

准噶尔盆地博格达山周缘全油气系统油气藏类型及成藏模式

杨有星^{1,2,3},高永进^{1,2,3},孙相灿^{1,2,3},文磊^{1,2,3},陈夷^{1,2,3},田亚^{1,2,3},
刘丽红^{1,2,3},周继兵⁴,尹成明^{1,2,3},伍新和^{1,2,3}

(1. 中国地质调查局 油气资源调查中心,北京 100083;2. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室,北京 100083;3. 中国地质调查局 非常规油气重点实验室,北京 100083;4. 新疆维吾尔自治区地质局 乌鲁木齐地质大队,新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:准噶尔盆地博格达山前带经历了多期构造运动和叠加变形改造,构造与沉积演化复杂,优质烃源岩分布特征不清。研究该区全油气系统油气藏类型及成藏模式对指导山前复杂构造区油气勘探具有重要意义。利用野外露头、地震、新钻井及地球化学资料,研究了博格达山前复杂构造区二叠系全油气系统石油地质条件及成藏类型,建立了山前复杂构造区“全油气系统多动力油气成藏及其有序分布”模式。研究表明:①博格达山前带中二叠统芦草沟组发育一套厚度较大的优质湖相烃源岩。该套烃源岩为裂谷构造背景下的咸化湖盆半深湖-深湖沉积,现今博格达山位置为中二叠统芦草沟组沉积时期的沉降和沉积中心,以黑色-灰黑色富有机质泥页岩为主,距博格达山越近,烃源岩越厚、有机质丰度与成熟度越高。②博格达山前复杂构造区具备全油气系统成藏条件。以芦草沟组优质烃源岩为中心,发育源内芦草沟组页岩和致密砂岩、源下井井子沟组致密砂岩、源上梧桐沟组致密砂岩和克拉玛依组砂岩3类有利储层。这3类储层在空间上有序分布,通过晚期形成的断裂与芦草沟组优质烃源岩相沟通,具备规模成藏条件。③山前复杂构造区具有源内束缚动力场吸附作用滞留烃形成的页岩油气藏、源-储相邻局限动力场非浮力主导油气短距离运移形成的致密砂岩油气藏以及源上自由动力场浮力主导油气长距离运移形成的油气藏。这3类油气藏在空间上有序分布。该模式指导博格达山北缘阜康断裂带上盘和南缘柴窝堡凹陷钻获重要油气发现,证实博格达山前复杂构造带具备良好的常规和非常规油气勘探潜力。

关键词:全油气系统;页岩油气;致密油气;成藏模式;芦草沟组;二叠系;博格达山;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Hydrocarbon reservoir types and accumulation model of a whole petroleum system on the periphery of the Bogda Mountain, Junggar Basin

YANG Youxing^{1,2,3}, GAO Yongjin^{1,2,3}, SUN Xiangcan^{1,2,3}, WEN Lei^{1,2,3}, CHEN Yi^{1,2,3},
TIAN Ya^{1,2,3}, LIU Lihong^{1,2,3}, ZHOU Jibing⁴, YIN Chengming^{1,2,3}, WU Xinhe^{1,2,3}

(1. Oil and Gas Resources Survey Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Continental Shale Oil, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas Geology, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 4. Urumqi Geological Team, Geological Bureau of Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Urumqi, Xinjiang 830000, China)

Abstract: The Bogda piedmont zone in the Junggar Basin experienced multiple stages of tectonic movements, as well as superimposed deformations and reworking, leading to complex tectono-sedimentary evolution. As a result, the distribution characteristics of high-quality source rocks in this piedmont zone remain poorly understood. Investigating the hydrocarbon reservoir types and accumulation model of the whole petroleum system (WPS) in this zone holds great significance for guiding hydrocarbon exploration in complex piedmont structural settings. Using data from outcrops, seismic surveys, newly drilled wells, and geochemical analysis, we examine the petroleum geological conditions and hydrocarbon accumulation types of the Permian WPS in the complex Bogda piedmont structural zone. Accordingly, a multi-dynamic hydrocarbon accumulation model together with an orderly hydrocarbon reservoir distribution pattern of the WPS is developed. The results indicate that the Middle Permian Lucaogou Formation in the Bogda piedmont zone contains a thick

收稿日期:2025-09-05;修回日期:2025-11-25。

第一作者简介:杨有星(1985—),男,正高级工程师,沉积学与油气成藏地质评价。E-mail: yangyouxing22@163.com。

通信作者简介:孙相灿(1986—),男,高级工程师,石油地质与资源潜力评价。E-mail: 250047377@qq.com。

基金项目:中国地质调查局二级项目(DD202402003, DD20230042, DD20190106);国家自然科学基金项目(41802173)。

suite of high-quality lacustrine source rocks consisting primarily of black to grayish-black organic-rich shales. These source rocks were deposited in a semi-deep to deep saline lacustrine basin under a rift tectonic setting, with the subsidence and depositional center located at the present-day Bogda Mountain. These rocks exhibit a greater thickness, higher organic matter abundance, and higher thermal maturity as their distance from the Bogda Mountain decreases. The complex Bogda piedmont structural zone possesses the hydrocarbon accumulation conditions for a WPS. Specifically, with the high-quality source rocks in the Lucaogou Formation as a center, three types of favorable reservoirs are identified: (1) shales and tight sandstones in the Lucaogou Formation, situated within source rocks, (2) tight sandstones in the Jingjingzigou Formation, located beneath source rocks, and (3) tight sandstones in the Wutonggou Formation and sandstones in the Karamay Formation, both situated above source rocks. These three types of reservoirs are orderly distributed in space, and are connected to the high-quality source rocks of the Lucaogou Formation through faults formed at the late stage, creating favorable conditions for large-scale hydrocarbon accumulation. The complex Bogda piedmont structural zone exhibits three types of hydrocarbon reservoirs: (1) shale hydrocarbon reservoirs within source rocks, formed by retained hydrocarbons under the action of adsorption in a irreducible dynamic field, (2) tight-sand hydrocarbon reservoirs adjacent to source rocks, resulting from short-distance hydrocarbon migration driven predominantly by non-buoyancy in a restricted dynamic field, and (3) conventional hydrocarbon reservoirs above source rocks, formed by long-distance hydrocarbon migration driven primarily by buoyancy in a free dynamic field. These hydrocarbon reservoirs also show an orderly spatial distribution. Under the guidance of the hydrocarbon accumulation model of the WPS, major hydrocarbon discoveries have been made during exploratory drilling in the hanging wall of the Fukang fault zone and the Chaiwopu Sag, located along the northern and southern margins of the Bogda Mountain, respectively. These discoveries confirm the promising prospects for conventional and unconventional hydrocarbon exploration in the complex Bogda piedmont structural zone.

Key words: whole petroleum system (WPS), shale oil and gas, tight oil and gas, accumulation pattern, Lucaogou Formation, Permian, Bogda Mountain, Junggar Basin

引用格式:杨有星,高永进,孙相灿,等. 准噶尔盆地博格达山周缘全油气系统油气藏类型及成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(4): 1160–1177. DOI: 10. 11743/ogg20260407.

YANG Youxing, GAO Yongjin, SUN Xiangcan, et al. Hydrocarbon reservoir types and accumulation model of a whole petroleum system on the periphery of the Bogda Mountain, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(4): 1160–1177. DOI: 10. 11743/ogg20260407.

勘探实践证实,全油气系统理论自2014年提出以来,已经成为准噶尔、鄂尔多斯、四川以及松辽等多个大型含油气盆地深层-超深层源内油气勘探获得突破的重要指导理论^[1-4]。全油气系统理论强调有效烃源岩生成的油气,经历运移、聚集乃至后期调整的全过程,涵盖非常规连续型聚集与常规圈闭型成藏,构成一个统一的自然系统^[5-8]。该理论揭示了油气生成序列及常规-非常规油气聚集机制^[9-11],突破了传统油气系统“从源到圈”的局限,转向“源-储耦合、有序聚集”的研究视角,阐释了常规与非常规油气藏之间的成因联系^[12-14]。在全油气系统理论的指导下,准噶尔盆地腹部地区二叠系油气勘探取得显著成效,在玛湖凹陷和吉木萨尔凹陷相继发现10亿吨级大油田^[15-16],盆1井西、沙湾以及阜康等凹陷陆续实现油气突破或形成规模储量^[17-19],发现阜康断裂带下盘吉南凹陷萨探1井的亿吨级油藏^[20-21],并建立了玛湖凹陷和吉木萨尔凹陷全油气系统成藏模式。

准噶尔盆地博格达山周缘中二叠统芦苇沟组发育一套厚度大、分布广的咸化湖盆暗色泥岩,分析测试结果表明其为一套生-排烃效率高的优质烃源岩,指示该区也曾是二叠纪准噶尔盆地重要的深水湖盆之一^[22-23]。但是,与构造相对稳定、勘探程度较高的玛湖和吉木萨尔等准噶尔盆地腹部凹陷不同,博格达山前带属于中亚造山带中的北天山造山带,晚古生代后经历了多期构造反转和强烈的变形叠加及破坏,构造单元划分、烃源岩分布以及油气成藏主控因素不清,极大制约了该区油气勘探的进程和成效^[24-25]。针对上述问题,中国地质调查局围绕该区开展了持续性基础地质调查与研究,完成了大龙口和大黄山等8条野外露头剖面测量,采集航空高光谱数据2 500 km²,解释二维地震资料3 200 km,采集二维地震161 km/(11条),钻探地质调查井和参数井6口。其中,新吉参1井和新永地1井等在博格达山前带深层二叠系芦苇沟组和浅层三叠系克拉玛依组获得工业气流^[26-27]。本研究

a. 研究区位置;b. 研究区构造单元划分;c. 石炭系—三叠系综合柱状图

海相碎屑岩沉积。中二叠统自下而上发育乌拉泊组、井井子沟组、芦草沟组和红雁池组。乌拉泊组主要为灰绿色-紫红色长石砂岩夹少量薄层凝灰岩;井井子沟组主要为蓝灰色凝灰岩、凝灰质砂泥岩夹砂岩以及页岩;芦草沟组整体为灰黑色泥岩,中下部夹少量砂岩、凝灰质砂岩和凝灰岩;红雁池组为灰绿色砂泥岩互层夹砾岩和砂砾岩层。上二叠统自下而上发育泉子街组、梧桐沟组和锅底坑组。三叠系自下而上发育韭菜园组、烧房沟组、克拉玛依组、黄山街组和郝家沟组。研究区盆地构造演化经历了6个阶段(图2)^[25]。其中,

中二叠世主要为陆内裂谷盆地发育阶段,是二叠系芦草沟组优质烃源岩的主要发育期;三叠纪为陆内拗陷发育阶段,是中-上三叠统克拉玛依组储层的主要形成期;白垩纪陆内统一拗陷和新生代再生前陆盆地发育阶段,是逆冲构造与圈闭的主要形成期^[31-32]。

