

引用: 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.

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

支东明¹ 李建忠¹ 杨帆² 康积伦³ 张伟³ 马强³ 陶林本³

(1 中国石油吐哈油田公司; 2 中国石油勘探开发研究院; 3 中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院)

摘要: 为了深入剖析吉木萨尔凹陷二叠系含油气系统, 对烃源岩、沉积物源体系、构造演化和源储时空匹配关系进行研究, 认为吉木萨尔凹陷二叠系具备形成全油气系统的地质条件。平面上由凹陷中部向边缘依次发育页岩油、致密油、常规砂砾岩油藏3个带, 纵向上围绕二叠系芦苇沟组优质烃源岩自下而上发育致密油、页岩油、常规砂砾岩油藏, 油气整体呈现“全油气系统”成藏特点。以该认识为指导, 3种类型油藏勘探均取得突破, 基本形成满凹含油、多层多类型油藏叠合有序共生态势。立足大平台、多套层系立体开发模式, 最大限度实现效益动用的思路和技术在实践中逐渐成熟。解剖吉木萨尔凹陷二叠系全油气系统地质特征、成藏模式和勘探开发实践, 对丰富全油气系统勘探理论, 指导相似富油凹陷的勘探开发具有重大意义。

关键词: 全油气系统; 有序共生; 立体开发; 二叠系; 吉木萨尔凹陷

中图分类号: TE112.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.04.002

Geological characteristics and exploration and development practice of the Permian full oil and gas system in Jimsar Sag, Junggar Basin

Zhi Dongming¹, Li Jianzhong¹, Yang Fan², Kang Jilun³, Zhang Wei³, Ma Qiang³, Tao Linben³

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

Abstract: Based on the study of source rock, sediment source system, tectonic evolution and dynamic matching relationship between hydrocarbon source and reservoir, the Permian oil and gas bearing system in Jimsar Sag is analyzed in detail. The study results indicate that the Permian in Jimsar Sag has favorable geological conditions for forming full oil and gas system. On the plane, shale oil, tight oil, conventional glutenite oil reservoirs are distributed in sequence from the central to the marginal sag, and tight oil, shale oil, conventional glutenite oil reservoirs are distributed upward around the high-quality source rock in Lucaogou Formation, showing the overall hydrocarbon accumulation characteristics of “full oil and gas system”. Guided by this understanding, breakthroughs have been made in the exploration of three types of oil reservoirs, basically forming a pattern of oil bearing in the whole sag and orderly co-occurrence and superposition of multi-layer and multi type oil reservoirs. By applying the large platform and multi-layer stereoscopic development mode, the exploration idea and technology for maximizing the benefit resource utilization are gradually mature in practice. The detailed analysis of geological characteristics, hydrocarbon accumulation pattern, and exploration and development practice of the Permian full oil and gas system in Jimsar Sag is of great significance for

基金项目: 新疆维吾尔自治区“天山英才”科技创新领军人才支持项目“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); 中国石油天然气股份有限公司科技项目“三塘湖—准东二叠系页岩油勘探开发理论与关键技术研究”(2021DJ1807)。

第一作者简介: 支东明(1971-), 男, 上海人, 硕士, 2009年毕业于西南石油大学, 教授级高级工程师, 现主要从事石油地质综合研究及油气勘探方面的工作。地址: 新疆哈密市伊州区吐哈石油基地中国石油吐哈油田公司, 邮政编码: 839009。E-mail: zhidm@petrochina.com.cn

通信作者简介: 杨帆(1984-), 男, 湖北荆州人, 博士, 2010年毕业于中国地质大学(北京), 高级工程师, 现主要从事油气地质及勘探评价工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 邮政编码: 100086。E-mail: yf2010@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-04-26; 修改日期: 2023-07-10

enriching the exploration theory of the full oil and gas system and guiding the exploration and development in similar oil rich sags.

Key words: full oil and gas system, orderly co-occurrence, stereoscopic development, Permian, Jimsar Sag

0 引言

近年随着非常规油气勘探开发突破, 常规与非常规油气成藏机理、关键控制要素和空间展布规律成为新的研究课题, 逐步形成常规—非常规油气有序聚集的全油气系统相关理论^[1-3], 其核心理论内涵和外延也在不断地发展完善。1995年Magoon首次提出全油气系统概念, 指以一个正在生烃或曾经生烃的烃源岩聚集区为源, 所有已发现和未发现的相关油气(油气苗、油气显示、油气藏), 以及对油气聚集至关重要的所有地质要素(烃源岩、储集岩、围岩和盖层)和过程(油气生、运、聚及圈闭的形成)的总和^[4]。2014年邹才能等在研究国内外常规与非常规油气关系的基础上, 首次提出“常规—非常规油气有序聚集”理论, 认为在含油气单元(盆地、坳陷或凹陷)内, 由于富有机质烃源岩热演化生排烃与不同类型储层的储集空间随埋深演化全过程耦合, 使油气在时间域持续充注、空间域有序分布, 常规油气与非常规油气空间共生, 形成常规—非常规油气聚集体系^[1]。唐勇等在系统梳理玛湖凹陷勘探历程后提出了二叠系风城组全油气系统概念, 认为自凹陷周缘斜坡区到凹陷区, 呈现成熟常规油藏、中—高成熟致密油、中—高成熟页岩油的有序共生特征^[5-9]。根据这些理论认识, 常规油气的发现预示着供烃方向有非常规油气共生, 而非常规油气的发现则预示着外围空间可能有常规油气共存, 这对揭示盆地内常规与非常规油气藏分布规律, 指导油气勘探高效发展具有革命性意义。

目前的全油气系统重点强调了烃源岩层段的平面上不同相带有序分布、不同类型油气藏有序聚集, 较少考虑到烃源岩层系以外的地层, 尤其是源下油气成藏方面鲜有涉及。从吉木萨尔凹陷二叠系油气勘探来看, 不仅在平面上体现了以芦草沟组为源的全油气系统成藏特点, 在纵向上也存在油气有序共生的特征。先后在吉木萨尔凹陷斜坡区、凹陷区发现吉7区块梧桐沟组砂砾岩稠油油藏和芦草沟组页岩油两大规模储量区^[10-13]。近年来通过梳理吉木萨尔凹陷成藏要素空间动态匹配关系, 提出吉木萨尔凹陷二叠系具有平面、纵面全油气系统成藏的特点。在这个思路指导下, 在芦草沟组页岩油高部位发现了常规砂砾岩油藏, 在芦草沟组上、下均发现了规模油气储量。本文

