

鄂尔多斯盆地绥德 1H 井 8#煤储层孔隙特征及煤岩气成藏特征

刘翰林^{1,2,3}, 邹才能^{1,2,3}, 邓泽^{1,2,3*}, 赵群^{1,2,3}, 周国晓⁴, 陈艳鹏^{1,2}, 田文广^{1,2}, 尹帅⁵, 陈朝兵⁵,
沈振^{1,2}, 孙粉锦^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油天然气集团有限公司煤岩气重点实验室, 河北廊坊 065007; 3. 国家能源页岩气研发(实验)中心, 河北廊坊 065007; 4. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018; 5. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西西安 710065)

摘要: 绥德地区深部煤岩气目前处于勘探初期, 明晰其煤岩气成藏和富集规律对该地区深部煤岩气的高效开发意义重大。本文以绥德 1H 井 8#煤为研究对象, 应用有机岩石学及岩石物理学相关手段, 分析并讨论其与邻区储层差异、沉积环境、孔隙结构的主控因素以及煤岩气的赋存特征。研究结果表明: ①研究区煤储层沼泽类型主要为湿地森林沼泽和开阔水域沼泽; ②孔隙主要以微孔为主, 灰分含量是煤储层微孔的主控因素; ③本溪组 8#煤储层含气量较高, 解吸气是总含气量的主要组成部分; ④研究区煤储层煤质较好, 含气量高, 构造平缓, 沉积较连续, 有利于煤岩气的富集和成藏。本文明确绥德 1H 井本溪组 8#煤的储层特征与成藏特征, 对于深部煤储层的勘探开发具有一定的借鉴意义。

关键词: 深部煤岩气; 本溪组 8#煤; 孔隙结构; 储层特征

中图分类号: P618

收稿日期: 2025-06-24

Pore Characteristics and Coalbed Gas Reservoir formation characteristics of Coal Reservoir of the No. 8 Coal Seam in Well Suide 1H, Ordos Basin

Liu Hanlin^{1,2,3}, Zou Caineng^{1,2,3}, Deng Ze^{1,2,3*}, Zhao Qun^{1,2,3}, Zhou Guoxiao⁴, Chen Yanpeng^{1,2}, Tian Wenguang^{1,2},
Yin Shuai⁵, Chen Chaobing⁵, Shen Zhen^{1,2}, Sun Fenjin^{1,2}

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 2. CNPC Key Laboratory of Coalrock Gas, Langfang, Hebei 065007, China; 3. National Energy Shale Gas R&D (Experiment) Center, Langfang, Hebei 065007, China; 4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company; 5. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;)

Abstract: At present, the deep coalbed gas resources in the Suide area are at the early stage of exploration. Clarifying the accumulation and enrichment mechanisms of coalbed gas in this region is therefore of great significance for the efficient development of deep coalbed gas. This study focuses on the No. 8 coal seam of the Benxi Formation from Well Suide 1H. Using organic petrology and rock physics approaches, the differences in reservoir properties between this well and adjacent areas, as well as the controlling factors of depositional environment, pore structure, and gas occurrence characteristics, were systematically analyzed and discussed. The results show that: ① the coal-forming peat in the study area was mainly derived from wet-forest and open-water marshes; ② micropores are the dominant pore type, and ash content is the primary controlling factor for micropore development in the coal reservoirs; ③ the No. 8 coal seam of the Benxi Formation exhibits a relatively high gas content, with desorbed gas accounting for the major component of the total gas content; ④ the coal reservoirs in the study area are characterized by high-quality coal, high gas content, gentle structure, and continuous deposition, which together favor coalbed gas enrichment and accumulation. This study clarifies the reservoir and accumulation characteristics of the No. 8 coal seam from Well Suide 1H and provides valuable insights for the exploration and development of deep coal reservoirs.

Keywords: Deep Coalbed Methane; Benxi Formation NO.8 Coal; Pore Structure; Reservoir Characteristics

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项《深层煤岩气成藏机理与效益开发技术》(2025ZD1404200)、中国石油科技项目《煤岩气富集规律与开发机理研究》(2024DJ23)——两性课题、中国石油科技项目《深层煤层气成藏理论与效益开发技术研究》(2023ZZ18)——攻关应用课题

作者简介: 刘翰林, 1992 年生, 高级工程师, 博士; 主要从事非常规油气地质和油气能源战略方面的研究工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路 20 号 910 信箱非常规研究所。ORCID: 0009-0004-9513-9829。E-mail: lhldmc@163.com

***通信作者:** 邓泽, 1982 年生, 高级工程师; 主要从事非常规天然气实验测试与储层评价工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路 20 号。ORCID: 0000-0001-9574-6056。E-mail: dengze@petrochina.com.cn

0 引言

目前,我国煤岩气的勘探开发逐渐向深部拓展。初步估计,国内 2000~3000m 以深煤岩气资源量可达 $18.47 \times 10^{12} \text{m}^3$ (刘翰林等, 2024; 秦勇, 2023; 周德华等, 2022)。大宁-吉县区块探明了储量达 $1.12 \times 10^{11} \text{m}^3$ 且埋深超 2000m 的大型煤岩气田(徐凤银等, 2022; 周德华, 2022)。大宁-吉县地区、临兴区块、神府区块以及准噶尔盆地多地深部煤岩气井均达到了单井日稳产 $1 \times 10^4 \text{m}^3$ 的高产气量(李斌等, 2024; 王志壮等, 2024; 杨延辉等, 2024)。鄂尔多斯盆地保德区块、柳林区块、延川南区块等均已实现了深部煤岩气的商业化开发。深部煤岩气的高效开发不仅可以大幅提升能源供应的安全性,同时也有助于支撑我国能源结构的优化调整。

煤储层物性影响煤岩气的成藏和产出,尤其是孔隙结构、渗透性和含气性等参数是储层评价的关键要素(Qin et al., 2020; Wang et al., 2020; 李松等, 2016)。鄂尔多斯盆地本溪组煤储层埋藏深,含气量可达 $7 \sim 21 \text{m}^3/\text{t}$ (程建等, 2023)。2022 年,中国石油长庆油田公司开展了 2400m 埋深煤层的保压含气量测试,实验表明游离气含量可达 35.29%(赵伟波, 2024)。孔隙是煤岩气的主要赋存空间,决定着煤储层的含气性和产出能力。前人对对比极限吸附量与比表面积的关系,发现微孔控制着煤储层吸附煤岩气的能力,游离气含量受微孔和过渡孔的影响较大(陈亮等, 2017)。海陆过渡相煤岩储层总含气量会随着孔体积和孔比表面积的增加而增加,微孔和中孔是吸附气的主要富集场所,大孔是游离气的富集场所(张吉振等, 2021)。孔隙可分为连通性孔隙和封闭性孔隙,连通性孔隙是进行扩散作用和渗流作用的主要场所。当封闭孔较多时,会导致煤储层的连通性差,即渗流作用差,渗透率低。裂隙孔和渗流孔的增多对于渗透率的增加起着极大的促进作用,而深部煤储层的天然粉化结构,导致其微、小孔居多,吸附能力较强,渗流能力较弱,具有较低的渗透率。

孔隙结构,包括孔隙的大小、形态、分布以及连通性,直接影响了煤岩气在煤储层中的赋存和运移(Shi et al., 2024; Wei et al., 2019)。表征孔隙结构的实验手段分为辐射法和注入法,辐射法包括扫描电镜实验、小角 X 射线散射实验、光学显微镜、低场核磁共振、CT 扫描等,注入法包括压汞实验、低温氮气吸附实验以及低压 CO_2 吸附实验等。杨昌永等利用扫描电镜观察到不同完整度煤样的不同类型的微孔隙及充填情况,并定性分析孔隙形态(杨昌永等, 2019)。李祥春等利用低温氮气吸附、低压二氧化碳吸附法以及扫描电镜法综合表征不同煤阶孔隙结构,发现高阶煤表面存在大量的碎屑和层状纹理,且孔比表面积较大,孔隙结构发育最复杂,微孔数量较多(李祥春等, 2019)。王刚等利用压汞和低温氮气吸附实验综合表征孔隙结构并利用 CT 扫描实现孔隙结构的三维表征:压汞实验的高压条件易破坏煤岩样品,且表征的孔径范围存在局限性,导致孔隙结构评价精准度及适用度大幅降低。翟成等通过低场核磁共振技术综合分析了煤样孔隙结构,包括孔径分布、孔隙流体、孔隙连通性、孔隙度、润湿性和渗透率,并用于不同的研究实例,且与其他测试方法进行了对比,发现低场核磁共振对比于其他测试方法测试时间更短、测试结果更精准、测试全程无损以及测试范围更广泛。

孔隙结构是沉积环境、煤化作用、构造作用、生物作用以及各种地下流体作用等因素综合影响的结果。煤样的原始沉积环境对孔隙结构具有较强的控制作用,如赵伟波等研究煤岩煤相与孔隙结构特征时发现保存指数(TPI)值越大,凝胶化指数(GI)值越小,煤样中孔与小孔数量越多(赵伟波等, 2024);杨青等发现随着地下水流动指数(GWI)值的升高,褐煤的总孔容升高而总孔比表面积降低,微孔和过渡孔与腐殖组含量相关,惰质组含量越高,中孔和大孔发育越多(杨青等, 2020)。在孔隙发育过程中,煤岩的演化程度也是控制孔隙结构的重要因素,樊祺章发现不同的变质程度的镜质体反射率(R_o)对应着不同的孔隙结构特征(樊祺章等, 2020)。褐煤中不同孔径孔容受灰分影响差异明显,较大孔隙随着灰分含量的升高而快速降低;而太原组煤岩 TOC 含量和成熟度控制着微孔和中孔的发育(聂万才等, 2024)。孔隙结构的发育受多种因素控制,但目前对于深部煤储层孔隙结构的表征及其对煤岩气赋存状态的控制作用有待进一步研究。

榆林地区石炭-二叠系煤岩气气测显示良好,但该地区深部煤岩气仍处于勘探初期,煤岩气储层的孔隙特征、物性及煤岩气成藏等地质要素的发育特征尚未查明(曹煜彤, 2024)。绥德地区位于鄂尔多斯盆地榆林市绥德县,本文以绥德 1H 井本溪组 8#煤为研究对象,综合运用有机岩石学手段、核磁共振技术、低温氮气吸附实验、低温 CO_2 吸附实验表征其孔隙特征,分析其主控因素。并探讨了孔隙结构的差异所造成的储层含气量差异,并分析煤岩气的赋存机理,为绥德地区的煤岩气勘探开发和评价提供参考。

1 地质背景及样品采集

鄂尔多斯盆地范围广阔，被多个构造带包围，是在古生界华北克拉通基础上发育的中生界不对称大向斜矩形盆地（图 1）。绥德 1H 井位于伊陕斜坡与晋西挠褶带过渡带，伊陕斜坡是西南倾斜的单斜构造，多发育大规模低幅度构造，如长轴鼻隆、鼻褶带、挠曲以及穹窿等。晋西挠褶带是鄂尔多斯盆地的东部边缘，整体为由东向西倾伏的单斜，多发育南北向、东西向的褶皱及数条较大规模的东西向正断层。绥德 1H 井处于构造相对平缓部位。该井钻遇地层自下向上依次有马家沟组、本溪组、太原组、陕西组、石盒子组、石千峰组、刘家沟组、和尚沟组、纸坊组、延长组，其中石盒子组、山西组、太原组及本溪组发育煤层，本文目标层位为本溪组煤层。

绥德 1H 井本溪组 8#煤层埋深为 2353.3~2360.5m，整体呈灰黑色（图 2）。该井自顶部至底部，共采集 14 块煤样，煤样以碎裂煤（5 块）和原生结构煤（9 块）为主，原生结构煤样中镜煤和亮煤总含量占比为 95%以上，为光亮型煤，碎裂煤以暗淡、半暗淡煤为主。

