

准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律

唐勇¹,宋永¹,何文军^{1,2},赵龙¹,杨海波¹,赵长永¹,郑孟林¹,孙帅³,费李莹¹

[1. 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;2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京102249;3. 中国石油勘探与生产分公司,北京100000]

摘要:准噶尔盆地是中国西部重要的含油气叠合盆地,近50年来的油气勘探开发不断取得突破,是叠合盆地复式油气成藏的一个典型实例。基于准噶尔盆地最新勘探发现和已有研究认识,文章总结了油气成藏规律,分析了重大勘探领域,以此为勘探战略选区提供依据,丰富和发展陆相石油地质理论。结果表明,准噶尔多期盆地类型叠加演化过程中,纵向上形成了“三层楼”成藏组合;横向上不同时期、不同地区、不同规模的隆、拗构造格局相互叠置,多期叠合的改造形式和强度,形成了不同地区不同的地质结构,决定了油气聚集与分布具有地区差异性。油气富集规律表现为烃源岩对油气分布具有首要控制作用;盖层、断裂、古构造、不整合以及沉积相对油气的分布具有次级控制作用。盆地富烃凹陷斜坡区中深层-深层、南缘冲断带、陆梁隆起石炭系以及中-下二叠统页岩油(气)等领域是未来风险勘探部署有望获得战略突破的现实领域。准噶尔叠合盆地多旋回构造演化的性质,决定了这类盆地勘探的长期性和油气发现的多阶段性。

关键词:冲断带;复式油气成藏;全油气系统;多旋回构造演化;深层油气;页岩油气;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.3 **文献标识码:**A

Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin, Junggar Basin

Tang Yong¹, Song Yong¹, He Wenjun^{1,2}, Zhao Long¹, Zhao Changyong¹, Zheng Menglin¹,
Yang Haibo¹, Sun Shuai³, Fei Liying¹

[1. Exploration and Development Research Institute, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Kelamayi, Xinjiang 834000, China;
2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China;
3. Exploration and Production Company, PetroChina, Beijing 10000, China]

Abstract: The Junggar Basin is one of the most important petroliferous superimposed basins in western China. Oil and gas discoveries made there in recent decades have confirmed its great hydrocarbon potential as a superimposed basin. Data gathered through the latest exploration breakthroughs and previous studies are used to summarize the enrichment patterns of oil and gas, analyze the characteristics of oil and gas discoveries, guide strategic selection of exploration targets, and provide theoretical materials for a geological study on continental petroleum reservoirs in the basin. The result shows that the reservoir assemblages in the basin exhibit a vertical “three-story” pattern and horizontal superimposition of uplifts and depressions of different stages, areas and scales in various patterns and intensity during the multi-stage superimposition process, which results in a disparity in the accumulation and distribution of oil and gas. It also suggests that the oil and gas distribution is controlled firstly by source rocks and secondly by caprocks, faults, paleo-structures, unconformities and sedimentary facies. Four major strategic exploration targets are singled out: the mid-deep to deep layers in slope area of hydrocarbon-rich sag, the thrust belt of the southern margin, the Carboniferous of Lu-Liang uplift, and shale oil in the Middle-Lower Permian. However, finding oil and gas reservoirs in this multi-cycle tectonic basin is still a big challenge due to its complex evolution history.

收稿日期:2021-08-16;修订日期:2021-11-17。

第一作者简介:唐勇(1967—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail: tyong@petrochina.com.cn。

通讯作者简介:何文军(1988—),男,硕士、工程师,油气资源评价与油气勘探。E-mail: fchwj@petrochina.com.cn。

基金项目:准噶尔盆地岩性地层油气藏分布规律与目标评价项目(2017ZX05001-004);中国石油天然气股份有限公司科技重大专项(2019E-26)。

Key words: thrust belt, composite hydrocarbon accumulation, total petroleum system, multicyclic tectonic evolution, deep oil/gas reservoir, shale oil and gas, Junggar Basin

引用格式:唐勇,宋永,何文军,等. 准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 132-148. DOI: 10. 11743/ogg20220111.

Tang Yong, Song Yong, He Wenjun, et al. Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 132-148. DOI: 10. 11743/ogg20220111.

准噶尔盆地是中国西部一个重要的含油气叠合盆地,面积约为 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$,勘探历史悠久,始于20世纪50年代,是新中国建成的第一个 100×10^4 级油田。2002年实现了原油产量破 $1000 \times 10^4 \text{ t}$,成为中国西部第一个 1000×10^4 级大油区^[1]。前期盆地勘探的主攻区域为正向构造单元4 500 m以浅的领域,层次上也主要聚焦在三叠系以上中-上组合,探明石油资源量超 $27 \times 10^8 \text{ t}$,天然气资源量近 $1 800 \times 10^8 \text{ m}^3$,但油气综合探明率为24.3%,依然处于勘探初期;随着地质认识的不断深入,发现规模成熟-高过成熟轻质油气以及非常规油气资源富集于盆地拗陷区中-下组合深层领域,勘探前景广阔,吸引着众多勘探家和科学家持续开展工作^[2]。

对于准噶尔盆地油气富集规律的研究,已形成诸如“源控论”、“扇控论”、“梁控论”以及“断控论”等认识,均为单一含油气系统的由“烃源岩—圈闭”的勘探实践,更多的强调油气排出后的成藏要素或者某一关键控藏要素^[3-4],并未反映出盆地叠合背景下复合含油气系统油气聚集的特点,也多以早期围绕富烃凹陷周缘正向构造带的发现为基础。自2005年以来,准噶尔盆地风险油气勘探不断取得突破^[5-7],在富烃凹陷^[8]、深层^[9-11]以及非常规^[12-14]等领域持续取得发现,勘探不断由浅层走向深层^[15],由正向构造走向凹陷区^[7,16],由单一常规油藏走向常规-非常规共生系统^[17]。现有源外油气富集理论认识已不能完全满足宏观油气分布判断以及有利勘探领域的优选与评价,油气地质理论面临新一轮发展。有鉴于此,本文通过消化和吸收前人研究成果,结合新的成果认识资料,重新梳理盆地油气成藏条件及特征,系统总结叠合盆地复式全油气系统成藏规律,并以典型实例分析全油气系统成藏模式指导下的立体勘探实践,同时探讨盆地油气勘探前景,以期不断丰富发展中国陆相石油地质理论,为盆地勘探获得更大的突破提供理论依据。

1 地质背景

准噶尔盆地是一个晚石炭世—第四纪沉积的复合

型叠合盆地,位于哈萨克斯坦板块东部,盆地基底近似三角形,是三面被古生代缝合带(天山缝合带、乌拉尔缝合带以及额尔齐斯缝合带)包围且被挤压推覆构造包围着的压性叠合盆地。受周缘大地构造运动的影响,演化复杂^[18-20]。早期受古亚洲洋多期开合作用的控制,晚期则受到特提斯洋关闭和青藏高原隆升的影响。关于准噶尔盆地的基底性质,有古老结晶基底与洋壳,以及古老结晶基底和晚古生代褶皱基底组成的双重基底等不同观点^[21]。根据最新的年代学与地球物理资料分析,准噶尔盆地具有前寒武系结晶基底和上古生界褶皱基底的特点^[22]。

受限于盆地基底形态以及后期的构造叠加演化,同一套地层在盆地不同地区埋深差异较大。尤其是白垩纪以来,盆地整体的南降北升运动,形成了现今的箕状盆地,基底形态呈现隆凹相间的格局,平面上划分为6个一级构造单元,44个二级构造单元,具有多个富烃凹陷^[23]。目前已发现的石油资源多集中在盆地富烃凹陷周缘的正向构造单元中^[24](图1)。

准噶尔盆地自晚古生代以来先后经历了海西构造运动、印支构造运动、燕山构造运动及喜马拉雅构造运动,沉积了包括上古生界上石炭统(C_2)和二叠系(P),中生界三叠系(T)、侏罗系(J)、白垩系(K)及新生界古近系(E)和新近系(N),盆地沉积盖层的最大厚度可达15 000 m。经历了多年勘探,在石炭系至新近系的21个层组中发现工业油气流,已发现32个油气田440个油气藏,呈现出纵向上多层系复式油气聚集,平面上油气藏复合叠加连片的油气分布格局(图1,图2)。

2 复式油气成藏基本要素与条件

2.1 烃源岩条件

准噶尔盆地存在多套烃源岩(图1,图2)。王绪龙等(2013)^[25]、陈建平等(2016)^[26]对准噶尔盆地烃源岩特征进行了系统研究,其中石炭系、下二叠统佳木河组和侏罗系烃源岩为优质气源岩;下二叠统风城组、中二叠统下乌尔禾组、下白垩统以及古近系安集海河组烃

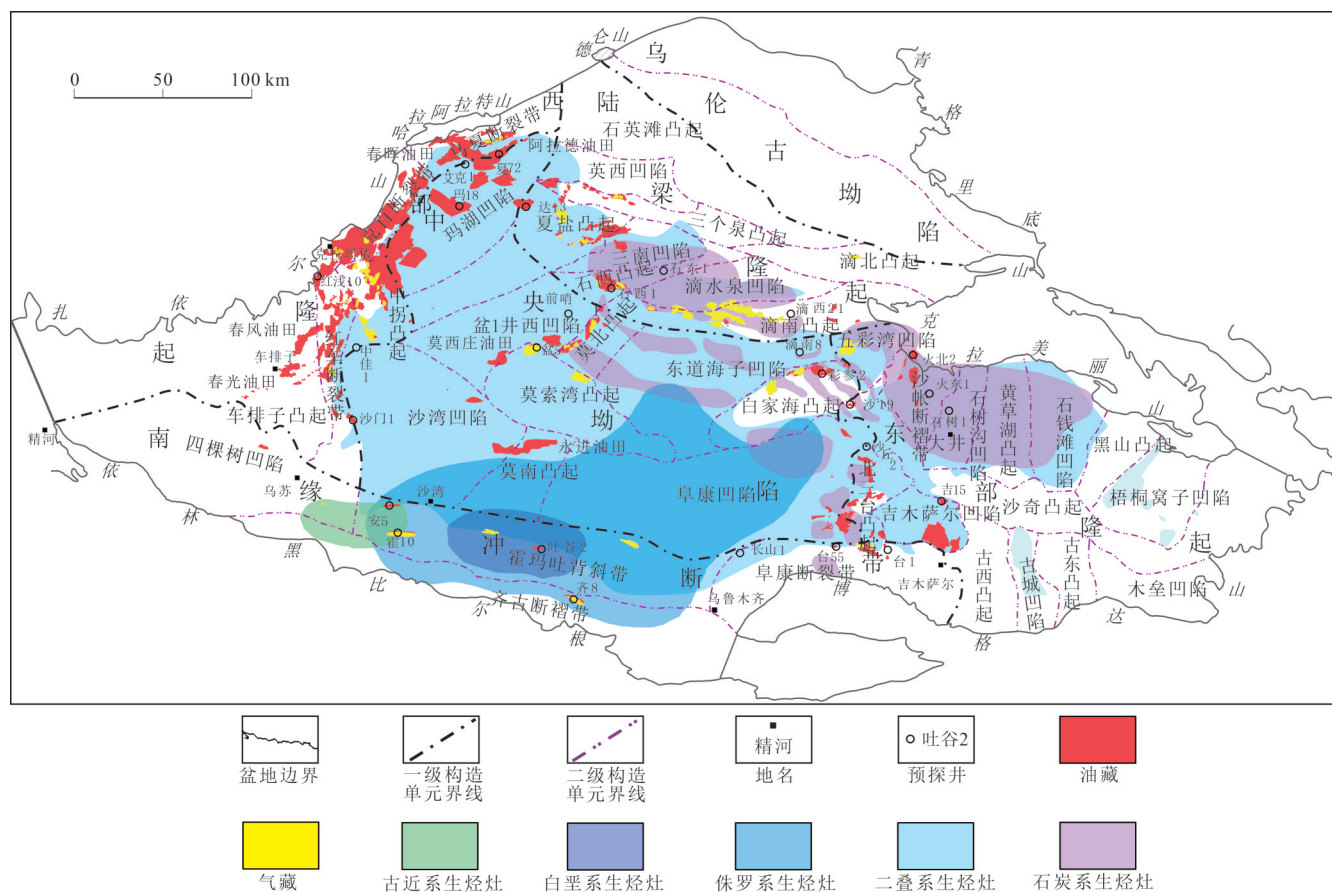


图1 准噶尔盆地构造单元划分、烃源灶与已发现油气分布叠合图

Fig. 1 Overlay plot showing tectonic units, hydrocarbon kitchens and discoveries in the Junggar Basin