对吉木萨尔凹陷全油气系统的油气地质条件、成藏模式等进行系统研究, 以期进一步丰富全油气系统勘探理论体系, 为类似富油气凹陷油气勘探提供新思路。

1 区域地质背景

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东部隆起区, 是在石炭纪褶皱基底上发育的一个西断东超的箕状凹陷, 东西长约60km, 南北宽50km, 面积约3000km²。吉木萨尔凹陷构造东高西低, 三面被断层分割, 其中西面以西地断裂为界与北三台凸起相接, 北面以吉木萨尔断裂和青1井南断裂为界与沙奇凸起、北三台凸起毗邻, 南面以三台断裂为界与吉南凸起相接, 向东表现为一个逐渐抬升的斜坡, 过渡到古西凸起上, 凹陷中心位于西地断裂附近(图1a)。

吉木萨尔凹陷地层发育齐全, 自下而上发育石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系, 最大厚度约5000m。石炭系为滨浅海相、海陆交互相泥岩、碳质泥岩和火山岩建造。二叠系自下而上发育中二叠统乌拉泊组(P₂w1)、井井子沟组(P₂jj)、芦草沟组(P₂l)和上二叠统梧桐沟组(P₃wt)(图1b)。乌拉泊组和井井子沟组主要岩性为灰绿色、灰色厚层中—细粒长石砂岩, 以及含砾砂岩、凝灰质砂岩, 岩层中可见波痕、泥裂等沉积构造。芦草沟组主要为一套咸化湖泊沉积, 地层厚度为200~350m, 凹陷边缘以砂砾岩为主, 斜坡区、凹陷区发育砂岩、泥岩、碳酸盐岩的混积岩, 是凹陷最主要的烃源岩, 也是页岩油赋存层系, 烃源岩厚度为100~250m。上二叠统梧桐沟组主要为砂砾岩、含砾砂岩、中—粗砂岩、泥岩沉积。二叠系3套地层组成了储—源—储结构, 是区域最重要的成藏组合^[14-16]。三叠系主要由厚层红褐色泥岩、砂岩、粉砂岩组成, 属干旱背景下湖泛平原沉积。侏罗系为一套含煤碎屑岩系, 不整合覆盖在三叠系、二叠系及石炭系之上。白垩系局限分布在凹陷以西地区, 在凹陷中部剥蚀尖灭。古近系主要分布于南部地区, 新近系、第四系广泛分布, 与白垩系、侏罗系等地层不整合接触。

吉木萨尔凹陷先后经历了海西期、印支期、燕山期、喜马拉雅期4期构造运动^[17-18]。凹陷的雏形形成于海西期, 石炭纪末期, 准东地区整体为拉张环境, 在凹陷周缘形成边界断裂, 北部沙奇凸起、东部古西

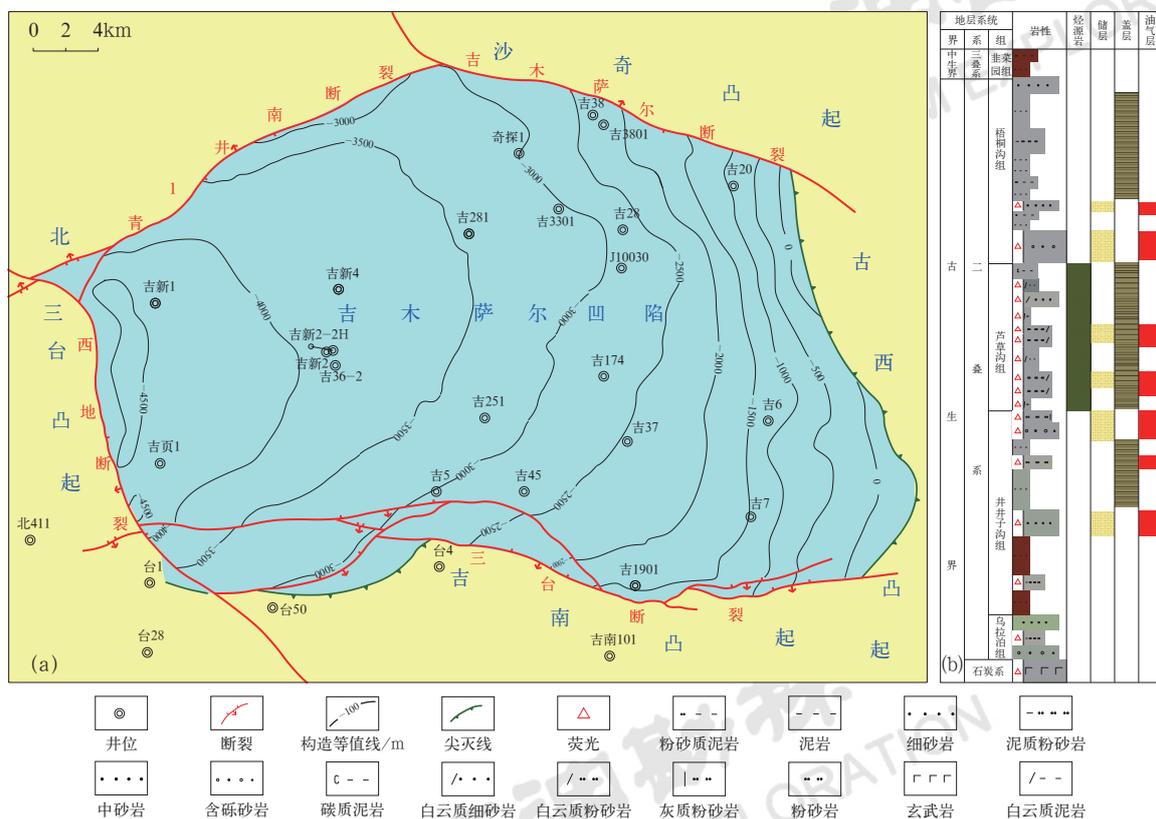


图1 吉木萨尔凹陷地质概况图

Fig.1 Geological overview of Jimsar Sag
(a) 芦草沟组底界构造图; (b) 二叠系综合柱状图

凸起已经隆升, 博格达地区为海槽环境, 吉木萨尔凹陷与博格达海槽、阜康凹陷沉积环境一致。石炭纪末期—早二叠世, 塔里木板块与准噶尔地块强烈碰撞, 博格达海槽关闭, 海水逐渐退出准噶尔地块, 准东地区发生东西向挤压, 北三台凸起开始形成, 吉木萨尔凹陷整体抬升, 下二叠统由阜康凹陷逐渐向北三台凸起超覆尖灭。中一晚二叠世, 准东地区进入拉张沉降阶段, 吉木萨尔凹陷接受井井子沟组和芦草沟组沉积。晚二叠世以后, 准东地区进一步抬升, 吉木萨尔凹陷周缘的凸起遭受大范围剥蚀, 为吉木萨尔凹陷内形成稳定沉积提供充足物源, 盆地原来隆坳错落的格局已基本填平补齐。三叠纪至今, 吉木萨尔凹陷进入了整体沉积—抬升的振荡发展阶段, 形成了三叠系与侏罗系之间的区域性不整合。

