

引用: 刘国勇, 宋永, 毛新军, 等. 准噶尔盆地高效勘探主要策略与方向 [J]. 中国石油勘探, 2024,29(1):47-64.

Liu Guoyong, Song Yong, Mao Xinjun, et al. Main strategies and orientations for high-efficiency exploration in Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2024,29(1): 47-64.

准噶尔盆地高效勘探主要策略与方向

刘国勇¹ 宋永² 毛新军² 唐勇² 郭旭光² 卫延召³ 龚德瑜³

(1 中国石油青海油田公司; 2 中国石油新疆油田公司; 3 中国石油勘探开发研究院)

摘要: 准噶尔盆地进入富烃凹陷勘探新阶段, 面临勘探目标越来越深、越来越散、越来越隐蔽, 储层孔渗条件越来越差, 已发现储量升级率低、储量动用率低等新挑战, 如何提高勘探成效、实现油田效益发展是迫切需要回答的问题。通过新一轮盆地整体研究和再认识, 认为准噶尔盆地多层系烃源灶空间分布具有互补性, “既富油, 也多气”, 突破了盆地“油多气少”传统认识; 富烃凹陷发育4类规模有效储集体, 空间分布侧向有序、纵向叠置; 存在源内常规—非常规有序聚集、源上退覆式扇三角洲砂砾岩大面积成藏、中浅层断—砂耦合立体成藏3种成藏体系。文章结合准噶尔盆地资源特点、地质新认识、勘探开发技术适应性及可持续效益发展目标等, 提出“油气并举、常非并重、深浅兼顾、多域增储”高效勘探策略, 指出三大勘探方向及九大勘探领域, 有望助力油田实现效益可持续发展。

关键词: 准噶尔盆地; 富烃凹陷; 天然气资源; 断—砂耦合; 高效勘探; 勘探方向

中图分类号: TE112

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2024.01.004

Main strategies and orientations for high-efficiency exploration in Junggar Basin

Liu Guoyong¹, Song Yong², Mao Xinjun², Tang Yong², Guo Xuguang², Wei Yanzhao³, Gong Deyu³

(1 PetroChina Qinghai Oilfield Company; 2 PetroChina Xinjiang Oilfield Company; 3 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development)

Abstract: The petroleum exploration in Junggar Basin has entered a new stage of exploration in hydrocarbon rich sags, which faces new challenges such as increasing burial depth, more scattered and subtle exploration targets, poorer reservoir porosity and permeability, and low upgrade rate and recovery rate of reserves. It is an urgent task to improve exploration effectiveness and achieve benefit development of oil fields. The new round of integrated research and re-understanding of the basin indicates that the spatial distribution of multiple source kitchens in Junggar Basin are complementary, showing “abundant oil and rich gas”, which has broken through the traditional understanding of “abundant oil but less gas” in the basin; There are four types of large-scale effective reservoirs in hydrocarbon rich sags, with orderly distribution in lateral and superposition in vertical direction; Three types of hydrocarbon accumulation systems are identified, such as orderly accumulation of conventional and unconventional oil and gas in source rock, large-scale hydrocarbon accumulation in regressive fan delta facies glutenites above source rock, and stereoscopic hydrocarbon accumulation in medium-shallow fault-sand coupling reservoirs. In combination with the resource characteristics, new geological knowledge, adaptability of exploration and development technologies, and goal of sustainable and benefit development in Junggar Basin, strategies for high-efficiency exploration are proposed, including “simultaneous exploration of oil and gas, emphasis on both conventional and unconventional oil and gas, co-exploration of deep and shallow oil and gas, and reserve increase in multiple fields”, and three major exploration orientations and nine major exploration fields are put forward, so as to support the benefit and sustainable development of the oilfield.

Key words: Junggar Basin, hydrocarbon rich sag, natural gas resources, fault-sand coupling, high-efficiency exploration, exploration orientation

基金项目: 中国石油重点科技攻关项目“岩性地层油气藏成藏规律与关键技术研究”(2021DJ04), “岩性油气藏群富集规律及有利区带评价技术研究”(2021DJ0404)。

第一作者简介: 刘国勇(1978—), 男, 湖北荆州人, 博士, 2007年毕业于中国石油大学(北京), 教授级高级工程师, 主要从事油气田地质勘探综合研究与管理工作。地址: 甘肃省敦煌市七里镇中国石油青海油田公司, 邮政编码: 736202。E-mail: liuguoyong@petrochina.com.cn

通信作者简介: 卫延召(1972—), 男, 河南洛阳人, 博士, 2001年毕业于中国石油勘探开发研究院, 高级工程师, 现从事油气地质及油气勘探综合研究工作。地址: 北京市海淀区910信箱石油地质研究所, 邮政编码: 100083。E-mail: weiyanzhao@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-06-20; 修改日期: 2024-01-05

0 引言

准噶尔盆地油气勘探历经百余年,2010年之前主要集中于源外和源边正向构造单元勘探,在西北缘断阶带、东部隆起带、腹部古凸起三大正向构造油气聚集带建成三大油气生产基地,支撑了准噶尔盆地千万吨油田建设。随着富烃凹陷周缘正向构造单元油气勘探程度日益增高,老区增储稳产压力巨大,“跳出凸起带、走向凹陷区”是实现盆地勘探增储上产和可持续发展的必然选择。

2010年以来,围绕玛湖、吉木萨尔两大二叠系富烃凹陷下组合勘探,先后发现了玛湖凹陷百口泉组砾岩大油区,吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油、玛湖南部上二叠统上乌尔禾组地层型大油区,成为准噶尔盆地近年储量增长的主体。

准噶尔盆地凹陷区下组合勘探具有近源优势,已发现储量规模大,但也面临埋深大、勘探对象隐蔽、储层非均质性强、储量劣质化等客观现实。据统计,2019—2021年盆地探明储量埋藏深度普遍处于3770~4200m,储层孔隙度为7.5%~9.7%、渗透率为0.04~0.46mD,属特低孔超低渗储层,非常规油藏为主。埋深大、储层复杂、钻井周期长、投资成本高,是深层非常规油气资源的客观地质条件。2019—2021年提交石油预测储量 8.49×10^8 t、石油控制储量 5.29×10^8 t,储量升级率分别为18%和0,新增石油探明储量 5.09×10^8 t,整体动用率仅为23%,新增储量升级率、动用率“双低”,严重制约了油田效益发展。

造成准噶尔盆地目前储采失衡主要有3方面原因,一是对盆地资源结构认识不足,盆地“富油少气”的传统认识造成盆地天然气勘探开发长期处于较低水平,在低油价背景下依靠天然气提高油田综合效益处于劣势;二是针对凹陷区下组合非常规油气资源勘探部署过于集中,造成新增三级石油储量主要为非常规油气,储量规模有余、优质高效储量不足,储量升级和动用难度大、成本高;三是盆地整体研究和地质认识迭代偏慢,造成多元化勘探领域和区带目标准备不足。

本文在充分利用富烃凹陷新探井、大面积新三维地震勘探等资料的基础上,对盆地构造、烃源岩、沉积储层、油气成藏等开展了新一轮整体研究和再认识,对盆地的地质特征、油气资源结构等取得了一些新认识,结合地质新认识及油田公司效益可持

续发展需求,提出了准噶尔盆地“油气并举、常非并重、深浅兼顾、多域增储”高效勘探新策略,梳理出盆地未来三大勘探方向、九大勘探领域,以期助力油田实现效益可持续发展。

1 地质概况

准噶尔盆地位于新疆维吾尔自治区北部,为大型叠合含油气盆地,盆地主要经历了晚海西期、印支期、燕山期3幕、喜马拉雅期等多期构造运动叠加改造,主要参考海西期隆坳格局,可划分为6个一级构造单元、44个二级构造单元,其中包括玛湖凹陷、盆1井西凹陷、沙湾凹陷、东道海子凹陷、阜康凹陷、吉木萨尔凹陷等多个富烃凹陷(图1)。自晚泥盆世开始该盆地分区依次进入洋壳闭合、陆陆碰撞的洋陆转换阶段,大约从晚石炭世开始盆地主体进入多旋回陆相湖盆演化阶段,经历了晚石炭世—中二叠世前陆盆地、晚二叠世—早—中侏罗世陆内拗陷盆地、晚侏罗世陆内前陆盆地、白垩纪—古近纪陆内拗陷盆地及新近纪—第四纪陆内前陆盆地五大成盆演化阶段,具有3期前陆盆地、2期拗陷盆地的演化特点。

准噶尔盆地内发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系及新近系,二叠系风城组、芦草沟组为主力油源岩,石炭系滴水泉组、松喀尔苏组B段及中—下侏罗统煤系地层是主力气源岩,白垩系和古近系烃源岩主要分布于盆地南缘西部,为局部油源岩。

从石炭系到新近系发育四大类储集体,一是石炭系—下二叠统发育的火山岩储集体;二是中—下二叠统咸湖背景下发育的云质砂岩、云质泥页岩等细粒储集体;三是二叠系—三叠系陡坡背景下发育的冲积扇—扇三角洲砾岩、砂砾岩储集体;四是侏罗系—古近系缓坡背景下发育的河流—三角洲砂岩储集体(图2)。

盆地主体区(中央拗陷、陆梁隆起)纵向上发育3套主力储盖组合,下组合以上二叠统上乌尔禾组三段褐色、灰褐色泥岩为盖层,石炭系—中—上二叠统火山岩、白云质岩、砂砾岩为储层,主要发育火山岩风化壳油气藏、砂砾岩油藏、白云质砂岩致密油藏及页岩油;中组合以三叠系白碱滩组深灰色泥岩为区域盖层,以三叠系百口泉组、克拉玛依组砂砾岩为主要储层,主要发育大面积砂砾岩岩性油藏;上组合以白垩系吐谷鲁群深灰色、灰绿色泥岩为区域盖层,以侏罗系—白垩系砂岩、砂砾岩为主要储层,主要发育远源次生油气藏(图2)。