源岩为优质油源岩。从各烃源岩层的生烃史及分布研究来看,石炭系、二叠系以及侏罗系烃源岩对盆地油气聚集贡献最大。这与3套烃源岩的形成时期盆地性质有直接关系。3套主力烃源岩分布于盆地玛湖凹陷、沙湾凹陷、盆1井西凹陷以及阜康凹陷,形成的生烃中心具有纵向叠加、横向迁移性^[26-27]。围绕3个生烃凹陷形成了3套大型含油气系统^[1],东部以石炭系气源和二叠系油气源为主,中西部以二叠系油源为主,南部以侏罗系气源岩为主,形成了盆地满凹含油气的特征(图2)。目前石炭系和二叠系已经取得了重大突破,盆地南部的侏罗系也有油气发现,但规模相对较小,突破空间大。

此外,不同地区、层系发育的烃源岩存在母质类型与埋深等差异,热演化过程复杂,生、排烃时期变化较大,形成3套主力烃源岩纵、横向叠加分布,多期次成烃叠加混合成藏特征。例如,准噶尔盆地最重要的二叠系烃源岩,西北缘地区主要以下二叠统风城组油源岩为主,自晚二叠世开始进入生油门限,至早侏罗世达到第一个生烃高峰;也存在中二叠统下乌尔禾组源岩的贡献,甚至存在下二叠统佳木河组气源岩的生烃贡

献^[28];而盆地东部地区油气源可能来自石炭系、二叠系或者侏罗系^[29]。此外,从石炭纪—二叠纪的“热盆”演变为中、新生代典型的“冷盆”^[30],地温场的变化影响着烃源岩早期生烃、后期持续生烃,为纵向上多源供烃提供了良好条件(图3)。

总体而言,盆地自中晚二叠世以来,不同烃源岩层系先后进入生烃门限,并达到生烃高峰,其上覆沉积储集层长期处于油气充注状态。以达探1井为例,二叠系风城组储层包裹体存在早期方解石包裹体(均一化温度峰值80~100℃)、中期石英包裹体(均一化温度峰值90~110℃)和晚期亮晶方解石包裹体(60~110℃),没有明显的峰值,整体呈现油气供给的多期性。玛湖凹陷周缘以风城组为烃源岩形成的油藏(风城1井,风南4井,乌35井,夏72井,玛13井和玛15井区)原油密度为0.815~0.980 g/cm³,凝固点温度为25~34℃,Ts/Tm值为0.01~1.22,反映出玛湖凹陷风城组烃源岩在不同热演化阶段生成原油的混合成藏。同时,风城组烃源岩形成于碱湖沉积环境,“早热晚冷”的盆地热体制,造就了超宽液态生烃窗及超长生排油期,形成了风城组成熟—高成熟两期生烃高峰期特

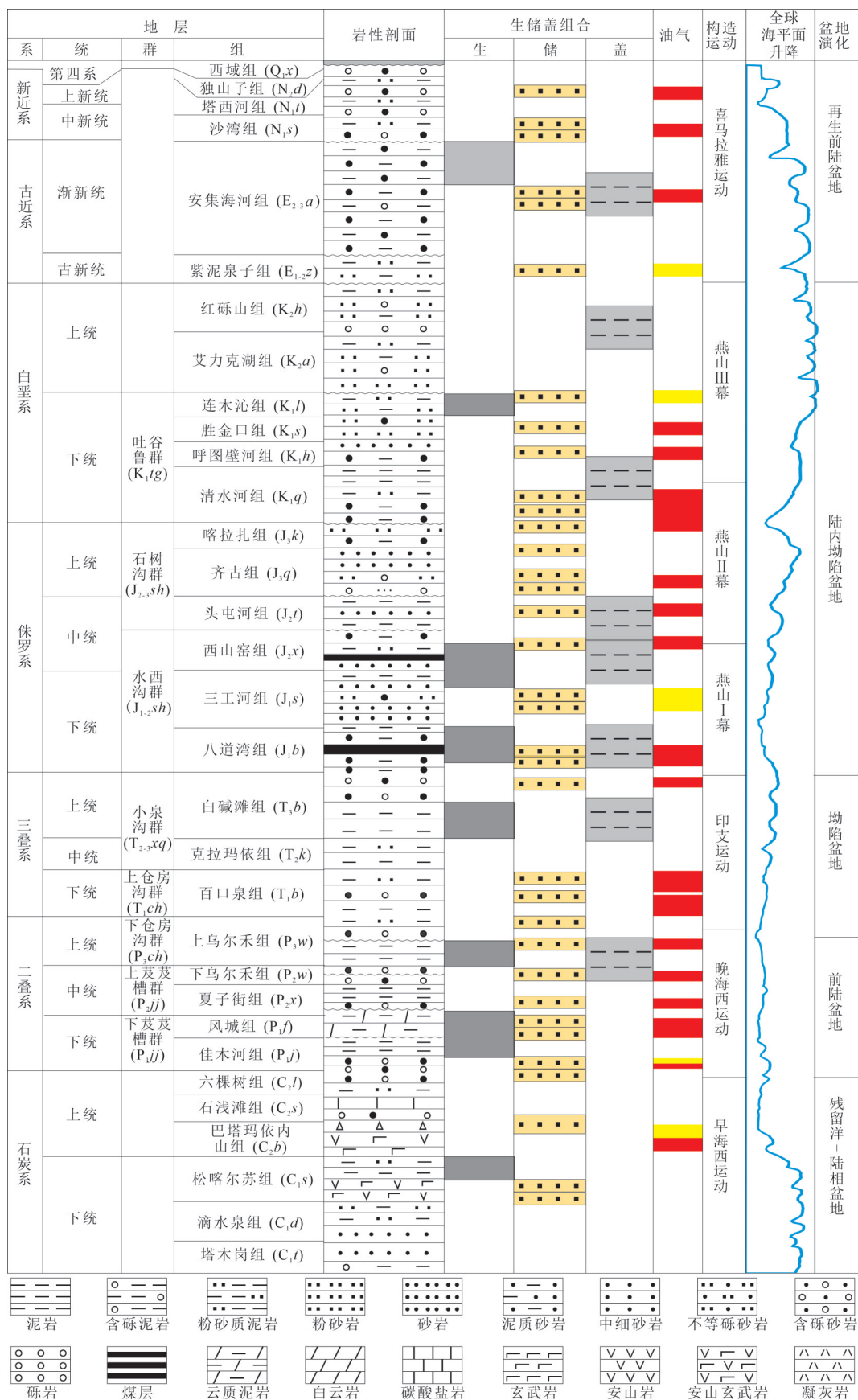


图2 准噶尔盆地地层综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of the Junggar Basin

层,与下部盆地构造转换时期形成的底砂(砾)岩配置关系较好。例如,盆地最重要的区域性盖层——三叠系白碱滩组泥岩,属于统一的坳陷型盆地湖泛沉积,盆地目前发现的储量主体位于其下部的储层。此外,盆地不同地区不同层系还发育有局部沉积的细粒盖层^[24,28],例如侏罗系八道湾组二段泥岩、三工河组泥岩、上乌尔禾组顶部的滨湖相泥岩和中、下三叠统砂砾岩之间的泥岩隔层等,均是较好的局部盖层。

2.3 复式输导体系特征

研究发现,盆地的区域性盖层将储盖组合划分成“三层楼”的格局(图2),构成上、中、下3套成藏组合^[1,34],目前已发现油气藏多为下生上储聚集成藏,被上覆泥岩所封盖。因此,输导体系是关键成藏要素。

盆地多期的构造运动,形成两套高效的油源断裂体系。海西-印支运动形成的自石炭系一下三叠统高角度逆冲性质的走滑断裂体系,沟通了二叠系主力源岩和二叠系、三叠系内部的储集层,多组受走滑断裂体系影响形成的次级断裂共同形成跨层运移的输导“断裂泵”。燕山运动至喜马拉雅运动早期形成了断穿三叠系和侏罗系的高角度具有拉张性质的正断层,该套

断裂体系部分断至白垩系,与海西-印支运动形成的通源断裂纵向搭接,形成“Y”字型断裂组合(图4),构成纵向上油气运移的良好通道,也是盆地侏罗系以上中浅层油气富集的重要保障^[35]。

根据盆地系统的地震解释研究,地层的接触关系复杂多样,削蚀、超覆以及整合型不整合广泛发育。如侏罗系沉积末受车莫古隆起影响,头屯河组以及齐古组多地区存在剥蚀,地层发育不完整;后期盆地沉降,沉积了白垩系清水河组,地层产状呈现近平行结构,形成了整合型不整合。再如石炭系火山岩体,受到盆地抬升剥蚀,与上覆地层呈高角度接触,形成规模较大的不整合面等。盆地目前可能存在的不整合界面有:下石炭统与上石炭统,上石炭统与下二叠统,下二叠统与中二叠统,中二叠统与上二叠统,上二叠统与三叠系,三叠系与侏罗系^[36],侏罗系与白垩系,白垩系与古近系之间的区域性不整合面,此外还存在侏罗系、中二叠统等层内各层组之间发育的局部不整合面。这些不整合结构与纵向的断裂体系空间匹配关系较好,形成横向油气运移的有利条件。纵向发育的20余套储集层与不整合纵向相互叠置,形成油气的网毯式输导与聚集。总体而言,断裂、不整合以及砂体的空间配置构成

