

文章编号:1009-9603(2022)05-0049-09

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202110030

准噶尔盆地南缘中段侏罗系烃源岩 热演化史及其对天然气成藏的影响

韩 杨, 蒋文龙, 杨海波, 任海蛟, 王霞田, 王 韬
(中国石油新疆油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:准噶尔盆地南缘深部资源是近年来天然气勘探的热点,其中位于南缘中段霍玛吐背斜带的侏罗系烃源岩资源潜力巨大,但由于研究区勘探程度较低,烃源岩热演化史与成藏条件的匹配关系尚不清晰。基于实测地震解释、热史温标数据,应用盆地模拟方法对南缘中段中—下侏罗统烃源岩热演化史进行恢复,并结合烃源岩地球化学特征分析,对天然气生成、运聚以及与构造演化的耦合关系进行系统研究。结果表明:南缘中段发育中—下侏罗统主力烃源岩,其关键生气时期为早白垩世早期(距今99.6 Ma)和晚白垩世末期(距今65.5 Ma),现今中—下侏罗统烃源岩处于高成熟—过成熟阶段,尚具一定生烃潜力;该区具有晚期抬升型次生气藏和持续埋深型高成熟气藏2种天然气成藏模式,天然气分布受烃源岩和构造双重控制。

关键词:热演化史;烃源岩;中—下侏罗统;成藏模式;准噶尔盆地南缘

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Thermal evolution and natural gas accumulation of Jurassic source rocks in middle of southern margin of Junggar Basin

HAN Yang, JIANG Wenlong, YANG Haibo, REN Haijiao, WANG Xiatian, WANG Tao

(Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang, 834000, China)

Abstract: In recent years, deep resources in the southern margin of Junggar Basin have been a hot spot for natural gas exploration. Among them, in the middle of the southern margin, the Jurassic source rocks in Huomatu anticline zone have huge potential resources. However, due to the low degree of exploration, the relationship between the thermal evolution of source rocks and the gas accumulation conditions is still unclear. Based on the seismic interpretation and thermal history data, a basin simulation system was applied to restore the thermal evolution histories of Middle and Lower Jurassic source rocks in the southern margin of Junggar Basin. Furthermore, combined with the geochemical characteristics of Jurassic source rocks, the generation and accumulation of gas and the coupling relationships with structural evolution were systematically studied. The research showed that the Middle and Lower Jurassic source rocks developed in the middle of the southern margin. Moreover, the gas mainly generated in the early stage of the Early Cretaceous Epoch (99.6 Ma) and the late stage of the Late Cretaceous Epoch (65.5 Ma), respectively. Now, the Middle and Lower Jurassic source rocks are in the stage of high and over maturity and still have hydrocarbon generation potential. At the same time, two hydrocarbon accumulation models have been formed in the area, and they are secondary accumulation with late uplift and high-mature accumulation with continuous buried depth. In addition, the gas distribution has been controlled by the evolution of the source rocks and the structure.

Key words: thermal evolution history; source rocks; Middle and Lower Jurassic; hydrocarbon accumulation model; southern margin of Junggar Basin

收稿日期:2021-10-19。

作者简介:韩杨(1994—),男,江苏宿迁人,助理工程师,硕士,从事油气成藏及生烃动力学研究。E-mail:hanyang123@petrochina.com.cn。

通信作者:蒋文龙(1987—),男,江苏宜兴人,高级工程师,博士。E-mail:jwl@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油“十四五”前瞻性基础性重大科技项目“准噶尔盆地凹陷区下组合轻质油与天然气成藏规律研究”(2021DJ0206)。

准噶尔盆地南缘勘探潜力巨大,目前已成为中国西部天然气勘探的一个热点区域。历经半世纪的勘探研究,准噶尔盆地南缘发现了独山子油田、齐古油田、呼图壁气田等多个油气田,特别是高探1井和呼探1井的相继突破,显示了该区丰富的天然气资源潜力。而南缘中段与多个主力生烃凹陷毗邻,且背斜发育、成藏配置条件完善^[1-2],是寻找规模天然气、储量突破的重点勘探区域。

近年来,针对准噶尔盆地南缘油气地球化学特征及油气成藏方面的研究不断深入。陈建平等在南缘进行了大量的油气地球化学实验和对比研究,将天然气分为煤型气、混合气与油型气3类,提出南缘中段油气主要来源于侏罗系烃源岩,并含有少量混源气的特征^[3-4];朱明等通过油源对比等手段,对南缘西段的四棵树凹陷烃源岩热演化及差异成藏规律进行了研究,判断四棵树凹陷的生烃中心位于南部山前^[5-6];胡瀚文等通过对老油区进行研究,提出了四棵树凹陷烃源岩的大量生烃时期为新近纪,关键成藏时期为晚新生代^[7-8];靳军等基于大量实测温压数据,系统分析了南缘下组合现今温压场特征^[9-10]。可以看出,针对南缘烃源岩的研究主要集中在南缘西段的四棵树凹陷,且烃源岩及油气地球化学的研究方法多以现今实测数据为主,无法从时间、空间上反映烃源岩与储盖组合、圈闭保存条件等成藏配置的耦合关系,这也使南缘中段天然气成因及成藏模式尚不清晰,尤其是烃源岩热演化与构

造格局的配置关系亟待解决。为此,笔者应用盆地模拟方法,结合烃源岩地球化学研究结果,对南缘中段的天然气生成、成藏模式及与生气时期匹配问题进行分析,旨在找出南缘中段“源-断”控制背景下的天然气关键成藏时期,为下一步油气勘探部署提供依据。

