https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.210

冀中坳陷石炭系-二叠系残留断陷盆地深部煤层气富集规律及有利区评价

闫睿昶[1],李熹微[2],李小冬[2],罗　静[3],王元杰[3],黄　芸[3],李　奔[2],王小明[4],史冠中[4*]

1. 中国石油华北油田公司,河北任丘　062552
2. 中国石油华北油田公司勘探事业部,河北任丘　062552
3. 中国石油华北油田公司勘探开发研究院,河北任丘　062552
4. 中国地质大学(武汉)资源学院,湖北武汉　430074

摘　要: 随着全球能源结构转型的加速,深部煤层气作为一种重要的非常规天然气,已成为中国天然气增产的战略接替资源.冀中坳陷作为渤海湾盆地的重要组成部分,其石炭系-二叠系煤系历经多期构造演化,呈现复杂的地质特征与煤层气富集规律.本文基于钻井、测井及实验测试数据,系统分析了冀中坳陷深部煤层气的地质特征、富集主控因素及成藏模式,并提出了有利勘探区优选方案.研究表明,冀中坳陷深部煤层厚度大(太原组单层最大25 m)、埋深差异大(1 000～5 600 m),煤岩镜质组反射率R_o总体在0.65%～0.95%之间,显微组分以镜质组为主(46.7%～97.4%),热成熟度受火山烘烤作用影响显著,局部R_o高达4.6%.煤层含气量(6～18 m³/t)与煤厚、压力系数及保存条件密切相关,深部弱超压环境(压力系数>1.18)及稳定盖层(碳质泥岩突破压力15～29 MPa)对气体富集与保存具有重要作用.研究揭示火山活动引发的异常热流是促进煤层气产气的关键地质因素,二次生烃与构造保存条件的时空配置主导了成藏过程.通过综合评价,文安斜坡中-内带及大城凸起东北部被划为Ⅰ类有利区,具备煤层厚度大(6～8 m)、生气强度高(>110 m³/t)、吸附能力强(平均兰氏体积11.39～12.42 m³/t)等优势.研究成果可为冀中坳陷深部煤层气勘探开发提供理论支撑,也为类似残留断陷型盆地煤层气资源评价提供了重要参考.

关键词: 煤层气;富集成藏模式;残留断陷盆地;石炭系-二叠系;冀中坳陷;石油地质.

中图分类号: P618.13　　**文章编号:** 1000－2383(2026)09－3578－21　　**收稿日期:** 2025－06－24

Enrichment Patterns and Favorable Area Evaluation of Deep Coalbed Methane in Carboniferous-Permian Residual Faulted Basins of Jizhong Depression

Yan Ruichang[1], Li Xiwei[2], Li Xiaodong[2], Luo Jing[3], Wang Yuanjie[3], Huang Yun[3], Li Ben[2], Wang Xiaoming[4], Shi Guanzhong[4*]

1. *PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu* 062552, *China*
2. *PetroChina Huabei Oilfield Company Exploration Division, Renqiu* 062552, *China*
3. *PetroChina Huabei Oilfield Company Exploration & Development Research Institute, Renqiu* 062552, *China*

基金项目: 国家油气重大专项(No. 2024ZD1400100).

作者简介: 闫睿昶(1972－),男,高级工程师,主要从事油气田勘探与开发方面研究工作.E-mail: hzkf_yrc@petrochina.com.cn

* **通讯作者:** 史冠中,ORCID: 0000-0003-2957-6647. E-mail: cugshi@163.com

引用格式: 闫睿昶,李熹微,李小冬,罗静,王元杰,黄芸,李奔,王小明,史冠中,2026.冀中坳陷石炭系-二叠系残留断陷盆地深部煤层气富集规律及有利区评价.地球科学,51(9):3578－3598.

Citation: Yan Ruichang, Li Xiwei, Li Xiaodong, Luo Jing, Wang Yuanjie, Huang Yun, Li Ben, Wang Xiaoming, Shi Guanzhong, 2026. Enrichment Patterns and Favorable Area Evaluation of Deep Coalbed Methane in Carboniferous-Permian Residual Faulted Basins of Jizhong Depression. *Earth Science*, 51(9): 3578－3598.

4. *School of Earth Resources*, *China University of Geosciences* (*Wuhan*), *Wuhan* 430074, *China*

Abstract: With the acceleration of the global energy structure transformation, deep coalbed methane as an important unconventional natural gas has become a strategic replacement resource for China's natural gas production increase. As an important part of the Bohai Bay Basin, the Jizhong Depression has undergone multiple tectonic evolutions in its Carboniferous-Permian coal-bearing strata, presenting complex geological characteristics and coalbed methane enrichment patterns. Based on drilling, logging and experimental test data, this paper systematically analyzes the geological characteristics, main controlling factors of enrichment and accumulation models of deep coalbed methane in the Jizhong Depression, and proposes a favorable exploration area selection scheme. The research shows that the deep coal seams in the Jizhong Depression are thick (the maximum single layer of the Taiyuan Formation is 25 meters), with significant burial depth differences (1 000－5 600 meters), and the vitrinite reflectance (R_o) of the coal rocks generally ranges between 0.65% and 0.95%, with vitrinite as the main maceral component (46.7%－97.4%). The thermal maturity is significantly affected by volcanic baking, and the local vitrinite reflectance (Ro) is as high as 4.6%. The gas content of the coal seam (6－18 m^3/t) is closely related to the coal thickness, pressure coefficient and preservation conditions. The weak overpressure environment (pressure coefficient ＞1.15) and stable cap rock (breakthrough pressure of carbonaceous mudstone 15－29 MPa) in the deep part promote gas enrichment. The study reveals that anomalous heat flow triggered by volcanic activity is a key geological factor enhancing coalbed methane generation, and the spatio-temporal configuration of secondary hydrocarbon generation and structural preservation conditions dominates the accumulation process. Through comprehensive evaluation, the middle to outer belt of the Wena Slope and the northeastern part of the Dacheng Uplift are classified as Class I favorable areas, with advantages such as large coal seam thickness (6－8 meters), high gas generation intensity (＞110 m^3/t), and large Langmuir volume (average 11.39－12.42 m^3/t). The research results provide theoretical support for the exploration and development of deep coalbed methane in the Jizhong Depression and offer a reference for the evaluation of coalbed methane in similar residual faulted basins.

Key words: coalbed methane; enrichment and accumulation model; residual faulted basin; Carboniferous–Permian; Jizhong Depression; petroleum geology.

0　引言

随着全球能源结构转型的加速,深部煤层气作为一种重要的非常规天然气,已成为中国天然气增产的战略接替资源.自“十一五”以来,我国在沁水盆地南部和鄂尔多斯盆地东缘已建成两大煤层气产业基地,并在准噶尔盆地五彩湾等区块实现深部突破,其中吉深6-7平01井煤层埋深2 100 m,最高日产量1.01×10^5 m^3,累计产量超过1.4×10^7 m^3,平均日产量5.82×10^4 m^3,标志着我国煤层埋深大于2 000 m的深部煤层气勘探开发获得重大突破(闫霞等,2021,2024;徐凤银等,2022;周德华等,2022;康永尚等,2023;兰浩等,2024).理论认识明确了埋深大于1 500 m、以煤为储集岩的天然气资源,其赋存状态为吸附气与游离气共存,揭示了深层煤岩割理裂缝发育、含气量随埋深增加而升高的特征.开发技术方面,形成了地质工程一体化选区评价、“五位一体”井网优化、水平井优快钻井、缝网体积压裂及全生命周期采气等核心工艺,推动单井EUR提升至6.0×10^7 m^3以上,实现“压后即产、见气快、高产稳产”效果(李勇等,2024;周立宏等,2025b,2025c).深部煤层气藏处于“高温、高压、高应力”地质环境,储层物性及含气性表现出显著差异,煤层气富集通常与煤阶、裂隙发育程度密切相关.随着埋深增加,游离气比例大幅增加,其聚集过程表现为游离气在宏观裂隙中微距运移,煤层气富集不单纯受水动力条件控制,更多地依赖于顶底板封盖特性和地应力条件(郭旭升等,2024;李国欣等,2024;刘岩等,2025;任鹏飞等,2025).

冀中坳陷早在1982－1984年就在文安斜坡内带发现了苏桥气田,探明天然气地质储量150.64×10^8 m^3,是渤海湾盆地最早发现石炭系-二叠系煤层气藏的地区,煤层气勘探潜力巨大(赵贤正等,2010;李志军等,2024).然而,由于地质条件复杂、构造活动频繁、煤层分布不均等问题,导致勘探进展缓慢,探井成功率较低.近年来,随着对深部煤层气富集规律和成藏条件的深入了解,研究人员发现石炭系-二叠系煤储层非均质性强、煤层气富集成藏机理复杂,构造扰动影响大,为优选有利区块带来挑战.本研究系统分析了冀中坳陷深

部煤层气基础地质特征，充分利用钻井、测井及分析测试资料，探讨煤层气富集规律，提出成藏模式，构建深部煤层气有利区块评价体系，旨在为冀中坳陷深部煤层气勘探开发提供理论依据.

1 研究区概况

冀中坳陷位于渤海湾盆地西北部，北起燕山，南止邢衡隆起，西邻太行山，东到沧县隆起，面积约31 700 km^2.冀中坳陷石炭系-二叠系煤岩主要残留在冀中坳陷东北部(图1)，残留面积为7 500 km^2.石炭系-二叠系煤系经历了中生代之前的稳定沉积、中生代晚期构造活跃阶段、古近系断陷期和新近系坳陷期4个阶段，构造演化呈现先东倾、后西倾的“跷跷板式”特征，导致石炭系-二叠系多残留在复向斜区内，属于典型的残留断陷型盆地(梁宏斌等，2006).地层主要分布于霸县凹陷的文安斜坡、廊固凹陷的河西务地区、武清凹陷的全部、里坦凹陷和大城凸起等构造单元，含煤地层主要为太原组和山西组.太原组主要为一套海相的含煤地层，厚度80～220 m，岩性主要为灰、深灰、灰黑色泥岩、碳质泥岩、煤层和浅灰色砂岩夹数层海相灰岩层.底部为晋祠砂岩，区域分布比较稳定(宋慧波等，2018；李志军等，2024).山西组为一套三角洲分支河道-河口坝砂体沉积，厚度40～150 m，主要为灰、深灰、灰黑色泥岩、碳质泥岩和煤层与浅灰、褐灰色砂岩、含砾砂岩不等厚互层.底部为一含砾砂岩，也称北岔沟

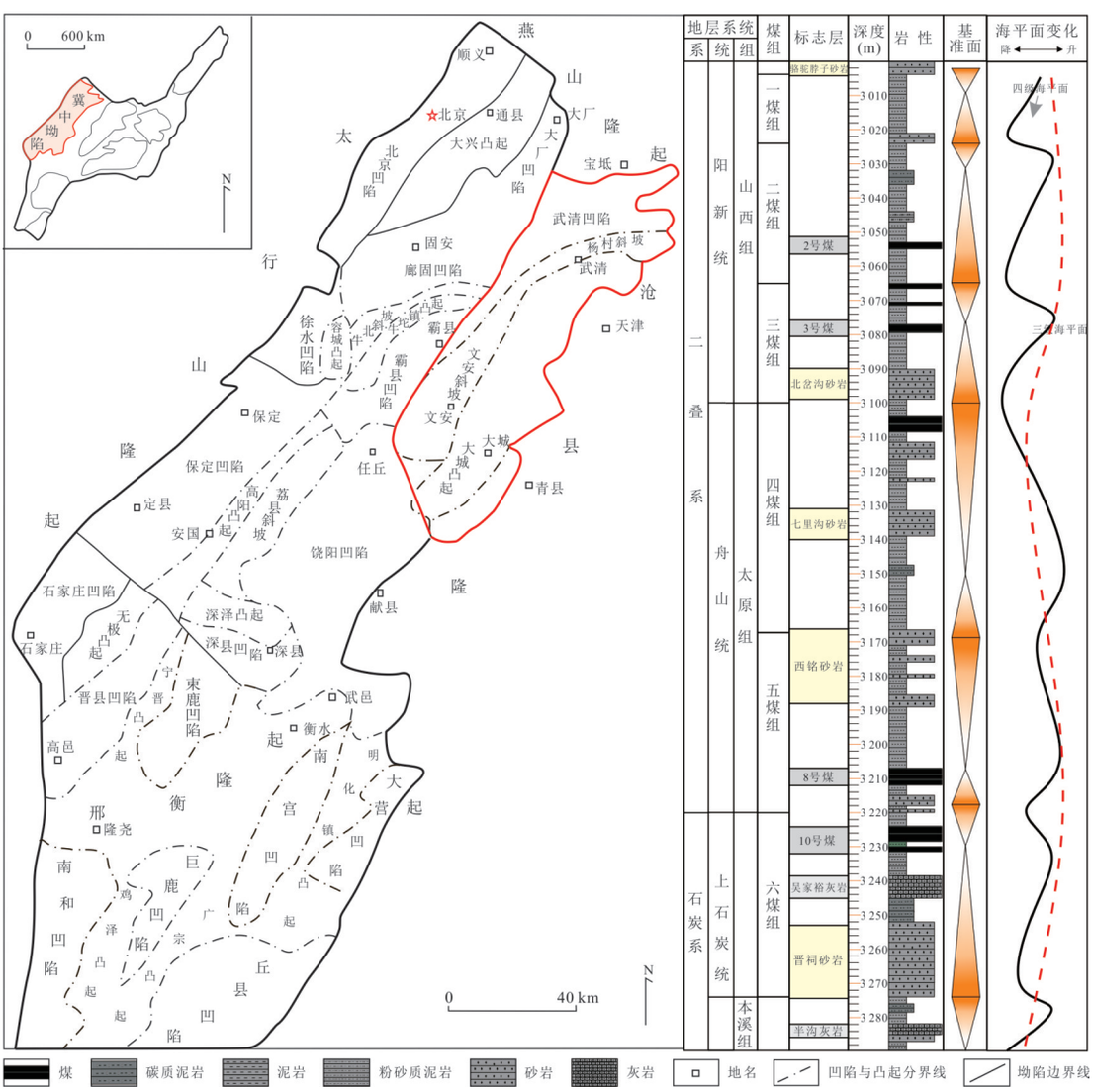


图1 冀中坳陷位置及构造单元划分和地层综合柱状图

Fig.1 Location of the Jizhong Depression, division of structural units, and comprehensive stratigraphic column