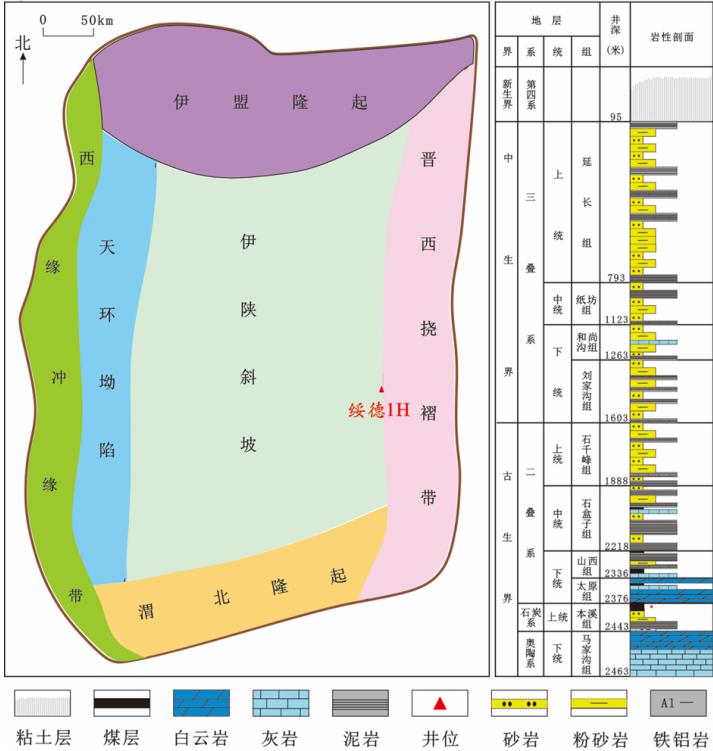


图 1 绥德 1H 井区域构造及地层柱状图

Fig.1 Tectonic and strata diagram of the Suide area
(郭彦如等, 2014) 修改

2 实验方法

2.1 工业分析

遵照 GB/T 30732-2014《煤的工业分析仪器法》执行，将煤样粉碎至 60~80 目后在室温 24℃、湿度 40%下使用 5E-MAG6700 全自动工业分析仪进行煤样水分（M）、灰分（A）、挥发分(V)和固定碳(FC)的测定。

2.2 显微组分和反射率测定

遵照 GB/T 8899-1998《煤的显微组分和矿物测定方法》和 GB/T 6948-2008《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》执行。将煤样制作为块样后，使用德国 ZEISS 公司生产的 Axio Imager 光学显微镜及光度计进行显微组分和油浸反射率(R_o)测定。

2.3 核磁共振(NMR)

遵照 SY/T 6490-2014《岩样核磁共振参数实验室测量规范》执行，将煤样制作为柱样，并在室温 25℃、湿度 29%下，使用 RecCore-5000 型核磁共振仪进行测试分析，选取永磁磁体，控制磁体温度为 35℃，磁场强度为 0.047T 左右，选用 CPMG 脉冲序列。操作步骤：将煤样制作为长度为 3cm、直径为 2.5cm 的柱样，放置在

85℃ 的真空烘干箱内干燥 24 小时，冷却到室温后放至仪器中记录 T₂ 光谱。记录完成后在 50MPa 下，使用蒸馏水对柱样进行 24 小时的水饱和，随后转移至仪器中，记录其饱和水条件下的 T₂ 光谱。

2.4 孔隙结构表征

为表征绥德 1H 井本溪组 8#煤储层孔隙特征，开展低温氮气吸附实验和低压 CO₂ 吸附实验。实验使用比表面及孔径分析仪 JW-BK200C，遵照 GB/T 19587-2017《气体吸附 BET 法测定固态物质比表面积》标准，低温氮气吸附实验在 77K 下进行，通过 BET 方程计算孔隙比表面积，BJH 方程计算孔容。低压 CO₂ 吸附实验在 273.15K 下进行，通过 DFT 方程得到孔隙比表面积和孔容。

2.5 含气量测定

测试遵照 GB/T 19559-2021《煤层气含量测定方法》执行，采用 LK6 型保压取心含气量实时测试系统进行测定。测试步骤：先通过特制保压气罐收集其带压气量 Q₀，再将煤芯放入解吸罐中测算其自然解吸气量 Q₂，解吸结束后将煤样破碎放入恒温箱测定其残余气 Q₃，通过散失时间和气体解吸变化率计算其损失气 Q₁，总含气量由公式(1)得出。

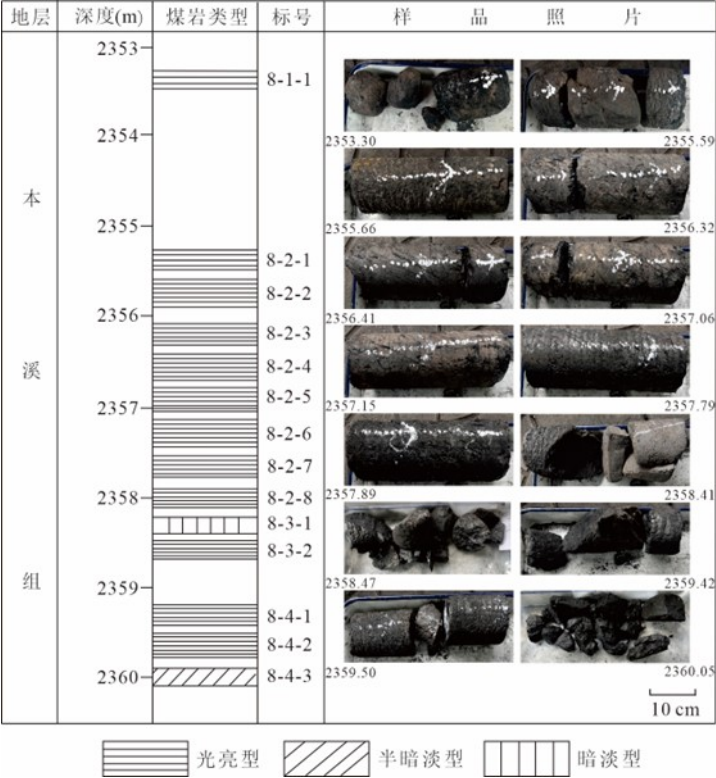
$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3$$

(1)

3 实验结果

3.1 煤岩煤质特征

绥德 1H 井本溪组 8#煤岩具有强玻璃光泽，硬度 3 左右，参差状断口。煤岩结构为条带状结构，呈块状构造，发育大致垂直层理面的两组割理，两组割理垂直或斜交，内生割理无充填、无外生裂隙。根据绥德 1H 井本溪组 8#煤储层工业分析（表 1）可知，煤储层水分含量在 0.64%~1.01%之间，平均值为 0.83%，灰分含量在 2.35%~14.20%之间，平均值为 6.06%，挥发分含量在 8.01%~10.16%之间，平均值为 8.72%，固定碳含量在 89.84%~91.98%之间，平均值为 91.28%，油浸镜质体反射率在 1.95~2.34 之间，平均值为 2.16%，有机碳含量在 30.53%~35.52%之间，平均值为 33.71%，全硫含量在 1.93%~4.4%之间，平均值为 2.99%。由以上分析结果可知，绥德 1H 井 8#煤为中-高阶、低含水量、中-低灰分、低挥发分、中-高硫烟煤。



10 cm

图2 绥德 1H 井本溪组 8#煤样照片及宏观煤岩结构

Fig.2 Photograph and macroscopic coal structure of 8 # coal sample from the Benxi Formation

表 1 绥德 1H 井本溪组 8#煤岩工业分析

Table 1 Industrial analysis of 8 # coal in the Benxi Formation of the Suide 1H well

样品	深度(m)	M _{ad} (%)	A _d (%)	V _{daf} (%)	FC _{daf} (%)	R _o (%)	TOC(%)	S _{t,d} (%)
8-1-1	2353.30	0.64	7.98	8.70	91.30	2.00	34.73	2.95
8-2-1	2355.31	0.80	8.57	8.42	91.58	2.15	33.36	2.73
8-2-2	2355.66	0.82	3.23	8.02	91.98	1.95	32.72	2.78
8-2-3	2356.04	0.92	2.35	8.37	91.63	2.07	35.52	3.40
8-2-4	2356.41	0.80	3.41	8.56	91.44	2.02	34.13	2.87
8-2-5	2356.78	0.70	2.96	8.32	91.68	2.09	35.76	3.09
8-2-6	2357.15	0.84	4.74	10.16	89.84	2.03	34.33	3.43
8-2-7	2357.53	1.00	2.42	8.01	91.99	2.21	33.43	3.03
8-2-8	2357.89	0.95	4.67	8.84	91.16	2.25	32.79	2.45
8-3-1	2358.20	0.86	4.98	8.21	91.79	2.14	32.07	3.63
8-3-2	2358.47	0.75	3.72	8.06	91.94	2.04	34.53	2.74
8-4-1	2359.20	0.75	14.20	10.27	89.73	1.99	33.66	4.40
8-4-2	2359.50	1.01	8.08	8.67	91.33	2.17	34.49	2.50
8-4-3	2359.87	0.79	13.51	9.39	90.61	2.34	30.53	1.93

注：M_{ad}-水分（空气干燥基）；A_d-灰分（干燥基）V_{daf}-挥发分（干燥无灰基）；FC_{daf}-固定碳（干燥无灰基）；R_o-镜质体反射率（平均）；TOC-有机碳含量；S_{t,d}-全硫（干燥基）。

3.2 煤岩显微组分特征

统计无矿物基下绥德 1H 井本溪组 8#煤岩的显微组分定量统计分析（表 2），发现绥德 1H 井本溪组 8#煤岩以镜质组为主，含量介于 52.69%~85.82%之间，平均值为 75.56%，惰质组含量介于 14.18%~47.31%之间，平均值为 24.44%。镜质组的亚显微组分以均质镜质体和基质镜质体为主，均质镜质体含量介于 17.51%~49.42%之间，平均值为 30.72%，基质镜质体含量介于 8.25%~28.94%之间，平均值为 20.17%。惰质体的亚显微组分以半丝质体和碎屑惰质体为主，半丝质体含量介于 3.86%~22.43%之间，平均值为 8.89%，碎屑惰质体含量介于 5.94%~21.81%之间，平均值为 14.17%。

表 2 绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层显微组分分析（无矿物质基）

Table 2 Microscopic component analysis of coal in Benxi Formation 8 # coal reservoir of Suide 1H well (no mineral content)

样品	镜质组(%)						惰质组(%)				
	T	TC	CC	DC	VD	合计	F	Sf	ID	Ma	合计
8-1-1	17.97	17.51	0.77	15.21	1.23	52.69	7.22	22.43	17.67	—	47.31
8-2-1	11.38	19.76	—	28.94	3.99	64.07	4.19	10.98	20.76	—	35.93
8-2-2	16.05	23.79	1.74	20.70	2.51	64.80	2.71	18.38	14.12	—	35.20
8-2-3	11.32	42.59	—	20.78	4.32	79.01	0.21	10.08	10.70	—	20.99
8-2-4	6.51	43.49	0.57	28.74	6.51	85.82	1.72	6.51	5.94	0.19	14.18
8-2-5	3.45	31.09	1.34	14.98	24.95	75.81	—	4.61	19.58	—	24.19
8-2-6	1.99	38.12	2.39	19.56	18.98	81.04	—	6.19	12.77	—	18.96
8-2-7	8.28	43.52	2.12	21.66	5.94	81.53	0.85	7.86	9.77	—	18.47
8-2-8	0.98	49.42	0.98	17.39	15.04	83.81	0.19	3.36	12.64	—	16.19
8-3-1	17.01	27.41	2.46	18.15	18.33	83.36	0.18	4.17	12.29	—	16.64
8-3-2	24.74	22.47	0.21	20.41	6.80	74.64	1.03	11.34	12.99	—	25.36
8-4-1	12.97	29.58	1.34	24.62	14.69	83.20	0.57	3.25	12.98	—	16.80
8-4-2	17.88	20.04	3.94	8.25	16.69	66.80	—	11.39	21.81	—	33.20
8-4-3	11.18	21.34	1.02	22.97	24.80	81.30	0.41	3.86	14.43	—	18.70