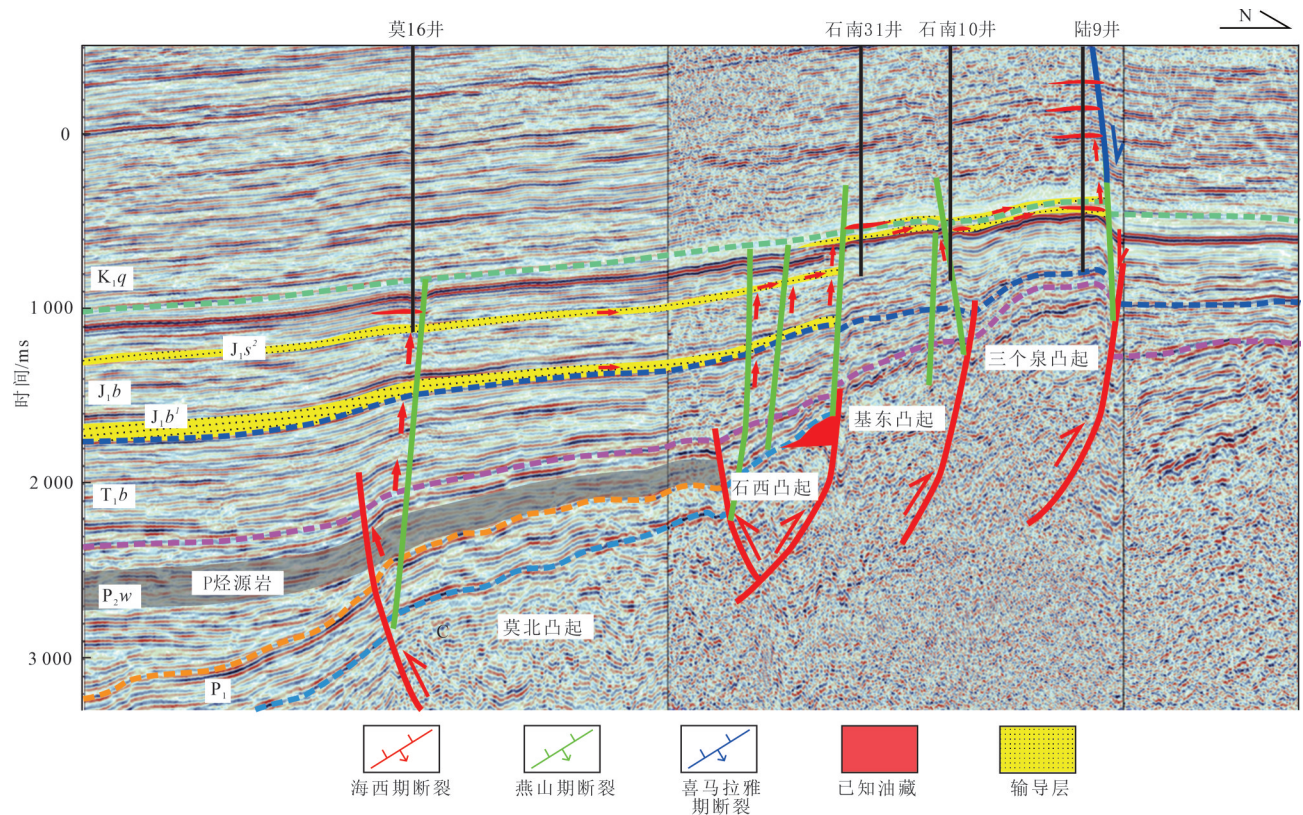


图4 准噶尔断裂—不整合—砂体立体输导体系与成藏关系示意图(以腹部地区为例)

Fig. 4 Sketch map showing the fault-unconformity-sandbody carrier system and hydrocarbon accumulations in the Juggar Basin (taking the central part as an example)

了准噶尔盆地高效的网格状输导体系,也造就了如玛湖凹陷源上大面积岩性圈闭的规模油气聚集(断裂为最主要输导条件)、陆梁隆起侏罗系-白垩系源上远源型断层-岩性圈闭的高效油气聚集(不整合、砂体是保障油气横向运移最主要的输导条件)。

综上所述,4期断裂、多期不整合以及多期叠置砂体,空间匹配形成立体高效输导体系。目前油气藏的空间分布呈现出输导体系决定着油气的供给与富集,盆地区域性构造运动决定着油气最终的归属地。以陆梁隆起石南21井油藏以及南部永进地区的永进油田为例,受喜马拉雅期盆地整体构造掀斜,南降北升,形成自南向北拾阶而上的构造格局,受断裂-不整合-砂体的油气输导(图4),油气逐渐向浅层、高部位运聚,在永进地区、莫索湾、莫北以及石南等地的中浅层遇到封闭断层的遮挡,形成油气聚集。最终形成自凹陷区向凸起区,由深层向浅层逐级而上的阶梯状油气聚集^[35,37]。

2.4 多期成藏与复杂油气相态

准噶尔盆地油气成藏的多期性^[38]表现在烃源岩分布受盆地演化及构造格局的影响,先后进入生烃门限,其次为烃源岩成熟度受盆地叠合演化的影响,低成熟度形成油气与中高成熟度形成油气先后运移聚集,混合成藏^[39]。如达探1井二叠系风城组流体包裹体显示均一化温度为60~120℃,无明显峰型,显示为多期持续充注的过程。夏盐2井三叠系百口泉组流体包裹体均一温度存在两期峰型,分别对应60~80℃和100~130℃,反映为两期油气充注的特征。再如玛中地区多井三叠系百口泉组岩心出筒见轻质油气,同时岩层孔隙中部分充填沥青。玛中4井三叠系百口泉组原油密度为0.803 5~0.822 6 g/cm³,原油甾烷异构化指数 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20S/(20S+20R)$ 值为0.495, $C_{29}\alpha\beta\beta/(\alpha\beta\beta+\alpha\alpha\alpha)$ 值为0.649, T_s/T_m 为0.781,反映为烃源岩成熟-高成熟阶段的产物,同时也能见到沥青存在,为多期油气成藏形成产物的根本实证。

准噶尔盆地是一个富油盆地已达成广泛共识,天然气虽然也有发现,但规模均不大。多井钻探结果与预期差异大。如达探1井部署之初认为深大构造中应该存在规模气藏,按目前埋深、热体制以及岩石组成,数值模拟结果应为大规模气藏,但钻探结果却未发现大规模天然气藏。南缘山前四棵树凹陷高探1井^[9],从现有热史模拟结果以及烃源岩类型推测,其钻探结果应以低熟油藏为主,即使存在源岩低熟阶段形成的湿气,尚不构成规模天然气藏。但试油过程中除了高

产的油流外,还伴随着大规模天然气,同时还产出较为可观的轻烃,气/油比在350~400 m³/m³,属于挥发性油藏-凝析气藏的过渡相态。

这种复杂的油气相态比较常见,流体相态的差异性主要受到烃源岩的供烃类型控制,其次与烃源岩成熟度有关。克拉美丽气田主要围绕石炭系气源岩的生烃灶分布^[40];玛湖凹陷大面积连片的油藏主要来自于风城组油源岩^[8];而南缘地区形成的油气藏主要来自于深埋的侏罗系烃源岩^[41-42]。这些烃源岩层系在富烃凹陷内部埋深多已进入深层-超深层范围,在不考虑超压抑制成熟度的条件下,目前的烃源岩已进入高-过成熟演化阶段。不仅烃源岩已进入大规模生气阶段,早期形成的古油藏也应发生裂解,形成干酪根裂解气与油裂解气的规模聚集。尤其是二叠系风城组油源岩,在玛湖凹陷中心区现今成熟度已超过1.3%,但油气源对比很少发现来自于其高成熟的气显示。盆地南部侏罗系烃源岩^[43],以Ⅱ-Ⅲ型母质为主,也发育煤系烃源岩,白垩纪末期南缘中段部分地区已进入规模生湿气阶段,南缘冲断带及其紧邻的沙湾-阜康凹陷,现今成熟度普遍超过1.3%。理论而言,可生成规模的气态烃,但莫南凸起永1井^[44]和阜康凹陷董1井^[45]的钻探结果显示,6 000 m深度依然为油藏,含少量溶解气,并未见到规模气藏。烃源岩成熟度升高,生成规模气态烃的可能性应更大,据此盆地深部应存在规模性天然气藏,但钻探结果与认识之间有矛盾,需要重新认识。此外,准噶尔盆地进入深层油气藏多处于超压环境,是否存在超压抑制烃源岩热演化现象^[46],亦或是超压的存在影响了地层中油气的相态特征^[47]等基础科学问题对于深层的油气勘探至关重要,亟待深入研究。

2.5 多类型油气藏与复式成藏模式

准噶尔盆地的多期叠合演化,存在挤压、拉张以及剪切等多种盆地应力机制,形成了褶皱、断裂和不整合等多种构造表现形式。同时,不同盆地类型发育冲积扇、河流、三角洲与湖泊相等沉积体系,沉积充填了火成岩、碳酸盐岩和碎屑岩等多种岩石类型,这些要素叠加在一起,造就了盆地油气藏类型的复杂多样,总体可划分为构造型油气藏(背斜、断块、断背斜)、地层型油气藏(不整合、超覆、潜山)、岩性型油气藏及复合型油气藏(构造-岩性、构造-地层、地层-岩性)^[24]。

通过油气藏类型的解剖以及前人对于成藏认识的总结^[1],准噶尔盆地存在5类复式油气成藏模式(图5)。

1)西北缘逆冲断裂带复式油气成藏模式^[38],目前油气储量发现最多,以克-乌断裂带、红车拐地区为主

体,纵向上石炭系—白垩系发育4套含油层系、10个含油气层组,断裂带上盘、下盘均发育油层,具有明显的复式成藏特征。

2)源上相控复式油气成藏模式^[48],以玛湖凹陷 $10\times 10^8\text{t}$ 储量的发现最为典型,围绕玛湖富烃凹陷生烃灶,纵向上受到断裂—不整合—砂体的立体网格控制,以广覆式分布的二叠系—三叠系扇三角洲前缘砾岩沉积、侏罗系辫状河三角洲前缘砂岩沉积为有利储集体,形成了纵向十余套大面积“连续”分布的含油层系。整体上,相带控储、物性控产。

3)源外沿梁断控阶状成藏模式^[49],这类成藏模式以陆梁、莫北和莫索湾地区的油气发现得以证实。处于富烃凹陷周缘正向构造单元,发育有深、浅接续性断裂体系,油气沿通源断裂向上运移,在适当部位先成藏(如石西油田)。深部断裂与浅部断裂桥接时,油气便调整运移至浅部侏罗系—白垩系储层中成藏。

4)源内自生自储油气成藏模式^[50],以克拉美丽气田石炭系气藏的发现以及吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组^[12]、玛湖凹陷风城组页岩油^[14]的发现最为典型。其中页岩油之上的储层中往往受到断裂的沟通也形成常规油气藏,形成常规与非常规空间上共生的复式油气成藏模式。

5)源上挤压背斜油气成藏模式^[51],此类油气成藏

模式主要见于南缘冲断带。受喜马拉雅运动的影响,在南缘地区形成三排挤压背斜构造带,存在局部发育于南缘地区的烃源岩,油气源条件较好。受构造运动影响发育的带状分布的通源断裂,形成良好的输导条件。并且该区的储层多为来自南部物源的近源沉积,发育优质的储集层,能够保证油气的高效富集。

