

文章编号: 0253-2697(2024)01-0052-17 DOI:10.7623/syxb202401004

准噶尔盆地油气勘探新领域、新类型及勘探潜力

宋永¹ 唐勇¹ 何文军^{1,2} 龚德瑜³ 晏奇¹ 陈桐³ 单祥⁴ 刘超威¹ 刘刚³
秦志军¹ 阿布力米提·依明¹ 尤新才¹ 任海蛟¹ 白雨¹ 高岗^{2,5}

(1. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院 新疆克拉玛依 834000; 2. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京) 北京 102249;
3. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 4. 中国石油杭州地质研究院 浙江杭州 310023;
5. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249)

摘要:准噶尔盆地油气资源丰富,发育石炭系、二叠系和侏罗系3套主力烃源岩,储集层类型多样,岩性包括火山岩、砾岩、砂岩及碳酸盐岩型混积岩等,其中,分布于盆地富烃凹陷边缘及斜坡区的砾岩是盆地规模增储上产的主体。盆地发育3套区域性泥岩盖层,与储层呈纵向叠置,形成“三层楼”结构,并由此构建3大油气系统,即石炭系油气系统、二叠系油气系统和侏罗系油气系统。近年来,通过地质认识创新,突出风险勘探,强化集中勘探与精细勘探,准噶尔盆地“下凹进源”,走向深层—超深层领域的勘探取得了丰硕成果。围绕新区、新领域、新层系与新类型,通过继承前期研究工作、深化含油气系统成藏条件分析,创新了“全油气系统”“他源型煤层气”“石炭系自生自储与新生古储”等成藏认识,在南缘冲断带下组合天然气、西部拗陷风城组全油气系统、富烃凹陷周缘古隆起以及盆地内侏罗系煤层气4个领域取得了重要新突破。通过系统梳理近期的勘探新成果,综合分析各领域特征,指出了未来的勘探方向及重点领域,明确了盆地未来应坚持“常非并重、油气并举、全油气系统”的综合勘探思路,围绕准噶尔盆地南部中—下组合天然气、西部拗陷深层—超深层常规构造—非常规轻质油气以及侏罗系煤层气开展深化勘探。

关键词:准噶尔盆地;全油气系统;煤层气;页岩气;致密气;深层—超深层;勘探方向

中图分类号:TE122

文献标识码:A

New fields, new types and exploration potentials of oil-gas exploration in Junggar Basin

Song Yong¹ Tang Yong¹ He Wenjun^{1,2} Gong Deyu³ Yan Qi¹ Chen Gang³ Shan Xiang⁴ Liu Chaowei¹
Liu Gang³ Qin Zhijun¹ Ablimit Yiming¹ You Xincai¹ Ren Haijiao¹ Bai Yu¹ Gao Gang^{2,5}

(1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Xinjiang Karamay 834000, China;
2. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 4. PetroChina Hangzhou
Research Institute of Geology, Zhejiang Hangzhou 310023, China; 5. College of Geosciences, China University of
Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract:Junggar Basin is rich in oil-gas resources. There are three sets of major source rocks of Carboniferous System, Permian System and Jurassic System. There are diverse types of reservoirs, including volcanic rock, conglomerate, sandstone and carbonate-type mixed rock. Among them, conglomerates distributed at the edges and slopes of hydrocarbon-rich sags in the basin are the main body for increasing reserves. There are three sets of regional mudstone cap rocks distributed in the basin, which are vertically stacked with the reservoir, thus dividing the basin into a three-decker structure and forming three major petroleum systems, i. e., the Carboniferous, Permian and Jurassic petroleum system. In recent years, through innovating geological understandings, highlighting risk exploration, strengthening intensive exploration and fine exploration, and exploring the sag center and source rocks, Junggar Basin has achieved substantial achievements in the exploration of deep and ultra-deep fields. Particularly, focusing on “new areas, new fields, new strata and new types”, based on previous research work, a deep analysis is performed on accumulation conditions for petroleum systems, and efforts are made to innovate the understandings of hydrocarbon accumulation, involving “whole petroleum system”, “coalbed methane from other source rocks”, “Carboniferous self-generation and self-reservoir and new generating hydrocarbon in paleo-reservoir”. Therefore, four important new breakthroughs have been made as below: natural gas of lower as-

基金项目:中国石油天然气股份有限公司前瞻性基础性研究科技重大项目“准噶尔盆地二叠系全油气系统地质理论与勘探实践”(2022DJ0108)和新疆维吾尔自治区科学技术厅“天山英才”培养计划科技创新领军人才项目“北疆地区二叠系超级盆地全油气系统地质理论与战略接替领域优选”(2022TSYCLJ0070)资助。

第一作者:宋永,男,1978年9月生,2020年获西南石油大学博士学位,现为中国石油新疆油田公司教授级高级工程师,主要从事盆地油气勘探开发管理工作。Email:syong@petrochina.com.cn

通信作者:何文军,男,1988年12月生,2013年获中国石油大学(北京)硕士学位,现为中国石油新疆油田公司高级工程师、中国石油大学(北京)博士研究生,主要从事油气资源评价及非常规油气综合勘探研究工作。Email:fchwj@petrochina.com.cn

semble in the southern margin thrust belt, whole petroleum system in Fengcheng Formation in the western depression, paleo-uplift around the hydrocarbon-rich sag, and Jurassic coalbed methane in the basin. Future exploration directions and key areas are pointed out by systematically summarizing recent exploration achievements, and comprehensively analyzing the characteristics of the field. It has been clarified that the basin should adhere to the comprehensive exploration idea of “equal emphasis on both conventional and unconventional resources, collaborative development of oil and gas, and whole petroleum system” in the future, focusing on the further exploration of natural gas of the southern middle-lower assemblage, deep/ultra-deep conventional structural trap and unconventional light hydrocarbons in the western depression, and Jurassic coalbed methane.

Key words: Junggar Basin; whole petroleum system; coalbed methane; shale gas; tight gas; deep and ultra-deep strata; exploration direction

引用:宋永,唐勇,何文军,龚德瑜,晏奇,陈桐,单祥,刘超威,刘刚,秦志军,阿布力米提·依明,尤新才,任海蛟,白雨,高岗. 准噶尔盆地油气勘探新领域、新类型及勘探潜力[J]. 石油学报,2024,45(1):52-68.

Cite: SONG Yong, TANG Yong, HE Wenjun, GONG Deyu, YAN Qi, CHEN Gang, SHAN Xiang, LIU Chaowei, LIU Gang, QIN Zhijun, ABLIMIT Yiming, YOU Xincan, REN Haijiao, BAI Yu, GAO Gang. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 52-68.

准噶尔盆地是中国西部重要的叠合含油气盆地,面积约为 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$,已探明石油资源量超过 $30 \times 10^8 \text{ t}$,探明天然气资源量超过 $1500 \times 10^8 \text{ m}^3$,油气综合探明率为 24.3%^[1-2]。20 世纪,按照传统的“含油气系统一顺藤摸瓜”的找油思路^[3-4],围绕正向构造单元及其周缘,发现了新中国第 1 个百万吨级油田。准噶尔盆地 2002 年的原油年生产能力超过千万吨,并连续 20 余年保持千万吨稳产上产,目前已累计生产原油 $4 \times 10^8 \text{ t}$,是中国六大陆相超级含油气盆地之一。

随着准噶尔盆地油气勘探开发进程持续推进,油气的发现逐渐走向深层—超深层领域,勘探开发目标由浅层常规高效油气藏逐渐转变为深层非常规致密油气藏,这些致密油气藏整体表现为“低品位、埋深大、难发现、难动用”。随着勘探开发目标的转变,勘探思路也逐渐由“单一含油气系统”转变为“复合含油气系统”“全油气系统”^[5-6]。在相关勘探理论的指导下,中国石油新疆油田公司围绕“新区带、新层系、新类型”开展风险勘探部署工作,取得了多个新领域与新资源类型的突破,主要有盆地南缘冲断带下组合天然气^[7-8]、西部拗陷风城组全油气系统^[9-10]、富烃凹陷周缘古隆起^[11] 3 个新领域以及侏罗系煤层气^[12] 1 种新类型。笔者基于前人对盆地油气形成条件的认识,结合近期勘探取得的新突破,总结了准噶尔盆地新领域的油气富集规律,以期对盆地未来勘探方向的选择提供参考。

1 油气勘探开发简况

准噶尔盆地的油气勘探开发可追溯到 20 世纪初期。早期,为查明盆地的隆-拗格局,开展了大量的地质踏勘、重力以及磁力等非地震工作。1909 年,新疆商务总局在盆地南缘独山子地区开展钻探工作,开启了盆地油气勘探的序幕^[13]。1936 年,按照地表“油气苗”进行勘探,发现了盆地可供规模开发的独山子油

田。1950 年,按照“扇控论”和“断控论”的找油理念,采用“定凹选凸”的方法发现了克拉玛依大油田。1951—1955 年,盆地西北缘开展了大量钻井工作,相继发现了 3 个油田。1960 年,准噶尔盆地内的油田达到了 $166 \times 10^4 \text{ t/a}$ 的产油高峰。1963 年之后,油气有机成因理论的提出奠定了“源控论”的找油思想,并发展成油系统^[14]、原油系统^[6]及含油气系统^[15-16]等相关理论。按“源控论”的找油思想,20 世纪 80 年代,油公司在准噶尔盆地东部发现了彩南、三台等油田;按含油气系统“由源到圈”的找油思路,在盆地腹部相继发现了陆梁、石西、莫北等百万吨级高效油气田。基于这些油田的发现,准噶尔盆地的油气产量快速增长,至 2002 年,克拉玛依油田成为中国西部第 1 个千万吨级大油田。

2002—2017 年,准噶尔盆地的油气勘探与开发进入千万吨级稳产上产良性循环新阶段,可供上产的新发现储量成为盆地面临的现实需求。油公司基于准噶尔盆地为多期叠合的综合研判,按照本土化的复合含油气系统思想^[5],一方面深化老区滚动勘探,另一方面加大新领域的勘探力度,勘探方向开始“跳出断裂带、走向凹陷区”。2017 年,随着克拉美丽气田、玛湖凹陷百口泉组 10 亿吨级新油区以及吉木萨尔凹陷芦草沟组亿吨级非常规油区先后被发现,准噶尔盆地形成了“油气并举、常非并重”的勘探开发新局面,原油产量持续保持千万吨级以上稳产。2017 年以后,受非常规油气勘探思路的冲击,全油气系统^[17-18]找油新理念形成,这加快了勘探思路由单一凹陷向全盆地、由单一类型油藏向多类型油藏、由单一层系向多层系综合兼顾转变,在上乌尔禾组、玛湖凹陷风城组、盆地南缘深部构造等地区相继发现多个亿吨级油气储量区(图 1),为盆地的增储上产奠定了坚实的资源基础(图 2)。