2 全油气系统地质特征

吉木萨尔凹陷二叠系为凹陷背景下湖泊建造体系, 芦草沟组发育规模优质烃源岩, 紧贴烃源岩上、下均发育碎屑岩储层, 形成独特的三明治结构。同时多期构造运动在二叠系内部形成复杂的断裂体系, 为油气纵向输导提供了通畅运移通道, 具备形成全油气

系统基本特征。

2.1 芦草沟组发育咸化湖盆优质烃源岩

芦草沟组烃源岩是中国最为古老的陆相烃源岩层系之一, 是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。凹陷区已钻井均钻遇芦草沟组烃源岩, 其自下而上又可细分为芦一段 (P_{21})、芦二段 (P_{22}) (图2), 主体分布在凹陷中心, 向周边逐渐减薄, 厚度大于200m的有利区面积达800km² (图3)。

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%, 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%, S_1+S_2 平均为 29.36mg/g, 大部分为 I 型和 II₁ 型, 少数为 II₂ 型。除了常规的暗色泥岩、富含有机质的碳酸盐岩具有生烃能力外, 作为非常规储层的泥质粉砂岩也具有一定的生烃能力, 以镜质组和惰质组为主, 有机质类型以 II 型为主, TOC 平均为 3.62%, S_1+S_2 平均为 20.1mg/g, I_H 大多大于 350mg/g, R_o 主体

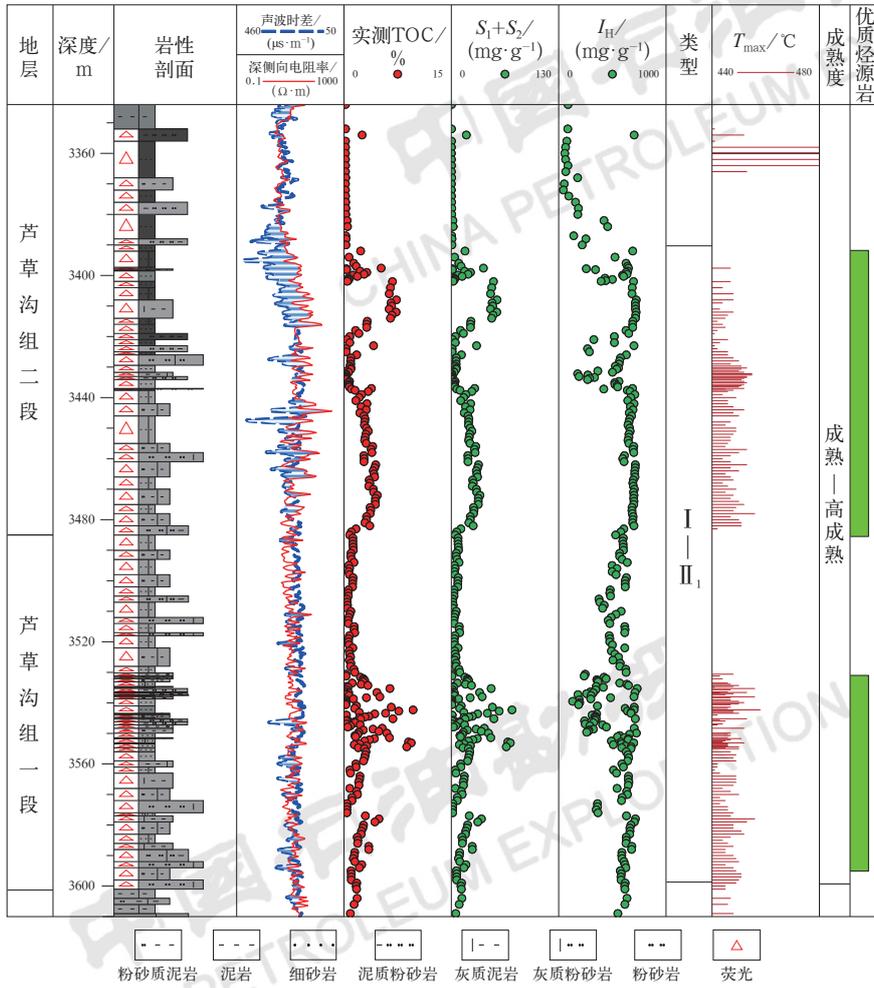


图 2 吉 3301 井芦草沟组地球化学综合柱状图

Fig.2 Comprehensive geochemical column of Lucaogou Formation in Well Ji3301

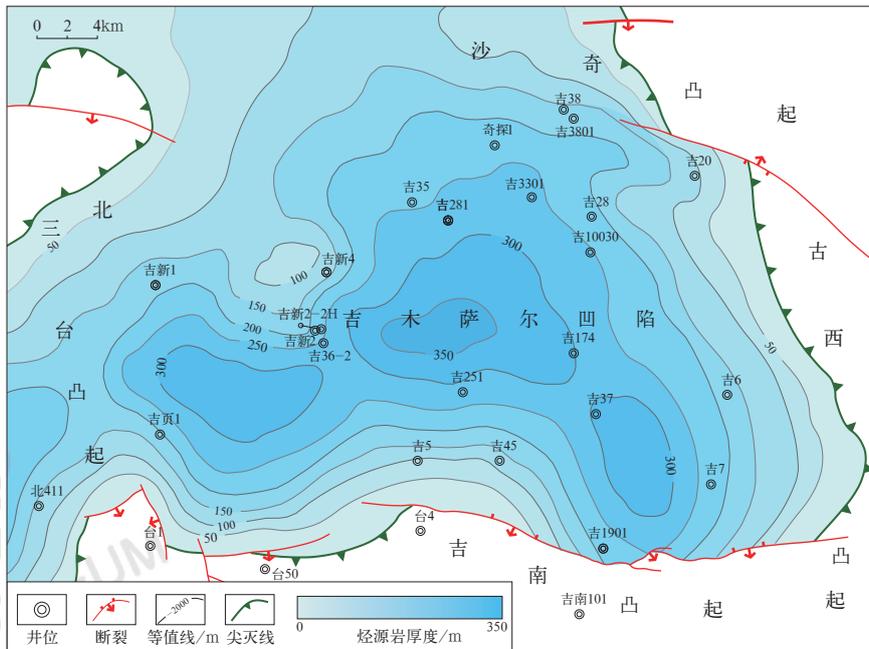


图 3 吉木萨尔凹陷芦草沟组烃源岩厚度图

Fig.3 Thickness map of source rock in Lucaogou Formation in Jimsar Sag

介于0.65%~1.16%， T_{\max} 平均为441.6℃，整体评价为有机质丰度高、类型好、低成熟—成熟的优质烃源岩。

热演化史模拟结果显示，三叠纪中期烃源岩埋深已达到低成熟油气生排烃门限；在早—中侏罗世，芦草沟组达到生油高峰期；在晚侏罗世末期—古近纪，受燕山—喜马拉雅构造活动影响，芦草沟组成熟烃源岩大量排烃。芦草沟组和梧桐沟组储层中烃类包裹体研究证实，吉木萨尔凹陷至少存在两期成藏：第一期包裹体均一温度为65℃，对应的成藏时间为侏罗纪；第二期包裹体均一温度为120℃左右，对应的成藏时间为白垩纪—早古近世^[19-20]。