2 二叠系芦草沟组优质烃源岩分布特征

准噶尔盆地博格达山周缘芦草沟组发育一套咸化湖相优质烃源岩。以往对准噶尔盆地二叠系芦草沟

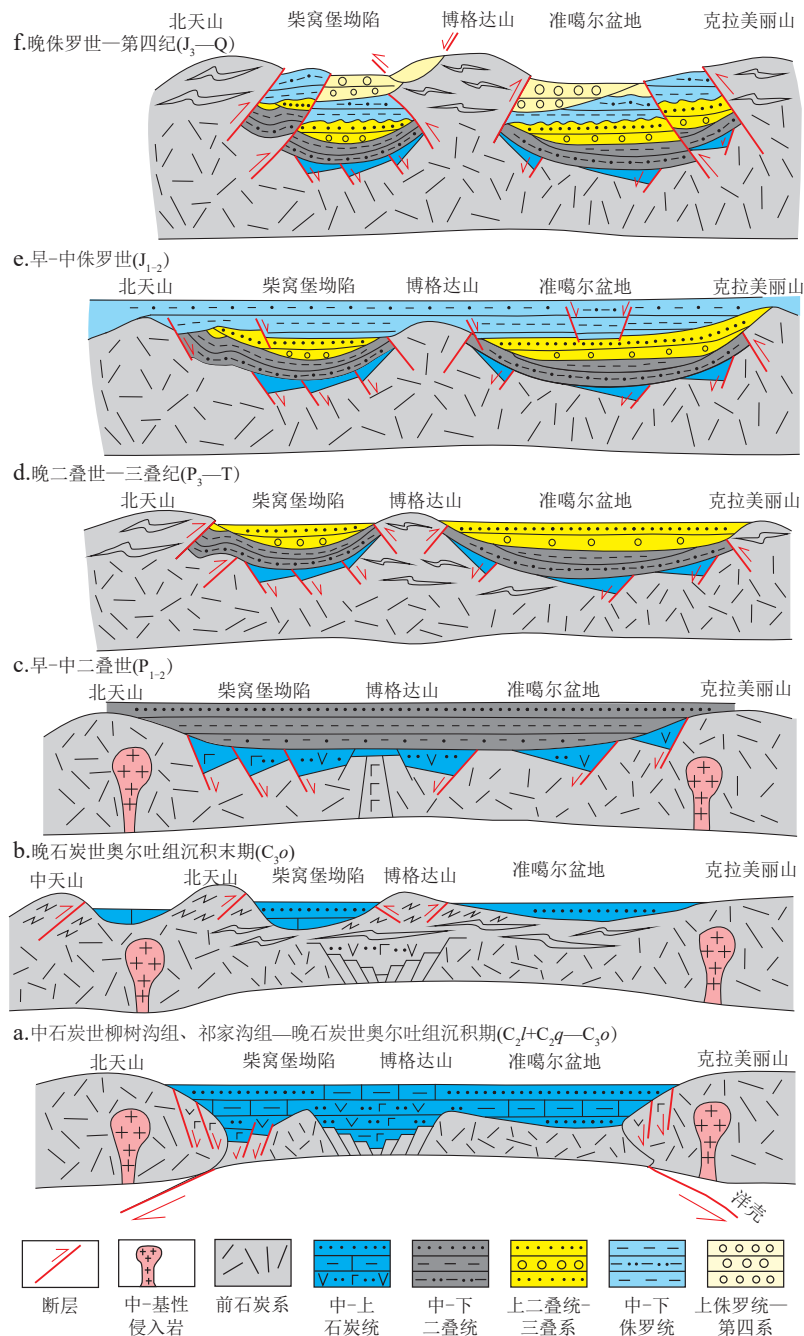


图2 准噶尔盆地博格达山构造演化及沉积充填过程(据文献[25]修改)

Fig. 2 Tectonic evolution and sedimentary filling process of the Bogda Mountain, Junggar Basin (modified after reference [25])

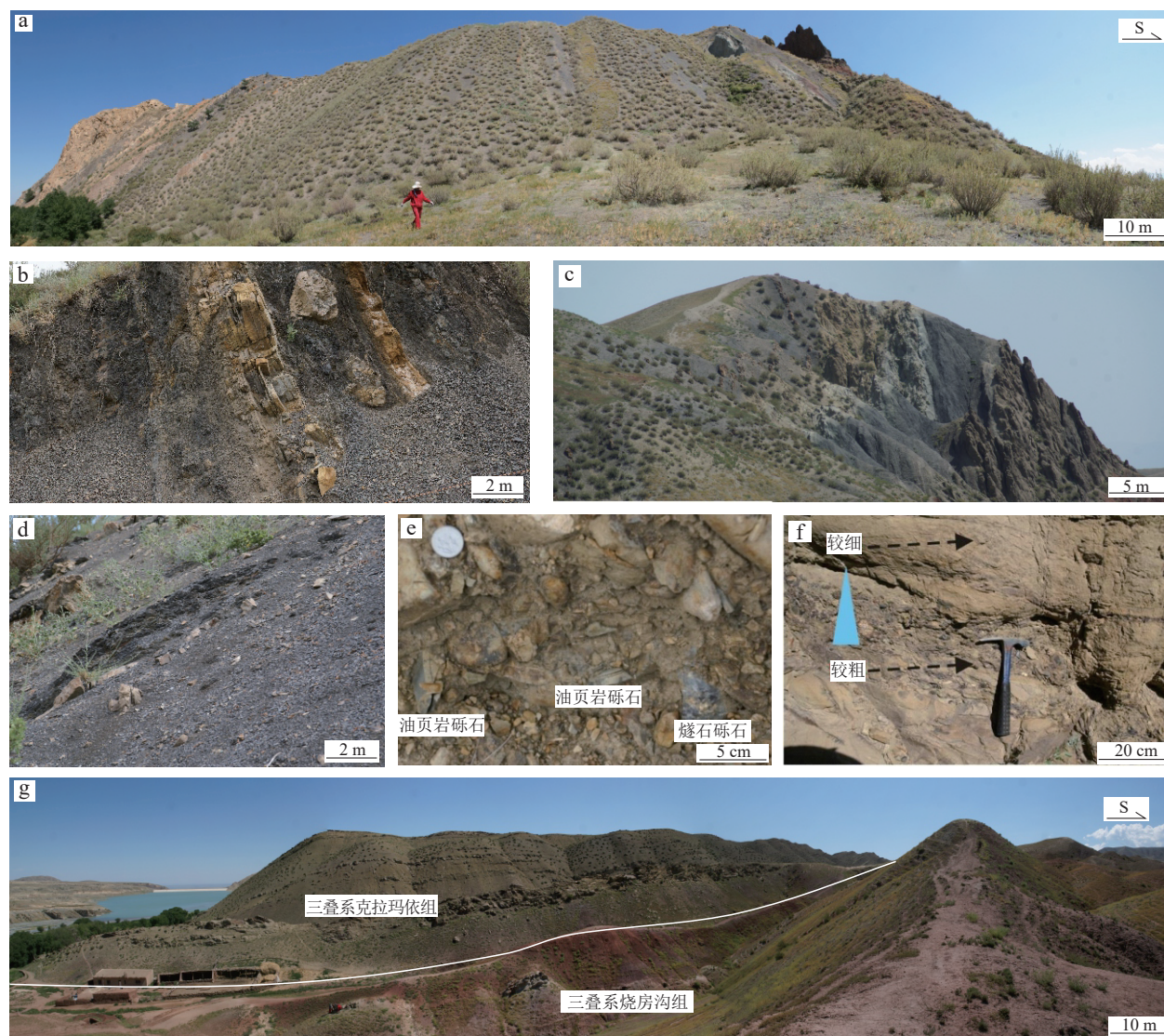


图3 准噶尔盆地博格达山周缘中、上二叠统-三叠系地层岩性发育特征野外剖面照片

Fig. 3 Lithological characteristics of the Middle-Upper Permian-Triassic strata on the periphery of the Bogda Mountain, Junggar Basin
a. 中二叠统芦草沟整体岩性特征, 东大龙口露头剖面; b. 芦草沟组上段灰褐色油页岩夹透镜状白云岩, 东大龙口露头剖面; c. 芦草沟组下段黑色泥岩夹少量砂岩, 东大龙口露头剖面; d. 芦草沟组黑色油页岩夹薄层白云岩, 东大龙口露头剖面; e. 上二叠统泉子街组灰黑色油页岩砾石, 东大龙口露头剖面; f. 三叠系克拉玛依组辫状河三角洲平原河道砂岩, 西大龙口露头剖面; g. 三叠系克拉玛依组与烧房沟组角度不整合, 西大龙口露头剖面

组烃源岩的研究主要集中在盆地腹部的玛湖、沙湾、阜康以及吉木萨尔地区。博格达山周缘二叠系芦草沟组发育一套咸化湖盆构造背景下的深湖-半深湖相暗色泥岩沉积, 具备形成优质烃源岩的沉积条件^[33-34]。然而, 由于缺乏深钻井资料, 对该套烃源岩的评价主要依靠露头剖面样品数据, 而露头剖面地层为阜康断裂上盘抬升至地表的产物, 成熟度普遍偏低, 难以准确评价原地系统芦草沟组烃源岩的生烃潜力。通过新吉参1井、新永地1井、博参1井以及准页4井等参数井钻探取心分析测试数据, 结合野外露头剖面资料, 本文系统研究了芦草沟组的沉积展布特征、烃源岩生烃指标和成熟度变化特征。

2.1 芦草沟组沉积相类型及平面分布特征

中二叠统芦草沟组沉积期, 准噶尔盆地博格达山周缘为陆相陆内裂谷构造演化环境, 整体为拉张伸展的构造环境, 形成了“南断北超”的不对称统一湖盆, 水体深度差异较大, 现今博格达山及其北缘所在位置为中二叠统芦草沟组沉积期的沉降中心和沉积中心, 裂谷盆地边界断裂控制了湖盆延伸方向和构造形态, 湖盆轴向呈近东西向延伸, 具有南陡、北缓的构造特征^[35-36]。研究区博格达山南部以扇三角洲沉积为主, 中部水深最大, 以半深湖-深湖和重力流沉积为主, 北部以滨-浅湖和辫状河三角洲沉积为主(图4)。其中,

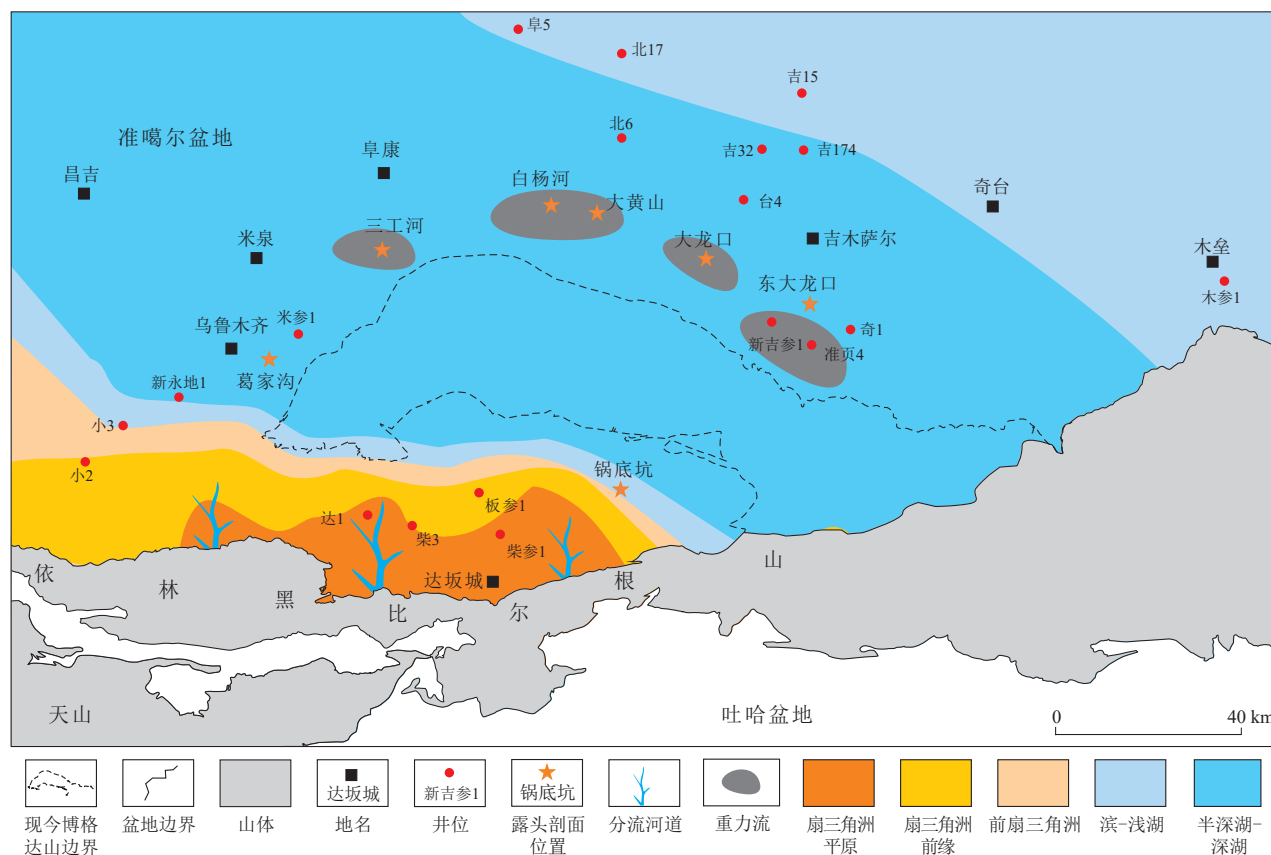


图4 准噶尔盆地博格达山周缘二叠系芦草沟组沉积相平面分布(据文献[33]修改)