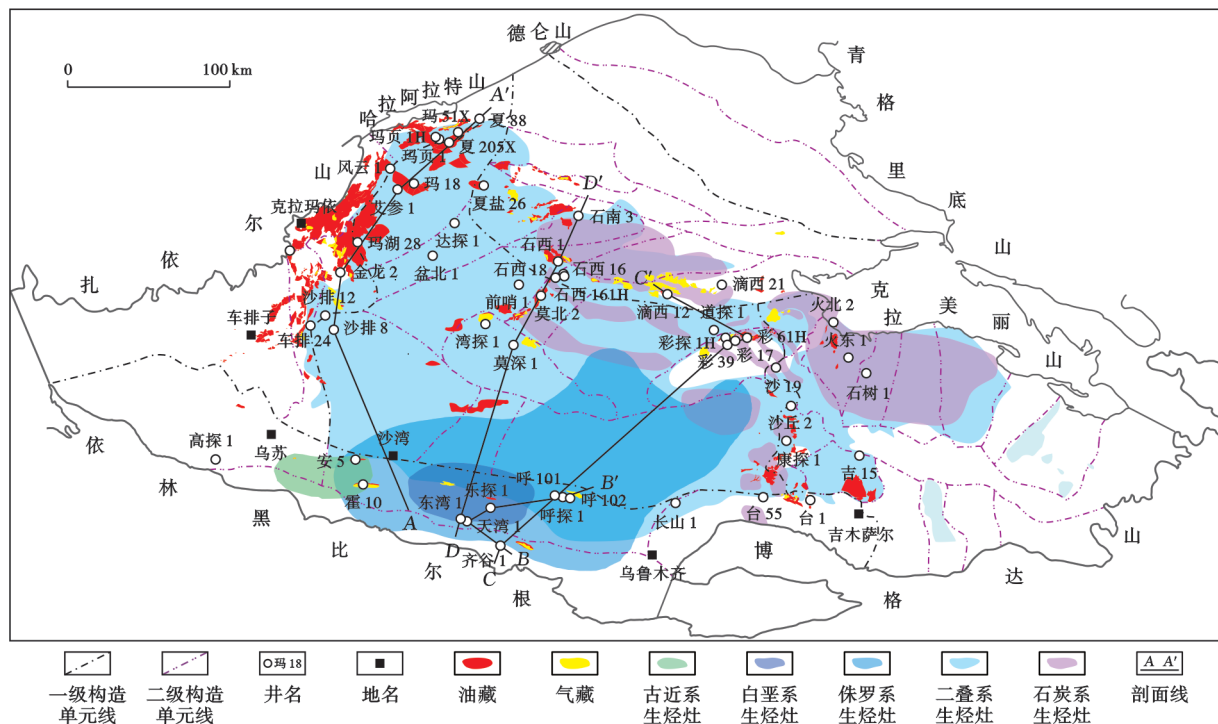


图1 准噶尔盆地勘探成果

Fig. 1 Exploration achievements of Junggar Basin

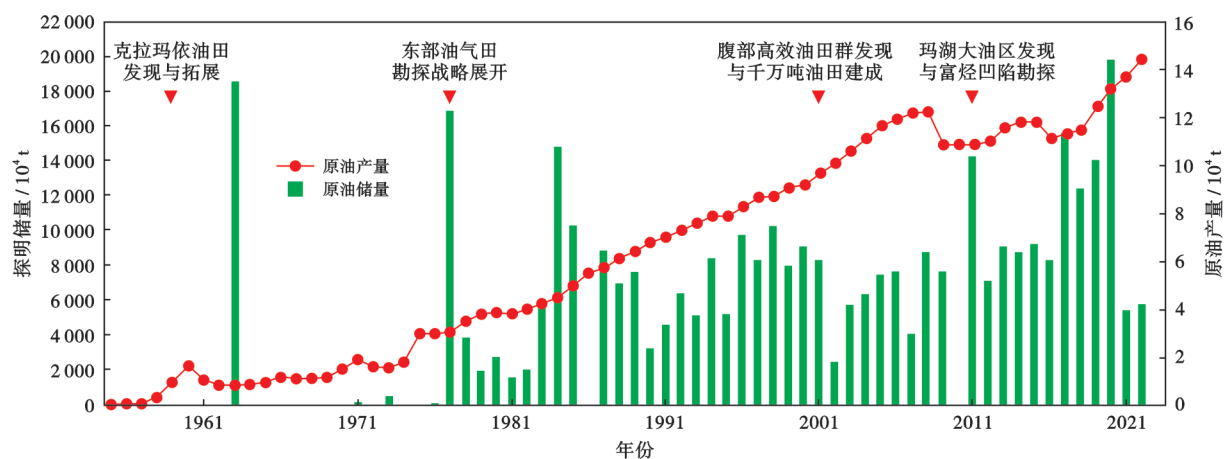


图2 准噶尔盆地历年石油储量、产量变化

Fig. 2 Changes of oil reserves and production in Junggar Basin over the years

2 基本油气地质条件

2.1 烃源岩

准噶尔盆地受石炭纪残留海相盆地、早二叠世前陆盆地、中一晚二叠世至古近纪稳定拗陷盆地以及新近纪以来再生前陆盆地控制^[19],在石炭系、二叠系和侏罗系分别形成了3套主力烃源岩。已发现的油气田围绕着3套源岩呈环带状分布(图1)。

前人对3套源岩及地球化学特征开展了研究并取得丰硕成果^[20-21]。石炭系有效源岩主要分布在准噶尔

盆地东部,面积约为 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$,以海陆过渡相细粒沉积为主,母质类型以 II_2 型— III 型为主,是重要的气源岩。二叠系烃源岩受博格达海槽内高盐度海水自西向东退出影响,在准噶尔盆地形成西部下二叠统风城组(咸化碱湖型)和东部中二叠统芦苇沟组(咸化湖型)2类湖相烃源岩^[22];二叠系烃源岩整体表现为高丰度菌藻类、大厚度沉积,母质类型以 I 型— II_1 型为主,是准噶尔盆地最重要的油源岩,目前盆地已发现的油气有87%来自该套源岩;二叠系烃源岩覆盖了准噶尔盆地中央拗陷的5大次级凹陷,面积约为 $5.6 \times$

10^4 km^2 。侏罗系烃源岩是稳定坳陷湖盆期沉积的淡水湖盆源岩,以侏罗系八道湾组和西山窑组的煤系烃源岩为主,达到成熟的有效烃源岩主要分布在准噶尔盆地南缘山前,面积为 $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[23]。

2.2 储-盖组合

准噶尔盆地储集层的发育有其特殊性,受火山作用、湖盆水体盐度变化以及物源供给的差异性影响,发育火山岩、砾岩、砂岩及碳酸盐岩型混积岩等多类型储集层^[19]。火山岩主要发育在石炭系及下二叠统,岩性以中性-酸性岩为主(图3),部分地区发育熔结凝灰岩及与之相关的凝灰质砂砾岩^[24];砾岩是盆地规模增储和上产的主体,主要发育在中-上二叠统及三叠系,以百口泉组砾岩大油区的发现为典型代表,分布于盆地富烃凹陷边缘及斜坡区;砂岩主要发育于侏罗系-白垩系,目前已发现的侏罗系砂岩储层在全盆地广泛分布,以盆地腹部的高效油气藏为典型代表;碳酸盐岩型混积岩则主要发育于中-下二叠统,是咸化湖盆的特征沉积,为“内源化学、陆源碎屑以及火山物质”三元组成的细粒混合沉积^[1],以白云质、灰质砂岩-泥岩为主,既具备生烃能力,又具备储集能力,往往表现为源-储一体/源-储紧邻,是致密(页岩)油储集层的主体,多发育裂缝和溶蚀孔,且有效储集层在深埋条件下依然发育,主要分布在盆地西部玛湖凹陷-沙湾凹陷下二叠统风城组和东部阜康凹陷-吉木萨尔凹陷中二叠统芦苇沟组。

准噶尔盆地发育3套区域性泥岩盖层,厚度大,封盖能力强,主要为中二叠统下乌尔禾组、三叠系白碱滩组以及下白垩统吐古鲁群泥岩。3套区域盖层与储层在纵向上叠置,形成“三层楼”结构。此外,局部发育的烃源岩及部分层系中的湖相泥岩也可作为局部盖层对油气形成封堵。

综上所述,准噶尔盆地整体发育3套储-盖组合,即上组合(侏罗系-白垩系砂岩储层与上覆白垩系泥岩盖层)、中组合(上二叠统一三叠系砾岩储层与上三叠统白碱滩组泥岩盖层)、下组合(石炭系-下二叠统火山岩、混积岩储层与中二叠统泥岩盖层),成藏条件极为有利。需要注意的是,在准噶尔盆地南缘地区,受埋深影响,3套储-盖组合与盆地主体部分有差别^[7](图4)。

2.3 油气系统

准噶尔盆地发育3套烃源岩,储-盖配置形成“三层楼”结构。从油气系统生-排-运-聚的角度分析,单一油气源生成的油气受断裂和不整合输导体系控制,在纵向上可以跨不同组合运移成藏。以玛湖凹陷二叠系风城组烃源岩为例,风城组生成的油气不仅在

下组合聚集,受贯穿石炭系-三叠系的通源断裂影响,还在中组合储层中聚集,其中以百口泉组和上乌尔禾组的大面积成藏最为典型,其在纵向上的跨度近2000m。此外,受三叠系-侏罗系内三级断裂控制,油气可形成纵向接力,风城组生成的油气运移至侏罗系-白垩系储层中,在上组合中聚集。总体而言,围绕3套源岩、3套盖层以及多套储层,形成了3大油气系统,分别为石炭系油气系统、二叠系油气系统以及侏罗系油气系统(图4)。值得指出的是,近年来,随着盆地“进源勘探”的推进,传统源外的“由源岩到圈闭”的勘探已逐渐拓展到源外-源内协同勘探,并逐渐形成了全油气系统理念^[17]。每一个生烃凹陷的同一套源岩具有常规-非常规有序成藏的全油气系统特征^[1,25]。

3 近期勘探重大突破

自2017年以来,围绕3大油气系统,按照“全油气系统”理念重新调整勘探思路,油公司“跳出正向构造,走向凹陷区,走进源岩,走向深层”,立足中-下组合,开启了盆地“油气并举、常非并重”勘探的新征程,取得了4项重大突破。

3.1 新领域、新类型勘探重大突破

3.1.1 南缘冲断带下组合天然气

准噶尔盆地南缘的油气勘探由中-上组合逐步向下组合转变,陆续部署的6口探井均见到丰富的油气显示。2019年,高探1井在白垩系清水河组的产油量为1003.36t/d、产气量为 $32.17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实现了南缘下组合油气勘探重大突破,开启了准噶尔盆地南缘前陆冲断带大型油气富集区勘探的新里程^[26]。2020年,围绕下组合天然气勘探领域,陆续部署了4口风险探井,其中,位于盆地南缘中段的呼探1井、天湾1井在白垩系清水河组分别试获 $61.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $75.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,长期试产的压力和产量稳定,展示出该层系巨大的勘探潜力。在围绕呼探1井区开展的评价中,部署的呼101井和呼102井均试获高产工业油气流:呼101井在侏罗系喀拉扎组的产油量为30.31t/d、产气量为 $23.35 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,在白垩系清水河组的产油量为51.05t/d、产气量为 $39.23 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;呼102井在侏罗系喀拉扎组的产油量为87.47t/d、产气量为 $80.03 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。呼探1井、呼101井、呼102井的先后勘探突破开辟了侏罗系厚层规模气藏勘探新层系,展现了准噶尔盆地南缘冲断带下组合天然气勘探的广阔前景(图5)。

