

引用格式: 林潼, 张华, 李攀, 刘俊田, 杨润泽, 张鹏翼, 杜晓江. 吐哈盆地厚煤层形成机制与煤岩气甜点段分布[J/OL]. 沉积学报, 2025, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.059. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.059.[LIN Tong, ZHANG Hua, LI Pan, LIU JunTian, YANG RunZe, ZHANG PengYi, DU XiaoJiang. Formation mechanism of thick coal seams and distribution of coal-rock gas sweet spots in the Tuha Basin[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.059. CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.059.]

吐哈盆地厚煤层形成机制及其煤岩气甜点段预测

林潼¹, 张华^{2, 3}, 李攀¹, 刘俊田², 杨润泽¹, 张鹏翼², 杜晓江⁴

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

2. 中国石油吐哈油田分公司 勘探开发研究院, 新疆哈密 839009

3. 怀柔实验室新疆研究院, 乌鲁木齐 830000

4. 中国石油西部钻探工程有限公司 吐哈钻井公司, 新疆鄯善 838200

摘要 【目的】煤岩气作为一种新型的非常规天然气, 近年来在中西部盆地勘探中取得了重大突破。目前对煤岩气的研究主要聚焦于煤岩的生气能力和聚气能力方面, 而对煤岩气赋存的载体——厚煤层的形成机制与分布规律研究明显不足, 制约了对有利煤岩气区带的优选, 特别是西部地区中低阶厚煤层中甜点段的优选面临困难。【方法】对吐哈盆地井下西山窑组煤岩取心样品, 开展了显微组分鉴定、主微量元素分析和岩石热解分析, 以及部分样品的工业分析、总有机碳含量和镜质体反射率分析, 在此基础上对比了厚煤层中煤岩的沉积环境、煤相特征以及煤岩气甜点段的关键参数。【结果】煤岩显微组分分析显示, 吐哈盆地西山窑组不仅在平面上发育多种类型的煤相, 在同一位置的厚煤层中也存在多种类型的煤相叠加特点。煤岩主微量元素对比分析显示, 厚煤层中存在多期水进水退的旋回特征。【结论】研究认为, 水进水退过程的不同阶段, 其成煤环境各不相同, 造成了不同煤相间煤岩品质的差异, 而厚煤层的成因正是多期水体上升和下降造成的不同类型煤相的煤岩纵向叠置形成的。侏罗纪时期, 吐哈盆地为山间陆相盆地, 不同的沉积相带受水体深浅的影响, 泥炭的生产速率与可容纳空间的增长速率比值差异明显, 造成了煤层发育与分布的差异性, 下三角洲平原相和浅湖相是西山窑组煤岩堆积的有利地带。在本区厚煤层中可识别出水淹型界面和水退过程中的可容纳空间转化面, 其中, 水退型转换面是煤岩有机质含量最高的层段, 是煤岩气勘探的甜点段。

关键词 煤岩气; 厚煤层成因; 吐哈盆地; 西山窑组; 煤岩甜点段; 水进水退

第一作者简介 林潼, 男, 1980 年出生, 博士, 高级工程师, 储层沉积学, E-mail: lintong1980@163.com

中图分类号: P512.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0550 (2025) 00-0000-00

0 引言

厚煤层(单层厚度介于 3.5~8 m)和巨厚煤层(单层厚度>8 m)作为重要的地质碳库和能源资源, 其成因机制一直是煤田地质学关注的问题(Dai *et al.*, 2020; Shao *et al.*, 2020), 其研究认识对煤炭资源的勘查和开发具有重要的指导意义。通过理解厚煤层的形成过程, 可以更准确地预测煤炭资源的分布, 提高煤炭资源的勘探效率(吴昕等, 2016; 张强骅等, 2017; 王东东等, 2018)。近年来, 伴随着我国对天然气需求的不断增大, 煤系天然气的勘探开始由浅层煤层气向深层煤岩气领域转变, 并且已经在深层厚煤层中(埋藏深度大于 1 500 m)

收稿日期: 2025-07-08; 收修改稿日期: 2025-09-18

基金项目: 中国石油青年科技专项(2024DQ03025); 新疆维吾尔自治区重点研发专项项目(2024B03002); 新型油气勘探开发国家科技重大专项(2024ZD1406000)

取得了煤岩气勘探的重大成功（牛小兵等，2024；邹才能等，2025）。2024 年全国煤岩气产量达 25 亿立方米，2025 年诞生了首个 200 万吨级的煤岩气气田——大吉气田，剑桥能源周更是将煤岩气誉为“继页岩革命后的煤岩革命”。虽然煤的能源属性逐渐由固态形式向气态形式转变，但是厚煤层、超厚煤层的成因分析在油气地质勘探领域受到了比以往更加强烈的重视（秦勇，2023；赵喆等，2024；毛新军等，2024），特别是厚煤层中煤岩气甜点段的分布与成因（桑树勋等，2023；刘翰林等，2024），成为深层煤岩气效益勘探亟须解决的关键问题。

全球范围内，厚煤层广泛分布（胡社荣等，2011；王东东等，2016）。吐哈盆地沙尔湖地区 Shamei-1 井和大南湖地区的 Damei-1 井，中侏罗统西山窑组单层煤厚分别达 138 m 和 107 m，是我国典型的陆相山间盆地厚煤层沉积的代表。针对厚煤层成因，前人开展了广泛的研究和探讨，目前在理论方面存在着“原地堆积学说”和“异地堆积学说”两种观点（王国力等，1995；吴冲龙等，1996，2003）。早期理论认为，厚煤层形成于泥炭堆积速率与基底沉降速率长期均衡的稳定环境（Bohacs and Suter, 1997），泥炭沼泽需在数万年甚至百万年内保持水位与植被生长的动态平衡，泥炭层经压实后形成厚煤层。然而，现代泥炭沼泽单层最大厚度仅 20 m，若按泥炭—煤压缩比 6:1 计算，形成 40 m 厚煤层需原始泥炭厚 240 m，远超现代观测值（邵龙义等，2022）。这一矛盾促使学者提出多期次叠加模型，认为厚煤层由多个泥炭沼泽垂向叠置形成，其间存在沉积间断面（Jerrett et al., 2011；Shearer et al., 1994；邵龙义等，2022）。部分学者提出厚煤层可能通过植物碎屑的异地搬运再沉积形成（吴冲龙等，2003），而在超厚煤层中发育泥炭重力流沉积，表明成煤物质也可能经湖泊搬运分异后二次堆积形成（吴冲龙等，1996，2003）。明确厚煤层的成因机制和模式对深化煤岩气的进一步勘探有着重要的指导作用。因此，本文通过对吐哈盆地侏罗系西山窑组厚煤层成因机制的分析，以期能够指导我国陆相煤岩气的勘探方向，特别是厚煤层中煤岩气甜点段的分布规律，为加快我国煤岩气勘探开发提供有益的帮助。

1 地质背景

吐哈盆地位于华北—塔里木、西伯利亚和哈萨克斯坦三大板块的汇聚边缘区，经历了裂谷、断陷—断拗转化、类前陆多个演化阶段（甄宇等，2024）。其中，中、新生代是吐哈盆地类前陆盆地形成的主要时期，在盆地的北部和西南部发育山前拗陷区，沉积了上三叠统到下侏罗统、中侏罗统多套储集体和烃源岩。侏罗纪是盆地最为主要的沉降与充填时期，发育辫状河三角洲和浅湖沉积体系，在中下侏罗统水西沟群形成了一套煤系建造层（图 1），是

吐哈盆地证实的最重要的烃源岩层系（倪云燕等，2019），也是近年来近源勘探和深层煤岩气探索的主要层系（支东明等，2024）；中晚侏罗世沉积的巨厚湖相泥岩为下部的油气藏提供了重要的区域性盖层，在这些条件的共同作用下，整个侏罗纪地层是吐哈盆地油气勘探最为富集的层系。

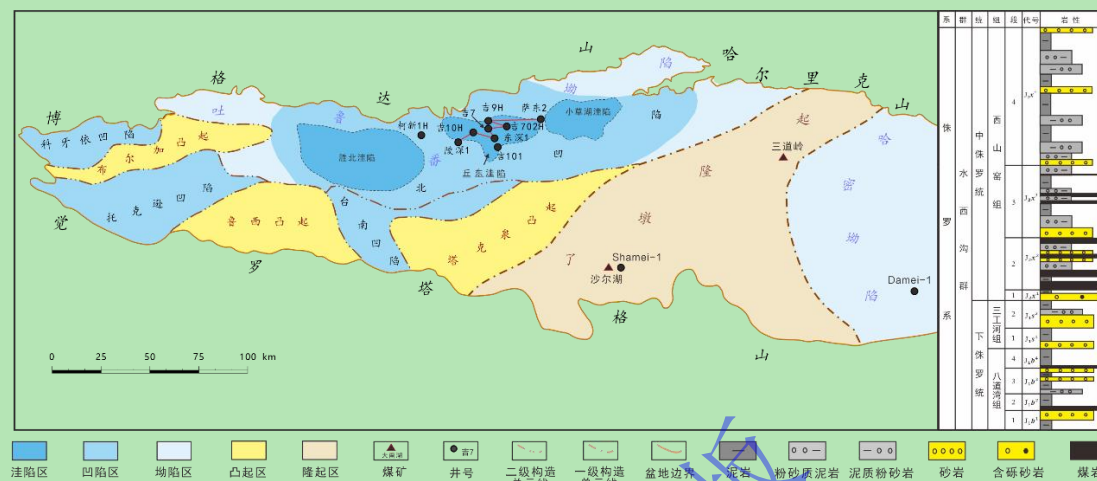


图 1 吐哈盆地构造单元划分及水西沟群地层柱状图

Fig.1 Tectonic units in the Tuha Basin and stratigraphic histogram of the Shuixigou Group