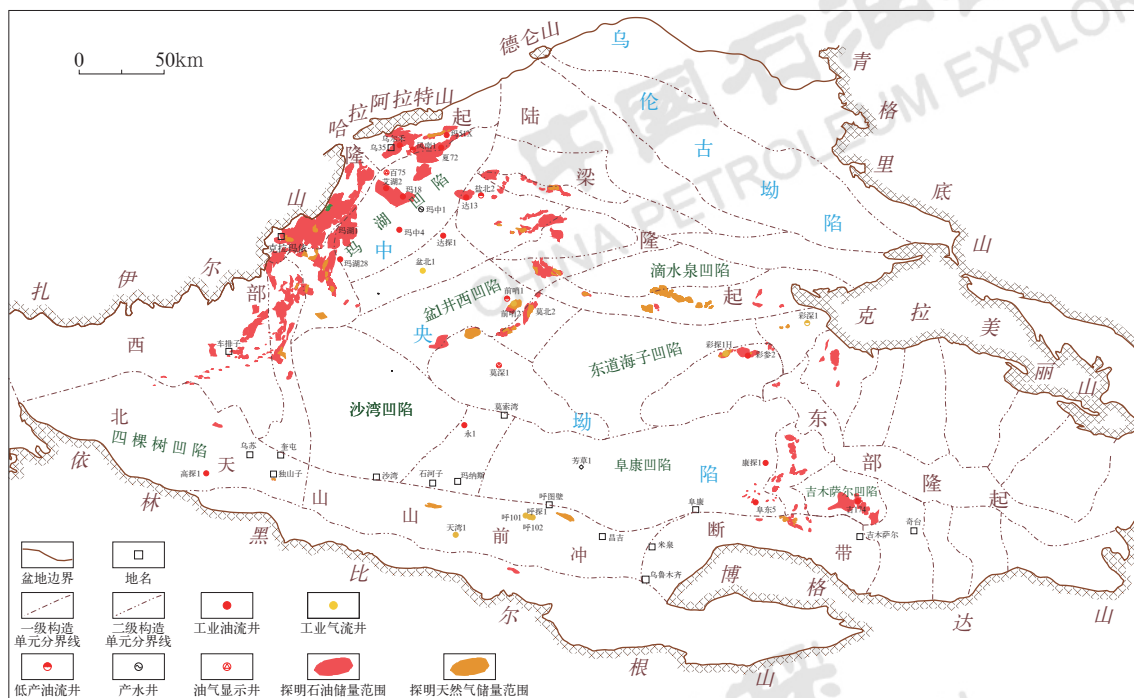


图1 准噶尔盆地构造单元划分及勘探成果图

Fig.1 Division of structural unit and exploration achievements in Junggar Basin

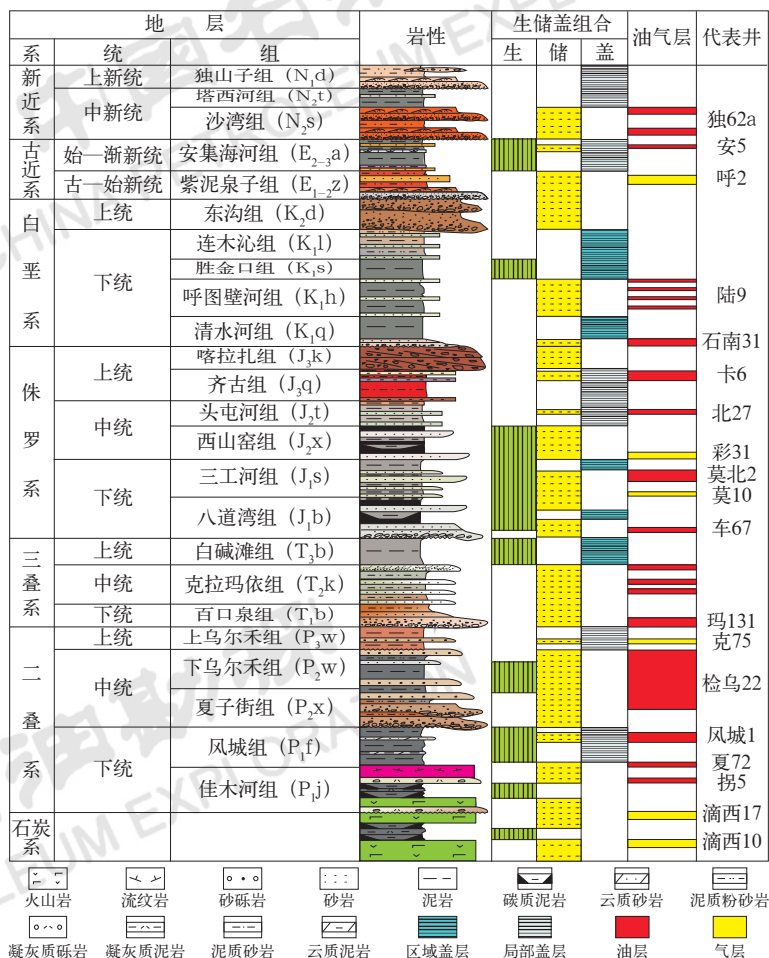


图2 准噶尔盆地地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of Junggar Basin

北天山山前冲断带以中新世为主要目的层,发育背斜型油气藏,纵向上划分为上、中、下3套储盖组合,下组合以吐谷鲁群泥岩为区域盖层,中—上侏罗统砂岩、砂砾岩为储层;中组合以古近系安集海河组泥岩为盖层,上白垩统东沟组、古近系紫泥泉子组和安集海河组砂岩为储层;上组合以中新统塔西河组为盖层,沙湾组为储层(图2)。

准噶尔盆地经历百余年油气勘探,在石炭系至新近系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,累计探明石油储量 $33 \times 10^8 \text{t}$ (常规)、天然气储量 $1935 \times 10^8 \text{m}^3$,呈现油多气少的特点,纵向上多层系复式油气聚集,平面上油气藏复合叠加连片^[1]。

2 叠合盆地多层系烃源灶富油多气,空间分布具有互补性

准噶尔盆地发育泥盆系—石炭系、二叠系、侏罗系3套主力烃源岩层系及三叠系、白垩系、古近系3套次要烃源岩层系,奠定了准噶尔盆地丰富的油气资源基础^[2]。

2.1 中—下二叠统发育2套优质油源岩,石油资源基础雄厚

准噶尔盆地发育下二叠统风城组、中二叠统芦草沟组两套咸湖背景下的优质烃源岩,前者主要分布在中央拗陷西部地区,后者主要分布在盆地东南地区,分别控制西部、东部两大富油气区。

风城组发育淡水—微咸水—碱湖背景下的泥岩、云质泥岩和泥质白云岩全类型烃源岩,是迄今为止全球发现的最古老的碱湖优质烃源岩^[3-4],总有机碳含量普遍大于0.6%、生烃潜量(S_1+S_2)多大于 6.0mg/g ,以I—II₁型为主^[2,5],是一套倾油型烃源岩,整体达到好—极好烃源岩级别。玛湖凹陷风城组烃源岩总体处于中成熟—成熟演化阶段。风城组烃源岩生烃模拟在生油高峰期产烃率可以达到 800mg/g ,是常见湖相烃源岩的两倍,生烃潜力巨大^[3,6]。玛湖凹陷是准噶尔盆地已经勘探证实的最富生烃凹陷,钻井及油气源对比也已证实其油气主要来源于以生油为主的下二叠统风城组^[6-7]。

中二叠统芦草沟组主要分布在盆地东南部吉木萨尔凹陷、阜康凹陷及南部博格达山前带。芦草沟组为近海咸化湖盆混积岩沉积,间歇性的海水注入迅速咸化造成非海相生物群体死亡,有利于有机质富集形成

优质烃源岩。吉木萨尔凹陷芦草沟组烃源岩主要包括碳酸盐岩类和泥岩类,碳酸盐岩类烃源岩TOC平均为2.93%,生烃潜量(S_1+S_2)平均为 24.28mg/g ,有机质类型绝大多数为I型,极少数为II₁型,泥岩类烃源岩TOC平均为3.82%,生烃潜量(S_1+S_2)平均为 29.36mg/g ,大部分为I型和II₁型,少数为II₂型,整体评价为好—极好烃源岩,以生油为主^[8-10]。目前,吉木萨尔凹陷、北三台凸起、阜康断裂带发现的原油主要来自芦草沟组烃源岩^[11-15]。

据中国石油第四次油气资源评价(简称四次资评)结果,准噶尔盆地中—下二叠统模拟生油量达 $1862 \times 10^8 \text{t}$,盆地常规石油资源量为 $80 \times 10^8 \text{t}$,非常规石油资源量为 $20 \times 10^8 \text{t}$,石油资源基础雄厚^[16]。

2.2 发育3套规模气源岩,天然气资源丰富

准噶尔盆地天然气勘探发现较少,探明天然气储量为 $1935 \times 10^8 \text{m}^3$,天然气资源量评价偏低,四次资评盆地常规天然气资源量为 $2.3 \times 10^{12} \text{m}^3$ ^[16],形成了准噶尔盆地“油多气少”的传统认识,进一步制约了准噶尔盆地天然气勘探和发现。近年来,井震结合系统开展了盆地烃源岩评价、烃源灶刻画及资源潜力分析,揭示盆地发育3套规模气源岩,生气潜力大,天然气资源丰富。

2.2.1 中—上泥盆统一石炭系煤系气源岩分布广泛,天然气潜在资源巨大

准噶尔盆地中—晚泥盆世到石炭纪经历了古亚洲洋闭合、陆陆碰撞的洋陆转换阶段,充填一套海陆过渡相沉积建造,广泛发育煤系气源岩。西准噶尔地区野外广泛出露中泥盆统、上泥盆统一石炭统煤系烃源岩,和布克河组发育碳质泥岩和角质煤,厚度为40~60m,平均有机碳含量为12.4%,有机质类型以III型为主,热解峰温平均为 476°C ,目前盆内尚没有钻井钻遇,分布范围不清楚,是一套潜在的优质气源岩。东准噶尔地区野外及井下广泛发育下石炭统烃源岩,以滴水泉组和松喀尔苏组B段为代表,岩性以暗色泥岩、碳质泥岩及煤岩为主,有机质类型以III型为主,综合评价为较好—好气源岩^[17-20]。滴水泉剖面滴水泉组泥岩、碳质泥岩有机碳含量平均为1.15%,生烃潜量平均为 0.58mg/g ,热解峰温为 $465 \sim 490^\circ\text{C}$ 。五彩湾凹陷彩深1井松喀尔苏组B段钻遇深灰色泥岩及凝灰质泥岩烃源岩,有机碳含量在1.47%~3.14%之间,热解生烃潜量为 $0.96 \sim 13.65 \text{mg/g}$,有机质成熟度在1.31%~1.83%之间。

泥盆纪—石炭纪沉积盆地普遍经历了碰撞挤压和褶皱隆升, 形成盆地浅变质褶皱基底, 后期又经历多次构造运动叠加改造, 原型盆地已面目全非, 烃源岩分布更是支离破碎。石炭系及更老地层地震资料成像较差, 仅在滴水泉凹陷及五彩湾凹陷勉强能够解释追踪松喀尔苏组B段, 对泥盆系—石炭系天然气资源潜力认识仍然非常局限。

新的井震资料研究认为, 晚古生代准噶尔地区发育东北缘、西北缘及南缘三大活动陆缘, 石炭系烃源槽分布主要受晚古生代活动陆缘前陆盆地和碰撞期后断陷盆地控制, 三大活动陆缘均具有发育石炭系烃源槽的构造背景^[21], 井震结合落实了滴水泉、五彩湾、东道海子、大井、阜康、吉木萨尔、玛湖、沙湾等8

个石炭系残余生烃凹陷, 面积达15000km² (图3), 估算石炭系天然气地质资源量达 $1.1 \times 10^{12} \text{m}^3$, 较四次资评新增 $3374 \times 10^8 \text{m}^3$, 石炭系天然气资源量大幅增加, 另外, 虽然现阶段对深层泥盆系、下石炭统滴水泉组烃源岩认识不足, 但其天然气资源潜力不可低估。

2.2.2 风城组烃源岩高温条件下生气潜力大, 具备形成大中型气田的资源基础

玛湖凹陷风城组是一套倾油型好—极好烃源岩, 是玛湖10亿吨级大油田的主要油源^[1,22], 历次资源评价均对风城组生油潜力及资源量进行了评价, 并没有作为气源岩重点评价, 四次资评二叠系整体天然气资源量仅为 $3337 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[16]。