3.1.2 西部坳陷风城组全油气系统

西部坳陷主要包含玛湖凹陷、盆1井西凹陷和沙湾凹陷3大凹陷,其主要烃源岩赋存在风城组。2017年,

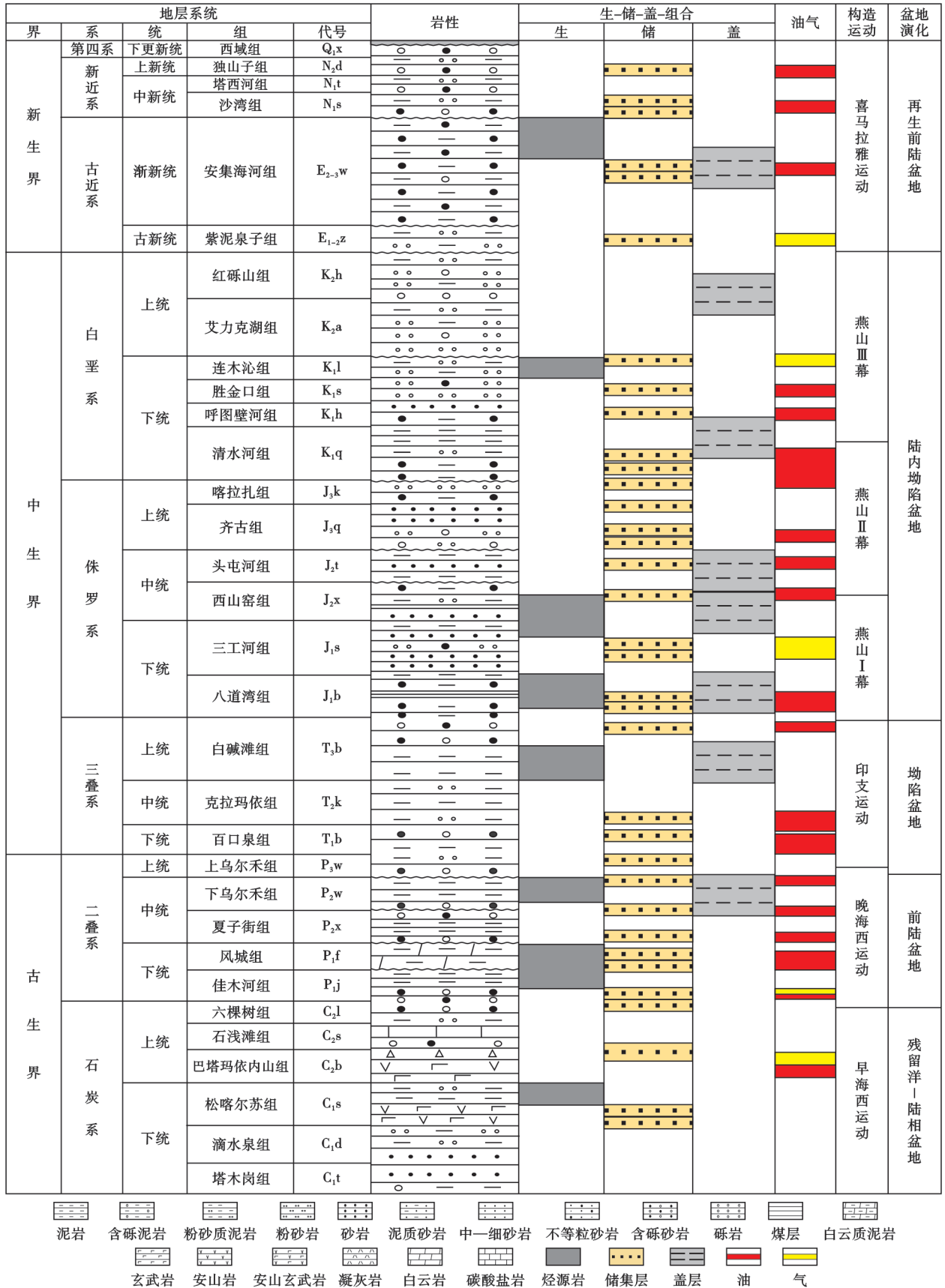
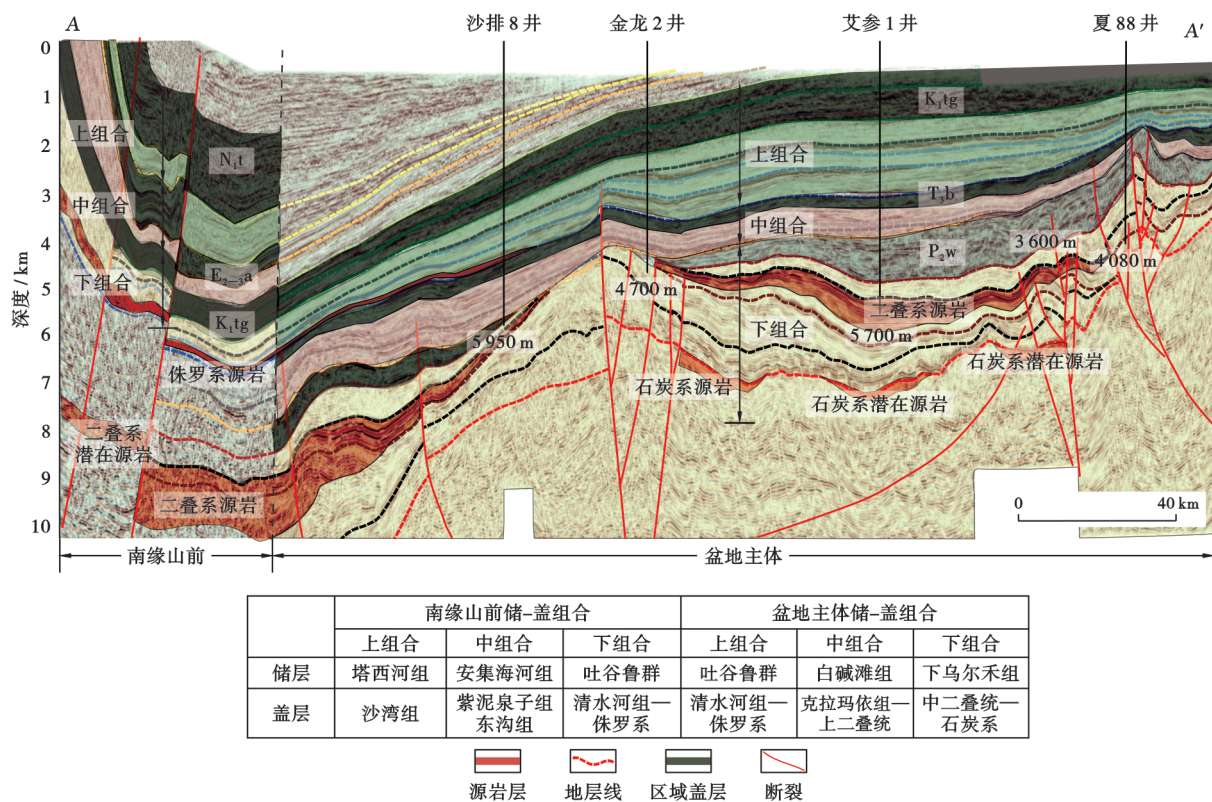


图3 准噶尔盆地综合地层特征

Fig. 3 Comprehensive stratigraphic characteristics of Junggar Basin



注: N₁t—塔西河组; E₂₋₃a—安集海河组; K₂d—东沟组; K₁tg—吐谷鲁群; T₃b—白碱滩组; P₂w—下乌尔禾组。

图 4 准噶尔盆地地层结构与源-储-盖关系(剖面位置见图 1)

Fig. 4 Stratigraphic structure and source-reservoir-cap relationship in Junggar Basin

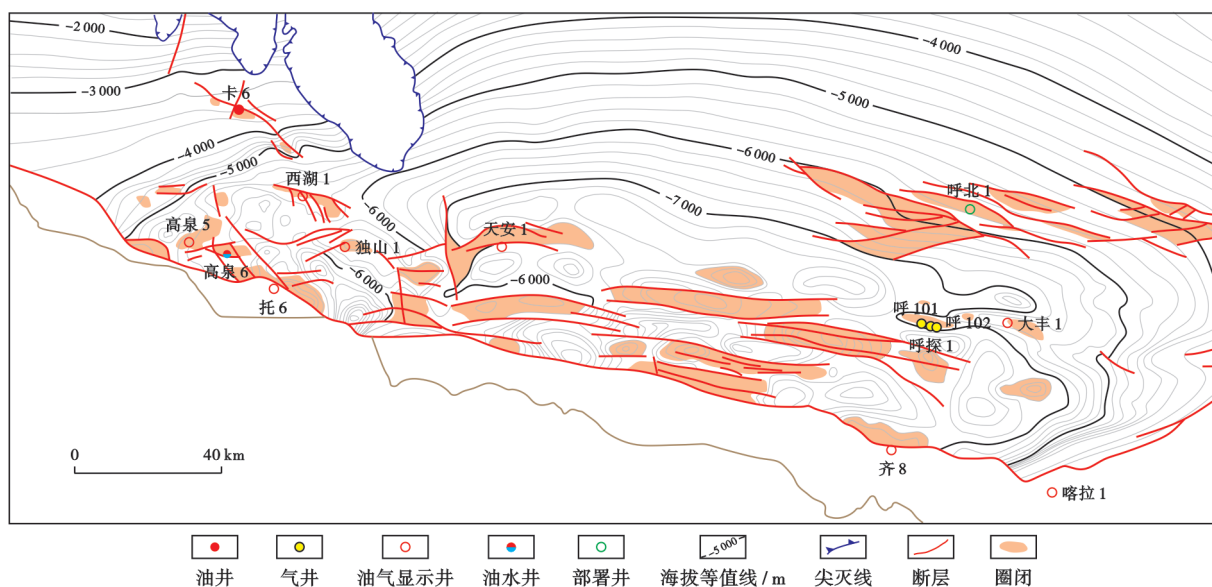


图 5 准噶尔盆地南缘油气勘探成果

Fig. 5 Oil-gas exploration achievements in the southern margin of Junggar Basin

按照常规—非常规油气有序成藏的全油气系统勘探思路,先浅后深,取得了玛湖凹陷风城组全油系统 10 亿吨级非常规新油区的发现^[18,27-28]。由玛湖凹陷向盆 1 井西凹陷及沙湾凹陷拓展,在车排 24 井、湾探 1 井等多口探井的勘探中取得了新突破,揭示西部坳陷“南油

北气”的成藏特征,并提出了西部坳陷风城组全油气系统的新认识(图 6)。

(1) 玛湖凹陷全油系统:玛湖凹陷全油系统的发现以 2019 年玛页 1 井页岩油和玛湖 28 井区致密油的勘探突破为契机,连续 3 年累计落实储量 5.4×10^8 t。

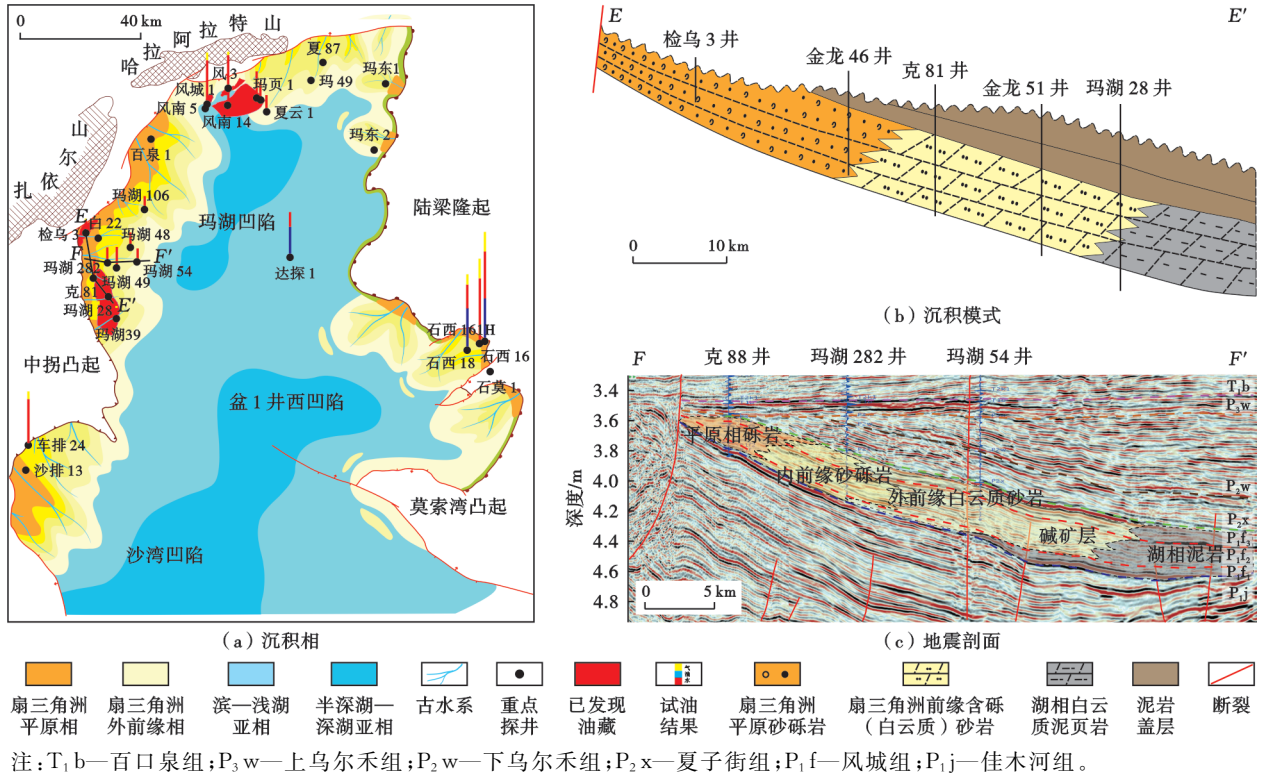


图6 准噶尔盆地西部坳陷风城组勘探成果

Fig. 6 Exploration achievements of Fengcheng Formation in western depression of Junggar Basin