1 区域地质概况

准噶尔盆地南缘是构造条件最为复杂的褶皱带,二叠纪以来可分为前陆盆地、陆内拗陷盆地、再生前陆盆地3个阶段,历经海西末期、印支期、燕山期和喜马拉雅期等多期构造运动^[11],现今构造呈现出东西分段、南北分带的特征(图1)。南缘中段西起四棵树凹陷,东至阜康断裂带,南接依林黑比尔根山,北延伸至沙湾凹陷-莫南凸起-阜康凹陷交界处,面积约为45 000 km²,最大沉积厚度为15 000 m,由南向北大致可划分为三排背斜带和三排向斜带。研究区深部地层自下而上发育二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系,目前钻揭侏罗系八道湾组(J_{1b})、三工河组(J_{1s})、头屯河组(J_{1t})和喀拉扎组(J_{1k})以及白垩系吐谷鲁群(K_{1tg})清水河组(K_{1q})底部5套规模储层,且吐谷鲁群包括清水河组、呼图壁组(K_{1h})、胜金口组(K_{1s})和连木沁组(K_{1l}),发育500~2 000 m的巨厚泥岩盖层,具有良好的储盖配置条件^[11],从而该区具备形成规模天然气藏的条件。

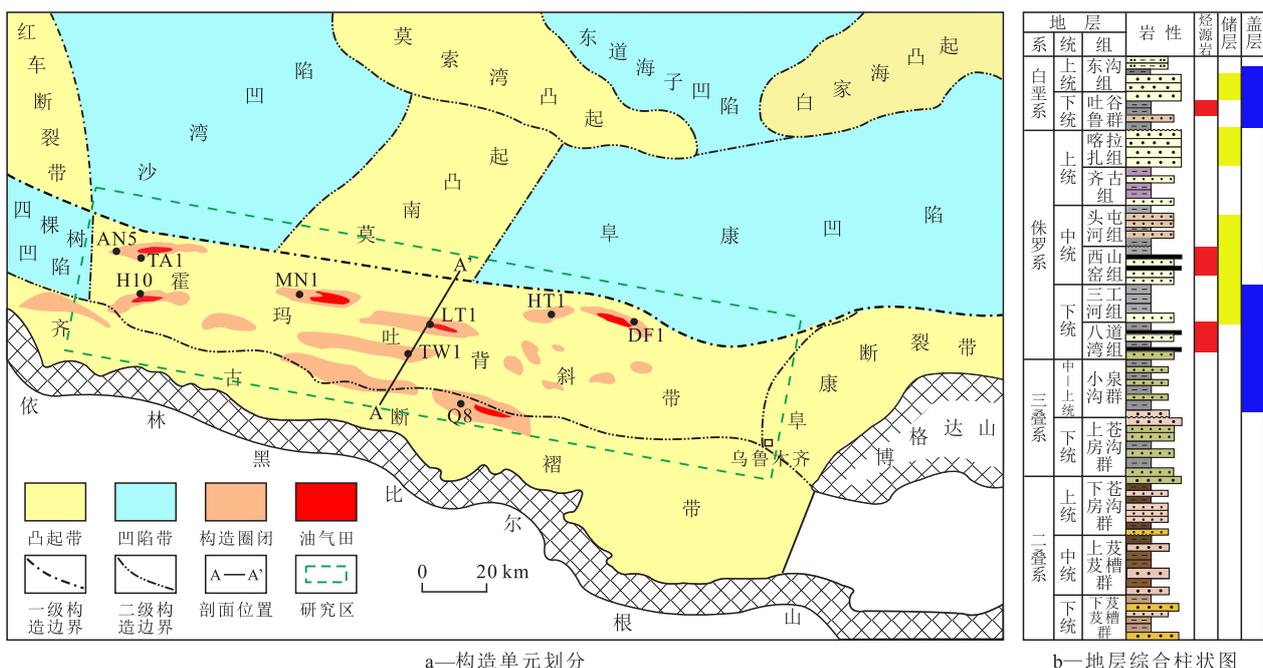


图1 准噶尔盆地南缘构造单元划分及地层综合柱状图

Fig.1 Structural division and comprehensive strata diagram of southern margin of Junggar Basin

2 烃源岩地球化学特征

准噶尔盆地南缘主力烃源岩为中一下侏罗统的八道湾组和西山窑组,研究区广泛发育滨浅湖亚相暗色泥岩含煤层。南缘中段钻揭侏罗系烃源岩较少,考虑到沉积时期、物源基本一致,本次研究烃源岩地球化学参数的统计范围包括整个南缘。统计结果表明,八道湾组烃源岩总有机碳含量(TOC)为0.43%~39.96%,平均值为9.43%;生烃潜量(S_1+S_2)为0.08~127.42 mg/g,平均值为37.11 mg/g。西山窑组烃源岩总有机碳含量为0.46%~3.51%,平均值为1.26%;生烃潜量为0.4~9.0 mg/g,平均值为1.9 mg/g。此外,煤层在八道湾组和西山窑组皆有分布,认为其是研究区天然气的主要来源,八道湾组煤层的总有机碳含量为15.1%~91.9%,平均值为50.1%;生烃潜量为29.6~189.2 mg/g,平均值为94.2 mg/g;西山窑组煤层的总有机碳含量为15.7%~79.9%,平均值为56.6%;生烃潜量为7.38~98.4 mg/g,平均值为68.9 mg/g。镜质组反射率(R_o)测试结果表明,侏罗系烃源岩现今成熟度为0.62%~1.08%,由于测试样品深度较浅,推测深部侏罗系烃源岩现今处于成熟—过成熟演化阶段,以生气为主。由图2可以看出,侏罗系八道湾组和西山窑组烃源岩的品质为中等—好,有机质类型主要为 II_2 — III 型^[12-13](图2b),

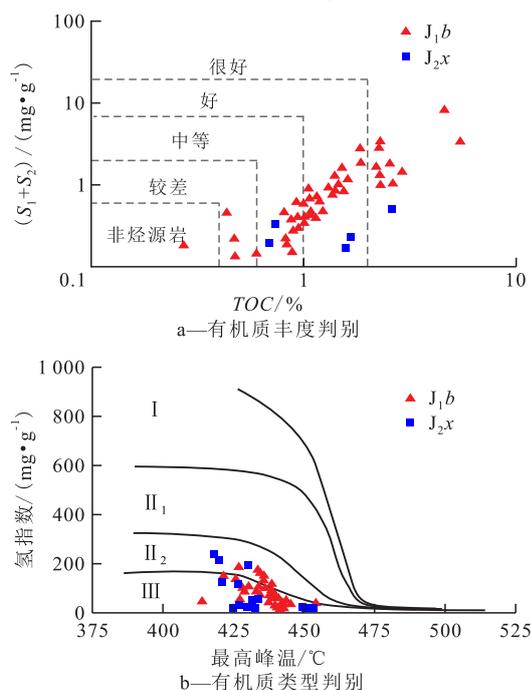


图2 准噶尔盆地南缘侏罗系八道湾组和西山窑组烃源岩地球化学特征

Fig.2 Geochemical characteristics of source rocks of Jurassic Badaowan Formation and Xishanyao Formation in southern margin of Junggar Basin