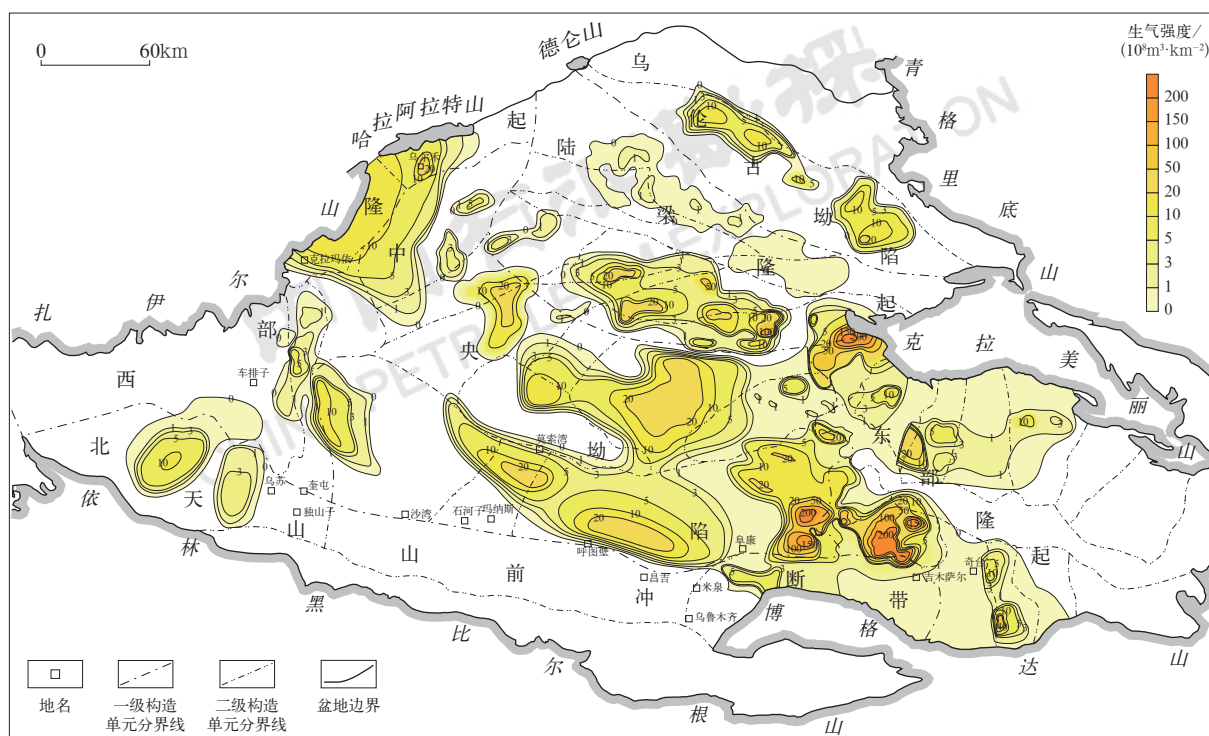


图3 准噶尔盆地石炭系烃源岩生气强度等值线图

Fig.3 Contour of gas generation intensity of the Carboniferous source rock in Junggar Basin

在静态热解参数分析的基础上, 开展风城组烃源岩封闭体系黄金管热模拟实验, 总有机碳甲烷产率最大可达650mL/g, 说明风城组烃源岩及生成的石油在高温背景下具有较大的生气潜力^[23]。根据中央坳陷西部埋藏史分析, 玛湖凹陷风城组埋深相对较浅, 烃源岩整体成熟度处在生油高峰晚期—凝析油湿气阶段早期 ($R_o < 1.5\%$), 主体以生油为主; 盆1井西凹陷风城组烃源岩整体进入生凝析油/湿气

阶段, 部分进入生干气阶段; 沙湾凹陷风城组烃源岩整体进入生干气阶段。据统计, 风城组进入生干气阶段 ($R_o > 2.0\%$) 的面积约为20000km², 进入生凝析油/湿气阶段 ($R_o > 1.3\%$) 的面积约为25000km², 模拟生气强度大于 $20 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ 的面积达13000km² (图4), 目前, 在盆1井西凹陷和沙湾凹陷发现了一批来自风城组烃源岩的高成熟油型气^[23], 揭示盆1井西凹陷—沙湾凹陷风城组具备形成大中型气田的资源基础。

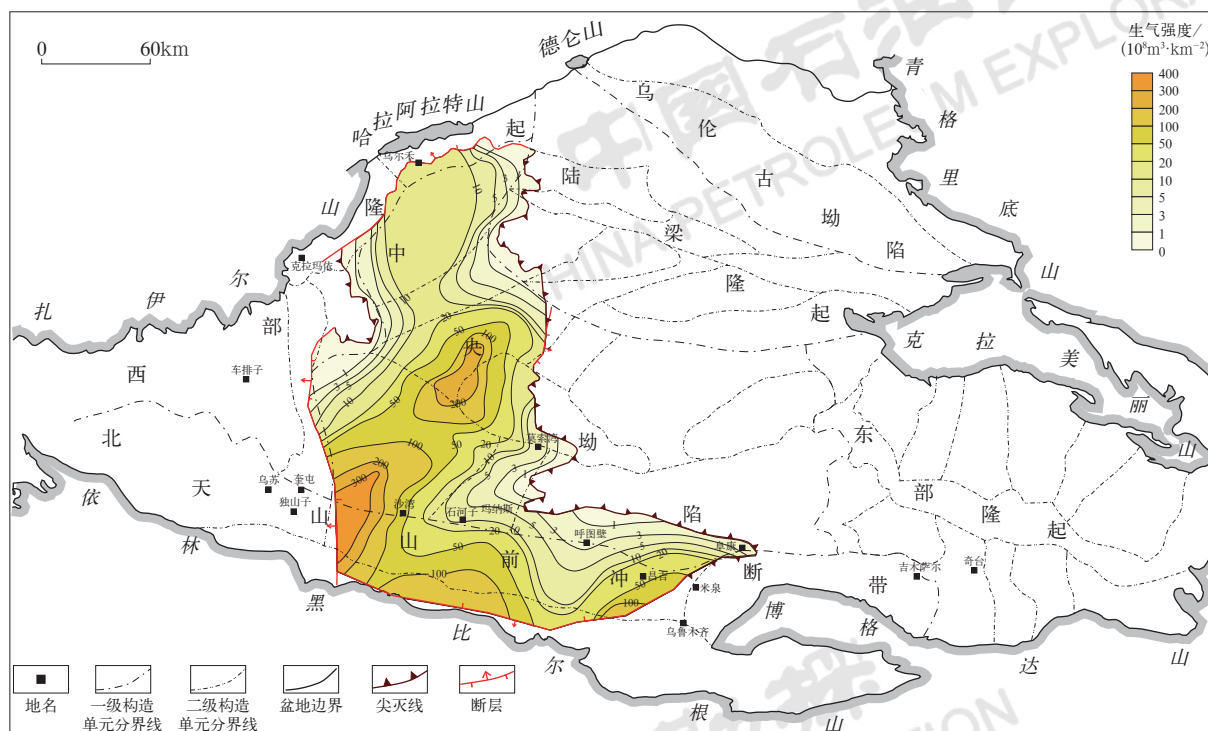


图4 准噶尔盆地风城组烃源岩生气强度等值线图

Fig.4 Contour of gas generation intensity of Fengcheng Formation source rock in Junggar Basin

2.2.3 中—下侏罗统煤系气源岩厚度大、分布广，天然气资源被低估

准噶尔盆地是中生代最重要的聚煤盆地之一，中—下侏罗统主要为浅水湖泊—沼泽相沉积，发育暗色泥岩、碳质泥岩和煤岩3类气源岩。暗色泥岩有机碳含量平均为1.58%，生烃潜量(S_1+S_2)平均为1.85mg/g，主体为中等烃源岩；碳质泥岩有机碳含量平均为20.32%，生烃潜量(S_1+S_2)平均为26.69mg/g，为极好烃源岩；煤岩主要分布在西山窑组和八道湾组，有机碳含量平均为61.27%，生烃潜量(S_1+S_2)平均为77.83mg/g，主体为好—极好烃源岩。中—下侏罗统煤系烃源岩有机质类型以Ⅱ₂—Ⅲ型为主，是一套优质气源岩。

受中—新生代低地温场影响，中—下侏罗统烃源岩成熟度普遍偏低，成熟气源灶主要分布在莫索湾以南地区，埋深较大，勘探程度较低。受前期钻井及地震资料限制，对南部中—下侏罗统不同岩性烃源岩厚度、分布及生烃潜力等缺乏系统研究，认识薄弱。受限于勘探和认识程度，第一次、第二次、第三次油气资源评价运聚系数均小于1%，第四次油气资源评价为2.0%^[16]，而库车坳陷第一次、第二次、第三次油气资源评价侏罗系运聚系数均为3.5%，第四次油气

资源评价为4.5%^[16]，总体上看，准噶尔盆地侏罗系天然气资源量评价偏低，天然气资源潜力被低估。

本文充分利用新钻井及地震反演资料，系统预测了下侏罗统八道湾组、三工河组、西山窑组煤岩和暗色泥岩的厚度及分布范围，和四次资评相比均有大幅度增加(图5)，通过模拟计算，准噶尔盆地南部中—下侏罗统烃源岩生气强度大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的面积达16000km²，生气强度大于 $60 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的面积达3000km²(图6)，总生气量达 $147 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，比第四次油气资源评价增加 $76 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，按运聚系数2.82%计算，天然气地质资源量为 $4.16 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，比第四次油气资源评价增加 $2.70 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，大大提升了盆地南部天然气资源潜力。

2.3 盆地多层系烃源灶空间分布具有迁移性，资源分布具有互补性

准噶尔盆地经历了晚古生代洋陆转换期、中生代统一坳陷湖盆、新生代南缘再生前陆盆地等多期湖盆演化，不同时期盆地空间分布总体表现为有序性，受钻井及地震资料限制，中—晚泥盆世海相盆地分布目前认识还不清楚，根据野外露头及地层序列推测具有广覆式分布的特点，石炭纪—早—中二叠世主要沿东

北缘、西北缘、南缘三大活动陆缘先后发育前陆盆地和碰撞期后断陷盆地，中生代统一坳陷盆地主要分布

在盆内广大地区，新生代再生前陆盆地主要分布在盆地南部。

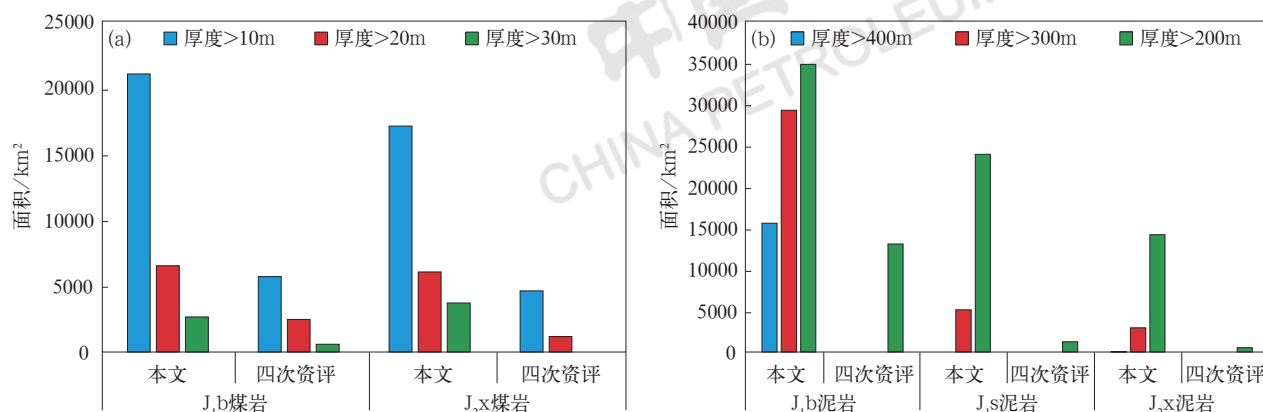


图 5 准噶尔盆地侏罗统煤岩和暗色泥岩厚度及分布面积统计直方图

Fig.5 Histogram of thickness and area of coal and dark mudstone of the Jurassic in Junggar Basin