玛湖凹陷的风城组埋深为 4 500~6 000 m, 烃源岩的镜质体反射率(R_o)普遍分布在 0. 7%~1. 2%; 受控于热演化程度, 流体相态整体以油为主; 近两年相继在玛 51X 井、夏 205X 井、玛页 1H 井等多口井取得了百吨高产的突破。基于这些成果, 研究者在玛湖凹陷建立了全油气系统成藏模式^[10, 29]。同时, 随着钻探的深入, 提出全气系统概念。根据风城组的热演化模拟研究, 锁定埋深更大的盆 1 井西凹陷与沙湾凹陷的风城组, 提出二者具备探索风城组全气系统的条件。

(2) 盆 1 井西凹陷全气系统: 借鉴玛湖凹陷风城组勘探经验, 对比玛湖凹陷风城组的成藏条件, 系统剖析已发现的油藏特征, 开展储层相带分布预测, 建立了常规气—致密气—页岩气的有序分布模式^[30]。首先在凹陷边缘构造高部位部署的石西 16 井, 在风城组试获产油量为 124. 14 t/d、产气量为 $2. 16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 之后部署的提产水平井——石西 161H 井, 获产油量 828. 27 t/d、产气量 $104. 38 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业油气流, 打破了盆地单井高产的历史记录, 开辟了盆 1 井西凹陷风城组勘探的新领域。根据取心及钻后地质综合分析, 结合地震相反射特征, 建立了风城组退覆式扇三角洲沉积模式: 风城组在构造高部位物源区分布砂岩—砾岩沉积, 斜坡部位分布白云质砂岩沉积, 凹陷区

分布白云质泥页岩沉积。据此构建了全气序列成藏模式并依据新模式部署了湾探 1 井。湾探 1 井的风城组一段(风一段)底部埋深为 7 500 m, 发育受波浪改造的灰质/白云质砂岩优质储层, 厚度为 35 m, 壁心平均孔隙度为 10%; 在埋深为 7 512~7 540 m 的层段开展压裂试油, 6 mm 油嘴的产油量为 25. 7 t/d、产气量为 $13. 78 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 实现了源内致密气勘探重大突破。

(3) 沙湾凹陷全气系统: 沙湾凹陷与玛湖凹陷在风城组沉积期均为前陆坳陷带。沙湾凹陷具有与玛湖凹陷相似的沉积结构, 砾岩—白云质砂岩—白云质泥页岩的序次沉积^[31]。按照“先常规后非常规、先浅后深”的部署思路, 在构造高部位砾岩区部署井位, 车排 24 井、沙排 12 井等井取得了高产油气突破, 并于 2022 年落实控制储量近 $5 000 \times 10^4 \text{ t}$, 从流体相态分析, 沙湾凹陷的原油具有轻质、气油比高的特征, 由此推测其深部存在致密气和页岩气。

3. 1. 3 盆地侏罗系煤层气

准噶尔盆地侏罗系八道湾组和西山窑组的多套煤层呈广覆式分布, 埋深为 1 000~4 500 m。其中, 西山窑组煤层的厚度一般为 5~40 m, 最厚达到 187 m; 八道湾组煤层的厚度一般为 5~20 m, 最厚达 100 m。侏罗系两层煤岩富煤区的叠合面积为 19 170 km²(图 7)。支东明等^[32]研究认为, 准噶尔盆地 1 000 m 以深的煤

层气资源量为 $17 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占全国中—深部煤层气资源总量的 29%, 深部煤层气是准噶尔盆地乃至中国煤层气的重点勘探领域。2020 年, 针对准噶尔盆地腹部白家海凸起部署了彩探 1H 井, 该井在侏罗系西山窑组煤岩水平段压裂后, 12 mm 油嘴试获产气量为 $5.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 开辟了准噶尔盆地天然气勘探新领域。自此, 准噶尔盆地深部煤层气研究进入全面展开阶段。

2023 年, 白家海凸起彩 61H 井在侏罗系西山窑组煤层试获产油量为 7.18 t/d、产气量为 $1270 \text{ m}^3/\text{d}$; 滴南凸起美 001 井在侏罗系西山窑组老井区复试, 抽汲 28 d 见气, 折算最高产气量为 $4000 \text{ m}^3/\text{d}$ 。盆地腹部多井在西山窑组背斜型煤岩目标层中相继获气, 证实准噶尔盆地煤层气的成藏条件优越, 具有广阔的勘探前景。

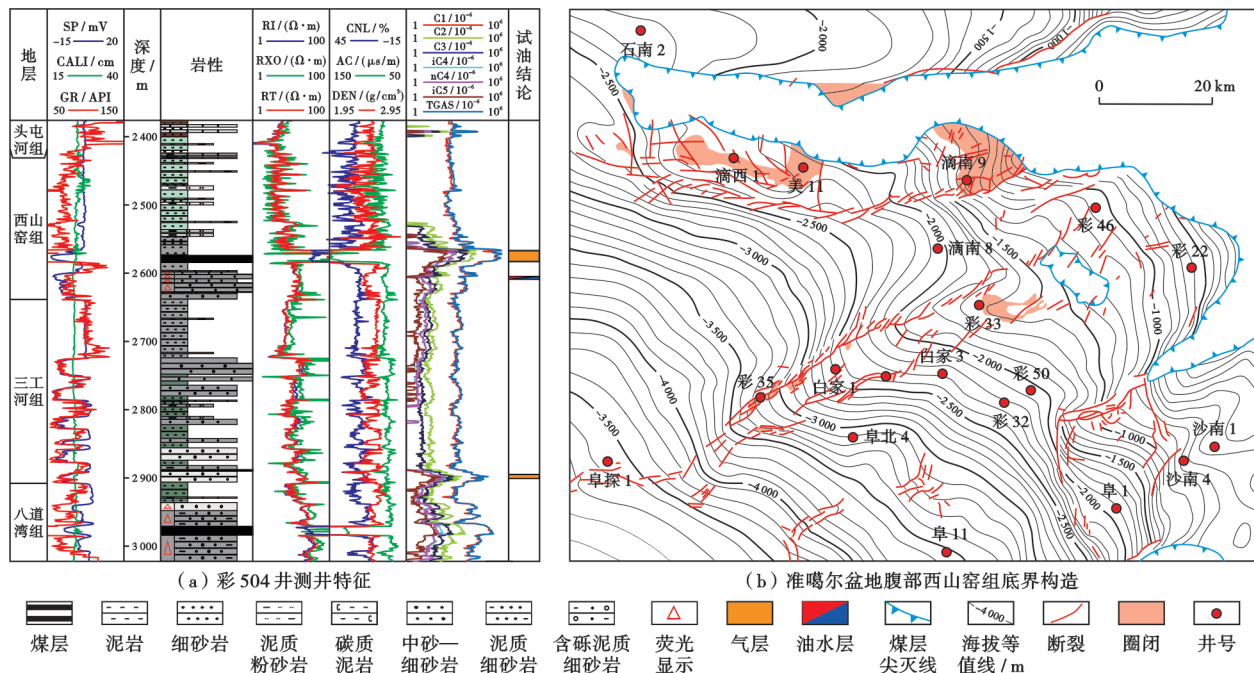


图 7 准噶尔盆地腹部煤层气勘探成果

Fig. 7 Exploration achievements of coalbed methane in the hinterland of Junggar Basin

3.1.4 富烃凹陷周缘古隆起

近年来, 油公司围绕富烃凹陷周缘古隆起部署了多口风险探井和预探井(图 8), 取得了一系列勘探突破。2020 年, 针对夏盐凸起的石炭系背斜构造部署了夏盐 26 井^[33], 在石炭系—三叠系多个层系见油气显示; 该井的石炭系主要发育安山岩和凝灰岩 2 套火山岩储层, 岩心见油迹—荧光级油气显示, 实测平均孔隙度为 4.7%; 在埋深为 5350~5360 m 的层段试油, 获得产油量为 23.63 t/d、产气量为 $0.356 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2021 年, 针对达巴松凸起的石炭系古潜山背斜部署了盆北 1 井, 在石炭系角砾凝灰岩和安山岩段取心 16 m, 均见荧光显示, 实测孔隙度达 25.8%; 在埋深为 6127~6135 m 的层段试油, 获得产油量为 27.11 t/d、产气量为 $52.13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 证实石炭系富集自生自储型天然气, 但存在烃源岩分布难以落实的瓶颈问题。

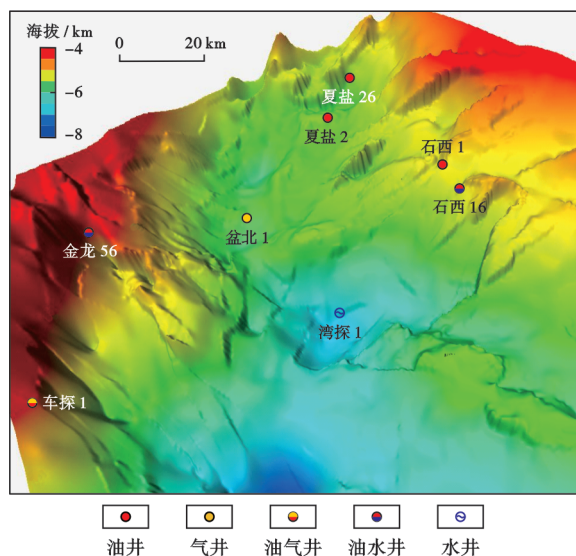


Fig. 8 Carboniferous structure in western depression of Junggar Basin

3.2 发现态势及重点领域优选

随着新区新领域的快速突破与落实(表1),准噶尔盆地的油气勘探呈现出3个鲜明特点:①富烃凹陷中一下组合成为储量增长的主体,近10年油气三级储量当量共计 33.53×10^8 t,占比为81%,且比例逐年提高(近3年高达90%),标志着盆地已进入富烃凹陷中一下组合勘探新时代。②中一下组合以深层领域为主,表现为轻质油与天然气富集。盆地前期勘探主要集中在北部中一上组合,盆地南深北浅的格局(图4)决定了“南气北油”的分布规律。近年来,随着勘探目标向南部深层—超深层的下组合转移,高成熟—过成熟凝析油、天然气的占比持续提升,其核心原因是盆地

南部的侏罗系、二叠系烃源岩埋深普遍超过6500 m, R_o 普遍超过1.6%,达到规模生气的热演化阶段。③结合生产实际资料,近几年突破的油气新领域、新类型虽然整体处于深埋状态,但油气普遍高产高效。综合分析认为,这一方面是由于深埋油气的相态以凝析油气—干气为主,另一方面是由于盆地深部的地层压力系数明显升高^[34-35],如盆地南缘地区呼探1井的地层压力系数高达2.1,玛湖凹陷风城组页岩油的地层压力系数普遍高于1.4,整体处于高压—超高压环境,试油过程中地层能量充足。此外,深部钻遇的储层普遍发育微裂缝^[36-37],这较大地改善了储集性能,造就了深层勘探的高产高效,也坚定了勘探向盆地深部进军的信心。

表1 准噶尔盆地深井—超深井生产数据统计

Table 1 Statistics of production data of deep and ultra-deep wells in Junggar Basin

序号	井号	深度/m	层位	压力系数	产油量/(t/d)	产气量/(10^4 m ³ /d)
1	呼探1	7367~7382	清水河组	2.02	87.10	61.00
2	高探1	5768~5775	清水河组	2.37	1003.36	32.17
3	康探1	5116~5121	上乌尔禾组	1.78	132.01	1.12
		4994~5066	上乌尔禾组	1.78	114.54	0.60
4	石西161H	5028~5528	风城组	1.50	231.40	21.72
5	石西18	5003~5018	风城组	1.50	32.09	6.06
6	车排24	4606~4708	风城组	1.42	121.14	1.56
7	玛51X	4791~5816	风城组	1.92	79.66	
8	盆北1	6127~6135	石炭系	1.83	27.11	52.13
9	天湾1	8066~8092	清水河组	2.18	105.34	75.82