红色范围指示北部探区位置

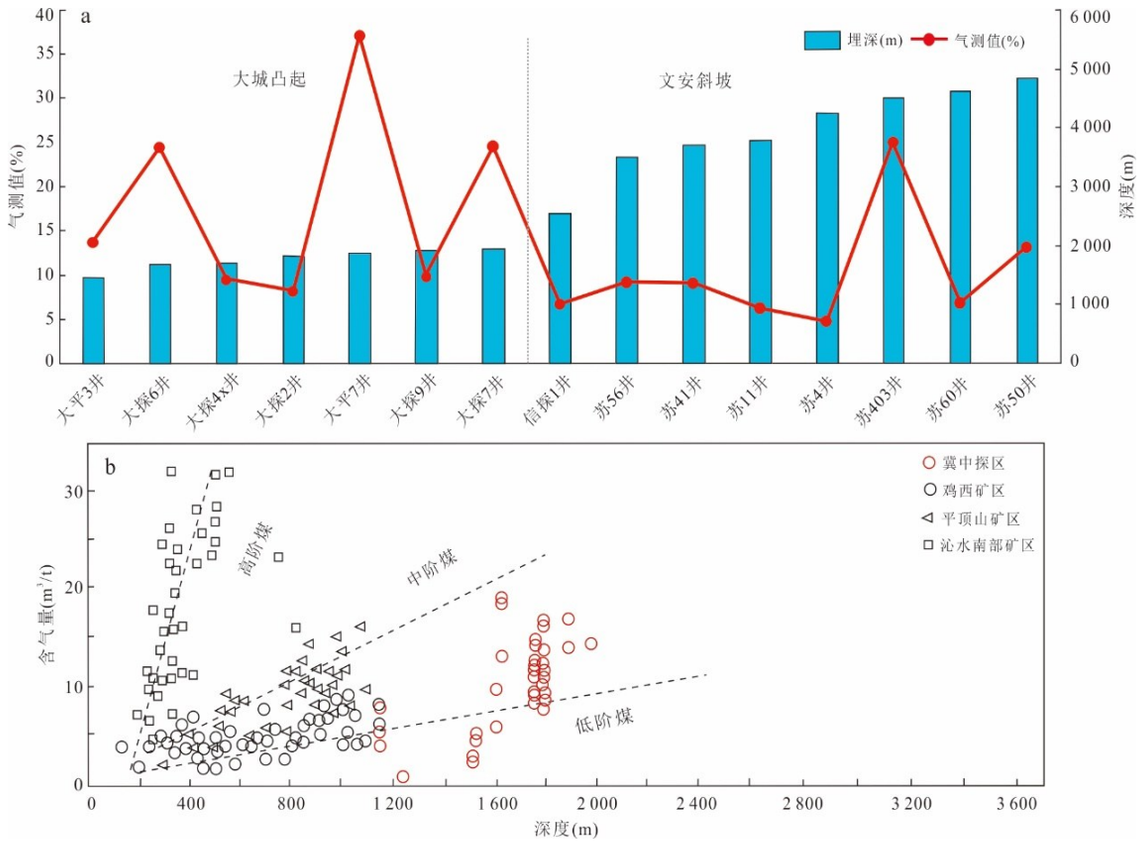


图 2　冀中坳陷北部探区单井含气量与埋深关系(a)及与其他研究区对比(b)

Fig.2　Relationship between gas content and burial depth for a single well in the northern exploration area of the Jizhong Depression (a), and comparison with other study areas (b)

图 b 展示了高、中和低阶煤含气量与埋深关系;鸡西、平顶山和沁水南部矿区含气量数据引自宋岩(2019)

砂岩,全区基本均有分布(黄建松等,2022).本研究根据岩性和测井曲线的变化,将山西组和太原组划分为 6 个四级层序,分别对应六个煤组(图 1).其中,冀中坳陷北部探区太原组六煤组煤层厚度大、分布稳定,是当前区域煤层气勘探的主力层位.

勘探实践证实,冀中坳陷煤岩含气量与勘探潜力方面具有显著特征,主要体现在:(1)地质构造条件复杂,深部煤层气田富集规律和勘探潜力存在差异.通常认为,煤层埋深越大,煤层含气量越高,两者呈正相关性(Guo *et al.*, 2022).然而随钻气测数据显示,大城凸起与文安斜坡地区煤岩的气测值与埋深相关性规律不明显(图 2).(2) 冀中坳陷煤岩以中、低阶煤为主,生烃潜力差异大.受多期构造运动影响,二次生烃与火山烘烤作用是控制有效生烃面积和生气强度的重要因素.(3)受煤岩沉积环境和差异埋藏影响,煤岩灰分中等,孔隙以大、中孔为主,孔隙类型多样,渗透率非均质性强.

2　煤岩地质特征

本文中煤层厚度基于地震反演和井震联合分析确定.有机质显微组分依据 GB/T 8899—2013,采用偏光显微镜进行定量鉴定.煤岩工业分析依据 GB/T 212—2008,使用 SDTGA 5000a 型工业分析仪完成.镜质组反射率(R_o)依据 GB/T 6948—2008,借助 CoalPro III™光谱反射率计进行测定.孔隙结构表征采用扫描电镜观察微观孔隙类型,并结合高压压汞仪和低温 N_2 吸附仪分析孔隙分布,含气量数据通过低压 CO_2 吸附实验获取.

2.1　煤层厚度与埋深

冀中坳陷北部探区由东南向西北依次发育里坦凹陷、大城凸起、文安斜坡、杨村斜坡、武清凹陷及河西务构造带 6 个主要次级构造单元.区内广泛发育的 NE 向断裂对煤岩地层的深埋与成藏有显著控制作用.下二叠统山西组煤岩总厚度为 3~35 m,平面上可识别出苏桥-文安、永清-信安、胜芳-静海

及大城-里坦4个聚煤中心(图3a).该组形成于陆表海背景下的三角洲-潮坪沉积体系,以滨岸沼泽和分流间湾泥炭坪为主要聚煤环境(赵贤正等,2010;王阳等,2024).煤层多呈层状或透镜体展布,与细砂岩、粉砂质泥岩互层,显示出潮汐-河流交互作用下的周期性海进成煤特征(彭思钟等,2022;欧阳诚等,2024).煤层单层厚度介于0.5～10.5 m,平均2.3 m,其中文安斜坡一带单层厚度多超过5 m,横向分布较稳定.

上石炭统太原组煤岩总厚度为2～46 m,普遍大于山西组,分布于武清凹陷、文安斜坡及里坦凹陷一带,存在信安-胜芳、苏桥和里坦3大聚煤中心(图3b).太原组形成于海陆交互相障壁海岸-潟湖沉积环境,其中潮坪-沼泽相持续泥炭堆积,煤层单层厚度大、横向连续性好(康世龙等,2024;王阳等,2024).煤层单层厚度0.4～8.0 m,平均2.8 m,最大煤厚约25 m(苏23井),文安斜坡胜芳镇附近煤层稳定且普遍厚度达3～4 m,局部可超过6 m.相比之下,冀中坳陷南部煤层厚度普遍较薄,多为4～6 m.太原组煤层厚度较大且分布稳定,与成煤期基底沉降速率与泥炭堆积速率相近,为厚煤层形成提供了充足的可容纳空间(Hou *et al.*, 2019).

山西组和太原组煤层埋深受构造作用显著影响,总体上表现为"东浅西深"的展布特征.在大城地区,太原组和山西组煤层埋深为1 000～1 900 m,平均约1 540 m,变化相对平缓;在文安-杨村斜坡地区,受NE向断裂活动影响,煤层埋深由约3 100 m骤增至4 800 m.在武清凹陷,煤层埋深普遍达到4 800～5 600 m.在冀中坳陷南部地区,受新生代断陷活动影响,石炭系-二叠系埋深变化较大,多在1 500～3 500 m之间,局部断块可达2 500～3 500 m.DZ/T0216－2020《煤层储量估算规范》按埋藏深度将煤层分为深层、中层和浅层:埋藏深度大于等于1 000 m为深层,埋藏深度在500 m和1 000 m之间为中层,埋藏深度小于500 m为浅层.按此标准,冀中坳陷北部探区煤层整体属于深层煤层.

2.2 煤岩特征

2.2.1 有机质显微组分与煤质 冀中坳陷石炭系-二叠系煤岩有机质显微组分以镜质组为主,在不同地层和岩石类型中呈现显著差异.山西组煤岩显微组分中各组分平均含量为:镜质组46.70%、惰质组

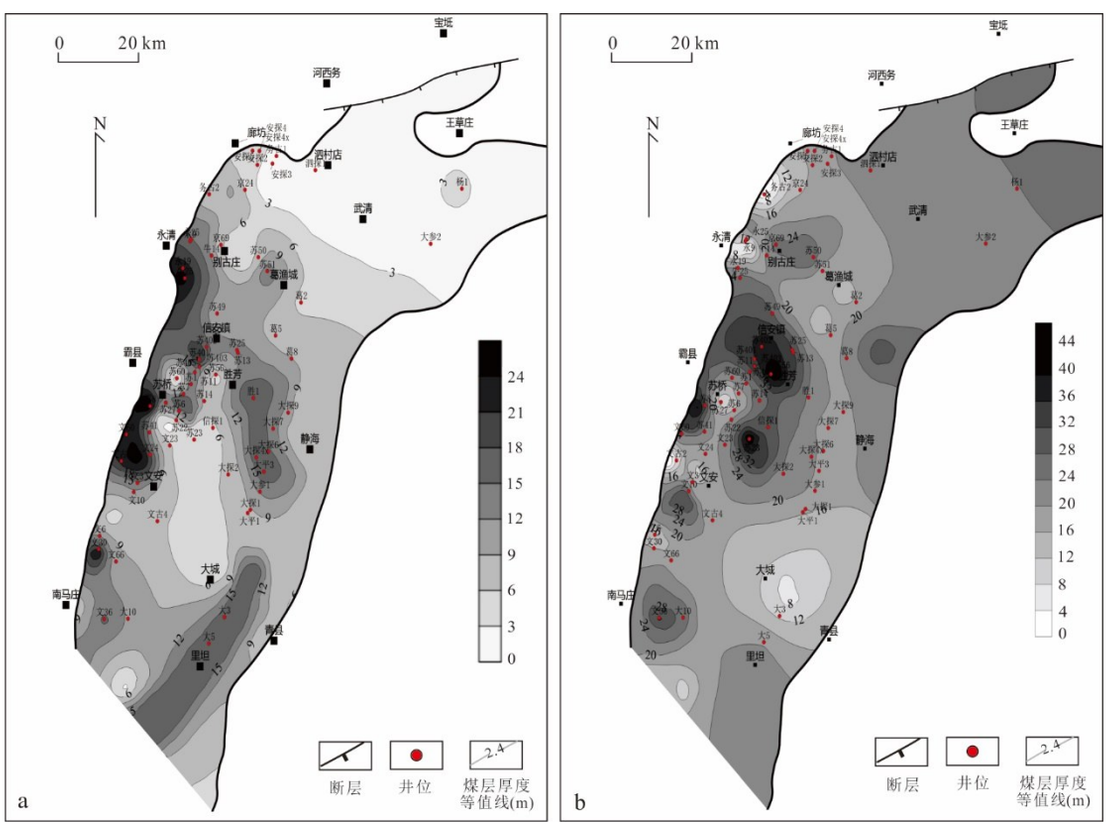


图3 冀中坳陷北部探区山西组(a)、太原组(b)煤层厚度

Fig.3 Coal seam thickness maps of the Shanxi Formation (a) and Taiyuan Formation (b) in the northern exploration area of the Jizhong Depression