水西沟群自下而上划分为八道湾组、三工河组和西山窑组，煤层位于八道湾组和西山窑组内，西山窑组煤层在全盆地广泛分布，沉积的厚度中心位于盆地的北部以及盆地南部的浅层地区（图 2a）；八道湾组煤层主要分布在盆地的西部（图 2b）。西山窑组煤层由于单层厚度大、分布面积广、埋藏相对浅，是盆地深层煤岩气勘探的主要目的层。煤层最厚的层段位于西山窑组的二段和三段（图 1），其中西二段煤层单层厚度大、煤层多，特别是西二段底部单煤层厚度在 15~60 m 之间，全区发育稳定，是目前煤岩气钻探的首选目的层；西三段整体煤层厚度小、层数少，以煤泥和煤砂互层为主。

2 样品来源、测试方法与结果

近年来,为识别煤岩品质和煤岩煤相,为煤炭开采和利用提供依据,前人对盆地东部三道岭煤矿和南部沙尔湖煤矿的露头煤层开展过详细的采样与分析工作(李玉坤和李广,2019;马荣等,2023)。然而,针对盆地厚煤层的成因和煤岩气甜点段的研究,尚未开展过具体的分析。本次研究,首次利用盆内凹陷区唯一一口西山窑组煤层段连续取心的东深1井和仅有的一口针对多煤层段开展取心煤岩含气量测试的柯新1井,分别开展厚煤层成因与甜点段特征分析。同时对凹陷内少数取心井收获的部分西山窑组煤样开展了显微组分分析,旨在为全区煤岩煤相的判识提供依据。虽然东深1井连续取心段并不是西二段最厚煤层,但是该取心段位于西二段内,其沉积环境与下部最厚煤层的沉积环境一致,整体为水体震荡上升时期的

沼泽相,层段内煤层多,煤层与泥岩和粉砂质泥岩互层,砂岩整体不发育。本次研究对东深1井煤岩样品开展了煤岩显微组分分析、热解分析和主微量元素分析;对柯新1井含气量测试的煤岩样品开展了显微组分分析、热解分析、总有机碳(TOC)含量、镜质体反射率(R_o)和工业分析;对碎屑岩取心段携带的少量煤层样品井,如吉101井、吉7井和陵深1井,仅开展煤岩显微组分分析。通过对东深1井厚煤层的成因机制研究,结合柯新1井甜点段特征参数的分析,进而识别煤岩气甜点段的分布规律,为后期盆地深层中低阶煤岩气的勘探提供指导。

煤岩显微组分的鉴定参考《煤的显微组分和矿物测定方法》GB/T 8899—2013,利用Axioskop 40偏光显微镜完成;微量元素的分析依据《硅酸盐岩石化学分析方法 第30部分:44个元素量测定》GB/T 14506.30—2010,利用ICAP RQ等离子体质谱仪完成;煤岩的总有机碳测定依据《沉积岩中总有机碳测定》GB/T 19145—2022,利用CS230红外碳硫仪和AL204电子天平完成;煤岩的热解分析依据《岩石热解分析》GB/T 18602—2012,通过YQ-VIIA油气显示评价仪和AL204电子天平完成;煤的镜质体反射率和泥岩镜质体反射率测定分别依据《煤的镜质体反射率显微镜测定方法》GB/T 6948—2008和《沉积岩中镜质体反射率测定方法》SY/T 5124—2012,利用Axio Scope.A1偏光显微镜和MSP 400分光光度计完成;工业分析采用5E-MAG6700全自动工业分析仪依据GB/T 30732—2014完成分析。分析测试的主要数据见表1、表2和图3、图4。其中,煤相的评价参数TPI(植物保存指数)反映了植物组织的破坏程度以及木本植物在成煤植物中的比例;GI(凝胶化指数)指示泥炭形成早期的水位变化特征和植物遗体后期遭受凝胶化作用的程度。两者的计算参见文献(Diessel, 2007; 邵龙义等, 2021), TPI值越大,反映成煤植物中木本植物所占比例越大;GI值高表明水位相对较高,GI值低表明水位相对较低。

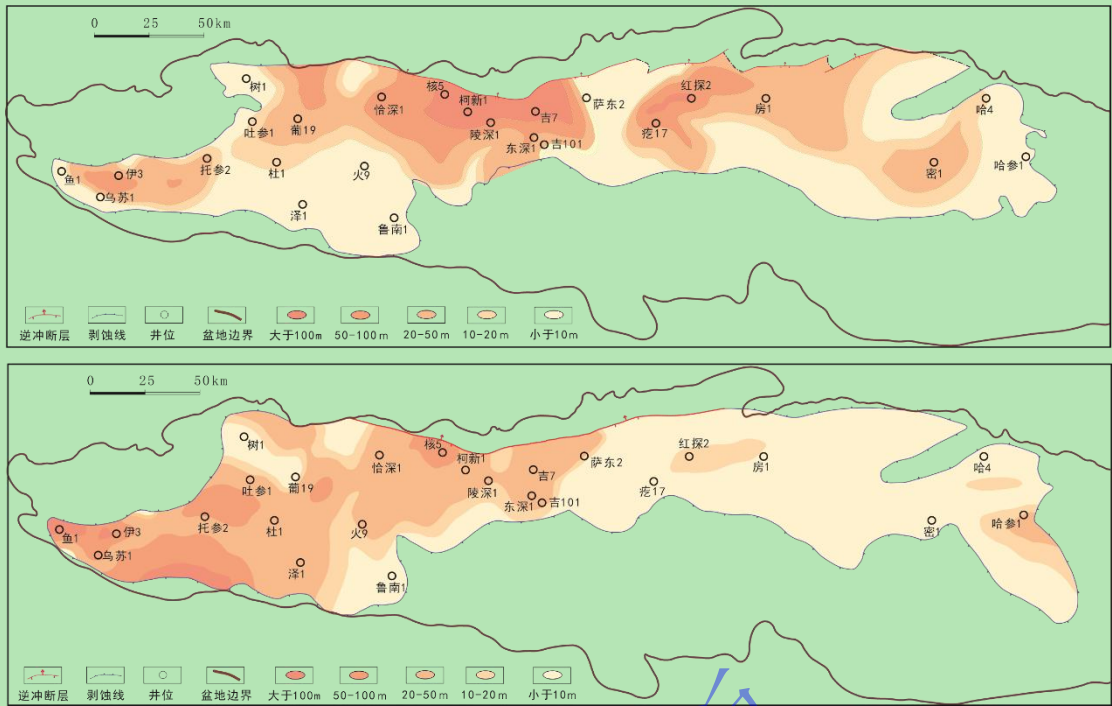


图2 吐哈盆地水西沟群西山窑组(a)和八道湾组(b)煤层累积厚度分布图

Fig.2 Cumulative thickness distribution map of Shuixigou Group coal seams in Tuha Basin:
(a) Xishanyao Formation; (b) Badaowan Formation

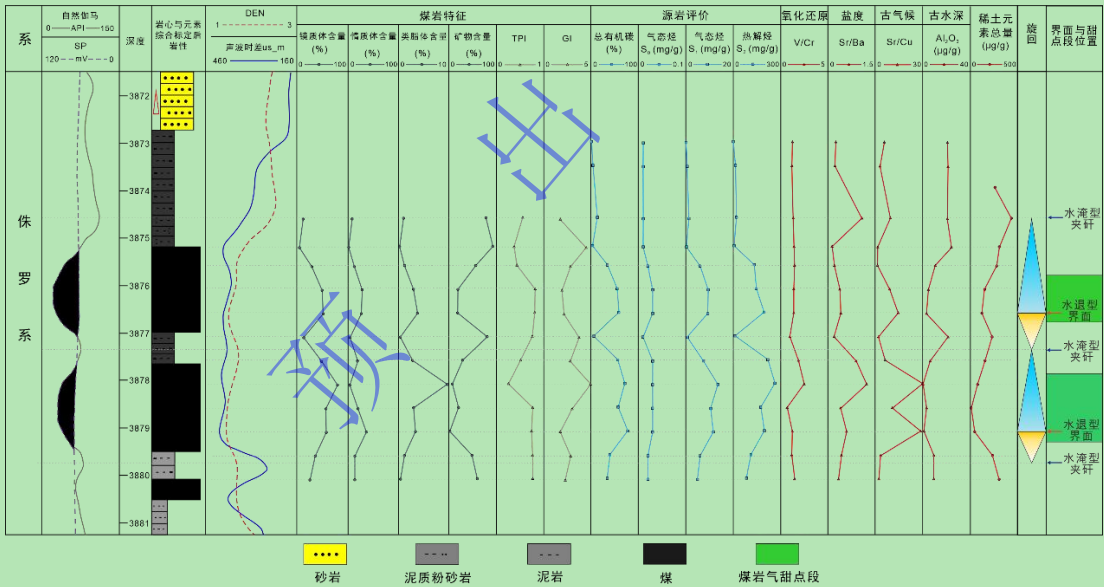


图3 东深1井西山窑组煤层取样层段各项分析参数纵向分布规律

Fig.3 Longitudinal distribution of analysis parameters in the coal seam sampling interval of the Xishanyao Formation, well Dongshen 1