立足3大油气系统,基于地质条件及近期勘探发现开展综合研判,明确了4个首选重点领域:①石炭系油气系统——富烃凹陷周缘古隆起;②二叠系油气系统——西部拗陷风城组全油气系统(“常非并重、油气并举”);③侏罗系油气系统——盆地南部中一下组合天然气;④侏罗系煤系地层致密气。除以上重点领域外,3套源灶周缘的成熟探区、中—上组合浅层等为可纵向兼顾的勘探领域。

4 重点新领域油气富集规律

4.1 西部拗陷风城组全油气系统

西部拗陷风城组发育淡水—微咸水—碱湖背景下的泥岩、白云质泥岩和泥质白云岩全类型烃源岩,以及砂砾岩—白云质砂岩—白云质泥岩全类型储集层。按照“源-储耦合、有序聚集”的理念分析,油气藏具备全油气系统特征。整体上,受烃源岩成熟度与岩相结构的序次变化控制,风城组在生油窗内形成常规油—致密油—页岩油的序次分布特征,在生气窗内则形成常规气—致密气—页岩气的序次分布特征;在局部构造作用下形成的具备圈闭形态的目标区,还可形成常规油气藏(图9)。此外,整个西部拗陷围绕风城组烃源岩形成的油气系统受通源断裂控制,具有“多层楼”结构特征。宏观上形成2套油气子系统:源内全油气系统子系统和源外传统含油

气系统。钻探实践已证实,由于热演化程度的差异,烃源岩的生、排烃时间不同,油气在空间上呈现露头—浅埋区发育低成熟重质油(含生物降解石油)、中—深层斜坡区发育成熟中质油、深层凹陷区发育高成熟轻质油以及超深层发育过成熟凝析油/天然气^[9]的分布特征,其成藏过程表现为烃源岩生、排烃的全过程与储集层成岩演化的全过程耦合^[18]。目前,源外系统以及源内全油系统均已被证实,全气系统已实现常规气藏与致密气藏的突破;未来,页岩气及高成熟凝析油气是主要勘探攻关领域。

4.2 盆地南部中一下组合天然气

盆地南部中一下侏罗统煤系优质烃源岩的 $R_o > 1.3\%$,面积超过15000 km²,中东段主体进入了生气高峰,具备雄厚的天然气资源基础。下组合发育白垩系清水河组和侏罗系喀拉扎组、头屯河组、西山窑组、三工河组、八道湾组6套碎屑岩储集层,与上覆湖泛泥岩均构成了有利的储盖组合。钻探已证实,在6000~7000 m以深仍发育规模化的有效储层,具备天然气规模成藏的储集条件。从构造演化背景上看,盆地南缘冲断带受多期构造运动影响,具有“东西分段、南北分带、垂向分层”的基本特征,自南向北发育3排构造带,垂向上形成了深、浅3套滑脱层及断裂系统^[38]。基于盆地南缘烃源岩—圈闭的时空耦合关系及勘探成效开

展的分析认为:盆地南缘冲断带具有多期充注、立体成藏的特点;深、浅断裂的发育及组合样式控制了油气的分布特征及富集规律^[39-40]。其中,深部的中生代断裂对于下组合油气的规模输导、成藏具有重要意义。深部断裂向上一一般难以断穿白垩系吐谷鲁群近千米厚的封盖层;而自吐谷鲁群泥岩滑脱层向上发育的浅部断

裂系统则可能对下组合油气进行调整。前期勘探实践也证实,对于深、浅断裂系统相互独立且垂向上不连通或深部断裂系统被遮盖在浅部断裂系统之下的构造组合,其下组合是油气规模成藏富集的有利场所,如天湾 1 井(图 10)。而深、浅断裂系统以高角度断裂相连则会导致深部油气遭到破坏,油气向上运移调整。综合

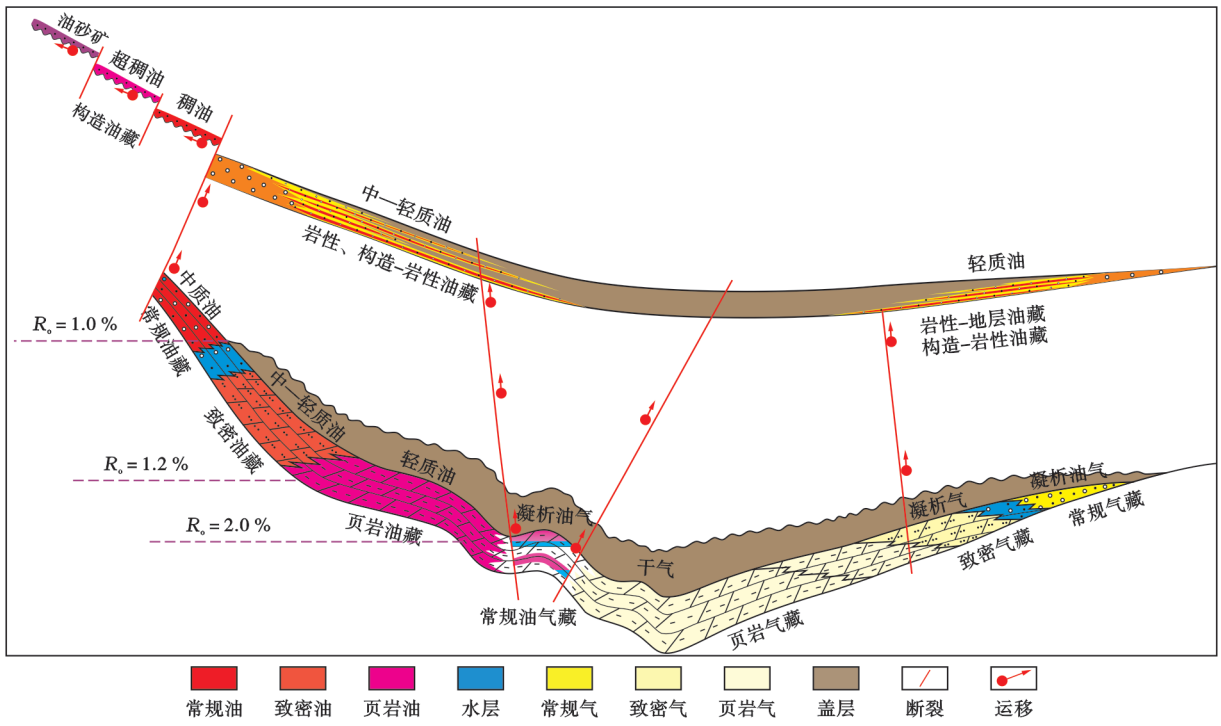
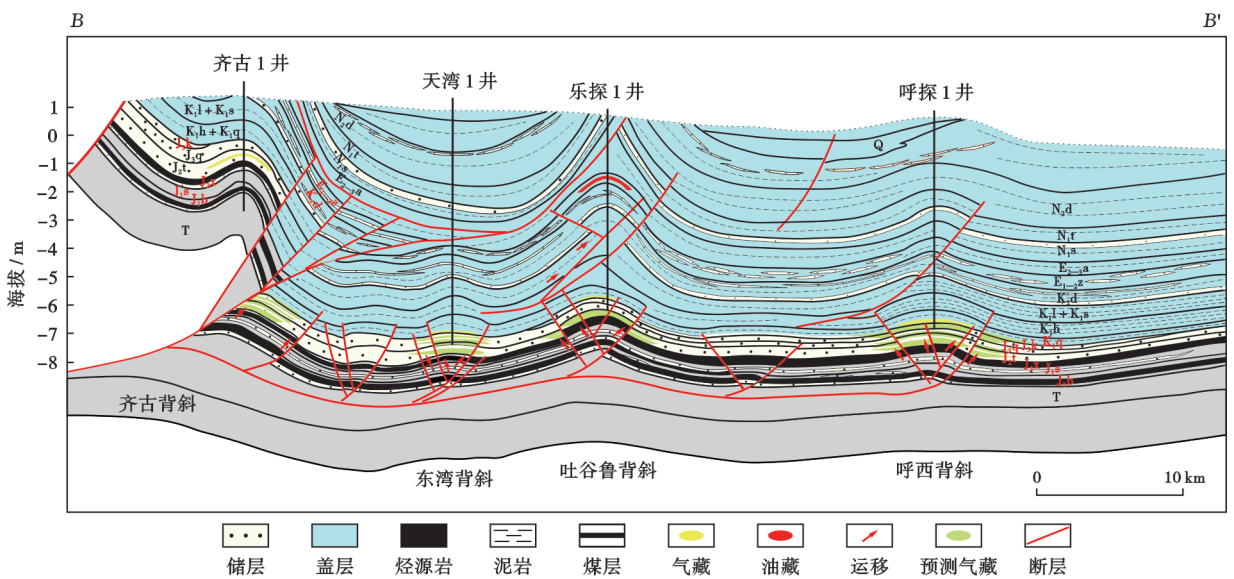


图 9 准噶尔盆地西部坳陷全油气系统成藏模式

Fig. 9 Accumulation model of the whole petroleum system in western depression of Junggar Basin



注:Q—第四系;N₂d—独山子组;N₁t—塔西河组;N₁s—塔沙湾组;E₂₋₃a—安集海河组;E₁₋₂z—紫泥泉子组;K₂d—东沟组;K₁l—连木沁组;K₁s—胜金口组;K₁h—呼图壁河组;K₁q—清水河组;J₃k—喀拉扎组;J₂t—头屯河组;J₂x—西山窑组;J₁s—三工河组;J₁b—八道湾组;T—三叠系。

图 10 准噶尔盆地南部冲断带下组合油气成藏模式(据文献[10],剖面位置见图 1)

Fig. 10 Accumulation model of lower assemblage of thrust belt in southern Junggar Basin

所述,位于规模高成熟源灶之上的隐伏构造带具有充注强度大、保存条件好的优势,是南缘冲断带下组合油气富集的主要场所。

4.3 玛湖凹陷—盆1井西凹陷周缘古隆起

富烃凹陷周缘古隆起的主要勘探目标为石炭系—二叠统火山岩圈闭。优质的火山岩储层是油气藏富集高产的前提。整体而言,该领域具有2类成藏关系,以二叠系为烃源的新生古储和以石炭系为烃源的自生自储/古生新储。前者“围凹近源”,在莫深1井、达探1井以及石西16井等井的研究中已证实成藏的关键是具有良好的源-储空间配置关系^[41],二叠系烃源岩与鼻凸构造带中的石炭系以断裂大跨度对接,油气富集在伸入主生烃槽内的古鼻凸构造中,靠近源区发育

的大供烃窗的构造目标是深层石炭系油气勘探成功的关键。后者一方面受石炭系有效源岩控制,另一方面受火山岩风化壳与内幕储层品质控制。2023年,盆北1井在石炭系获得勘探突破,天然气干燥系数为0.98,甲烷的碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)为 -30.14% ,乙烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -23.05% ,反映石炭系发育腐殖型高成熟—过成熟烃源岩(图11),与克拉美丽地区的石炭系气源一致。受控于钻探程度,对这套源岩的认识程度低,源灶有效性刻画难度大。总体而言,石炭系古隆起因受不同程度的风化淋滤作用以及构造裂缝改造,风化壳储层的物性普遍较好,而钻井失利的原因主要是油气充注程度低、含油饱和度低。因此,围绕圈闭和源岩关系对石炭系古隆起开展研究是下一步勘探的首要任务。