其中八道湾组生烃条件较好。

3 热演化史模拟

3.1 模拟方法

应用 PetroMod 盆地模拟系统对烃源岩热演化史进行模拟,研究过程中所需参数为地层格架、岩石热导率以及边界条件。首先综合地震解释及克里金插值等地球物理方法,结合准噶尔盆地及外围第四次油气资源评价建立研究区的地质格架;再依据实际录井资料及勘探研究成果对软件内置的岩性模块进行混合岩性定义;最后结合地史研究恢复地层剥蚀量,并将中一下侏罗统镜质组反射率实测数据作为古温标,绘制镜质组反射率与深度拟合曲线,进而得出研究区烃源岩热演化史。

3.2 模拟过程

3.2.1 边界条件确定

烃源岩热演化史模拟所需的边界条件主要包括沉积时水界面温度、大地热流及古水深。沉积时水界面温度(SWIT)可根据全球平均地表温度模板在 PetroMod 软件内进行标定。大地热流主要结合前人研究成果和实际资料获得,邱楠生等对准噶尔盆地古—今地温及大地热流特征进行了研究,同时利用实验测得的岩石热导率综合分析了研究区不同沉积时期的地温梯度^[14-16]。根据全国大地热流汇编(第四版)以及现今地温拟合曲线(图3)与前人研究成果,可知准噶尔盆地南缘中段属于低温区,现今大地热流为 $(36.2 \pm 9.8) mW/m^2$,现今地温梯度为 $18.2 ^{\circ}C/km$ ^[17]。古水深主要依据地层沉积和海平面升降进行估算。早二叠世准噶尔盆地南缘中段沉积环境以半深湖—深湖为主,古水深为40~80 m;三叠纪开始,盆地由断陷向拗陷转化,整体抬升及迅速充填作用使水域大为缩小;晚三叠世盆地大范围发生湖侵,沉积环境以滨浅湖—半深湖为主,古水深为20~40 m;侏罗纪至古近纪受到燕山运动的影响,盆地整体表现为陆内拗陷,沉积环境以三角洲—滨浅湖为主,古水深为0~40 m;新近纪以来,喜马拉雅运动使南缘中段快速且大幅度地隆升,湖泊面积缩小,水体变浅,古水深多为0~20 m。

3.2.2 剥蚀量恢复

晚侏罗世末期燕山运动Ⅱ幕的构造抬升对研究区侏罗系烃源岩的热演化影响十分明显,该时期构造运动使侏罗系与白垩系之间形成区域不整合面,以致烃源岩热演化处于停滞状态。为此,采用

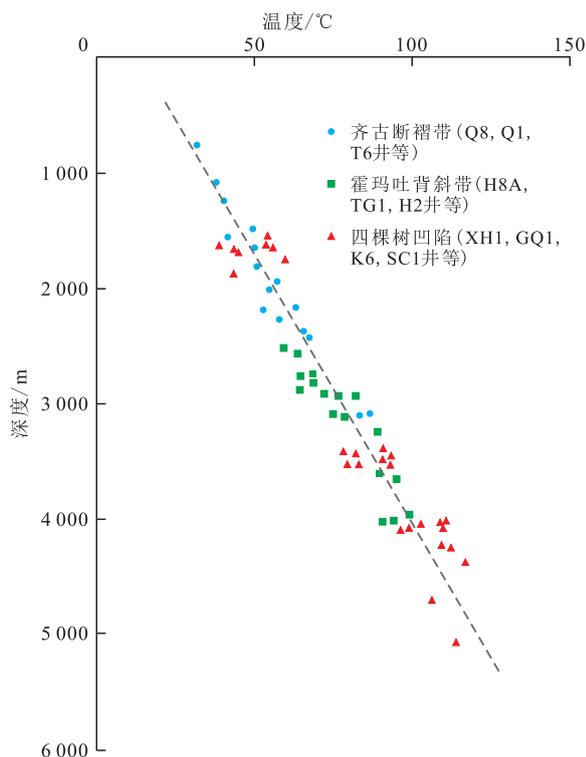


图3 准噶尔盆地南缘中段现今地温拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of current ground temperature in middle of southern margin of Junggar Basin

地层趋势法并结合前人研究成果对该时期地层剥蚀量进行恢复和厘定^[18]。该方法认为地层沉积具有继承性和持续性,利用剥蚀地层和未剥蚀地层在横向变化趋势上的相关性,以邻层作为参考层,厘定剥蚀量在侧向上的变化规律并进行估算,得出研究区侏罗系剥蚀量为200~400 m,其中安集海背斜剥蚀量为300 m,玛纳斯背斜剥蚀量为400 m,霍尔果斯背斜剥蚀量为250 m,呼图壁背斜剥蚀量为350 m,吐古鲁背斜剥蚀量为400 m。