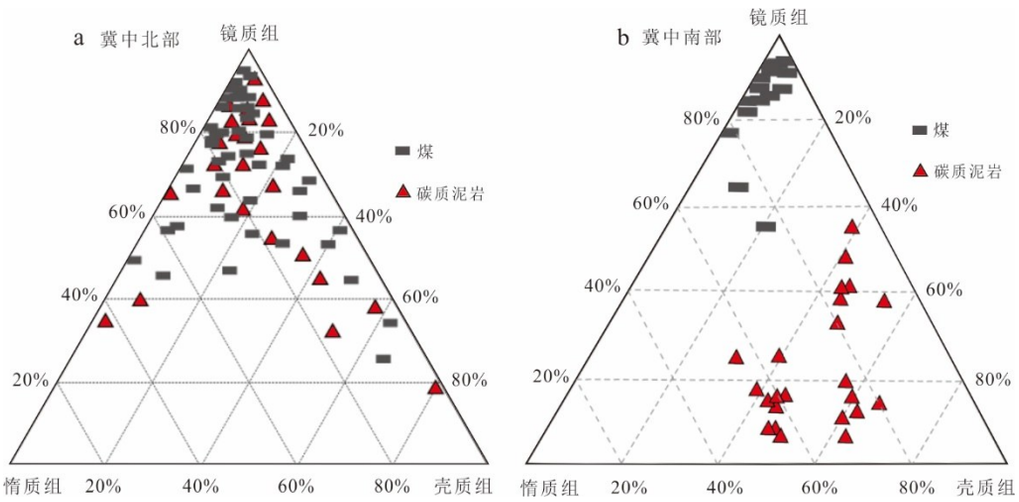


图 4　冀中坳陷北部(a)和南部(b)研究区煤岩有机质显微组分分布特征

Fig.4　Distribution characteristics of maceral composition in coal from the northern (a) and southern (b) study areas of the Jizhong Depression

表 1　冀中坳陷北部探区煤岩样品工业分析结果(%)

Table 1　Proximate analysis results (%) of coal samples from the northern exploration area of the Jizhong Depression

组	煤组	灰分	水分	挥发分	固定碳
山西组	一煤组	13.10～61.60(21.47)	0.60～1.47(1.16)	0.50～36.85(14.48)	37.63～78.13(62.89)
	二煤组	10.52～29.34(19.45)	0.88～1.50(1.24)	7.04～37.03(14.07)	41.31～81.13(65.23)
	三煤组	8.34～41.11(17.17)	0.94～1.41(1.27)	0.50～35.57(10.03)	42.58～83.67(71.52)
太原组	四煤组	6.12～49.22(14.82)	0.90～1.32(1.185)	6.61～44.84(15.38)	4.84～84.06(68.61)
	五煤组	12.69～47.42(22.66)	0.68～1.30(0.938)	7.40～34.33(23.89)	18.85～78.61(52.51)
	六煤组	9.44～33.19(22.36)	0.55～1.31(1.07)	6.86～30.59(15.84)	35.70～82.39(60.73)

注:括号内为平均值.

25.53%、壳质组 27.77%.镜质组占比相对较低,与三角洲平原周期性覆水沼泽成煤环境有关(汤达祯等,2000;程爱国等,2000).太原组煤岩显微组分平均含量变化为:镜质组显著升高至 59.01%,惰质组减少至 11.12%,壳质组和腐泥组约为 29.88%.这表明太原组成煤环境与潟湖持续覆水的还原性泥炭坪有关(程剑波等,2018).山西组较太原组煤岩惰质组占比偏高,暗示成煤期氧化事件频繁(Algeo and Li,2020).有机质显微组分在冀中坳陷分布略有差异,坳陷北部地区镜质组含量为 20.5%～88.0%,惰质组含量一般为 5.3%～38.2%,壳质组含量为 5.4%～67.2%;冀中坳陷南部地区煤岩的有机质显微组分含量高达 66.4%～87.3%,惰质组一般为 10.0%～44.9%,壳质组含量低,一般为 3.0%～17.6%(图 4).煤岩工业分析显示煤层水分 M_{ad} 为 0.5%～1.5%,均值为 1.19%.山西组和太原组煤层 A_d 产率相似,灰分 A_d 为 4.1%～40.0%,平均值为 10.55%(表 1).根据中国国家标准《煤炭质量分级》(GB/T 15224.1－2018)和国际通用标准,该煤岩属中灰分煤.挥发分 V_{daf} 产率为 0.5%～44.8%,平均值为 15.6%,多数煤岩属于中等挥发分煤.

2.2.2　煤变质程度　冀中坳陷北部地区的煤变质程度非均质性强,受构造深埋和火山烘烤作用双重影响.根据煤岩镜质组反射率随埋深的变化趋势,本研究划分出 3 种地温梯度类型(图 5a):高地温梯度型,镜质组反射率变化率大于 0.005/m,代表性的井有大城凸起大参 1 井、文安斜坡地区苏 401 井,镜质组反射率 R_o 通常大于 1.2%.这些井一般分布在火山岩区,或者在最大埋深时期受到火山烘烤作用影响.过渡地温梯度型,镜质组反射率变化率介于 0.005/m 与 0.000 4/m,代表性的井有大探 6 井、胜 1 井、苏 23 井等(图 5a).这些井一般分布在火山活动区外围,火山活动引起地温梯度增高,导致热成熟度不同程度升高.低地温梯度型,镜质组反射率变化率小于 0.000 4/m,代表性的井有葛 2 井、苏 50 井,镜质组反射率 R_o 集中在 0.65%～0.90%.低地温

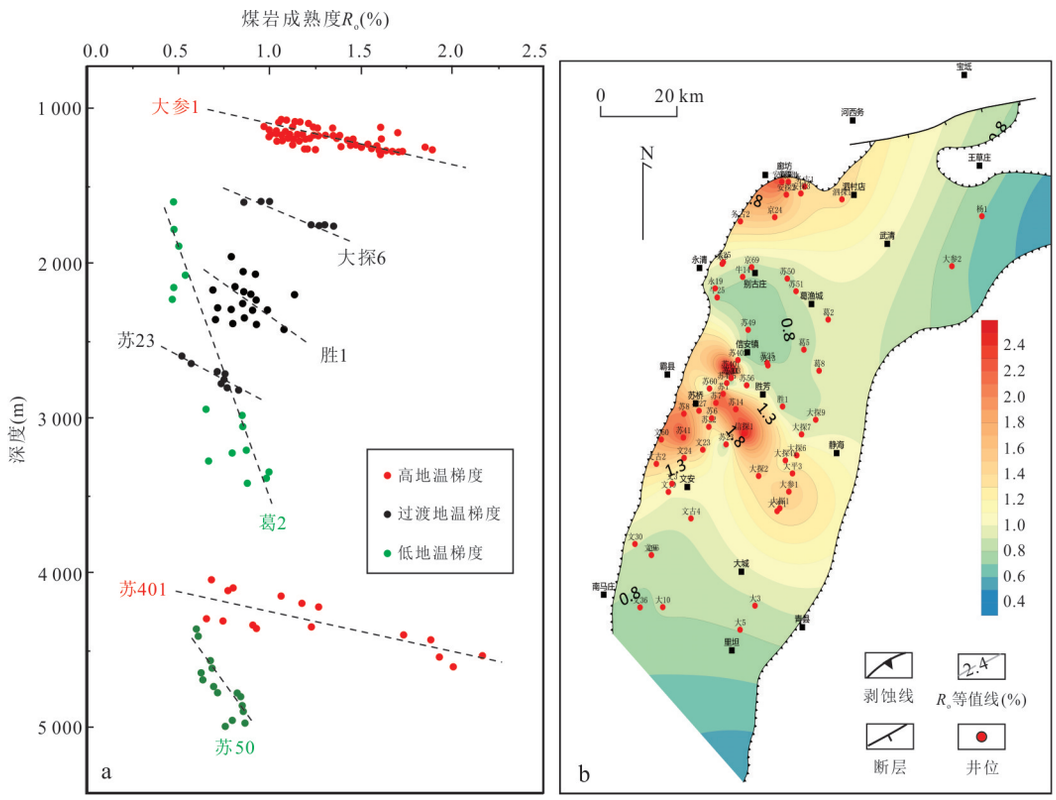


图 5 冀中坳陷北部探区煤岩热成熟度典型井特征与代表性煤组分布

Fig.5 Characteristics of typical wells for coal thermal maturity and distribution of representative coal seams in the northern exploration area of the Jizhong Depression

梯度型煤岩远离火山作用区，其变质程度主要与构造埋深有关(李熹微等，2025)．

在文安斜坡和大城凸起地区，煤岩变质熟度主要受控于火山侵入体的热效应，煤岩变质程度平面上呈现出区带分布(图 5b)．镜质组反射率R_o值在信安镇南至文安，东至静海一带，沿着 SE-NW 向存在串珠状高值区，镜质组反射率高达 4.6%．钻井取心显示煤岩常常有火山岩脉夹层侵入．文安斜坡的苏 8 井 4 750 m 火山岩层对上下 15 m 范围内煤岩有重要烘烤作用，导致R_o值从 0.6%～0.9% 迅速增加至＞2%(李熹微等，2025)．未受火山扰动的区域，如信安镇以北、别古庄和葛渔城地区，尽管埋深在 3 000～5 000 m 范围，镜质组反射率R_o通常＜1%(图 5a，5b)．火山活动引发的异常热流显著改变了区域煤化进程，其热变质程度远超过正常埋藏条件下的演化水平(张旗等，2016)．冀中坳陷常规深埋作用热成熟度普遍偏低(R_o=0.65%～0.9%)，揭示出火山活动是形成高煤阶的关键地质作用．

2.2.3 煤层与煤体结构特征 煤层结构是指煤层内部由不同岩性和厚度的分层所组成的层序特征，表现为煤层中是否含有夹矸层及其分布规律(陈健明等，2009)．针对冀中坳陷夹矸层的发育程度和空间展布特征，本研究将煤层结构分为简单、较简单、较复杂和复杂 4 类．简单煤层结构，指煤层厚度大，横向分布均一，煤层中不含夹矸层．较简单煤层结构是指含 1～2 层薄且稳定的夹矸，夹矸厚度一般小于煤层总厚度的 10%，且夹矸呈连续或较规则层状分布．简单和较简单煤层分层清晰、煤质均一，常分布于稳定沉积环境中沉积的厚煤层中．较复杂煤层结构是指煤层内含 3～4 层夹矸，夹矸单层厚度大，一般为煤层总厚度的 10%～30%，且夹矸侧向连续性差、分布不稳定．复杂煤层结构表现为煤层内含多层(≥4 层)夹矸，夹矸单层厚度大，可超过煤层总厚度的 30%，形态多呈透镜状、团块状断续展布，常见煤层分叉合并现象．钻、测井资料显示，冀中坳陷北部探区煤层结构的平面分布具有显著的空间分异性．区域上，煤层结构整体呈现“北简南杂、局部突变”的特征(图 6)．别古庄地区以简单结构煤层为主，煤层分层清晰，夹矸层少且厚度稳定；信安镇-胜芳一带煤层结构较简单，局部发育 1～2 层薄夹矸，连续性较好．苏桥地区虽煤层厚度较大，但结构复杂，夹矸层数多(≥3 层)、厚度变化剧烈，常呈透

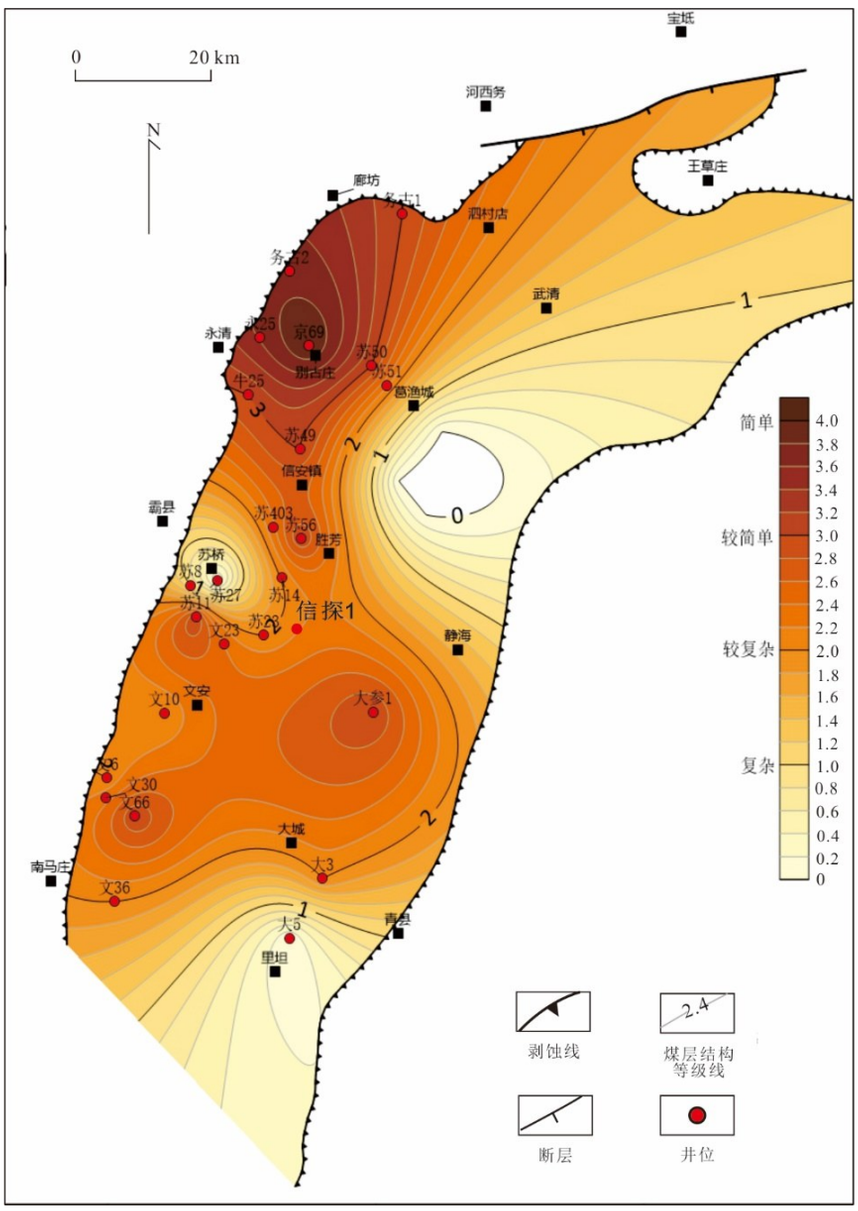


图 6　冀中坳陷代表性煤组煤层结构平面分布

Fig.6　Planar distribution of coal seam structures in representative coal groups of the Jizhong Depression

镜状或断续分布.大城凸起煤层结构非均质性强,仅在大参1井周边小范围分布较简单煤层结构,其余区域夹矸层发育程度较高.简单结构煤层顶底板多为致密泥岩或砂质泥岩,封闭性较好,利于煤层气的富集和保存;而复杂结构煤层夹矸层多,且常呈透镜状或断续分布,这会破坏储层的连续性和顶底板的完整性,往往形成局部阻水层或渗流通道,影响储层内气体和水的运移.煤层气水力压裂过程中,简单结构煤层能够形成稳定的裂缝延伸路径;复杂结构煤层容易导致压裂裂缝分叉甚至终止,增加井壁坍塌及顶板冒落等工程风险.