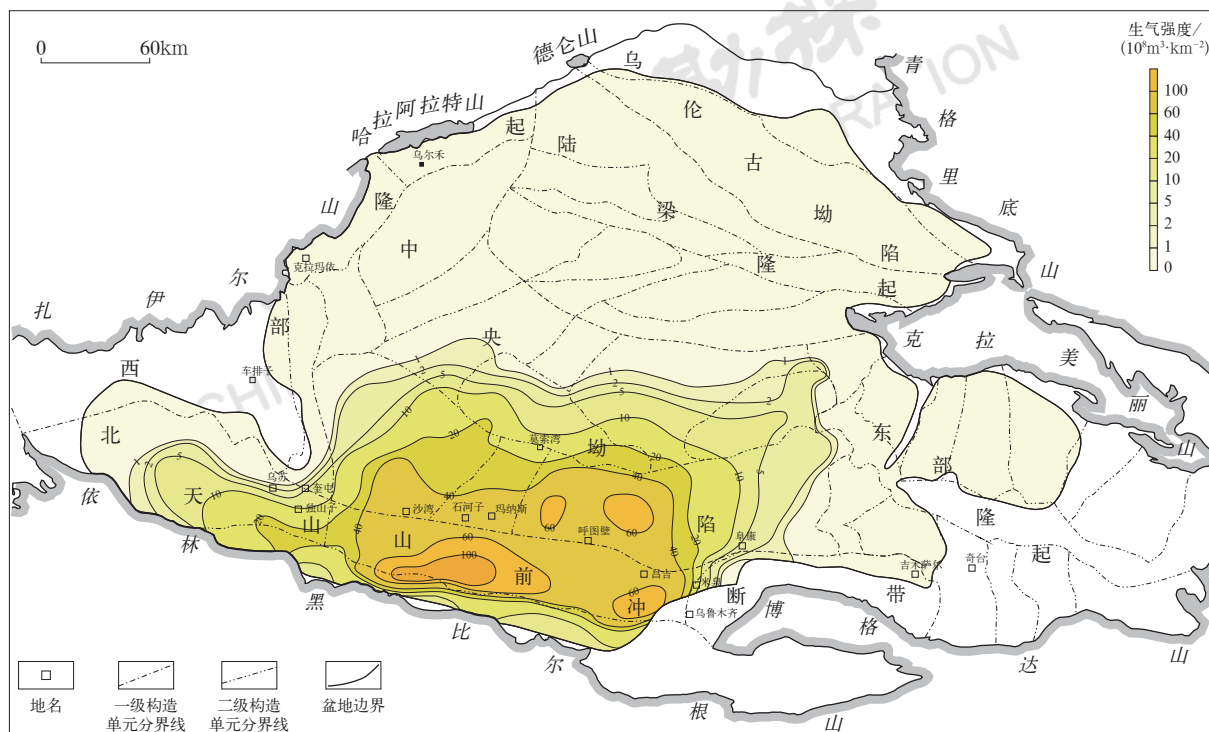


图 6 准噶尔盆地侏罗统八道湾组烃源岩生气强度等值线图

Fig.6 Contour of gas generation intensity of the Lower Jurassic Badaowan Formation source rock in Junggar Basin

盆地演化的时空有序性决定了多层系烃源灶分布具有迁移性(图 7)，东北缘环克拉美丽山前、陆梁隆起主要发育石炭系气源灶，缺乏二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系及古近系烃源灶。玛湖凹陷主要发育佳木河组气源灶和风城组油源灶，盆 1 井西凹陷和沙湾凹陷主要发育风城组气源灶。准噶尔盆地南部主要

发育侏罗系气源灶，白垩系、古近系有效烃源灶主要发育在南部山前。东部阜康凹陷、吉木萨尔凹陷及阜康断裂带主要发育中二叠统芦草沟组油源灶。

多层系烃源灶迁移分布的特点决定了准噶尔盆地油气系统及资源分布具有互补性，除了二叠系富烃凹陷外，盆缘冲断带、盆内隆起区均具有勘探潜力。

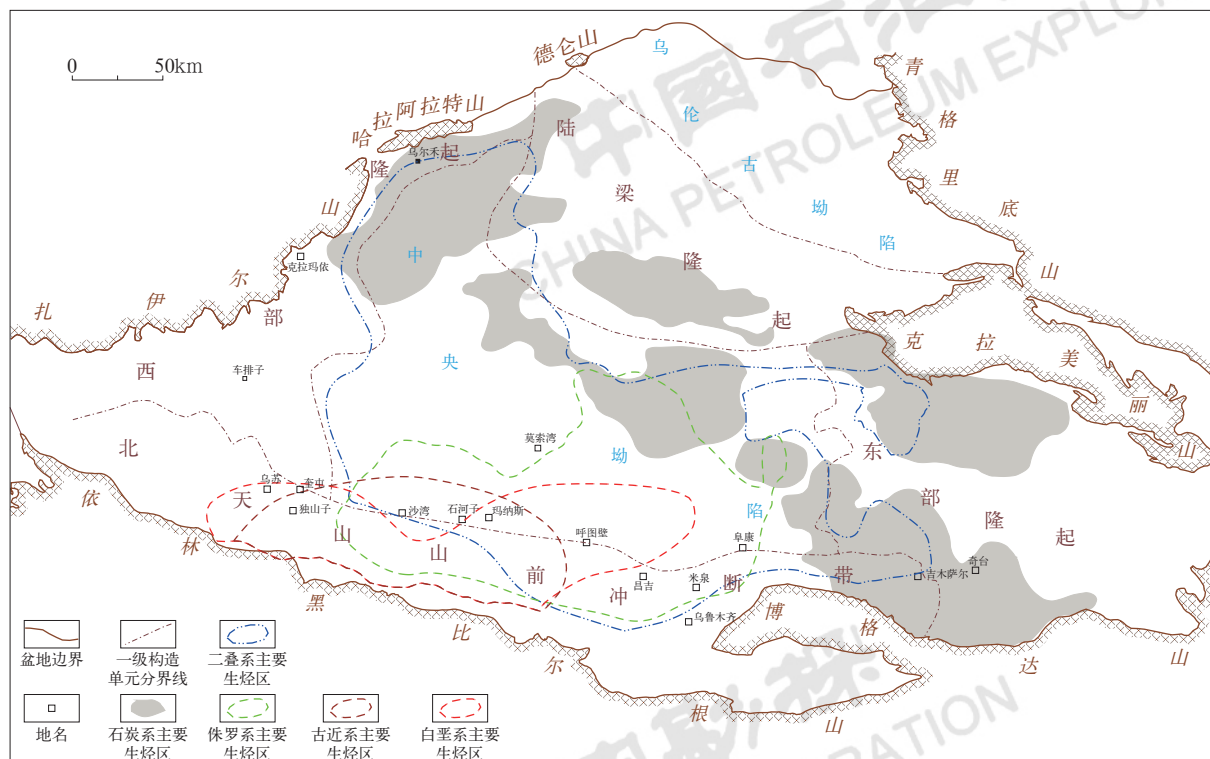


图7 准噶尔盆地主要烃源岩分布叠合图

Fig.7 Superposition of main source rocks in Junggar Basin

3 发育4类规模有效储集体, 空间分布侧向有序、纵向叠置

勘探实践证实, 准噶尔盆地从石炭系至新近系七大层系发育火山岩、砂砾岩、砂岩、云质岩4类规模有效储集体, 受多旋回盆地叠合演化及沉积基准面频繁升降控制, 4类储集体总体表现为平面有序分布、纵向上叠置分布。

3.1 海西期古隆起控制石炭系一下二叠统火山岩风化壳储层分布

火山岩是准噶尔盆地重要的储集类型之一, 纵向上主要分布在石炭系一下二叠统, 全盆地广泛分布。自1980年在九区古13井石炭系安山岩中发现油气藏以来, 陆续在石西、车排子、红山嘴及克拉美丽等地区发现大量火山岩油气藏。

准噶尔盆地火山岩优质储层岩性主要包括火山角砾岩、凝灰岩、安山岩、玄武岩, 火山角砾岩平均孔隙度为12.9%、平均渗透率为30.2mD, 凝灰岩平均孔隙度为8.3%、平均渗透率为9.9mD, 玄武岩平均孔隙度为12%、平均渗透率为3.8mD, 安山岩平均孔隙

度为11.5%、平均渗透率为14.3mD^[24]。火山岩优质储层储集空间类型主要包括次生溶孔、气孔、晶间孔、构造应力缝、溶蚀缝、冷凝收缩缝及节理缝^[24-27]。

火山岩优质储层形成主要控制因素是风化淋滤作用和构造应力作用。火山岩原生孔隙往往互不连通, 必须经过风化淋滤改造以后才能成为有效储层, 风化淋滤时间越长风化壳储层孔渗性能越好, 厚度也越大, 当风化淋滤时间超过36.5Ma时, 风化壳厚度达到最大平衡值510m, 断裂带附近可达1100m^[26]。构造裂缝的发育对改善储层的孔渗条件有重要作用, 主要表现在3个方面: 一是增加了火山岩储集空间; 二是改善原生孔隙的连通性; 三是增强了风化淋滤作用^[25]。

石炭纪末、二叠纪末海西期构造挤压作用, 形成西部隆起、陆梁隆起、东部隆起及中央拗陷内玛中鼻隆带、莫索湾凸起、白家海凸起等海西期古隆起和古凸起, 是风化淋滤作用、构造应力作用、断裂作用集中发育区, 控制准噶尔盆地石炭系、下二叠统火山岩风化壳储层的发育。

3.2 中一下二叠统富烃凹陷源内多类型储集体有序分布

玛湖凹陷风城组、吉木萨尔凹陷芦草沟组源内勘

探实践揭示咸化湖盆发育砂砾岩、砂岩、云质岩和泥页岩等多种类型储集体,不同类型储集体空间上表现为有序分布的特点。

玛湖凹陷风城组主体为一套半深湖—深湖相、富含有机质的混源细粒沉积岩,该套沉积建造中不仅存在近物源扇三角洲陆源碎屑(如砾岩、含砾砂岩、砂岩、粉砂岩等),也发育与盆内火山活动相关的火山碎屑物质(凝灰岩),同时还存在干旱炎热气候环境下的源内化学沉积物(白云岩、盐岩等)^[3,28],形成了砾岩、砂岩、凝灰岩、盐岩、云质岩和泥岩等多类岩石及其过渡类型。储集性能上,砂砾岩平均孔隙度为6.3%,平均渗透率为2.30mD,属特低孔低渗储层,云质岩平均孔隙度为4.4%,平均渗透率为0.09mD,属非常规致密储层^[8]。

纵向上,受风城组沉积期陆源碎屑供给强度、湖盆水体变化及火山活动等影响,风城组岩性构成具有明显的3段特征,风一段沉积期局部火山活动强烈(如风南1井—夏72井附近),其下部发育火山碎屑岩夹火山岩,上部为水进期的富有机质泥岩及云质岩^[28];风二段沉积期处于强蒸发环境,水体盐度高,陆源碎屑供给相对不足(砂砾岩粗碎屑局限在盆缘),主要发育富有机质云质砂岩、粉砂岩和泥页岩,以及一些典型的碱性矿物(如硅硼钠石、碳酸钠钙石、天然碱等)^[29];风三段主要为厚层陆源粗碎屑(砂砾岩)沉积。风城组总体表现为进积序列,由下向上陆源碎屑的含量和粒度均呈增加趋势。

平面上,风城组受盆地西北缘山体隆升剥蚀的影响,主要的陆源碎屑自盆地西北缘向盆内搬运,因此整体上表现为自西向东、由盆缘向凹陷沉积物粒度变

细、并逐渐过渡为化学沉积作用为主的岩类,盆缘斜坡区发育扇三角洲砂砾岩储层,凹陷中心逐渐过渡为云质砂岩、云质粉砂岩和云质泥页岩、泥页岩、白云岩和盐岩。

吉木萨尔凹陷芦草沟组主要发育砂砾岩、砂岩、碳酸盐岩及泥页岩等多种类型储集体,平面上总体表现为有序分布的特征。扇三角洲砂砾岩、含砾粗砂岩等常规储层主分布于凹陷边缘,埋深较浅,平均孔隙度为8.32%,平均渗透率为0.17mD,表现为低孔特低渗致密储层。前扇三角洲以灰质砂岩、云质砂岩为主,是致密油的主要发育区,凹陷区主要发育粉—细砂岩、泥岩和碳酸盐岩等细粒混积岩,页理发育,是页岩油的主要发育区^[8]。

3.3 上二叠统、下三叠统退覆式扇三角洲砂砾岩纵向错置、横向连片分布

上二叠统上乌尔禾组、下三叠统百口泉组是玛湖凹陷砾岩大油区主要产层,储层以砾岩、砂砾岩为主,平面上具有叠置连片、大面积分布的特点。

晚二叠世—早三叠世为准噶尔盆地从前陆盆地向大型坳陷盆地演化的重要转换期^[30],周缘老山持续冲断隆升,形成盆缘陡、盆内缓、多级坡折的特殊古地形特征,盆缘较陡的地形为扇三角洲形成提供了充足的物源,盆内缓坡浅水为大型扇三角洲群的形成提供了有利的沉积背景。多级坡折和持续湖侵导致扇三角洲退覆式(退积型)沉积,初期,首先在靠近凹陷中心的坡折下形成扇三角洲,随着水体不断加深,扇三角洲依次在更上一级坡折下沉积,从而形成扇三角洲前缘砾岩、砂砾岩储集体纵向错置、横向连片、大面积分布(图8)^[31]。