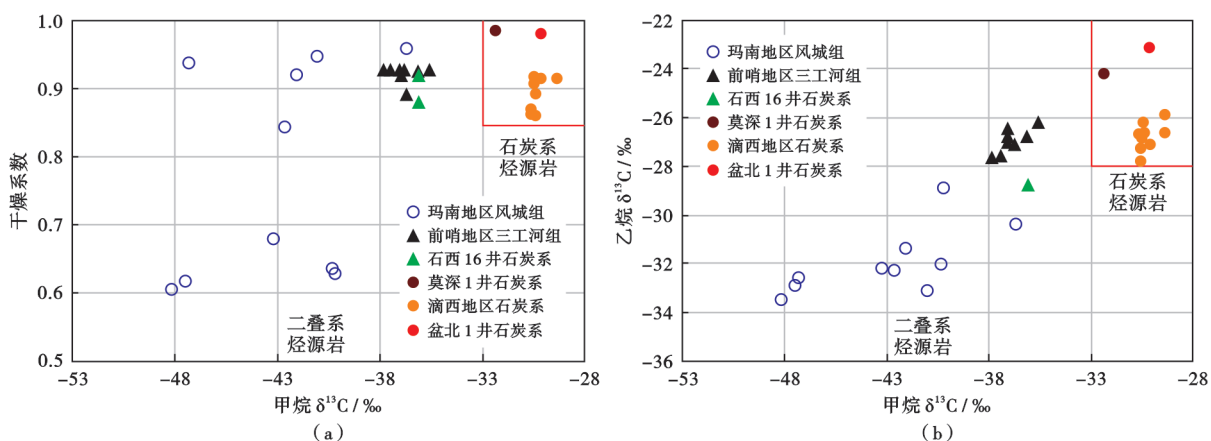


图11 准噶尔盆地玛湖凹陷—盆1井西凹陷油气甲烷、乙烷碳同位素指标

Fig. 11 Carbon isotope indexes of hydrocarbon methane and ethane in Mahu sag and Well Pen1 West sag of Junggar Basin

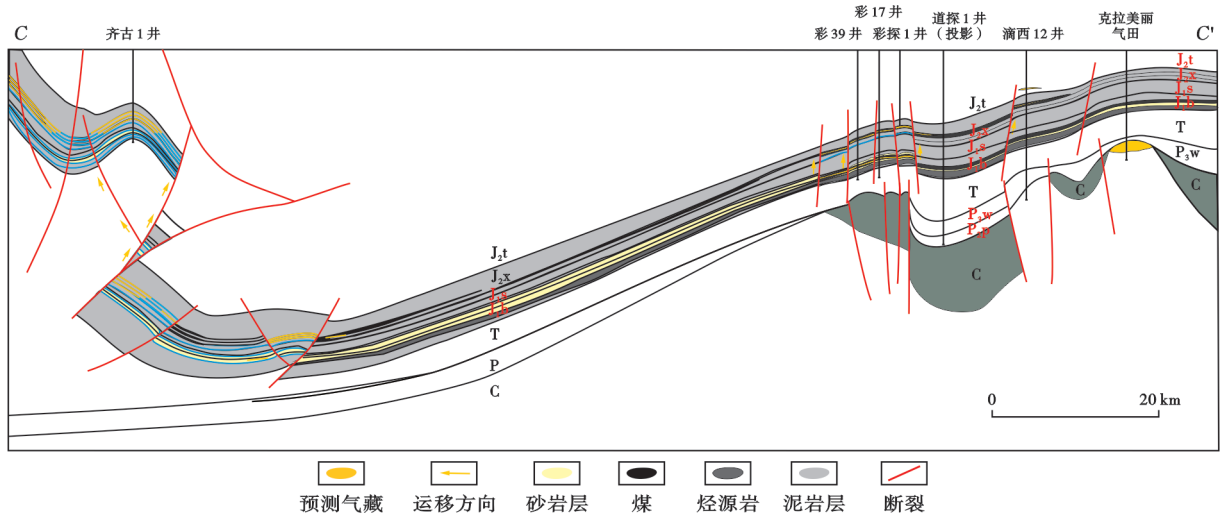
4.4 侏罗系煤层气

准噶尔盆地侏罗系煤层气与中国其他盆地不同,其演化程度较低,除盆地南缘为中—高阶煤外,盆地腹部的煤岩演化程度均较低,为中—低阶煤。从煤层气的碳同位素分布特征来看:盆地腹部煤岩天然气甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -30% ~ -32% ,乙烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -26% ~ -28% ;盆地南缘煤岩天然气甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -32% ~ -35% ,乙烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -22% ~ -25% 。甲烷、乙烷的碳同位素差异表明准噶尔盆地的煤层气存在不同的成因。结合盆地烃源岩及油气研究成果综合分析,建立了准噶尔盆地南缘“自生自储”型和腹部“古生新储”型2种成藏模式(图12、图13):①盆地南缘西山窑组煤层气为侏罗系“自生自储”型气藏,煤层气的富集成藏受“高成熟烃源灶、有效储层、顶底板条件、构造变形程度”控制;②盆地腹部西山窑组煤层气因自身侏罗系煤系烃源岩的热演化程度低,主要为石炭系他源型“古生新储”型气藏,煤层气的富集成藏受“优质储层、顶底板条件、近源断输”控制。因此,圈闭的有效性对煤层气探索至关重要。

5 勘探方向与潜力

5.1 盆地南部中—下组合天然气

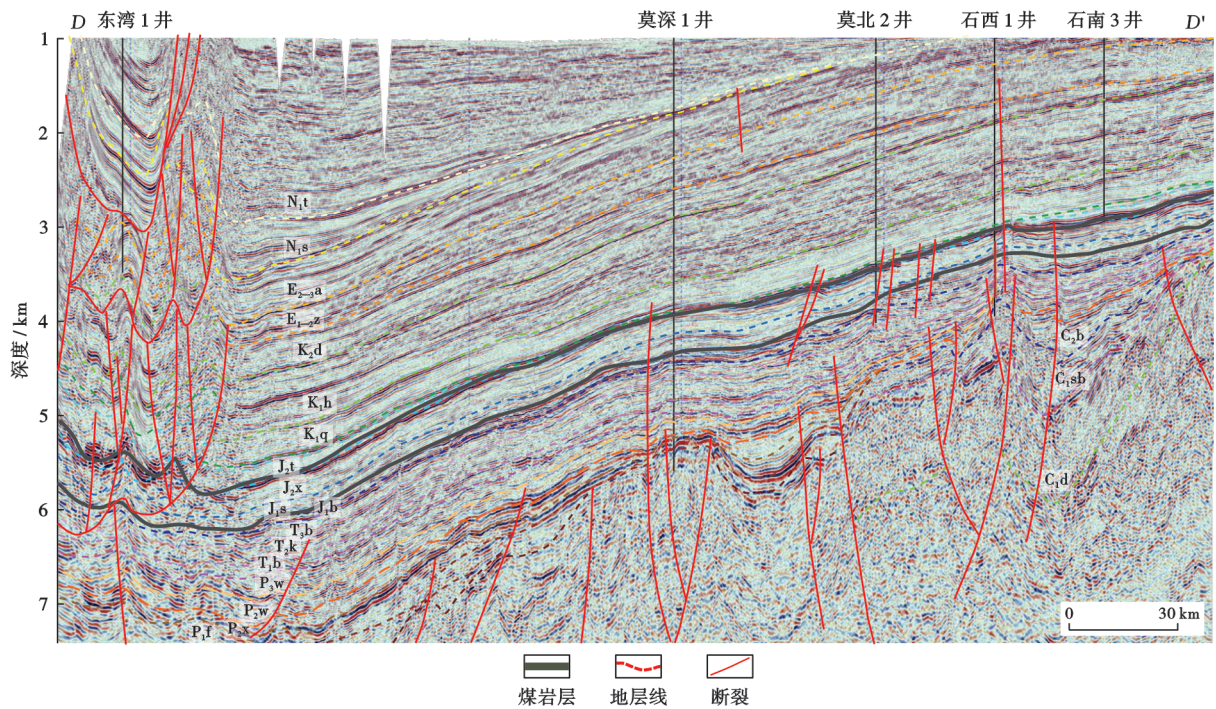
准噶尔盆地南缘冲断带面积为 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,据第4次油气资源评价结果,其石油资源量为 $4.26 \times 10^8 \text{ t}$,天然气资源量为 $9800 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。截至2023年,石油探明率为14%,天然气探明率仅为5%,表明南缘冲断带仍处于油气勘探的初期阶段,总体表现出资源潜力巨大、勘探前景广阔^[7]。从纵向的储-盖组合分布及勘探程度来看,南缘下组合自上而下发育清水河组/喀拉扎组砂岩+白垩系泥岩、头屯河组砂岩+齐古组泥岩、三工河组砂岩+西山窑组泥岩、八道湾组一段砂岩+八道湾组二段泥岩等4套储-盖组合。剖面上,目前盆地南缘钻探的主体目标为最上部的第1套储-盖组合,下伏的3套储-盖组合在山前推覆带及露头区均已证实发育规模储层并有油气显示,是南缘冲断带未来勘探的重要拓展方向。平面上,受喜马拉雅期推覆作用影响,南缘主体发育3排构造带。综合考虑构造



注: J₂t—头屯河组; J₂x—西山窑组; J₁s—三工河组; J₁b—八道湾组; T—三叠系; P—二叠系; P₃w—上乌尔禾组; P₂p—平地泉组; C—石炭系。

图 12 准噶尔盆地侏罗系煤层气及煤系地层的致密气成藏模式(剖面位置见图 1)

Fig. 12 Tight gas accumulation model of Jurassic coalbed methane and coal measures in Junggar Basin



注: N₁t—塔西河组; N₁s—塔沙湾组; E₂₋₃a—安集海河组; E₁₋₂z—紫泥泉子组; K₂d—东沟组; K₁h—呼图壁河组; K₁q—清水河组; J₂t—头屯河组; J₂x—西山窑组; J₁s—三工河组; J₁b—八道湾组; T₃b—白碱滩组; T₂k—克拉玛依组; T₁b—百口泉组; P₃w—上乌尔禾组; P₂w—下乌尔禾组; P₂x—夏子街组; P₁f—风城组; C₂b—巴塔玛依内山组; C₁sb—松喀尔苏组; C₁d—滴水泉组。

图 13 SN 向过准噶尔盆地南缘冲断带—陆梁隆起地震地质剖面(剖面位置见图 1)

Fig. 13 South-north trending seismic-geological section crossing southern margin thrust belt and Luliang uplift in Junggar Basin

变形强度、源-储配置关系等因素认为,第 2 排构造带位于侏罗系源灶的生烃中心,变形强度适中,保存条件好,是南缘中一下组合天然气勘探的有利区。准噶尔盆地南缘除西段为相对独立的四棵树凹陷外,中东段发育呼图壁背斜、东湾背斜、霍玛吐背斜等 7 个大型构造背斜,发育背

斜、断鼻、断块等多类型构造目标,构造规模大且紧密相连;基于三维地震资料落实了构造圈闭 42 个,总面积为 2420 km²,具备广阔的勘探空间(图 5)。除第 2 排主体构造带外,还存在两大勘探方向值得探索。一是第 1 排构造带的掩伏三角带(图 10),发育多套垂向叠合的

源-储组合,逆冲+反冲断裂组合样式的断层封闭性较好,构成了潜在的有效成藏系统;二是北部的莫南前陆斜坡区(图10),该区的侏罗系源岩主体已进入生油生气窗,受燕山期车莫古隆起影响发育多级大型地层超覆剥蚀带,构造变形弱,保存条件好,是未来探索斜坡区规模地层岩性油气藏及致密砂岩气藏的重要勘探方向。

5.2 西部坳陷深部高成熟凝析油气

5.2.1 深部致密(页岩)油气

目前,针对玛湖凹陷风城组的勘探依然围绕现今构造的斜坡区开展工作,其烃源岩处于成熟一中、高成熟热演化阶段。向凹陷区方向,风城组埋深增大,烃源岩进入

高成熟—过成熟热演化阶段,存在规模生气的可能。2023年,风云1井在风一段的白云质粉砂岩与白云质泥页岩段试油,2.0mm油嘴的最高产气量为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。天然气以甲烷为主,甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -44.04% ,乙烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -28.56% ,丙烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -25.07% ,干燥系数大于95%。烃源岩的母质类型偏腐殖型,有机质的 R_o 为1.65%,达到高成熟生气阶段,证实玛湖凹陷风城组深部存在高成熟度的腐殖型烃源岩。据风城组分布、岩性预测和油气地球化学研究推测,埋深更大的盆1井西凹陷、沙湾凹陷的烃源岩成熟度更高,其生气潜力可能更大(图14)。