煤体结构是控制煤层气赋存与产出的重要地质因素(陈峥嵘等,2025).已有的取心显示冀中坳陷内远离断层带的煤层通常保存完整,以原生结构煤为主,层理结构清晰.在断裂带附近或受火山岩侵入影响的层位,普遍发育碎裂煤或糜棱煤,原生结构遭受不同程度破坏.此类煤受构造应力或热力作用影响,裂隙密集发育,呈碎裂状或碎粒状,煤单层厚度通常为数厘米至几十厘米.信探1井碎裂煤因裂隙网络贯通导致气体逸散,含气量普遍低于原生结构煤(图7).因此,构造扰动不仅改变煤体物理结构,影响裂隙系统发育,还直接影响煤层渗透率和煤层含气量.

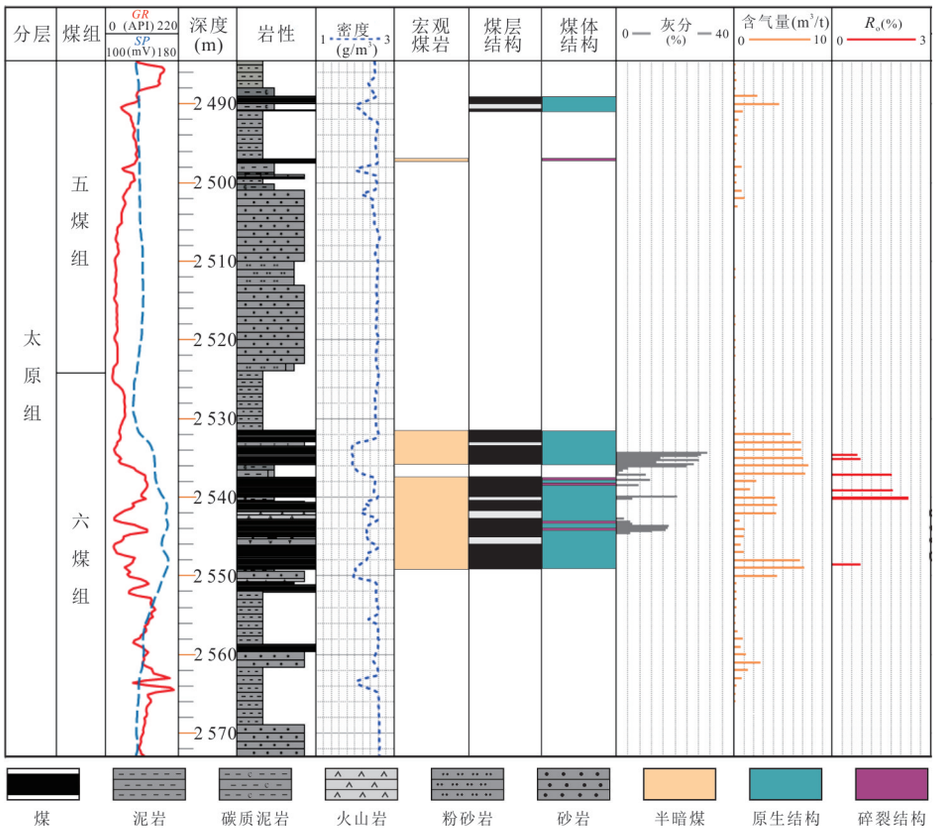


图 7 冀中坳陷信探 1 井煤体结构垂向分布

Fig.7 Vertical distribution of coal body structures in Well Xintan-1, Jizhong Depression

2.3 含气性特征

冀中坳陷北部山西组与太原组煤岩含气性呈现明显的分带性特征.山西组一煤组在文安-大城以南地区出现含气量高值区、中心含气量可达 15 m^3/t以上,二、三煤组在葛渔城以东及苏 23、文 23 井位附近及牛 25 井位附近出现煤层含气量高值区,中心含气量可达 12 m^3/t以上.太原组四、五、六煤组有文安-大城以南地区、文古 2 井位、苏 14 井位附近煤层含气量高值区,高值区分布范围整体较大,含气量也较高,中心含气量可达 14 m^3/t以上.通过保压取心解吸数据、试井测试等相关试验结果,冀中坳陷北部 9 口井吸附含气饱和度为 51.4%～115.9%,含气饱和度为:三煤组 51.4%～71.4%,平均 57.5%;四煤组 52.9%～115.5%,平均 80.1%;五煤组 71.3%～105.7%,平均 88.5%;六煤组 56.7%～115.9%,平均为 90%.在 1 000～2 000 m 范围内随埋深增加,含气量从 6.7 cm^3/g升至 15 cm^3/g,吸附含气饱和度从 51.4%升至 115.9%,六煤组 1 823 m 吸附含气饱和度达 115%,游离气占比高达 15.6%.

本研究表明煤岩含气量与煤厚、埋深及储层压力系数关系密切,含气量的分布是煤厚、埋深、压力条件及地质保存状态综合作用的结果.煤厚与含气量的关系统计表明,高含气量(>15 m^3/t)主要存在于厚煤层中,煤厚增加通常有利于煤层气富集(图 8a).埋深与含气量的关系表现为含气量随埋深增加逐渐增加(图 8b).储层压力系数是表征含气性的重要参数,常压储层的压力系数一般为 0.90～1.05,代表正常地层流体压力状态;弱超压储层则是孔隙压力略高于静水压力,压力系数约为 1.05～1.20,常见于许多沉积盆地深部层系;压力系数大于 1.20 为超压地层,反映压实不全、流体封闭或烃类生成等作用的叠加效果(Swarbrick and Osborne, 1998).本研究显示高含气量多集中于储层压力系数>1.18 的区域(图 8c),表明弱超压-超压环境是深部煤层气勘探有利区带.研究区部分厚煤层和局部高储层压力系数的煤层含气量仅维持一般水平(<15 m^3/t),与煤层顶底板封闭性差导致气体逸散有关.

2.4 煤岩储层孔隙特征

冀中坳陷深部煤层具有“微孔、多孔、低渗”特征.实验测试结果显示,山西组煤岩总孔隙率为 3.8%～8.8%,平均为 6.3%;太原组煤层总孔隙率为 3.4%～8.6%,平均为 5.2%.扫描电镜分析结果表

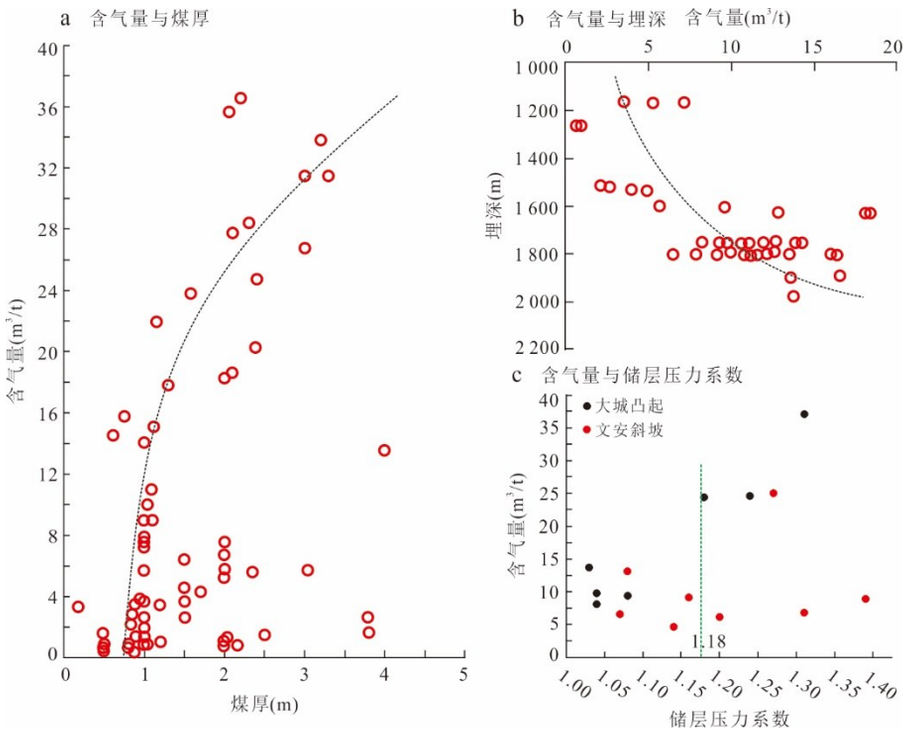


图 8　冀中探区煤岩含气量与煤层厚度关系(a);含气量与埋藏深度关系(b);含气量与储层压力系数关系(c)

Fig.8　Relationship between gas content and coal seam thickness in the Jizhong exploration area (a); relationship between gas content and burial depth (b); relationship between gas content and reservoir pressure coefficient (c)

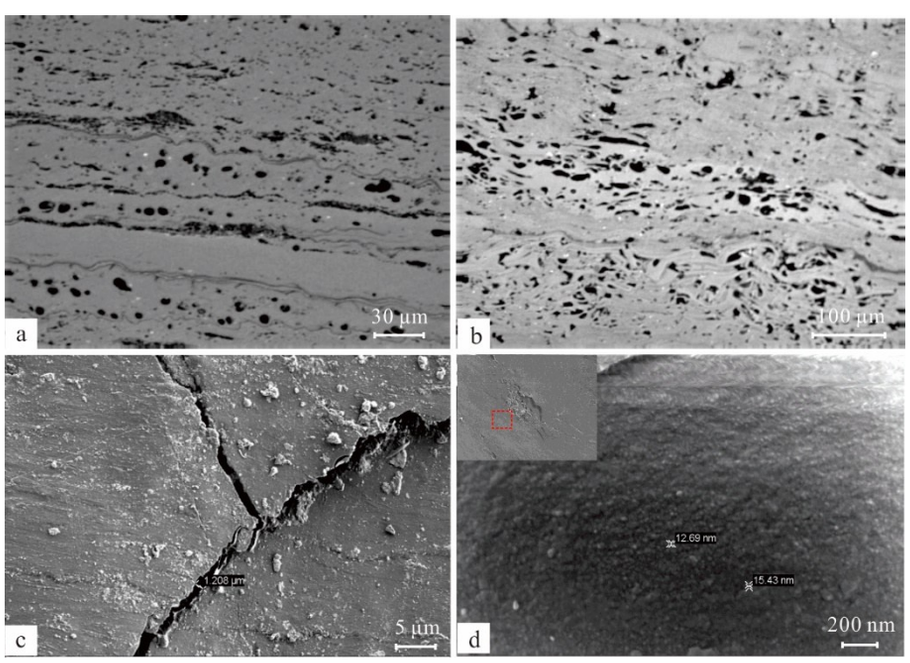


图 9　冀中坳陷信探 1 井代表性煤岩孔隙特征

Fig.9　Pore characteristics of representative coal samples from Well Xintan-1 in the Jizhong Depression

a. 腐殖质生气过程中发育气孔,并在边缘发育裂隙形成排烃通道;b. 丝质体胞腔孔;c. 静压裂隙;d. 均质镜质体发育纳米级小孔,图中标注出小孔的孔径

明,冀中北部煤岩储层的孔隙类型多样,以气孔、铸模孔、组织孔为主,存在少量碎粒孔、晶间孔等,面孔率为 0.5%～4.5%. 信探 1 井平均总面孔率为 3.32%,其中碎粒孔占 10%、气孔占 16%、屑间孔占

40%、铸模和晶间孔占 34%.冀中坳陷煤层气孔观测结果显示,气孔主要发育在镜质组和壳质组中,孔径在 10~40 nm;裂隙多发育在镜质组中,主要分布在有机质边缘或呈 Y 型分布在有机质内部(图 9a).镜质组丰度和成熟度直接影响甲烷气的生成量,且在成煤过程中易形成大量纳米级孔隙,这些孔隙是深部煤层气赋存的主要场所.在成岩和热演化过程中,镜质组因收缩变形产生裂缝,这些裂缝是煤层气微距迁移的主要通道(Crosdale *et al.*, 1998).在低阶煤中观察到中、大孔,特别是在结构镜质体和丝质体中(图 9b),一般为原生孔隙,连通性差.次生孔以小孔为主,常伴随生气过程.煤岩中多见静压裂隙(图 9c),静压裂隙是煤层在地质埋藏和静压力长期作用下顺层发育的原生构造缝,一般呈闭合状态,偶尔被矿物质充填.高分辨率扫描电子显微镜(SEM)观察到均质镜质体发育纳米级小孔(图 9d),孔径多分布于 1~20 nm 范围内,呈簇状或孤立状发育于有机质基质中.纳米级孔隙是煤吸附气体的主要场所,孔隙大小和分布对吸附量和吸附速率有重要影响(任鹏飞等,2025).