注：T-结构镜质体；TC-均质镜质体；CC-团块镜质体；DC-基质镜质体；VD-碎屑镜质体；F-丝质体；Sf-半丝质体；ID-碎屑惰质体；Ma-粗粒体。

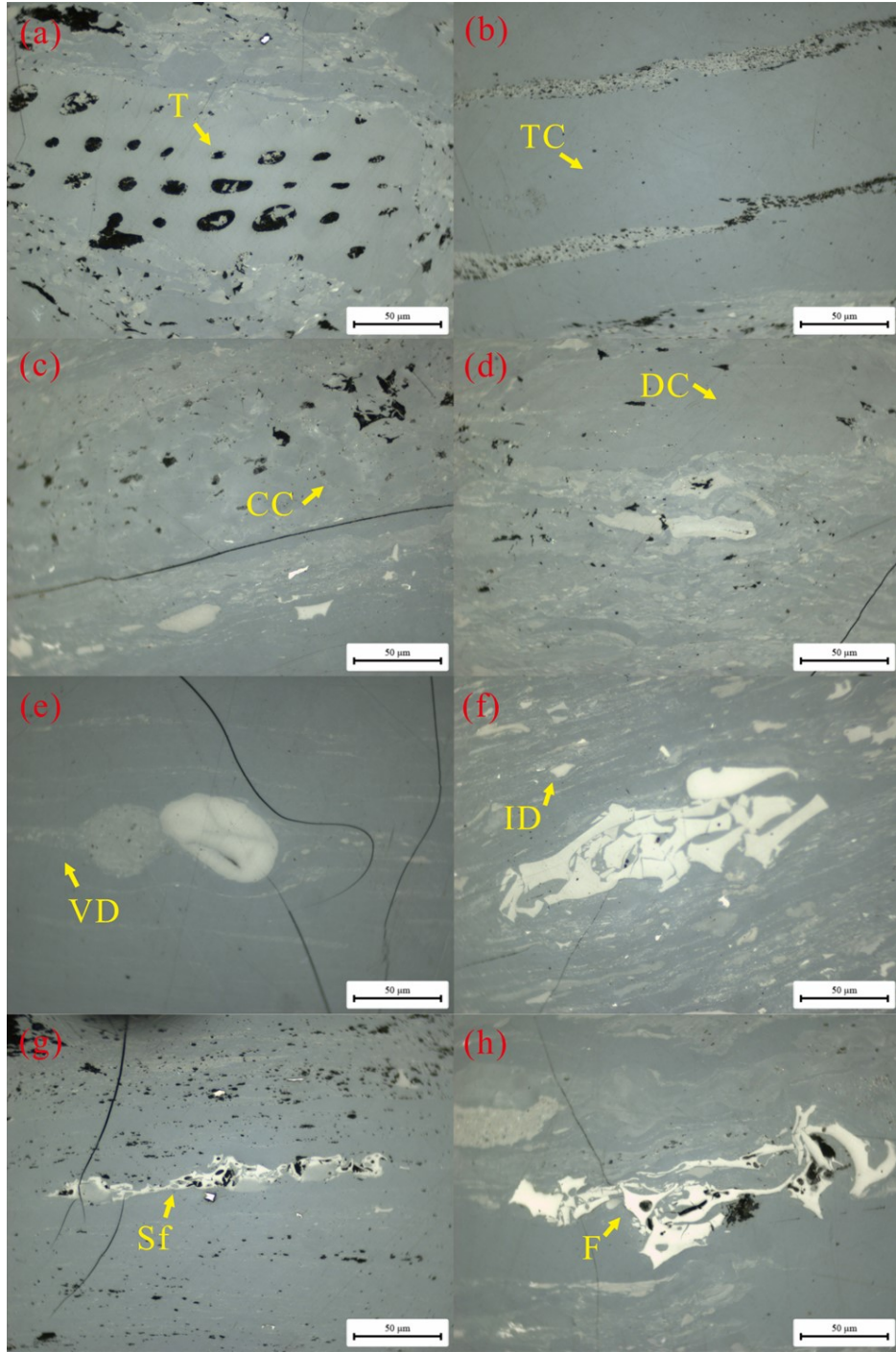


图3 绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层显微组分特征

Fig.3 Microscopic composition characteristics of coal in Benxi Formation 8 # coal reservoir of Suide 1H well

(a) T-结构镜质体，细胞腔显示清楚，多为圆形或椭圆形，大多被挤压而变形；(b) TC-均质镜质体，不显示细胞结构，为完全均一的物质，多呈浅灰色；(c) CC-团块镜质体，为团块状，多呈椭圆形和纺锤形，成群出现于均质体或基质体中；(d) DC-基质镜质体，呈现为均一或不均一的致密状态，其上多见矿物颗粒，没有固定形态。(e) VD-碎屑镜质体，不具有具体的形态，由各类镜质体的碎屑组成；(f) ID-碎屑惰质体，为半丝质体和丝质体的碎屑，无细胞结构，无定形，有微突起；(g) Sf-半丝质体，白色，有微突起，常出现在均质镜质体上；(h) F-丝质体，保存着完好的细胞结构，高突起，细胞腔常被黄铁矿填充。

3.3 煤岩 NMR 的 T_2 谱图分布特征

根据绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层核磁共振 T_2 谱图(图 4)可知,通过其谱图形态可观察不同孔隙占比情况,峰值的高低代表了孔隙含量的大小,谱峰之间的连通性反应了孔隙间的连通性(赵伟波, 2024)。干燥煤样的谱图大多呈现三峰型,在 $0.01\text{ms}\sim 1\text{ms}$ 、 $1\text{ms}\sim 100\text{ms}$ 以及大于 10000ms 处,部分样品在 $1\text{ms}\sim 100\text{ms}$ 无峰值。饱水煤

样的谱图大多呈现三峰型，在 0.01ms~1ms、1ms~100ms 以及 100ms~10000ms 处，且饱水煤样的峰值相比干燥煤样较大。根据其谱图形态可将孔隙分为微孔区、中孔区以及大孔区三个区域，微孔区以弛豫时间为 0.1~1ms 占比微孔数量最多，中孔区以弛豫时间 10~100ms 占比中孔数量最多，大孔区以弛豫时间为 100~1000ms 占比大孔数量最多。同样，根据各谱峰之间的连通性可以发现，微孔区与中孔以及大孔区的孔隙并不连通，中孔区与大孔区之间的连通性较好。

由核磁共振理论可知(Zheng et al.,2019) ， 横向弛豫时间 T_2 与表面弛豫率 ρ_2 的表达式如下：

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \left(\frac{S}{V} \right) \quad (2)$$

式中， T_2 为核磁共振横向弛豫时间，单位为 ms； ρ_2 为表面弛豫率，单位为 $\mu\text{m/s}$ ； S 为孔隙表面积，单位为 μm^2 ； V 为孔隙体积，单位为 μm^3 。

同时由于 S/V 是孔径与孔隙形状因子的函数，所以式(1)可以表示为：

$$\frac{1}{T_2} = F_s \left(\frac{\rho_2}{r} \right) \quad (3)$$

式中， F_s 为孔隙形状因子，柱状孔隙为 2，球状孔隙为 3； r 为孔径，单位为 μm 。

对于氮气吸附实验，我们可以通过 SVR 方法来计算出煤样的表面弛豫率。表达式如下：

$$\rho_2 = \frac{V}{T_{2LM} S} \quad (4)$$

式中， T_{2LM} 为 T_2 的对数平均值。

通过 3.4 小节中的低温氮气吸附实验和公式 4，计算出本文的煤岩的平均表面弛豫率为 $0.73\mu\text{m/s}$ 。通过式 3 将 T_2 谱图转换为孔隙体积占比随孔径变化的全尺度孔径分布图(图 5)，并根据 IUPAC 分类将孔隙按孔径分为微孔(0 nm~2 nm)、中孔(2 nm~50 nm)和大孔 (> 50 nm)。由计算结果可知(表 3) (Sing et al.,1985)，本文煤样的孔隙以微孔为主，占比介于 52.52%~86.73%之间，平均值为 75.19%，中孔占比介于 3.52%~11.25 之间，平均值为 6.79%，大孔占比介于 10.17%~17.77%之间，平均值为 18.02%。

表 3 绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层核磁共振谱图分析

Table 3 Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy Analysis of Coal in Benxi Formation 8 # coal reservoir of Suide 1H well

样品	表面弛豫率 ($\mu\text{m/s}$)	孔隙体积占比(%)		
		微孔	中孔	大孔
8-2-1	0.7109	78.18	7.24	14.57
8-2-3	0.7478	78.70	3.52	17.77
8-2-4	0.7538	52.52	11.25	36.23
8-2-7	0.6583	86.73	3.10	10.17
8-3-2	0.6474	72.56	9.81	17.63
8-4-1	0.8805	82.47	5.78	11.75

3.4 煤岩微观孔隙特征

对于多孔介质，因其复杂的孔隙结构， N_2 吸附等温线的脱附线和吸附线会形成滞后圈，根据吸附等温线和滞后环的形状可以明确煤孔隙结构(Sing et al.,2004)。绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层低温氮气吸附实验所得到的等温吸附曲线，在相对压力较低时吸附量上升较快，曲线向上凸后继续上升，但速度变得较缓慢，曲线近于平缓。处于相对压力较大时，吸附量迅速上升，曲线整体呈反“S”型，符合 IUPAC 中的 IV 型吸附等温线，滞后环符合 IUPAC 分类中的 H_3 型[图 6(a)]。在脱附过程中由于孔结构对其造成的阻力，需要在更小相对压力才能脱附完全，所以出现滞后环现象。滞后环现象的出现指示煤岩孔隙结构较复杂，具有较多的狭缝孔和楔形孔。同时根据孔径分布曲线可知，煤样中孔径分布大多呈现双峰型，优势孔径在 3nm 左右和 10nm 左右。根据低温氮气吸附实验的孔比表面积和孔体积随孔径变化图可知[图 6(c)]，煤的比表面积在 3nm 和 10nm 左右出现高峰值，说明中孔对煤层比表面积的贡献较大。而孔径越大所对应的孔体积增量越大，在 40nm 和 100nm 处出现了峰值，表明中孔和大孔都对孔体积有较大的贡献。

由绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层低压 CO_2 吸附实验所得到的等温吸附曲线在相对压力较小时，吸附量迅速增加，曲线呈向上凸的形式，当相对压力较大时，吸附量增速缓慢，曲线趋于平缓。该曲线特征对应吸附曲线

分类中的I型，表明绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层中富含微孔[图 6(b)]。根据低压 CO₂ 吸附实验的孔比表面积和孔体积随孔径变化图可知[图 6(d)]，绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层微孔的孔体积和比表面积呈现多峰的特征，在孔径为 0.5~0.7nm 和 0.8~1.0nm 区间内都会出现 1-2 个高峰值。由总体的趋势可知，孔径介于 0.5~0.7nm 之间的孔径贡献了较大的孔体积和孔比表面积，孔径大于 0.9nm 的部分，虽然没有贡献较大的孔比表面积，但是贡献了较大的孔体积。

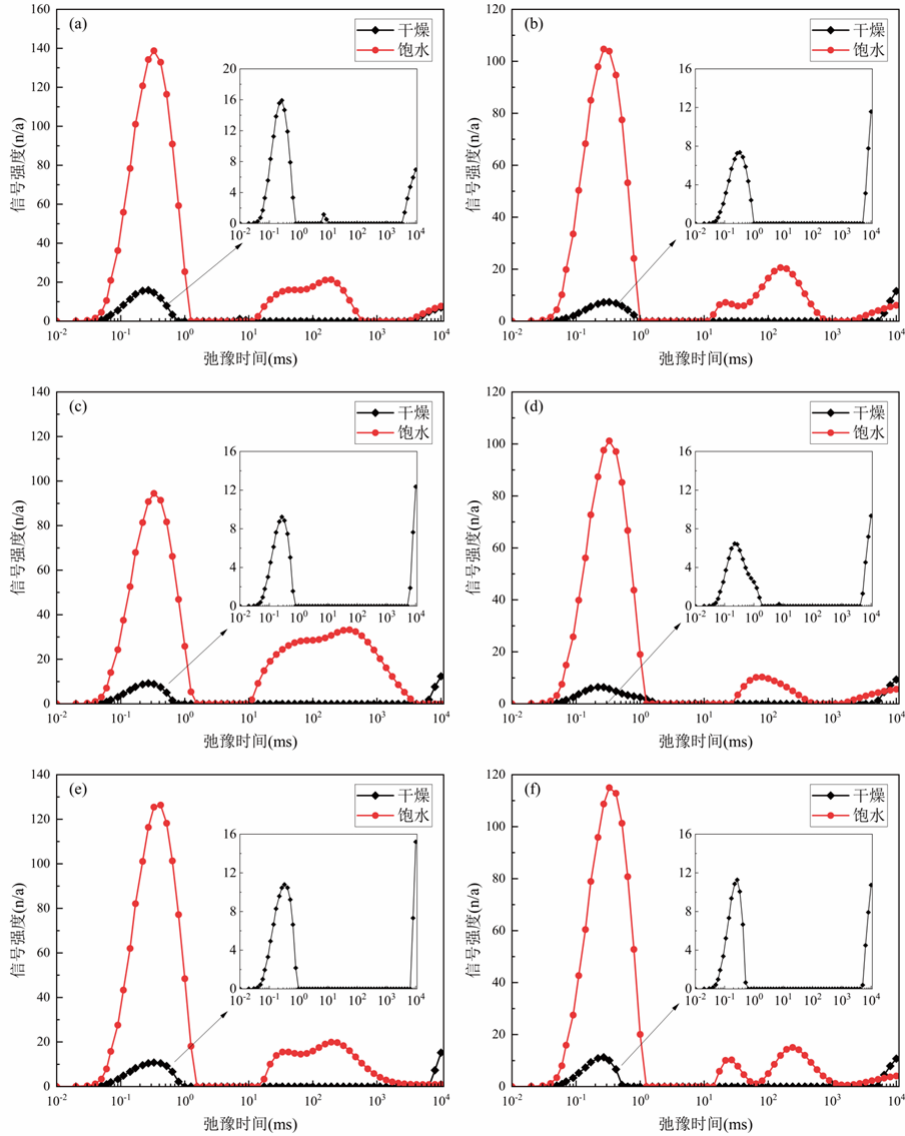


图 4 绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层核磁共振 T₂ 谱图

Fig. 4 Nuclear magnetic resonance T₂ spectrum of coal in Benxi Formation 8 # coal reservoir of Suidé 1H well

