI Hongquan, WANG Cunwu, et al. Enrichment patterns and exploration countermeasures of deep coalbed methane in the Linxing—Shenfu block on the eastern margin of the Ordos Basin [J]. Coal Geology & Exploration,2024,52(8):1-12.

[45] LI J,LU S,ZHANG P,et al.Estimation of gas-in-place content in coal and shale reservoirs: A process analysis method and its preliminary application [J]. Fuel,2020,259:116266.

[46] 石军太,曹敬添,徐凤银,等.深部煤层气游离气饱和度计算模型及其应用[J].煤田地质与勘探,2024,52(2):134-146.
SHI Juntai,CAO Jingtian,XU Fengyin,et al.A calculation model of free gas saturation in deep coalbed methane reservoirs and its application [J].Coal Geology & Exploration,2024,52(2):134-146.

(责任编辑 沈春妮 仝 腾)