3.2.3 热史参数拟合

针对热史的研究,目前中外采用的主要方法为地球动力学模型法和古温标法。结合上述2种方法,将中一下侏罗统镜质组反射率实测数据作为古温标,拟合得到镜质组反射率与深度的关系曲线(图4)。采用常用的EASY% R_o 模型,选取相关化学反应动力学参数,结合沉积埋藏史和不同沉积时期大地热流值计算 R_o 值,并与实测值进行对比,通过调整参数使之与实测值基本一致,其表达式为:

$$R_o = \exp(-1.6 + 3.7F_i) \quad (1)$$

4 热演化特征

4.1 热演化时期

基于地史、热史参数的厘定与模拟,利用邻区

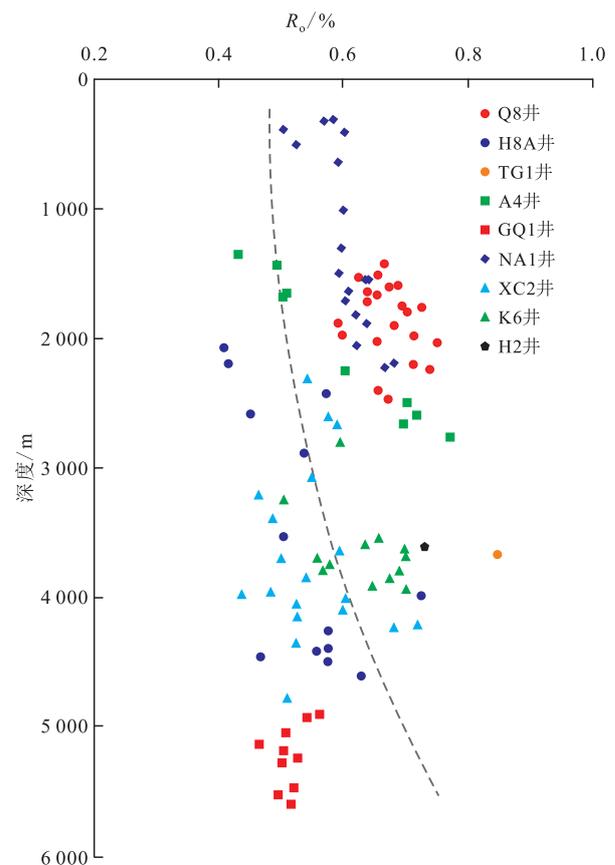


图4 准噶尔盆地南缘中段热史温标拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of thermal history temperature scale in middle of southern margin of Junggar Basin

及高部位已知探井对无井区域开展虚拟井模拟,考虑到研究需要全层系、深埋藏的背景,在南缘中段的玛纳斯背斜建立模拟1井,分析2套烃源岩在不同沉积时期的热演化特征。由图5可见,研究区八道湾组烃源岩在侏罗纪末期(距今145 Ma)已进入成熟生油阶段($0.8\% < R_o < 1.5\%$),开始大量生烃;晚白垩世早期(距今99.6 Ma),烃源岩达到生烃高峰,进入高成熟生湿气阶段($1.5\% < R_o < 2.0\%$),开始大量生成湿气;演化至今,烃源岩多处于高成熟一过成熟阶段($1.8\% < R_o < 2.3\%$),以生气为主。西山窑组烃源岩在早白垩世早期(距今139.8 Ma)进入成熟生油阶段($0.8\% < R_o < 1.5\%$),开始大量生烃;白垩纪末期(距今65.5 Ma),烃源岩进入生气高峰($1.5\% < R_o < 2.0\%$),开始大量生成湿气;现今,烃源岩多在高成熟阶段末期($R_o = 1.8\%$),以生湿气为主。

从烃源岩热演化史可以看出,研究区中一下侏罗统烃源岩经历了完整的生烃演化阶段,白垩纪是八道湾组、西山窑组烃源岩的主要生烃高峰时期,八道湾组烃源岩生气强度最高可达 2.3×10^6 t/km³,西山窑组烃源岩生气强度最高可达 2.1×10^6 t/km³,说明这2套烃源岩具有良好的生烃能力。

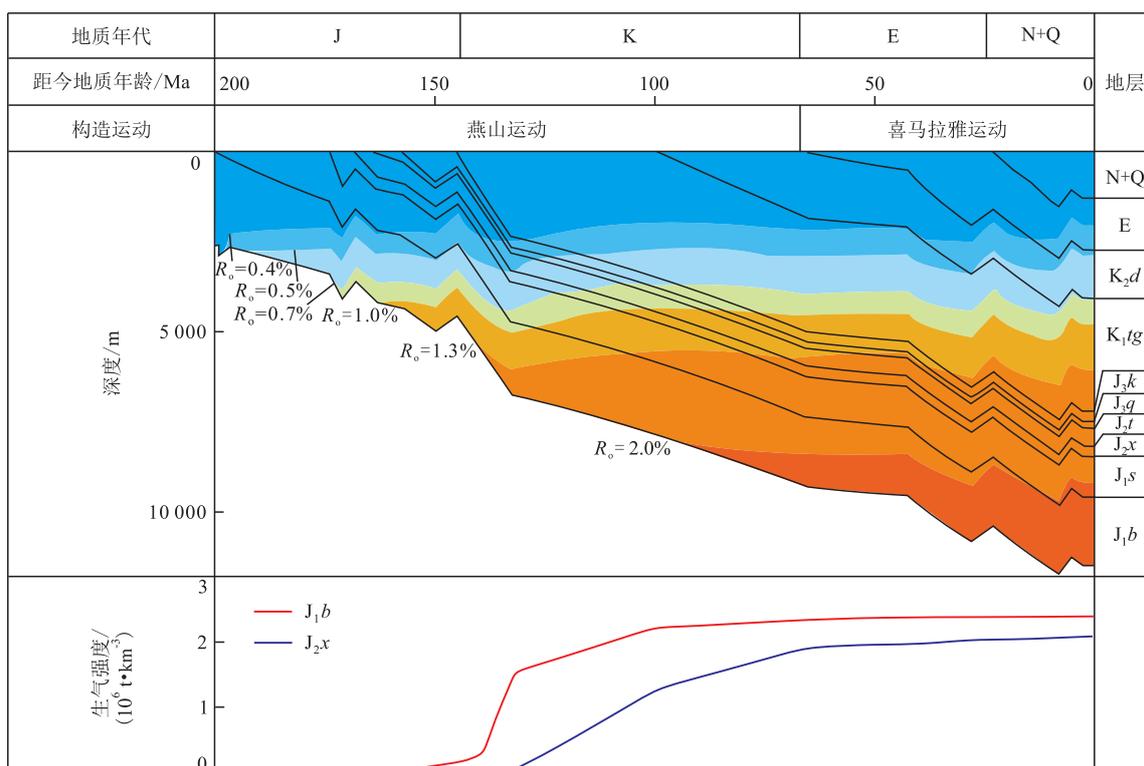


图5 准噶尔盆地南缘中段侏罗系烃源岩热演化特征

Fig.5 Thermal evolution characteristics of Jurassic source rocks in middle of southern margin of Junggar Basin