(a)8-2-1 样品; (b)8-2-3 样品; (c)8-2-4 样品; (d)8-2-7 样品; (e)8-3-2 样品; (f)8-4-1 样品。

通过对二氧化碳吸附实验与氮气吸附实验进行联合表征可以发现，绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层中孔隙主要以微孔为主，微孔的孔比表面积占比介于 98.66%~99.84%之间，平均值为 99.42%，孔体积占比介于 83.25%~95.11%之间，平均值为 90.42%，介孔的孔比表面积和孔体积占比次之，大孔的孔比表面积与孔体积占比最少（表 4 和表 5）。

由其综合表征的结果与核磁共振实验结果进行对比，发现总体趋势一致，都表明煤岩中微孔数量居多，贡献的孔体积较大，但由于低温氮气吸附实验表征的孔径范围为 2~296nm，所以大孔的体积占比相差较大。

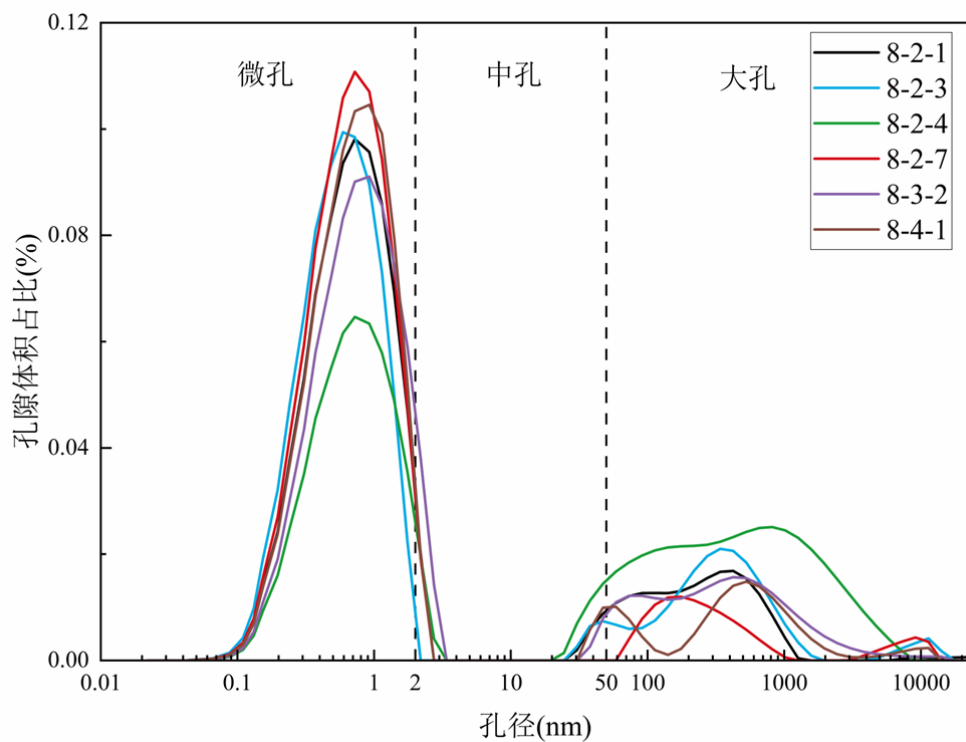


图 5 孔隙体积占比随孔径变化图
Fig. 5 Change in pore volume with pore size

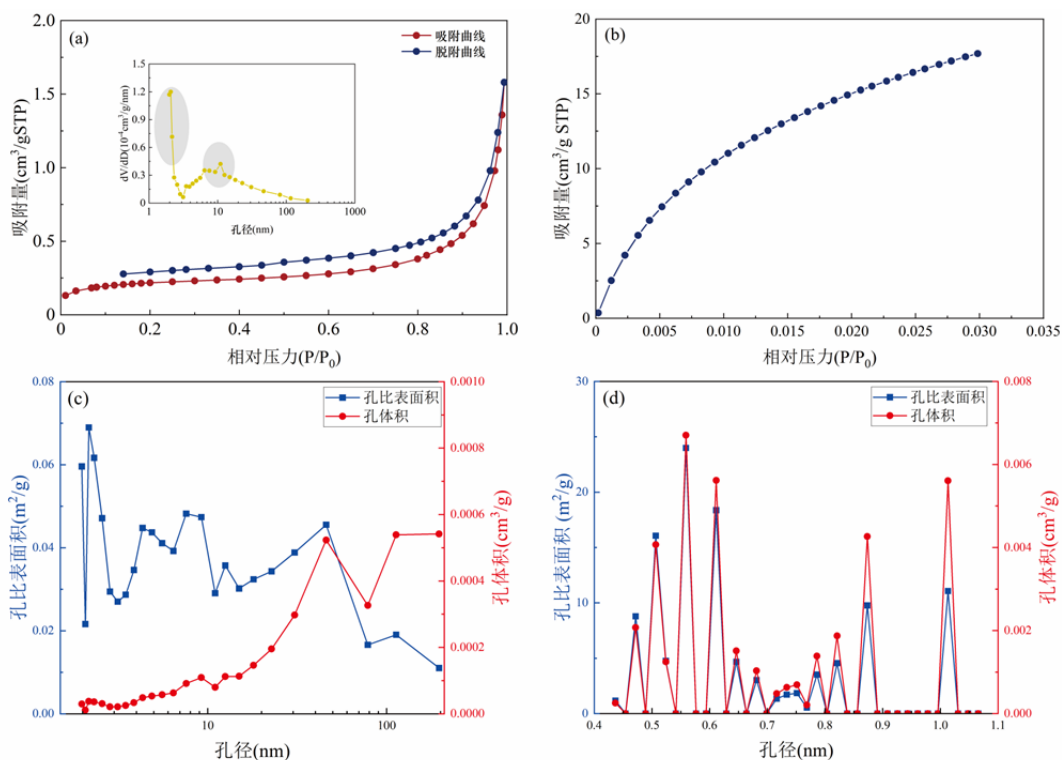


图 6 绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层孔隙特征分析图

Fig. 6 Analysis of coal pore characteristics in Benxi Formation 8 # coal reservoir of Suide 1H well

(a)低温氮气吸附曲线图；(b)低压二氧化碳吸附曲线图；(c)低温氮气吸附实验孔比表面积和孔体积随孔径变化图；(d)低压二氧化碳实验比表面积和孔体积随孔径变化图

表 4 绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层孔比表面积分析

Table 4 Analysis of coal pore specific surface area in Benxi Formation 8 # coal reservoir of Suide 1H well

样品	孔比表面积(m^2/g)			孔比表面积贡献率(%)		
	微孔	中孔	大孔	微孔	中孔	大孔
8-1-1	152.060	0.578	0.052	99.59	0.38	0.03
8-2-1	152.160	1.976	0.084	98.66	1.28	0.06
8-2-2	162.830	0.717	0.033	99.54	0.44	0.02
8-2-3	166.200	0.967	0.061	99.39	0.58	0.04
8-2-4	155.246	1.271	0.059	99.15	0.81	0.04
8-2-5	160.886	0.248	0.038	99.82	0.15	0.02
8-2-6	154.130	0.231	0.023	99.84	0.15	0.02
8-2-7	163.770	0.547	0.037	99.64	0.33	0.02
8-2-8	152.980	0.449	0.035	99.68	0.29	0.02
8-3-1	156.310	0.547	0.045	99.62	0.35	0.03
8-3-2	165.590	1.898	0.073	98.82	1.13	0.04
8-4-1	135.780	0.655	0.046	99.49	0.48	0.03
8-4-2	157.360	1.634	0.046	98.94	1.03	0.03
8-4-3	136.580	0.382	0.032	99.70	0.28	0.02

表 5 绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层孔体积分析

Table 5 Coal pore volume analysis of Benxi Formation 8 # coal reservoir in Suide 1H well

样品	孔体积($10^{-2}\text{cm}^3/\text{g}$)			孔体积贡献率(%)		
	微孔	中孔	大孔	微孔	中孔	大孔
8-1-1	3.40	0.19	0.15	90.78	5.10	4.12
8-2-1	3.40	0.44	0.25	83.25	10.74	6.00
8-2-2	3.70	0.18	0.10	92.99	4.49	2.52
8-2-3	3.60	0.27	0.19	88.79	6.61	4.60
8-2-4	3.37	0.30	0.18	87.66	7.78	4.56
8-2-5	3.33	0.12	0.12	93.28	3.49	3.23
8-2-6	3.30	0.10	0.07	95.11	2.80	2.08
8-2-7	3.40	0.17	0.11	92.30	4.64	3.06
8-2-8	3.20	0.16	0.11	92.36	4.51	3.12
8-3-1	3.20	0.18	0.14	90.87	5.25	3.88
8-3-2	3.70	0.39	0.21	85.99	9.07	4.94
8-4-1	2.90	0.19	0.14	89.76	6.03	4.21
8-4-2	3.80	0.29	0.14	89.84	6.88	3.28
8-4-3	3.00	0.13	0.10	92.85	4.08	3.08

3.5 煤层含气量特征

本文通过保压取心对鄂尔多斯盆地绥德 1H 井本溪组 8#煤储层进行含气量分析发现(表 6), 其总含气量最高可达 $29.17 \text{ m}^3/\text{t}$, 介于 $8.56 \text{ m}^3/\text{t} \sim 29.17 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间, 平均值为 $24.28 \text{ m}^3/\text{t}$, 并且含气量主要由解吸气组成, 解吸气最高可达 $22.03 \text{ m}^3/\text{t}$, 介于 $7.52 \text{ m}^3/\text{t} \sim 22.03 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间, 平均值为 $19.03 \text{ m}^3/\text{t}$, 属于高含气量煤层。保压气介于 $0 \text{ m}^3/\text{t} \sim 1.19 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间, 均值为 $0.69 \text{ m}^3/\text{t}$, 残余气介于 $0.06 \text{ m}^3/\text{t} \sim 0.69 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间, 均值为 $0.38 \text{ m}^3/\text{t}$ 。

表 6 绥德 1H 井本溪组 8#煤储层含气量分析 (m^3/t)Table 6 Gas content analysis of 8 # coal reservoir in Benxi Formation of Suide 1H well (m^3/t)

样品	保压气 (Q_0)	损失气 (Q_1)	解吸气 (Q_2)	残余气 (Q_3)	总含气量
8-1-1	0.00	4.88	22.03	0.54	27.45
8-2-1	0.91	6.83	20.84	0.59	29.17
8-2-2	0.87	5.24	21.16	0.69	27.96
8-2-3	0.84	7.15	18.39	0.48	26.86
8-2-4	0.84	4.56	21.04	0.32	26.76
8-2-5	0.86	6.54	19.91	0.23	27.54
8-2-6	0.80	3.39	21.05	0.38	25.62
8-2-7	0.84	6.02	19.65	0.53	27.04
8-2-8	0.85	5.91	20.06	0.48	27.30
8-3-1	0.00	0.98	7.52	0.06	8.56
8-3-2	0.00	2.70	20.33	0.17	23.20
8-4-1	1.19	2.39	22.08	0.31	25.97
8-4-2	1.11	1.38	21.56	0.24	24.29
8-4-3	0.56	0.54	10.76	0.35	12.21

