

引用: 李国欣, 张永庶, 陈琰, 等. 柴达木盆地油气勘探进展、方向与对策 [J]. 中国石油勘探, 2022,27(3):1-19.
Li Guoxin, Zhang Yongshu, Chen Yan, et al. Progress, orientation and countermeasures of petroleum exploration in Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(3):1-19.

柴达木盆地油气勘探进展、方向与对策

李国欣¹ 张永庶¹ 陈琰¹ 张国卿² 王波³ 周飞³ 吴志雄³ 张长好² 雷涛³

(1 中国石油青海油田公司; 2 中国石油青海油田公司勘探事业部; 3 中国石油青海油田公司勘探开发研究院)

摘 要: 通过系统总结柴达木盆地“十二五”以来主要勘探发现和重要地质认识, 提出了盆地未来油气勘探从浅层向深浅层结合、从构造向构造—岩性结合、从碎屑岩向多种岩性复合、从常规向常规与非常规结合的四大转变。系统分析盆地四大含油气系统, 结合成藏主控要素, 按照战略准备、战略突破和战略展开 3 个层次, 共梳理出 13 个有利油气勘探方向和 3 个非油气矿产的勘探方向, 系统梳理柴达木盆地油气勘探地质、工程技术、管理等方面面临的主要挑战并提出对策, 为推动柴达木盆地油气勘探转型发展、强改造型盆地油气地质理论技术提升和盆地综合资源勘探持续发现提供支撑。

关键词: 柴达木盆地; 勘探成果; 勘探方向; 挑战与对策

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.03.001

Progress, orientation and countermeasures of petroleum exploration in Qaidam Basin

Li Guoxin¹, Zhang Yongshu¹, Chen Yan¹, Zhang Guoqing², Wang Bo³, Zhou Fei³, Wu Zhixiong³,
Zhang Changhao², Lei Tao³

(1 PetroChina Qinghai Oilfield Company; 2 Exploration Department, PetroChina Qinghai Oilfield Company; 3 Research Institution of Exploration and Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company)

Abstract: The major discoveries and geological understanding in petroleum exploration since the 12th Five-Year Plan period are summarized in detail. Four major changes are proposed for future petroleum exploration, i.e., from shallow formation to both deep and shallow formations, from structural to structural-lithologic traps, from clastic rock to multi-lithologic composite reservoir, and from conventional to both conventional and unconventional oil and gas reservoirs. Based on the systematic analysis of the four major petroleum systems in the basin, and combined with the main controlling factors for hydrocarbon accumulation, a total of 13 favorable oil and gas exploration orientations and 3 types of non-oil and gas minerals are identified in Qaidam Basin as in three levels of strategic preparation, strategic breakthrough and strategic deployment. In addition, the main challenges in geology, engineering technology, and management restricting petroleum exploration are systematically summarized and countermeasures are put forward, which provide support for promoting the transformation and development of petroleum exploration, improving petroleum geological theory and technology of strongly transformed basin and the continuous discovery of comprehensive resources in Qaidam Basin.

Key words: Qaidam Basin, exploration result, exploration orientation, challenge and countermeasure

第一作者简介: 李国欣 (1971-), 男, 山西忻州人, 硕士, 2005 年毕业于中国石油大学 (华东), 正高级工程师, 主要从事油气勘探开发研究与管理。地址: 甘肃省敦煌市七里镇青海油田机关 1 号楼, 邮政编码: 736202。E-mail: guoxinli@petrochina.com.cn

通信作者简介: 陈琰 (1972-), 女, 湖南祁阳人, 博士, 2010 年毕业于中国地质大学 (武汉), 正高级工程师, 主要从事油气地质勘探研究工作。地址: 甘肃省敦煌市七里镇青海油田勘探开发研究院, 邮政编码: 736202。E-mail: licqh@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-12-01; 修改日期: 2022-04-20