3 深部煤层气富集主控因素与成藏模式

3.1 富集主控因素

深部煤层气富集成藏是“生-储-保”协同作用的结果:煤层在高热演化阶段生气强度大,可提供充足气源;气体以吸附态和游离态赋存于纳米孔隙中,形成超压储集系统;良好的封存条件可以有效阻止气体逸散,实现高压、高饱和含气系统的保存与富集(桑树勋等,2022,2024;李勇等,2023;李建忠等,2025;周立宏等,2025a).冀中坳陷煤层气以中低煤阶为主,二次生烃对含气量影响较大,煤岩灰分中等,生气强度、储层特征和保存条件对研究区深部煤层富集成藏规律影响较大.

3.1.1 生气强度 煤岩成熟度是影响生气强度的主要指标,镜质组反射率高意味着生气量大,有利于煤层气富集成藏(Zhang *et al.*, 2024).单井含气量与镜质组反射率的关系证实,随 R_o 值增加含气量呈逐渐增加的趋势(郭广山等,2024;李志军等,2024).根据煤岩变质程度本研究将有机质热演化过程划分为 3 个阶段(图 10).I 低成熟阶段,埋深在 3 000~3 500 m,地温为 70~90 ℃,R_o 值为 0.5%~0.70%,以长焰煤为主.沥青“A”/TOC 为 1.5%~3%,(S_1+S_2)/TOC 在 0.3%~0.8%,S_1/TOC< 10 mg/g,氢指数~250 mg/g,干酪根 H/C 原子比约为 0.85,T_{max} 为 430~435 ℃.本阶段主要生物降解作用产物为生物甲烷(CH_4)和二氧化碳(CO_2).烃气产量较低,一般不超过 50 m^3/t.处于低级成熟阶段的煤岩主要分布在武清凹陷和杨村斜坡一带,这些地区煤岩热成熟度主要受多期埋藏作用影响,在地质历史时期,该区域较长时间处于构造抬升阶段.II 成

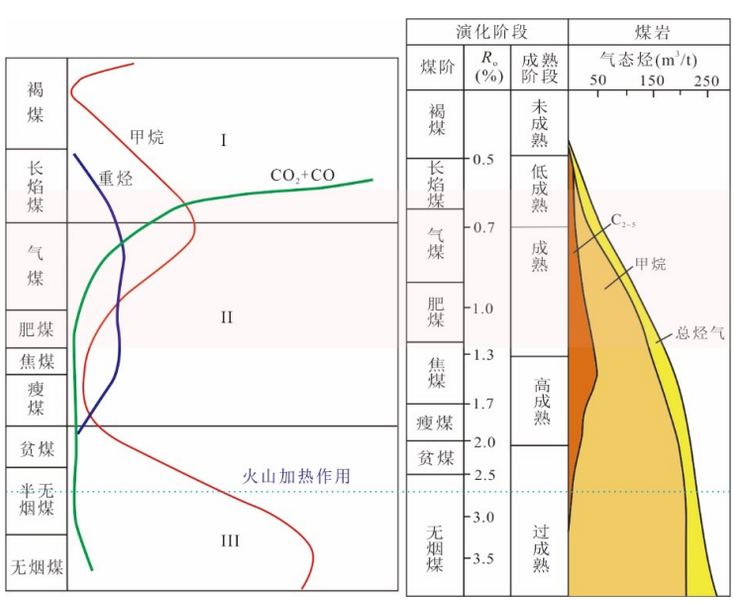


图 10 冀中坳陷煤岩变质程度、成气阶段与产气强度关系

Fig.10 Relationship between coal metamorphism degree, gas generation stage, and gas production intensity in the Jizhong Depression

熟阶段,埋深在3 500～4 800 m,地温为90～120 ℃,R_o值为0.7%～1.3%,以气煤-肥煤阶段为主,(S_1+S_2)/TOC在0.8%～2.8%,沥青"A"/TOC从3%增加到8%,S_1/TOC由6 mg/g增加到35 mg/g,氢指数<100 mg/g,干酪根H/C原子比<0.60,T_{max}从435 ℃升至473 ℃.本阶段以热降解作用为特征,煤岩大量生烃和排烃,湿气向干气转变.研究区文安斜坡和大城凸起受古近纪火山岩侵入体影响,整体大地热流值高,煤岩热变质作用高于正常埋深值,处于成熟阶段.此成熟阶段的煤岩含气饱和度高(60%～90%),以吸附气为主.III高成熟阶段,埋深在4 800～6 200 m,温度120～170 ℃,R_o值>1.3%,T_{max}>473 ℃,以焦煤和瘦煤为主.这个阶段(S_1+S_2)/TOC<0.5%,S_1/TOC<5 mg/g,烃类大量裂解生气,气体成分以甲烷为主.高成熟阶段煤岩以"高含气、高饱和度"为特征,游离气占比显著增加.文安斜坡地区火成岩发育区(苏4、苏1、苏8、文23等)通常达到高成熟阶段.

冀中坳陷石炭系-二叠系在三叠纪末期经历重要构造隆升,地层遭受不同程度剥蚀,早期埋藏煤岩成熟度低、尚未达到生气高峰,形成的甲烷气受后期构造扰动难以保存(朱炎铭等,2004;蔡超等,2008).古近纪,冀中地区开始强烈下陷,地温和有机质成熟度迅速增加,开始发生二次生烃作用,为古生界煤层气成藏创造了条件.本研究证实,二次生烃门限的埋深为3 000 m,二次生烃面积约为1 780 km^2.再次埋藏煤岩的R_o值一般在0.6%～0.9%,除形成煤层吸附气藏之外,难以形成具工业价值的深部煤层气藏.古近纪火成岩的侵入可以有效提升地温梯度,文安斜坡流体包裹体分析证实火成岩侵入煤岩可促进煤层进入二次生烃期.煤层地温场和岩浆热场叠加控制,导致石炭系-二叠系煤岩的总生气量约为8.51×10^{12} m^3,在原地温场基础上增加了60%(孟元林等,2003).

3.1.2　储集能力　孔隙是储存气体的主要空间,裂隙是气体运移的通道(降文萍等, 2016;王红岩等, 2024;Ren *et al.*, 2026).冀中坳陷整体上中-低煤阶煤岩孔隙度值高于中-高煤阶煤岩,煤储层具有由孔隙和裂隙组成的双重孔隙结构.煤岩以半亮煤为主,具备面割理、端割理、基质孔等储集空间.在深部高温高应力条件下,煤岩会发生塑性变形而产生新的裂隙,具有大面积含气的潜力.半亮煤微孔比表面积大,可以为甲烷提供更多的吸附点位,而高比例的中、大孔有助于气体迁移流动.本研究表明,随着煤岩孔隙度增加,含气量逐渐增加(图11a).随着灰分体积分数增加,含气量逐渐降低(图11b).煤岩中的灰分主要由黏土矿物组成,矿物质充填孔隙,导致孔容减少,煤岩吸附能力降低,从而影响储气能力和含气量(黄兴龙,2018;郭广山等,2024).

与浅部煤层相比,深部煤层常常呈现出特殊的煤层气吸附特性和赋存状态(Zhu *et al.*, 2024).冀中坳陷模拟数据表明,在约1 100 m深度,吸附气含量出现转折,在此埋深以浅吸附气量随深度增加而迅速增大,转折点最大含气量超过14 m^3/t.在浅层以吸附气为主,游离气含量较少.随着埋深的增加,地层温度升高,孔隙结构发生变化,深部煤层中游离气的比例逐渐增大,吸附气比例逐渐降低.

3.1.3　保存条件　煤层气大面积连片成藏受控于盖层封闭能力,而盖层的封闭能力取决于岩性的孔渗性、流体突破压力和厚度(Zhang *et al.*, 2019).本

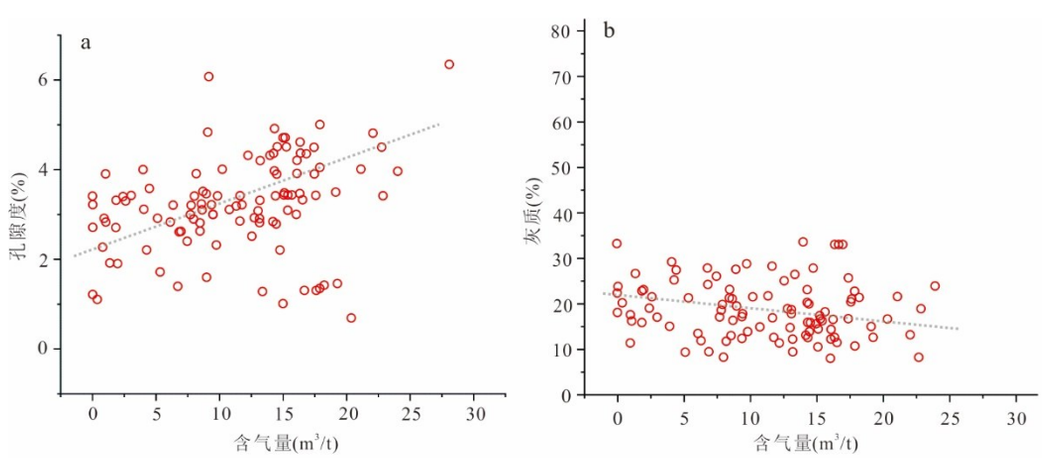


图11　冀中坳陷代表性煤岩孔隙度、灰分含量与含气量的关系

Fig.11　Relationship between porosity, ash content, and gas content of representative coal samples in the Jizhong Depression

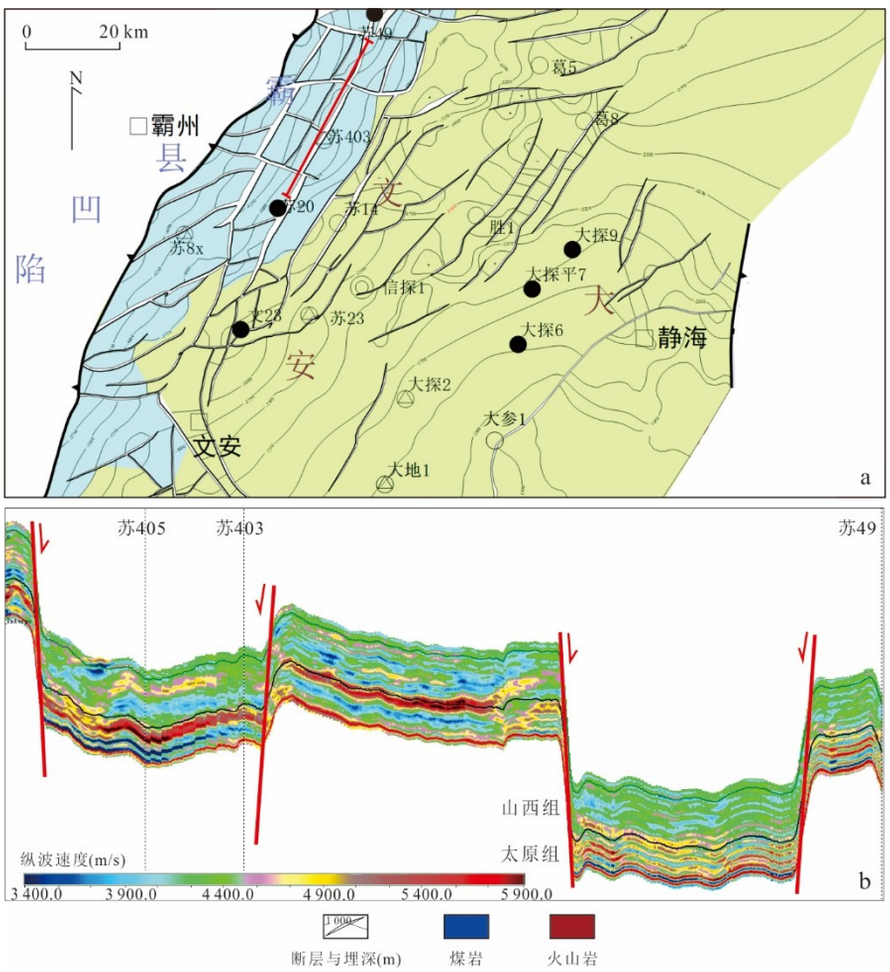


图 12 文安斜坡地区断裂构造与地震反演特征

Fig.12 Fault structures and seismic inversion characteristics in the Wen'an Slope area

a. 文安斜坡区代表地区石炭系-二叠系断层发育特征；b. 煤岩与火山岩展布地震反演. 断裂切割煤层，火山岩在断裂两侧分布. 苏 405 附近的微幅背形构造是气测高值区

研究将太原组和山西组盖层岩性组合类型划分为煤与泥岩、碳质泥岩、砂岩和灰岩 4 种岩石类型. 煤与碳质泥岩组合中，煤岩孔隙度＜9%，渗透率在 0.000 5～0.003 5 mD 之间(Zhang *et al.*, 2014)，而碳质泥岩渗透率为 0.000 6 mD 左右，突破压力为 15～29 MPa，对煤层封堵性好，有利于煤层气的富集和储存. 山西组一、二煤组煤岩欠发育，以煤-砂组合发育为主，煤-泥组合次之. 三煤组主要发育煤-泥组合，分布较稳定，局部发育煤-灰、煤-砂组合. 太原组四煤、六煤组主要发育煤-泥组合，分布较稳定，局部发育煤-灰、煤-砂组合. 五煤组整体煤岩欠发育，主要发育煤-砂组合，煤-泥次之. 沉积相分析表明，太原组煤-泥储盖组合主要分布在潟湖环境，泥岩厚度为 3～12 m；山西组煤-泥储盖组合主要分布在河流间湾环境，泥岩厚度一般为 2～8 m.