根据绥德 1H 井本溪组 8#煤储层含气量随深度变化图可知(图 7), 煤储层总含气量在中上部较稳定, 在煤层

的中下部含气量发生了局部的突然下降后又升高，这可能是因为在 2358m 处发育了一层暗淡煤，由于暗淡煤的割理和裂隙发育较多，所以导致煤层气总含气量发生了骤降，并且其多为解吸气量。在 2359.50m 埋深处含气量与上部煤储层的含气量大致相等，但在 2359.87m 埋深处又发生了骤降，这可能是因为靠近煤层的底板，由于底板为本溪组砂岩，致密度差，导致部分煤岩气逃逸，所以含气量降低。

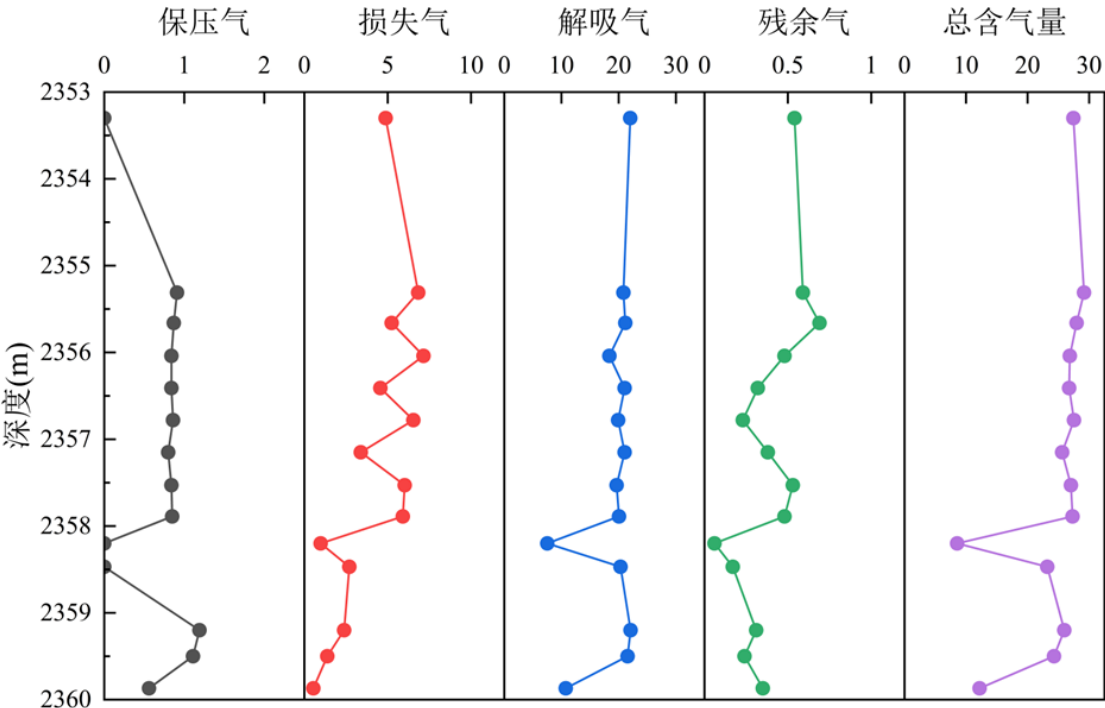


图 7 绥德 1H 井本溪组 8#煤储层含气量随深度变化图

Fig.7 Change in gas content with depth in Benxi Formation 8 # coal reservoir of Suidé 1H well

4 讨论

4.1 绥德地区深部及邻区煤储层特征对比

鄂尔多斯盆地深层煤岩主要赋存于山西组、太原组和本溪组等地层。绥德地区处于鄂尔多斯盆地的东缘，主要含煤地层为本溪组 8#煤。由图 8 可知，鄂尔多斯盆地的含煤地层埋藏较深，达到了 1500m 以上，而与邻近地层相比，绥德地区的煤层埋藏较深，深度在 2300m 以上。根据显微组分分析得出绥德地区的煤样的镜质组含量均值为 75.56%，惰质组含量均值为 24.44%，与榆林地区本溪组煤储层相比，惰质组含量基本一致，但镜质组含量上升了较 10%左右，说明绥德地区成煤时期沼泽森林更茂盛，成煤原始物质以富含木质素的乔木、灌木等木本植物输入更多，或者成煤沼泽的水位较深、环境越稳定、还原性越强等。而对比邻区的较浅煤层，如临兴地区的本溪组 8#煤储层，其镜质组含量与惰质组含量都较少，相比绥德地区下降了 4%左右，而对比太原组的煤储层可以发现，它们的镜质组含量普遍较高，而惰质组含量普遍较低，说明其在泥炭化作用过程中作用环境较不稳定，主要原因可能是水动力条件不稳定，导致其缺氧或多氧，或者由于其埋深较浅，导致煤化作用较弱。但绥德地区的 $R_{o,max}$ 明显高于邻区，说明绥德地区煤储层的煤阶较高，热演化程度较高，这可能是因为绥德地区的煤储层埋藏较深，导致其演化过程中温度较高，所以煤阶相比于邻区略高。

通过含气量的对比可以发现，绥德地区的含气量与同为本溪组 8#煤储层的榆林地区相比，含气量变化较大，最大含气量较榆林地区高，但榆林地区的最低含气量较绥德地区大，这可能是由于构造或沉积影响导致绥德地区本溪组 8#储层发育较差。而与太原组储层对比可以发现，大宁-吉县的地区的含气量较高，而其他地区的含气量较低，说明本溪组 8#煤储层的含气量较太原组稳定。

表 7 绥德地区与邻区煤储层特征对比

Table 7 Comparison of coal reservoir characteristics between Suide area and Nearby areas

(李可心, 2020; 李清, 2014; 刘迈杰, 2021; 唐淑玲等, 2023; 王成旺等, 2024; 姚红生等, 2022; 赵伟波, 刘洪林, 王怀厂, 刘德勋, 李晓波, 2024; 周龙刚, 2023)

地区	煤储层	深度(m)	镜质组(%)	惰质组(%)	R _{o,max} (%)	含气量(m ³ /t)
绥德地区	本溪组 8#煤	2353~2360	75.56	24.44	2.34	8.56~29.17
榆林地区	本溪组 8#煤	2 500~3 200	66.96	24.26	1.77	15.40~23.63
大宁-吉县地区	太原组 8#煤	1 888~2 277	82.20	11.60	2.15	23.67~37.64
延川南地区	山西组 2#煤	1 500~1 800	72.00	18.00	2.35	8~22
保德区块	太原组 8 和 9#煤	1 000~1 200	69.00	22.00	1.11	0~12
神府南区	太原组 8 和 9#煤	2000	75.32	24.67	1.40	7.94~21.13
临兴东区	本溪组 8 和 9#煤	1800~2200	70.18	20.77	1.87	11.28~22.44

4.2 深部 8#煤沉积环境

本文使用煤相分析恢复成煤时期泥炭沼泽的古环境, 如表 8 所示, 选取的煤相参数包括凝胶化指数(GI)、结构保存指数(TPI)、地下水指数(GWI)、镜惰比(V/I)、骨基比(F/M)以及氧化指数(OI)。使用 TPI 与 GI 指数分出五类沼泽环境, 即 TPI<1: GI<1, 草本沼泽, GI>1, 开阔水域沼泽; TPI>1: GI<1, 干燥森林沼泽, 1<GI<5, 湿地森林沼泽, 5<GI<10, 覆水森林沼泽, GI>10, 较深覆水森林沼泽。由表 8 可知, 绥德地区 8#煤储层呈现出较大的 TPI 值和 GI 值, GI 值均大于 1, 根据 TPI-GI 煤相图(图 8), 指示煤形成于湿地森林沼泽和开阔水域沼泽。并且随着深度的变化, 见[图 9(a)和(b)], 成煤沼泽环境由湿地森林沼泽向覆水森林沼泽演变, 再向开阔水域沼泽和湿地森林沼泽演变。

GWl 值可以指示泥炭沼泽的地下水动力条件和水位变化(Guo et al., 2018; 赵伟波等, 2024)。由图 9(b)和(c)可知, GWl 值与 GI 值的趋势相似, 当 GWl 值变大, 即水位变高, 地下水动力变强时, GI 值会变大, 当水位变化时, 即泥炭的排水/再湿过程会影响泥炭沼泽的氧化还原过程, 改变土壤微生物和酶的活性, 从而改变土壤有机碳的分解和存储过程, 所以出现当水位和地下水动力条件变化时, 泥炭沼泽环境也随之变化(徐志伟等, 2022)。F/M 指数也可以指示水环境(Duan et al., 2011)。当地下水动力较强时, 即 GWl 值较小时, F/M 指数通常大于 1, 即成煤泥炭沼泽处于滞留环境, 而当地下水动力较强时, F/M 指数会出现小于 1 的情况, 即成煤泥炭沼泽由滞留环境演变为活水环境[图 9(e)]。并且煤储层的硫元素含量较高, 平均值为 2.99%, 指示泥炭沼泽可能受海侵影响而输送进硫酸盐, 导致硫含量较高(Guo, Littke and Zieger, 2018)。

V/I 值可以反应泥炭沼泽的覆水程度(翟迎铨等, 2020)。当 V/I<1, 属于潮湿-弱覆水环境, 1<V/I<4, 属于极潮湿-覆水, V/I>4, 属于强覆水环境。由图 9(d)可以看出, 绥德地区本溪组 8#煤储层处于弱覆水-强覆水环境, 当沼泽处于覆水环境时, 氧的供应量会大幅减小。而 OI 值可以指示沼泽的氧化还原环境(马家亮等, 2017)。当 OI 值小于 1 时, 代表为还原环境。根据 V/I 值和 OI 值的变化反应, 绥德地区本溪组 8#煤储层上中下部均处于弱还原-还原环境。

表 8 绥德 1H 井本溪组 8#煤储层煤相参数统计(无矿物质基)

Table 8 Statistics of coal phase parameters of Benxi Formation 8 # coal reservoir in Suide 1H well (no mineral content)

样品	镜质组(%)	惰质组(%)	GI	TPI	GWl	V/I	F/M	OI
8-1-1	52.69	47.31	1.11	1.87	1.04	1.11	1.91	0.21
8-2-1	64.07	35.93	1.78	0.86	2.16	1.78	0.86	0.26
8-2-2	64.80	35.20	1.84	1.56	1.30	1.84	1.63	0.16
8-2-3	79.01	20.99	3.76	1.79	1.40	3.76	1.79	0.12
8-2-4	85.82	14.18	6.05	1.39	2.38	6.05	1.41	0.07
8-2-5	75.81	24.19	3.13	0.64	0.63	3.13	0.66	0.24
8-2-6	81.04	18.96	4.27	0.86	1.16	4.27	0.90	0.15
8-2-7	81.53	18.47	4.41	1.53	1.76	4.41	1.62	0.11
8-2-8	83.81	16.19	5.18	1.17	1.29	5.18	1.20	0.14
8-3-1	83.36	16.64	5.01	0.95	0.65	5.01	1.00	0.14
8-3-2	74.64	25.36	2.94	1.47	0.71	2.94	1.48	0.15
8-4-1	83.20	16.80	4.95	0.86	1.01	4.95	0.89	0.15
8-4-2	66.80	33.20	2.01	0.97	0.47	2.01	1.05	0.28
8-4-3	81.30	18.70	4.35	0.58	0.85	4.35	0.59	0.17