3 讨论

3.1 煤岩煤相特征

吐哈盆地井下西山窑组煤岩煤相整体为低位沼泽相,水体较浅,成煤植物以草本为主(图4),煤岩宏观特征表现为半暗煤—半亮煤(图5)。但是在丘东洼陷的中部吉7井西二段

底部厚煤层中钻井取得部分煤岩岩心，TPI-GI 图版投影显示为较深覆水森林沼泽相，其煤岩岩心也表现为本区少有的半亮煤特征（图 5a），同区的吉 101 井煤岩岩心的宏观类型也为半亮煤（图 5b），其投影（图 4）与吉 7 井一致，二者均位于较深覆水森林沼泽相。由于盆地内井下煤层取心少，无法通过大量的数据准确判断吉 7 和吉 101 井煤层纵向上煤相变化特征，但至少说明丘东洼陷中部在西山窑组煤层形成时期存在过较深覆水森林沼泽相。柯新 1 井西二段煤层的岩心煤相分析显示，煤岩数据点主要落在覆水草本沼泽相和潮湿—干燥森林沼泽相，TPI 和 GI 的数据具有较好的线性相关性，说明柯新 1 井该煤层煤岩发育多种类型的煤相特征（图 5c），并且具有从干旱到潮湿、从浅水到覆水、从木本到草本交替演变的规律，揭示了柯新 1 井区西二段厚煤层存在不同煤相条件下的煤岩纵向叠置现象。陵深 1 井的三个数据点分布也显示出煤层具有类似的特征。东深 1 井单煤层的连续取心煤岩显微组分分布规律显示，该井煤层全部为覆水草本沼泽相，但是 TPI 和 GI 的数据仍表现出差异性，特别是反映水体深度指标的 GI 分布区间在 1.7~26.6，表明存在水体的深浅变化。从该井段煤岩岩心宏观特征来看，半暗煤、半亮煤和光亮煤均有发育（图 5d），以半暗煤居多，显示出聚煤环境总体以覆水草本沼泽相为主，但是受成煤环境变化的影响，发育了多种的煤岩类型。

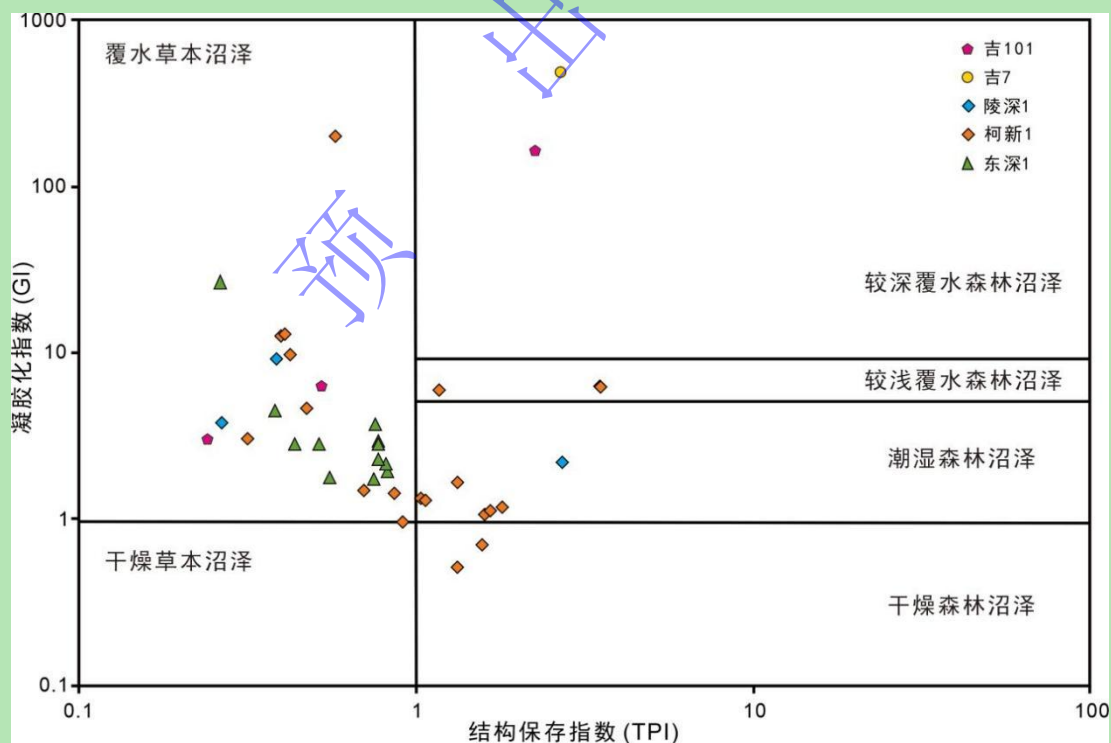


图 4 吐哈盆地西山窑组煤岩的煤相判识图

Fig.4 Coal facies identification map of coal rock in the Xishanyao Formation, Tuha Basin

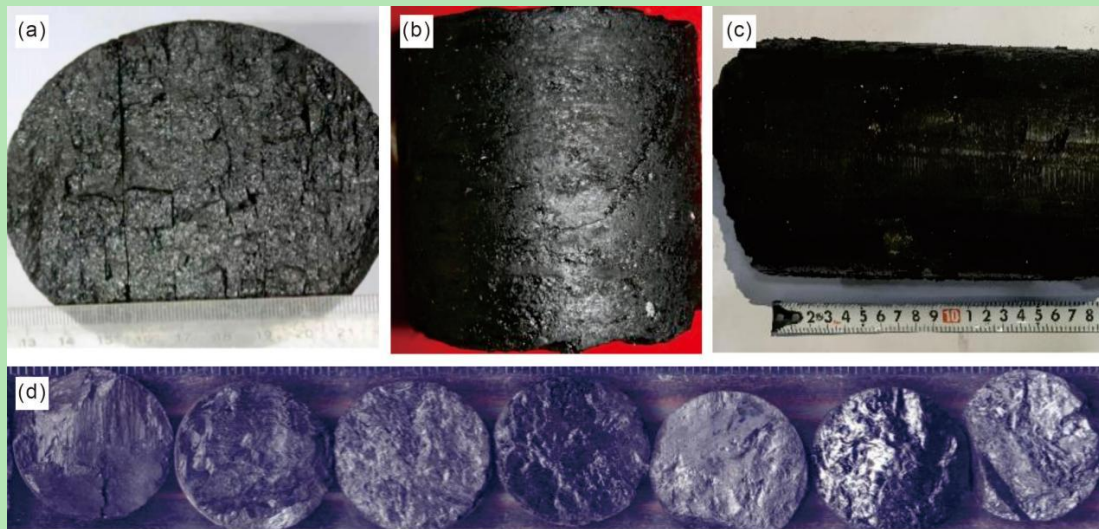


图5 吐哈盆地西山窑组煤岩特征

(a) 吉7井, 3 878.1 m, 半亮煤、亮煤, 面割理和端割理; (b) 吉101井, 3 843.2 m, 半亮煤; (c) 柯新1井, 3 309.4 m, 半亮煤—半暗煤, 碎裂状; (d) 东深1井, 3 875.0 m, 半暗煤、半亮煤和光亮煤。

Fig.5 Characteristics of coal and rock in the Xishanyao Formation, Tuha Basin

表 1 东深 1 井西山窑组煤层取样点各项分析参数表

Table 1 Analysis parameters of coal seam sampling points in the Xishanyao Formation, well Dongshen 1