2.2 二叠系发育多旋回沉积体系

二叠纪是准噶尔盆地的重要变革时期，由早期的海陆过渡相逐渐变为陆相环境，海水自西向东退去，在阜康断裂带边缘残留有局限海盆。早—中二叠世，博格达地区为稳定深湖沉积区，吉木萨尔凹陷和吉南凹陷基本连通，之间夹有吉南凸起，为吉木萨尔凹陷提供有限的物源。古西凸起控制吉木萨尔凹陷东部沉积，沙奇凸起控制吉木萨尔东北部沉积，北三台凸起控制吉木萨尔西部沉积。中二叠统井子沟组沉积时期，吉木萨尔凹陷表现为北高南低，沙奇凸起与古西凸起对凹陷沉积格局控制强烈，沙奇凸起与吉木萨尔凹陷为断层接触，坡度相对较缓，控制该区域辫状河三角洲沉积（图4a）；吉南凸起与吉木萨尔凹陷为断层接触，呈箕状断陷样式；吉木萨尔凹陷与东部古西凸起、西部北三台凸起之间为缓坡，以辫状河三角洲沉积为主。

中二叠统芦草沟组沉积时期构造整体平缓，处于最大湖泛时期。古西凸起稳定隆升，吉南凸起表现为水下低凸起。芦草沟组沉积期，吉木萨尔凹陷周缘以扇三角洲沉积体系为主，但沉积规模萎缩，凹陷内主要发育咸化湖盆背景下的粉—细砂岩、泥岩、碳酸盐岩的混积沉积，仅在斜坡高部位存在扇三角洲沉积（图4b）。

上二叠统梧桐沟组沉积时期，博格达山的隆升导致构造—沉积格局发生反转，吉木萨尔凹陷整体构造变为南高北低，北三台凸起倾没；古西凸起稳定隆起，控制吉南凸起、吉木萨尔凹陷东部沉积。吉南凸起受博格达山隆升的影响，隆起幅度减小，此时可能为水下低凸起，基本不供源。沙奇凸起控制吉木萨尔凹陷东北部沉积。扇三角洲沉积主要来自南部博格达山物源、吉南凸起物源和古西凸起物源，凹陷南部自

博格达山运输而来的扇三角洲主要分为3个扇体，该扇体在根部为长轴状，前端形成朵状，代表了较远的搬运距离和较强的物源特征^[21-22]。沙奇凸起西侧发育鸟足状扇三角洲，且规模小。沙奇凸起东侧形成两支规模较小的鸟足状扇体伸入吉木萨尔凹陷。吉木萨尔凹陷东南部的大型扇三角洲沉积来自吉南凸起物源，该扇体由吉南凸起和古西凸起边界断层交叉部位入湖，呈朵状展布（图4c），是梧桐沟组最主要的沉积体系。

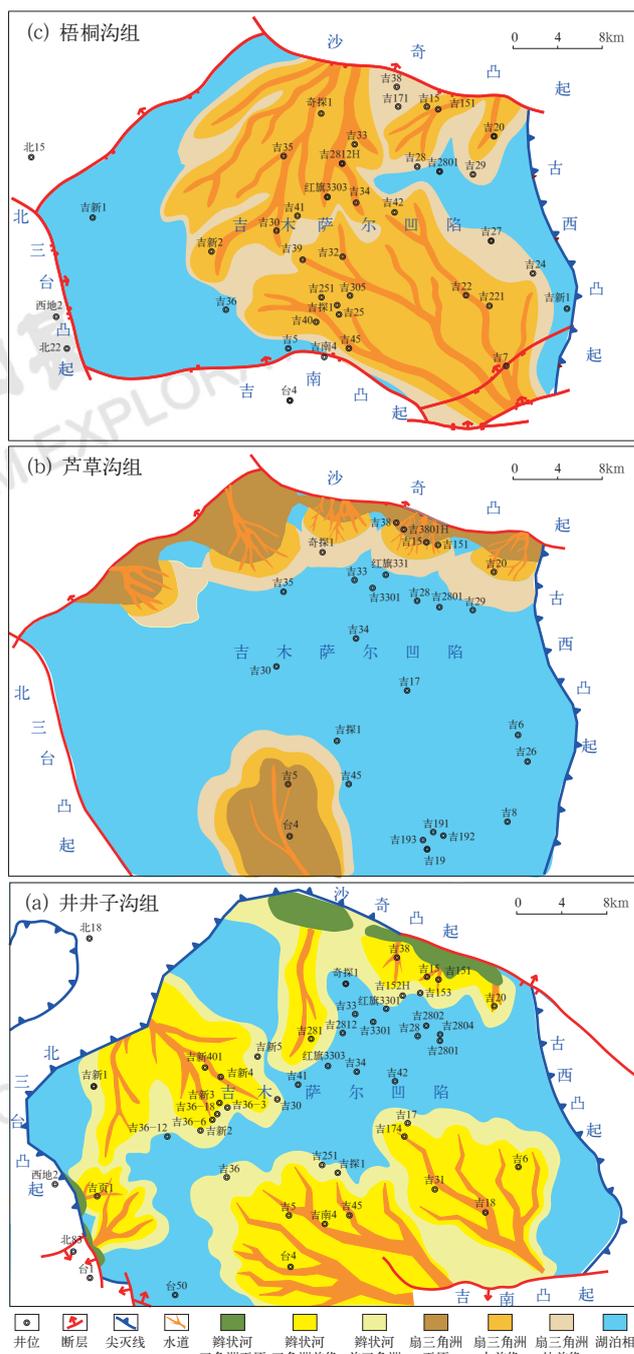


图4 吉木萨尔凹陷二叠系沉积相图

Fig.4 Sedimentary facies map of the Permian in Jimsar Sag

2.3 二叠系常规—非常规储层时空有序分布

纵向上二叠系储层由井井子沟组致密砂岩，过渡为芦苇沟组混积岩、砂砾岩，梧桐沟组又沉积了厚层砂岩、砂砾岩。平面上芦苇沟组沉积建造较为复杂，岩石类型有陆源碎屑岩、内源碳酸盐岩和蒸发岩，各种岩性横向有序分布。