0 引言

柴达木盆地位于青藏高原东北部, 盆内海拔为2600~3700m, 为昆仑山、祁连山、阿尔金山所环抱的菱形山间高原盆地, 呈西高东低、西宽东窄的特征。柴达木盆地作为典型的内陆高原荒漠盆地, 地貌多样, 包括戈壁、沙漠、山地、草原、盐湖、沼泽等。盆地沉积岩面积为 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$, 最大厚度超过17200m。

柴达木盆地是青藏高原唯一的油气生产基地, 油气地质条件独具特色, 其油气勘探肇始于1954年, 虽历经近70年, 但工作量主要集中于盆缘隆起区, 盆地腹部及凹陷区勘探程度较低, 盆地整体勘探程度不均衡^[1-4]。截至2021年底, 盆地共完成三维地震 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$, 完钻各类探井2661口, 共探明油气田34个, 其中油田24个, 探明石油地质储量 $8.0 \times 10^8 \text{ t}$; 气田10个, 探明天然气地质储量 $4407 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

1 基本地质特征及油气勘探历程

1.1 基本地质特征

柴达木盆地平面上划分为柴西坳陷、阿尔金山前带、柴北坳陷、柴东坳陷、德令哈隆起5个一级构造单元、25个二级构造单元(图1), 纵向上, 柴达木盆地自古生代接受沉积以来, 沉积了古生界至新生界共16套地层(图2), 其中石炭系分布局限于盆地边缘的祁连山前带和昆仑山前带, 侏罗系—白垩系主要分布在柴北缘腹部及山前, 古近系—第四系全盆地均有分布。柴达木盆地发育石炭系海陆交互相烃源岩、侏罗系湖沼相烃源岩、古近系—新近系咸化湖相烃源岩及柴东第四系生物气源岩4套烃源岩, 形成4套含油气系统^[5-9]。已探明的石油地质储量主要分布于柴西坳陷古近系—新近系, 天然气地质储量主要分布于柴东坳陷第四系、阿尔金山前东段侏罗系—基岩、柴北坳陷侏罗系—新近系^[1-3]。