Fig. 4 Sedimentary facies distribution of the Permian Lucaogou Formation on the periphery of the Bogda Mountain, Junggar Basin (modified after reference [33])

半深湖-深湖亚相中发育部分重力流浊积砂体^[37-38]。岩性以大套厚层灰黑色泥页岩为主,夹有块状泥岩粉砂质、泥晶白云岩和少量岩屑细砂岩,并伴有大量黄铁矿等自生矿物(图5)。页岩呈纹层结构,沿层面容易剥离。由于现今博格达山位置为芦草沟组的沉降和沉积中心,因此山前带芦草沟组厚度较大,平均厚度超过400 m,新吉参1井地区厚度最大,达1 000 m以上。

构造运动和古气候条件控制博格达山周缘沉积体系的类型和演化。大量的岩浆岩岩石学、岩石地球化学和同位素地球化学特征分析表明,博格达山周缘晚石炭世一早二叠世构造在裂谷环境中形成,中二叠世延续了陆内裂谷的构造背景,导致博格达地区为该区的沉降中心,为沉积物的堆积提供了巨大的可容纳空间,该区也成为湖盆水体最深的区域。通常情况下,可以利用铈/铜元素含量比值(Sr/Cu)、铈/钡元素含量比值(Sr/Ba)、镁/钙元素含量比值(Mg/Ca)、铜/锌元素含量比值(Cu/Zn)、化学蚀变指数以及斜长石蚀变指数等参数判断沉积时期的气候条件。铈与钡是碱土金属中化学性质较相似的两种元素,与铈相比,钡的化合物溶解度更低。在沉积水体中,随着蒸发的不断进行,早期

低盐度环境中形成的沉积物中富钡、贫铈,而晚期高盐度环境中形成的沉积物中则富铈、贫钡。铈含量的升高和钡含量的降低反映水体蒸发作用的加强,盐度随之升高,因此可利用 Sr/Ba 元素质量比值 $[m(Sr)/m(Ba)]$ 来确定古盐度^[39]。博格达山北麓大黄山剖面芦草沟组泥岩样品中 Sr, Ba 与 B 的微量元素分析测试结果显示, $m(Sr)/m(Ba)$ 值集中分布在 $0.66 \sim 1.53$,相当 B 值主要分布在 $(234.66 \sim 852.36) \times 10^{-6}$,说明二叠系芦草沟组沉积水体环境为半咸水-咸水环境。

2.2 芦草沟组烃源岩有机质丰度、类型和分布特征

芦草沟组岩石类型多样,以黑色-灰黑色泥岩为主,夹杂粉砂质泥岩、云质泥岩和油页岩等,厚度较大,泥岩集中段发育有机质纹层,富含介形虫、藻类、疑源类、孢粉、微细菌以及甲烷菌等微体生物化石。博格达山北缘新吉参1井、博参1井和准页4井钻井数据揭示,芦草沟组烃源岩厚度分别为410,330和270 m。而博格达山南麓柴窝堡凹陷小1井和新永地1井钻井数据揭示,芦草沟组烃源岩厚度超过280 m,具有越靠近博格达山、厚度越大的特征,这主要受控于中二叠世芦草

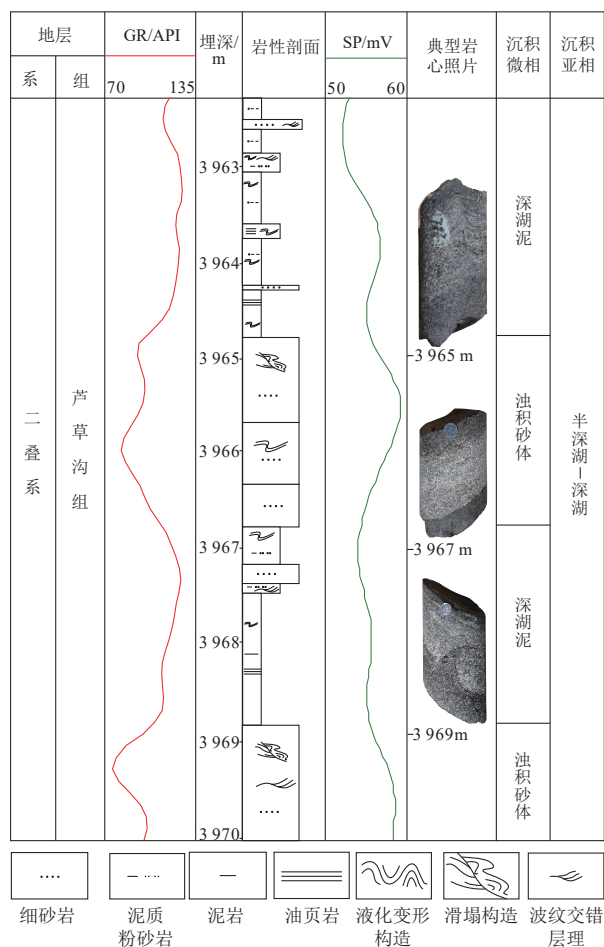


图5 准噶尔盆地博格达山周缘新吉参1井芦草沟组半深湖-深湖相岩性发育特征综合柱状图

Fig. 5 Column showing the lithological characteristics of the semi-deep to deep lacustrine subfacies in the Lucaogou Formation in well XJC-1 on the periphery of the Bogda Mountain, Junggar Basin

沟组沉积时期博格达山周缘地区湖盆的沉积和沉降中心(图6)。烃源岩有机质丰度较高,以I-II₁型干酪根为主(表1)^[40-41]。芦草沟组沉积时期,湖泊中曾发生大规模蓝藻水华事件^[42],藻类勃发为芦草沟组提供充足的烃源基础,有利于有机质的富集。博格达山南部柴窝堡凹陷新永地1井钻探结果表明,芦草沟组烃源岩总有机碳含量(TOC)介于0.95%~6.94%、平均值为3.49%,生烃潜量(S_1+S_2)介于1.42~29.11 mg/g、平均值为11.16 mg/g,氯仿沥青“A”含量介于0.065 3%~0.493 7%、平均值为0.280 2%,总体显示有机质丰度较好;该组烃源岩的干酪根显微组分以腐泥组为主,普遍占比介于60%~80%,大部分为层状藻,镜质体反射率(R_o)介于1.15%~1.39%,达到成熟阶段,以生油和湿气为主。新吉参1井芦草沟组有机质丰度不高,主要由于该井埋深较大,成熟度较高,残余有机质潜力较小。

2.3 芦草沟组烃源岩平面成熟度差异

受阜康断裂后期冲断抬升的影响,博格达山周缘芦草沟组烃源岩有机质成熟度平面差异较大。越靠近博格达山地区(如新吉参1井区),烃源岩埋深越大,热演化程度越高,总体达到成熟-高成熟阶段,而离博格达山越远,成熟度越低(图7)。新吉参1井二叠系芦草沟组主体埋深介于3 900~4 900 m,钻井揭示其厚度达410 m,属于厚层高-过成熟烃源岩, R_o 介于1.31%~1.83%,平均值为1.71%,最高热解峰温(T_{max})介于460~480 °C,大于455 °C,达到高成熟阶段(湿气)。同时,新吉参1井地层埋藏-热演化史分析及包裹体测试结果显示,二叠系芦草沟组烃源岩在二叠纪快速深埋,于二叠纪晚期进入生烃门限,存在二叠纪晚期、侏罗纪晚期和新近纪3期油气充注,是该区油气藏形成的主要贡献层系^[43](图8)。柴窝堡凹陷永丰次凹新永地1井芦草沟组烃源岩 R_o 介于1.15%~1.39%,处于成熟阶段;露头区芦草沟组烃源岩 R_o 介于0.60%~1.20%;吉木萨尔凹陷芦草沟组烃源岩 R_o 介于0.87%~0.91%,平均值为0.89%,处于低-成熟阶段,受阜康断裂影响最小,构造演化相对稳定。博参1井代表地层出露区,在阜康断裂冲断影响下持续强烈抬升,烃源岩成熟度最低,多数处于未成熟-低成熟阶段,主要发育油页岩固体矿($R_o < 0.5$),伴随少量稠油^[44]。

3 博格达山前页岩、致密砂岩和常规储层发育特征

根据致密油储层评价标准,以空气渗透率 $1.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、基质覆压渗透率 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、孔喉直径 $1 \mu\text{m}$ 为界,可将储层分为常规储层和非常规储层^[45-46];其中,非常规储层又可进一步划分为页岩储层和致密砂岩储层。博格达山周缘纵向上发育5套储层,分别是二叠系芦草沟组页岩储层与致密砂岩储层、二叠系井井子沟组和梧桐沟组致密砂岩储层以及三叠系克拉玛依组常规砂岩储层。

3.1 二叠系芦草沟组页岩和致密砂岩储层

阜康断裂带芦草沟组为一套细粒沉积岩,岩性复杂多样,主要由黑色泥岩、碳酸盐岩和细碎屑岩(粉细砂岩)混积构成,发育页岩储层和致密砂岩储层。页岩储层岩性主要为富有机质暗色泥页岩、白云质(含碳、含有机质及含粉砂)泥岩和粉砂质(含碳与含钙)泥岩,颜色一般呈灰黑色和黑色,泥质含量较高,可达61%~

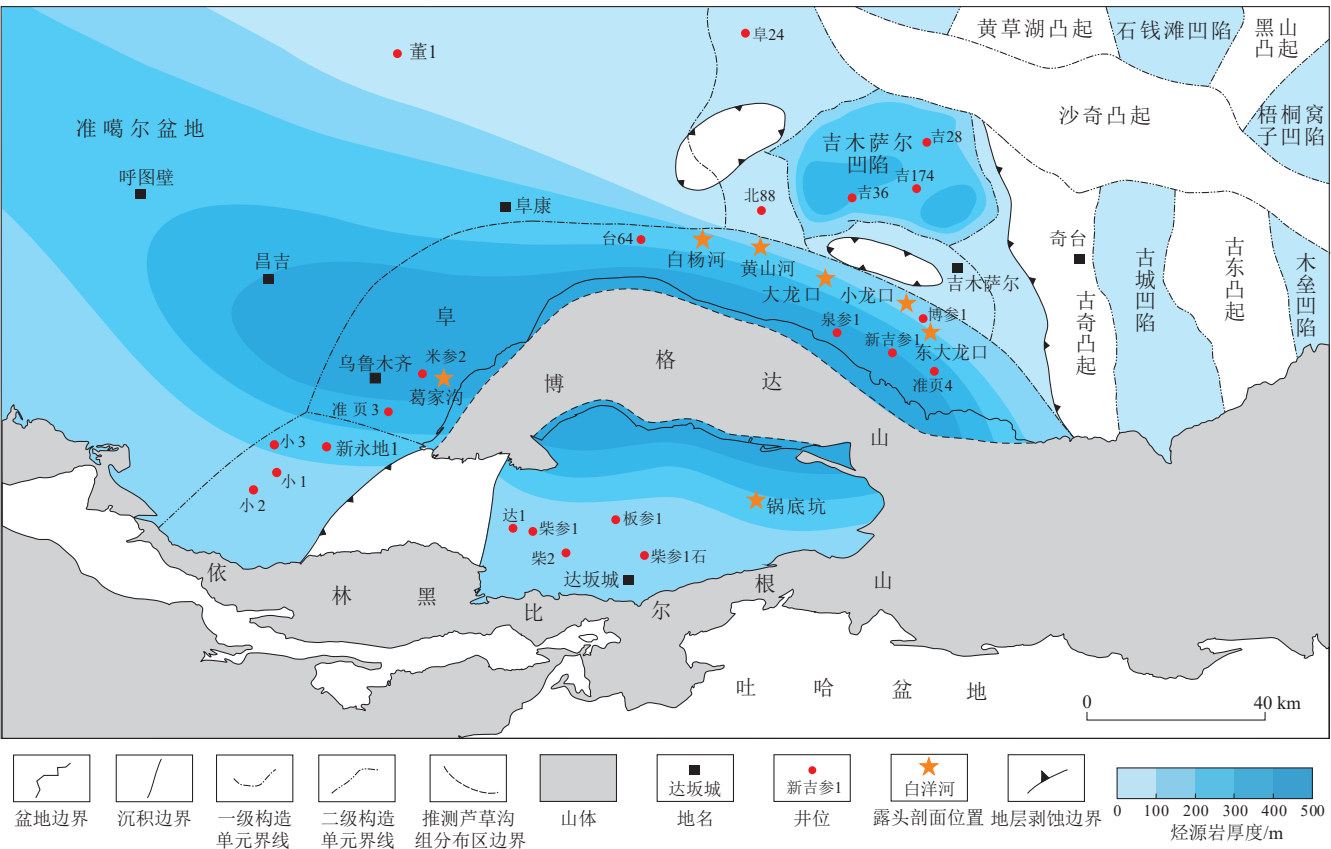


图6 准噶尔盆地博格达山周缘二叠系芦草沟组烃源岩厚度等值线图

Fig. 6 Isopach map of source rocks in the Permian Lucaogou Formation on the periphery of the Bogda Mountain , Junggar Basin