4.2 区域热演化特征

结合准噶尔盆地南缘构造格架,建立了南缘中段侏罗系三维盆地热演化模型,使之更为直观地反映烃源岩平面热演化展布特征(图6)。整体来看,研究区中一下侏罗统烃源岩现今都已达到成熟—高成熟阶段,热演化程度自西向东依次升高,其中霍玛吐背斜带的中一下侏罗统烃源岩演化阶段完整,模拟结果显示烃源岩皆已达到高成熟—过成熟生气阶段,且随着演化程度的加深,天然气成熟度自西向东逐渐变高,这与该区天然气地球化学特征十分吻合^[19-21],即南缘中段天然气多呈现湿气—干气的特征,气源显示均为侏罗系烃源岩,并且天然气自西向东呈现出逐渐变干的趋势,进一步证实了本次热演化模型的准确性。

此外,综合地史、热史的模拟结果认为构造运动对于准噶尔盆地南缘烃源岩成熟度的影响主要有2个方面。第一,南缘烃源岩成熟度受到燕山运动构造格局的影响^[22-26],呈现出热演化差异性。垂向上,八道湾组烃源岩成熟阶段要明显早于西山窑组;平面上,烃源岩成熟度在白垩纪前也呈现出东高西低的特征(图6)。第二,若将分析尺度进一步精确到南缘中段,燕山运动以来,中一下侏罗统烃源岩热演化史为一个持续埋深成熟的过程,生烃演

化的关键时期为白垩纪,此后喜马拉雅运动造成南缘东部地层剧烈抬升,但此时南缘中段的中一下侏罗统烃源岩多已进入高成熟—过成熟阶段,因此该时期构造抬升并非是造成烃源岩热演化差异性的主要原因。

5 热演化史对天然气成藏的影响

5.1 天然气成藏模式

综合分析烃源岩热演化特征与构造演化的耦合关系,准噶尔盆地南缘中段侏罗系天然气具有晚期抬升型次生气藏和持续埋深型高成熟气藏2种天然气成藏模式,以过TW1和LT1两口重点探井的AA'剖面(图7)为例进行分析。

准噶尔盆地南缘中段发育三排构造带,其中齐古断褶带为第一排构造带,早在燕山运动时期就已形成低缓背斜,白垩纪末期,侏罗系烃源岩达到成熟阶段,开始生成少量的低成熟—成熟气,在背斜带聚集成藏。古近纪以来,烃源岩逐渐达到高成熟阶段,以生湿气为主,受到上覆白垩系巨厚盖层的影响,侏罗系天然气仅向上侏罗统齐古组(J_{3q})、喀拉扎组运聚。新近纪末期,喜马拉雅运动在天山北缘发生强烈的逆冲推覆作用,导致齐古断褶带先存

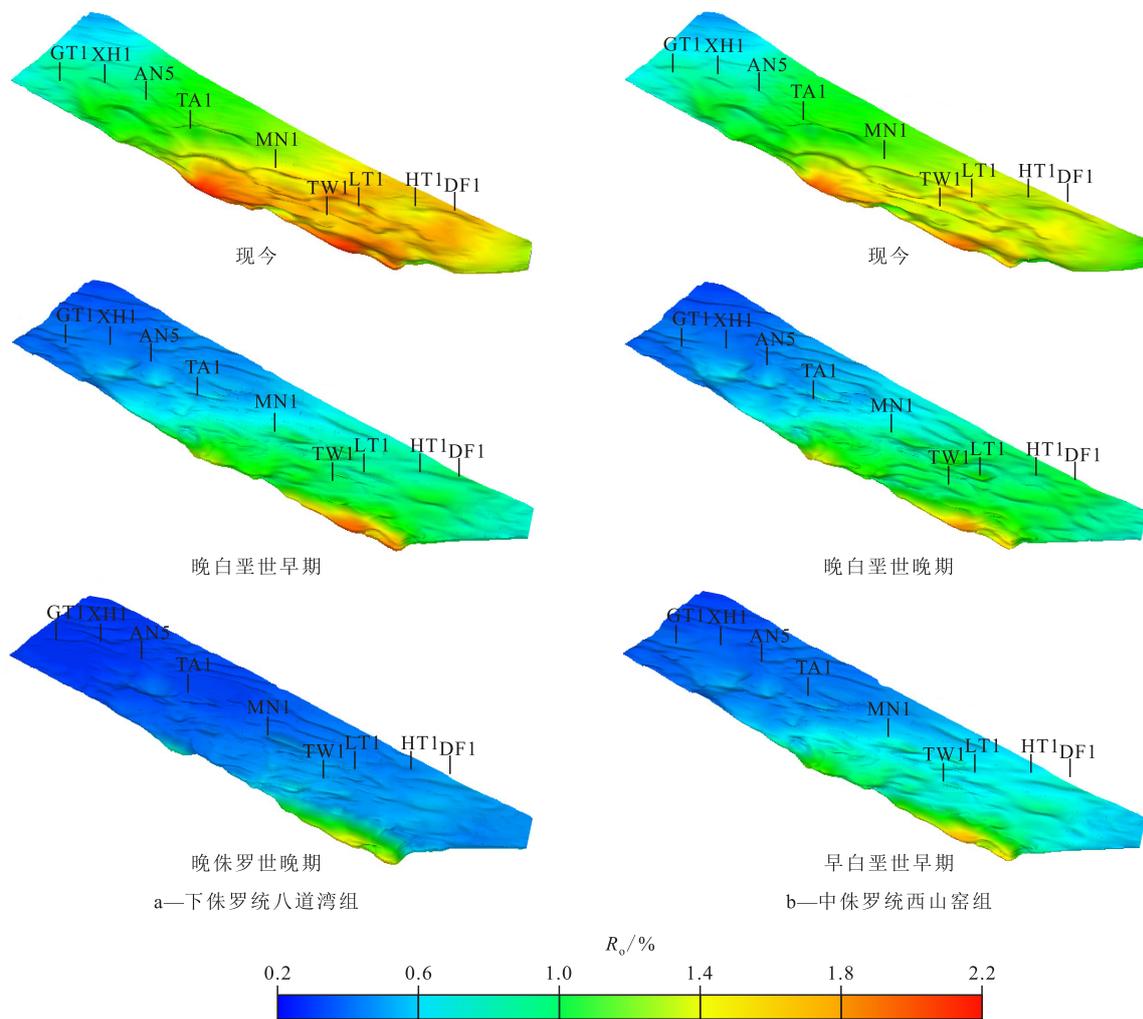


图6 准噶尔盆地南缘中段侏罗系烃源岩平面热演化展布特征

Fig.6 Planar thermal evolution characteristics of Jurassic source rocks in middle of southern margin of Junggar Basin