冀中坳陷经历多期构造活动，断层对煤层气保存影响显著. 断层控气作用主要表现在断层性质、断裂开启程度以及对煤岩的破坏程度(赵贤正等，2010). 文安斜坡带发育多条 NE 向断裂，沿 NE 向断裂常发育小型裂隙，同时文安斜坡发育近 EW 向的小型断裂(图 12a)，将文安斜坡划分为棋盘格状断块. 通常断层附近煤岩相对破碎，对煤岩含气性起到一定破坏作用. 苏 405 的钻探实践证实，远离断层的微幅背形构造常常是煤层气富集中心(图 12b). 大城凸起煤岩地层相对比较平缓，地层倾角小(＜9°)，煤层结构相对稳定，厚度适中，有利于煤层气富集.

矿化度是评价煤层气保存条件的重要指标. 矿化度高意味着地下水循环不畅，封闭条件较好，有利于煤层气的保存(李建新等，2022). 断层作为导水通道或阻水屏障是影响地下水流动和矿化度的重要因素(Bense *et al.*, 2013). 冀中坳陷石炭系-二叠系矿化度可划分为三个等级(图 13)：矿化度＜5 g/L

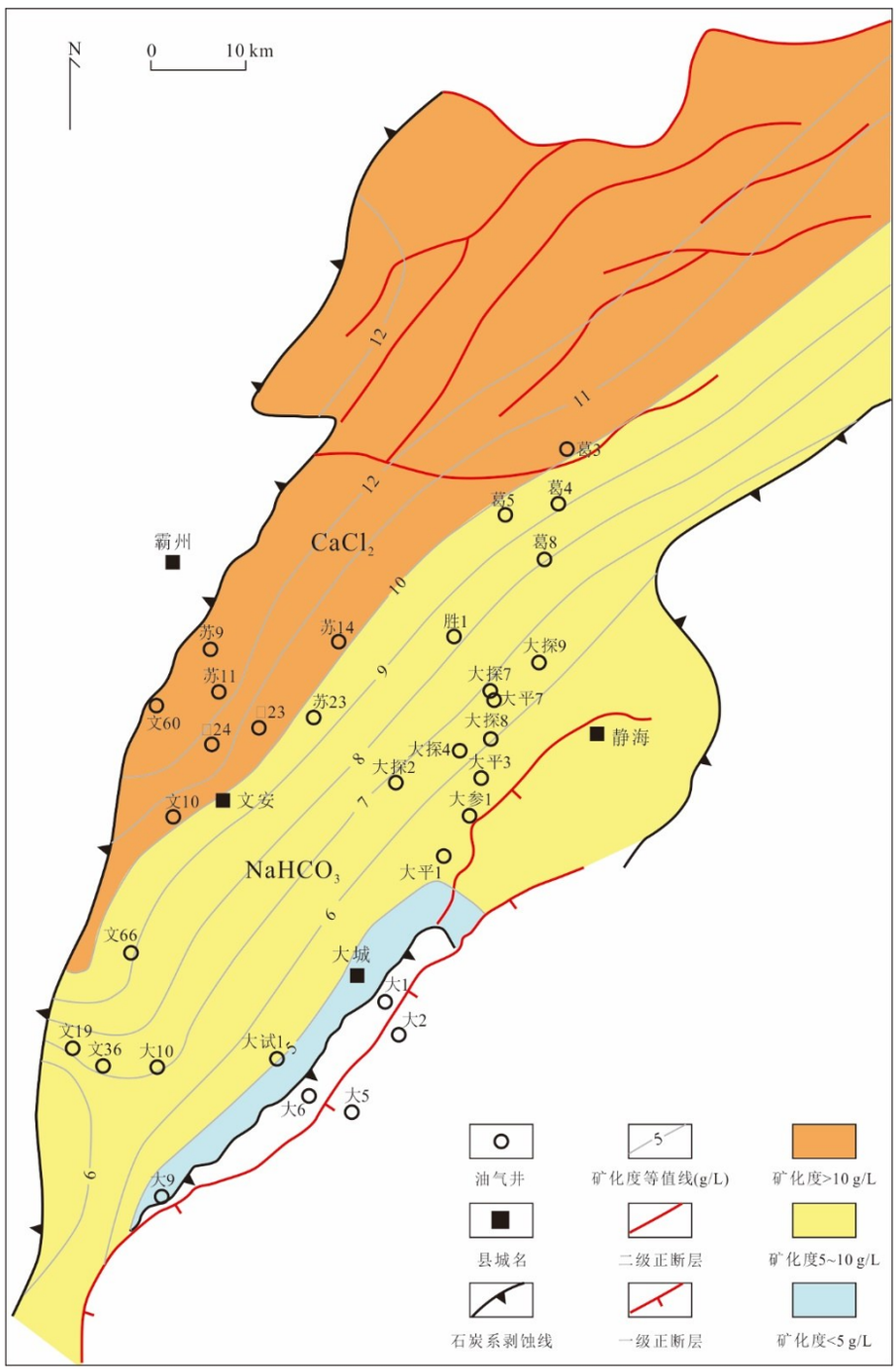


图 13　冀中坳陷北部石炭二叠系水文地质条件

Fig.13　Hydrogeological conditions of the Carboniferous-Permian system in the northern Jizhong Depression

的低盐区主要分布在东南部的大城凸起一带，沿区域大断层带展布；矿化度 5～10 g/L 的中盐区广泛分布于构造相对稳定的斜坡带，反映中等封闭性水文环境；矿化度＞10 g/L 的高盐区则集中分布于武清凹陷及文安斜坡内带，主要为次级正断层控制的局部凹陷区，表明水岩相互作用弱，地层封闭性强，有利于煤层气保存．高气测值煤层气井多位于高盐区与中盐区过渡带，指示水文封闭条件与煤层气富集密切相关．

3.2　富集成藏模式

冀中坳陷以中、低阶煤为主，大孔相对发育，孔隙度高，游离气占比可达 1/3，表现为吸附气为主，游离气共存的赋存特征．随着盆地煤层埋深增加，煤储层温度和压力增加，游离气含量不断升高，形

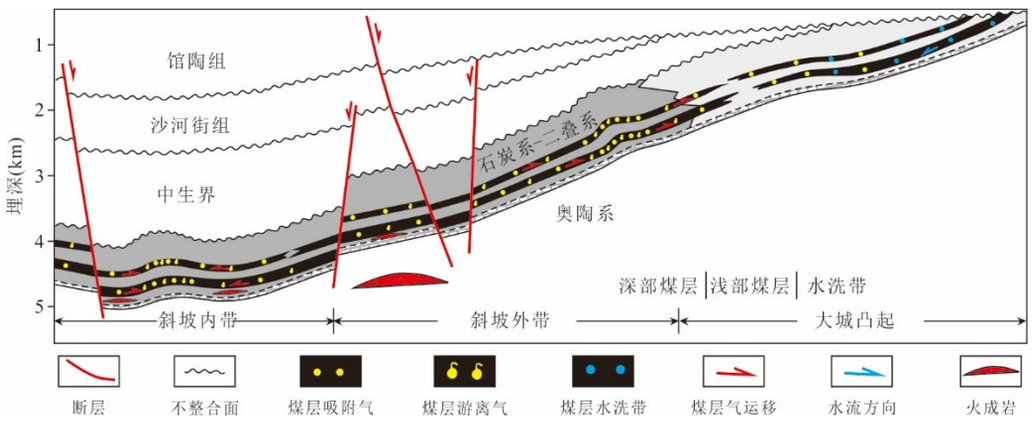


图 14 冀中坳陷煤层气成藏模式

Fig.14 Model of coalbed methane accumulation in the Jizhong Depression

浅部区在抬升后期地表水作用下形成生物成因气与热成因气混合;深部斜坡带在埋深和火山烘烤双重作用下富集热成因气.断裂作用利于煤岩具有高渗透率,导致煤层气在局部构造高位富集成藏

成“超饱和”煤层气藏.深部煤层气有利层位通常是割理裂隙发育的原生结构煤层.断裂作用导致斜坡区裂隙发育,特别是构造抬升后次生割理发育,往往呈现出高渗透率效应,在含气量和渗透率的叠合作用下煤层气富集成藏(桑树勋等,2022;周德华等,2022;惠鹏等,2023, 任少魁等,2023;Li *et al.*, 2026).本研究将冀中勘探实践与煤层气富集理论结合,形成盆地深部斜坡带煤层热成因气富集模式(图 14):(1)浅部水洗带有充足的地表水补给,在前期热成因气残余基础上,外来水源在甲烷菌作用下导致生物气生成,通过地表承压水封存富集于斜坡的浅部位置.大城凸起大探 1 井 $\delta^{13}C$ 介于 −64.1‰～−52.6‰,显示晚期生物气特征(陈英等,1994),表明热成因气和晚期生物气在斜坡区弱径流承压水封闭条件下富集成藏.(2)在浅部缓坡带,随埋深逐渐增加,煤层含气量逐渐增高,煤层顶底板岩性圈闭是该类气藏保存的主要机制.局部构造高位受伸展作用影响,煤层渗透性较高,有利于煤层气富集.浅部煤层区虽然经历过后期的构造隆升,但封存条件较好的位置仍残留早期热成因气,以大城凸起的大平 7 为代表.(3)在盆地深部洼陷区域,复向斜构造是煤层气富集的有利部位,特别是复向斜的微幅背形区往往呈现高含气性特征,向斜构造两端地层封闭能力好,在局部高位下伏气体向上聚集形成高压封闭,优良的顶底板保存条件导致储层压力系数高,压力系数一般高于 1.2,以文安斜坡的苏 403 井为代表.

4 有利区综合评价

研究区深部煤层气目前处于勘探开发初级阶段,通过已有的含气量静态数据和产能动态数据,结合文安斜坡和大城凸起的勘探实践,本文筛选出 3 类 13 个影响因素作为评价指标(表 2).评价指标体系设定主要依据冀中坳陷大城凸起和文安斜坡地区的实钻数据,通过分析已获高气测值和高含气量区块的评价参数特征,归纳出关键参数体系及其分级阈值.其中,资源潜力包括煤层厚度、含气量、生气强度和含气面积;储层条件包括变质程度、煤体结构、埋深和压力系数.保存条件包括构造变形、盖层厚度和水文地质条件.将各个评价参数叠合以确定出 3 类煤层气富集有利区评价标准.

文安斜坡中、内带和大城凸起东北部为Ⅰ类区,具备的有利条件为:(1)煤岩发育,太原组 10 号煤厚度约 6～8 m,面积＞100 km^2,煤层主要沉积在潟湖环境,多发育良好的煤-碳质泥岩储盖组合;(2)热演化程度高,区带内煤岩的 R_o 为 1.0%～1.4%,火山岩侵入区 R_o 可高达 4.2%,处于成熟和过成熟阶段.煤层产气强度大,太原组的生气强度＞110 m^3/t,是深部煤层气勘探的有利区.(3)煤层吸附能力强.兰氏体积代表煤岩最大吸附能力(Fianu *et al.*, 2019),煤岩等温吸附试验显示,文安地区兰氏体积为 6.98～15.10 m^3/t,平均为 11.39 m^3/t;大城地区兰氏体积为 4.11～15.5 m^3/t,平均为 12.42 m^3/t.值得注意的是,文安斜坡多期构造活动会导致煤层气向复向斜核部的凸起区聚集,构造相对高处常常是有利位置.在鼻状构造、次级背斜等单斜上倾方向高部

表 2　冀中坳陷地区深部煤层气评价指标体系

Table 2　Evaluation index system for deep coalbed methane in the Jizhong Depression area

评价要素		不同深度煤层气对比		I类	II类	III类
		大城凸起	文安斜坡			
资源潜力	煤层厚度(m)	0.18～8.66	0.18～5.50	＞5	4～5	＜4
	含气量(m^3/t)	6～35	5～27	＞12	4～6	＜8
	生气强度(m^3/t)	～90～100	＞110	＞110	80～100	＜80
	含气面积(km^2)	～200	＞250	＞100	50～100	＜50
储层因素	煤体结构	原生-碎裂	原生-碎裂	原生结构	原生-碎裂	碎粒结构
	热演化程度 R_o(%)	≈0.95	≈1.15	＞1.0	0.7～1.0	＜0.7
	埋深(m)	1 300～1 800	＞2 600	1 800～3 500	3 500～4 800	4 800
	压力系数	1.0～1.25	1.0～1.3	＞1.18	1.0～1.18	＜1.0
	含气饱和度(%)	51～115	80～113	＞80	50～80	＜50
保存条件	后期构造活动	较强	较强	弱	较强	强
	顶底板厚度(m)	＞4	3～4	＞6	3～6	＜3
	水文矿化度(g/L)	5～8	8～10	＞8	5～8	＜5

位,整体封盖性能好,局部构造高点成为煤层气优先勘探区域.II区域主要分布在大城凸起带地区,浅部煤层气呈吸附状态赋存在煤岩中,游离气含量较低,埋深通常在1 300～1 800 m(江同文等,2023),大城凸起地区位于地表径流区,整体保存条件一般,局部存在煤层厚度大、储盖组合条件良好的区域,构造稳定的部位同样是有利勘探区.