表1 准噶尔盆地博格达山周缘二叠系芦草沟组烃源岩地化指标统计

Table 1 Statistics of the geochemical indicators of source rocks in the Permian Lucaogou Formation on the periphery of the Bogda Mountain, Junggar Basin

构造带	露头、钻井	TOC/%	(S ₁ +S ₂)/(mg/g)	氯仿沥青“A” 质量分数/%	有机质 类型	R _o /%	数据来源
阜康构造带	西大龙口露头	7.05	20.80	0.100	I 型	0.74	本次实测
	大黄山露头	4.85	39.00	0.180	I 型	0.74	
	白杨沟露头	4.45	21.07	0.121	I 型	0.91	
	小龙口露头	7.05	23.00	0.150	I 型	1.18	
	新吉参1井	1.03	1.17	0.050	I - II ₁ 型	1.70	
	奇1井	5.45	5.90	0.300	I - II ₁ 型	0.75	
吉木萨尔凹陷	萨探1井	5.20	37.60	0.600	II ₁ 型	0.75	文献[27,43]
	吉17井	5.20	11.30	0.190	I - II ₁ 型	0.74	
	吉174井	6.11	15.23	0.160	II ₁ 型	0.87	
柴窝堡凹陷	锅底坑露头	2.50	5.10	0.090	I - II ₁ 型	0.60	
	小1井	3.90	3.53	0.183	I - II ₁ 型	0.78	
	新永地1井	3.49	11.16	0.280	I - II ₁ 型	1.20	本次实测

注:表中所有数据为参数指标平均值;TOC表示总有机碳含量;S₁+S₂表示生烃潜力;R_o表示镜质体反射率。

91%,平均值为78%;炭质碎屑物含量介于5%~15%,平均值为10%;石英含量介于3%~25%,平均值约为10%;长石和方解石矿物含量介于2%~5%。致密砂岩储层岩性包括泥质粉砂岩和粉砂岩,X射线衍射全岩矿物含量分析显示黏土矿物含量一般介于3%~62%,平均值约为30%;石英含量介于14%~55%,平均值约为31%;钾长石+斜长石含量介于2%~57%,平均值约为24%;碳酸盐矿物含量介于2%~54%,平均值约为

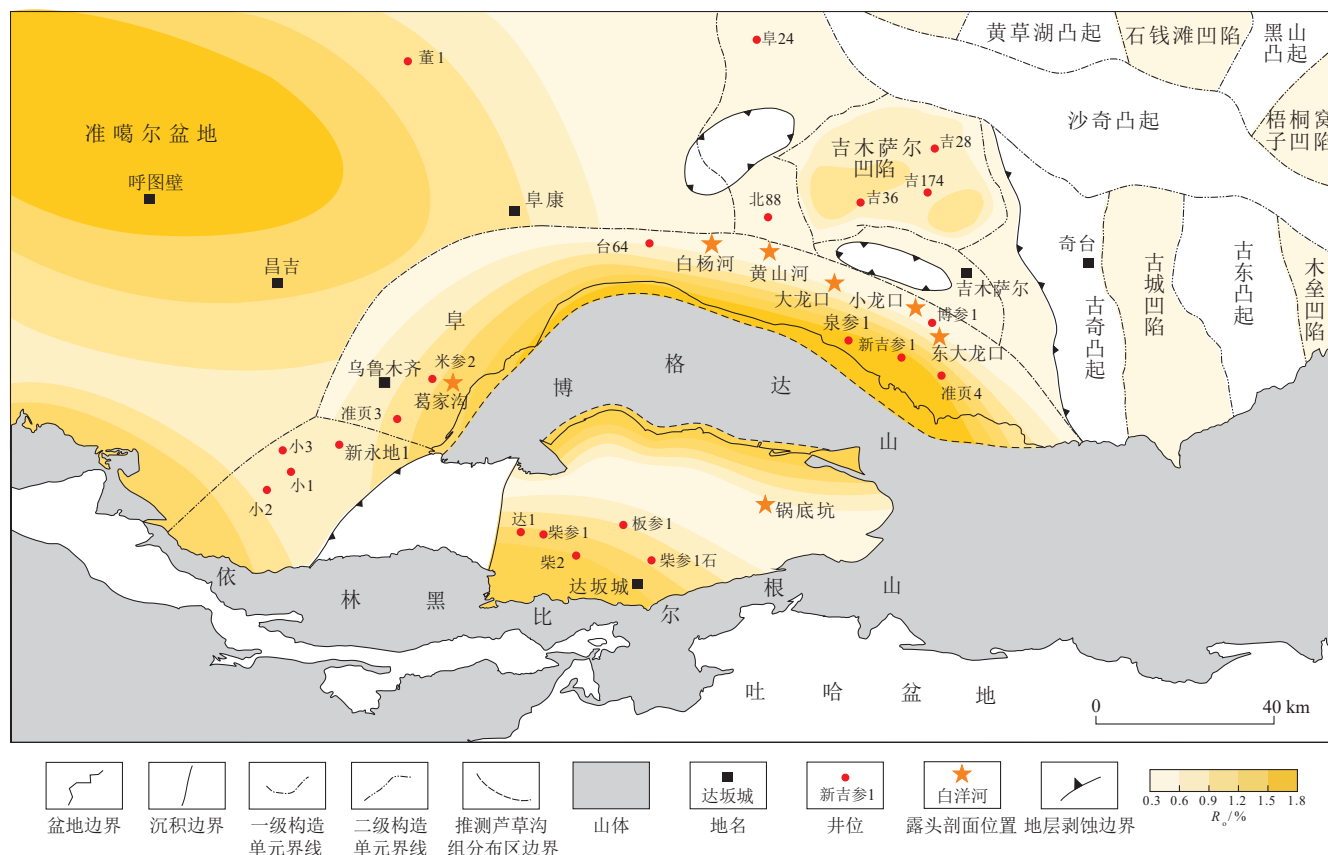


图7 准噶尔盆地博格达山周缘二叠系芦草沟组烃源岩成熟度(R_o)等值线图

Fig. 7 Contour map showing the thermal maturity (R_o) of source rocks in the Permian Lucaogou Formation on the periphery of the Bogda Mountain, Junggar Basin

15%。孔隙类型包括原生孔隙和次生孔隙,其中原生孔隙约占36%,包括粒间孔(占29%)、粒内孔(占6%)和潜穴(占1%);次生孔隙约占64%,包括粒间溶孔(占26%)、溶蚀缝(占11%)、铸模孔(占11%)、粒内溶孔(占8%)和微裂缝(占9%)5种类型。博参1井油气储集部位集中在页岩层间缝隙和天然裂缝中,录井显示埋深162.0~998.0 m井段共发现气测显示287.0 m/(44层),全烃含量最高达2.4%,测井解释油层43.7 m/(10层)。

柴窝堡凹陷永丰地区芦草沟组具有明显的上、下分段特征(图9)。其中,上段以灰色粉砂岩和细砂岩为主,局部可见细砾岩与灰色泥岩,为致密砂岩储层发育段;下段包括黑色泥岩、页岩夹薄层粉砂岩以及灰色白云质砂岩,局部可见过渡性灰岩(上-下段过渡部分),为页岩储层发育段。镜下薄片显示,新永地1井芦草沟组上段致密储层岩性主要为岩屑砂岩;岩石组分以岩屑为主,其次为石英;岩屑成分以中性喷出岩(安山质)为主,另含少量酸性喷出岩屑;岩石学特征表现以陆源碎屑为主。岩石粒级为中-细砂级和粉砂级,分选程度中等偏差,磨圆度较差,以次棱角-棱角状为主。颗粒呈支撑结构,彼此间多为线-凹凸接触

关系。胶结物主要为黏土矿物和碳酸盐矿物,胶结类型以孔隙-压嵌为主,成分成熟度和结构成熟度较低。铸体薄片观察结果显示,新永地1井芦草沟组上段致密砂岩储层储集空间类型包括原生孔隙、次生溶蚀孔隙和裂缝,总体以次生溶蚀孔隙为主,原生孔隙破坏严重,仅发育残余粒间孔(图10a)。次生溶蚀孔隙分布具有较强的非均质性,主要包括粒间溶孔和粒内溶孔(图10b,c)。岩心和铸体薄片观察结果显示,裂缝可以分为3种类型:微裂缝、早期构造缝以及晚期构造缝。微裂缝指贯穿于颗粒之间、形似裂缝的孔隙,主要见于泥质砂岩中,该类孔隙主要源自埋藏期有机酸溶蚀形成的流体通道,后被油气充填,其发育与构造断裂或破碎作用关系不大(图10d);早期构造缝大多为充填缝,形成之后先后被石英、方解石及有机质充填(图10e);晚期构造缝多为高角度裂缝(10f),呈锯齿状延伸,其中未充填裂缝可作为烃类运移和渗流的通道,显著提升了储层的渗流能力,有利于提高油气产能。