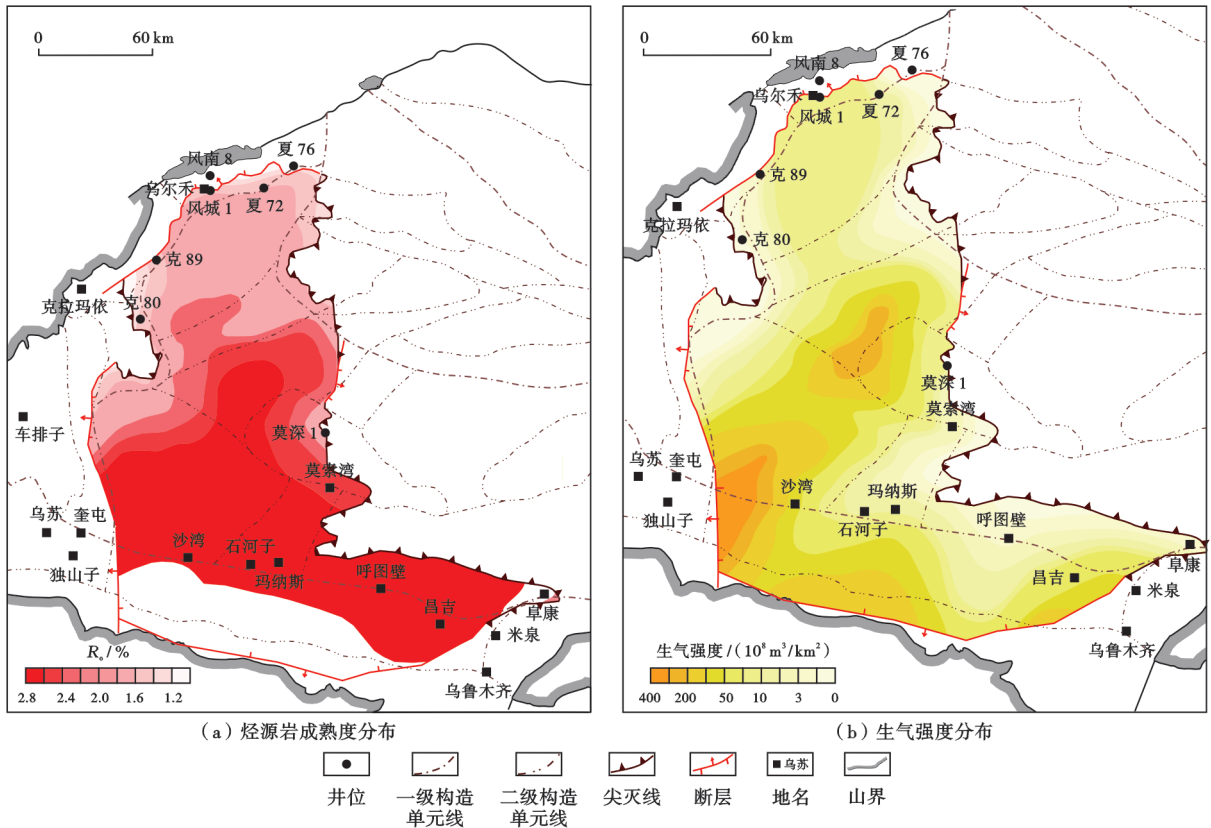


图14 准噶尔盆地西部坳陷风城组成熟度与生气强度

Fig. 14 Maturity and gas generation intensity of Fengcheng Formation in western depression of Junggar Basin

5.2.2 洼中隆起构造型凝析油—天然气新类型

前期勘探证实玛湖凹陷、盆1井西凹陷、沙湾凹陷等富烃凹陷周缘的石炭系古隆起紧邻风城组生烃中心,且可能存在石炭系烃源岩,源-储对接关系好,成藏条件十分优越。基于地震资料精细刻画揭示,3大凹陷内及其周缘存在多个凸起构造,源-储对接关系及储层条件均较有利,叠合圈闭面积为 4933 km^2 ,是凝析油和天然气勘探的重要目标(表2)。

5.2.3 盆1井西凹陷—沙湾凹陷周缘常规—非常规天然气

风城组烃源岩在盆1井西凹陷—沙湾凹陷已达高

成熟—过成熟的生天然气阶段,前期因受钻探程度限制,对其认识程度较低。但据浅层已发现油气的同位素、流体包裹体等证据反映,风城组烃源岩发育有效的高成熟油型气源灶。烃源岩在中三叠世进入生油高峰,在晚侏罗世进入生气阶段,至晚白垩世达到生气高峰,现今整体已进入生凝析油/湿气阶段^[42]。厚度大于150m的烃源岩面积达 $1.55 \times 10^4 \text{ km}^2$,生气强度大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,具备形成大—中型气田的资源潜力^[43]。从构造格局来看,盆1井西凹陷的风城组展布表现为“两凸四洼”,在夏盐地区、石西地区、莫东地区和莫索湾地区发育4大扇体,这为规模储层的发育提

表 2 准噶尔盆地富烃凹陷周缘古隆起圈闭评价要素

Table 2 Evaluation elements of paleo-uplift traps around hydrocarbon-rich sags in Junggar Basin

构造带	鼻凸带	面积/ km ²	源岩层位	储集层			近源及源-储对接方式			
				岩性	厚度/ m	孔隙度/ %	源-储对接 方式	供烃窗口/ m	距离主力 源灶/km	
玛湖凹陷 周缘凸 起带	①玛中背斜带	玛东 1 井 西断背斜	170	风城组、石炭系	火山岩	50~100	5~10	披覆、侧接	800	0
		玛北背斜	380	风城组	火山岩	50~100	5~10	披覆、侧接	900	0
		玛中背斜	530	风城组	火山岩	50~100	5~10	披覆、侧接	900	0
	②盆北背斜带	350	风城组、石炭系	火山岩 碎屑岩	50~100	10~25	侧接、自生自储	400	0	
	③莫索湾鼻凸带	1603	风城组	火山岩	50~150	5~10	侧接	600	10~30	
盆 1 井 西凹陷周 缘凸起带	④夏盐鼻凸带	450	风城组	火山岩	10~30	4~8	侧接	150	3	
	⑤达巴松鼻凸带	650	风城组	火山岩	50~100	5~10	侧接	800	8	
	⑥石西鼻凸带	340	下乌尔禾组、风城组	火山岩	20~80	5~14	侧接	800	7	
	⑦莫北鼻凸带	460	下乌尔禾组、风城组	火山岩			侧接	1700	6	

供了有利条件。风一段至风城组三段(风三段)的沉积整体为退积型旋回,伴着湖平面上升,砂体逐层超覆;受岸线控制,按照由浅至深的原则,斜坡区前缘带发育波浪改造型高孔砂岩,是天然气聚集的重要场所。风一段的有利储层面积为 1816 km²,风城组二段(风二段)的有利储层面积为 1333 km²,风三段的有利储层面积为 2764 km²,叠合面积超过 3000 km²。2023 年实施的湾探 1 井实现了致密气的重大勘探突破,进一步证实凹陷区天然气勘探的资源潜力巨大。

5.3 侏罗系煤层气

煤层气作为一种新的天然气类型,是对常规天然气供应的有力补充。根据煤层的厚度、含气量、烃源岩等指标,准噶尔盆地深部煤层气按照“自生自储”和“古生新储”2 种类型的控藏要素分别开展评价,并针对 2 种煤层气成藏类型优选出滴南—白家海地区和南缘齐古地区两大有利目标区(图 15),落实煤层气资源规模为 13490×10⁸ m³。

自生自储型煤层气分布受侏罗系高成熟气源灶控制,主要分布在准噶尔盆地南缘。盆地南缘的断褶带自西向东划分为托斯台背斜、南安集海向斜、清水河断

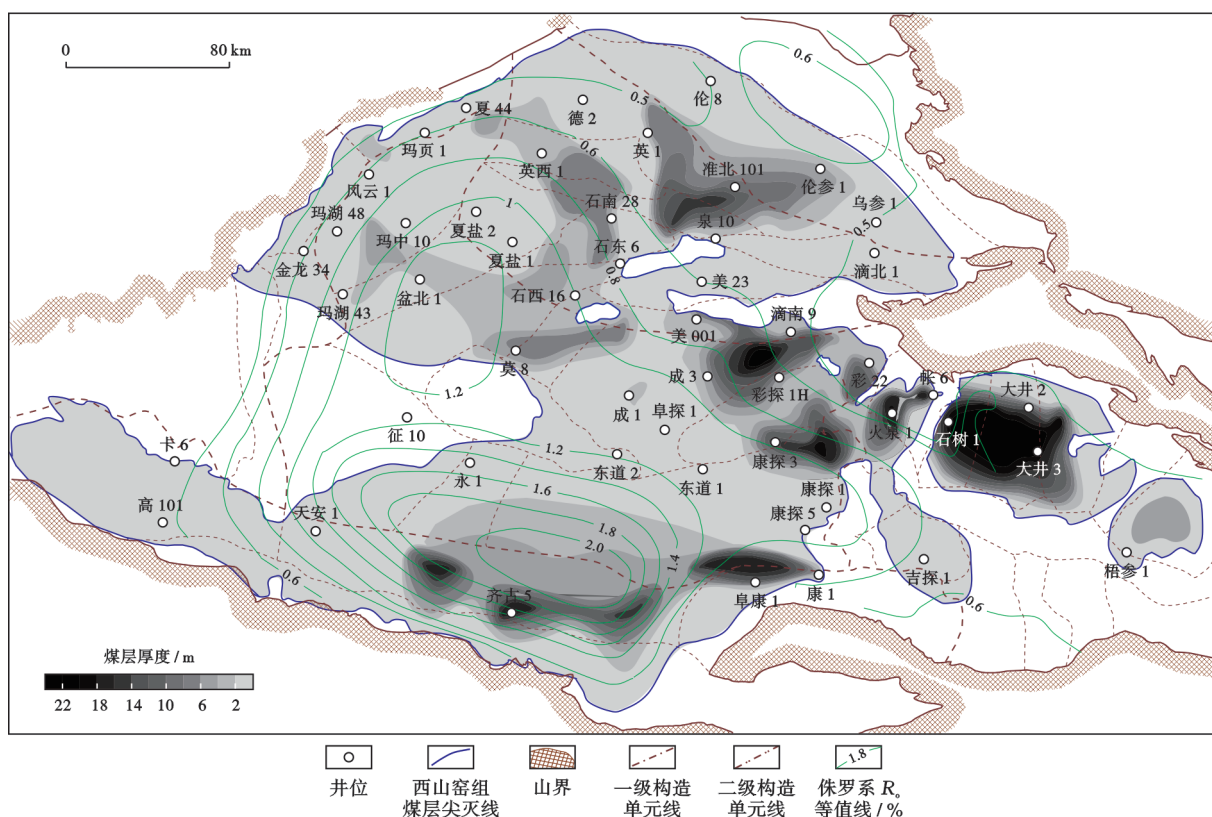


图 15 准噶尔盆地侏罗系煤层气综合评价

Fig. 15 Comprehensive evaluation of Jurassic coalbed methane in Junggar Basin

鼻构造、齐古背斜带 4 大构造区,有利勘探面积为 2 236 km²。齐古背斜带构造完整,存在正向构造背景且保存条件好,为 I 类区,有利区面积为 566 km²,资源量为 4 040 × 10⁸ m³;托斯台—南安地区煤层埋深相对较浅,是浅部煤层气的重点勘探领域,有利区面积为 530 km²,资源量为 1 580 × 10⁸ m³。

古生新储型煤层气的分布受石炭系高成熟气源灶控制,主要分布在盆地腹部的滴南—白家海地区,按照目标类型可细分为背斜型、地层型和岩性型 3 种类型。其中,背斜型目标的构造位置有利,成藏条件好,为 I 类区,有利区面积为 450 km²,资源量为 1 050 × 10⁸ m³;西山窑组和八道湾组 2 套煤层为地层型和岩性型目标,有利区面积为 3 860 km²,资源量为 6 820 × 10⁸ m³。

6 结论

(1) 准噶尔盆地油气资源丰富,发育石炭系、二叠系和侏罗系 3 套主力烃源岩,储集层岩性包括火山岩、砾岩、砂岩及碳酸盐岩型混积岩等。盆地发育 3 套区域性泥岩盖层,与储层呈纵向叠置,形成“三层楼”结构,构成了 3 大油气系统,在每一个生烃凹陷内同一套源岩具有常规—非常规有序成藏的全油气系统特征。