采样深度 /m	岩性	煤岩生烃潜量				煤岩显微组分 /%					煤相		主量元素含量 /%					微量元素含量/ (μg/g)				稀土元素含量
		总有机碳/%	气态烃 S ₀ /(mg/g)	液态烃 S ₁ /(mg/g)	热解烃 S ₂ /(mg/g)	热解烃峰温 T _{max} /°C	镜质组	惰质组	类脂组	矿物含量	TPI	GI	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	V	Cr	Cu	Sr	Ba	ΣREE μg/g	
3 871.05	泥	1.03	0.01	0.10	0.95	441	/	/	/	/	/	20.99	2.48	0.94	114.99	92.61	23.86	132.53	528.29	210.79		
3 871.55	岩	3.97	0.01	0.62	15.35	440	/	/	/	/	/	21.90	2.76	0.94	133.61	110.33	45.50	132.09	609.13	262.42		
3 872.65	煤和碳质泥岩	13.30	0.01	1.32	20.33	440	12.6	8.2	1.0	78.2	0.56	1.77	21.01	2.10	0.87	140.10	104.65	176.76	1711.38	1 603.58	434.95	
3 873.25		3.06	0.01	0.26	5.40	442	5.4	1.2	0.2	93.2	0.38	4.50	24.43	3.01	0.89	123.14	85.56	81.50	114.99	854.46	307.60	
3 873.65		34.60	0.02	5.99	133.18	435	29.6	12.4	1.2	56.8	0.44	2.85	11.29	1.49	0.69	112.11	75.02	94.27	135.17	650.70	280.38	
3 874.15		55.20	0.03	9.46	146.68	435	49.4	28.4	3.0	19.2	0.82	1.92	5.10	1.03	0.48	79.58	57.39	48.92	444.29	1 159.77	152.90	
3 874.65		58.90	0.03	9.29	195.59	434	51.4	25.8	3.8	19	0.81	2.15	3.64	0.50	0.32	58.29	41.51	39.53	571.57	1 379.94	123.36	
3 875.15		6.20	0.01	0.65	13.32	443	14.2	3.8	0.4	81.6	0.76	3.74	21.84	2.24	0.94	92.51	94.33	55.37	111.14	577.45	231.99	
3 875.65		56.40	0.03	7.43	219.52	437	48.4	19.4	2.8	29.4	0.52	2.81	6.52	0.56	0.60	61.83	32.95	34.31	214.17	238.57	156.61	
3 876.15		71.60	0.03	13.57	264.48	438	79.4	3.4	9.8	7.4	0.26	26.60	1.14	0.05	0.09	40.14	16.12	17.48	806.77	655.13	78.60	
3 876.65	岩	57.40	0.03	10.49	175.30	437	57	19.6	3.0	20.4	0.78	2.95	3.37	0.48	0.27	5.99	8.53	6.35	68.61	173.22	12.76	
3 877.15		77.50	0.03	11.68	197.83	439	57.6	36.6	3.4	2.4	0.75	1.74	0.69	0.03	0.06	12.83	10.26	11.46	328.04	554.35	48.88	
3 877.65		40.20	0.02	6.02	113.25	436	36.4	13.4	1.2	49	0.77	2.83	9.27	1.59	0.69	80.56	68.28	71.44	244.62	578.46	236.48	
3 878.15		34.20	0.02	4.91	83.54	435	26.2	13.2	0.4	60.2	0.77	2.31	9.34	1.39	0.84	168.34	113.31	61.44	133.05	406.59	305.84	

3.2 煤岩气甜点段特征

煤岩气是近年来在深层煤岩储层中发现的一种新型非常规天然气，其定义为“煤岩自身生成或其他气源运移而赋存于煤岩中，游离态和吸附态并存，游离气含量高，通过储层改造可快速产气并能工业化开采的烃类气体”（李国欣等，2024）。与传统的煤层气相比，煤岩气埋深多超过 2 000 m，具有“高压、高地温、高含气、高饱和、高游离”的“五高”地质特征，且游离气占比高达 20%~50%（赵喆等，2024）。其开发方式更接近页岩气和致密气，无需长期排水降压，依靠地层能量即可快速产气，因此煤岩气甜点段评价与页岩气和致密气甜点评价一样重要，都需要在大套的储集载体中选取优势富集段（甜点段）进行钻探与生产。由于煤岩气赋存机理复杂，目前对其赋存和渗流机制尚不明确（康永尚等，2019；杨焦生等，2023；熊先钺等，2023），煤岩气的气源既有自生型又有他源充注型或者两者的混合型，煤岩气的赋存方式既有吸附态又有游离态（李勇等，2023），既不完全与浅层煤层气一样，又与页岩气和致密气有着本质的区别。如何评价煤岩的甜点段是目前煤岩气勘探初期所面临的关键问题。通过鄂尔多斯盆地煤岩气成功的勘探事例（李勇等，2023；唐淑玲等，2023；徐凤银等，2023），目前普遍认为较高的煤阶（ $R_o > 1.4\%$ ）、煤岩原生结构好、顶底板条件优越是煤岩气富集三个主要因素，其中煤岩的成熟度是煤岩气富集最关键的因素。因此，针对中高阶煤岩的评价更多地选择煤岩的原生结构和保存条件开展研究，对煤岩的生烃潜力并未做过多考虑。然而，我国的西部地区整体以中低阶煤岩为主（陈峰和宋普洪，2023；陈旋等，2024），煤岩成熟度大多低于 1.2%，以吐哈盆地为例，西山窑组主力煤层的镜质体反射率主体分布在 0.6%~1.0%之间，尚未达到生气的高峰阶段，其现阶段的生气能力仅为鄂尔多斯盆地本溪组 8#煤的 1/3。因此，面对西部地区极其丰富的中低阶煤炭资源，如何寻找厚煤层中的甜点段是实现西部地区煤岩气勘探突破的关键问题。

本次研究对吐哈盆地柯新 1 井煤岩含气量与各种参数进行了相关性分析（表 2、图 6），结果显示中低阶煤岩的总含气量与热解参数、总有机碳含量具有显著的正相关性，而与前人通过鄂尔多斯盆地相关研究得出的灰分产率与含气量正相关的观点（牛小兵等，2024），有着明显的差异，说明针对中低阶煤岩的甜点评价，灰分产率并不能反映出与煤岩含气量的关系。热解参数主要体现两个方面的内容，一是煤岩本身的生气潜力，二是生烃温度。而中低阶煤岩本身成熟度就偏低，因此以热解参数所反映的煤岩自身的生气潜力来评价中低阶煤岩的甜点段有一定可操作性。

从柯新 1 井各类参数与总含气量之间关系表可以看出（表 2），煤岩的总有机碳含量，特别是有效碳含量（能够参与热解反应并转化为烃类的碳）与煤岩的总含气量之间关系最紧

密,说明煤岩在中低演化条件下,自身的生烃潜力才是形成煤岩气富集的最主要因素。通过柯新1井煤岩取心段总有机碳与煤岩特征参数之间的相关性可以发现(图6),总有机碳与煤岩中的镜质体含量具有一致的纵向演变趋势,两者之间的线性相关系数 $R=0.62$ 。前人通过显微单组分的生烃贡献研究,探讨了贵州六盘水地区煤岩显微组分的生烃潜力和生烃贡献,发现镜质组对煤岩的生烃潜力起到了重要的作用,占全煤层生烃贡献的56%(刘惠永等,1999)。镜质组是煤岩中主要的显微组分,对生烃的贡献十分重要(Wilkins *et al.*, 2002; 刘栩和程青松,2020),而总有机碳是衡量煤岩生烃潜力的关键指标之一。从图6可以看出,煤岩中镜质组与总有机碳、生烃潜力“可溶烃(S_1)+热解烃(S_2)”存在正相关,说明镜质组含量的增加对煤岩中总有机碳含量及生烃潜力具有明显的提升作用,这为后面进一步分析和预测煤岩气的甜点段提供了有效依据。

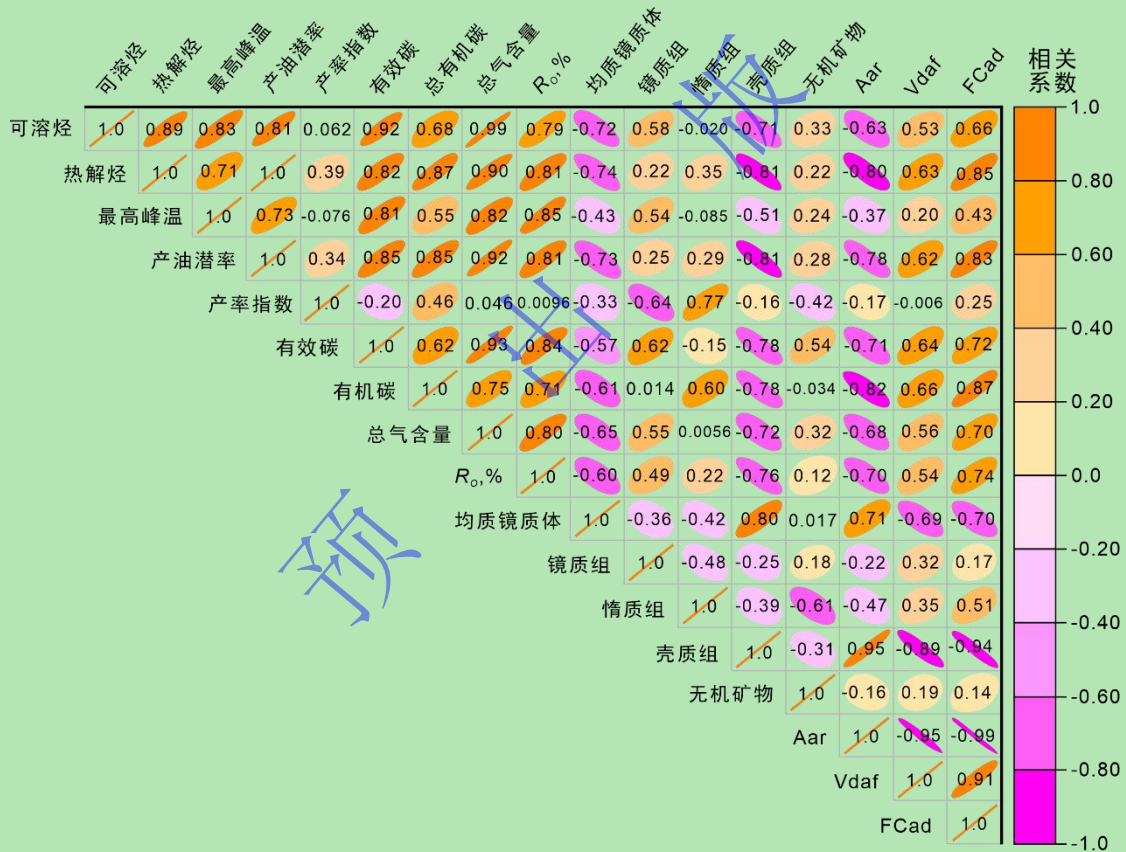


图6 吐哈盆地柯新1井煤岩含气量与各参数之间的相关性对比分析

Fig.6 Comparative analysis of the correlation between the coal-rock gas content and various parameters of the well Kexin 1, Tuha Basin