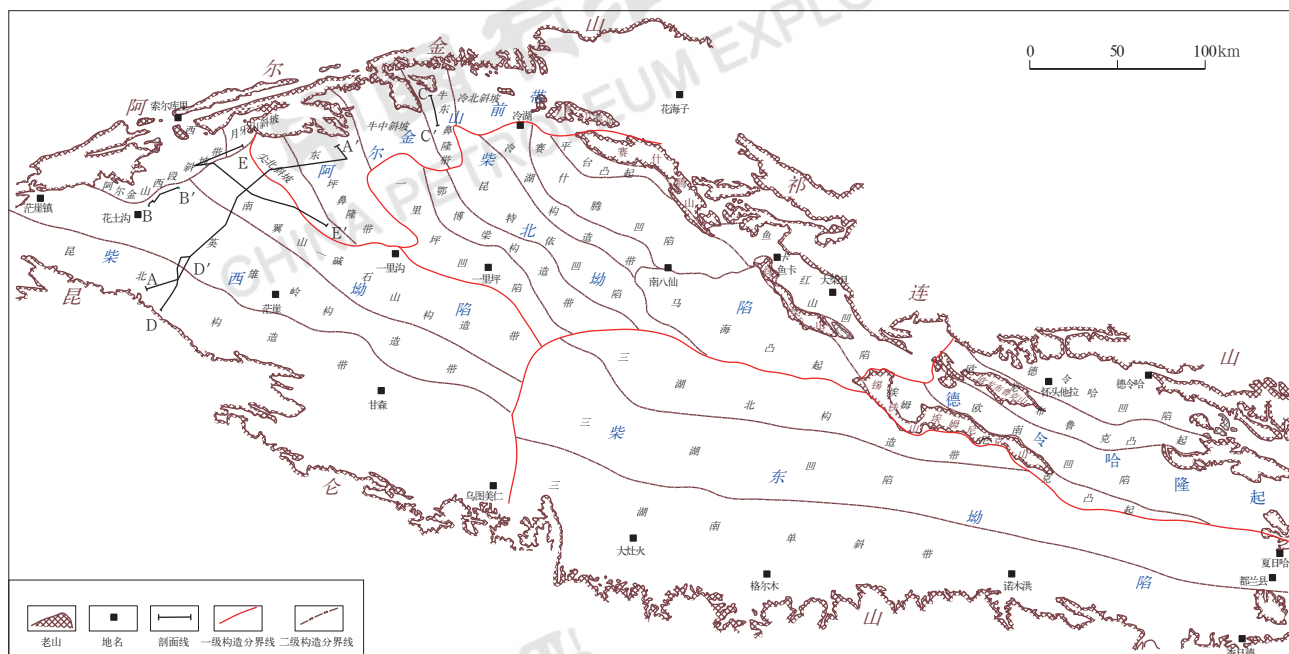


图1 柴达木盆地构造单元分区图

Fig.1 Division of structural unit in Qaidam Basin

1.2 油气勘探历程

柴达木盆地油气勘探肇始于1954年, 至今已走过近70年的历程, 大致可以划分为3个阶段(图3)。

(1) 第一阶段(1954—1977年): 地面地质调查、地面构造钻探阶段。

第一阶段为柴达木盆地勘探起步阶段, 受物探技术和钻井技术限制, 主要以浅层油气勘探为主。在地面地质调查及重力、磁法勘探基础上, 围绕地面构造开展浅层钻探, 在柴西坳陷发现了油泉子、油砂山、南翼山等浅油藏, 柴北缘探明了冷湖油田, 柴东三湖落实了盐湖、涩北、台吉乃尔含气构造带。1958年