的气藏遭受破坏,油气随断裂运移至浅层二次成藏,因此在齐古断褶带发现的天然气具有中—低成熟与高成熟气共存的特点。喜马拉雅运动晚期,随着构造抬升加剧,先存油气沿断裂向上运移至浅层紫泥泉子组(E_{1+2z}),研究区受由南向北的逆冲推覆作用,气藏进行了进一步调整,形成晚期抬升型次生气藏(图7)。

霍玛吐背斜带为靠近凹陷区的二、三排背斜带,相较齐古断褶带具有烃源岩成熟早、构造形成晚的演化特征。白垩纪末期,侏罗系烃源岩整体进入高成熟生湿气阶段,但此时背斜带尚未形成,缺少保存条件,导致天然气在此处未能有效成藏。此后,燕山运动导致研究区形成侏罗系与白垩系之间的区域不整合面,为后期天然气运聚提供了良好的保存条件。喜马拉雅运动以来,霍玛吐背斜带逐渐形成,侏罗系烃源岩此时已处于高成熟—过成熟阶段,大量生成的天然气经断层输导作用以及盖层的

遮挡作用在侏罗系顶部及白垩系清水河组储层聚集成藏,形成持续埋深型高成熟气藏(图7)。

5.2 天然气分布探讨

结合烃源岩关键生气时期和构造运动对准噶尔盆地南缘中段的天然气成藏进行动态演化分析,认为南缘中段霍玛吐背斜带侏罗系顶部及白垩系清水河组为天然气有利分布区域。原因之一是燕山运动形成的断裂为深部油气运移至侏罗系顶部及白垩系清水河组提供了良好的运移通道,同时区域不整合面与后期形成的白垩系巨厚盖层也为天然气成藏提供了良好的遮挡和保存条件,有利于天然气在侏罗系顶部及白垩系清水河组中聚集。再者,喜马拉雅运动的构造挤压作用主要造成了齐古断褶带浅层油气的大量散失,对于南缘中段霍玛吐背斜带深部的先存油气藏起到了二次运移和调整的作用。受制于研究区勘探程度尚低,针对侏罗系—白垩系储层的发育特征与储集性能尚未进行

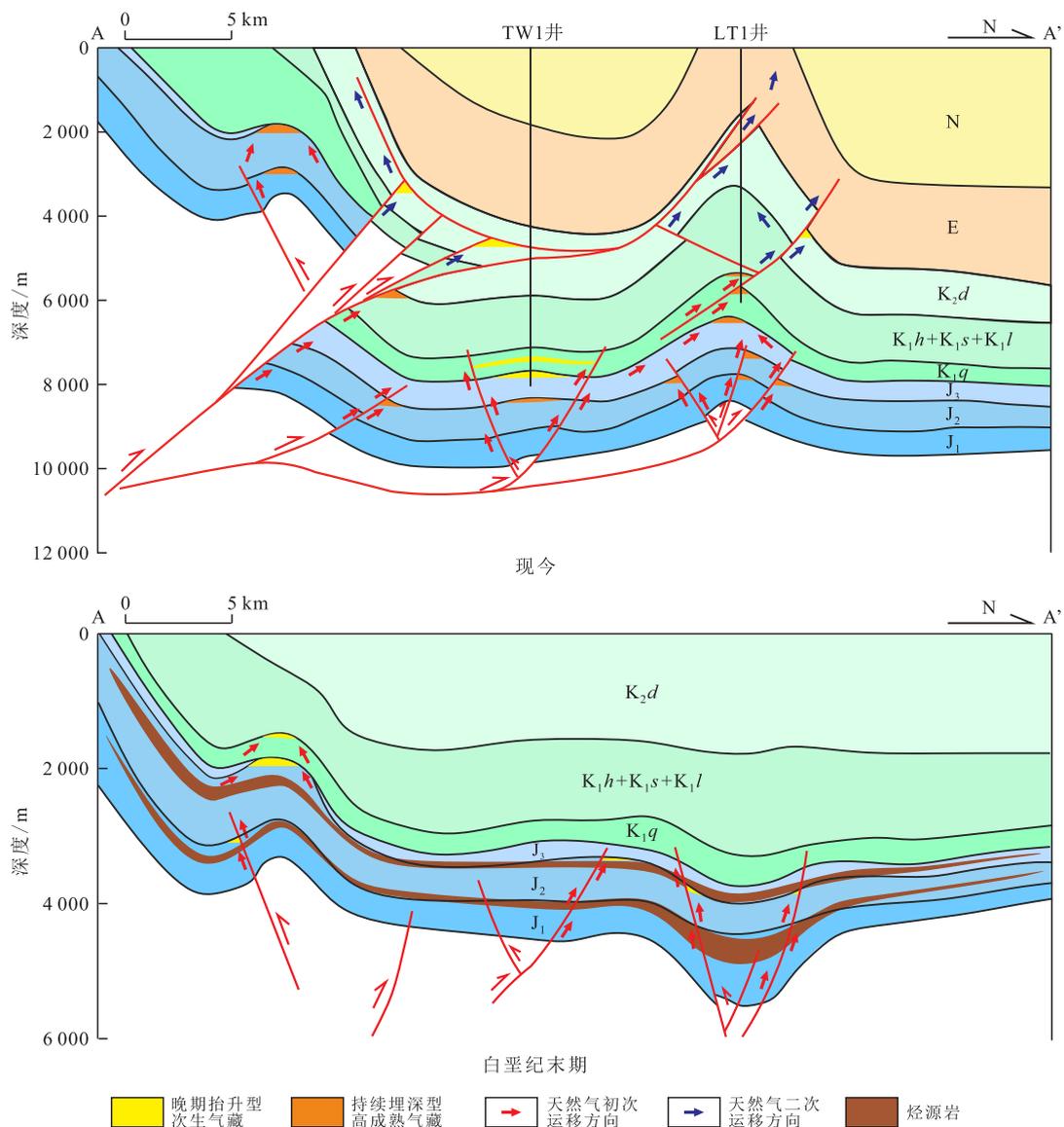


图7 准噶尔盆地南缘中段天然气运移与成藏模式(剖面位置见图1)