井井子沟组发育辫状河三角洲沉积砂岩储层，纵向上主要发育两套砂体，上砂组在凹陷边部发育，以中—细砂岩为主，砂体厚度为60~111m，孔隙度为6.6%~13.2%，平均为9.6%，渗透率为0.055~1.69mD，平均为0.46mD，属中低孔、特低渗储层；下砂组主要发育于凹陷中部，以细砂岩、含砾砂岩为主，砂体厚度为40~80m，孔隙度为9.0%~15.0%，平均为12.4%，渗透率为0.05~1.00mD，平均为0.34mD，储层具有低孔、特低渗特征。储集空间以粒间孔为主，少量粒内溶孔，分布不均匀，孔隙连通性一般（图5a、b）。

芦苇沟组的常规砂砾岩储层分布于吉木萨尔凹陷边缘，埋深较浅，以扇三角洲平原沉积为主，单层厚度为3.6~18.8m，累计厚度为30~174m，储层孔隙度为2.4%~13.4%，平均为8.32%，渗透率为0.01~87.4mD，平均为0.17mD，储集空间以微孔、粒内溶孔、构造缝、贴粒缝为主（图5c、d），表现为低孔、特低渗致密储层特征。斜坡区扇三角洲前缘主要发育含砾粗砂岩。前扇三角洲以灰质、云质砂岩为主，是致密油的主要发育区，2023年在斜坡区部署的风险井奇探1井芦苇沟组钻遇近100m厚的灰质

粉砂岩，压裂后3mm油嘴最高日产油66.45m³，储层孔隙度为5.0%~17.83%，平均为11.26%，渗透率为0.08~1.43mD，平均为0.49mD。凹陷区发育页岩油，为一套咸湖沉积背景受机械沉积作用和化学沉积作用共同控制的由砂砾岩、粉—细砂岩、泥岩和碳酸盐岩混合堆积的混积岩^[23-24]，页理发育，发育上下两套甜点富集区，储层单层厚度为3~8m，累计厚度为42~84m，储层孔隙度为2%~14.9%，平均为8.1%，渗透率为0.005~6.31mD，平均为0.002mD，储集空间有残余粒间孔、粒内溶孔、晶间孔及微米—纳米孔、粒间溶孔（图5e—g）。

梧桐沟组自下而上划分为梧一段（P₃wt₁）和梧二段（P₃wt₂），纵向上表现为水进过程，具有下粗上细、下厚上薄的特征。储层主要为砂砾岩、含砾砂岩、中—粗砂岩，黏土矿物以粒表不规则的伊/蒙混层、蠕虫状高岭石为主，含少量的绿泥石和伊利石^[25]。碎屑颗粒分选好—中等，磨圆为次圆状—次棱角状。胶结类型以接触—孔隙、压嵌—孔隙为主，颗粒接触方式以线一点接触为主，胶结、压实程度均较低。凹陷中心储层较为致密，孔隙度为5.3%~10%，平均为8.11%，渗透率为0.011~1.34mD，平均为0.18mD，储集空间以微孔为主，如吉新2区块。凹陷边缘以常规砂砾岩为主，孔隙度为4%~22.3%，平均为15.82%，渗透率为0.0062~344mD，平均为30.42mD，储集空间类型以剩余粒间孔为主，孔喉连通性好（图5h、i），如吉7区块、吉19区块。

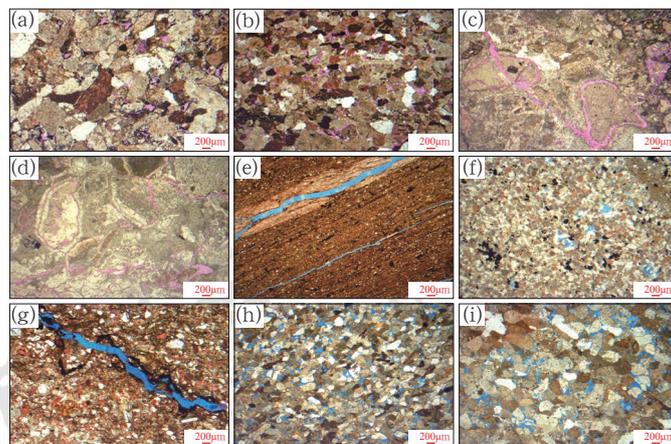


图5 吉木萨尔凹陷二叠系储层镜下特征图

Fig.5 Microscopic characteristics of the Permian reservoirs in Jimsar Sag

(a) 吉新2井, P₂jj, 4588.58m, 中—细粒岩屑砂岩, 粒间孔; (b) 吉新4井, P₂ji, 4525.08m, 粗—中粒岩屑砂岩, 粒间孔; (c) 吉3801井, P₂l, 2684.4m, 含砾粗砂岩, 构造缝、贴粒缝、溶蚀缝; (d) 吉3801井, P₂l, 2692.77m, 含砾粗粒岩屑砂岩, 微孔、构造缝、贴粒缝; (e) 吉2801井, P₂l, 3058.73m, 含碳酸盐粉砂岩, 纳米孔、溶蚀缝; (f) 吉2801井, P₂l, 3046.87m, 云质粉砂岩, 粒内溶孔; (g) 吉3301井, P₂l, 3546.17m, 含凝灰质粉—细砂岩, 溶蚀缝; (h) 吉1901井, P₃wt, 2117.54m, 不等粒岩屑砂岩, 粒间孔; (i) 吉1901井, P₃wt, 2116.83m, 中—粗粒岩屑砂岩, 粒间孔、粒内溶孔

3 全油气系统成藏模式

吉木萨尔凹陷二叠系油气分布具有常规—非常规全油气系统有序共生和序次成藏的特征。平面上，凹陷区的页岩油、斜坡区的高成熟致密油，以及凹陷边缘的常规砂砾岩稠油油藏有序共生。纵向上，受

上二叠统梧桐沟组湖泛泥岩顶板和中二叠统井井子沟组泥岩底板遮挡，形成以芦草沟组为烃源岩的油气成藏组合，上部以梧桐沟组常规砂砾岩油藏为主，下部发育井井子沟组致密砂岩油藏，芦草沟组发育源内页岩油、近源致密油和源边常规油藏（图6）。