3 油气富集规律

3.1 3类盆地叠合形成3套主力源岩决定油气的平面分布

前已述及,盆地最重要的3套烃源岩层系(石炭系、二叠系及侏罗系)分别形成于石炭世的断陷盆地、早中二叠世的前陆盆地以及早侏罗世的陆内前陆盆地。3套烃源岩在盆地的不同地区形成不同规模的生烃凹陷,油气自凹陷向四周正向构造运移富集,构成油气聚集的环带状模式。目前发现的油气田基本围绕这些富烃凹陷分布(图2)。这3套源岩的供烃类型及分布决定了目前盆地满盆油、半盆气的分布格局。盆地东部石炭系在克拉美丽、五彩湾、大井以及吉木萨尔—北三台等地存在生烃中心;石炭系高熟腐殖型气源岩与火山岩时—空匹配,形成油气的高效聚集,目前已发现的克拉美丽气田、五彩湾气田、泉6—泉8气

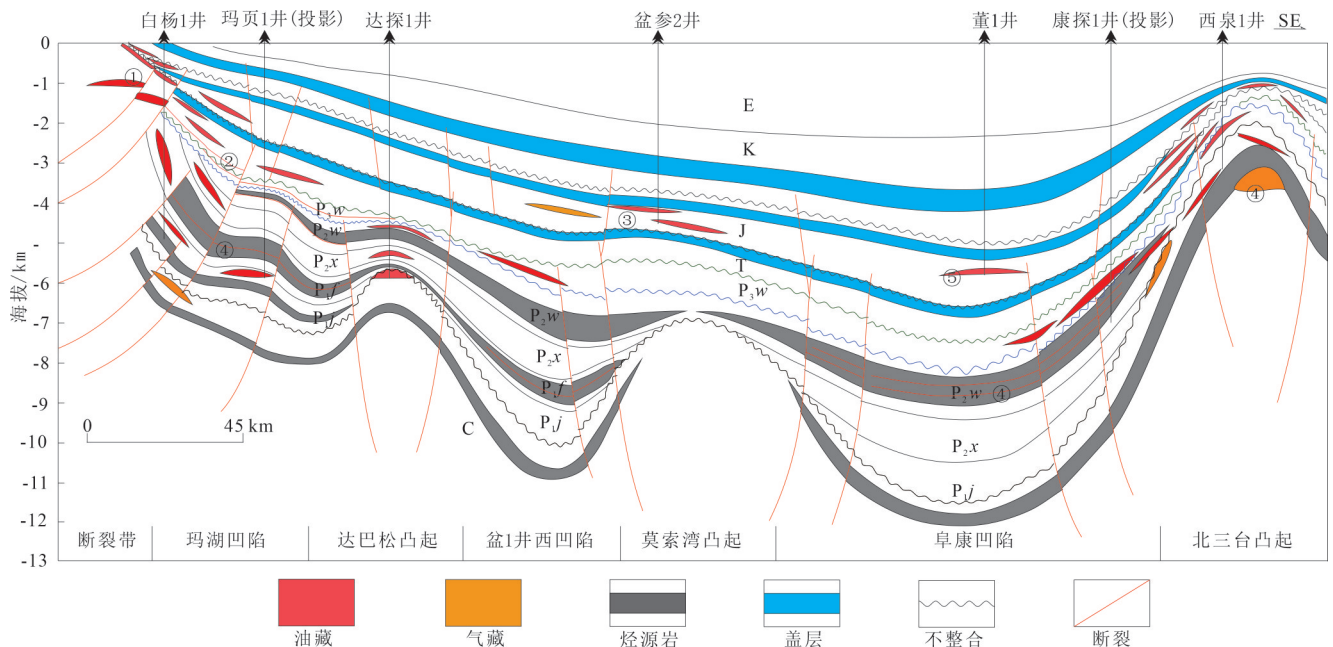


图5 准噶尔盆地复式油气成藏模式

Fig. 5 Composite hydrocarbon accumulation model in the Junggar Basin

①西北缘逆冲断裂带复式油气成藏模式:风城油田(J_1b)、克拉玛依油田(T_2k);②源上相控复式油气成藏模式:玛湖油田(P_3w/T_1b);③源外沿梁断控阶状成藏模式:莫索湾气田(J_1s)、石西油田(C)、三台油田($J-T_1$);④源内自生自储油气成藏模式:昌吉油田(P_2J)、克拉美丽气田(C);⑤源上挤压背斜油气成藏模式:玛河气田($E-J$)

藏、阜26气藏和吉15油藏等都围绕这些生烃中心分布。二叠系生烃灶决定了盆地油气主要环绕玛湖凹陷、盆1井西凹陷、沙湾凹陷与阜康凹陷呈环带状分布。玛湖凹陷周缘目前发现的油藏分布于其下部发育的佳木河组、风城组及下乌尔禾组3套源岩形成的烃源灶。玛湖凹陷南部发育有佳木河组以生气为主的源岩,因此在玛南地区发现规模大小不一的气藏^[52],但总体以风城组和下乌尔禾组油源岩形成的复式油气聚集为主。其他诸如盆1井西凹陷、沙湾凹陷、阜康凹陷、东道海子及吉木萨尔凹陷等也均以二叠系烃源岩生成油气富集为主,围绕盆1井西凹陷形成了莫索湾、莫西庄、莫北、石西石南和陆梁等油气田。围绕沙湾凹陷形成了西缘红车拐油气富集带,东部也发现永进油田和征1井油藏。而侏罗系烃源岩主要分布于盆地南部,生烃灶分布于沙湾-阜康凹陷一带,受深埋作用的影响,南缘冲断带围绕侏罗系高熟气源灶,目前已发现玛河与呼图壁等多个气田,近期在南缘冲断带中段部署的呼探1井获得高产工业气流,为以侏罗系源灶为主的产物。

3.2 多类型有利沉积相带中规模优质储层提供油气聚集的场所

不同类型盆地多期振荡运动,湖平面频繁升降,形成了烃源岩与储集体侧变与垂向上叠置的组合关系。烃源岩与储集体接触面积大小,有无良好的输导条件,是油气能否有效聚集的直接条件。但能否形成规模性油气藏与是否存在规模储层密切相关。盆地周缘造山带物源的供给能力和湖盆可容纳空间的影响,形成广

覆式沉积的扇三角洲前缘相优质砂-砾岩体,纵向叠置、横向连片,在油气源充足的条件下可形成较大规模的油气藏。如玛湖凹陷三叠系百口泉组砾岩大油区、二叠系上乌尔禾组大面积连片的含油特征(图6)^[8,11]。再如盆地腹部和东部点砂坝、三角洲分支河道砂坝、前缘砂坝以及浊积扇等相带沉积的砂体,横向非均质强,优质储层分布局限,形成了一批规模及储量丰度均相对较小的油气田,如莫北油田、盆5井油气田、盆6井油气田和莫西庄油气田。

3.3 立体输导网络对油气横、纵向分布具有调节作用

立体输导网络是复式油气成藏的重要条件,尤其是断裂,是控制准噶尔盆地油气资源分布的一个重要因素。已知盆地存在4期断裂,其在油气运聚过程中的作用有别,分别为海西期以逆冲推覆为主的断裂体系,控制着盆地坳、隆构造格局,也是盆地最重要的油源断裂;印支期发育以压扭走滑为特征的断裂体系,与海西期断裂搭接,形成“Y”字形跨层输导结构;燕山期以伸展拉张为主,呈雁列状分布的小规模正断裂体系,控制了中、浅层油气分布;喜马拉雅期南天山的挤压推覆作用,形成以滑脱断层为主的断裂体系,主要控制着南缘地区的油气分布。整体而言,区带性的大断裂主要起油气输导作用,小断裂起控藏作用(图7)。此外盆地纵向存在的多期不整合,如石炭系顶面、中二叠统顶面、中-下侏罗统顶面以及侏罗系顶面的不整合对油气成藏与分布具有局部控制作用。加之不整合面与继承性鼻凸及油源断裂相结合,形成数个油气运移的汇聚区,在不整合面

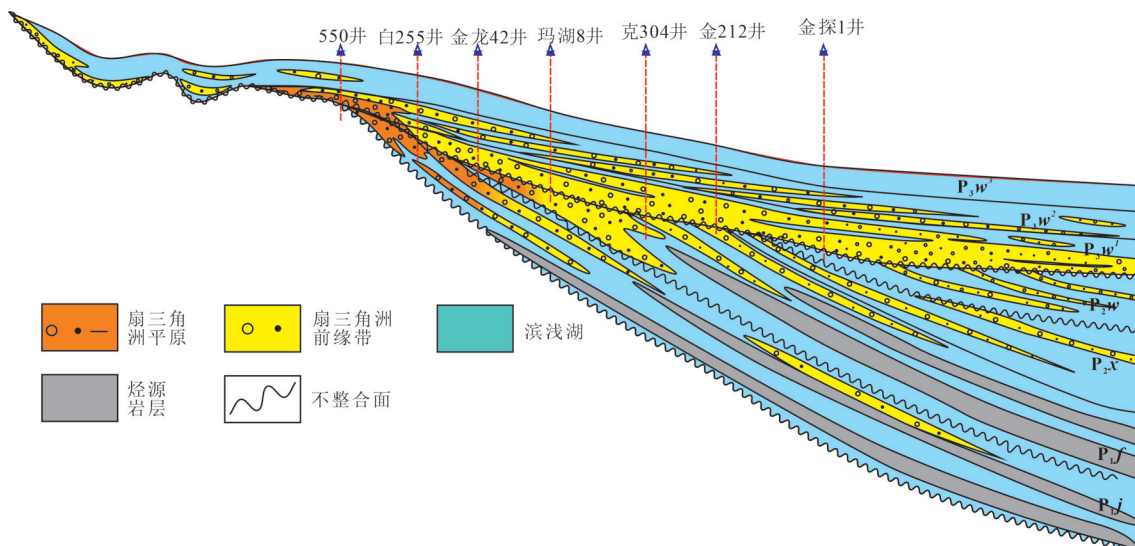


图6 准噶尔盆地中上二叠统扇三角洲沉积模式

Fig. 6 Fan delta sedimentary model of the Middle-Upper Permian in the Junggar Basin

上、下形成众多的地层以及地层-岩性油气藏,如盆地西北缘断裂带石炭系顶面油气藏、石西油田石炭系油气藏、陆东地区石炭系顶面不整合气藏以及中拐凸起南部佳木河组不整合气藏等,均为立体输导网络沟通烃源岩,油气横纵向调整聚集的结果。总之,没有海西期—印支期这组具有一定走滑性质的逆冲断裂,就没有沟通源灶的油气运移“高速公路”;没有燕山期—喜马拉雅期这组正断裂,就没有次生的高效油气田,也就没有纵向 26 套含油气层系的立体格局。因此,围绕中-下二叠统优质源岩的中-下组合是寻找大规模油气储量的主力层位,中-上组合虽然保存条件也好,但断裂的发育与沟通作用有限,规模性油藏的发现也就相对局限。

3.4 古构造决定油气的最终归属地

准噶尔盆地在喜马拉雅期,盆地发生掀斜,南降北升,形成现今隆凹相间的构造格局(图2)。西北缘的克-乌断裂带和红车拐断裂带分别紧邻玛湖凹陷和沙湾凹陷两大富烃凹陷。北三台凸起紧邻阜康凹陷;帐北断裂带叠加在石树沟生烃凹陷之上;达巴松凸起、莫