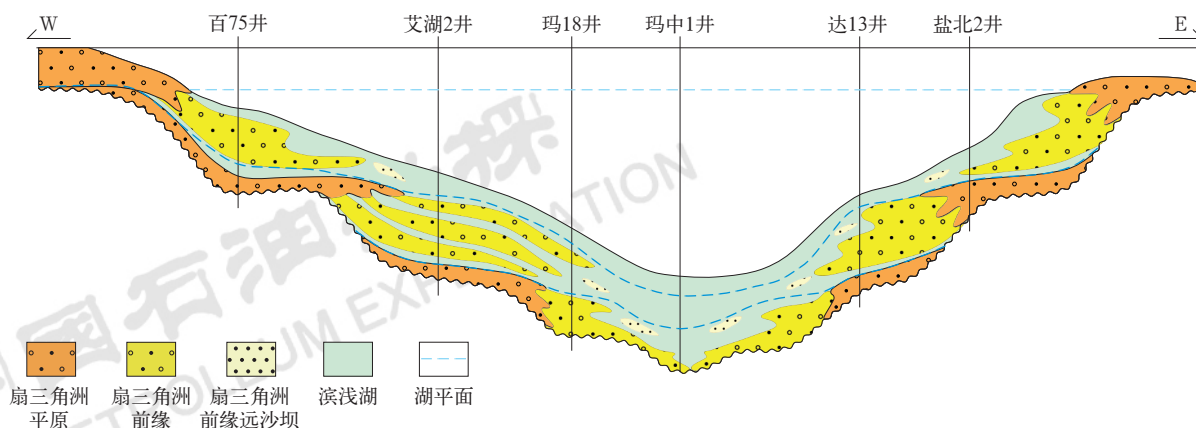


图8 玛湖凹陷百口泉组退覆式扇三角洲沉积模式图

Fig.8 Depositional pattern of regressive fan delta of Baikouquan Formation in Mahu Sag

3.4 中浅层多层系发育重力流、滩坝砂体等优质储层，可与深部储集体空间叠置

多年来，对于准噶尔盆地中浅层沉积体系认识基本上以大型辫状河三角洲—湖相为主，骨架砂体主要为三角洲前缘复合砂体，微相类型以水下分流河道为主，其次为河口坝砂体，而对重力流、滩坝等成因类型砂体研究比较薄弱，限制了中浅层凹陷区岩性油气藏勘探。

2012年在盆1井西凹陷东环带前哨地区部署了风险探井前哨1井，在三工河组二段一砂组发现天然气藏，当时并没有对该套砂体的成因类型深入解剖和认识。2016年通过周边井岩心系统观察，结合区域古地貌背景分析，提出前哨地区三工河组二段一砂组砂体成因类型主要为砂质碎屑流（图9），2019年部

署前哨2井，在三工河组再获高产天然气流，之后多口探井、评价井获高产，探明前哨天然气高效储量区。

三叠系白碱滩组是准噶尔盆地最重要的区域盖层之一，主要发育厚层泥岩，缺乏规模砂体，长期以来没有被作为主探目的层。近年在玛湖凹陷和盆1井西凹陷钻探的玛中4井、盆北1井均在白碱滩组钻遇油气层，通过岩心观察和岩电关系分析，发现玛中4井产层砂体微相类型为滩坝砂体，盆北1井产层砂体类型为浊积砂体（图9）。玛中4井区白碱滩组提交探明储量 $1051 \times 10^4 \text{t}$ ，储量有规模，升级、动用性高。

玛湖凹陷—盆1井西凹陷中浅层三工河组、白碱滩组钻遇砂质碎屑流、浊流及滩坝砂体，储层优、圈闭条件好，揭示中浅层多旋回湖侵期可广泛发育该类砂体，纵向上可与深层规模储集体叠置分布，是凹陷区勘探重要目标类型之一。

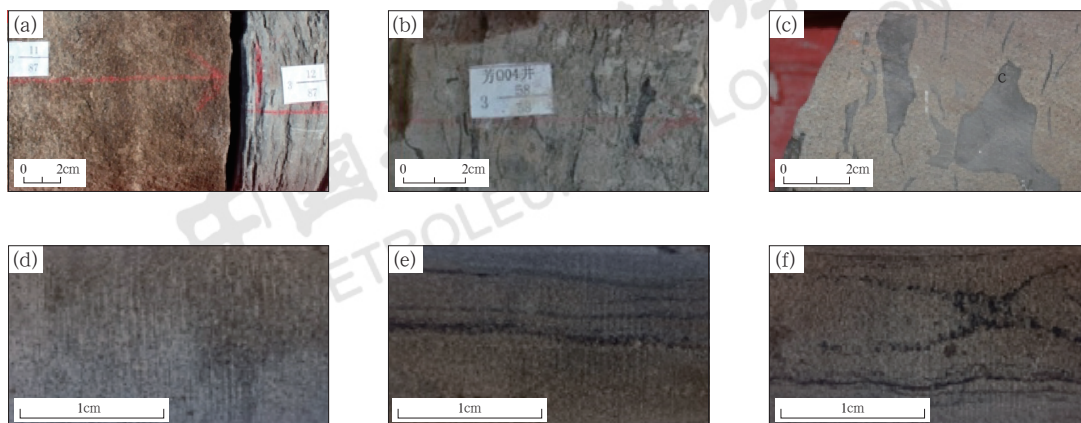


图9 中央坳陷西部三工河组、白碱滩组岩心照片

Fig.9 Core photos of Sangonghe Formation and Baijiantan Formation in Central Depression

(a) 前哨1井，三工河组，砂岩与深灰色泥岩突变接触；(b) 芳004井，三工河组，泥岩撕裂屑；(c) 莫17井，三工河组，泥砾；(d) 盆北1井，白碱滩组，粒序层理，4528m；(e) 盆北1井，白碱滩组，平序层理，4536m；(f) 盆北1井，白碱滩组，波纹层理，4566m

4 富烃凹陷存在3类成藏体系，规模高效各具潜力

玛湖凹陷勘探实践揭示富烃凹陷源内常规—非常规油气有序聚集，源上断裂—不整合面优势输导、退覆式扇三角洲前缘砂砾岩大面积成藏，中浅层走滑断裂垂向输导、断—砂耦合立体成藏，3类成藏体系控制形成常规、非常规两类资源，非常规资源规模大，常规油气藏储量优。

4.1 源内常规—非常规油气有序聚集

玛湖凹陷风城组发育常规油、致密油和页岩油3

种油气资源，凹陷边缘主要发育砂砾岩常规油藏，斜坡区主要发育云质砂岩类致密油藏，凹陷区则主要发育页岩油藏（图10），油气主要受控不同储集体空间相序分布，空间上呈现有序聚集模式^[3,6,32]。

常规油藏的显著特点是源储分离，储层与烃源岩没有直接接触。油气主要经过二次运移，以圈闭为单元在浮力作用下形成常规油气藏。风城组常规油藏主要发育在玛湖凹陷的冲断带附近，储层厚度大，以砾岩、砂岩、火山岩等为主，发育微裂缝和基质孔^[33-34]。这种模式下，油气运移路径较长，运移效率较低，但储量丰度高，开发效果较好。

致密油藏储层与烃源岩相邻，但并不直接接

触^[35]，油气运聚动力主要为生烃压力与浮力，活塞式运聚，油气通过短距离运移后聚集在储层中。风城组致密油主要分布在凹陷周缘斜坡区，以云质砂岩、凝灰质砂岩为主要储层，油气运移路径较短，运移效率较高，大面积分布，但储量丰度相对较低，储量升级和动用周期长。

页岩油藏为源储一体型油藏，聚集模式为源内自生自储，运聚动力主要为生烃压力。风城组页岩油储层极其致密，孔隙度介于0.4%~17.7%，大多小于3.0%，渗透率远小于0.1mD^[36]。风城组页岩油主要分布在玛湖凹陷中央区域，以云质粉—细砂岩、泥质岩为主要储层，储层较厚，有机质含量高。风城组页岩油储层储集空间主要为微裂缝和无机矿物孔隙，以微纳米级孔隙为主。这种模式下，油气运移路径

最短，运移效率最高，大面积分布，但储量动用难度比较大。

4.2 源上退覆式扇三角洲前缘大面积成藏

玛湖凹陷受到盆地周缘老山海西—印支期多期逆冲推覆作用的影响，一是发育一系列具有调节性质、近东西向的走滑断裂，向下切入二叠系烃源岩层中，向上不同程度断开三叠系、侏罗系及白垩系，为二叠系烃源岩生成的油气向上运移提供了垂向输导通道；二是造成中—上二叠统挠曲抬升、大范围剥蚀，形成三叠系和二叠系之间的区域不整合面，该不整合面与走滑断裂体系配置构成源上立体输导体系，为百口泉组、上乌尔禾组砂砾岩大面积成藏提供了高效输导通道（图10）。

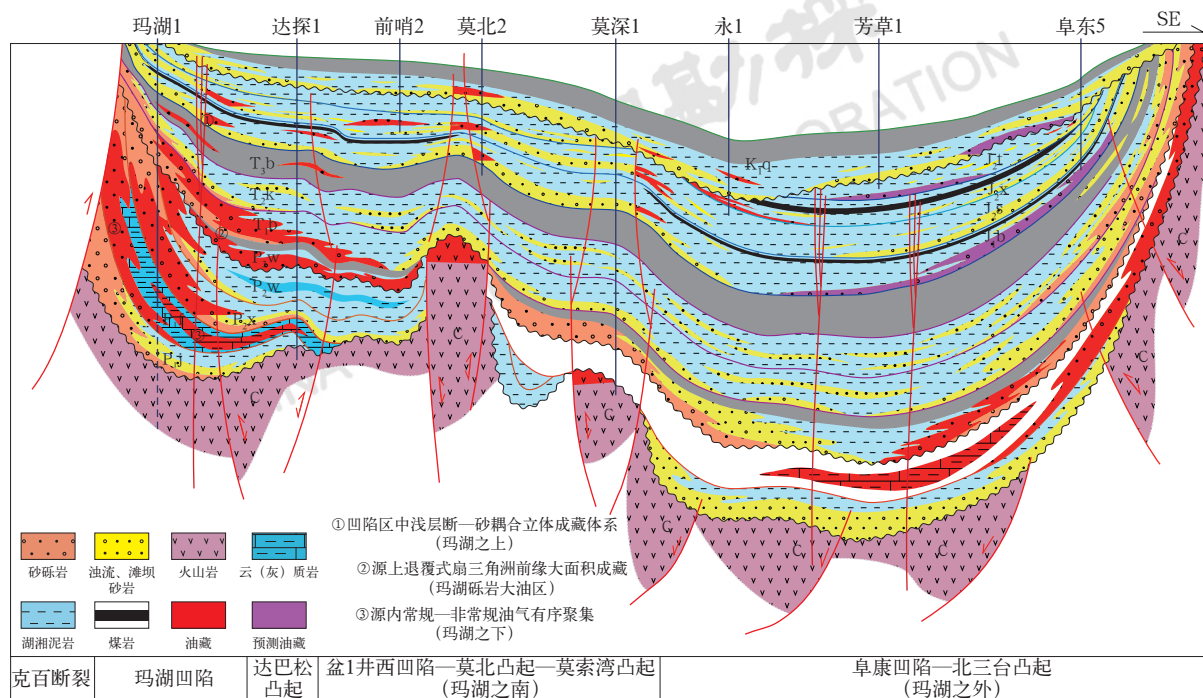


图10 准噶尔盆地富烃凹陷油气成藏模式及勘探领域综合图

Fig.10 Hydrocarbon accumulation pattern and exploration field prediction in hydrocarbon rich sag in Junggar Basin