(2) 围绕 3 大油气系统,按照全油气系统理念勘探,取得了 4 项重大突破。准噶尔盆地南缘冲断带下组合天然气勘探获高产工业气流,开辟了侏罗系厚层规模气藏勘探新层系;盆地西部,玛湖凹陷风城组全油气系统发现 10 亿吨级非常规新油区,盆 1 井西凹陷和沙湾凹陷多口探井获得勘探新突破,展现出“南油北气”的特征;盆地腹部有多口井在西山窑组背斜型煤层目标区相继获气;围绕富烃凹陷周缘古隆起,石炭系勘探获工业油气流。

(3) 西部坳陷围绕风城组烃源岩形成的油气系统具有“多层楼”的结构特征,宏观上形成了源内全油气系统子系统和源外传统含油气系统。盆地南部中—下侏罗统的煤系优质烃源岩的热演化程度高,具备天然气勘探的资源基础,受多期构造运动影响,具有“东西分段、南北分带、垂向分层”的基本特征。

(4) 准噶尔盆地南缘冲断带的地层岩性油气藏及致密砂岩气藏是未来勘探方向。西部坳陷风城组的资源潜力大,向凹陷区方向烃源岩成熟度高,坳陷区内、周缘凸起带及斜坡区是凝析油和天然气勘探的重要目标。准噶尔盆地的深部煤层气发育“自生自储”和“古生新储”2 种类型,主要分布在滴南—白家海地区和南缘齐古地区两大有利目标区,资源规模达 13 490 × 10⁸ m³。

参 考 文 献

- [1] 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.
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.
- [2] 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.
- [3] 汪时成,周庆凡. 含油气系统概念的由来及内涵[J]. 石油与天然气地质,2000,21(3):279-282.
WANG Shicheng, ZHOU Qingfan. Origin and intension of concept in petroleum system[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(3): 279-282.
- [4] 赵文智,何登发,范士芝. 含油气系统术语、研究流程与核心内容之我见[J]. 石油勘探与开发,2002,29(2):1-7.
ZHAO Wenzhi, HE Dengfa, FAN Tuzhi. The study on terminology, technological process and kernel content for petroleum system[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 1-7.
- [5] 赵文智,何登发,池英柳,等. 中国复合含油气系统的基本特征与勘探技术[J]. 石油学报,2001,22(1):6-13.
ZHAO Wenzhi, HE Dengfa, CHI Yingliu, et al. Major characteristics and exploration technology of multi-source petroleum systems in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(1): 6-13.
- [6] DOW W G. Application of oil-correlation and source-rock data to exploration in Williston Basin[J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(7): 1253-1262.
- [7] 庞志超,冀冬生,刘敏,等. 准噶尔盆地南缘冲断带侏罗系—白垩系油气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报,2023,44(8):1258-1273.
PANG Zhichao, JI Dongsheng, LIU Min, et al. Jurassic-Cretaceous oil-gas accumulation conditions and exploration potential in the thrust belt at the southern margin of Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(8): 1258-1273.
- [8] 赵进雍,唐雪颖,丁玉才,等. 准噶尔盆地南缘中西段油气成藏研究进展及下组合勘探方向[J]. 科技通报,2023,39(5):7-16.
ZHAO Jinyong, TANG Xueying, DING Yucai, et al. Research advances in pool formation and exploration in the lower play, southern margin of Jungaar Basin[J]. Bulletin of Science and Technology, 2023, 39(5): 7-16.
- [9] 支东明,唐勇,何文军,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组常规-非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式[J]. 石油勘探与开发,2021,48(1):38-51.
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.
- [10] 王江涛,刘龙松,江梦雅,等. 准噶尔盆地盆 1 井西凹陷及周缘二叠系风城组油气地质特征与勘探潜力[J]. 天然气地球科学,2023,34(5):794-806.

- WANG Jiangtao, LIU Longsong, JIANG Mengya, et al. Oil and gas geological characteristics and exploration potential of Permian Fengcheng Formation in western Well Pen-1 sag and its surrounding areas in Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(5): 794-806.
- [11] 阿布力米提·依明. 准噶尔盆地中央坳陷西部深层油气成因与成藏机理[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
YIMING A. Generation and accumulation of deep-seated oil and gas in the western central depression of Junggar Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2021.
- [12] 郭绪杰, 支东明, 毛新军, 等. 准噶尔盆地煤层气的勘探发现及意义[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(6): 38-49.
GUO Xujie, ZHI Dongming, MAO Xinjun, et al. Discovery and significance of coal measure gas in Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(6): 38-49.
- [13] 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.
- [14] 胡朝元. 生油区控制油气田分布——中国东部陆相盆地进行区域勘探的有效理论[J]. *石油学报*, 1982, 3(2): 9-13.
HU Chaoyuan. Source bed controls hydrocarbon habitat in continental basins, East China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1982, 3(2): 9-13.
- [15] MAGOON L B. The petroleum system—a classification scheme for research, exploration and resource assessment[M]//MAGOON L B. *Petroleum systems of the United States*. Washington: U. S. Geological Survey Bulletin, 1988; 2-15.
- [16] MAGOON L B, DOW W G. The petroleum system[M]//MAGOON L B, DOW W G. *The petroleum system—from source to trap*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1994; 3-24.
- [17] 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 geology theory[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 1-11.
- [18] 何文军, 宋永, 汤诗棋, 等. 玛湖凹陷二叠系风城组全油气系统成藏机理[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(6): 663-673.
HE Wenjun, SONG Yong, TANG Shiqi, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism of total petroleum system in Permian Fengcheng Formation, Mahu sag[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(6): 663-673.
- [19] 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, YIMING A, et al. Accumulation conditions of deep hydrocarbon and exploration potential analysis in Junggar Basin, NW China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(1): 189-201.
- [20] 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[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
WANG Xulong, ZHI Dongming, WANG Yutao, et al. *Source rocks and oil-gas geochemistry in Junggar Basin*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [21] 曹剑, 雷德文, 李玉文, 等. 古老碱湖优质烃源岩: 准噶尔盆地二叠统风城组[J]. *石油学报*, 2015, 36(7): 781-790.
CAO Jian, LEI Dewen, LI Yuwen, et al. Ancient high-quality alkaline lacustrine source rocks discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(7): 781-790.
- [22] 支东明, 宋永, 何文军, 等. 准噶尔盆地中—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 shale oil in Middle-Lower Permian, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(4): 389-401.
- [23] 陈建平, 王绪龙, 邓春萍, 等. 准噶尔盆地烃源岩与原油地球化学特征[J]. *地质学报*, 2016, 90(1): 37-67.
CHEN Jianping, WANG Xulong, DENG Chunping, et al. Geochemical features of source rocks and crude oil in the Junggar Basin, northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(1): 37-67.
- [24] 王江涛, 杨森, 邹阳, 等. 玛北地区二叠系风城组一段优质储层特征、成因及分布[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(3): 99-109.
WANG Jiangtao, YANG Sen, ZOU Yang, et al. Characteristics, genesis and distribution of high-quality reservoir of the first Member of the Permian Fengcheng Formation in Mabei area, Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(3): 99-109.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 唐勇, 何文军, 姜懿洋, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相页岩油富集条件与勘探方向[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 125-143.
TANG Yong, HE Wenjun, JIANG Yiyang, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Permian saline lacustrine shale oil and gas in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 125-143.
- [28] 唐勇, 宋永, 郭旭光, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷源上致密砾岩富集的主控因素[J]. *石油学报*, 2022, 43(2): 192-206.
TANG Yong, SONG Yong, GUO Xuguang, et al. Main controlling factors of tight conglomerate oil enrichment above source kitchen in Mahu sag, Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(2): 192-206.
- [29] 邹阳, 韦盼云, 曹元婷, 等. 碱湖型页岩油“甜点”分类与主控因素——以准噶尔盆地风城组为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(3): 458-470.
ZOU Yang, WEI Panyun, CAO Yuanting, et al. Classification and main controlling factors of sweet spots of alkaline lake type shale

- oil: a case study of Fengcheng Formation in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(3): 458-470.
- [30] 何海清, 唐勇, 邹志文, 等. 准噶尔盆地中央坳陷西部风城组岩相古地理及油气勘探[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(6): 192-206.
HE Haiqing, TANG Yong, ZOU Zhiwen, et al. Lithofacies paleogeography and petroleum exploration of Fengcheng Formation in western central depression of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(6): 192-206.
- [31] 董雪梅, 李静, 潘拓, 等. 准噶尔盆地红车断裂带油气成藏条件及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(5): 748-764.
DONG Xuemei, LI Jing, PAN Tuo, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of Hongche fault zone in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(5): 748-764.
- [32] 支东明, 薛冽, 王屿涛, 等. 准噶尔盆地煤层气资源及勘探潜力[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
ZHI Dongming, XUE Lie, WANG Yutao, et al. Coalbed methane resources and exploration potential in Junggar Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [33] 唐勇, 王彦君, 郭娟娟, 等. 准噶尔盆地夏盐凸起多层系油气富集条件及勘探前景[J]. *石油学报*, 2023, 44(4): 583-597.
TANG Yong, WANG Yanjun, GUO Juanjuan, et al. Enrichment conditions and exploration prospects of oil and gas in multi-layer system in Xiayan uplift, Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(4): 583-597.
- [34] 孙靖, 齐洪岩, 薛晶晶, 等. 准噶尔盆地深层—超深层致密砾岩储层特征及控制因素[J]. *天然气工业*, 2023, 43(8): 26-37.
SUN Jing, QI Hongyan, XUE Jingjing, et al. Characteristics and controlling factors of deep and ultra deep tight conglomerate reservoirs in the Junggar Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(8): 26-37.
- [35] 孙靖, 尤新才, 薛晶晶, 等. 准噶尔盆地异常压力特征及其对深层—超深层致密储层的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 350-365.
SUN Jing, YOU Xincan, XUE Jingjing, et al. Characteristics of abnormal pressure and its influence on deep and ultra-deep tight reservoirs in the Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 350-365.
- [36] 唐勇, 吕正祥, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组白云质岩储集层白云石成因[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(1): 38-50.
TANG Yong, LYU Zhengxiang, HE Wenjun, et al. Origin of dolomites in the Permian dolomitic reservoirs of Fengcheng Formation in Mahu sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(1): 38-50.
- [37] TANG Yong, CAO Jian, HE Wenjun, et al. Discovery of shale oil in alkaline lacustrine basins: The Late Paleozoic Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin, China[J]. *Petroleum Science*, 2021, 18(5): 1281-1293.
- [38] 郭文建, 姜颜良, 卞保力, 等. 准噶尔盆地南缘中段山前复杂构造变形特征及形成演化[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 62-74.
GUO Wenjian, JIANG Yanliang, BIAN Baoli, et al. Complex tectonic deformation characteristics, formation and evolution of the mountain front in the middle part of the southern margin of Junggar Basin[J]. *North Western Geology*, 2023, 56(4): 62-74.
- [39] 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]. *地质前缘*, 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.
- [40] 吴林, 朱明, 冯兴强, 等. 准噶尔盆地四棵树凹陷构造应力场与构造变形解析[J]. *石油学报*, 2022, 43(4): 494-506.
WU Lin, ZHU Ming, FENG Xingqiang, et al. Interpretation on tectonic stress and deformation of Sikeshu sag in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(4): 494-506.
- [41] 江梦雅, 王江涛, 刘龙松, 等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷石炭系—二叠系天然气特征及成藏主控因素[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(3): 138-151.
JIANG Mengya, WANG Jiangtao, LIU Longsong, et al. Characteristics and main controlling factors of natural gas of Carboniferous-Permian in western Well Pen-1 sag, Junggar Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(3): 138-151.
- [42] 龚德瑜, 刘海磊, 杨海波, 等. 准噶尔盆地风城组烃源岩生气潜力与天然气勘探领域[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(6): 674-683.
GONG Deyu, LIU Hailei, YANG Haibo, et al. Gas generation potential of Fengcheng Formation source rocks and exploration fields in Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(6): 674-683.
- [43] 戴金星. 中国从贫气国正迈向产气大国[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(1): 1-5.
DAI Jinxing. Chinese great advance: from a gas-shortage country to a giant gas-producer[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(1): 1-5.

(收稿日期 2023-10-07 改回日期 2023-12-20 编辑 雷永良)