索湾凸起和白家海凸起被富烃凹陷所围限;陆梁隆起紧邻玛湖凹陷、盆1井西凹陷和东道海子凹陷。而且这些凸起带存在向生烃凹陷延伸的古鼻凸带,古鼻凸带不仅控制着盆地沉积砂体的展布,还与断裂构造相伴生,因此决定了古凸带成为油气运聚的主要方向^[53]。目前发现的油气主要集中于富烃凹陷周缘的正向构造单元,最典型的莫北-莫索湾凸起四周均为生烃凹陷,是长期继承性古隆起,具有良好的油气藏形成条件,形成了多个油气藏。此外还有北三台凸起、中拐凸起和达巴松凸起等继承性古隆,均为油气运移的有利指向区。

古构造格局也对沉积体系的控制作用明显,古凸起控制着水系的流向,进而控制着砂体的展布。盆地重要的白垩系清水河组底砂岩^[54],其沉积受石南低凸起影响,北部德仑山物源控制的辫状河三角洲被分隔为多个分支水系,其西侧分支水系在低凸翼部洼槽区形成河道侧积岩性体,后期构造发生反转,砂体上倾方向低凸泥岩遮挡,形成上倾尖灭型岩性油藏^[55]。按该模式发现了石南31井油藏,很好地反映出早期形成的古油藏,后期随构造发生反转而调整,尤其喜马拉雅期

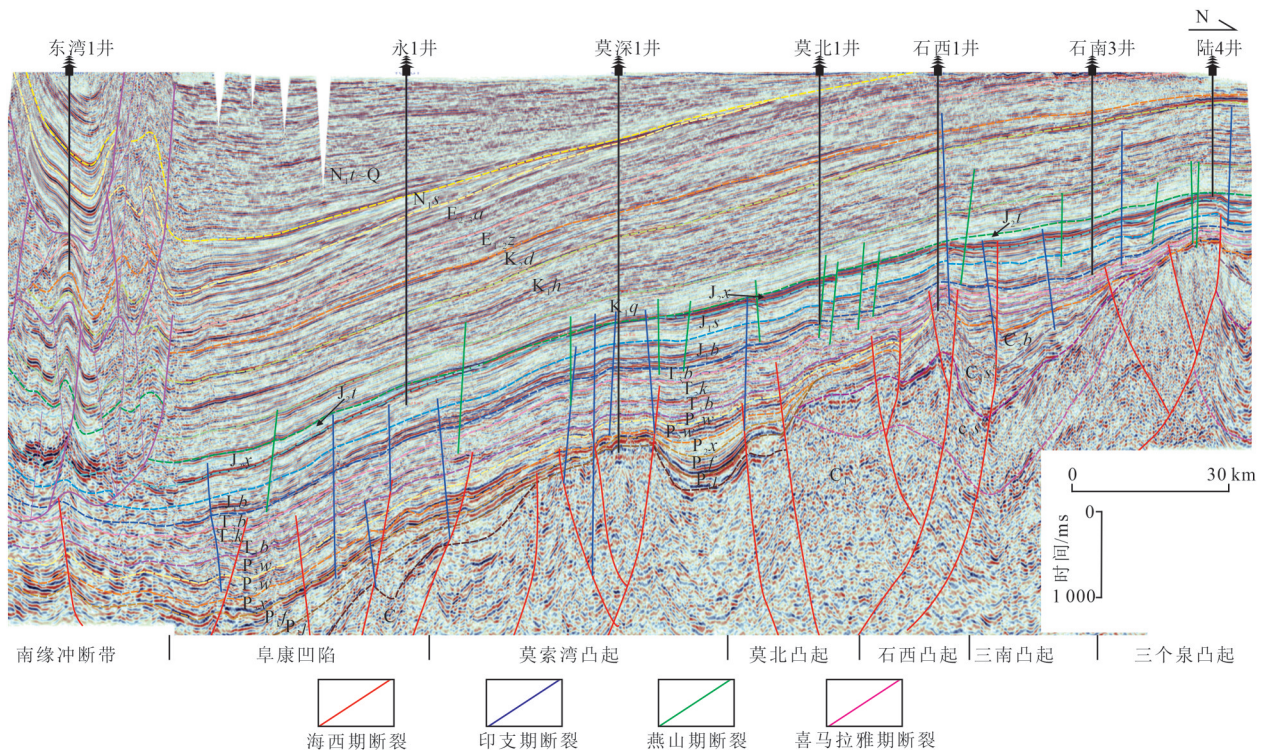


图7 准噶尔盆地4期断裂体系

Fig. 7 Four-stage fault system in the Junggar Basin

$N_1 \sim Q$. 新近系—第四系 N_{1s} . 新近系沙湾组 E_{2-3a} . 古近系安集海河组 E_{1-2z} . 古近系紫泥泉子组 K_2d . 白垩系东沟组 K_1h . 白垩系呼图壁河组
 K_1q . 白垩系清水河组 J_2t . 侏罗系头屯河组 J_2x . 侏罗系西山窑组 J_1s . 侏罗系三工河组 J_1b . 侏罗系八道湾组 T_2k . 三叠系白碱滩组
 T_2k . 三叠系克拉玛依组 T_1b . 三叠系百口泉组 P_3w . 二叠系上乌尔禾组 P_2w . 二叠系下乌尔禾组 P_2x . 二叠系夏子街组 P_1f . 二叠系风城组
 P_1j . 二叠系佳木河组 C_2b . 石炭系巴塔玛依内山组 C_1s^b . 石炭系松喀尔苏组上亚组 C_1s^a . 石炭系松喀尔苏组下亚组 C . 石炭系

的掀斜运动决定了晚期油气运移的主要方向和油气藏的最终归属地。

4 勘探实践与展望

综上所述,准噶尔叠合盆地形成多个相互叠加的复合油气系统。纵向上“三层楼”的油气分布特点决定了油气勘探早中期集中在埋藏相对较浅的正向构造单元油层发育区。随着勘探的深入,地质认识的程度越来越高,向盆地凹陷区深层进军是必然趋势,总体呈现叠合盆地勘探发现的多阶段性和长期性。勘探发现除了地质认识的深入,工艺水平的提高也在很大程度上促进了盆地深部油气的发现,盆地目前的油气发现集中体现在3个方面。

4.1 富烃凹陷油气发现是储量增长主体,立足烃源灶迎迕面谋求盆地级领域发现

近年来,中国石油新疆油田分公司围绕6大富烃凹陷:玛湖凹陷、沙湾凹陷、盆1井西凹陷、东道海子凹陷、阜康凹陷以及吉木萨尔凹陷,风险与预探一体化推进,先后取得玛湖凹陷百口泉组、上乌尔禾组和风城

组;吉木萨尔凹陷芦草沟组;东道海子凹陷上乌尔禾组;沙湾凹陷上乌尔禾组和风城组;阜康凹陷芦草沟组与上乌尔禾组等多个重大领域的发现与突破。尤其是2017年以来,围绕富烃凹陷下组合累计获得石油三级储量 15.82×10^8 t,占盆地三级储量发现的94.6%,2020年这个比例达到近100%。富烃凹陷油气勘探已成为近年储量增长的主体,也标志着盆地已进入富烃凹陷下组合勘探新时代。

油气勘探进入富烃凹陷下组合,纵向上贴近二叠系主力烃源岩,成藏具有“近水楼台先得月”的优势,但整体勘探程度极低,地质认识不足。下组合是盆地演化较为复杂的时期,沉积环境由石炭纪的海相盆地过渡到二叠纪的陆相湖盆,盆地类型由石炭纪一早二叠世的前陆盆地经过中二叠世的过渡,形成晚二叠世盆地统一的陆内坳陷型湖盆。早、中二叠世的分割性凹陷湖盆分布局限,发育了风城组和下乌尔禾组优质烃源岩,随着湖盆水进,形成了披覆在源岩之上的上乌尔禾组盆地级超覆地层系统(图8)。上乌尔禾组超覆尖灭带处于生烃灶上倾方向,形成盆地级的地层型油气遮挡带。纵向上,上乌尔禾组中、下部发育扇三角洲前缘优质砂砾岩储层,凹陷区-斜坡部位逐层退积,形成

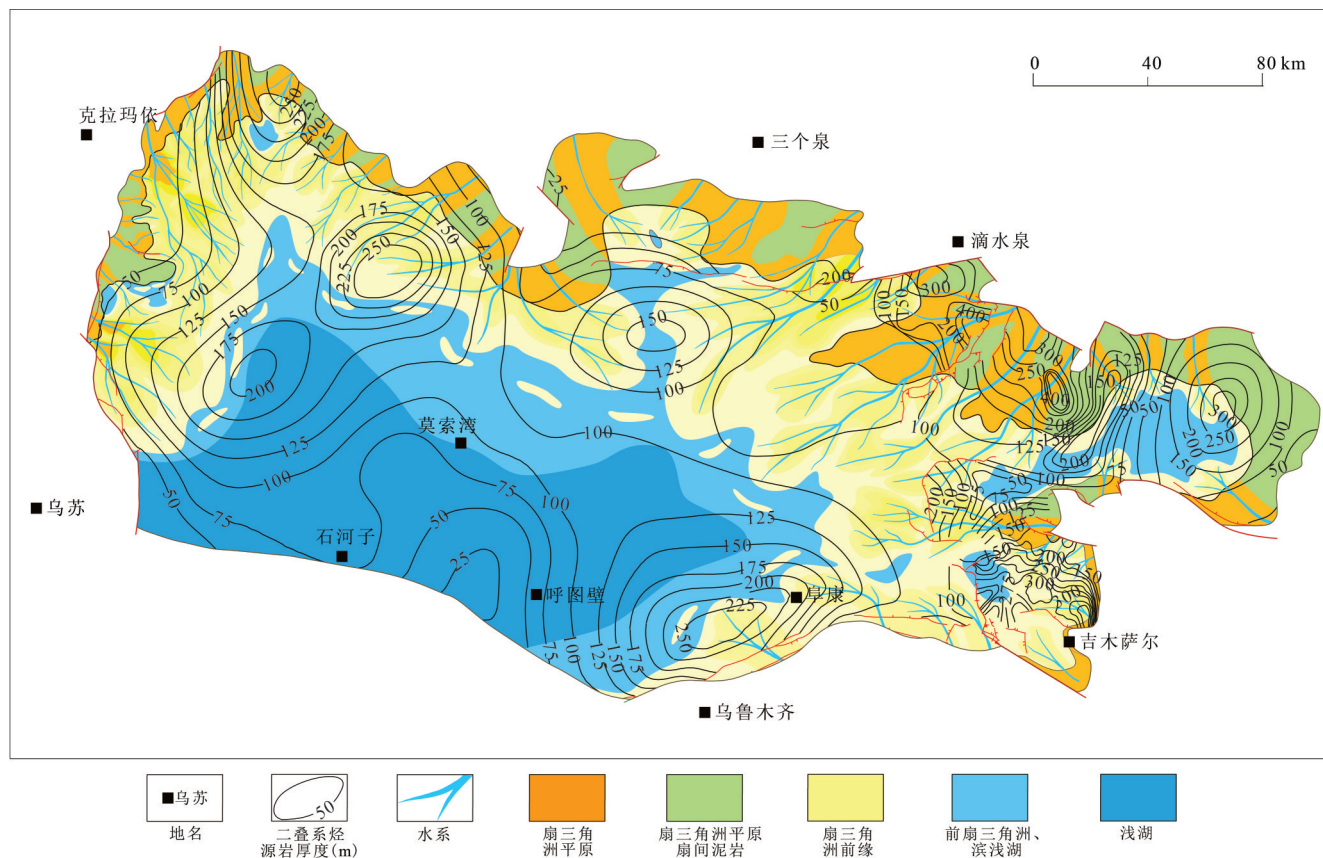


图8 准噶尔盆地上乌尔禾组沉积体系分布与烃源灶叠合图

Fig. 8 Sedimentary system distribution map with hydrocarbon source kitchens overlaid in the Wuerhe Formation, Junggar Basin