3.3 西山窑组厚煤层形成机制

东深1井煤岩段纵向上主量元素、微量元素和稀土元素的分析显示,该煤层段存在两期的水体旋回演变特征。通过元素 V/Cr 的比值分布特征可以推测,该煤段形成时整体为富氧环境, V/Cr 值几乎都小于2,仅有一个值大于2;从反映古盐度的 Sr/Ba 比值数据来看,数

值多数位于 0.6 以下，显示出成煤环境以淡水为主（范立勇等，2024），但是在 3 878.0 m 和 3 874.5 m 处 Sr/Ba 比值大于 1，表现出咸水的特点，说明该煤层段在纵向上存在至少两期水体淡—咸变化旋回的特征。对古气候反应较敏感的 Sr/Cu 比值纵向上的分布规律显示，Sr/Cu 比值与水体的盐度（Sr/Ba）比值具有很好的相关性，在 Sr/Cu 比值大于 10 的位置，Sr/Ba 比值基本大于 0.6，说明西山窑组煤层在聚煤时期水体的盐度与古气候的关系较为紧密。炎热干燥的气候条件下，水体蒸发快、汇水不足造成了沼泽地带水体封闭性变强，水体盐度逐渐增大；在温暖湿润的环境下，成煤沼泽带水体分布面积广、流动性较好，整体表现为淡水特征。此外，煤中的主量元素 Al 和稀土元素的总量（ ΣREE ）主要受碎屑物质的影响，当水体较浅、水动力条件较弱时，外源的碎屑物质供给不足，造成了成煤环境中 Al 和稀土元素含量的降低（李晶等，2012）。通过主量元素 Al 和 ΣREE 也能够很好地反映出水体深度的变化规律。元素 Al 或者 ΣREE 的含量纵向上的变化规律与反映古氧化还原环境、古盐度和古气候的元素特征值成较明显的负相关性（图 3），碎屑物质供给充足所反映的水体处于相对较深时期，水体总体表现为淡水的特点；而 Al 和 ΣREE 偏低所反映的水体较浅，碎屑物质供给不足时，水体总体表现为咸水的特点。

表 2 柯新 1 井煤岩含气量与各参数对比表
Table 2 Comparison between various parameters and coal and rock gas content in well Kexin 1

煤岩段深度 /m	热解分析								显微煤岩分析/%					工业分析/%			总气 含量 / cm ³ /g
	可溶 烃/ (mg/ g)	热解 烃 /mg/g	最高 峰温 /°C	产油 潜率 /(mg/ g)	产率 指数	有效 碳/%	总有 机碳 /%	R _o /%	均质 镜 质体	镜质 组	惰质 组	壳质 组	无机 矿物	A _{ar}	V _{daf}	F _{cad}	
3 156.60~3 157.00	13.82	81.06	443	94.88	0.15	7.88	41.00	0.64	27.26	75.82	0.38	17.66	6.14	73.82	13.57	10.93	6.20
3 157.80~3 158.15	12.65	138.34	440	150.99	0.08	12.53	66.60	0.76	18.22	75.77	17.24	4.08	2.91	8.3	33.71	56.41	6.93
3 251.30~3 251.60	30.71	217.48	445	248.19	0.12	20.60	79.20	0.74	19.34	79.11	6.38	5.60	8.90	5.23	33.82	59.58	17.91
3 306.00~3 306.40	30.97	290.72	448	321.69	2.08	15.87	92.60	0.79	7.96	71.12	25.57	1.12	2.23	2.45	30.72	66.12	16.09
3 307.50~3 307.90	31.28	252.13	453	296.02	0.15	24.57	75.49	0.81	18.90	74.89	3.96	0	21.13	6.36	31.29	60.90	16.78
3 309.00~3 309.40	33.54	216.59	445	250.13	0.13	20.76	66.26	0.74	4.27	80.98	6.05	0	12.98	5.77	36.57	56.26	16.28
3 326.00~3 326.40	42.35	288.53	461	330.88	0.13	27.46	74.84	0.92	8.42	84.42	6.69	0.38	8.49	1.26	32.83	64.48	21.73
3 327.75~3 328.10	41.08	268.55	464	309.63	0.13	25.70	92.24	0.90	9.98	81.46	10.79	0	7.76	4.28	31.98	62.24	22.30

因此,通过煤层中元素的综合分析,显示在成煤时期本区曾经发生过多期的水体上升和下降旋回。在水体演变的不同阶段,成煤环境各不相同,不同阶段形成了不同的成煤环境并造成了各煤相间煤岩品质的差异。研究区煤岩的发育受古气候因素影响密切,古气候造成的水平面下降期成煤环境偏干燥,成煤植物以木本类的银杏和松柏类为主(王士俊等,1997),形成的煤岩宏观特征多数为半暗煤,少量为半亮煤。当古气候变温暖湿润时期,水平面开始上升,成煤环境逐渐变潮湿,成煤植物以蕨类和裸子植物为主。在靠近物源区的上三角洲平原相带,煤岩宏观特征显示为暗淡煤;在靠近湖盆中心区的下三角洲平原相带,煤岩宏观特征表现为半亮煤;而当水体深度适合时,发育较深覆水森林沼泽相,成煤植物主体为木本植物,煤岩宏观特征表现为光亮煤的特点,如前面提到的吉7井煤岩所表现出的光亮煤宏观特征。

研究区厚煤层的成因是多期水体上升和下降造成不同类型的煤相纵向叠置。前人研究认为,煤岩形成与堆积的厚度并不是由可容空间或泥炭生产的绝对数量直接控制的,而是由可容纳空间的增长速率(R_A)和泥炭的生产速率(R_{PP})之间的比值控制的(Bohacs and Suter, 1997; 王东东等, 2018; 邵龙义等, 2022)。只有当泥炭的生产速率与可容纳空间的增长速率一致或者可容纳空间略高于生产速率的时候($R_A/R_{PP}=1.0\sim1.18$)(Bohacs and Suter, 1997),才是泥炭堆积并保存的最佳时期。吐哈盆地中侏罗世时期气候温暖,植被繁茂,盆地类型为陆相山间湖盆,泥炭生产能力强,当泥炭生产速率固定时,在不同的沉积相带中,泥炭的发育与保存状态不同。上三角洲平原地带,由于靠近山前且长期位于极低的可容纳空间地带,可容空间增长率低, R_A/R_{PP} 演化旋回曲线整体靠下(图7a),泥炭聚集的时间短,大部分时间内受到暴露和侵蚀,不发育煤岩(图7a1)。下三角洲平原相,可容纳空间发育, R_A/R_{PP} 比值长期处于泥炭聚集带内(图7a2),在整个水平面升降变化区间内都能够形成泥炭的堆积,使得煤层厚度大。浅湖相带,可容纳空间较大,空间变化率多数情况下大于泥炭的生产率,因此 R_A/R_{PP} 演化旋回曲线位于下三角洲平面相的上部(图7a3),部分时间段内受水淹的影响发育碳质泥岩,总体上煤层厚度较大。深湖相,可容纳空间最大,可容纳空间变化的速度远大于泥炭产生的速率,因此其 R_A/R_{PP} 演化旋回曲线整体位于泥炭堆积带的上方(图7a4),始终处于水淹的地带,湖相泥岩发育,煤层不发育。通过整体分析认为(图7),吐哈盆地煤岩堆积的有利地带为下三角洲平原相和浅湖相,特别是位于一定水深的覆水沼泽相带,而太靠近物源区(上三角洲平原相)或者太靠近湖盆中心区(半深湖—深湖相)均会使得泥炭的保存条件变差。需要指出的是,吐哈盆地侏罗纪时期整体的气候温暖湿润,但是在盆地的不同构造带或者同一构造带的不同演化时期内仍存在相对干旱的气候。这种气候的

影响间接地造成了相对可容纳空间变化率的浮动增大（图 7b），使得沉积旋回中煤层在体系域内发育的位置存在差别（图 7b1~b4），较高的可容纳空间变化率不利于煤岩的连续叠置，造成煤岩间存在相对较长的时间间隔，从图 7a 系列与图 7b 系列对比可以看出，可容空间的变化率影响了煤岩连续沉积的时间间断，这造成煤岩连续沉积厚度的差异以及煤岩夹矸的形成。

同时，受山间湖盆形态和规模的影响，盆地内发育多个相对较独立的洼陷，形成了多个泥炭厚度堆积中心。洼陷周缘受水体和盆缘物质的供给影响，可容纳空间减小，虽然泥炭的生产能力不变或者继续增强，但 R_A/R_{PP} 小于 1，形成的泥炭因为暴露或者遭受侵蚀保留下来的较少，所以煤层较薄，在洼陷周缘的煤系地层中可见砂岩含量明显增多变厚（图 8）。因此，吐哈盆地中侏罗世厚煤层主要发育于盆地的各洼陷区下三角洲平原相和浅湖相，煤层的顶部泥岩发育（图 8），显示出洼陷区水体整体偏深，陆缘碎屑供给少，砂体不发育，形成的煤岩顶板遮挡条件好；在洼陷周缘区水体偏浅，陆缘碎屑供给充足，砂体发育，形成的煤岩较薄，顶板以砂岩为主，后期的煤岩聚气的保存条件差。