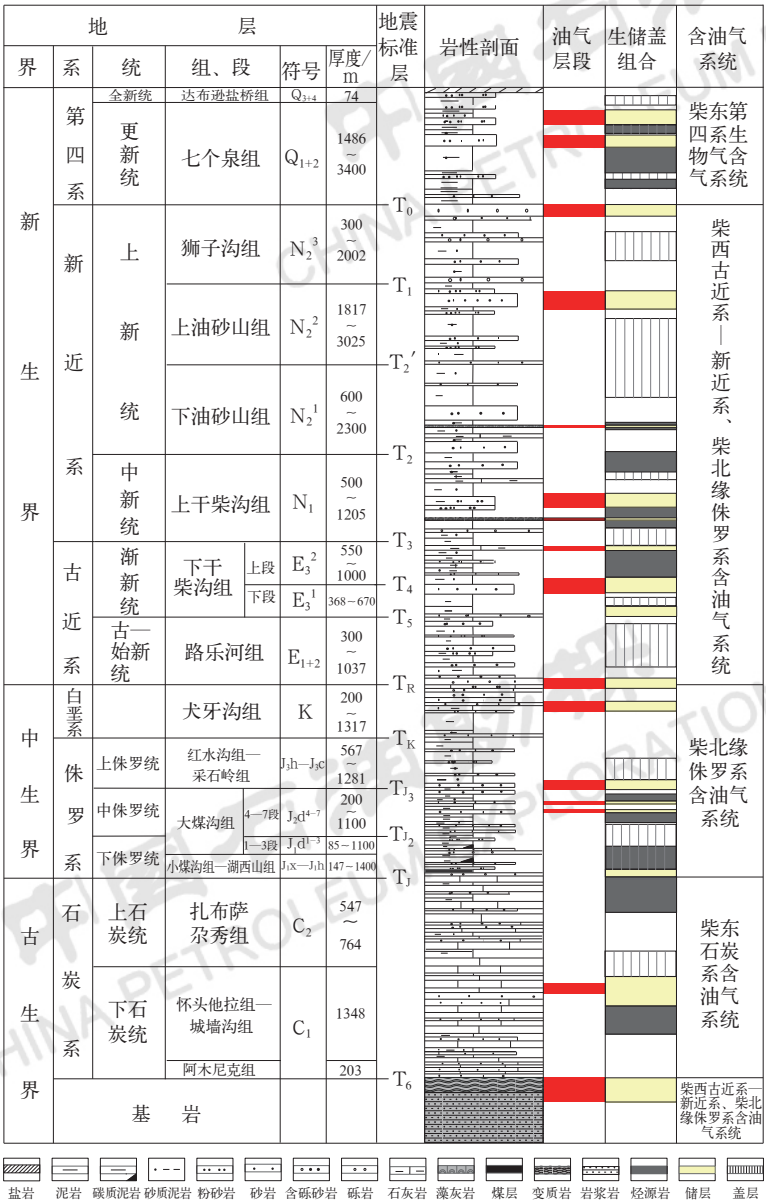


图 2 柴达木盆地地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column in Qaidam Basin

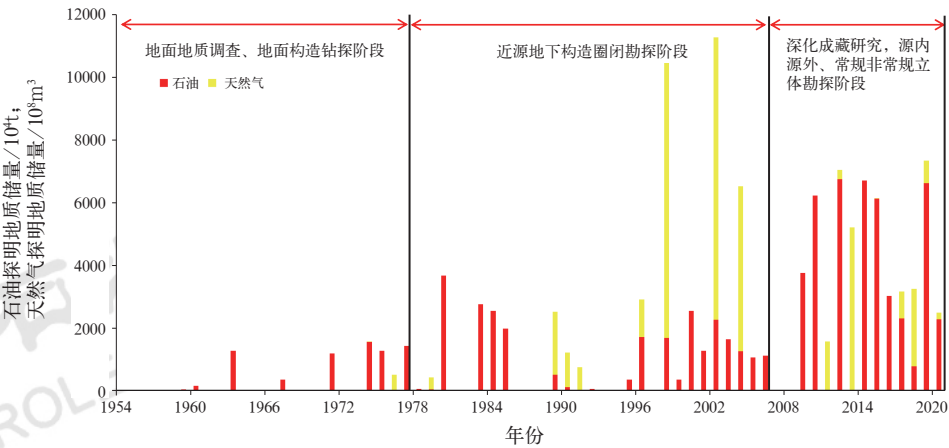


图 3 柴达木盆地油气勘探历程图

Fig.3 Petroleum exploration history in Qaidam Basin

冷湖五号构造一高点地中4井钻至650m后,日喷原油800t左右,发现了冷湖油田,此后柴西、柴北缘、三湖地区先后突破,共发现油气田17个,探明油气地质储量 7346.7×10^4 t油当量,其中探明石油地质储量 6455×10^4 t,探明天然气地质储量 89.17×10^8 m³,1959年油田年产石油 30.02×10^4 t,成为当时全国的四大油田之一。

(2) 第二阶段(1978—2006年):近源地下构造圈闭勘探阶段。

第二阶段二维地震开始规模应用,由地表构造转入地下构造圈闭勘探。1977年10月跃参1井获高产油流,发现了尕斯库勒油田,开启了地下构造找油序幕。同时,在三湖地区发现了台南气田,三湖气区探明天然气地质储量规模不断增长,到21世纪初累计探明天然气地质储量 2897.74×10^8 m³,产量快速增长,成为全国第四大气区。由于对盆地油气地质研究不够系统、油气富集规律认识不深入,随着构造圈闭目标的减少,新区发现、老区扩展效果不佳,该阶段后期主攻方向不明,未取得规模发现。

(3) 第三阶段(2007年至今):深化成藏研究,源内源外、常规非常规立体勘探阶段。

创新油气地质理论、开展工程技术攻关,先后在昆北、英东、东坪—尖北、扎哈泉、英西、干柴沟等新区、新领域连续发现5个亿吨级油气田,标志着盆

地油气勘探进入崭新阶段。形成了具有柴达木盆地特色的高原咸化湖盆成盆、成烃、成储、成藏系列地质理论,支撑油气勘探实现盆缘盆内全面发现、常规非常规并进、深浅层逐步突破。