叠置连片的大型储集体,加之顶部湖侵期厚层泥岩形成有效的遮挡,构成了最有利的成藏系统。自2016年以来,按照“由浅入深、风险引领、预探甩开、逐个击破”的战略思路,在玛湖凹陷南部上乌尔禾组累计落实了石油三级储量 8.6×10^8 t,探明储量已达 5×10^8 t。之后,围绕5大富烃凹陷,整体布控,取得了沙湾凹陷沙探1井^[7]、沙探2井的重大突破以及东道海子凹陷滴南15井两层百万、阜康凹陷康探1井两层百万和盆1井西凹陷石西16井重要苗头等一系列重大成果,打开了盆地深度5 500 m以浅的16 000 km²有利区,预示着盆地富烃凹陷下组合迎烃面(尤其上乌尔禾组)是盆地未来持续获得突破和落实规模储量的主战场。

4.2 源岩层系常规-非常规油气有序共生,揭示油气综合勘探重大新领域

随非常规油气地质理论的发展,认为在同一个含油气系统内,一般发现常规油气预示着供烃方向存在非常规油气与之共生,会出现常规和非常规油气“有序共生”现象^[56]。近年围绕玛湖富烃凹陷二叠系风城组的勘探,常规-非常规油气有序共生的全油气系统成藏模式得以证实^[57]。

前期,在玛南地区围绕断裂带风城组常规砂砾岩勘探,发现了一系列小型构造油气藏和构造-岩性油气藏,随着向斜坡方向甩开,多井出水,按照常规油藏的认识,风城组为边底水油气藏,向凹陷方向并无勘探潜力,导致勘探陷入僵局。通过多年的探索,认识到风城组岩性变化表现为由断裂带(砂砾岩)—斜坡区(白云质砂岩)—凹陷区(白云质泥页岩)(图9),粗粒沉积与细粒沉积空间上此消彼长。基于此,建立了常规砂砾岩油藏—白云质砂岩致密油—白云质泥页岩页岩油

的常规-非常规油气有序共生模式,并向玛南坡下甩开部署了玛湖26、玛湖28等井,发现油水过渡带之下新的云质砂岩致密油带,并快速落实整装规模控制储量 2.2×10^8 t。同时,在玛北地区优选构造高部位部署玛页1井,该井风城组全井段获荧光级以上岩心,岩性主体为云质泥页岩夹纹层状白云质粉砂质,油层厚度近200 m,采用直井大段分层压裂试油,获得50 m³高产工业油流。至此,风城组斜坡-凹陷区大面积的非常规“连续型”致密油(页岩油)打开局面,深度5 500 m以浅有利勘探领域超2 300 km²,资源规模及勘探潜力巨大。

以常规-非常规油气有序共生的全油气系统成藏模式为指导,相继在阜康凹陷二叠系芦苇沟组烃源岩层系内获得康探1井致密油的突破^[11],其早期生成的成熟油富集于凹陷边缘隆起区,晚期高熟轻质油与天然气主要富集于凹陷区,进一步证实并深化了不同类型油藏有序共生的成藏认识。这对于石油地质学理论具有重要意义,应重新审视烃源岩层系内的非常规油气勘探,其本身具备非常规油气富集的条件,是常规-非常规油气综合勘探的重大领域。

4.3 深层具备油气规模高效勘探潜力,坚定信心打开油、气并举新局面

深度大于4 500 m的深层是21世纪全球油气勘探的重要领域。在准噶尔盆地,早期研究认为深度4 500 m为碎屑岩储层的死亡界限,超过该深度不发育有效储集体。但随着勘探程度不断提高,诸如支撑砾岩、白云质砂岩、白云质泥页岩以及火山岩等各类深埋储层新类型不断出现。例如,阜康凹陷康探1井在中二叠统芦苇沟组深度5 296~5 315 m灰质砂岩段试油

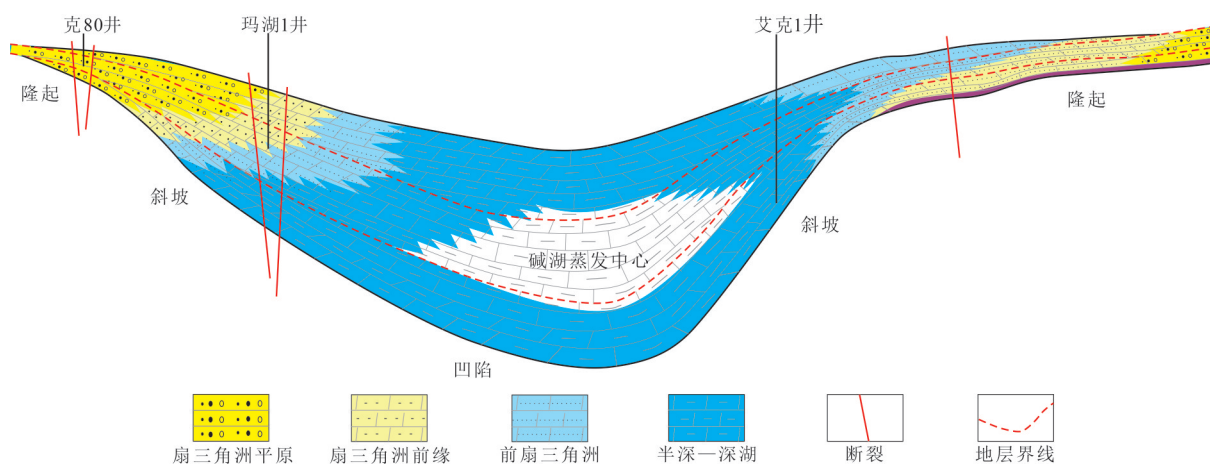


图9 准噶尔盆地风城组常规-非常规储层沉积模式

Fig. 9 Sedimentary model of conventional-unconventional reservoirs in the Fengcheng Formation, Junggar Basin

获日产油 18.47 t, 日产天然气 $1.364 \times 10^4 \text{ m}^3$; 在上二叠统上乌尔禾组 5 116~5 121 m 和 4 994~5 066 m 砂质砾岩段分别试油获日产油 132.1 t 和 114.54 t, 日产天然气 $1.119 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $0.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的两层百吨突破。玛湖凹陷玛湖 28 井在二叠系风城组深度 4 871~4 926 m 白云质砂岩段大段试油, 获最高日产油 35.77 t, 日产天然气 $0.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的高产工业油气流。这些深层探井的试油突破预示着准噶尔盆地深层的储集层是有效的, 并且从油层厚度及试油成效显示, 深层不仅意味着大规模, 同样也意味着高产与高效。

深层储层受成岩作用的影响往往物性变差, 但准噶尔盆地深层存在异常高压、微裂缝和次生溶蚀作用, 这促使深埋致密储层的物性得以改善^[58]。阜康凹陷康探 1 井上乌尔禾组砂质砾岩 23 个样品实测孔隙度为 0.8%~7.0%, 平均值为 4.3%, 空气渗透率 $(0.011 \sim 0.716) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $0.065 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 整体显示储层致密, 物性较差。但在上乌尔禾组 4 994~5 066 m 试获日产油 114.54 t, 5 116~5 121 m 试获日产油 132.01 t 的高产工业油气流, 试油结果与储层物性关系明显不相符。因此, 对康探 1 井上乌尔禾组储层进行了高孔隙压力-高围压条件下的渗透率实验, 发现异常压力系数超过 1.68, 渗透率增加幅度明显(图 10)。该区上乌尔禾组异常压力系数已普遍超过 1.75, 极大的改善了储层渗透性, 形成致密背景下的高效优质储层, 这也解释了康探 1 井储层致密但试油效果却很好的原因。此外, 玛湖凹陷白云质岩类钻井也已证实, 深埋条件下存在溶蚀作用, 且微裂缝发育, 能够有效的改善致密储层的储集性能^[59]。

同时, 从烃源岩热演化角度分析, 埋深增加, 烃源岩热演化程度升高, 晚期排出的烃类为轻质油或天然

气, 也利于油气高产。如康探 1 井上乌尔禾组原油密度为 0.8378 g/cm^3 , 且含有一定量的气显示, 与之对应的芦苇沟组烃源岩, 成熟度普遍超过 1.0%, 处于高成熟生轻质油或者湿气的热演化阶段。位于盆 1 井西凹陷北侧的石西 16 井, 石炭系深度 4 812~4 822 m 钻遇两套百万方高产的优质火山岩储层, 取获流体物性测试, 原油密度为 0.7911 g/cm^3 , 气/油比高达 $1184 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 天然气干燥系数 0.88, 其油气源来自于盆 1 井西凹陷成熟-高成熟阶段的二叠系烃源岩, 该井距离烃源灶区较远, 尚未进入凹陷区。凹陷区二叠系烃源岩层埋深超过 6 000 m, 成熟度已普遍超过 1.3%, 进入高-过成熟的大量生干气的阶段, 因此从现有气油比推断, 向凹陷区存在气油比更高的凝析气或者干气藏。

准噶尔盆地的深层具备发现优质规模油气藏的静态要素, 并且盆地凹陷区侏罗系以下地层成藏环境普遍处于异常高压带^[15], 二叠系可能还存在生烃引起的超高压, 且地层温度往往也较高, 油质轻, 气/油比高, 具备形成高效油气藏的基本条件。基于此, 应坚定向凹陷区深层进军信心, 寻找晚期高成熟阶段的轻质油、天然气, 实现规模大发现。

综上所述, 准噶尔盆地通过多年的勘探实践, 在基础石油地质理论方面, 形成了多个反映盆地特征的理论认识。包括: ①富烃拗陷迎坳盆地级规模地层-岩性油气藏群成藏新模式; ②深层常规-非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式; ③深层大构造新生古储大跨度侧向运移成藏模式等。在配套关键技术方面也初步形成了多个针对性的特色工艺技术, 诸如: ①沙漠区深层地层型圈闭精细识别配套技术系列, 精确刻画地层超削点和展布范围, 实现厚层砾岩储层甜点定量预测; ②复杂深埋高压储层产能分类综合评价技术; ③攻关形成砾岩支撑剂优化铺置工艺、全充填缝网压裂工艺、深穿透体积压裂工艺技术体系; ④陆相页岩油测井“三品质七性关系”综合评价技术方法体系等。这些理论认识与技术工艺仍然需要进一步深化, 以期不断丰富发展中国陆相石油地质理论, 并促进勘探实践。