注: GI-凝胶化指数; TPI-结构保存指数; GWl-地下水指数; V/I-镜惰比; F/M-骨基比; OI-氧化指数。

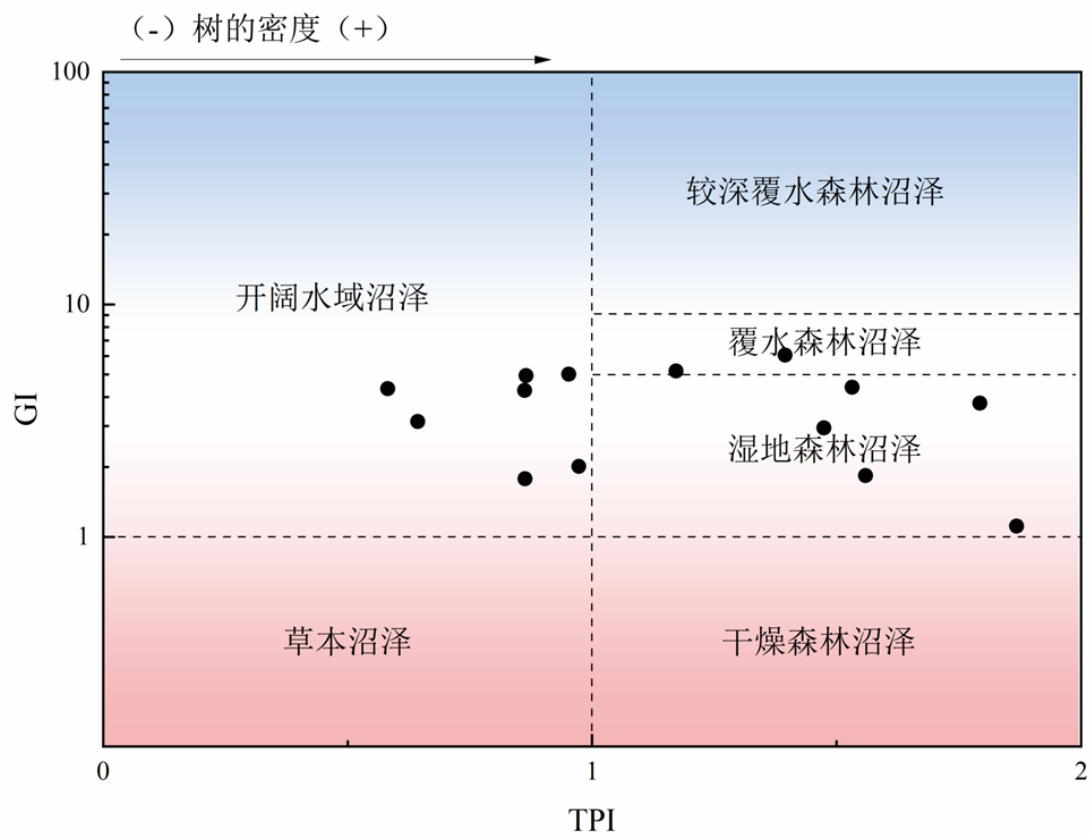


图 8 绥德 1H 井本溪组 8#煤储层 TPI-GI 煤相图

Fig. 8 TPI-GI coal phase diagram of Benxi Formation 8 # coal reservoir in Suide 1H well

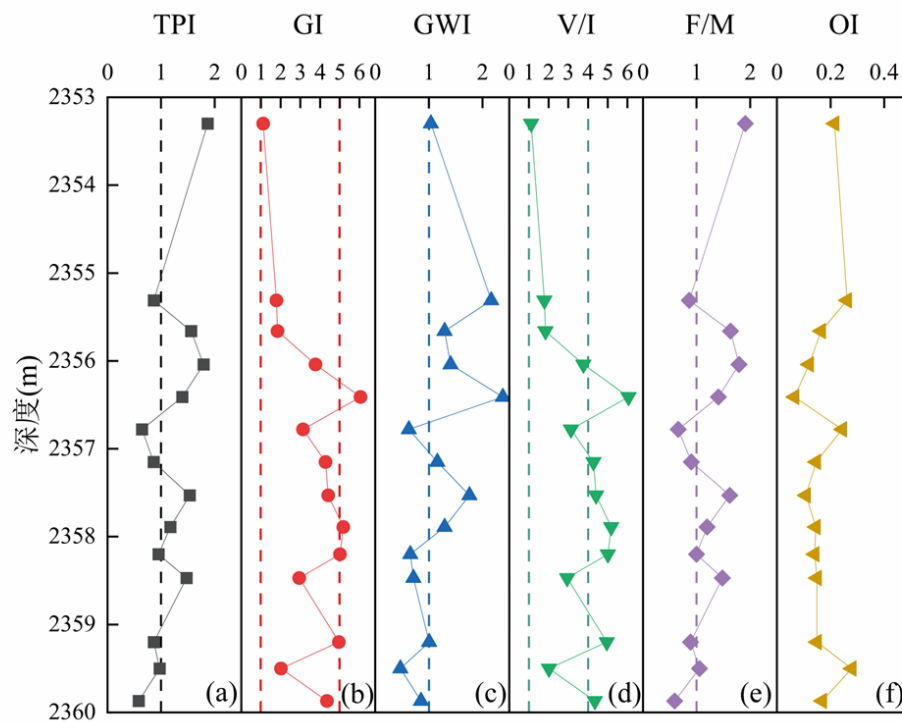


图 9 绥德 1H 井本溪组 8#煤储层煤相参数分析图

Figure 9 Coal phase parameter analysis of Benxi Formation 8 # coal reservoir in Suide 1H well

4.3 煤层孔隙发育特征及其控制因素

本文通过统计煤岩孔隙参数、显微组分、 R_o 、灰分与深度关系图如图 10 所示。从图 10 可以看出，在深度为 2356m 左右时，镜质组含量出现了大幅上升，后趋于平稳，灰分发生了大幅下降，微孔比表面积以及微孔体积发生了大幅上升，中孔比表面积、中孔体积、大孔比表面积、大孔体积都由峰值逐渐开始下降。且由图中可以看出，在上部煤层，即 2356m 以浅，镜质组含量较低时，灰分含量较高，微孔比表面积以及微孔体积较低，而中孔比表面积和中孔体积较大。在中下部煤层，即 2356m-2358.5m 之间，镜质组含量较高时，灰分含量较低，微孔比表面积以及微孔体积较高，而中孔比表面积和中孔体积较低。

而 R_o 在煤层的深度区间内并没有较大的变化。因此，本文通过进一步分析镜质组和灰分与孔隙参数的关系如图 10、11 所示。从图 10 和图 11 可知，灰分与微孔的比表面积呈现负相关，这可能是因为微孔主要为有机质孔，灰分含量的升高会导致有机质的含量降低，所以会导致其影响着微孔参数的变化，当有机质含量降低时，微孔的数量就会减少，所以微孔的孔比表面积和孔体积会减小。而灰分是煤岩中燃烧剩余的组分，主要反映煤中矿物含量，包括粘土矿物和方解石等，一部分大孔和中孔中可能充填部分的粘土矿物或方解石，导致较大孔隙的孔体积和孔比表面积减小。

由图 10 和图 11 可知，孔比表面积和孔体积随着镜质组含量的升高而降低，说明镜质体中的孔隙控制大部分的孔比表面积和孔体积。而惰质组中的孔隙主要由中孔和大孔组成，所以中孔和大孔的孔比表面积会减小。

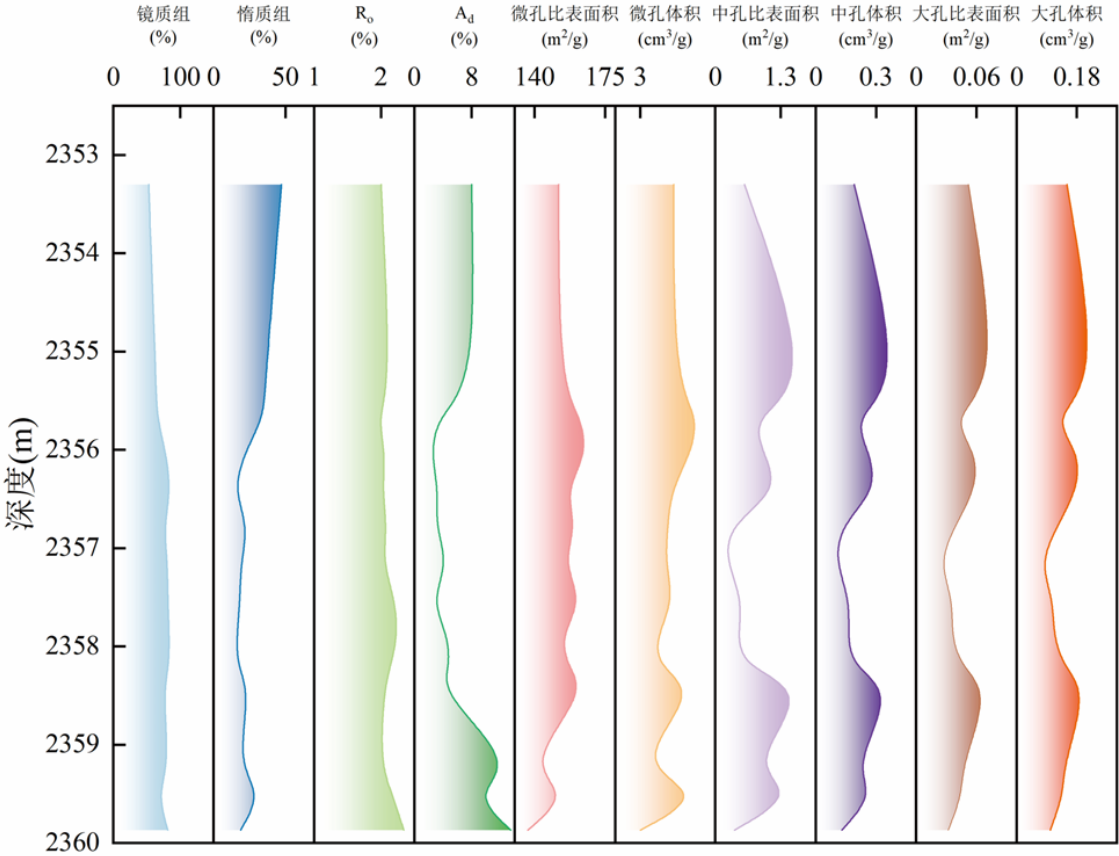


图 10 绥德 1H 井本溪组 8#煤有机岩石及孔隙特征

Fig. 10 Relationship between pore parameters, main controlling factors and depth of 8# coal in 1H Jingbenxi Formation, Suide

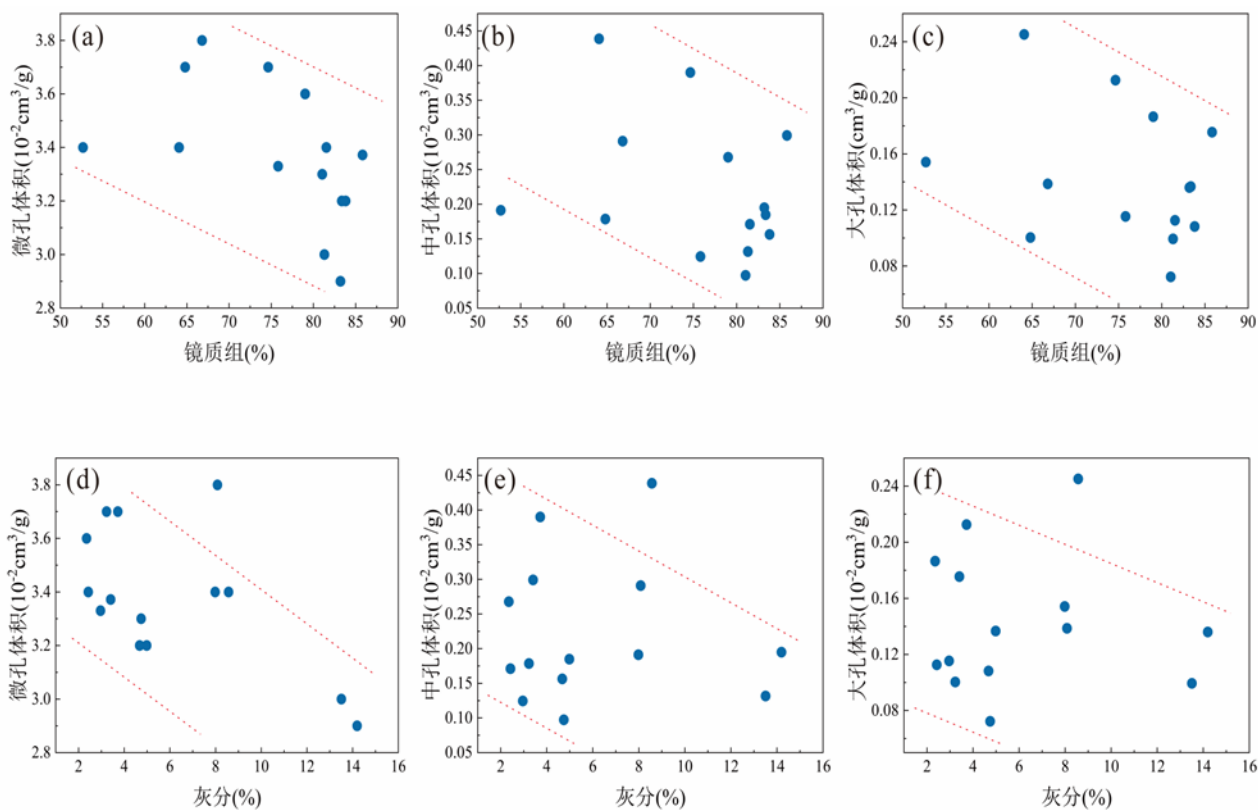


图 11 绥德 1H 井本溪组 8#煤镜质组、灰分与孔体积关系图

Fig. 11 Relationship between vitrinite, ash content and pore volume of Benxi Formation 8 # coal in Suide 1H well