3.4 煤岩甜点段的成因与分布预测

通过厚煤层的成因分析，在东深 1 井煤层中进一步识别出水淹型界面（夹矸）和水退过程中的可容纳空间转化面（简称水退型转换面）。水淹型界面（夹矸）所对应的 Al_2O_3 和 ΣREE 值高，说明在原始沉积时期，该位置位于较低的构造部位，具有较高的可容纳空间，外源物质汇聚充足，整体为深水覆盖。由于水体过于发育造成了可容纳空间的增加速率过大，泥炭的生产速率跟不上可容纳空间的增长，形成了水淹的特征（图 7a3, b2, b3），具体表现为此时期的镜质组和惰质组含量都不高或是镜/惰比小于 1，而矿物含量增高、总有机碳含量偏低，多数小于 40%，岩性为碳质页岩或者泥岩。水淹型界面是煤层堆积过程中的一种间断面，表示煤岩堆积的间断，从煤岩转变成碳质泥岩，而本区水退型转换面是一种非间断面，它是煤岩形成过程中的可容纳空间转换面。水退型转换面多位于单煤层的中段，对应相对较低的 Al_2O_3 和稀土元素总量值，与水淹型界面相比，该转换面仍然处于覆水的状态，只是水体变浅，可容纳空间相对变小，从水淹状态下 R_A/R_{PP} 比值过大，逐渐降低到适合于煤岩堆积的比值区间内。因此，该阶段煤岩发育，煤岩中镜质组含量最高，同时总有机碳含量相比水淹型界面达到了最高值，普遍大于 70%，是煤岩中有机质富集的甜点段。在图 3 中可以识别出 3 880.0 m 处（相对高伽马）存在水淹型夹矸界面，向上水体快速下降，并在 3 878.5 m 处水体达到最浅（此时仍为覆水环境），可容空间与泥炭生产速率之比达到最佳状态，之后水体又开始新一期的上升旋回，从低位体系域到湖侵体系域的初始阶段，可容纳空间增速迅速增

大,在泥炭生产速率不变的条件下,二者的增速比值升高,因此,在快速水退到快速水进两个阶段中煤岩发生连续堆积,形成了最有利的煤岩甜点发育段。随着湖侵持续,在3 878.7 m处(相对高伽马)又达到了新的一期最大湖泛面, R_A/R_{PP} 比值超过了煤岩的生产区间,形成了水淹条件下的泥岩夹矸。从煤—泥的纵向旋回叠置特征可以看出,东深1井在3 873.0~3 880.0 m的7 m区间内发生了两次的水进和两次的水退旋回特征,形成了三套水淹型泥岩夹矸和两套煤层。两套单煤层的中段—水退型转换面,是煤岩有机质含量最高的地方,是煤岩气勘探的甜点段。

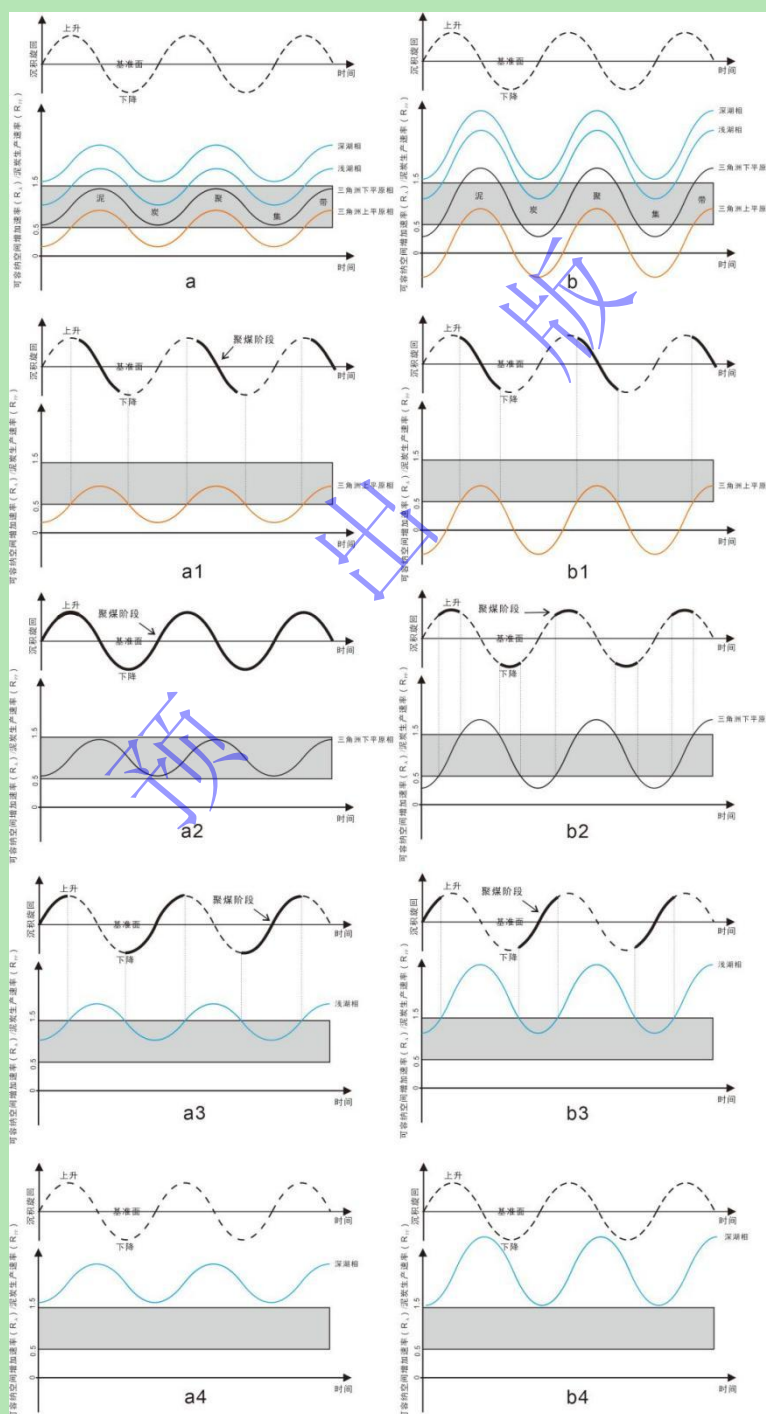


图1 湖相界面升降与煤岩生产速率关系图

图7 不同可容空间变化率条件下,不同沉积相带泥炭堆积的体系域位置与堆积连续性

Fig.7 System domain location and continuity of peat accumulation in different sedimentary facies zones for different rates of spatial accommodation change

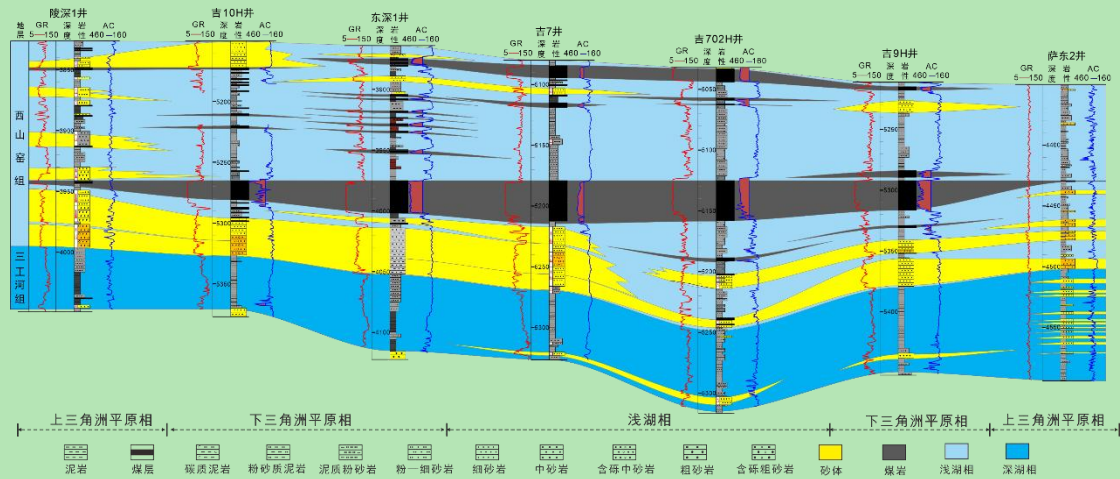


图8 台北凹陷东西向水西沟群煤系地层连井对比剖面图(剖面位置见图1)

Fig.8 Comparative profile of coal measure strata in the east-west Shuixigou Group, Taipei Sag (The section position is shown in Figure 1.)