5　结论

本研究以冀中坳陷石炭系-二叠系深部煤层气为研究对象,通过分析地质特征、富集主控因素构建深部煤层气成藏模式,取得以下主要认识:

冀中坳陷残留石炭系-二叠系太原组与山西组煤层总厚度分别为2～46 m和3～35 m,埋深介于1 000～5 600 m.煤岩以中低阶为主(R_o=0.65%～4.60%),镜质组占比46.7%～97.4%,灰分平均为10.55%,储层物性表现为"微孔、多孔、低渗"特征,孔隙率介于3.4%～8.8%.含气量呈现出显著分带性,高值区(＞15 m^3/t)主要分布于文安斜坡及大城凸起北部,游离气占比可达15.6%.

富集成藏主控因素主要为生气能力、储集能力和保存条件.火山烘烤导致局部 R_o 值跃升至1.5%～4.6%,显著高于正常埋藏演化水平,是深层高含气量的核心要素;煤岩中镜质组富集有利于裂隙发育,进而提升煤储层吸附与渗流能力,影响煤层气微距运移.煤-碳质泥岩组合及矿化度＞10 g/L的水文封闭条件是气体保存的关键,局部复向斜构造形成压力封闭,有利于煤层气保存.

本研究提出三类成藏模式:(1)浅部生物-热成因混合型,生物气补充增强资源潜力;(2)斜坡带煤-碳质泥岩储盖组合型,以吸附气为主,含少量游离气;(3)洼陷复向斜构造高压富集型,以游离气为主.基于资源潜力、储层条件及保存参数的综合评价,文安斜坡中-内带及大城凸起东北部被划为I类有利区,煤层厚度6～8 m、生气强度＞110 m^3/t、兰氏体积＞13 m^3/t,具备优先勘探价值;大城凸起埋深＜1 800 m的区域为II类区,需重点关注构造保存稳定位置.

References

Algeo, T. J., Li, C., 2020. Redox Classification and Calibration of Redox Thresholds in Sedimentary Systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 287: 8－26. https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.01.055

Bense, V. F., Gleeson, T., Loveless, S. E., et al., 2013. Fault Zone Hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, 127: 171－192. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008

Cai, C., Zhu, Y. M., Qin, Y., et al., 2008. Hydrocarbon Generation and Evolution of Carbono-Permian Coal Series from the Well Su-50 in the Wuqing Sag, Central Hebei Depression. *Chinese Journal of Geology*, 43(1): 154－161 (in Chinese with English abstract).

Chen, J. M., Zheng, R., Yi, H. X., et al., 2009. Causes and Characteristics of Coal Seam Structural Gangue in the Northern Part of Lianshao Coalfield. *West-China Exploration Engineering*, 21(1): 125－127 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y., Dai, J. X., Qi, H. F., 1994. On Some Theoretical and Methodological Topics of Biogenic Gas Syudies. *Experimental Petroleum Geology*, (3): 209－219 (in Chinese with English abstract).

Chen, Z. R., Liu, W., Zhu, X. S., et al., 2025. Prediction of Geological and Engineering Integrated Sweet Spots of Deep Coalbed Methane. *Coal Geology & Exploration*, 53(6): 191－200 (in Chinese with English abstract).

Cheng, A. G., Peng, S. P., Cheng, B. Z., et al., 2000. Establishment of Peat Swamp System and Its coal-Forming Model. *Coal Geology & Exploration*, 28(5): 4－7 (in Chinese with English abstract).

Cheng, J. B., Zhou, R., Liu, Y. H., 2018. Coal Petrology and Quality Characteristics of Shanxi Coal Forormation in Xishan Coalfield. *Coal Technology*, 37(3): 132－134 (in Chinese with English abstract).

Crosdale, P. J., Beamish, B. B., Valix, M., 1998. Coalbed Methane Sorption Related to Coal Composition. *International Journal of Coal Geology*, 35(1－4): 147－158. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(97)00015-3

Fianu, J., Gholinezhad, J., Hassan, M., 2019. Application of Temperature-Dependent Adsorption Models in Material Balance Calculations for Unconventional Gas Reservoirs. *Heliyon*, 5(5): e01721. https://doi. org/10.1016/j.heliyon.2019.e01721

Guo, G. S., Xu, F. Y., Liu, L. F., et al., 2024. Enrichment and Accumulation Patterns and Favorable Area Evaluation of Deep Coalbed Methane in the Fugu Area, Ordos Basin. *Coal Geology & Exploration*, 52(2): 81－91 (in Chinese with English abstract).

Guo, X. S., Zhao, P. R., Shen, B. J., et al., 2024. Geological Features and Exploration Practices of Deep Coalbed Methane in China. *Oil & Gas Geology*, 45(6): 1511－1523 (in Chinese with English abstract).

Guo, Z. Q., Cao, Y. X., Zhang, Z., et al., 2022. Geological Controls on the Gas Content and Permeability of Coal Reservoirs in the Daning Block, Southern Qinshui Basin. *ACS Omega*, 7(20): 17063－17074. https://doi. org/10.1021/acsomega.2c00371

Hou, H. H., Shao, L. Y., Wang, S., et al., 2019. Influence of Depositional Environment on Coalbed Methane Accumulation in the Carboniferous-Permian Coal of the Qinshui Basin, Northern China. *Frontiers of Earth Science*, 13(3): 535－550. https://doi. org/10.1007/s11707-018-0742-8

Huang, J. S., Zheng, J., Song, X., et al., 2022. Sedimentary Characteristics of Beichagou Sandstone in the Lower Permian Shanxi Formation in Ordos Basin and Its Effects on Natural Gas Accumulation. *Journal of Palaeogeography*, 24(4): 680－696 (in Chinese with English abstract).

Huang, X. L., 2018. Study on Occurrence Characteristics and Controlling Factors of Coalbed Methane in Zhaoguan Coalfield. *Coal Science and Technology*, 46(4): 196－201 (in Chinese with English abstract).

Hui, P., Ma, D. M., Chen, Y., et al., 2023. Macromolecular Structure of Vitrain/Durain in Medium-Low Rank Coal and Its Effect on Methane Adsorption. *Coal Conversion*, 46(3): 25－38 (in Chinese with English abstract).

Jiang, T. W., Xiong, X. Y., Jin, Y. Q., 2023. Geological Characteristics and Development Countermeasures of Deep Coalbed Methane. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1918－1930 (in Chinese with English abstract).

Jiang, W. P., Zhang, Q., Jiang, Z. B., 2016. Effect on CBM Drainage Characteristics of Pore Structure of Tectonic Coal. *Natural Gas Geoscience*, 27(1): 173－179 (in Chinese with English abstract).

Kang, S. L., Lü, Y. M., Wang, C. W., et al., 2024. Control of Sedimentary Environments on Gas Contents of Coal Seams: A Case Study of No. 15 Coals Bed of the Taiyuan Formation in Shouyang Area, Qinshui Basin. *Journal of Palaeogeography* (*Chinese Edition*), 26(2): 416－430 (in Chinese with English abstract).

Kang, Y. S., Yan, X., Huangfu, Y. H., et al., 2023. Concept and Main Characteristics of Deep Oversaturated Coalbed Methane Reservoir. *Acta Petrolei Sinica*, 44 (11):1781－1790 (in Chinese with English abstract).

Lan, H., Yang, Z. B., Qiu, P., et al., 2024. Exploration and Exploitation of Deep Coalbed Methane in the Baijiahai Uplift, Junggar Basin: Progress and Its Implications. *Coal Geology & Exploration*, 52(2): 13－22 (in Chinese with English abstract).

Li, G. X., Zhang, S. C., He, H. Q., et al., 2024. Coal-Rock Gas: Concept, Connotation and Classification Criteria. *Petroleum Exploration and Development*, 51(4): 783－795 (in Chinese with English abstract).

Li, J., Cui, M. R., Zhang, J. J., et al., 2026. Experimental Study on Dynamic Occurrence and Migration of Gas and Water in Deep Coal Measure Reservoirs in Yan'an Area of Eastern Ordos Basin. *Fuel*, 405: 136654. https://doi. org/10.1016/j.fuel.2025.136654

Li, J. X., Hu, B. W., Fang, J., et al., 2022. Study on Gas Occurrence Law and Main Control Factors of No.8 Coal Seam in Baode Coal Mine. *China Energy and Environmental Protection*, 44(12): 291－296 (in Chinese with English abstract).

Li, J. Z., Chen, X., Gong, D. Y., et al., 2025. New Explo-

ration Fields and Resource Potential of Tight Sandstone Gas and Coalbed Methane in Turpan-Hami Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 46(1): 104－117, 172 (in Chinese with English abstract).

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, F. Y., Tang, S. H., et al., 2024. Progress and Development Direction of Coalbed Methane(Coal-Rock Gas) Exploration and Development in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(10): 63－79 (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).

Li, Z. J., Xiao, Y., Tian, J. Z., et al., 2024. Potentials and Favorable Directions for New Fields, New Types of Oil-Gas Exploration in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(1): 69－98 (in Chinese with English abstract).

Liang, H. B., Cui, Z. Q., Zhang, S. T., et al., 2006. Reservoir Characteristic and Exploration Target of Carboniferous-Permian Reservoirs in Northwestern Jizhong Depression. *China Petroleum Exploration*, 11(2): 8－14, 29 (in Chinese with English abstract).

Liu, Y., Shen, J., Liu, Z., et al., 2025. Gas-Bearing and Reservoir Heterogeneity Characteristics of Deep Coalbed Reservoir in the Dacheng Block, Bohai Bay Basin. *Journal of China Coal Society*, 50(S2): 1064－1077 (in Chinese with English abstract).

Meng, Y. L., Xiao, L. H., Yin, X. L., et al., 2003. The Activity of High-Temperature Hydrothermal Fluids and the Formation of the Hydrocarbon Reservoirs in the Wen′an Slope of the Bohaiwan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 337－347 (in Chinese with English abstract).

Ouyang, C., Duan, X. G., Fang, J., et al., 2024. Discussion on a Sedimentary Model of River-Controlled Shallow-Water Delta Plain Subfacies: Taking the Shanxi Formation of the S59 Block Gas Field in Ordos Basin as an Example. *Journal of Chengdu University of Technology* (*Science & Technology Edition*), 51(1): 102－116, 129 (in Chinese with English abstract).

Peng, S. Z., Liu, D. X., Zhang, L. F., et al., 2022. Shale Lithofacies and Sedimentary Facies of the Permian Shanxi Formation, Daning-Jixian Area, Eastern Margin of Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(1): 47－59 (in Chinese with English abstract).

Ren, L. F., Yu, X., Li, J. B., et al., 2026. Microscopic Characteristics and Gas Generation Patterns of Spontaneous Combustion Oxidation in Deep High-Temperature Coal Seams of the Juye Mining Area. *Fuel*, 403: 136124. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136124

Ren, P. F., Chen, L., Luo, W. Q., et al., 2025. Pore Structure and Heterogeneity Characteristics of Deep Coal Reservoirs Constrained by Coal Macrolithotypes. *Natural Gas Geoscience*, 36(9): 1706－1717 (in Chinese with English abstract).

Ren, S. K., Qin, Y. J., Jia, Z. K., et al., 2023. Fractal Characterization of Pore Structure of Coal with Different Ranks and Its Effect on Methane Adsorption Characteristics. *Safety in Coal Mines*, 54(5): 175－181 (in Chinese with English abstract).

Sang, S. X., Han, S. J., Liu, S. Q., et al., 2022. Comprehensive Study on the Enrichment Mechanism of Coalbed Methane in High Rank Coal Reservoirs. *Journal of China Coal Society*, 47(1): 388－403 (in Chinese with English abstract).

Sang, S. X., Li, R. M., Liu, S. Q., et al., 2024. Research Progress and Breakthrough Directions of the Key Technical Fields for Large Scale and Efficient Exploration and Development of Coalbed Methane in Xinjiang. *Journal of China Coal Society*, 49(1): 563－585 (in Chinese with English abstract).