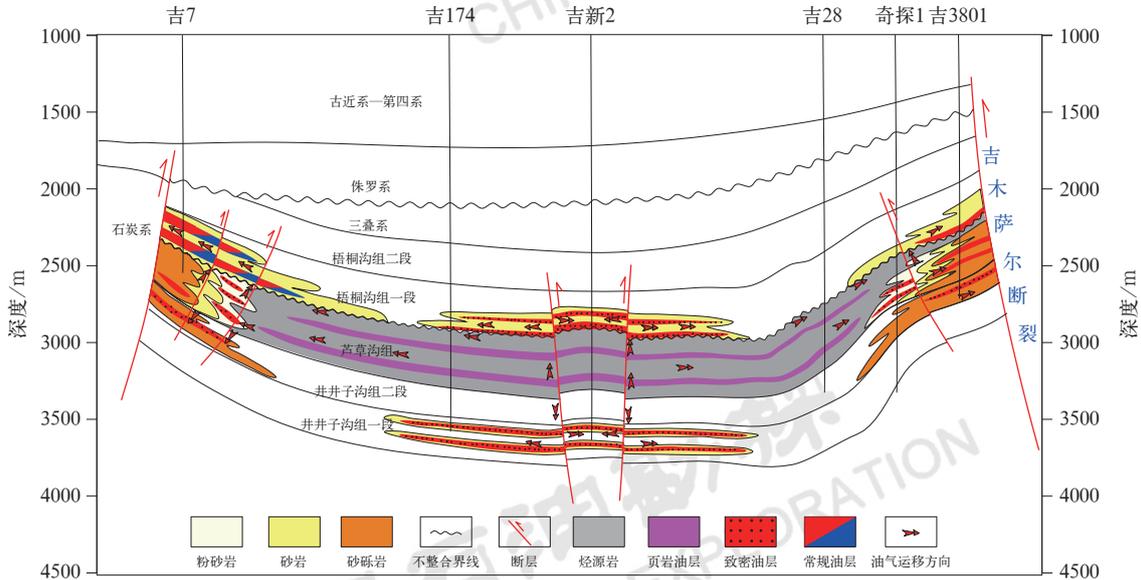


图6 吉木萨尔凹陷全油气系统成藏模式图

Fig.6 Hydrocarbon accumulation pattern of the full oil and gas system in Jimsar Sag

3.1 源储一体页岩油

页岩油主要分布在凹陷区和斜坡低部位，源内自生自储，大面积连续分布。原油在生烃增压驱动下，以游离态、吸附态经过短距离初次运移聚集于泥质页岩、云质粉砂岩储集体中，芦草沟组发育的层理缝、构造缝、压溶缝合线、晶间孔和广泛分布的微—纳米级孔喉系统为原油运移、聚集提供通道和储集空间，构成自生自储、源储一体的页岩油成藏模式（图6）。在吉木萨尔凹陷区已经发现10亿吨级页岩油，预测有利含油面积614km²（图7）。

3.2 源储紧邻致密油

在吉木萨尔凹陷，致密油储层与烃源岩侧向接触、纵向紧邻，近源聚集成藏，主要有两种类型，第一种为源下井井子沟组致密砂岩油藏，主要发育在构造活动区，断层错断地层，造成芦草沟组烃源岩与下伏井井子沟组侧向对接，在生烃增压作用下，油气从烃源岩经过短距离运移后聚集成藏，例如吉新2区块。该类油藏平面受有利储层、构造、盖层共同控制，有明显的圈闭外形，其本质是储层比较致密的常规油

气藏，以浮力成藏为主，油水分离作用造成油气在高部位聚集。第二种为芦草沟组扇三角洲前缘外带致密油，储层以云质粉砂岩为主，孔隙度为11.26%，渗透率为0.49mD，微米—纳米晶间孔发育，由于长英质、碳酸盐等脆性矿物含量较高，微裂缝较发育。呈游离态的油气受压差驱动，顺层侧向运移至致密储层中，在微米—纳米高毛细管阻力控制下形成“自封闭”体系。此类致密油藏表现为整体含油、局部富集的特点，受储层非均质性影响较大。部分储层微孔隙发育，连通性差，毛细管阻力较大，油气需克服更大的毛细管阻力驱替地层水，造成局部含油饱和度低。

根据烃源岩、构造、砂体3个因素，初步圈定吉新2—吉新1区块井井子沟组、吉38区块芦草沟组、奇探1区块芦草沟组3个致密油有利区带，预测有利勘探面积503km²、资源量2×10⁸t（图7）。

3.3 源储分离常规油藏

常规油藏主要分布在芦草沟组高部位和上覆梧桐沟组，代表性油藏是吉15区块、吉7区块和吉19区块梧桐沟组砂砾岩油藏。在盆地挤压应力和凹陷中部拉伸应力的共同作用下，吉木萨尔凹陷发育一系列北

东向、近南北向断裂，沟通芦草沟组烃源岩与上部砂砾岩储层^[26-27]，形成良好的油气垂向运移通道，与梧桐沟组横向展布的扇三角洲储集体共同构成了油气的立体输导体系，在盆缘形成大面积的常规油气富集带。该类油藏油质稠，原油密度为 $0.90\sim 0.93\text{g}/\text{m}^3$ ，有明

显的油水界面，油气以浮力为运移动力，以油水驱替成藏为特征，形成以圈闭为单元的常规油藏。储层岩性多以砂岩、砂砾岩为主，物性普遍较好，集中分布在吉木萨尔凹陷东南部，预测有利含油面积 65km^2 、资源量达 $1\times 10^8\text{t}$ （图7）。