3.2 二叠系井井子沟组和梧桐沟组致密砂岩储层

博格达山前带北缘凹陷区的上二叠统梧桐沟组是

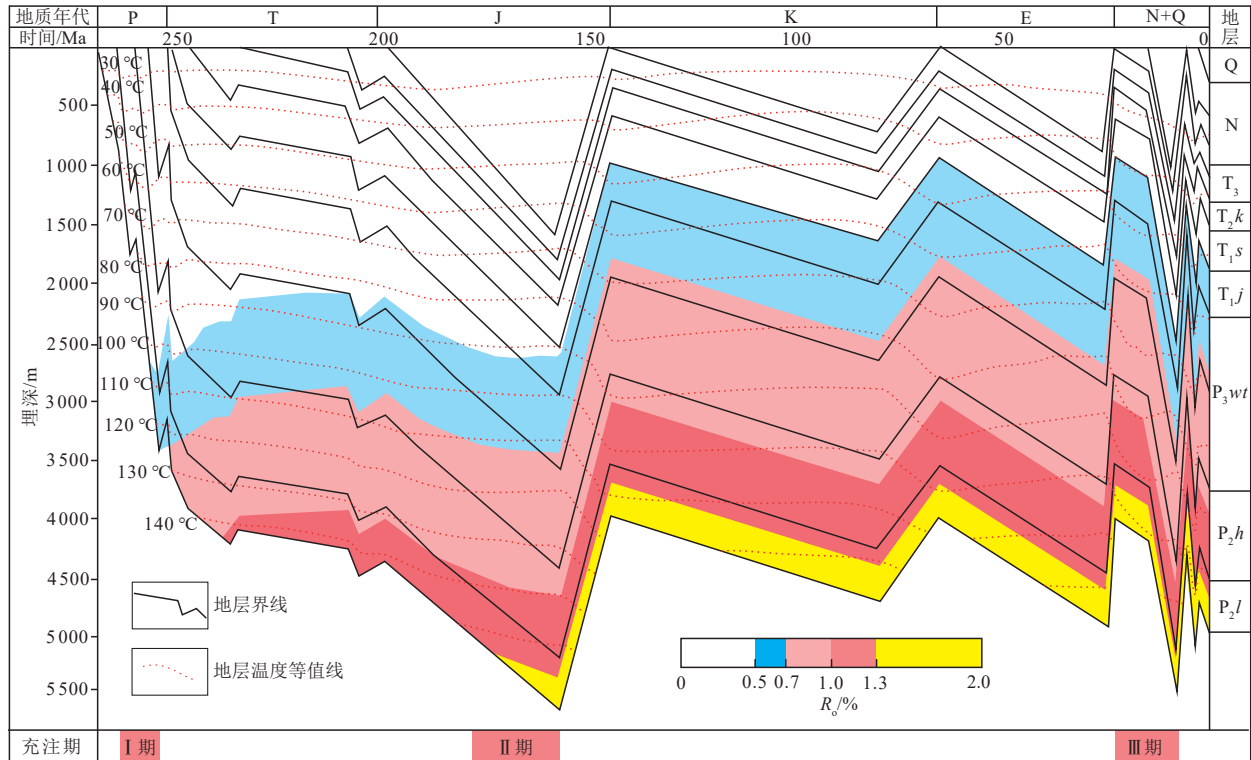


图8 准噶尔盆地博格达山前带新吉参1井油气藏形成期次综合判别图版(据文献[43]修改)

Fig. 8 Comprehensive discriminant diagram showing the formation stages of hydrocarbon reservoirs in well XJC-1 in the Bogda piedmont zone, Junggar Basin (modified from reference [43])

P. 二叠纪/系; T. 三叠纪/系; J. 侏罗纪; K. 白垩纪; E. 古近纪; N. 新近纪/系; Q. 第四纪/系; T₃. 上三叠统; T_{2k}. 中三叠统克拉玛依组; T_{1s}. 下三叠统烧房沟组; T_{1j}. 下三叠统韭菜园组; P_{3wt}. 上二叠统梧桐沟组; P_{2h}. 中二叠统红雁池组; P_{2l}. 中二叠统芦苇沟组; R₀. 镜质体反射率

一套重要的勘探目的层系。该层系主要分布于吉木萨尔凹陷及北三台地区。博格达地区上二叠统梧桐沟组主要以冲积扇相与河流相为主,发育粉-细砂岩与中-粗砂岩,泥质含量较高^[36]。梧桐沟组储层物性较差,孔隙度主要介于6.00%~10.00%,渗透率总体小于 $0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要为致密储层和特低渗储层。储集空间以粒间溶孔和粒内溶蚀孔为主。新吉参1井梧桐沟组岩性以油迹粉砂岩和荧光中砂岩为主。具体显示为:油迹泥质粉砂岩0.5 m/(1层)、油迹粉砂岩3.5 m/(1层)、荧光中砂岩15 m/(1层)、荧光细砂岩3.0 m/(1层)、荧光粉砂岩2.0 m/(1层)、荧光泥质粉砂岩15.0 m/(5层)。测井共解释差油层8.0 m/(3层)、干层195.6 m/(37层)。值得注意的是,部分岩心搁置3个月后可出现可动原油渗出,局部达油浸级别。

井子沟组沉积期,沉积相类型以湖相三角洲为主,主要发育三角洲前缘砂岩储层。储层岩性以长石岩屑细砂岩和岩屑细砂岩为主,成分成熟度较低,储层厚度介于10~80 m。储集空间类型以粒间孔隙为主,其次为粒内溶孔和微裂缝,储层非均质性较强。孔隙度主要介于5%~9%,渗透率平均值为 $0.258 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,

属于致密砂岩储层。萨探1井在二叠系井井子沟组致密砂岩储层测试获高产工业油流,证实该套储层具有较大的油气勘探潜力。

3.3 三叠系克拉玛依组常规砂岩储层

中-上三叠统克拉玛依组主要为辫状河与辫状河三角洲环境中形成的中-细砂岩,砂岩成分主要为岩屑,长石与石英含量次之。储层物性相对较好,新吉参1井钻遇克拉玛依组储层的孔隙度为8.17%~10.70%,平均值为9.40%;渗透率为 $(1.38 \sim 3.58) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $2.48 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层岩性以细砂岩与泥质细砂岩为主,物性好,储层厚度大。新吉参1井在克拉玛依组的岩屑录井中发现荧光显示,包括荧光细砂岩8 m/(2层)和荧光泥质细砂岩5 m/(1层)。测井综合解释显示油-水同层11.6 m/(1层)、含水层6 m/(1层)。

4 山前带全油气系统成藏模式与勘探实践

博格达山前复杂构造区具备全油气系统成藏条件。

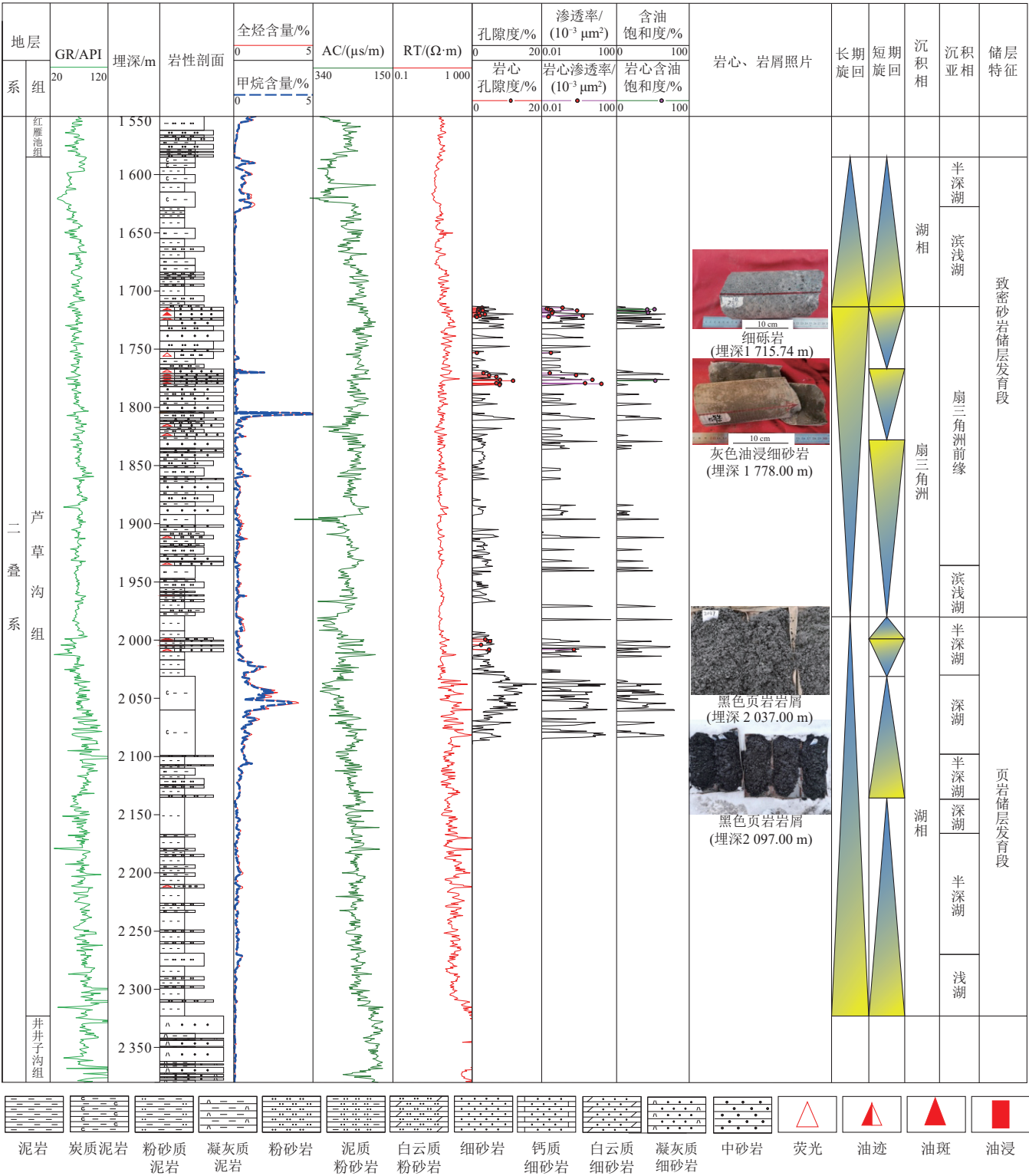


图9 准噶尔盆地博格达山周缘柴窝堡凹陷新永地1井岩性、电性、物性及含油气性综合柱状图

Fig. 9 Column showing the relationships among reservoir properties , oil-bearing capacity , oil mobility , and fracability in well XYD-1 in the Chaiwopu Sag located in the periphery of the Bogda Mountain , Junggar Basin

在此基础上,建立了山前复杂构造区“全油气系统多动力油气成藏及其有序分布”模式,包含源内束缚动力场吸附作用滞留烃形成的页岩油气藏、源-储相邻局限动

力场非浮力主导油气短距离运移形成的致密砂岩油气藏以及源上自由动力场浮力主导油气长距离运移形成的常规油气藏。这3类油气藏在空间上有序分布。

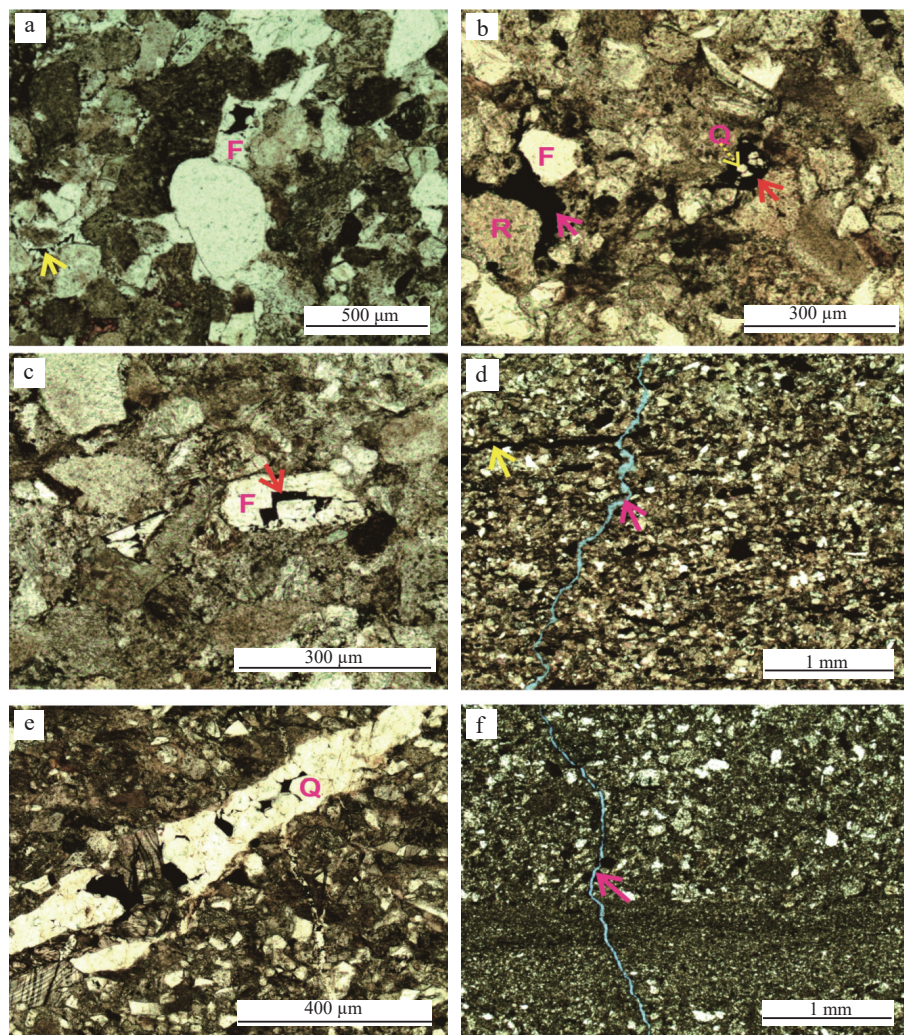


图10 准噶尔盆地博格达山周缘柴窝堡凹陷新永地1井芦草沟组储集空间特征显微照片

Fig. 10 Micrographs showing the reservoir space characteristics of the Lucaogou Formation in well XYD-1 in the Chaiwopu Sag on the periphery of the Bogda Mountain, Junggar Basin

a. 埋深1 719.12 m,残余粒间孔被有机质充填(黄色箭头处),普通薄片;b. 埋深1 718.82 m,粒间溶孔扩大孔(粉色箭头处)被有机质充填,长石铸模孔被石英和有机质充填(红色箭头处),铸体薄片;c. 埋深1 715.74 m,长石粒内溶孔(红色箭头处),普通薄片;d. 埋深2 008.10 m,微裂缝被有机质充填(黄色箭头处)及晚期构造缝(粉色箭头处),铸体薄片;e. 埋深1 753.10 m,早期构造缝被石英、有机质充填,普通薄片;f. 埋深1 721.37 m,晚期高角度构造缝(粉色箭头处)