玛湖凹陷上二叠统一三叠统发育大型浅水退覆式扇三角洲沉积，扇三角洲前缘亚相砂砾岩泥质含量低、粒径适中、分选好，发育规模有效储层，纵向上顶、底板发育湖侵期厚层泥岩，侧向及上倾方向发育扇三角洲平原亚相致密带、扇间泥岩及断裂组合遮挡，为扇三角洲前缘亚相规模有效储层提供了3面立体封堵的良好封闭条件，形成退覆

式扇三角洲前缘亚相大面积岩性圈闭群的地质条件（图8）^[37]。

玛湖凹陷下二叠统风城组优质烃源岩提供了充足的油源条件，凹陷区走滑断体系、三叠系/二叠系区域不整合面配置构成油气立体输导体系，不整合面上、下的上乌尔禾组、百口泉组退覆式扇三角洲提供了规模储集空间和岩性圈闭条件，共同构成源上

断裂—不整合面优势输导、退覆式扇三角洲前缘砂砾岩大面积成藏模式(图10)。

2010年以来,围绕玛湖凹陷三叠系/二叠系不整合面上、下的百口泉组和上乌尔禾组勘探,先后发现了玛西—玛北百口泉组砂砾岩百里油区和玛南上乌尔禾组规模砂砾岩大油区,建成了中国石油新疆油田公司增储上产新基地,开辟了准噶尔盆地岩性油气藏勘探新局面^[31,37]。

4.3 凹陷区中浅层断—砂耦合立体成藏体系

准噶尔盆地中浅层主要指中—上三叠统及以上勘探目的层,具有“埋藏浅、储层好”的优势,但中浅层成熟烃源灶主要分布在盆地南部地区,大部分地区中浅层要靠二叠系烃源灶供源,成藏具有“源储分离、远源次生”的特点^[32-39],早期主要围绕正向构造勘探,先后发现了石西、石南、莫北、陆梁、莫索

湾等高效油气田,为中国石油新疆油田公司年产原油上千万吨做出了巨大贡献,但随着正向构造单元勘探程度增加,勘探难度增大。

受早期地震资料分辨率限制,认为凹陷区不发育断裂,中浅层缺乏油源断裂沟通,成藏条件不利。随着近年中央坳陷西部高密度三维地震部署,在玛湖、沙湾等多个富烃凹陷解释出大量呈东西向带状分布的大型走滑断裂体系(图11),自下而上断穿了石炭系至白垩系多套地层,构成了凹陷区中浅层油气高效垂向输导通道^[40]。

前已述及,中浅层多期湖侵背景下发育砂质碎屑流、浊流及滩坝等多种成因类型砂体,具有较好的储集条件和圈闭条件,与走滑断裂搭接构成断—砂耦合立体成藏体系(图10),目前已经在前哨地区三工河组、玛中4井区白碱滩组发现高效油气藏,揭示了中浅层断—砂耦合立体成藏体系的勘探潜力。

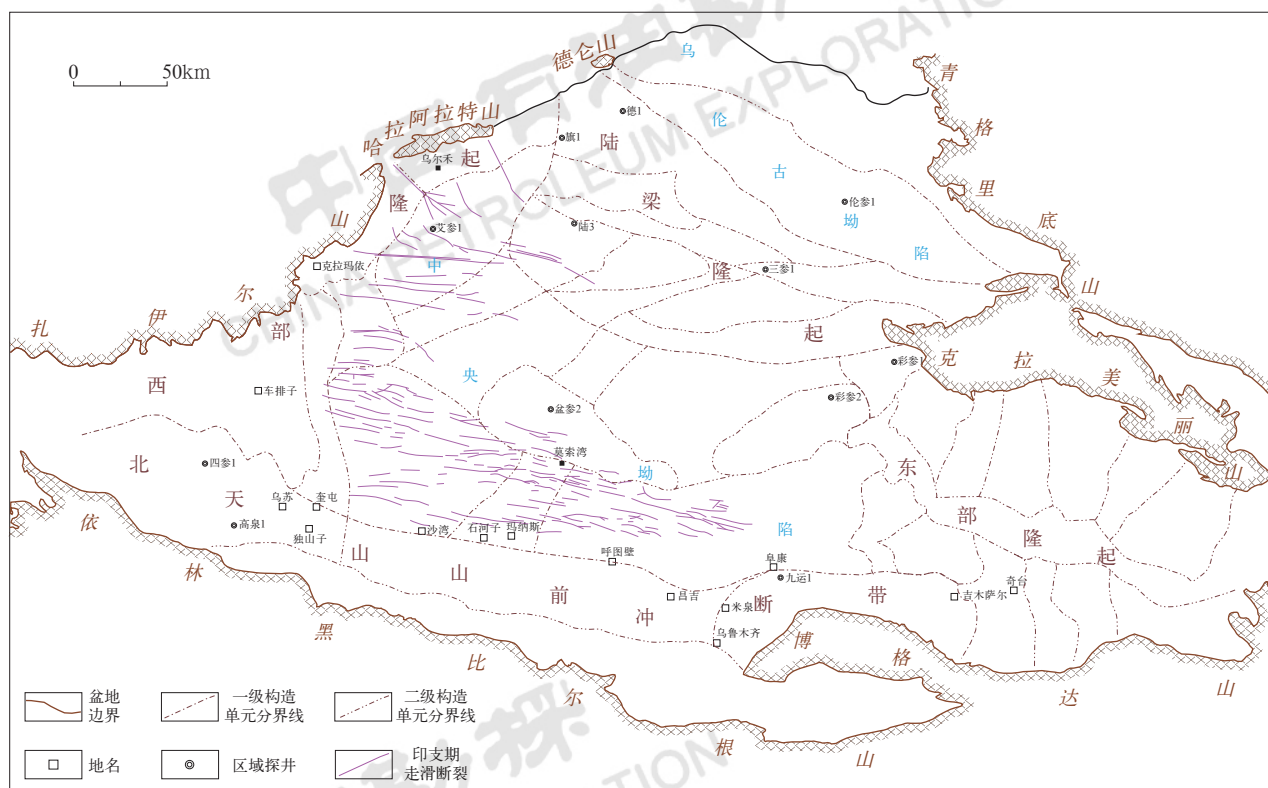


图11 准噶尔盆地印支期走滑断裂体系分布图

Fig.11 Distribution of Indosinian strike slip fault system in Junggar Basin

5 盆地高效勘探策略与勘探方向

近年来,重点围绕盆地二叠系富烃凹陷下组合近源勘探,发现了玛湖百口泉组砾岩大油区、吉木萨尔

凹陷芦草沟组页岩油、上二叠统上乌尔禾组地层型大油区、风城组致密油和页岩油,成为盆地储量增长的主体,但也面临储量埋深大、非常规为主、储量升级率和效益动用率双低等难题,也是盆地油气勘探进入

新阶段勘探理念、部署思路不适应导致的暂时结果。本文结合准噶尔盆地油气地质特点、地质新认识、勘探开发技术适应性及可持续效益发展目标,认真梳理,提出油气高效勘探策略,梳理出准噶尔盆地未来勘探方向和勘探领域,以期对准噶尔盆地未来油气勘探开发可持续效益发展有所帮助。

5.1 “油气并举、常非并重、深浅兼顾、多域增储” 高效勘探策略

本文在充分考虑准噶尔盆地多层系烃源灶富油多气、4类储集体规模发育、富烃凹陷3类成藏体系等油气地质特点,结合新形势下高效勘探新要求,确立了“油气并举、常非并重、深浅兼顾、多域增储”盆地高效勘探新策略。

“油气并举”是指在盆地勘探工作量以油为主、深层储量品质劣质化明显等背景下,加大天然气勘探投资及部署工作量,通过天然气勘探开发的高效益弥补非常规油气勘探开发的高成本,从而达到油田当下效益发展的目的。据统计,在2020年低油价背景下,中国石油实现盈利的油气田企业天然气产量均有一定规模,油气产量当量占比均高于50%,充分说明规模天然气产量是低油价下油田公司效益发展的重要保障。根据近年对准噶尔盆地天然气资源的再认识、再评价,发现盆地深层天然气资源丰富,发育石炭系、侏罗系两大煤系气源岩及二叠系高成熟油型气源岩,三大气源岩烃源灶均具有一定规模和资源潜力,具备加大发展天然气勘探开发的资源基础。

“常非并重”是指在富烃凹陷源内常规—非常规油气资源有序聚集模式指导下,常规—非常规一体化统筹部署,遵循先常后非、先浅后深、先粗后细、择优先探等思路,加强近物源斜坡区常规油、致密油勘探力度,同时要深入认识源内页岩油甜点储层发育分布规律,积极探索页岩油储量效益动用技术和开发模式,形成源内常规、非常规油气勘探有序推进、量效互补、可持续发展。

“深浅兼顾”是指勘探部署工作在紧盯富烃凹陷近源规模储量的同时,还要兼顾中浅层高效储量勘探和发现,中浅层高效储量的发现和快速开发建产对油田综合效益的提升具有立竿见影的功效。2022年中国石油新疆油田公司聚焦准噶尔盆地西北缘老区中浅层储量可动用、好动用、经济可采等优势,以“油藏再认识”为核心,强化精细滚动,落实中浅层效益储量 $5547 \times 10^4 \text{t}$,支撑老区稳产上产,效果显著。

“多域增储”是指在围绕富烃凹陷下组合集中勘探的同时,充分考虑盆地多层系烃源灶分布的迁移性和油气资源分布的互补性,持续开展盆地整体性、系统性基础研究和编图,掌握盆地各领域资源类型、潜力和油气富集规律,加强超深层、中浅层、隆起区多资源类型的甩开预探、风险勘探及科学探索,为盆地可持续效益发展开拓新的战略接替领域。

5.2 盆地未来勘探方向和领域

2012年以来,在源上扇控大面积成藏理论认识指导下,玛湖地区勘探持续获得新发现,在上二叠统上乌尔禾组、三叠系百口泉组建成超 $15 \times 10^8 \text{t}$ 玛湖砾岩大油区,成为盆地增储上产重要领域,实现了几代石油人跳出断裂带走向斜坡区的夙愿。

然而,继玛湖砾岩大油区之后盆地未来勘探方向及接替领域在哪里是必须要超前思考的问题。在“油气并举、常非并重、深浅兼顾、多域增储”高效勘探策略指导下,充分考虑盆地资源特点、地质特点及高效勘探需求,系统梳理出盆地未来三大勘探方向、九大勘探领域(图10、图12),奠定了盆地油气勘探开发效益发展的基础。

鉴于“玛湖”基本上成为上乌尔禾组、三叠系百口泉组砾岩大油区的代名词,为了论述方便、行文流畅,下文以“玛湖”代替玛湖凹陷上乌尔禾组、三叠系百口泉组砾岩大油区以及未来可能发现的规模增储上产大油区。

5.2.1 “玛湖”上、下找“玛湖”

“玛湖”上、下找“玛湖”是指在上乌尔禾组、百口泉组砾岩大油区之下及中浅层寻找新的规模增储上产接替层系。综合考虑玛湖凹陷下组合烃源灶认识及高效勘探新策略,认为玛湖风城组源储一体有利区、深层石炭系构造圈闭及中浅层断层—岩性油气藏有利区是继源上扇控大面积砾岩大油区之后三大重要勘探领域(图12)。

随着勘探和认识程度的深入,构建了玛湖凹陷风城组源内常规—非常规油气有序聚集模式(图10),揭开了玛湖凹陷上乌尔禾组—百口泉组砾岩大油区之下源内勘探新领域,近年来围绕玛湖风城组勘探,发现了玛南、玛北、玛西等大量致密油、页岩油规模储量,玛51X井、玛页1H井等非常规储量效益动用探索也获得重大突破,风城组已经成为盆地最重要的规模增储上产接替领域(图12)。