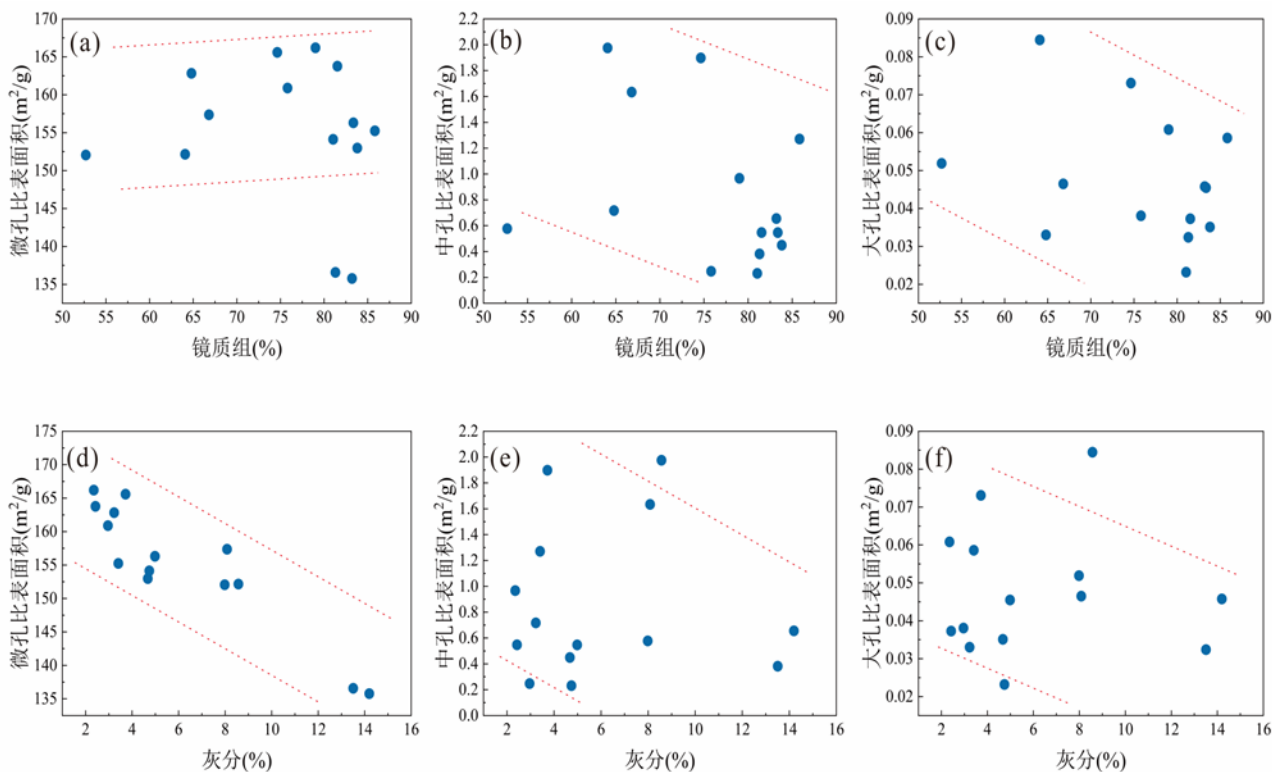


图 12 绥德 1H 井本溪组 8#煤镜质组、灰分与孔比表面积关系图

Fig. 12 Relationship between vitrinite, ash content and pore specific surface area of Benxi Formation 8 # coal in Suide 1H well

4.4 深部煤岩气赋存基本特征

深部煤储层由于其埋深大，导致地应力大，地层的压实作用变强，造成了独特的孔隙结构特征。通过核磁

共振结果、低温氮气吸附实验和低压二氧化碳吸附实验可以发现，绥德 1H 井本溪组 8#煤岩孔隙以微孔为主，中孔和大孔的数量较少。并且通过核磁共振实验可以发现，绥德 1H 井本溪组煤储层的连通性差，微孔大多为独立孔，为典型的低渗储层。

通过统计总含气量不同组成部分对其的贡献率可知(图 13)，绥德 1H 井本溪组 8#煤储层中煤岩气主要以解吸气为主，占比达 70%以上，说明煤岩气主要是以吸附的状态赋存在煤储层中。而通过低温氮气吸附实验和低压二氧化碳吸附实验结果(表 4 和表 5)可以发现，绥德 1H 井本溪组 8#煤岩储层中微孔贡献了最多的孔比表面积和孔体积，说明微孔提供了较多的吸附位点供甲烷分子以吸附状态赋存在煤储层中。

由图 14(a)可知，总含气量与微孔占比相关度大于解吸气与微孔占比的相关度，说明微孔含量并不是控制解吸气量的主要因素，即微孔虽然为甲烷提供了较多的吸附位点，可气体从微孔中运移的难度较大，对解吸气量贡献受限。而通过图 14(b)可知，灰分含量与总含气量以及解吸气量线性拟合有更好的相关性。这可能是因为煤中矿物质贡献部分孔隙空间。同时，无机孔与有机孔的连接能为煤层甲烷的赋存提供更多的运移通道，有利于甲烷气体的解吸及运移。灰分中含有矿物等支撑较大孔隙的物质。灰分增加，有机质含量减少，微孔主要存在于有机质中，就会导致总含气量会出现一定幅度的下降。不同煤岩类型的煤样表现出不同的微孔特征，光亮煤的最大吸附量要比暗亮煤大(刘玉龙等, 2016)。深部煤储层中高比例的光亮煤会促进甲烷的吸附。而通过对榆林 M172 井 8#煤进行大孔占比与含气量的关系分析可知，大孔体积占比与游离气含量正相关，大孔占比越高，游离气含量越高(赵伟波, 2024)。鄂尔多斯盆地中东部地区深部煤岩的吸附气占比平均为 77.33%，游离气占比平均为 22.67%，与煤岩微孔和宏孔的占比特征相似(何智同等, 2025)。深部煤储层中 1.5 nm 孔径的绝对吸附量显著高于其他孔隙，增大孔径会导致绝对吸附气量小幅下降，微孔整体含气量显著下降(季亮等, 2025)。而浅部煤层镜质体含量较深部煤层低，含气饱和度低，但是其孔隙多为中孔和大孔，连通性较好，有利于气体吸附、解吸、扩散(邢丽茹等, 2024)。但随着深度的逐渐加深，温度对于吸附气的负效应大于压力的促进作用，纳林河地区超 3000m 埋深煤储层中，煤岩吸附性能主要受温度的负效应控制，使得煤岩处于过饱和和吸附状态，部分天然气呈游离态赋存，游离气含量占比达 30%(侯雨庭等, 2024)。所以，绥德 1H 井以微孔为主的孔隙结构，为煤层气的赋存提供了较好的条件。但由核磁共振实验得到的中孔和大孔与微孔的较差连通性，导致其含气性主要以吸附气为主。

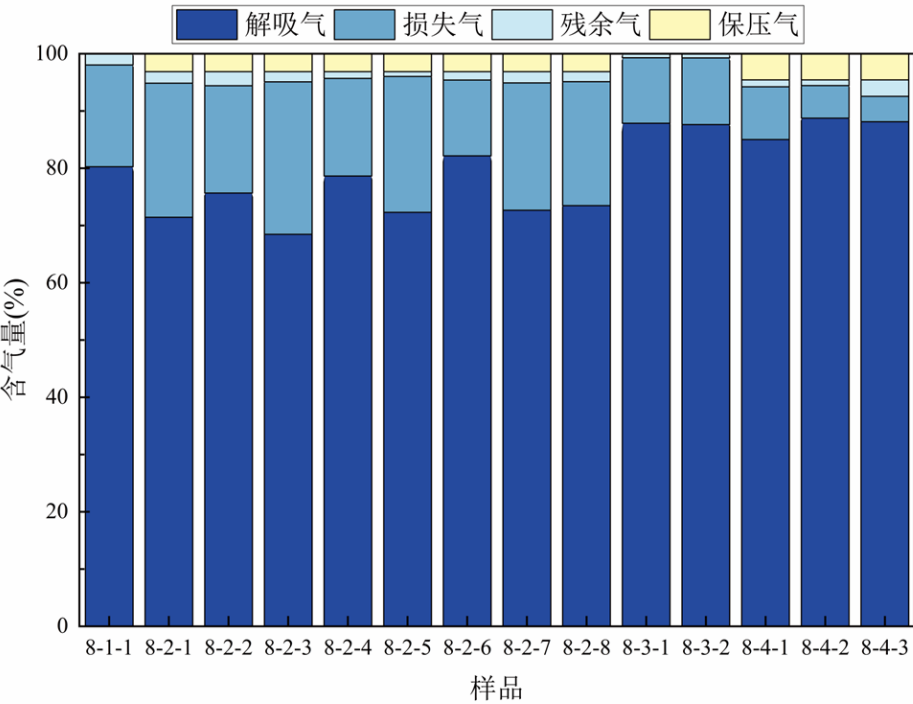


图 13 绥德 1H 井本溪组 8#煤含气量分布图

Fig. 13 Gas content distribution of 8 # coal in Benxi Formation of Suidi 1H well

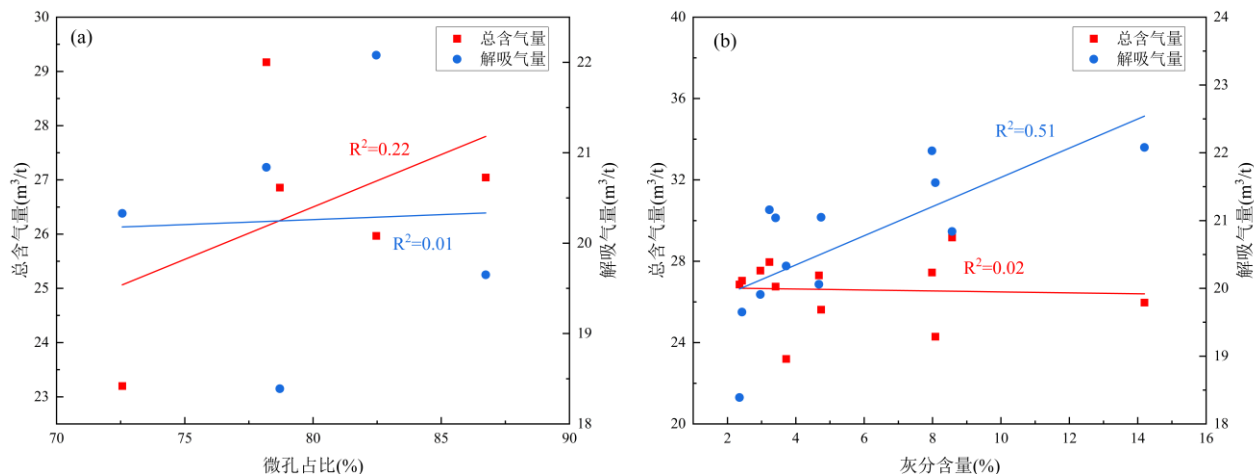


图 14 绥德 1H 井本溪组 8#煤微孔占比和灰分含量与总含气量和解吸气量关系图

Fig. 14 Relationship between the proportion of micropores, ash content, total gas content, and desorption gas content of 8 # coal in Benxi Formation of Suide 1H well