Fig.7 Gas migration and accumulation in middle of southern margin of Junggar Basin (Profile position can be seen in Fig.1)

有效地分析和系统研究。目前,部分学者在对该区侏罗系顶部至白垩系清水河组的研究中已经揭示了该层段发育优质储层^[27-28]。由此可见,在“源-断”控藏模式的基础上,南缘中段霍玛吐背斜带深部侏罗系—白垩系资源潜力巨大,可作为下一步天然气有利勘探目标。

6 结论

准噶尔盆地南缘中段中—下侏罗统烃源岩的关键生气时期为白垩纪,下侏罗统八道湾组在晚白垩世早期达到生气高峰,中侏罗统西山窑组在晚白垩世末期达到生气高峰,现今烃源岩多处于高成熟—过成熟阶段。多期构造运动与烃源岩演化的

时空匹配关系共同控制了南缘中段天然气聚集与分布,天然气成熟度自西向东呈逐渐变高的趋势。白垩纪以来,烃源岩的持续供气与喜马拉雅期的构造抬升在研究区形成了晚期抬升型次生气藏和持续埋深型高成熟气藏2类天然气成藏模式。南缘中段霍玛吐背斜带深部侏罗系—白垩系具有良好的成藏条件,笔者认为下一步研究应重点聚焦侏罗系顶部至白垩系清水河组有利储层的分布特征,形成“源-储-盖”一体的成藏模式,为该区天然气勘探提供指导。

符号解释

F_k ——地层底界面第 k 个埋藏点的化学反应程度,取值为0~0.85;

k ——埋藏点序号;

R_0 ——镜质组反射率拟合值, %。

参考文献

- [1] 陈建平,王绪龙,倪云燕,等.准噶尔盆地南缘天然气成藏及勘探方向[J].地质学报,2019,93(5):1 002-1 019,1 189.
CHEN Jianping, WANG Xulong, NI Yunyan, et al. The accumulation of natural gas and potential exploration regions in the southern margin of the Junggar basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(5):1 002-1 019, 1 189.
- [2] 王小军,宋永,郑孟林,等.准噶尔盆地复合含油气系统与复式聚集成藏[J].中国石油勘探,2021,26(4):29-43.
WANG Xiaojun, SONG Yong, ZHENG Menglin, et al. Composite petroleum system and multi-stage hydrocarbon accumulation in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4):29-43.
- [3] 陈建平,王绪龙,倪云燕,等.准噶尔盆地南缘天然气成因类型与气源[J].石油勘探与开发,2019,46(3):461-473.
CHEN Jianping, WANG Xulong, NI Yunyan, et al. Genetic type and source of natural gas in the southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3):461-473.
- [4] 陈建平,邓春萍,王绪龙,等.准噶尔盆地南缘凝析油、蜡质油与稠油的形成机理[J].中国科学:地球科学,2017,47(5):567-585.
CHEN Jianping, DENG Chunping, WANG Xulong, et al. Formation mechanism of condensates, waxy and heavy oils in the southern margin of Junggar Basin, NW China[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2017, 47(5):567-585.
- [5] 朱明,梁则亮,马健,等.准噶尔盆地四棵树凹陷侏罗系有机质生烃差异及油气藏分布规律[J].天然气地球科学,2020,31(4):488-497.
ZHU Ming, LIANG Zeliang, MA Jian, et al. Patterns of hydrocarbon generation and reservoir distribution in the Jurassic strata, Sikeshu Sag, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(4):488-497.
- [6] 张运波,王明健,杜治利,等.准噶尔盆地南缘四棵树凹陷主力烃源岩及油源对比[J].海洋地质前沿,2020,36(12):39-48.
ZHANG Yunbo, WANG Mingjian, DU Zhili, et al. Main oil source rocks and oil-source correlation in the Sikeshu Sag, the southern margin of Junggar Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(12):39-48.
- [7] 胡瀚文,张元元,卓勤功,等.准噶尔盆地南缘下组合油气成藏过程——以齐古油田为例[J].天然气地球科学,2019,30(4):456-467.
HU Hanwen, ZHANG Yuanyuan, ZHUO Qingong, et al. Hydrocarbon charging history of the lower petroleum system in the southern Junggar Basin: Case study of the Qigu Oil Field[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(4):456-467.
- [8] 胡瀚文,张元元,郭召杰,等.准噶尔盆地南缘深层侏罗系储层沥青成因及其对油气成藏的启示[J].地质学报,2020,94(6):1 883-1 895.
HU Hanwen, ZHANG Yuanyuan, GUO Zhaojie, et al. Origins and hydrocarbon accumulation significance of bitumen in the deeply buried Jurassic reservoirs in the southern Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(6):1 883-1 895.
- [9] 靳军,刘明,刘雨晨,等.准噶尔盆地南缘下组合现今温压场特征及其控制因素[J].地质科学,2021,56(1):28-43.
JIN Jun, LIU Ming, LIU Yuchen, et al. Present-day temperature-pressure field and its controlling factors of the lower composite reservoir in the southern margin of Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(1):28-43.
- [10] 张凤奇,鲁雪松,卓勤功,等.准噶尔盆地南缘下组合储层异常高压成因机制及演化特征[J].石油与天然气地质,2020,41(5):1 004-1 016.
ZHANG Fengqi, LU Xuesong, ZHUO Qingong, et al. Genetic mechanism and evolution characteristics of overpressure in the lower play at the southern margin of the Junggar Basin, northwest China[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5):1 004-1 016.
- [11] 陈建平,王绪龙,邓春萍,等.准噶尔盆地南缘油气生成与分布规律——烃源岩地球化学特征与生烃史[J].石油学报,2015,36(7):767-780.
CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Geochemical features of source rocks in the southern margin, Junggar Basin, Northwestern China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7):767-780.
- [12] 黄家旋.准噶尔盆地南缘烃源岩热演化生烃史及油气源分析[D].西安:西安石油大学,2017.
HUANG Jiaxuan. The southern margin of Junggar Basin hydrocarbon source rock thermal evolution history of hydrocarbon generation and oil and gas source analysis[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
- [13] 马万云,迪丽达尔·肉孜,李际,等.准噶尔盆地南缘侏罗系烃源岩生烃特征[J].新疆石油地质,2020,41(1):31-37.
MA Wanyun, ROUZI Dilidaer, LI Ji, et al. Hydrocarbon generation of Jurassic source rocks in the southern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(1):31-37.
- [14] 邱楠生,杨海波,王绪龙.准噶尔盆地构造—热演化特征[J].地质科学,2002,37(4):423-429.
QIU Nansheng, YANG Haibo, WANG Xulong. Tectono-thermal evolution in the Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(4):423-429.
- [15] 匡立春,支东明,王小军,等.新疆地区含油气盆地深层—超深层成藏组合与勘探方向[J].中国石油勘探,2021,26(4):1-16.
KUANG Lichun, ZHI Dongming, WANG Xiaojun, et al. Oil and gas accumulation assemblages in deep to ultra-deep formations and exploration targets of petroliferous basins in Xinjiang region[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4):1-16.
- [16] 邱楠生,王绪龙,杨海波,等.准噶尔盆地地温分布特征[J].地质科学,2001,36(3):350-358.
QIU Nansheng, WANG Xulong, YANG Haibo, et al. The characteristics of temperature distribution in the Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(3):350-358.
- [17] 姜光政,高珊,饶松,等.中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J].地球物理学报,2016,59(8):2 892-2 910.