除风城组以外,石炭系深大构造是玛湖凹陷深层

天然气重大勘探领域(图10)。根据最新石炭系烃源灶刻画,玛湖凹陷发育规模石炭系及二叠系佳木河组气源岩,石炭系具备自生自储、新生古储两种成藏模式。玛湖凹陷深层发育多个石炭系大构造,发育爆发相和溢流相火山岩风化壳储层,源储配置优越,是天然气重大勘探领域(图12)。近期在达巴松凸起盆北1井石炭系测试获日产 $62 \times 10^4 \text{m}^3$ 高产气流,证实玛湖凹陷深层石炭系巨大勘探潜力。

玛湖凹陷中浅层断—砂耦合立体成藏体系是高效勘探的重要领域。勘探实践证明玛湖凹陷发育大侏罗沟等多条近东西向走滑断裂体系,纵向上沟通二叠系烃源灶和中—上三叠统、八道湾组、三工河组多套储盖组合,形成中浅层断—砂耦合立体成藏体系(图10),目前凹陷区克拉玛依组、白碱滩组、八道湾组中下段、三工河组二段均已发现大量出油气点,加强精细评价和深浅兼顾,仍能发现规模高效储量区块。

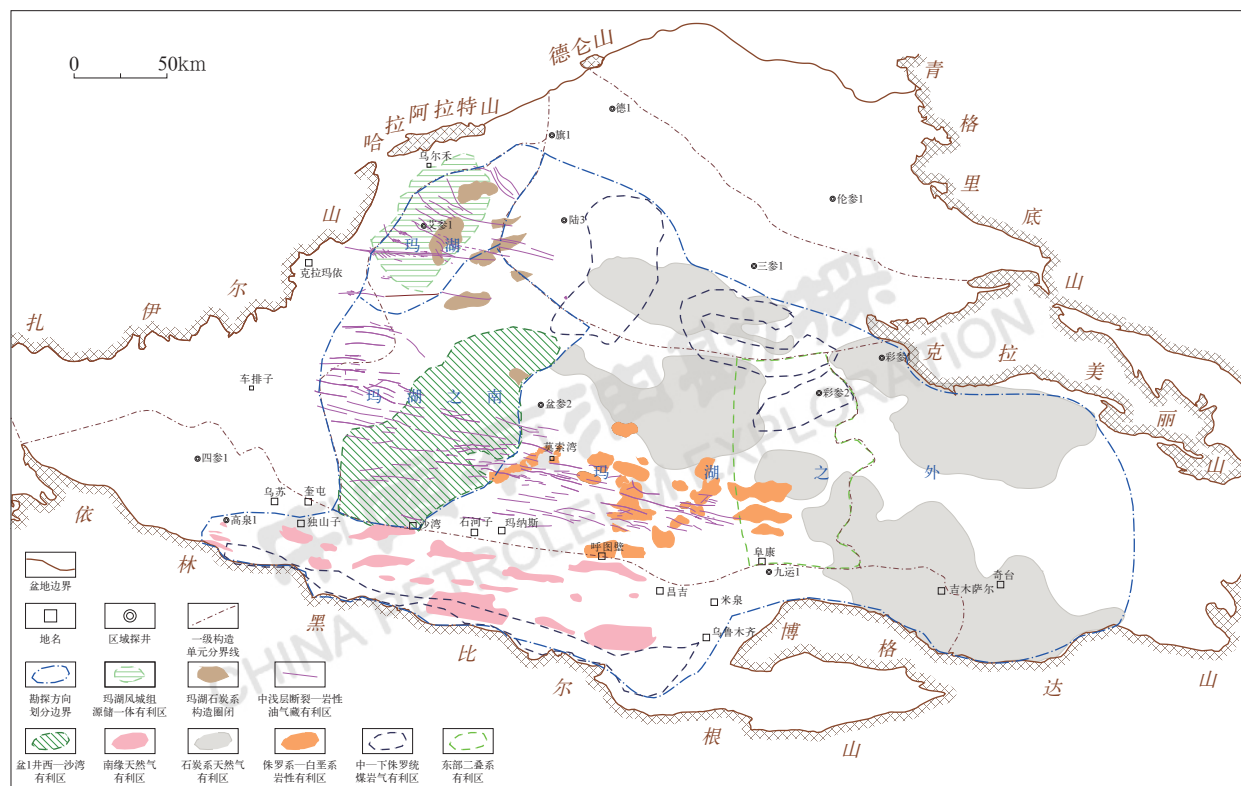


图12 准噶尔盆地勘探方向及勘探域划分图

Fig.12 Exploration orientation and division of exploration fields in Junggar Basin

5.2.2 “玛湖”之南找“玛湖”

“玛湖”之南找“玛湖”是指在玛湖富烃凹陷之南盆1井西凹陷、沙湾凹陷两个富烃凹陷寻找新的规模增储上产接替领域。准噶尔盆地“早热晚冷”地温场及喜马拉雅期南部再生前陆盆地演化,造成多套烃源岩高成熟烃源灶偏南、偏深,玛湖凹陷风城组烃源岩主体以生油为主,玛湖凹陷以南风城组烃源岩埋深更大,热演化程度更高,整体进入规模生气阶段,而侏罗系烃源岩在盆地南部也普遍成熟,开始规模生气,因此,玛湖凹陷以南盆1井西凹陷—沙湾凹陷烃源条件更加优越。

储层方面,从石炭系至浅层白垩系,发育砂砾

岩、中—细砂岩、云质岩、火山岩等多类储层,孔隙度为3%~23.8%、渗透率为0.01~145mD,钻井揭示在6700m处碎屑岩孔隙度可达17%、渗透率可达1.76mD,表明盆1井西凹陷—沙湾凹陷深埋背景仍可发育规模有效储层。

盆1井西凹陷—沙湾凹陷发育海西期—燕山期深浅断裂、印支期走滑断裂两类油源断裂,垂向搭接、平面切割,形成油气立体输导网络。凹陷区发育一系列继承性大型鼻凸构造带,有利于油气汇聚富集。目前已在二叠系、三叠系及侏罗系多层系试获工业油气流,油气性质表现出从凸起区到凹陷区原油密度降低、气油比升高的特点,揭示深层以凝析油气及

天然气为主,具备立体勘探、油气并举的勘探潜力,是继玛湖富烃凹陷之后最重要的接替凹陷(图10、图12)。

5.2.3 “玛湖”之外找“玛湖”

“玛湖”之外找“玛湖”是指跳出玛湖、盆1井西及沙湾等西部富烃凹陷,在盆地更广阔的范围内寻找新的规模增储上产接替领域。准噶尔盆地纵向发育六大烃源层系,资源基础雄厚,多层系烃源灶分布具有空间迁移性,决定了准噶尔盆地资源分布具有互补性,盆缘冲断带及盆内隆起区、斜坡区同样具有较大勘探潜力,综合盆地油气地质条件及近期勘探新苗头,梳理出南缘天然气有利区、东部二叠系有利区、石炭系天然气有利区、中一下侏罗统煤岩气有利区、侏罗系—白垩系岩性地层有利区等五大勘探领域(图12)。

北天山山前冲断带具备形成万亿立方米大气区的油气地质条件。北天山山前冲断带位于中一下侏罗统规模气源灶之上,新估算天然气资源量达 $4.2 \times 10^{12} \text{m}^3$,并且已发现油气证实也有来自中一下二叠统咸水湖相烃源岩的贡献,具备形成大油气区的资源基础。北天山山前冲断带中—新生界由南向北发育三排大型构造圈闭(图12),中、下组合背斜构造保存相对比较完整,圈闭条件非常有利。南缘下组合发育大型冲积体系,主要发育清水河组、喀拉扎组、头屯河组、三工河组4套规模砂体,低地温梯度背景下早期浅埋、晚期快速深埋,叠加强超压,8000m以深仍发育规模有效储层,具备高产稳产的储层条件。2019年高探1井清水河组获千吨高产,下组合获得了重大历史性突破。随后呼探1井、天湾1井清水河组相继获高产油气流,近期在呼西背斜部署的评价井——呼101井、呼102井均在喀拉扎组厚层砂砾岩储层中获高产气流,进一步揭示北天山山前冲断带万亿立方米大气区的勘探潜力。

玛湖凹陷勘探开发过程证实,富烃凹陷具有源内全序列成藏、源外多层系立体成藏特征。二叠系富烃凹陷剩余常规石油资源量 $27 \times 10^8 \text{t}$ 、页岩油资源量 $25 \times 10^8 \text{t}$ 、天然气资源量 $5 \times 10^{12} \text{m}^3$,围绕二叠系富烃凹陷近源、进源勘探仍是实现规模增储上产的主旋律。除了中央坳陷西部玛湖凹陷、盆1井西凹陷和沙湾凹陷之外,盆地东部阜康凹陷、东道海子凹陷也应是未来增储上产的重要勘探领域。阜康凹陷东斜坡康探1井在二叠系芦草沟组、梧桐沟组及三叠系韭菜园子组3层均获百吨高产油流,提交梧桐沟组预

测储量 $1.4 \times 10^8 \text{t}$,揭示了阜康凹陷深层巨大勘探潜力,浅层侏罗系头屯河组多井发现断裂—河道砂高效油藏,证实阜康凹陷具有立体成藏的特征(图10、图12)。

石炭系自生自储油气系统是盆地天然气勘探的重要接替领域。中—上泥盆统—石炭系发育多套煤系气源岩,基本上均已达到高成熟以上演化阶段,资源潜力巨大。限于地层改造强烈及深层地震成像差,目前只能对下石炭统烃源灶分布进行刻画和资源量评价,根据新落实的下石炭统烃源灶分布估算天然气地质资源量达 $1.1 \times 10^{12} \text{m}^3$,如果考虑另外4套烃源岩贡献,天然气资源不可限量。石炭系发育岛弧型和裂谷型规模火山岩体,规模有效储层主要受火山岩相及风化淋滤时间控制,受埋深影响较小,深层仍可发育规模有效储层。目前已发现盆地唯一的千亿立方米大气田——克拉美丽气田,证实石炭系具备形成大气田的地质条件,加强气源灶刻画及规模有效储层预测,积极开展区带目标评价,有望发现新的千亿立方米大气田。

中一下侏罗统深层煤岩气是新发现的资源类型,存在石炭系他源型和侏罗系自源型两种类型,资源潜力大、勘探前景广阔。2021年按照探索深层煤岩气的重要思路,围绕盆地白家海凸起部署的风险探井——彩探1H井获重大突破,开辟了我国深层煤岩气勘探新领域,该井在西山窑组煤岩测试最高日产气 $5.7 \times 10^4 \text{m}^3$,稳产 $2.4 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$,累计产出天然气超 $1200 \times 10^4 \text{m}^3$,证实深层煤岩气规模效益开发前景良好,有望对盆地天然气增储上产注入新的活力。准噶尔盆地侏罗系广泛发育不同煤阶煤岩,有利区面积为 $2.7 \times 10^4 \text{km}^2$,埋藏较浅的西山窑组煤岩致密气资源量为 $3.8 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。盆地北部以低煤阶煤岩储层为主,石炭系供源“古生新储”成藏。盆地南部地区,煤岩演化程度高,发育高煤阶煤岩储层,可“自生自储”成藏。两类煤岩气均勘探潜力巨大,是盆地天然气增储上产的重要勘探新领域(图10、图12)。

准噶尔盆地南部中—上侏罗统—下白垩统具备形成大型岩性地层油气藏的地质条件,具有极大勘探潜力(图10、图12)。中侏罗统西山窑组沉积末期,受盆缘挤压应力影响,盆地中部形成北东—南西走向的大型车莫古隆起,车莫古隆起轴部中一下侏罗统被剥蚀,削蚀地层圈闭发育,同时在隆起东南翼沉积较厚的中—上侏罗统,中—上侏罗统向车莫古隆起逐层超覆,可形成超覆地层圈闭。白垩纪之前,车莫古隆起沉降消亡,下白垩统清水河组由盆内向东、西盆缘