Song, H. B., Li, Y. N., Yu, Z. F., et al., 2018. Sedimentary Succession and Environment Evolution of the Taiyuan Formation in Northeastern Qinshui Basin, Shanxi Province. *Journal of Palaeogeography*, 20(4): 623－636 (in Chinese with English abstract).

Song, Y., 2019. Basic Research on Controlling Factors and Exploration and Development of Coalbed Methane High Production and Enrichment. Science Press, Beijing (in Chinese).

Swarbrick, R. E., Osborne, M. J., 1998. Mechanisms that Generate Abnormal Pressures: An Overview. *Abnormal Pressures in Hydrocarbon Environments*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, https://doi.org/10.1306/m70615c2

Tang, D. Z., Yang, Q., Zhou, C. G., et al., 2000. Study on the Relationship between Late Paleozoic Coal-Forming Swamp Microenvironment and Genesis of Sulfur in Coal in North China. *Science in China* (*Series D*), 30(6):

584－591 (in Chinese).

Wang, H. Y., Duan, Y. Y., Liu, H. L., et al., 2024. Preliminarily Exploring the Theories and Technologies for Coalbed Methane Production Using Horizontal Wells: Comparison of Conditions for Coalbed Methane and Shale Gas Exploitation. *Coal Geology & Exploration*, 52(4): 47－59 (in Chinese with English abstract).

Wang, Y., Zhang, H. Y., Zhu, Y. M., et al., 2024. Sedimentary Environment and Organic Matter Enrichment of Marine-Continental Transitional Shale in the Shanxi-Taiyuan Formations in Western Linqing Depression, Bohai Bay Basin, China. *Journal of Palaeogeography*, 26(5): 1090－1107 (in Chinese with English abstract).

Xu, F. Y., Yan, X., Lin, Z. P., et al., 2022. Research Progress and Development Direction of Key Technologies for Efficient Coalbed Methane Development in China. *Coal Geology & Exploration*, 50(3): 1－14 (in Chinese with English abstract).

Yan, X., Xiong, X. Y., Li, S. G., et al., 2024. Production Contributions of Deep CBM Horizontal Well Sections and Their Controlling Factors: A Case Study of Daning-Jixian Area, Eastern Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(10): 80－92 (in Chinese with English abstract).

Yan, X., Xu, F. Y., Nie, Z. H., et al., 2021. Microstructure Characteristics of Daji Area in East Ordos Basin and Its Control over the High Yield Dessert of CBM. *Journal of China Coal Society*, 46(8): 2426－2439 (in Chinese with English abstract).

Zhang, B., Tao, S., Sun, B., et al., 2024. Genesis and Accumulation Mechanism of External Gas in Deep Coal Seams of the Baijiahai Uplift, Junggar Basin, China. *International Journal of Coal Geology*, 286: 104506. https://doi.org/10.1016/j.coal.2024.104506

Zhang, K. Z., Liu, Q. Q., Jin, K., et al., 2019. Influence of Overlying Caprock on Coalbed Methane Migration in the Xutuan Coal Mine, Huaibei Coalfield, China: A Conceptional Analysis on Caprock Sealability. *Geofluids*, 2019(1): 9874168. https://doi. org/10.1155/2019/9874168

Zhang, Q., Jin, W. J., Wang, J. R., et al., 2016. Relationship between Magma-Thermal Field and Hydrocarbon Accumulation. *Progress in Geophysics*, 31(4): 1525－1541 (in Chinese with English abstract).

Zhang, S. H., Tang, S. H., Qian, Z., et al., 2014. Evaluation of Geological Features for Deep Coalbed Methane Reservoirs in the Dacheng Salient, Jizhong Depression, China. *International Journal of Coal Geology*, 133: 60－71. https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.09.002

Zhao, X. Z., Jin, Q., Zhang, L., et al., 2010. Accumulation Conditions and Perspectives of Coal-Derived Hydrocarbon of Carboniferous-Permian in Northern Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 32(5): 459－464 (in Chinese with English abstract).

Zhou, D. H., Chen, G., Chen, Z. L., et al., 2022. Exploration and Development Progress, Key Evaluation Parameters and Prospect of Deep CBM in China. *Natural Gas Industry*, 42(6): 43－51 (in Chinese with English abstract).

Zhou, L. H., Li, Y., Ding, R., et al., 2025a. Differential Accumulation Characteristics and Production of Coalbed Methane/Coal-Rock Gas: A Case Study of the No. 8 Coal Seam of the Carboniferous Benxi Formation in the Daji Block, Ordos Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(4): 772－781 (in Chinese with English abstract).

Zhou, L. H., Xiong, X. Y., Ding, R., et al., 2025b. Connotation, Enrichment Mechanism and Practical Significance of Coal-Rock Gas. *Natural Gas Industry*, 45(3): 1－15 (in Chinese with English abstract).

Zhou, L. H., Xiong, X. Y., Li, Y., et al., 2025c. Revolutionary Breakthroughs and Key Theories and Technologies in Deep Coalbed Methane Development. *Natural Gas Industry*, 45(5): 17－30 (in Chinese with English abstract).

Zhu, Q. Y., Du, X. J., Zhang, T., et al., 2024. Investigation into the Variation Characteristics and Influencing Factors of Coalbed Methane Gas Content in Deep Coal Seams. *Scientific Reports*, 14: 18813. https://doi. org/10.1038/s41598-024-66011-2

Zhu, Y. M., Qin, Y., Fan, B. H., et al., 2004. Evaluation of the Second Hydrocarbon-Generation of the Permo-Carboniferous Source Rocks in Wuqing Depression. *Earth Science*, 29(1): 77－84 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

蔡超，朱炎铭，秦勇，等，2008. 冀中坳陷武清凹陷苏50井石炭-二叠纪煤系的成烃演化. 地质科学，43(1): 154－161.

陈健明，郑儒，易海霞，等，2009. 涟邵煤田北段煤层构造夹矸的成因及特征. 西部探矿工程，21(1): 125－127.

陈英，戴金星，戚厚发，1994. 关于生物气研究中几个理论及方法问题的研究. 石油实验地质，(3): 209－219.

陈峥嵘，刘伟，朱学申，等，2025. 深部煤层气地质-工程一体化甜点区预测. 煤田地质与勘探，53(6): 191－200.

程爱国, 彭苏萍, 程保州, 等, 2000. 泥炭沼泽体系的建立及其成煤模式. 煤田地质与勘探, 28(5): 4－7.

程剑波, 周瑞, 刘燕海, 2018. 西山煤田山西组煤层煤岩学和煤质特征. 煤炭技术, 37(3): 132－134.

郭广山, 徐凤银, 刘丽芳, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地府谷地区深部煤层气富集成藏规律及有利区评价. 煤田地质与勘探, 52(2): 81－91.

郭旭升, 赵培荣, 申宝剑, 等, 2024. 中国深层煤层气地质特征与勘探实践. 石油与天然气地质, 45(6): 1511－1523.

黄建松, 郑杰, 宋翔, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地北岔沟砂岩沉积特征及其对天然气成藏的控制作用. 古地理学报, 24(4): 680－696.

黄兴龙, 2018. 赵官煤田煤层气赋存特征及其控制因素研究. 煤炭科学技术, 46(4): 196－201.

惠鹏, 马东民, 陈跃, 等, 2023. 中低煤阶镜煤/暗煤大分子结构及对甲烷吸附的影响. 煤炭转化, 46(3): 25－38.

江同文,熊先钺,金亦秋,2023. 深部煤层气地质特征与开发对策. 石油学报,44(11): 1918－1930.

降文萍,张群,姜在炳,等,2016. 构造煤孔隙结构对煤层气产气特征的影响. 天然气地球科学,27(1): 173－179.

康世龙, 吕玉民, 王存武, 等, 2024. 沉积环境对煤层含气量的控制: 以沁水盆地寿阳地区太原组15#煤为例. 古地理学报, 26(2): 416－430.

康永尚,闫霞,皇甫玉慧,等,2023. 深部超饱和煤层气藏概念及主要特点. 石油学报,44(11): 1781－1790.

兰浩, 杨兆彪, 仇鹏, 等, 2024. 新疆准噶尔盆地白家海凸起深部煤层气勘探开发进展及启示. 煤田地质与勘探, 52(2): 13－22.

李国欣, 张水昌, 何海清, 等, 2024. 煤岩气: 概念、内涵与分类标准. 石油勘探与开发, 51(4): 783－795.

李建新, 胡博文, 方杰, 等, 2022. 保德煤矿8号煤瓦斯赋存规律及主控因素研究. 能源与环保, 44(12): 291－296.

李建忠, 陈旋, 龚德瑜, 等, 2025. 吐哈盆地致密砂岩气及煤层气勘探新领域与资源潜力. 石油学报, 46(1): 104－117, 172.

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, 徐凤银, 唐书恒, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地煤层(岩)气勘探开发进展及发展方向. 天然气工业, 44(10): 63－79.

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.

李志军,肖阳,田建章,等,2024. 渤海湾盆地冀中坳陷新领域、新类型油气勘探潜力及有利方向. 石油学报,45(1): 69－98.

梁宏斌, 崔周旗, 张舒亭, 等, 2006. 冀中坳陷东北部石炭-二叠系储层特征及勘探方向. 中国石油勘探, 11(2): 8－14, 29.

刘岩, 申建, 刘忠, 等, 2025. 渤海湾盆地大城区块深部煤层含气性及储层非均质性特征. 煤炭学报, 50(S2): 1064－1077.

孟元林,肖丽华,殷秀兰,等,2003. 渤海湾盆地文安斜坡高温热流体活动与油气藏形成. 岩石学报,19(2):337－347.

欧阳诚, 段新国, 方健, 等, 2024. 河控浅水三角洲平原亚相沉积模式探讨: 以鄂尔多斯盆地S59区块山西组一段为例. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(1): 102－116, 129.

彭思钟, 刘德勋, 张磊夫, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县地区山西组页岩岩相与沉积相特征. 沉积学报, 40(1): 47－59.

任鹏飞,陈龙,罗文琴,等,2025. 宏观煤岩类型制约下的深部煤储层孔隙结构及非均质性特征. 天然气地球科学,36(9): 1706－1717.

任少魁, 秦玉金, 贾宗凯, 等, 2023. 不同煤阶煤孔隙结构分形表征及其对甲烷吸附特性的影响. 煤矿安全, 54(5): 175－181.

桑树勋, 韩思杰, 刘世奇, 等, 2022. 高煤阶煤层气富集机理的深化研究. 煤炭学报, 47(1): 388－403.

桑树勋, 李瑞明, 刘世奇, 等, 2024. 新疆煤层气大规模高效勘探开发关键技术领域研究进展与突破方向. 煤炭学报, 49(1): 563－585.

宋慧波, 李亚南, 于振峰, 等, 2018. 山西沁水盆地东北部太原组沉积序列及环境演化. 古地理学报, 20(4): 623－636.

宋岩,2019. 煤层气富集高产控制因素及勘探开发基础研究. 北京: 科学出版社.

汤达祯,杨起,周春光,等,2000. 华北晚古生代成煤沼泽微环境与煤中硫的成因关系研究. 中国科学(D辑),30(6): 584－591.

王红岩, 段瑶瑶, 刘洪林, 等, 2024. 煤层气水平井开发的理论技术初探: 兼论煤层气和页岩气开发条件对比. 煤田地质与勘探, 52(4): 47－59.

王阳, 张涵宇, 朱炎铭, 等, 2024. 渤海湾盆地临清坳陷西部山西组-太原组海陆过渡相泥页岩沉积环境及有机质富集. 古地理学报, 26(5): 1090－1107.

徐凤银, 闫霞, 林振盘, 等, 2022. 我国煤层气高效开发关键技术研究进展与发展方向. 煤田地质与勘探, 50(3): 1－14.

闫霞, 熊先钺, 李曙光, 等, 2024. 深层煤岩气水平井各段产出贡献及其主控因素: 以鄂尔多斯盆地东缘大宁-吉县区块为例. 天然气工业, 44(10): 80－92.

闫霞, 徐凤银, 聂志宏, 等, 2021. 深部微构造特征及其对煤层气高产"甜点区"的控制: 以鄂尔多斯盆地东缘大吉地区为例. 煤炭学报, 46(8): 2426－2439.

张旗,金维浚,王金荣,等,2016. 岩浆热场对油气成藏的影

响. 地球物理学进展,31(4): 1525－1541.

赵贤正, 金强, 张亮, 等, 2010. 渤海湾盆地冀中坳陷北部石炭-二叠系煤成油气成藏条件及勘探前景. 石油实验地质, 32(5): 459－464.

周德华, 陈刚, 陈贞龙, 等, 2022. 中国深层煤层气勘探开发进展、关键评价参数与前景展望. 天然气工业, 42(6): 43－51.

周立宏, 李勇, 丁蓉, 等, 2025a. 煤层(岩)气“同生异构”控藏特征及开发实践: 以鄂尔多斯盆地大吉区块石炭系本溪组8号煤为例. 石油勘探与开发, 52(4): 772－781.

周立宏, 熊先钺, 丁蓉, 等, 2025b. 煤岩气内涵、富集机理及实践意义. 天然气工业, 45(3): 1－15.

周立宏, 熊先钺, 李勇, 等, 2025c. 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.

朱炎铭, 秦勇, 范炳恒, 等, 2004. 武清凹陷石炭-二叠系烃源岩的二次生烃评价. 地球科学, 29(1): 77－84.