4.5 深部煤岩气成藏机理

鄂尔多斯盆地本溪组在绥德区域普遍发育，位于伊陕斜坡与晋西挠褶带过渡带，以平行不整合上伏于奥陶系地层。本溪组上部沉积岩性为砂岩、泥岩、粉砂岩及较厚的 8#煤储层，煤储层位于本溪组的顶部，局部夹灰岩，是上古生界主要的烃源岩之一。研究区构造平缓，无大规模断层，仅发育鼻褶、低幅度鼻状隆起等小构造，具有良好的自生自储的成藏条件。

绥德 1H 井本溪组 8#煤储层埋深超 2000m，煤层厚度为 8m 左右，保存条件好，沉积较连续。泥炭沉积环境为湿地森林沼泽和开阔水域沼泽，大规模的陆生植物的物质补充，并且受华北地台的快速海侵时间影响，具有良好的成煤环境，为煤岩气生成提供良好的物质基础(郭晓娇等)。储层煤岩 R_o 均值达 2.16%，处于中高阶烟煤区，具备造成沉积有机质规模热裂解成气的基本条件。由煤岩的显微组分统计得出煤岩的镜质组含量较高，平均 75.56%，其次为惰质组，均值为 24.44%，几乎无壳质组出现，同样证明煤岩经历过一定热改造。8#煤岩储层发育大致垂直层理面的两组割理，两组割理垂直或斜交，内生割理无充填，固定碳含量高，均值为 91.28%，固定碳含量较高有助于煤岩气的吸附，灰分产率较低，在 6.06%左右，煤质较好，是煤层气赋存的良好场所。

绥德 1H 井本溪组 8#煤储层的孔隙主要以微孔为主，微孔占比高达 80%左右，大量的微孔提高了煤储层的孔比表面积，有利于煤岩气的吸附。且储层的总含气量高，最高可达 $29.17\text{m}^3/\text{t}$ ，解吸气含量最高可达 $22.03\text{m}^3/\text{t}$ ，占总含气量的 70%左右，高解吸气含量指示储层具有良好的储气条件，具有较好的煤岩气储集空间。

绥德 1H 井本溪组 8#煤储层上覆太原组地层厚度为 40 米，是由海侵作用形成的灰岩和海退作用形成的泥岩和煤层，太原组下部发育巨厚灰岩夹薄泥层，灰、泥岩层粒度较细，整体为致密块状，渗透率较差，为煤储层提供了较好的封闭条件。其下伏地层奥陶系下统马家沟组地层厚度为 20m，是以蒸发作用为主的潮坪沉积，发育褐灰色白云岩、泥质白云岩及灰岩，夹膏云岩、盐岩，层内岩层厚度比较均一，此类岩性组合对 8#煤储层提供了良好的封闭和储存条件，有利于煤岩气的富集和成藏。

5 结论

(1) 绥德1H井本溪组8#煤岩储层为中-高阶、低含水量、中-低灰分、低挥发分、中-高硫烟煤。显微组分主要以镜质组为主，亚显微组分主要以均质镜质体、基质镜质体和半丝质体为主。煤储层沼泽类型主要为湿地森林沼泽和开阔水域沼泽，处于弱还原-还原环境。

(2) 绥德1H井本溪组8#煤储层孔隙主要以微孔为主，灰分含量是煤储层微孔的主控因素，灰分含量、镜质组含量与孔体积和孔比表面积呈现负相关关系。

(3) 绥德1H井本溪组8#煤储层含气量较高, 介于 $8.56\sim 29.17\text{ m}^3/\text{t}$ 之间, 平均值为 $24.28\text{ m}^3/\text{t}$ 。解吸气量是总含气量的主要组成部分。

(4) 绥德1H井本溪组8#煤储层以微孔为主的孔隙结构提供了较多的吸附位点供煤岩气以吸附状态赋存在煤储层中, 同时较高的中孔的大孔含量为煤层气提供的良好的赋存条件。并且其上覆的巨厚灰岩夹薄泥层和下伏的褐灰色白云岩、泥质白云岩及灰岩为煤岩气提供了良好的封闭和储存条件, 有利于煤岩气的富集和成藏。

References

- DUAN D, ZHAO C, QIN S, et al. 2011. Coal Petrological and Coal Facies Characteristics of the No.2 Seam From Huangling Mine, Shanxi Province, China. *Energ Explor Exploit*, 29: 647-665.
- Guo Q, Littke R, Zieger L. 2018. Petrographical and Geochemical Characterization of Sub-Bituminous Coals From Mines in the Cesar-Ranchería Basin, Colombia. *Int J Coal Geol*, 191: 66-79.
- Qin L, Li S, Zhai C, et al. 2020. Joint Analysis of Pores in Low, Intermediate, and High Rank Coals Using Mercury Intrusion, Nitrogen Adsorption, and Nuclear Magnetic Resonance. *Powder Technol*, 362: 615-627.
- Shi Y, He Y, Wan J, et al. 2024. The Primary Controlling Factors of the Occurrence State of Deep High-Rank Coalbed Methane in Eastern Ordos Basin. *Frontiers in Earth Science (Lausanne)*, 12.
- Sing K S W, Williams R T. 2004. Physisorption Hysteresis Loops and the Characterization of Nanoporous Materials. London, England: SAGE Publications, 22: 773-782.
- SING K, EVERETT D H, HAUL R, et al. 1985. Reporting Physisorption Data for Gas Solid Systems with Special Reference to the Determination of Surface-Area and Porosity (Recommendations 1984). *Pure Appl Chem*, 57: 603-619.
- Wang X, Pan J, Wang K, et al. 2020. Characterizing the Shape, Size, and Distribution Heterogeneity of Pore-Fractures in High Rank Coal Based On X-Ray CT Image Analysis and Mercury Intrusion Porosimetry. *Fuel (Guildford)*, 282: 118754.
- Wei Q, Li X, Hu B, et al. 2019. Reservoir Characteristics and Coalbed Methane Resource Evaluation of Deep-Buried Coals: A Case Study of the No.13-1 Coal Seam From the Panji Deep Area in Huainan Coalfield, Southern North China. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 179: 867-884.
- Zheng S, Yao Y, Liu D, et al. 2019. Nuclear Magnetic Resonance Surface Relaxivity of Coals. *Int J Coal Geol*, 205: 1-13.

中文参考文献

- 陈亮, 樊少武, 李海涛, 等. 2017. 煤体孔隙结构特征及其对含气性的影响. *煤炭科学技术*, 45: 126-132.
- 程建, 周小进, 刘超英, 等. 2023. 中西部大盆地重点勘探领域战略选区研究. *石油实验地质*, 45: 229-237.
- 翟迎铨, 李猛, 潘结南, 等. 2020. 平顶山煤田南部二叠系煤层煤相演化规律研究. *煤炭科学技术*, 48: 191-198.
- 樊祺章, 蔡益栋, 贝金翰, 等. 2020. 煤岩演化程度对煤储层孔裂隙结构的控制作用. *现代地质*, 34: 273-280.
- 郭晓娇, 王雷, 姚仙洲, 等. 深部煤岩地质特征及煤层气富集主控地质因素——以鄂尔多斯盆地东部M区为例. *石油实验地质*: 1-11.
- 郭彦如, 赵振宇, 徐旺林, 等. 2014. 鄂尔多斯盆地奥陶系层序地层格架. *沉积学报*, 32: 44-60.
- 何智同, 李勇, 侯雨庭, 等. 2025. 鄂尔多斯盆地本溪组8#煤煤岩气地质特征及富集控制因素. *天然气地球科学*: 1-26.
- 侯雨庭, 周国晓, 黄道军, 等. 2024. 鄂尔多斯盆地纳林河地区煤岩气成藏地质特征. *石油与天然气地质*, 45: 1605-1616.
- 季亮, 聂志宏, 孙政, 等. 2025. 深部煤储层吸附气与游离气赋存的温压作用. *大庆石油地质与开发*: 1-11.
- 李斌, 杨帆, 张红杰, 等. 2024. 神府区块深部煤层气高效开发技术研究. *煤田地质与勘探*.
- 李可心. 2020. 临兴西深部煤层气储层特征及气水产出机理. *中国矿业大学*.
- 李清. 2014. 山西延川南煤层气田2号煤层煤相研究——煤层气开发选区意义. *石油实验地质*, 36: 245-248.
- 李松, 汤达祯, 许浩, 等. 2016. 深部煤层气储层地质研究进展. *地学前缘*, 23: 10-16.

- 李祥春, 李忠备, 张良, 等. 2019. 不同煤阶煤样孔隙结构表征及其对瓦斯解吸扩散的影响. 煤炭学报, 44: 142-156.
- 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: 1-21.
- 刘迈杰. 2021. 保德区块煤储层物性及气体吸附解吸特性研究. 中国地质大学(北京).
- 刘玉龙, 汤达祯, 许浩, 等. 2016. 煤岩类型控制下的微观孔隙结构及吸附特征研究. 煤炭工程, 48: 107-110.
- 马家亮, 高政, 张佳为, 等. 2017. 阴山矿区南阳坡6#煤的煤岩特征及古环境研究. 煤炭技术, 36: 93-95.
- 聂万才, 张廷山, 王铭伟, 等. 2024. 海陆过渡相煤系页岩孔隙分形特征及影响因素——以沁水盆地北部太原组为例. 沉积学报, 42: 1047-1057.
- 秦勇. 2023. 中国深部煤层气地质研究进展. 石油学报, 44: 1791-1811.
- 唐淑玲, 汤达祯, 杨焦生, 等. 2023. 鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块深部煤储层孔隙结构特征及储气潜力. 石油学报, 44: 1854-1866.
- 王成旺, 刘新伟, 李曙光, 等. 2024. 大宁—吉县区块深部煤层气富集主控因素分析及地质工程甜点区评价. 西安石油大学学报(自然科学版), 39: 1-9.
- 王志壮, 吴鹏, 孙强, 等. 2024. 临兴区块深部煤层气井生产特征及影响因素. 煤田地质与勘探.
- 邢丽茹, 张洲, 任峻杉, 等. 2024. 准噶尔盆地深部与浅部煤层气储层物性特征对比分析. 中国煤炭, 50: 9-17.
- 徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 2022. 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. 中国海上油气, 34: 30-42.
- 徐志伟, 辛沐蓉, 王钰婷, 等. 2022. 水位影响泥炭沼泽土壤有机碳分解的生物化学机制研究进展. 生态学报, 42: 7729-7739.
- 杨昌永, 常会珍, 邵显华, 等. 2019. 扫描电镜下不同煤体结构煤微孔隙特征研究. 煤炭科学技术, 47: 194-200.
- 杨青, 李剑, 田文广, 等. 2020. 海拉尔盆地褐煤全孔径结构特征及影响因素. 天然气地球科学, 31: 1603-1614.
- 杨延辉, 李梦溪, 张辉, 等. 2024. 沁水盆地南部中深部煤层气富集高产控制因素与有利区评价. 天然气地球科学.
- 姚红生, 陈贞龙, 何希鹏, 等. 2022. 深部煤层气“有效支撑”理念及创新实践——以鄂尔多斯盆地延川南煤层气田为例. 天然气工业, 42: 97-106.
- 张吉振, 李贤庆, 邹晓艳, 等. 2021. 海陆过渡相煤系页岩孔隙结构特征及其对含气性的影响. 地球化学, 50: 478-491.
- 赵伟波. 2024. 鄂尔多斯盆地深部本溪组煤孔隙特征及成因探讨——以榆林M172井8~#煤为例. 天然气地球科学, 35: 202-216.
- 赵伟波, 刘洪林, 王怀厂, 等. 2024. 煤层微观孔隙特征及沉积环境对孔隙结构的控制作用-以鄂尔多斯盆地8号煤层为例. 煤炭科学技术, 52: 142-154.
- 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: 43-51.
- 周龙刚. 2023. 鄂尔多斯盆地神府南区深部煤层气有利区预测. 山东煤炭科技, 41: 173-176.
- 曹煜彤. 2024. 鄂尔多斯盆地榆林东区深部煤系气地质特征及造穴卸压开发模式. 中国矿业大学.