2 油气地质认识及近年勘探成果

2.1 油气地质认识

研究表明,柴达木盆地克拉通基底不发育,地块规模小且厚度薄,决定了成盆演化中长期以被动从属为主;同时缺乏区域性滑脱层和稳定的盆地边界,呈现厚皮构造变形特征。自古生代以来,柴达木盆地主要经历了海西期残留台缘裂陷、燕山期断拗复合、喜马拉雅早期挤压拗陷、喜马拉雅晚期挤压隆升四大演化期次,新生代以来受青藏高原隆升影响,形成现今复杂的叠加改造型山间盆地,构造演化控制了盆地构造格局、沉积体系及烃源岩展布,形成了盆地柴东石炭系、柴北缘侏罗系、柴西古近系—新近系及柴东第四系生物气四大含油气系统(图4)。

石炭纪残留台缘裂陷阶段,形成潜在的石炭系海陆交互相烃源岩。晚泥盆世以来,盆地继承发育的地台—海槽(裂谷)沉积,经历印支、燕山运动强烈改造,现今残余地层主要分布于冷湖和德令哈地区,在昆仑山前见到零星出露。

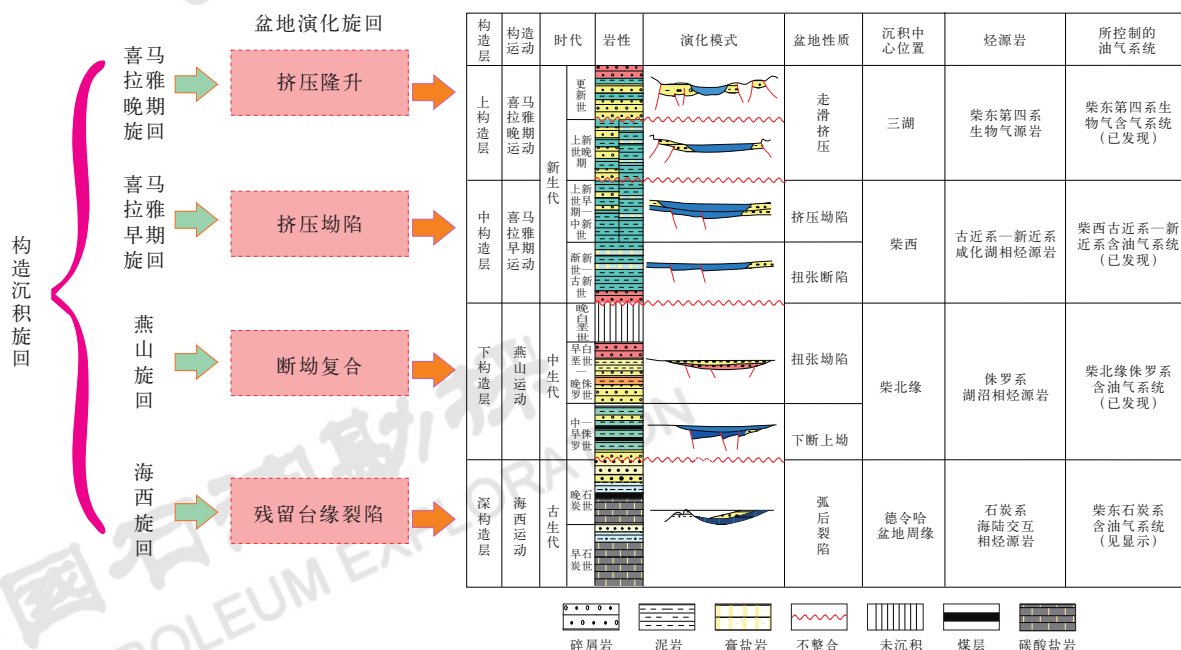


图4 柴达木盆地成盆演化阶段图

Fig.4 Basin formation and evolution stages of Qaidam Basin

早侏罗世—白垩纪断拗复合阶段,形成柴北缘侏罗湖沼相烃源岩。燕山运动早期,盆地发育一系列相互分割的大型断陷和拗陷,形成了昆特依、伊北、冷湖、赛什腾等中—下侏罗统(J_{1+2})生烃凹陷。燕山运动末期,盆地褶皱隆升,地层遭受差异剥蚀。坪东、茜南、马仙等大型断裂和柴中、平台、马海等古隆起(凸起)控制着中生界构造样式、构造格局和烃源岩展布。