F. 长石;Q. 石英;R. 岩屑

4.1 山前复杂构造区全油气系统多动力油气成藏及油气藏有序分布模式

研究区主要发育源-储一体页岩油气、源-储相邻致密油气和源-储分离常规油气3类油气藏(图11)。博格达山前带地层序列发育较完整,经历了多期旋回构造-沉积演化,具备完整的油气成藏条件。芦草沟组泥岩厚度较大、区域分布稳定,是本区最核心的烃源岩。此外,山前带纵向上发育多套储层,包括芦草沟组页岩储层与致密储层、梧桐沟组致密砂岩储层以及三叠系常规储层。同时,上三叠统黄山街组泥岩厚度大、

横向分布稳定,为下伏克拉玛依组常规油气藏提供良好的区域盖层。

4.1.1 页岩油气藏

源-储一体页岩油气藏主要分布在博格达山上盘靠近博格达山一侧和阜康断裂带的下盘深埋区,其成藏主要受束缚动力场控制,具体表现为储层极为致密,孔喉尺度微小。在此条件下,大分子的油相难以在地层中有效运移,只有小分子甲烷能以扩散方式继续迁移。页岩油气多表现为源内自生自储,呈大面积连续分布^[47]。二叠系芦草沟组生成的烃类在生烃压力和毛细

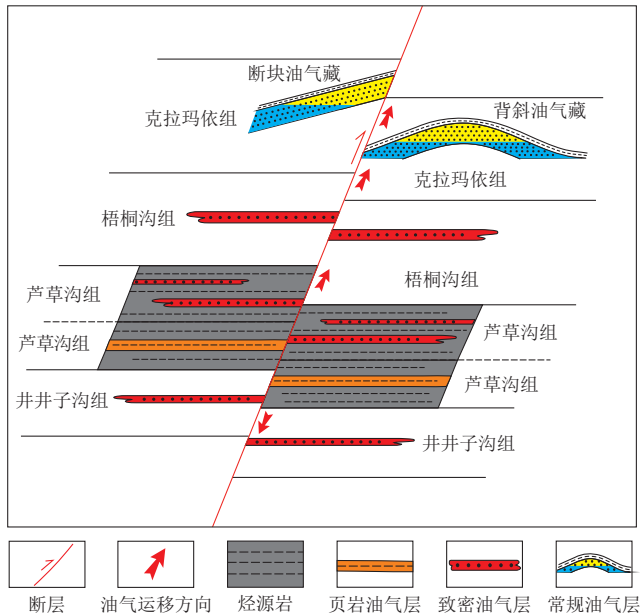


图 11 准噶尔盆地博格达山前带页岩油气藏、致密砂岩油气藏和常规油气藏油气层纵向分布特征

Fig. 11 Vertical distribution of shale hydrocarbon reservoirs, tight-sand hydrocarbon reservoirs, and conventional hydrocarbon reservoirs in the complex Bogda piedmont structural zone, Junggar Basin

管压力差作用下被排出生烃源岩,经过短距离初次运移,以游离态和吸附态聚集于二叠系芦草沟组富有机质暗色泥页岩、白云质(含炭、含有机质、含粉砂)泥岩和粉砂质(含碳、含钙)泥岩中。其中,由泥岩层理缝、构造缝、压溶缝合线以及晶间孔构成的微纳米级孔喉系统,为页岩油气提供了运移通道和储集空间。这形成了一种主要受二叠系芦草沟组沉积期原型盆地生油岩层系控制、源内自生自储、大面积连续分布且不需要盖层封堵的页岩油气成藏模式^[48-50]。

4.1.2 致密砂岩油气藏

在博格达山前带,致密砂岩油气储层与二叠系芦草沟烃源岩相邻,呈上-下接触和侧向接触,烃源岩生成的原油和天然气经过短距离运移到致密储层中,呈近源聚集成藏模式。这类油气藏地层内主要发育局限动力场,其孔喉半径通常介于 $0.025 \sim 1.000 \mu\text{m}$,渗透率介于 $(0.01 \sim 1.00) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在此条件下,油气运移不遵循常规达西定律,而往往表现为局限达西流、滑脱流甚至扩散流。按发育层位可将该类油气藏划分为3种类型:① 新生古储型,以源下井井子沟组致密砂岩油气藏为代表。这种类型的油气藏主要发育在阜康断裂下盘紧贴断层面附近,受喜马拉雅期博格达山急剧隆升作用的影响,山体向南、北两侧发生强烈冲

断,地层被阜康大断裂错断,致使芦草沟组烃源岩与下伏井井子沟组致密砂岩储层发生侧向对接,在生烃增压作用下,油气从烃源岩经过短距离运移到达井井子沟组致密砂岩储层中聚集成藏。该类型上生下储型致密油气藏,受断裂控制作用明显,油气保存条件好,资源潜力大。目前,新生古储型油气藏在阜康断裂下盘勘探获得良好油气显示并获工业油气流。② 自生自储型,以芦草沟组上段致密砂岩油气藏为代表。芦草沟组上段致密储层岩性主要为岩屑粉-细砂岩,基质主要为黏土矿物和碳酸盐,成分成熟度和结构成熟度均较低。储集空间类型包括原生孔隙、次生溶蚀孔隙和裂缝,其中微裂缝较为发育。该类致密砂岩储层与下伏芦草沟烃源岩呈上-下接触关系,紧密相邻,下伏芦草沟组烃源岩生成的游离态油气受压差驱动,向上运移至低孔、低渗致密储层中,具有“源-藏紧临”等特征。这类致密油气藏呈“甜点”富集特征,受储层物性横向变化影响较大^[51-53]。③ 古生新储型,以梧桐沟组致密砂岩油气藏为代表。梧桐沟组致密储层岩性以泥质含量较高的粉-细砂岩和中-粗砂岩为主,储层物性较差,储集空间以粒间溶孔和粒内容蚀孔为主。该类致密砂岩储层与下伏芦草沟烃源岩呈上-下接触关系,紧密相邻,源自下伏芦草沟组游离态的油受压差驱动,向上运移至低孔、低渗致密储层中。由于油气运移距离较芦草沟组致密油气藏远,这类致密油气藏受成藏期次和原油性质的影响较大,如果成藏期早且后期受到抬升,则原油稠、流动性差。

4.1.3 常规油气藏

常规油气藏集中发育在三叠系克拉玛依组,主要受达西流(自由)动力场控制,以浮力成藏为特征,储层孔隙度超过 $(10 \pm 2)\%$,渗透率一般大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔喉半径大于 $1 \mu\text{m}$ 。克拉玛依组常规油气储层岩性主要为辫状河三角洲环境下形成的中-细砂岩,储层厚度大,物性相对较好,孔隙度介于 $6\% \sim 13\%$,平均值为 11% ,渗透率约为 $(0.4 \sim 8.6) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。阜康断裂及其派生断裂是博格达山前带重要的油气输导层,沟通了深部二叠系芦草沟组烃源岩和上部克拉玛依组砂岩储层,受多期构造运动作用形成不整合面,这些不整合面与克拉玛依组横向分布的辫状河三角洲砂体共同组成了该区的有效油气输导体系,在构造高部位形成了大量常规油气藏。该类油气藏具有明显的油-水界面,物性通常较好,受沉积砂体类型、构造和断裂活动作用控制显著,呈非连续性分布,主要分布在山前带浅层三叠系克拉玛依组。

总体来看,博格达山前带二叠系和三叠系油气分布具有“常规-非常规全油气系统有序共生与序次成藏”的特征^[23](图12)。平面上,受博格达山后期隆升作用的影响,烃源岩成熟度平面差异较大,页岩油气、稠油和未成熟的油页岩固体矿($R_o < 0.5\%$)呈环带状有序分布和共生的特征。越靠近博格达山,二叠系芦草沟组烃源岩埋深越大、成熟度越高,资源类型主要为天然气;随着埋深的减小,资源类型向外逐渐过渡为常规油和稠油。在阜康断裂上盘地层出露区,烃源岩成熟度最低,资源类型以大面积分布的油页岩固体矿($R_o < 0.5\%$)为主,而在阜康断裂下盘,烃源岩的成熟度较高。

纵向上,深层二叠系芦草沟组主要发育源-储一体、大面积分布的源内页岩油气藏;中-深层梧桐沟组主要发育“断裂输导、岩性主控、成藏期早”的致密砂岩油气藏;浅层三叠系克拉玛依组主要发育“断裂输导、构造主控、成藏期晚”的构造油气藏。博格达山前带以芦草沟组烃源岩为核心,页岩、致密砂岩和常规油气藏相伴生,不同类型油气藏在纵向上和平面上均有序分布。上述认识为山前带油气调查提供了新思路,据此

指导勘探部署,成功在博格达山前带的南缘和北缘获得了重要勘探突破。

4.2 山前复杂构造区勘探实践

在全油气系统理论指导下,结合山前复杂构造区全油气系统成藏模式分析,先后在矿权空白区部署实施了新吉参1井、新永地1井、准页4井和米参2井等钻井,针对不同区带与资源类型开展调查与评价,取得了重要进展与发现。

4.2.1 博格达山北缘阜康断裂带上盘

新吉参1井位于博格达北缘山前带泉子街背斜,完钻井深4 950.0 m,最终钻揭层位为二叠系芦草沟组。自下而上依次钻遇二叠系芦草沟组、泉子街组和梧桐沟组,三叠系韭菜园子组、烧房沟组、克拉玛依组、黄山街组和郝家沟组,新近系沙湾组和独山子组以及第四系,缺失侏罗系、白垩系和古近系。新吉参1井全井共发现气测异常211.00 m/(79层),取心见油迹和荧光等显示共计26.65 m/(34层),综合解释含油气层90.90 m/(16层)。该井揭示了3种类型的油气藏:

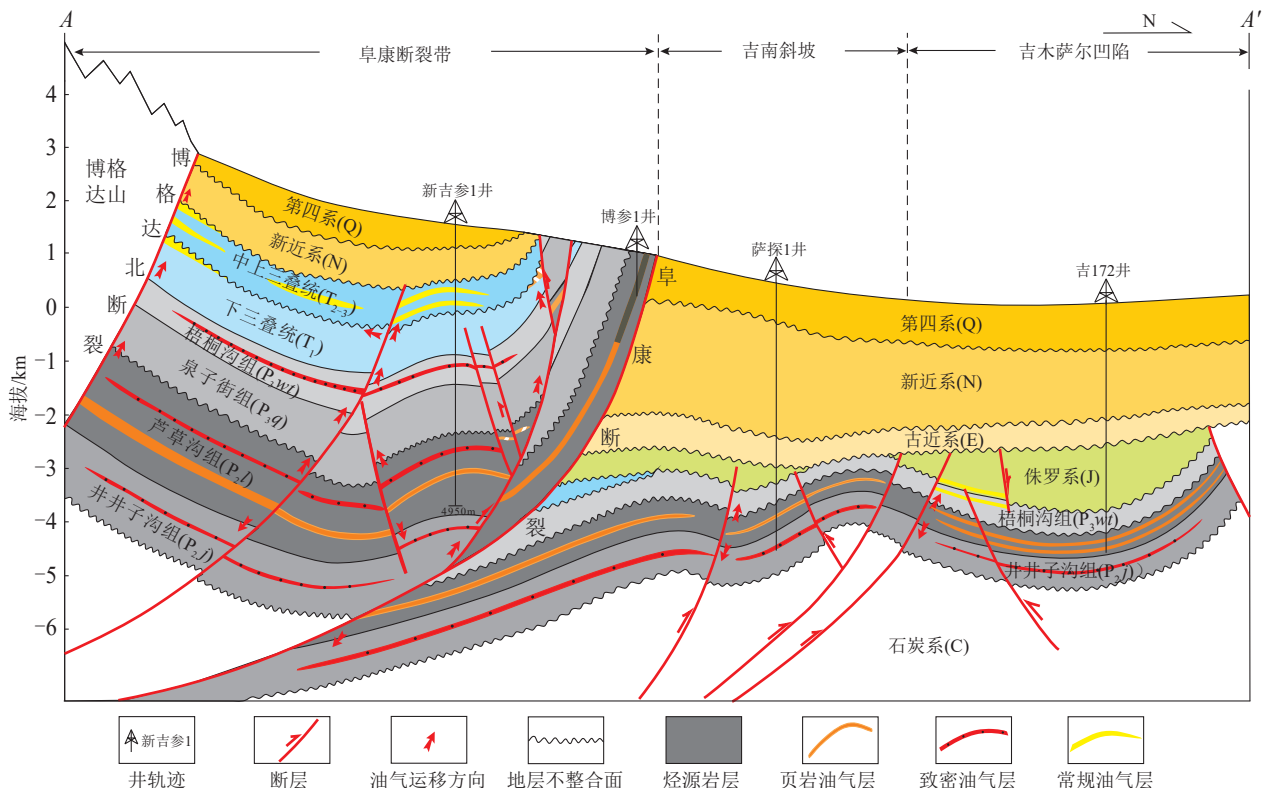


图12 准噶尔盆地博格达北缘山前复杂构造带全油气系统成藏模式

Fig. 12 Hydrocarbon accumulation model of the WPS in the complex piedmont structural zone along the northern margin of Bogda Mountain, Junggar Basin
(剖面位置见图1b。)

①芦草沟组自生自储页岩油气藏;②芦草沟组致密砂岩油气藏;③克拉玛依组下生上储常规油气藏。

在芦草沟组埋深4 153.5~4 229.0 m井段,针对页岩油气层选取18 m/(6段)进行测气求产,首次在博格达山前带获得工业气流,折算日产天然气量为 $1.800 \times 10^4 \text{ m}^3$,日产油量为0.41 t。

测试结果表明,新吉参1井所产天然气为油型湿气,相对密度0.746,甲烷平均含量73.00%,乙烷平均含量8.62%;甲烷、乙烷和丙烷稳定碳同位素比值分别为-41.86‰,-31.28‰和-28.78‰,指示气源主要来自二叠系芦草沟组。原油密度 0.81 g/cm^3 (温度 50°C),黏度 $1.91 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,凝固点 -6.0°C ,具有低蜡、低硫等特征。

在克拉玛依组埋深1 385.5~1 392.0 m井段,针对常规油气层选取6.50 m/(1段)进行测气求产,折算日产天然气量为 $1.070 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。这一突破实现了博格达山前带三叠系克拉玛依组浅层天然气藏的首次发现,证实了该区浅层具备常规天然气成藏条件与良好勘探前景。油-源对比结果也证实,克拉玛依组天然气与芦草沟组页岩油气同源,均来自芦草沟组烃源岩^[24, 36]。近期,新疆互盈公司在该区部署实施的大有2井、大有3井、大有301井以及大有302井在芦草沟组等多层系获得良好油气显示。

综合研究表明,博格达山前带以芦草沟组烃源岩为核心的含油气系统资源丰富,页岩油气藏、致密砂岩油气藏和常规油气藏共生,展现出规模勘探和效益开发的整体潜力。

4.2.2 博格达山南缘柴窝堡凹陷

新永地1井位于博格达山前带南缘柴窝堡凹陷永丰次凹,旨在评价博格达山前带南缘二叠系芦草沟组烃源岩特征和油气资源潜力。该井完钻井深2 444.0 m,层位为二叠系井井沟组。钻探发现气测异常189.00 m/(46层),并于芦草沟组取心段识别出多级油气显示:油浸1.90 m/(3层),油斑4.23 m/(5层)及油迹7.20 m/(7层),综合解释差油层22.60 m/(8层)与含气层34.60 m/(10层)。该井明确了芦草沟组“上致密、下页岩”的立体成藏格局:上段致密砂岩油气藏具“甜点”富集特征,横向变化大;下段为自生自储页岩油气藏大面积连续分布。测试取得的关键成果为:页岩油气藏获瞬时日产气量 $1.298 \times 10^4 \text{ m}^3$,首获永丰地区芦草沟组工业气流;致密油气藏亦获低产气流。油-源对比结果显示,两类油气藏油气同源,均来自于芦草沟组烃源岩。

5 结论

1) 准噶尔盆地博格达山前带中二叠统芦草沟组发育一套厚度较大、广覆式分布的优质湖相烃源岩。该套烃源岩在裂谷构造背景下形成了一套咸化湖盆半深湖-深湖沉积,其沉积-沉降中心位于现今博格达山,岩性以黑色-灰黑色富有机质泥页岩为主,表现为“靠近博格达山方向,厚度逐步增大、有机质丰度逐渐升高、成熟度逐步增高”。

2) 准噶尔盆地博格达山前复杂构造区具备全油气系统成藏条件。以芦草沟组优质烃源岩为中心,发育源内芦草沟组页岩和致密砂岩、源下井井子沟组致密砂岩、源上梧桐沟组致密砂岩和克拉玛依组常规砂岩3类有利储层。这3类储层在空间上有序分布,并通过晚期断裂与烃源岩有效沟通,具备规模成藏条件。

3) 建立了博格达山前复杂构造区“全油气系统多动力油气成藏及其有序分布”模式。该模式涵盖3类成藏体系:源内束缚动力场控制的页岩油气藏、源储相邻局限动力场控制的致密油气藏以及源上自由动力场浮力主导的常规油气藏。三者空间上有序分布,展现出良好的油气勘探前景。

参 考 文 献

- [1] 姜福杰,贾承造,庞雄奇,等.鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征与天然气富集地质模式[J].石油勘探与开发,2023,50(2):250-261.
JIANG Fujie, JIA Chengzao, PANG Xiongqi, et al. Upper Paleozoic total petroleum system and geological model of natural gas enrichment in Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 250-261.
- [2] 郭旭升,黄仁春,张殿伟,等.四川盆地海相碳酸盐岩全油气系统成藏特征与有序分布规律[J].石油勘探与开发,2024,51(4):743-758.
GUO Xusheng, HUANG Renchun, ZHANG Dianwei, et al. Hydrocarbon accumulation and orderly distribution of whole petroleum system in marine carbonate rocks of Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 743-758.
- [3] 张赫,王小军,贾承造,等.松辽盆地北部中浅层全油气系统特征与油气成藏聚集模式[J].石油勘探与开发,2023,50(4):683-694.
ZHANG He, WANG Xiaojun, JIA Chengzao, et al. Total petroleum system and hydrocarbon accumulation model in shallow and medium strata in northern Songliao Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 683-694.
- [4] 唐勇,雷德文,曹剑,等.准噶尔盆地二叠系全油气系统与源内天然气勘探新领域[J].新疆石油地质,2022,43(6):

- 654-662.
TANG Yong, LEI Dewen, CAO Jian, et al. Total petroleum system and inner-source natural gas exploration in Permian strata of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(6): 654-662.
- [5] 贾承造, 庞雄奇, 姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向[J]. *石油科学通报*, 2016, 1(1): 2-23.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie. Research status and development directions of hydrocarbon resources in China[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 1(1): 2-23.
- [6] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(2): 129-136.
JIA Chengzao, ZHENG Min, ZHANG Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(2): 129-136.
- [7] 赵喆, 白斌, 刘畅, 等. 中国石油陆上中-高成熟度页岩油勘探现状、进展与未来思考[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 327-340.
ZHAO Zhe, BAI Bin, LIU Chang, et al. Current status, advances, and prospects of CNPC's exploration of onshore moderately to highly mature shale oil reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 327-340.
- [8] 郭旭升, 李王鹏, 申宝剑, 等. 中国石化探区和邻区油页岩原位开采选区评价[J]. *油气藏评价与开发*, 2025, 15(1): 1-10.
GUO Xusheng, LI Wangpeng, SHEN Baojian, et al. Selection evaluation of in-situ exploitation of oil shale in Sinopec exploration areas and adjacent areas[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2025, 15(1): 1-10.
- [9] 白雪峰, 陆加敏, 李军辉, 等. 松辽盆地北部全油气系统成藏模式与勘探潜力[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43(3): 49-61.
BAI Xuefeng, LU Jiamin, LI Junhui, et al. Hydrocarbon accumulation patterns and exploration potential of whole petroleum systems in northern Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43(3): 49-61.
- [10] 宋岩, 李卓, 姜振学, 等. 非常规油气地质研究进展与发展趋势[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(4): 638-648.
SONG Yan, LI Zhuo, JIANG Zhenxue, et al. Progress and development trend of unconventional oil and gas geological research[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(4): 638-648.
- [11] PANG Xiongqi. Quantitative evaluation of the whole petroleum system: Hydrocarbon thresholds and their application [M]. Singapore: Springer, 2023: 131-150.
- [12] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 全油气系统理论基本原理[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(4): 679-691.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Basic principles of the whole petroleum system[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(4): 679-691.
- [13] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 1-11.
JIA Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 1-11.
- [14] 庞雄奇, 贾承造, 郭秋麟, 等. 全油气系统理论用于常规和非常规油气资源评价的盆地模拟技术原理及应用[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1417-1433.
PANG Xiongqi, JIA Chengzao, GUO Qiulin, et al. Principle and application of basin modeling technology for evaluation of conventional and unconventional oil-gas resource based on whole petroleum system theory[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1417-1433.
- [15] 唐勇, 白雨, 高岗, 等. 玛湖凹陷风云1井陆相深层页岩气勘探突破及其油气地质意义[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(1): 106-118.
TANG Yong, BAI Yu, GAO Gang, et al. Exploration breakthrough and geological significance of continental deep shale gas in Well Fengyun 1 in Mahu Sag[J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(1): 106-118.
- [16] 支东明, 李建忠, 杨帆, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系全油气系统地质特征与勘探开发实践[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(4): 14-23.
ZHI Dongming, LI Jianzhong, YANG Fan, et al. Geological characteristics and exploration and development practice of the Permian full oil and gas system in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(4): 14-23.
- [17] 何海清, 支东明, 唐勇, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷康探1井重大突破及意义[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(2): 1-11.
HE Haiqing, ZHI Dongming, TANG Yong, et al. A great discovery of Well Kantan 1 in the Fukang Sag in the Junggar Basin and its significance[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(2): 1-11.
- [18] 赵文智, 胡素云, 郭绪杰, 等. 油气勘探新理念及其在准噶尔盆地的实践成效[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(5): 811-819.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, GUO Xujie, et al. New concepts for deepening hydrocarbon exploration and their application effects in the Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 811-819.
- [19] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 437-452.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 437-452.
- [20] 支东明, 李建忠, 张伟, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷双吉构造带井间组勘探突破及意义[J]. *石油学报*, 2022, 43(10): 1383-1394.
ZHI Dongming, LI Jianzhong, ZHANG Wei, et al. Exploration breakthrough and its significance of Jingjizigou Formation in Shuangji tectonic zone of Jimsar Sag in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(10): 1383-1394.
- [21] 梁世君, 罗劝生, 康积伦, 等. 准噶尔盆地吉南凹陷萨探1井风险勘探突破及意义[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(4): 72-83.
LIANG Shijun, LUO Quansheng, KANG Jilun, et al. Breakthrough and significance of risk exploration in Well Satan 1 in Jinan Sag, Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(4): 72-83.