准噶尔盆地未来的油气勘探, 将通过理论认识的突破以及技术进步, 牢固树立全油气系统综合勘探新理念, 坚定深部高过成熟烃源灶规模天然气富集的信心, 走向深层, 拓展非常规, 努力开创“常非并重、油气并举”的新局面。实现中央拗陷五大富烃凹陷区深层—超深层及其周缘古凸起带、南缘冲断带、陆梁隆起石炭系、二叠统页岩油等重大领域的整体突破。

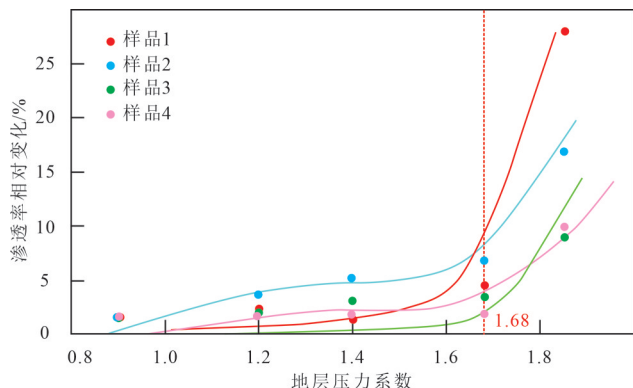


图 10 准噶尔盆地阜康凹陷康探 1 井高围岩压力条件下渗透率变化系数关系

Fig. 10 Permeability variation vs. rock pressure coefficient for Well Kangtan 1 in the Fukang Depression, Juggar Basin

5 结论

1)准噶尔盆地具有5类盆地叠加的成盆环境;3套主力烃源灶叠置发育的成烃背景;21套砂层组、4类规模储集体规模发育的成储条件;4期断裂组合搭接、8个区域构造层横向叠加的成藏条件;加之,3套区域盖层构成“三层楼”立体含油气格局,奠定了复式油气聚集的基本特征。

2)受盆地复式油气聚集的条件控制,形成了源外常规构造油气藏、岩性油气藏、地层油气藏与不整合油气藏等4类。同时受烃源岩以及储集体类型控制,形成了源内致密油气藏、页岩油气藏以及泥岩裂缝型油气藏,空间上表现出常规-非常规各类型油气藏共生的全油气系统特征。

3)盆地复式油气聚集的全油气系统特征,意味着盆地深层、非常规以及天然气领域是盆地未来勘探的主体,应坚持全油气系统综合勘探理念,“常非并重,油气并举”,跳出凸起带,走向凹陷区勘探。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 陈磊,杨懿婷,汪飞,等. 准噶尔盆地勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质,2020,41(5):505-518.
Chen Lei, Yang Yiting, Wang Fei, et al. Exploration history and enlightenment in Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(5): 505-518.
- [3] 何登发,陈新发,张义杰,等. 准噶尔盆地油气富集规律[J]. 石油学报,2004,25(3):1-10.
He Dengfa, Chen Xinfu, Zhang Yijie, et al. Enrichment characteristics of oil and gas in Jungar Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2004, 25(3): 1-10.
- [4] 张越迁,张年富. 准噶尔大型叠合盆地油气富集规律[J]. 中国石油勘探,2006,11(1):59-64+7-8.
Zhang Yueqian, Zhang Nianfu. Oil/gas Enrichment of large superimposed Basin in Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(1): 59-64+7-8.
- [5] 陈新发,杨学文,薛新克,等. 准噶尔盆地西北缘复式油气成藏理论与精细勘探实践[M]. 北京:石油工业出版社,2014.
Chen Xinfu, Yang Xuewen, Xue Xinke, et al. Theory and practice of fine exploration of duplex oil and gas accumulation at the north-west edge of Junggar Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014.
- [6] 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 effect in the Junggar Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 811-819.
- [7] 杜金虎,支东明,唐勇,等. 准噶尔盆地上二叠统风险领域分析与沙湾凹陷战略发现[J]. 中国石油勘探,2019,24(1):24-35.
Du Jinhu, Zhi Dongming, Tang Yong, et al. Prospects in Upper Permian and strategic discovery in Shawan Sag, Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 24-35.
- [8] 唐勇,郭文建,王霞田,等. 玛湖凹陷砾岩大油区勘探新突破及启示[J]. 新疆石油地质,2019,40(2):127-137.
Tang Yong, Guo Wenjian, Wang Xiatian, et al. A new breakthrough in exploration of large conglomerate oil province in Mahu Sag and its implications [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 127-137.
- [9] 杜金虎,支东明,李建忠,等. 准噶尔盆地南缘高探1井重大发现及下组合勘探前景展望[J]. 石油勘探与开发,2019,46(2):205-215.
Du Jinhu, Zhi Dongming, Li Jianzhong, et al. Major breakthrough of Well Gaotan 1 and exploration prospects of lower assemblage in southern margin of Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 205-215.
- [10] 卫延召,陈刚强,王峰,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷及周缘深大构造有效储层及烃类相态分析[J]. 中国石油勘探,2016,21(1):53-60.
Wei Yanzhao, Chen Gangqiang, Wang Feng, et al. Effective reservoirs and hydrocarbon phases in discordogenic in Mahu Sag and its periphery in Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 53-60.
- [11] 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 Kangtan 1 in the Fukang Sag in the Junggar Basin and its significance [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 1-11.
- [12] 杨智峰,唐勇,郭旭光,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组页岩油赋存特征与影响因素[J]. 石油实验地质,2021,43(5):784-796.
Yang Zhifeng, Tang Yong, Guo Xuguang, et al. Occurrence states and potential influencing factors of shale oil in the Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(5): 784-796.
- [13] 支东明,宋永,何文军,等. 准噶尔盆地中一下二叠统页岩油地质特征、资源潜力及勘探方向[J]. 新疆石油地质,2019,40(4):389-401.
Zhi Dongming, Song Yong, He Wenjun, et al. Geological characteristics, resource potential and exploration direction of Middle Lower Permian shale oil in Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(4): 389-401.
- [14] 支东明,唐勇,郑孟林,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油藏地质特征与成藏控制因素[J]. 中国石油勘探,2019,24(5):615-623.
Zhi Dongming, Tang Yong, Zheng Menglin, et al. Geological characteristics and accumulation controlling factors of shale reservoirs in Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 615-623.
- [15] 何文军,费李莹,阿布力米提·依明,等. 准噶尔盆地深层油气成藏条件与勘探潜力分析[J]. 地学前缘,2019,26(1):189-201.