古近纪—上新世早期挤压拗陷阶段,形成柴西咸化湖相烃源岩。新生代盆地在印度板块与欧亚板块碰撞的大背景下,受东昆仑和阿尔金左行走滑断裂联合控制,发育柴西、一里坪等沉降、沉积中心,为优质烃源岩的形成奠定了基础。渐新世末期,盆地边界清晰,盆缘隆起,盆内柴西、一里坪大型沉积拗陷持续发育,一里坪凹陷沉积范围更广、厚度更大。

上新世晚期—第四纪挤压隆升阶段,形成柴东第四系生物气源岩。喜马拉雅晚期盆地整体强烈隆升,构造变形强烈,盆地西部形成数排北西—南东向构造带,其中英雄岭构造带最为典型,山前形成大型冲断构造,隆拗相间;盆内褶皱变形相对较弱,浅表构造发育;柴东相对稳定,发育三湖第四系生物气拗陷。

勘探证实,在4期构造运动影响下,盆地存在基岩、碎屑岩及碳酸盐岩3种类型有效储层,其中基岩储层发育在三大山前继承性古隆起区,碎屑岩储层全盆地大面积分布,碳酸盐岩储层主要分布在柴西地区和柴东德令哈地区。

基岩储层岩性以加里东期—印支期侵入的花岗岩类为主,局部发育中浅变质岩及玄武岩、安山岩等,成岩期发育原生孔、构造缝,后经燕山晚期—喜马拉雅早期长期暴露,风化淋滤形成网状缝—洞体系,造就了多重介质储集空间,不同岩性和埋深的基岩均发育有效储层,基质孔隙度基本介于2%~10%。

碎屑岩储层广泛分布于盆地侏罗系—第四系。侏罗系受燕山期差异升降和温暖潮湿气候控制,河流相—湖沼相碎屑岩有效储层大规模发育,侏罗系储层整体具有石英含量相对高、黏土含量低、溶蚀孔发育的特点,抗压实能力强,同时受有机酸溶蚀,埋深较大的储层仍具较好储集能力,昆2井埋深6600m的下侏罗统大煤沟组储层岩心实测孔隙度仍可达12%。古近系—新近系受喜马拉雅期盆缘隆升、盆内沉降和古气候控制,柴西演化为咸化湖盆,发育碎屑岩和碳酸盐岩两类储层,柴北缘继承性发育河流—三角洲沉积体系,主要为碎屑岩储层。综合岩性、物性特征和

沉积微相展布,盆地古近系—新近系碎屑岩储层分为两类,一类碎屑岩储层是以古近系的辫状河三角洲砂体为代表,特点是单砂体厚度大,粒度粗,物性受沉积微相、压实作用和胶结作用控制,储层平面分布差异较大;另一类碎屑岩储层是以新近系的滨浅湖滩坝砂体为代表,特点是单砂体较薄,粒度较细,物性受沉积组分和胶结作用控制。柴东第四系储层以三湖地区滨浅湖相疏松砂岩为代表,整体处于未成岩—早成岩阶段,具有全尺度孔径分布的特征,原生粒间孔为主,裂缝、溶蚀孔为辅,还存在晶间孔、黏土矿物层间孔等微孔隙。