- [22] 胡素云, 王小军, 曹正林, 等. 准噶尔盆地大中型气田(藏)形成条件与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 247-259.
HU Suyun, WANG Xiaojun, CAO Zhenglin, et al. Formation conditions and exploration direction of large and medium gas reservoirs in the Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 247-259.
- [23] 支东明, 谢安, 杨帆, 等. 准噶尔盆地东部二叠系富烃凹陷全油气系统勘探前景[J]. 地质力学学报, 2024, 30(5): 781-794.
ZHI Dongming, XIE An, YANG Fan, et al. Exploration prospects of the whole oil and gas system in the Permian hydrocarbon depressions in the eastern Junggar Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2024, 30(5): 781-794.
- [24] 张传恒, 刘典波, 张传林, 等. 新疆博格达山初始隆升时间的地层学标定[J]. 地质学前沿, 2005, 12(1): 294-302.
ZHANG Chuanheng, LIU Dianbo, ZHANG Chuanlin, et al. Stratigraphic constraints on the initial uplift age of Bogda Shan, Xinjiang, north-west China [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(1): 294-302.
- [25] 方世虎, 贾承造, 郭召杰, 等. 准噶尔盆地二叠纪盆地属性的再认识及其构造意义[J]. 地质学前沿, 2006, 13(3): 108-121.
FANG Shihu, JIA Chengzao, GUO Zhaojie, et al. New view on the Permian evolution of the Junggar Basin and its implications for tectonic evolution [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(3): 108-121.
- [26] 杨有星, 高永进, 周新桂, 等. 新疆地区公益性油气调查进展与主要成果[J]. 中国地质调查, 2023, 10(3): 1-15.
YANG Youxing, GAO Yongjin, ZHOU Xingui, et al. Progress and main achievements of public welfare oil and gas Survey in Xinjiang [J]. Geological Survey of China, 2023, 10(3): 1-15.
- [27] 张林, 张敏, 高永进, 等. 准噶尔盆地南缘博格达山前带二叠系芦草沟组油气源分析和勘探潜力[J]. 中国矿业, 2021, 30(11): 178-188.
ZHANG Lin, ZHANG Min, GAO Yongjin, et al. Oil and gas source analysis and exploration potential of Permian Lucaogou Formation in Bogda piedmont belt in the southern margin of Junggar Basin [J]. China Mining Magazine, 2021, 30(11): 178-188.
- [28] 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报, 2006, 80(1): 148-168.
LI Jinyi, HE Guoqi, XU Xin, et al. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(1): 148-168.
- [29] 郑孟林, 田爱军, 杨彤远, 等. 准噶尔盆地东部地区构造演化与油气聚集[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 907-917.
ZHENG Menglin, TIAN Aijun, YANG Tongyuan, et al. Structural evolution and hydrocarbon accumulation in the eastern Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 907-917.
- [30] 汪新伟, 汪新文, 马永生. 新疆博格达山的构造演化及其与油气关系[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 116-124.
WANG Xinwei, WANG Xinwen, MA Yongsheng. The tectonic evolution of Bogda Mountain, Xinjiang, northwest China and its relationship to oil and gas accumulation [J]. Geoscience, 2007, 21(1): 116-124.
- [31] 张朝军, 何登发, 吴晓智, 等. 准噶尔多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(1): 47-58.
ZHANG Chaojun, HE Dengfa, WU Xiaozhi, et al. Formation and evolution of multicycle superimposed basins in Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(1): 47-58.
- [32] 孙国智, 柳益群. 新疆博格达山隆升时间初步分析[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 487-493.
SUN Guozhi, LIU Yiqun. The preliminary analysis of the uplift time of Bogda Mountain, Xinjiang, northwest China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(3): 487-493.
- [33] 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.
- [34] 王越, 林会喜, 张奎华, 等. 博格达山周缘中二叠统芦草沟组与红雁池组沉积特征及演化[J]. 沉积学报, 2018, 36(3): 500-509.
WANG Yue, LIN Huixi, ZHANG Kuihua, et al. Sedimentary characteristics and evolution of the Middle Permian Lucaogou Formation and Hongyanchi Formation on the periphery of Bogda Mountain [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(3): 500-509.
- [35] 史燕青, 王剑, 张国一, 等. 新疆博格达地区中二叠世一早三叠世构造-气候-沉积演化及耦合机制[J]. 古地理学报, 2021, 23(2): 389-404.
SHI Yanqing, WANG Jian, ZHANG Guoyi, et al. Tectono-climatic-sedimentary evolution and coupling mechanism during the middle Permian-Early Triassic in Bogda area, Xinjiang [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2021, 23(2): 389-404.
- [36] 杨有星, 张君峰, 张金虎, 等. 新疆博格达山周缘中上二叠统与中上三叠统沉积特征及其主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 670-682.
YANG Youxing, ZHANG Junfeng, ZHANG Jinhu, et al. Sedimentary characteristics and main controlling factors of the Middle-Upper Permian and Middle-Upper Triassic around Bogda Mountain of Xinjiang, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 670-682.
- [37] 王越. 博格达地区中二叠世咸化湖盆混积相带沉积特征及有利岩相预测[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
WANG Yue. The sedimentary characteristics and favorable lithofacies prediction of the mixed sedimentary facies belt in the Permian saline lacustrine basin in Bogda region [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [38] 杨志浩, 李胜利, 于兴河, 等. 准噶尔盆地南缘中二叠统芦草沟组富砂型湖泊深水扇沉积特征及其相模式[J]. 古地理学报, 2018, 20(6): 989-1000.
YANG Zhihao, LI Shengli, YU Xinghe, et al. Sedimentary characteristics and facies model of deep-water fan in sand-rich lake of the Middle Permian Lucaogou Formation in southern Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2018, 20(6): 989-1000.
- [39] 张韩静, 李素梅, 高永进, 等. 准噶尔盆地东南缘二叠系芦草沟组烃源岩有机地球化学特征[J]. 现代地质, 2022, 36(6): 1538-1550.

- ZHANG Hanjing, LI Sumei, GAO Yongjin, et al. Organic geochemical characteristics of source rocks of Permian Lucaogou Formation in southeastern of Junggar Basin [J]. *Geoscience*, 2022, 36(6): 1538–1550.
- [40] 于洪洲. 博格达山构造演化控制下的烃源岩生烃演化模式[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(4): 85–92.
- YU Hongzhou. Hydrocarbon generation pattern of source rocks controlled by tectonic evolution of Bogda Mountain [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(4): 85–92.
- [41] 冯德浩, 刘成林, 杨海波, 等. 准噶尔盆地东部中二叠统咸化湖相烃源岩生气潜力及天然气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1289–1304.
- FENG Dehao, LIU Chenglin, YANG Haibo, et al. Gas-generating potential of the Middle Permian saline lacustrine source rocks and significance for natural gas exploration in the eastern Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1289–1304.
- [42] 崔海骅. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组微体化石与沉积古环境研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023: 61–62.
- CUI Haisu. Study on microfossils and sedimentary paleoenvironment of the Permian Lucaogou Formation in the Jimsar Sag [D]. Changsha: Central South University, 2023: 61–62.
- [43] 李建忠, 陈旋, 杨润泽, 等. 准噶尔盆地东部吉南凹陷二叠系油气地质条件与源下成藏特征[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3): 491–503.
- LI Jianzhong, CHEN Xuan, YANG Runze, et al. Petroleum geology and sub-source hydrocarbon accumulation of Permian reservoirs in Jinan Sag, eastern Junggar Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 491–503.
- [44] 杜小弟, 李锋, 邱海峻, 等. 准东博格达山山前带二叠系芦草沟组重油的发育特征及其指示意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(2): 368–378.
- DU Xiaodi, LI Feng, QIU Haijun, et al. Characteristics of heavy oil hosted in Permian Lucaogou Formation discovered in Bogeda Mountain of Zhunggar Basin and its importance for further exploration [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(2): 368–378.
- [45] 郭旭升, 马晓潇, 黎茂稳, 等. 陆相页岩油富集机理探讨[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(6): 1333–1349.
- GUO Xusheng, MA Xiaoxiao, LI Maowen, et al. Mechanisms for lacustrine shale oil enrichment in Chinese sedimentary basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1333–1349.
- [46] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 1–25.
- LI Maowen, MA Xiaoxiao, JIN Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 1–25.
- [47] 林会喜, 王圣柱, 杨艳艳, 等. 博格达地区中二叠统芦草沟组页岩油储集特征[J]. *断块油气田*, 2020, 27(4): 418–423.
- LIN Huixi, WANG Shengzhu, YANG Yanyan, et al. Shale oil reservoir characteristics of Middle Permian Lucaogou Formation in Bogda area [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2020, 27(4): 418–423.
- [48] 康积伦, 杨润泽, 马强, 等. 准噶尔盆地东部吉南凹陷二叠系油藏形成条件、成藏特征与勘探方向[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(32): 13788–13802.
- KANG Jilun, YANG Runze, MA Qiang, et al. Formation conditions, accumulation characteristics and exploration direction of Permian reservoir in Jinan Sag, eastern Junggar Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(32): 13788–13802.
- [49] 刘海磊, 朱永才, 刘龙松, 等. 准噶尔盆地阜康断裂带上盘二叠系芦草沟组页岩油地质特征及勘探潜力[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(4): 90–101.
- LIU Hailei, ZHU Yongcai, LIU Longsong, et al. Geological characteristics and exploration potential of shale oil of Permian Lucaogou Formation in hanging wall of Fukang fault zone, Junggar Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(4): 90–101.
- [50] 杨智, 侯连华, 林森虎, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油、页岩油地质特征与勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2018, 23(4): 76–85.
- YANG Zhi, HOU Lianhua, LIN Senhu, et al. Geologic characteristics and exploration potential of tight oil and shale oil in Lucaogou Formation in Jimsar Sag [J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(4): 76–85.
- [51] 潘永帅, 柳波, 杨易卓, 等. 火山灰蚀变对细粒混积岩元素异常的影响及对古环境恢复的作用——以三塘湖盆地条湖-马朗凹陷二叠系芦草沟组二段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(2): 530–549.
- PAN Yongshuai, LIU Bo, YANG Yizhuo, et al. Impacts of volcanic ash alteration on element anomalies in fine-grained mixed deposits and paleoenvironmental reconstruction: A case study of the 2nd member of the Permian Lucaogou Formation, Tiaohu-Malang Sag, Santanghu Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(2): 530–549.
- [52] 白桦, 庞雄奇, 王绪龙, 等. 烃源岩排烃期与储层致密匹配关系的确定及意义——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油为例[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(28): 15–25.
- BAI Hua, PANG Xiongqi, WANG Xulong, et al. Determination and significance of matching relationship between phase of hydrocarbon expulsion and sandstone reservoir densification: Tight oil of Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(28): 15–25.
- [53] 周家全, 王越, 宋子怡, 等. 准噶尔盆地博格达地区中二叠统芦草沟组热液硅质结核特征及页岩油意义[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 789–800.
- ZHOU Jiaquan, WANG Yue, SONG Ziyi, et al. Characterizing hydrothermal siliceous nodules to guide shale oil exploration in the Middle Permian Lucaogou Formation, Bogda area, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 789–800.

(编辑 张 晟)