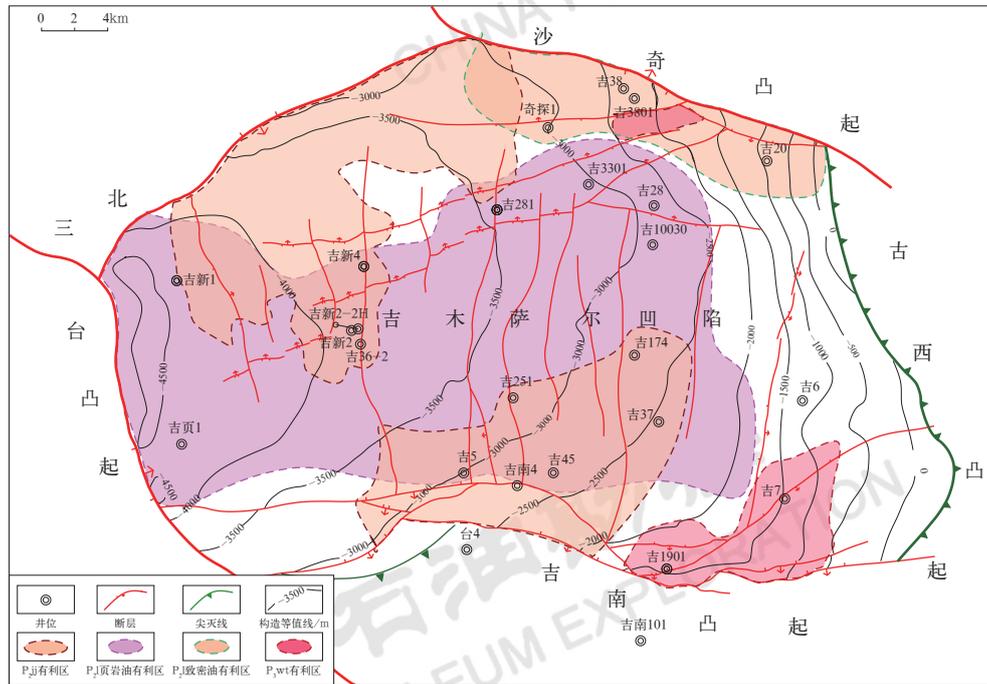


图7 吉木萨尔凹陷成藏有利区划分图

Fig.7 Favorable zones for hydrocarbon accumulation in Jimsar Sag

4 勘探开发实践

针对吉木萨尔凹陷二叠系全油气系统油气多层系、多类型纵向叠置、横向连片特征，勘探开发一体化整体布局，总体思路是用常规带动非常规、先易后难，通过立体动用实现油藏全生命周期效益动用。探井尽可能钻穿多套油层，分层测试，达到资源发现、平面控藏目的；评价立足控制规模、攻关单井提产技术；开发尽可能用大平台实现多套油藏动用、智能化管理降低操作成本。

4.1 页岩油勘探开发实践

2011年吉25区块在芦草沟组页岩油获重大突破后，按照直井控面、水平井提产、平台降本思路，经过4轮勘探评价和效益动用攻关取得丰硕成果^[27]，其中优质甜点区目前基本能实现效益动用。

通过深化四品质15项参数研究^[28-29]，基本明确了优质甜点资源潜力。油藏评价利用探井平台钻探水平井来攻关效益动用技术，主要通过优化轨迹提高

优质甜点钻遇率、钻井提速、压裂方案优化和注 CO_2 等新技术运用，形成了页岩油水平井钻井、体积压裂等效效益动用配套技术。效益开发方面在立体井网、立体动用原则下，持续攻关大平台、水平井、小井距、密切割、工厂化主体技术，建立了吉28区块19口井的试验区，不断优化相关参数，基本形成了上下甜点两套开发层系、水平井大液量蓄能体积压裂、井距200m、水平段长1450~2000m、上下甜点立体交错井网开发主体技术，同时通过充分引进社会化服务、地面优化智能化管理，大幅降低操作成本，形成效益动用配套技术。

通过持续攻关，3500m以浅优质甜点区在水平段长1500m、压裂规模 $4\times 10^4\text{m}^3$ 条件下基本能实现55美元/bbl国际油价下的效益开发。

4.2 源上常规岩性油藏勘探开发实践

源上梧桐沟组油藏针对南北两大岩性油藏发育区，勘探紧紧围绕沉积体系、油源断层、有效储集体预测和有利圈闭落实开展研究。南部区块已经发现了

吉7和吉19岩性油藏;北部区块储层非均质性较强,断层切割较为破碎,油藏比较复杂,目前吉281和吉36-2等井已经获得工业油流,有望实现连片。

梧桐沟组源上常规岩性油藏主要采用常规注水开发,在吉7区块通过注采井网完善,采用温和注水、立体井网已经实现了效益开发,采出程度已经达到18%。目前年产原油 35×10^4 t,整体开发效益好。

4.3 源下致密油勘探开发实践

源下致密油藏的勘探主要从源储匹配关系、输导体系描述和致密储层甜点预测3个方面入手,围绕井井子沟组沉积体系和成熟烃源岩的匹配关系,优选双吉构造带钻探吉36-6井,压裂后获得最高日产油10.2t的工业油流,首次在吉木萨尔凹陷发现井井子沟组油藏。部署吉新4井、吉新2-2H井均获高产油流,其中吉新2-2H井获日产油50.19t。初步圈定构造—岩性有利圈闭面积85.4km²,是凹陷区除页岩油外最具规模的接替领域。该类油藏整体表现为储层致密,常规测试不出油,改造后油水同出,早期采用直井多段压裂,但试采产量较低,可采用水平井+体积压裂方式来实现效益动用。

4.4 源边侧接型致密油勘探开发实践

源边芦苇沟组侧接型致密油藏主要分布在凹陷北部,勘探着重描述扇三角洲储层的非均质性,寻找有利相带。扇三角洲平原亚相砂砾岩和前缘亚相砂岩储层,针对“储层厚度大、物性致密、非均质强,直井常规测试不出,压裂后初期高产,后期递减快”的特征,采用水平井+体积压裂提产,单井稳定产量超过20m³/d,吉38—吉15区块初步圈定有利勘探面积54km²。扇三角洲前缘—前扇三角洲亚相粉砂岩、云质砂岩储层,直井压裂试油呈“高产稳产、含水低”特征,可采用直井+体积压裂方式来实现效益动用,奇探1井直井压裂排采日产油66.45m³,压力稳定,供液能力强。

5 结论

(1) 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系具备全油气系统成藏条件,以芦苇沟组优质烃源岩为中心,源上、源下发育多套有利储层,后期多期构造运动形成两组断层沟通成熟烃源岩与储层,以梧桐沟组顶部区域泥岩为顶板,以井井子沟组底部泥岩为底板,形成了页岩油—致密油—常规油藏空间有序分

布的全油气系统。

(2) 构建了吉木萨尔凹陷二叠系全油气系统油气成藏模式,指导3种类型油藏勘探取得新突破,平面上有四大潜力区带,满凹含油、多层多类型油藏叠合有序共生的态势基本形成,平面上由凹陷中部向边缘依次分布页岩油、致密油、常规砂砾岩油藏3个带。

(3) 探索全油气系统多套多类型油藏立体高效勘探开发取得新成效,勘探开发一体化整体考虑,探井尽可能钻穿多套油层,每一套油层尽可能单独试油试采。开发遵循常规带动非常规、先易后难,用大平台通过立体动用实现油藏全生命周期效益动用。