逐层超覆,易形成超覆地层圈闭。盆地南部中一下侏罗统烃源岩普遍达到成熟、高成熟,深层二叠系烃源岩也已达高一过成熟,具备双源供烃优势,盆地南部已发现油气的地球化学特征也证实存在双源供烃的事实。盆地南部发育印支期走滑断裂体系和喜马拉雅期滑脱逆冲断裂体系,走滑断裂体系可沟通二叠系、侏罗系两套烃源岩,逆冲断裂体系可沟通中一下侏罗统烃源岩。盆地南部已发现永进油田,产层主要为西山窑组,油藏类型主体为断层—地层油气藏,证实盆地南部中—上侏罗统一下白垩统岩性地层油气藏勘探潜力。

6 结论

准噶尔盆地发育下二叠统风城组、中二叠统两套咸湖背景的优质油源岩,发育泥盆系—石炭系、中一下侏罗统两套主力煤系气源岩,风城组在高熟条件下也具有较强的生气潜力,盆地既富油、也多气,油气资源空间分布具有互补性。前限于“油多气少”传统认识,天然气勘探发展缓慢,应该加大天然气勘探力度。

富烃凹陷发育火山岩、砂砾岩、砂岩、云质岩4类规模有效储集体,侧向上有序分布、纵向叠置分布,存在源内常规—非常规油气有序聚集、源上退覆式扇三角洲砂砾岩大面积成藏、中浅层断—砂耦合立体成藏等3种成藏体系,仍是近期增储上产的集中勘探领域。凹陷区深层勘探应遵循常非并重、择优先探的策略,同时还要兼顾中浅层高效油气藏的勘探,才能实现规模储量和高效储量同步增长,保持油田储采平衡和效益发展。

玛湖凹陷百口泉组、上乌尔禾组仍是准噶尔盆地增储上产的现实领域,玛湖凹陷风城组全油气系统、深大构造、中浅层断—砂组合,玛湖之南沙湾—盆1井西凹陷,东部坳陷二叠系富烃凹陷、北天山山前冲断带、泥盆系—石炭系天然气、深层煤岩气、南部侏罗系—白垩系岩性地层等领域是准噶尔盆地未来增储上产的接替领域,应加强基础研究、整体研究和风险勘探,积极拓展新区、新领域,实现盆地增储上产主战场的有序接替和可持续发展。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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 shale oil in Middle–Lower Permian, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019,40(4):389–401.
- [4] 曹剑,雷德文,李玉文,等.古老碱湖优质烃源岩:准噶尔盆地下二叠统风城组[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.
- [5] 王绪龙.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. Geochemistry of source rock and petroleum in the Junggar Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [6] 何文军,钱永新,赵毅,等.玛湖凹陷风城组全油气系统勘探启示[J].新疆石油地质,2021,42(6):641–655.
He Wenjun, Qian Yongxin, Zhao Yi, *et al.* Exploration implications of total petroleum system in Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(6):641–655.
- [7] 雷德文,陈刚强,刘海磊,等.准噶尔盆地玛湖凹陷大油(气)区形成条件与勘探方向研究[J].地质学报,2017,91(7):1604–1619.
Lei Dewen, Chen Gangqiang, Liu Hailei, *et al.* Study on formation conditions and exploration fields of the Mahu giant oil(gas) province, Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2017,91(7): 1604–1619.
- [8] 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.
- [9] 向宝力,廖健德,周妮,等.吉木萨尔凹陷吉174井二叠系芦苇沟组烃源岩地球化学特征[J].科学技术与工程,2013,13(32):9636–9640.
Xiang Baoli, Liao Jiande, Zhou Ni, *et al.* Organic geochemical features of Permian source rock from Lucaogou Formation in Ji 174 Well of Jimsar Depression[J]. Science Technology and Engineering, 2013,13(32):9636–9640.
- [10] 张韩静,李素梅,高永进,等.准噶尔盆地东南缘二叠系芦苇沟组烃源岩有机地球化学特征[J].现代地质,2022,35(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,

- 35(6):1538–1550.
- [11] 谢建勇, 崔新疆, 李文波, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油效益开发探索与实践[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 99–110.
Xie Jianyong, Cui Xinjiang, Li Wenbo, *et al.* Exploration and practice of benefit development of shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 99–110.
- [12] 康积伦, 王家豪, 马强, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组细粒湖底扇沉积及其页岩油储层意义[J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 82–93.
Kang Jilun, Wang Jiahao, Ma Qiang, *et al.* Fine-grained sublacustrine fan deposits and their significance in shale oil reservoirs in the Lucaogou Formation in the Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 82–93.
- [13] 王俊超, 李嘉成, 陈希, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油立体井网整体压裂设计技术研究与实践[J]. 石油科技论坛, 2022, 41(2): 62–68.
Wang Junchao, Li Jiacheng, Chen Xi, *et al.* Research and practice of integrated fracturing design technology for 3D Well pattern of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Depression in Junggar Basin[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022, 41(2): 62–68.
- [14] 刘得光, 王屿涛, 杨海波, 等. 准噶尔盆地阜康凹陷及周缘凸起区的原油成因与分布[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 94–107.
Liu Deguang, Wang Yutao, Yang Haibo, *et al.* Genesis types and distribution of crude oil in Fukang Sag and its peripheral bulges, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 94–107.
- [15] 宋永, 杨智峰, 何文军, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱湖型页岩油勘探进展[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 60–72.
Song Yong, Yang Zhifeng, He Wenjun, *et al.* Exploration progress of alkaline lake type shale oil of the Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 60–72.
- [16] 李建忠. 第四次油气资源评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
Li Jianzhong. Fourth assessment for oil and gas resource[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [17] 国建英, 李志明. 准噶尔盆地石炭系烃源岩特征及气源分析[J]. 石油实验地质, 2009, 31(3): 275–281.
Guo Jianying, Li Zhiming. Study of gas source and characteristics of Carboniferous hydrocarbon source rock in the Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(3): 275–281.
- [18] 余腾孝, 曹自成, 徐勤琪, 等. 准噶尔盆地北部古生代构造演化与石炭系烃源岩[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 91–97.
Yu Tengxiao, Cao Zicheng, Xu Qinqi, *et al.* The Paleozoic tectonic evolution and the Carboniferous source rocks in the northern Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 91–97.
- [19] 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 system in the Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 397–408.
- [20] 李林, 陈世加, 杨迪生, 等. 准噶尔盆地滴水泉凹陷石炭系烃源岩生烃能力分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(4): 52–58.
Li Lin, Chen Shijia, Yang Disheng, *et al.* Hydrocarbon generation capacity analysis of Carboniferous source rocks in Dishuiquan Sag of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2013, 37(4): 52–58.
- [21] 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.
- [22] Cao Jian, Xia Liuwen, Wang Tingting, *et al.* An alkaline lake in the Late Paleozoic ice age (IPIA): a review and new insights into paleoenvironment and petroleum geology [J]. Earth Science Reviews, 2020, 202: 103091.
- [23] 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.
- [24] 柳双权, 张顺存, 戴龙, 等. 准噶尔盆地石炭系火山岩优质储层特征及主控因素[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(6): 786–794.
Liu Shuangquan, Zhang Shuncun, Dai Long, *et al.* Characteristics and main controlling factors of high quality carboniferous volcanic reservoirs in Junggar Basin[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014, 50(6): 786–794.
- [25] 秦小双, 师永民, 吴文娟, 等. 准噶尔盆地石炭系火山岩储层主控因素分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 54–60.
Qin Xiaoshuang, Shi Yongmin, Wu Wenjuan, *et al.* Analysis of predominant factors of volcanic reservoirs in Carboniferous of Junggar Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(1): 54–60.
- [26] 王京红, 靳久强, 朱如凯, 等. 新疆北部石炭系火山岩风化壳有效储层特征及分布规律[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 757–766.
Wang Jinghong, Jin Jiuqiang, Zhu Rukai, *et al.* Characters and distribution patterns of effective reservoirs in the Carboniferous volcanic weathering crust in northern Xinjiang[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 757–766.
- [27] 李宗浩, 侯磊, 李卉, 等. 准噶尔盆地石西凸起晚石炭世火山岩储层发育影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(4): 33–45.
Li Zonghao, Hou Lei, Li Hui, *et al.* Influencing factors of late Carboniferous volcanic reservoir development in Shixi Uplift, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(4): 33–45.
- [28] 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.
- [29] 张志杰, 袁选俊, 汪梦诗, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组碱湖沉积特征与古环境演化[J]. *石油勘探与开发*, 2018,45(6):972–984.
- Zhang Zhijie, Yuan Xuanjun, Wang Mengshi, *et al.* Alkaline-lacustrine deposition and paleoenvironmental evolution in Permian Fengcheng Formation at the Mahu Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6):972–984.
- [30] 李攀, 李永强, 经俭波, 等. 准噶尔盆地西北部P–T转换期不整合的发育演化特征及意义[J]. *古地理学报*, 2020,22(4):697–714.
- Li Pan, Li Yongqiang, Jing Jianbo, *et al.* Unconformities formed during the P–T transition in the northwestern Junggar Basin: nature, evolution and implications[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2020,22(4):697–714.
- [31] 唐勇, 徐洋, 李亚哲, 等. 玛湖凹陷大型浅水退覆式扇三角洲沉积模式及勘探意义[J]. *新疆石油地质*, 2018,39(1):16–22.
- Tang Yong, Xu Yang, Li Yazhe, *et al.* Sedimentation model and exploration significance of large-scaled shallow retrogradation fan delta in Mahu Sag[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2018, 39(1):16–22.
- [32] 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.
- [33] 张元元, 李威, 唐文斌. 玛湖凹陷风城组碱湖烃源岩发育的构造背景和形成环境[J]. *新疆石油地质*, 2018,39(1):48–54.
- Zhang Yuanyuan, Li Wei, Tang Wenbin. Tectonic setting and environment of alkaline lacustrine source rocks in the Lower Permian Fengcheng Formation of Mahu Sag[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2018,39(1):48–54.
- [34] 宋涛, 黄福喜, 汪少勇, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷侏罗系油气藏特征及勘探潜力[J]. *中国石油勘探*, 2019,24(3):341–350.
- Song Tao, Huang Fuxi, Wang Shaoyong, *et al.* Characteristics and exploration potential of Jurassic oil and gas reservoirs in Mahu Sag of the Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019,24(3):341–350.
- [35] 厚刚福, 宋兵, 倪超, 等. 致密油源储配置特征及油气勘探意义: 以四川盆地川中地区侏罗系大安寨段为例[J]. *沉积学报*, 2021,39(5):1078–1085.
- Hou Gangfu, Song Bing, Ni Chao, *et al.* Tight oil source–reservoir matching characteristics and its significance for oil and gas exploration: a case study of the Jurassic Da’anzhai member in the central Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021,39(5):1078–1085.
- [36] 雷海艳, 郭佩, 孟颖, 等. 玛湖凹陷二叠系风城组页岩油储层孔隙结构及分类评价[J]. *岩性油气藏*, 2022,34(3):142–153.
- Lei Haiyan, Guo Pei, Meng Ying, *et al.* Pore structure and classification evaluation of shale oil reservoirs of Permian Fengcheng Formation in Mahu Sag[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2022,34(3):142–153.
- [37] 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.
- [38] 陶士振, 李建忠, 柳少波, 等. 远源/次生油气藏形成与分布的研究进展和展望[J]. *中国矿业大学学报*, 2017,6(4):699–714.
- Tao Shizhen, Li Jianzhong, Liu Shaobo, *et al.* Formation condition, distribution law and exploration potential of far-source secondary oil and gas reservoirs[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017,6(4):699–714.
- [39] Ma Weijiao, Wei Yanzhao, Tao Shizheng. A method for evaluating paleo hydrocarbon pools and predicting secondary reservoirs: a case study of the Sangonghe Formation in the Mosuowan area, Junggar Basin[J]. *Petroleum Science*, 2018,15:252–269.
- [40] 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.