- He Wenjun, Fei Liying, Ablimit Imin, et al. Methods in studying petroleum accumulation systems in a superimposed basin: a case study of petroleum reservoirs in the central Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontier*, 2019, 26(1): 189–201.
- [16] 钱海涛, 苏东旭, 阿布力米提·依明, 等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷斜坡区油气地质特征及勘探潜力[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(4): 551–561.
- Qian Haitao, Su Dongxu, Ablimit Imin, et al. Petroleum geological characteristics and exploration potential in slope area of Well Pen-1 Western Depression in Junggar Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(4): 551–561.
- [17] Zhi Dongming, Tang Yong, He Wenjun, et al. Orderly coexistence and accumulation models of conventional and unconventional hydrocarbons in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 38–51.
- [18] 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.
- [19] 易泽军, 何登发. 准噶尔盆地东部构造地层层序及盆地演化[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 932–942.
- Yi Zejun, He Dengfa. Tectono-stratigraphic sequence and basin evolution of the eastern Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 932–942.
- [20] 梁宇生, 何登发, 甄宇, 等. 准噶尔盆地沙湾凹陷构造—地层层序与盆地演化[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 943–954.
- Liang Yusheng, He Dengfa, Zhen Yu, et al. Tectono-stratigraphic sequence and basin evolution of Shawan Sag in the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 943–954.
- [21] 陈发景, 汪新文, 汪新伟. 准噶尔盆地的原型和构造演化[J]. *地质前缘*, 2005, 12(3): 77–89.
- Chen Fajing, Wang Xinwen, Wang Xinwei. Prototype and tectonic evolution of the Junggar Basin, northwestern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(3): 77–89.
- [22] 何登发, 张磊, 吴松涛, 等. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(5): 845–861.
- He Dengfa, Zhang Lei, Wu Songtao, et al. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5): 845–861.
- [23] 杨海波, 陈磊, 孔玉华. 准噶尔盆地构造单元划分新方案[J]. *新疆石油地质*, 2004, 6(25): 686–688.
- Yang Haibo, Chen Lei, Kong Yuhua. A novel classification of structural units in Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2004, 6(25): 686–688.
- [24] 何文军, 王绪龙, 邹阳, 等. 准噶尔盆地石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(2): 75–84.
- He Wenjun, Wang Xulong, Zou Yang, et al. The geological conditions, resource potential and exploration direction of oil in Junggar Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(2): 75–84.
- [25] 王绪龙, 支东明, 王屿涛, 等. 准噶尔盆地烃源岩与油气地球化学特征[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- Wang Xulong, Zhi Dongming, Wang Yutao, et al. Organic geochemistry of source rocks and hydrocarbons in the Junggar Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [26] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地油气源、油气分布与油气系统[J]. *地质学报*, 2016, 90(3): 421–450.
- Chen Jianping, Wang Xulong, Deng Chunping, et al. Oil and gas source, occurrence and petroleum system in the Junggar Basin, northwest China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(3): 421–450.
- [27] 柳波, 刘定勇, 郭天旭, 等. 准噶尔盆地西北缘烃源灶迁移演化及其对油气藏的定位作用[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(6): 621–625.
- Liu Bo, Liu Dingyong, Guo Tianxu, et al. Oil accumulation related to migration of source kitchens in northwestern margin structural belt, Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(6): 621–625.
- [28] 杨海波, 王屿涛, 郭建辰, 等. 准噶尔盆地天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(10): 1518–1530.
- Yang Haibo, Wang Yutao, Guo Jianchen, et al. Geological conditions, resource potential and exploration direction of natural gas in Junggar Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(10): 1518–1530.
- [29] 龚德瑜, 蓝文芳, 向辉, 等. 准噶尔盆地东部地区天然气地化特征与成因来源[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(1): 142–152.
- Gong Deyu, Lan Wenfang, Xiang Hui, et al. Genetic types and origins of natural gases from the eastern Junggar Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(1): 142–152.
- [30] 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.
- [31] 何登发, 陈新发, 况军, 等. 准噶尔盆地石炭系烃源岩分布与含油气系统[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(4): 397–408.
- He Dengfa, Chen Xinfu, Kuang Jun, et al. Distribution of Carboniferous source rocks and petroleum systems in the Junggar Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(4): 397–408.
- [32] 王然, 杨森, 万敏, 等. 玛南上斜坡区上乌尔禾组弱胶结砂砾岩储集层特征及控制因素[J]. *特种油气藏*: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1357.TE.20210603.1111.002.html>.
- Wang Ran, Yang Seng, Wan Ming, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of weakly cemented glutenite of Shangwuerhe formation in Manan upper slope area, Junggar Basin [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1357.TE.20210603.1111.002.html>.
- [33] 邹志文, 郭华军, 牛志杰, 等. 河控型扇三角洲沉积特征及控制因素: 以准噶尔盆地玛湖凹陷上乌尔禾组为例[J]. *古地理学报*, 2021, 23(4): 756–770.
- Zou Zhiwen, Guo Huajun, Niu Zhijie, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of river-dominated fan delta: a case study from the Upper Urho Formation in Mahu sag of Junggar Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2021, 23(4): 756–770.
- [34] 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(04): 1-16.
- [35] 刘刚, 卫延召, 陈桐, 等. 准噶尔盆地腹部侏罗系一白垩系次生油气藏形成机制及分布特征[J]. 石油学报, 2019, 40(8): 914-927.
- Liu Gang, Wei Yanzhao, Chen Gang, et al. Formation mechanism and distribution characteristics of Jurassic Cretaceous secondary reservoirs in the hinterland of Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(8): 914-927.
- [36] Kongyou Wu, Douglas Paton, Ming Zha. Unconformity structures controlling stratigraphic reservoirs in the north-west margin of Junggar basin, North-west China[J]. Frontiers of Earth Science, 2013, 7(1): 55-64.
- [37] 郭秋麟, 吴晓智, 卫延召, 等. 准噶尔盆地腹部侏罗系油气运移路径模拟[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(1): 37-45.
- Guo Qiulin, Wu Xiaozhi, Wei Yanzhao, et al. Simulation of oil and gas migration pathways for Jurassic in hinterland of Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(1): 37-45.
- [38] 张义杰, 曹剑, 胡文瑄. 准噶尔盆地油气成藏期次确定与成藏组合划分[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(3): 257-262.
- Zhang Yijie, Cao Jian, Hu Wenxuan. Timing of petroleum accumulation and the division of reservoir-forming assemblages, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 257-262.
- [39] 庞雄奇. 中国西部叠合盆地深部油气勘探面临的重大挑战及其研究方法 with 意义[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 517-541.
- Pang Xiongqi. Key challenges and research methods of petroleum exploration in the deep of superimposed basins in western China[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 517-534.
- [40] 李二庭, 靳军, 王剑, 等. 准噶尔盆地克拉美丽地区石炭系天然气来源[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(11): 1515-1523.
- Li Er-ting, Jin Jun, Wang Jian, et al. Source of Carboniferous natural gas in Kelameili area, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(11): 1515-1523.
- [41] 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 Chunying, Wang Xulong, et al. Formation mechanism of condensates, waxy and heavy oils in the southern margin of Junggar Basin[J]. Science China: Earth Sciences, 2017, 47(5): 567-585.
- [42] 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——典型类型原油油源对比[J]. 石油学报, 2016, 37(2): 160-171.
- Chen Jianping, Wang Xulong, Deng Chunping, et al. Oilsource correlation of typical crude oils in the southern margin, Junggar Basin, Northwestern China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(2): 160-171.
- [43] 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, northwest China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 767-780.
- [44] Guanbao Xie, Liming Qin, Zhihuan Zhang, Wenhao Li. Fluid inclusions and oil charge history in the reservoirs of the Yongjin oil field in central Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2013, 32(1).
- [45] 徐兴友, 孔祥星, 郭春清, 等. 准噶尔盆地腹地董1井和成1井的油源分析及其地质意义[C]//第十届全国有机地球化学学术会议, 无锡: 2005.
- Xu Xingyou, Kong Xiangxing, Guo Chunqing, et al. Original analysis and its significance in petroleum geology of well-DONG 1 and well-CHNEG 1, Junggar basin[C]//The Tenth Conference of Organic Geochemistry in China, Wuxi: 2005.
- [46] 谭绍泉, 曾治平, 宫亚军, 等. 准噶尔盆地腹部超压控制烃、储演化与油气充注过程[J]. 断块油气田, 2014, 21(3): 287-291.
- Tan Shaoquan, Zeng Zhiping, Gong Yajun, et al. Control of abnormal overpressure on hydrocarbon-reservoir evolution and hydrocarbon filling process in central of Junggar basin[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2014, 21(3): 287-291.
- [47] 任战利, 崔军平, 祁凯, 等. 深层、超深层温度及热演化历史对油气相态与生烃历史的控制作用[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 22-30.
- Ren Zhanli, Cui Junping, Qi Kai, et al. Control effects of temperature and thermal evolution history of deep and ultra-deep layers on hydrocarbon phase state and hydrocarbon generation history[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 22-30.
- [48] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷斜坡区三叠系百口泉组扇控大面积岩性油藏勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(6): 14-23.
- Kuang Lichun, Tang Yong, Lei Dewen, et al. Exploration of fan-controlled large-area lithologic oil reservoirs of Triassic Baikouquan Formation in slope zone of Mahu Depression in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(6): 14-23.
- [49] 张年富. 准噶尔盆地腹部莫索湾地区油气成藏条件与成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(3): 17-20.
- Zhang Nianfu. Fluid compartment and hydrocarbon accumulation in Mosuowan area in central part of Junggar basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(3): 17-20.
- [50] 郑民, 李建忠, 吴晓智, 等. 致密储集层原油充注物理模拟——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(02): 219-227.
- Zheng Min, Li Jianzhong, Wu Xiaozhi, et al. Physical modeling of oil charging in tight reservoirs: A case study of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(02): 219-227.
- [51] 李学义, 邵雨, 李天明. 准噶尔盆地南缘三个油气成藏组合研究[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(6): 32-34.
- Li Xueyi, Shao Yu, Li Tianming. Three oil-reservoir combinations in south marginal of Junggar Basin, northwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(6): 32-34.
- [52] 王韬, 郑孟林, 任海蛟, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷及周缘佳木河组划分对比新认识与天然气勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 99-112.
- Wang Tao, Zheng Menglin, Ren Haijiao, et al. New understandings of stratigraphic division and correlation of Jiamuhe Formation and natural gas exploration target in Mahu Sag and its periphery, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 99-112.
- [53] 陈桐, 卞保力, 李啸, 等. 准噶尔盆地腹部中浅层油气输导体系

- 及其控藏作用[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(1): 46-56.
- Chen Gang, Bian Baoli, Li Xiao, et al. Transport system and its control on reservoir formation of Jurassic-Cretaceous in hinterland of Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(1): 46-56.
- [54] 常敏. 准噶尔盆地车排子地区白垩系清水河组储层特征研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- Chang Min. Study on Reservoir Characteristics of the Cretaceous Qingshuihe Formation in Chepaizi area, Junggar Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum, Beijing, 2017.
- [55] 王毅, 李俊飞, 彭家琼, 等. 准噶尔盆地SN31井区白垩系清一段一砂组沉积相及储层主控因素分析[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(2): 194-208.
- Wang Yi, Li Junfei, Peng Jiaqiong, et al. Fine analysis of sedimentary facies and main controlling factors of reservoir in the first sand group of 1st member of Cretaceous Qingshuihe Formation in SN31 well area of Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 194-208.
- [56] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-27.
- Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: Concept and practical significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 14-27.
- [57] 唐勇, 曹剑, 何文军, 等. 从玛湖大油区发现看全油气系统地质理论发展趋势[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(01): 1-9.
- Tang Yong, Cao Jian, He Wenjun, et al. Development tendency of geological theory of total petroleum system: insights from the discovery of mahu large oil province[J]. Xinjiang Petroleum Geo-logy, 2021, 42(01): 1-9.
- [58] 张浩, 程亮, 樊海涛, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷地层超压成因及其对物性的影响[J]. 地球物理学进展: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20210208.1337.084.html>.
- Zhang Hao, Cheng Liang, Fan Haitao, et al. Formation overpressure and its influence on physical properties in Mahu sag, Junggar Basin[J]. Progress in Geophysics, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20210208.1337.084.html>.
- [59] 张益艮, 王贵文, 宋连腾, 等. 页岩岩相测井表征方法-以准噶尔盆地玛湖凹陷风城组为例[J]. 地球物理学进展: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20210723.0933.022.html>.
- Zhang Yiling, Wang Guiwen, Song Lianteng, et al. A logging identification method of shale lithofacies: A study of Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin[J]. Progress in Geophysics, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20210723.0933.022.html>.

(编辑 董立)

(上接第131页)

- [41] 苏圣民, 蒋有录. 含油气盆地断裂带结构特征及其与油气运聚关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 32-41.
- Su Shengmin, Jiang Youlu. Fault zone structures and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in petroliferous basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(4): 32-41.
- [42] 李曰俊, 宋文杰, 吴根耀, 等. 塔里木盆地中部隐伏的晋宁期花岗岩闪长岩和闪长岩[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2005, 35(2): 97-104.
- Li Yuejun, Song Wenjie, Wu Genyao, et al. Concealed Jinning granodiorite and diorite in Central Tarim Basin [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2005, 35(2): 97-104.
- [43] 阳怀忠. 塔里木盆地中央隆起带隆坳格局变迁及其构造控制机制分析[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2010.
- Yang Huaizhong. Research on uplift-depression framework evolution and its tectonic control mechanism in the Central Uplift Belt, Tarim Basin [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2010.
- [44] Lin B, Zhang X, Xu X, et al. Features and effects of basement faults on deposition in the Tarim Basin [J]. Earth - science reviews, 2015, 145: 43-55.
- [45] 乔日新, 张用夏. 高精度航空磁测在塔里木盆地油气勘查中的几点新认识[J]. 物探与化探, 2002, 26(5): 334-339, 371.
- Qiao Rixin, Zhang Yongxia. New knowledge obtained from the application of high-precision aeromagnetic survey to oil and gas exploration in tarim basin [J]. geophysical and geochemical exploration, 2002, 26(5): 334-339, 371.
- [46] 何碧竹, 焦存礼, 蔡志慧, 等. 塔里木盆地中部航磁异常带新解译[J]. 中国地质, 2011, 38(4): 961-969.
- He Bizhu, Jiao Cunli, Cai Zhihui, et al. A new interpretation of the high aeromagnetic anomaly zone in central Tarim Basin [J]. Geology in China, 2011, 38(4): 961-969.
- [47] 徐鸣洁, 王良书, 钟锴, 等. 塔里木盆地重磁场特征与基底结构分析[J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 585-592.
- Xu Mingjie, Wang Liangshu, Zhong Kai, et al. Features of gravitational and magnetic fields in the Tarim Basin and basement structure analysis [J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4): 585-592.
- [48] 周新源, 吕修祥, 杨海军, 等. 塔中北斜坡走滑断裂对碳酸盐岩油气差异富集的影响[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 628-637.
- Zhou Xinyuan, Lu Xiuxiang, Yang Haijun, et al. Effects of strike-slip faults on the differential enrichment of hydrocarbons in the northern slope of Tazhong area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(4): 628-637.
- [49] Qiu H, Deng S, Cao Z, et al. The evolution of the complex anticlinal belt with crosscutting strike-slip faults in the Central Tarim Basin, NW China [J]. Tectonics, 2019, 38(6): 2087-2113.
- [50] 许志琴, 李思田, 张建新, 等. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 1-22.
- Xu Zhiqin, Li Sitian, Zhang Jianxin, et al. Paleo-asian and tethyan tectonic systems with docking the Tarim Block [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 1-22.

(编辑 梁慧)