4 结论

(1) 吐哈盆地西山窑组煤岩的宏观特征与煤岩煤关系密切,受水进水退的频繁变化影响,厚煤层中纵向上煤相多变,造成了煤岩的宏观特征多样,主体为半暗煤,但存在半暗煤、半亮煤和少量光亮煤叠置发育的特征。

(2) 厚煤层中的煤岩气甜点段具有高镜质组含量、高 TOC 含量的特点,镜质组对煤岩的生烃潜量起到了重要的作用,可以通过高镜质组含量部位所对应的元素特征来判识煤岩气甜点段的成因和分布规律。

(3) 西山窑组厚煤层为多期的水进水退形成的不同煤相纵向叠置堆积而成。吐哈盆地煤岩堆积的有利地带为下三角洲平原相,特别是位于水下的覆水沼泽相带,厚煤层主要发育于盆地各洼陷的下三角洲平原相和浅湖相位置。

(4) 在西山窑组厚煤层中可以识别出水进过程的水淹型界面和水退过程中的转换面。水淹界面形成了夹矸,TOC 含量低,是煤岩沉积的间断面;而水退型转换面煤岩中镜质组含量最高,TOC 含量也最高,是煤岩气甜点段发育的位置。

参考文献 (References)

- 陈峰,宋普洪.2023.西北煤层气资源特征及开发潜力评价[J].能源与节能,(6):51-54.[Chen Feng, Song Puhong.2023.Resource characteristics and development potential evaluation of coalbed methane in Northwest China[J].Energy and Energy Conservation,(6):51-54.]

- 陈旋, 张华, 林霖, 等. 2024. 吐哈盆地台北凹陷中侏罗统西山窑组深层煤岩气地质特征与勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 29(4): 44-59. [Chen Xuan, Zhang Hua, Lin Lin, et al. 2024. Geological characteristics and exploration potential of deep coal measure gas in Xishanyao Formation in Taibei Sag, Turpan-Hami Basin[J]. China Petroleum Exploration, 29(4): 44-59.]
- 范立勇, 史云鹤, 董国栋, 等. 2024. 鄂尔多斯盆地中东部二叠系山西组深层煤岩地球化学特征及成煤环境[J]. 天然气工业, 44(10): 113-125. [Fan Liyong, Shi Yunhe, Dong Guodong, et al. 2024. Geochemical characteristics and coal-forming environments of deep coal rocks of Permian Shanxi Formation in central and eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 44(10): 113-125.]
- 胡社荣, 蔺丽娜, 黄灿, 等. 2011. 超厚煤层分布与成因模式[J]. 中国煤炭地质, 23(1): 1-5. [Hu Sherong, Lin Lina, Huang Can, et al. 2011. Distribution and genetic model of extra-thick coal seams[J]. Coal Geology of China, 23(1): 1-5.]
- 康永尚, 皇甫玉慧, 张兵, 等. 2019. 含煤盆地深层“超饱和”煤层气形成条件[J]. 石油学报, 40(12): 1426-1438. [Kang Yongshang, Huangfu Yuhui, Zhang Bing, et al. 2019. Formation conditions for deep oversaturated coalbed methane in coal-bearing basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 40(12): 1426-1438.]
- 李国欣, 张水昌, 何海清, 等. 2024. 煤岩气: 概念、内涵与分类标准[J]. 石油勘探与开发, 51(4): 783-795. [Li Guoxin, Zhang Shuichang, He Haiqing, et al. 2024. Coal-rock gas: Concept, connotation and classification criteria[J]. Petroleum Exploration and Development, 51(4): 783-795.]
- 李晶, 庄新国, 周继兵, 等. 2012. 新疆准东煤田西山窑组巨厚煤层煤相特征及水进水退含煤旋回的判别[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(增刊): 104-114. [Li Jing, Zhang Xinguo, Zhou Jibing, et al. 2012. Coal facies characteristic and identification of transgressive/regressive coal-bearing cycles in a thick coal seam of Xishanyao formation in eastern Junggar coalfield, Xinjiang[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(Supp2): 104-114.]
- 李勇, 高爽, 吴鹏, 等. 2023. 深部煤层气游离气含量预测模型评价与校正: 以鄂尔多斯盆地东缘深部煤层为例[J]. 石油学报, 44(11): 1892-1902. [Li Yong, Gao Shuang, Wu Peng, et al. 2023. Evaluation and correction of prediction model for free gas content in deep coalbed methane: A case study of deep coal seams in the eastern margin of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 44(11): 1892-1902.]
- 李玉坤, 李广. 2019. 吐哈盆地沙尔湖煤田煤质煤岩特征及煤相分析[J]. 煤炭科学技术, 47(5): 198-205. [Li Yukun, Li Guang. 2019. Analysis on quality, petrography and facies of coal seam in Shaerhu Coalfield of Turpan-Hami Basin[J]. Coal Science and Technology, 47(5): 198-205.]
- 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[J]. 天然气工业, 44(10): 1-21. [Liu Hanlin, Zou Caineng, Yin Shuai, et al. 2024. Formation, distribution, sweet spot evaluation and development prospect of coal-measure gas in China[J]. Natural Gas Industry, 44(10): 1-21.]
- 刘惠永, 张爱云, 翁成敏. 1999. 贵州六盘水地区龙潭煤系煤岩富氢显微组分的生烃潜力与生烃贡献[J]. 石油实验地质, 21(1): 66-70. [Liu Huiyong, Zhang Aiyun, Weng Chengmin. 1999. The hydrocarbon generating potential and contribution of hydrogen-rich maceral in Longtan coal bearing formation, Liupanshui area, Guizhou province[J]. Experimental Petroleum Geology, 21(1): 66-70.]
- 刘栩, 程青松. 2020. 准噶尔盆地侏罗系煤系烃源岩有机显微组成及意义[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 37(3): 82-90. [Liu Xu, Cheng Qingsong. 2020. Organic macerals of source rocks of Jurassic coal measures in Junggar Basin and their significance[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 37(3): 82-90.]
- 马荣, 何建国, 张宁, 等. 2023. 吐哈盆地三道岭煤矿4号煤层煤岩组分特征及其成因分析[J]. 中国煤炭, 49(7): 14-24. [Ma Rong, He Jianguo, Zhang Ning, et al. 2023. Characteristics and genesis analysis of coal maceral in No.4 coal seam of Sandaoling Coal Mine in Tu-Ha Basin[J]. China Coal, 49(7): 14-24.]
- 毛新军, 李艳平, 梁则亮, 等. 2024. 准噶尔盆地侏罗系煤岩气成藏条件及勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 29(4): 32-44. [Mao Xinjun, Li Yanping, Liang Zeliang, et al. 2024. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of the Jurassic coal measure gas in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 29(4): 32-44.]
- 倪云燕, 廖凤蓉, 龚德瑜, 等. 2019. 吐哈盆地台北凹陷天然气碳氢同位素组成特征[J]. 石油勘探与开发, 46(3): 509-520. [Ni Yunyan, Liao Fengrong, Gong Deyu, et al. 2019. Stable carbon and hydrogen isotopic characteristics of natural gas from Taibei sag, Turpan-Hami Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(3): 509-520.]
- 牛小兵, 范立勇, 闫小雄, 等. 2024. 鄂尔多斯盆地煤岩气富集条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 51(5): 972-985. [Niu Xiaobing, Fan Liyong, Yan Xiaoxiong, et al. 2024. Enrichment conditions and resource potential of coal-rock gas in Ordos Basin, NW China[J].

Petroleum Exploration and Development, 51(5): 972-985.]

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

桑树勋, 郑司建, 王建国, 等. 2023. 岩石力学地层新方法在深部煤层气勘探开发“甜点”预测中的应用[J]. 石油学报, 44(11): 1840-1853. [Sang Shuxun, Zheng Sijian, Wang Jianguo, et al. 2023. Application of new rock mechanical stratigraphy in sweet spot prediction for deep coalbed methane exploration and development[J]. Acta Petrolei Sinica, 44(11): 1840-1853.]

邵龙义, 徐小涛, 王帅, 等. 2021. 中国含煤岩系古地理及古环境演化研究进展[J]. 古地理学报, 23(1): 19-38. [Shao Longyi, Xu Xiaotao, Wang Shuai, et al. 2021. Research progress of palaeogeography and palaeoenvironmental evolution of coal-bearing series in China[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(1): 19-38.]

邵龙义, 党星宇, 高祥宇, 等. 2022. 厚煤层成因机制: 天文周期控制的多期次泥炭沼泽叠加模式[J]. 煤炭科学技术, 50(1): 186-195. [Shao Longyi, Dang Xingyu, Gao Xiangyu, et al. 2022. Genetic mechanism of thick coal seams: Astronomical-forcing superimposed multi-staged swamp model[J]. Coal Science and Technology, 50(1): 186-195.]

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[J]. 石油学报, 44(11): 1854-1866, 1902. [Tang Shuling, Tang Dazhen, Yang Jiaosheng, et al. 2023. Pore structure characteristics and gas storage potential of deep coal reservoirs in Daning-Jixian block of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 44(11): 1854-1866, 1902.]

王东东, 邵龙义, 刘海燕, 等. 2016. 超厚煤层成因机制研究进展[J]. 煤炭学报, 41(6): 1487-1497. [Wang Dongdong, Shao Longyi, Liu Haiyan, et al. 2016. Research progress in formation mechanisms of super-thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 41(6): 1487-1497.]