- JIANG Guangzheng, GAO Peng, RAO Song, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(8): 2 892-2 910.
- [18] 张快乐, 孙晓楠. 准噶尔盆地南缘冲断带侏罗系末剥蚀量的估算[J]. 地下水, 2014, 36(1): 203-204.
ZHANG Kuailie, SUN Xiaonan. Estimation of denudation thickness at the end of Jurassic in the thrust belt of the southern margin of Junggar Basin [J]. Ground Water, 2014, 36(1): 203-204.
- [19] 周妮, 李际, 刘翠敏, 等. 准噶尔盆地南缘油气苗有机地球化学特征及成因[J]. 石油实验地质, 2020, 42(6): 957-964.
ZHOU Ni, LI Ji, LIU Cuimin, et al. Organic geochemistry and genesis of oil and gas seeps in the southern Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(6): 957-964.
- [20] 王圣柱, 王千军, 张关龙, 等. 准噶尔盆地石炭系烃源岩发育模式及地球化学特征[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(4): 13-25.
WANG Shengzhu, WANG Qianjun, ZHANG Guanlong, et al. Development mode and geochemical characteristics of Carboniferous source rocks in Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(4): 13-25.
- [21] 李二庭, 靳军, 王剑, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷周缘中、浅层天然气地球化学特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 175-185.
LI Erting, JIN Jun, WANG Jian, et al. Geochemical characteristics and genesis of mid-to-shallow natural gas on the periphery of Shawan Sag, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 175-185.
- [22] 马德龙, 何登发, 袁剑英, 等. 准噶尔盆地南缘前陆冲断带深层地质结构及对油气藏的控制作用: 以霍尔果斯—玛纳斯—吐谷鲁褶皱冲断带为例[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 165-177.
MA Delong, HE Dengfa, YUAN Jianying, et al. The deep structures in the south Junggar foreland thrust belt and their control on petroleum accumulation: insights from the Huoerguosi-Manasi-Tugulu fold and thrust belt [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 165-177.
- [23] 于海涛, 孙雨, 孙同文, 等. 断-砂复合输导体系及优势输导通道表征方法与应用[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 31-40.
YU Haitao, SUN Yu, SUN Tongwen, et al. Characterization methods and application of fault-sandstone composite transport system and dominant migration pathways [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 31-40.
- [24] 薛罗, 马轮, 史忠生, 等. 南苏丹 Melut 盆地 Ruman 潜山构造演化及其对油气成藏的控制作用[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(2): 53-60.
XUE Luo, MA Lun, SHI Zhongsheng, et al. Tectonic evolution and its influence on hydrocarbon accumulation of Ruman buried hill in Melut Basin, South Sudan [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(2): 53-60.
- [25] 周小军, 王旭, 陈伟, 等. 准噶尔盆地南缘中段深层构造变形特征及构造转换关系[J]. 地质科学, 2020, 55(2): 339-351.
ZHOU Xiaojun, WANG Xu, CHEN Wei, et al. Structural deformation and transition relations of the deep structure in the central margin of the southern Junggar Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(2): 339-351.
- [26] 张奎华, 曹忠祥, 王越, 等. 博格达地区中二叠统芦草沟组沉积相及沉积演化[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(4): 1-12.
ZHANG Kuihua, CAO Zhongxiang, WANG Yue, et al. Sedimentary facies and evolution of Middle Permian Lucaogou Formation in Bogda area [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(4): 1-12.
- [27] 司学强, 袁波, 彭博, 等. 准噶尔盆地南缘冲断带侏罗系喀拉扎组沉积特征[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(4): 389-398.
SI Xueqiang, YUAN Bo, PENG Bo, et al. Sedimentary characteristics of Jurassic Kalazha formation in the thrust belt on the southern margin of Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(4): 389-398.
- [28] 司学强, 袁波, 郭华军, 等. 准噶尔盆地南缘清水河组储集层特征及其主控因素[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(1): 38-45.
SI Xueqiang, YUAN Bo, GUO Huajun, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of cretaceous Qingshuihe Formation in the southern margin of Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(1): 38-45.

编辑 何青芳