参考文献

- [1] 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):14-25.
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):14-25.
- [2] 邹才能,陶士振,白斌,等.论非常规油气与常规油气的区别和联系[J].中国石油勘探,2015,20(1):1-16.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Bai Bin, et al. Differences and relations between unconventional and conventional oil and gas[J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(1):1-16.
- [3] 贾承造.论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J].石油勘探与开发,2017,44(1):1-11.
Jia Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017,44(1):1-11.
- [4] Magoon L B. The play that complements the petroleum system: a new exploration equation[J]. The Oil & Gas Journal, 1995,93(40):85-87.
- [5] 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(1):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 Geology, 2021,42(1):1-9.
- [6] 支东明,唐勇,何文军,等.准噶尔盆地玛湖凹陷凤城组常规—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.
- [7] 何文军,钱永新,赵毅,等.玛湖凹陷凤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.
- [8] 宋永,杨智峰,何文军,等.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系凤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.
- [9] 秦勇, 李保柱, 胡水清, 等. 玛湖凹陷致密砾岩油藏四维地应力场模拟研究与应用[J]. 石油科技论坛, 2022,41(2):23-31.
Qin Yong, Li Baozhu, Hu Shuiqing, *et al.* Numerical simulation of four-dimensional stress field for tight glutenite reservoir in Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022,41(2):23-31.
- [10] 谢建勇, 崔新强, 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.
- [11] 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.
- [12] 杨智, 侯连华, 林森虎, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油、页岩油地质特征与勘探潜力[J]. 中国石油勘探, 2018,23(4):76-85.
Yang Zhi, Hou Lianhua, Lin Senhu, *et al.* Geologic characteristics and exploration potential of tight oil and shale oil in Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2018,23(4):76-85.
- [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 shale oil in Middle-Lower Permian, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019,40(4):389-401.
- [14] 梁世君, 罗功生, 康积伦, 等. 准噶尔盆地吉南凹陷萨探1井风险勘探突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2021,26(4):72-83.
Liang Shijun, Luo Quansheng, Kang Jilun, *et al.* Breakthrough and significance of risk exploration in Well Satan 1 in Jinan Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4):72-83.
- [15] 方世虎, 宋岩, 徐怀民, 等. 构造演化与含油气系统的形成:以准噶尔盆地东部吉木萨尔凹陷为例[J]. 石油实验地质, 2007,29(2):149-153.
Fang Shihu, Song Yan, Xu Huaimin, *et al.* Relationship between tectonic evolution and petroleum system formation: taking the Jimsar Sag of eastern Junggar Basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007,29(2):149-153.
- [16] 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.
- [17] 王斌. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷岩性油藏形成条件及勘探技术分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
Wang Bin. Analysis of lithologic oil deposit formation condition and exploration technology of Jimusar Sag of Junggar Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [18] 胡宗全, 郑伦举, 申宝剑, 等. 非常规与常规统一的含油气系统之初探[J]. 地质论评, 2021,67(4):1007-1020.
Hu Zongquan, Zheng Lunju, Shen Baojian, *et al.* Preliminary study on unconventional and conventional oil-bearing gas systems[J]. Geological Review, 2021,67(4):1007-1020.
- [19] 郑民, 李建忠, 王文广, 等. 致密储层石油充注成藏过程分析:以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 地球科学, 2018, 43(10):3719-3732.
Zheng Min, Li Jianzhong, Wang Wenguang, *et al.* Analysis of oil charging and accumulation processes in tight reservoir beds: a case study of Lucaogou Formation in Jimsar Sag of Junggar Basin, NW China[J]. Earth Science, 2018,43(10):3719-3732.
- [20] 姚宗全. 吉木萨尔凹陷梧桐沟组成藏主控因素研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
Yao Zongquan. Research on the key control factors of reservoir formation of Wutonggou Formation in Jimusaer Sag[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2015.
- [21] 丁超, 王佳玮. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系梧桐沟组沉积演化规律[J]. 中国石油勘探, 2015,20(3):22-29.
Ding Chao, Wang Jiawei. Sedimentary development law of Permian Wutonggou Formation in Jimsar Sag of Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2015,20(3):22-29.
- [22] 谭强, 张小红, 岳红星, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷北部二叠系梧桐沟组沉积模式研究[J]. 新疆石油天然气, 2018,14(4):1-7.
Tan Qiang, Zhang Xiaohong, Yue Hongxing, *et al.* Study on sedimentary model of Permian Wutonggou Formation in northern Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2018,14(4):1-7.
- [23] 支东明, 唐勇, 杨智峰, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. 石油与天然气地质, 2019,40(3):524-534.
Zhi Dongming, Tang Yong, Yang Zhifeng, *et al.* Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusaer Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019,40(3):524-534.
- [24] 匡立春, 王霞田, 郭旭光, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油地质特征与勘探实践[J]. 新疆石油地质, 2015,36(6):629-634.
Kuang Lichun, Wang Xiayan, Guo Xuguang, *et al.* Geological characteristics and exploration practice of tight oil of Lucaogou Formation in Jimsar Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(6):629-634.
- [25] 但顺华, 陈春勇, 向辉, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系梧桐沟组沉积演化规律[J]. 新疆石油天然气, 2018,14(2):17-22.
Dan Shunhua, Chen Chunyong, Xiang Hui, *et al.* Sedimentary evolution of the Permian Wutonggou Formation in Jimusaer Sag[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2018,14(2):17-22.
- [26] 赵孟军, 宋岩, 潘文庆, 等. 沉积盆地油气成藏期研究及成藏过程综合分析方法[J]. 地球科学进展, 2004,19(6):939-946.
Zhao Mengjun, Song Yan, Pan Wenqing, *et al.* The overall approach of hydrocarbon filling periods and process in sedimentary basins[J]. Advances in Earth Science, 2004,19(6): 939-946.
- [27] 霍进, 支东明, 郑孟林, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油藏特征与形成主控因素[J]. 石油实验地质, 2020,42(4):506-512.
Huo Jin, Zhi Dongming, Zheng Menglin, *et al.* Characteristics and main controls of shale oil reservoirs in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020,42(4):506-512.
- [28] 何海清, 范士芝, 郭绪杰, 等. 中国石油“十三五”油气勘探重大成果与“十四五”发展战略[J]. 中国石油勘探, 2021,26(1):17-30.
He Haiqing, Fan Tuzhi, Guo Xujie, *et al.* Major achievements in oil and gas exploration of PetroChina during the 13th Five-Year Plan period and its development strategy for the 14th Five-Year Plan[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(1): 17-30.
- [29] 杜金虎, 何海清, 杨涛, 等. 中国致密油勘探进展及面临的挑战[J]. 中国石油勘探, 2014,19(1):1-9.
Du Jinhua, He Haiqing, Yang Tao, *et al.* Progress in China's tight oil exploration and challenges[J]. China Petroleum Exploration, 2014,19(1):1-9.