王东东, 侯懿隼, 刘海燕, 等. 2018. 巨厚煤层沉积间断面的综合判别方法与成因模式[J]. 煤炭科学技术, 46(2): 56-64. [Wang Dongdong, Hou Yijun, Liu Haiyan, et al. 2018. Comprehensive identification method of sedimentary hiatal surface in ultra thick coal seam and its genetic mode[J]. Coal Science and Technology, 46(2): 56-64.]

王国力, 张启林, 马珂, 等. 1995. 华亭煤产地含煤岩系成因地层分析及主煤层成因[J]. 沉积学报, 13(4): 55-63. [Wang Guoli, Zhang Qilin, Ma Ke, et al. 1995. Genetic stratigraphy analysis of the coal measure and genesis of the main coal seam in Huating coal-producing area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 13(4): 55-63.]

王士俊, 唐修义, 张井, 等. 1997. 吐哈盆地侏罗纪成煤植物及其与煤成油的关系[J]. 煤田地质与勘探, 25(6): 26-28. [Wang Shijun, Tang Xiuyi, Zhang Jing, et al. 1997. Jurassic coal-forming plants in TuHa Basin and its relationship with oil form coal[J]. Coal Geology & Exploration, 25(6): 26-28.]

吴冲龙, 王根发, 李绍虎, 等. 1996. 陆相断陷盆地超厚煤层异地成因的探讨[J]. 地质科技情报, 15(2): 63-67. [Wu Chonglong, Wang Genfa, Li Shaohu, et al. 1996. Study on allochthonous genesis of ultra thick coalbeds in continental faulted basin[J]. Geological Science and Technology Information, 15(2): 63-67.]

吴冲龙, 李绍虎, 王根发, 等. 2003. 陆相断陷盆地超厚煤层异地堆积的新模式[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 28(3): 289-296. [Wu Chonglong, Li Shaohu, Wang Genfa, et al. 2003. New evidence and new model about allochthonous accumulation of extra-thick coalbeds in continental fault basin, China[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 28(3): 289-296.]

吴昕, 吴冲龙, 毛小平, 等. 2016. 吉尔嘎郎图凹陷赛汉塔拉组沉积特征与超厚煤层异地成因分析[J]. 沉积学报, 34(6): 1155-1164. [Wu Xin, Wu Chonglong, Mao Xiaoping, et al. 2016. Analysis on sedimentary characteristics and allochthonous genesis of extra-thick seam in Jiergalangtu Depression, Saihantala Formation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 34(6): 1155-1164.]

熊先钺, 闫霞, 徐凤银, 等. 2023. 深部煤层气多要素耦合控制机理、解吸规律与开发效果剖析[J]. 石油学报, 44(11): 1812-1826, 1853. [Xiong Xianyue, Yan Xia, Xu Fengyin, et al. 2023. Analysis of multi-factor coupling control mechanism, desorption law and development effect of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolei Sinica, 44(11): 1812-1826, 1853.]

徐凤银, 王成旺, 熊先钺, 等. 2023. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气成藏演化规律与勘探开发实践[J]. 石油学报, 44(11): 1764-1780. [Xu Fengyin, Wang Chengwang, Xu Xianyue, et al. 2023. Evolution law of deep coalbed methane reservoir formation and exploration and development practice in the eastern margin of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 44(11): 1764-1780.]

杨焦生, 冯鹏, 唐淑玲, 等. 2023. 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, 44(11): 1879-1891. [Yang Jiaosheng, Feng Peng, Tang Shuling, et al. 2023. Phase control factors and content prediction model of deep coalbed methane in

Danling-Jixian block[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 44(11): 1879-1891.]

张强骅, 侯恩科, 陈应涛, 等. 2017. 木里煤田西部聚煤期层序古地理特征与聚煤作用[J]. *煤田地质与勘探*, 45(4): 19-25. [Zhang Qianghua, Hou Enke, Chen Yingtao, et al. 2017. Sequence-paleogeography and coal accumulation of coal-accumulating period in the western part of Muli coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 45(4): 19-25.]

赵喆, 杨威, 赵振宇, 等. 2024. 中国煤成气地质理论研究进展与重点勘探领域[J]. *石油勘探与开发*, 51(6): 1240-1253. [Zhao Zhe, Yang Wei, Zhao Zhenyu, et al. 2024. Research progresses in geological theory and key exploration areas of coal-formed gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1240-1253.]

甄宇, 陈旋, 焦立新, 等. 2024. 东疆地区石炭纪一二叠纪构造古地理与原型盆地演化[J]. *古地理学报*, 26(1): 78-99. [Zhen Yu, Chen Xuan, Jiao Lixin, et al. 2024. Carboniferous-Permian tectonopaleogeography and prototype basin evolution in eastern Xinjiang, NW China[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(1): 78-99.]

支东明, 李建忠, 杨帆, 等. 2024. 吐哈盆地丘东洼陷侏罗系致密砂岩气勘探突破及意义[J]. *石油学报*, 45(2): 348-357. [Zhi Dongming, Li Jianzhong, Yang Fan, et al. 2024. Exploration breakthrough and significance of Jurassic tight sandstone gas in Qiudong subsag of Tuha Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 45(2): 348-357.]

邹才能, 赵群, 刘翰林, 等. 2025. 中国煤岩气突破及意义[J]. *天然气工业*, 45(4): 1-18. [Zou Caineng, Zhao Qun, Liu Hanlin, et al. 2025. China's breakthrough in coal-rock gas and its significance[J]. *Natural Gas Industry*, 45(4): 1-18.]

Bohacs K, Suter J. 1997. Sequence stratigraphic distribution of coaly rocks: Fundamental controls and paralic examples[J]. *AAPG Bulletin*, 81(10): 1612-1639.

Dai S F, Bechtel A, Eble C F, et al. 2020. Recognition of peat depositional environments in coal: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 219: 103383.

Diessel C F K. 2007. Utility of coal petrology for sequence-stratigraphic analysis[J]. *International Journal of Coal Geology*, 70(1/2/3): 3-34.

Jerrett R M, Davies R C, Hodgson D M, et al. 2011. The significance of hiatal surfaces in coal seams[J]. *Journal of the Geological Society*, 168(3): 629-632.

Shao L Y, Wang X T, Wang D D, et al. 2020. Sequence stratigraphy, paleogeography, and coal accumulation regularity of major coal-accumulating periods in China[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 7(2): 240-262.

Shearer J C, Staub J R, Moore T A. 1994. The conundrum of coal bed thickness: A theory for stacked mire sequences[J]. *The Journal of Geology*, 102(5): 611-617.

Wilkins R W T, George S C. 2002. Coal as a source rock for oil: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 50(1/2/3/4): 317-361.

Formation Mechanism of Thick Coal Seams and Prediction of Coal-rock Gas Sweet Spots in the Tuha Basin

LIN Tong¹, ZHANG Hua^{2,3}, LI Pan¹, LIU JunTian², YANG RunZe¹, ZHANG PengYi², DU XiaoJiang⁴

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChinaTuha Oilfield Company, Xinjiang Hami 839009, China

3. Xinjiang Research Institute of Huairou Laboratory, Urumqi, Xinjiang, 83000, China

4. Tuha Drilling Company, Xibu Drilling Engineering Company, Xinjiang Shanshan 838200, China

Foundation: National PetroChina Youth Science and Technology Project, No. 2024DQ03025; Xinjiang Uygur Autonomous Region Key R&D Special Project, No. 2024B03002; National Science and Technology Major Project for New Oil and Gas Exploration and Development, No. 2024ZD1406000

Abstract: [Objective] Coal-rock gas has achieved a major breakthrough in recent years as a previously unexploited type of natural gas in the central and western basins. Current research on coal-rock gas mainly focuses on its gas-generation and accumulation capacities. However, the formation mechanism and distribution pattern of thick coal seams (the reservoirs for coal-rock gas) are clearly insufficiently studied. This leads to difficulties in optimizing favorable coal-rock gas zones, and especially in selecting appropriate drilling intervals in thick coal seams of medium- and low-rank coal in the western basins. [Methods] Based on the description of cores and macroscopic characteristics of underground coal measures in the Tuha Basin, systematic identification of microscopic components and analysis both of major and trace elements and rock pyrolysis were carried out on coal samples from the Xishanyao Formation. This enabled the sedimentary environment, coal facies characteristics and features of coal-rock gas sweet spot sections in thick coal seams to be compared. [Results] The analysis of Xishanyao Formation coal macerals shows that there are various types of coal facies in the Tuha Basin, and also multiple types of coal facies present in thick coal seams at the same location. Comparative analyses of major and trace elements in the thick coal seams indicate cyclic multi-stage flooding and regression. [Conclusions] It is evident that the coal-forming environment differed at various stages of the flooding and regression processes, resulting in qualitative differences in the coal facies. The cause of these thick coal seams is the vertical superposition of coals of different facies types caused by water level fluctuations. During the Jurassic, the Tuha Basin was an intermountain continental basin in which sedimentary facies zones were affected differently by water depth, leading to obvious differences in the ratio of peat production rate to accommodation space growth rate and resulting in variations in coal seam development and distribution. In the thick coal seams of this region, the flooding surface and the regression transition surface were identified. Of these, the regression transition surface layer has the highest organic matter content in the coal, and it is also the sweet spot section for coal measure gas exploration.

Key words: Coal-rock gas; formation mechanism and distribution pattern of thick coal seams; Tuha Basin; Xishanyao Group; coal-rock gas sweet spot sections; flooding and regression processes