碳酸盐岩储层包括柴西湖相碳酸盐岩储层和柴东德令哈石炭系海相碳酸盐岩储层两类。湖相碳酸盐岩在柴西地区广泛发育, $E_3^2-N_2^1$ 碳酸盐岩从湖盆中心不断向东北方向迁移,平面上围绕咸化湖盆中心呈环带状分布,存在3种类型:一是以尕斯—跃西为代表的滨浅湖相古隆起区发育的生物—物理成因的藻类、颗粒滩灰云岩;二是以小梁山—南翼山为代表的浅湖相斜坡区发育的灰云岩与藻灰岩组合;三是以英雄岭为代表的半深湖相凹陷区灰云岩。柴东德令哈石炭系发育大面积台地相和台缘礁滩相碳酸盐岩储层,岩性主要为中厚层灰色、深灰色生物灰岩、鲕粒灰岩、含燧石灰岩等,储集空间包括岩溶孔洞、溶孔及裂缝。

整体上,柴达木盆地为一晚期强改造的含油气盆地,构造运动将盆地改造成为隆—拗—坡—阶等高差巨大、形态各异的构造单元,形成了特征不同、类型多样的油气成藏区带,支撑了盆地勘探战略转移。以柴西富烃凹陷为例,发育有序分布的全类型油气藏(图5),形成了英雄岭及周缘全油气系统,包括盆缘古隆起及斜坡区源外油气藏、盆内凹陷及斜坡区地层—岩性油藏、盆内晚期构造带源上油气藏和盆内富烃凹陷区源内非常规页岩油藏及页岩气藏等,因此,柴达木盆地富烃凹陷区未来可积极实施四方面拓展,即由源外向源内拓展、由常规向非常规拓展、由浅层向深层拓展、由单一圈闭向连续型地质体拓展。

2.2 近年主要勘探成果

“十三五”期间,依托中国石油重大科技专项,深化油气地质认识,明确强改造盆地咸化湖相混积型碳酸盐岩成储机理^[10-12],打破了以往干旱咸化湖盆大面积发育的混积型碳酸盐岩难以成为有效储层的传统认识。在“十二五”研究建立的盆缘隆起区源外油气成藏模式及咸化湖盆斜坡区滩坝砂体碎屑岩岩性油

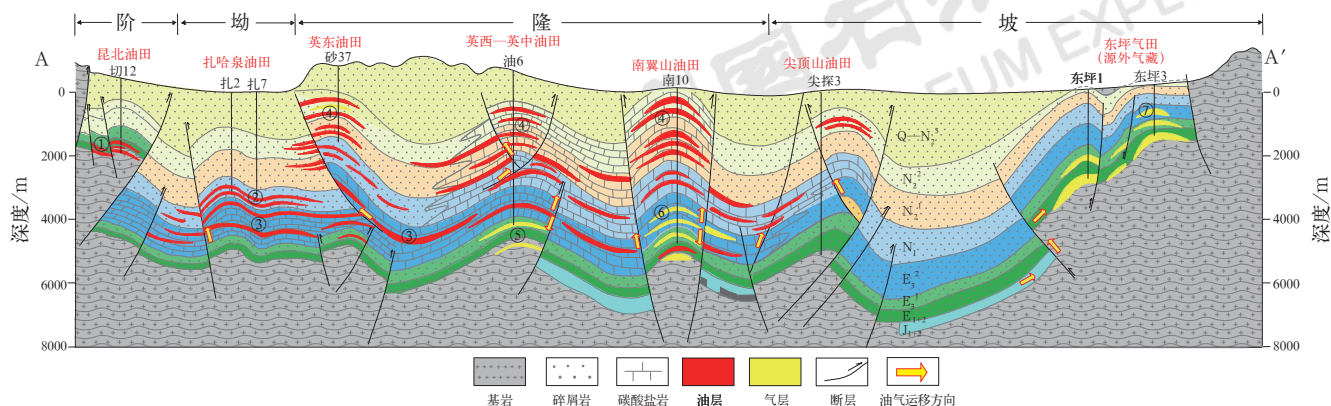


图 5 柴西富烃凹陷全油气系统成藏模式图 (剖面位置见图 1)

Fig.5 Hydrocarbon accumulation pattern of complete petroleum system in hydrocarbon-rich sags, western Qaidam Basin (section location is in Fig.1)

- ①盆缘古隆起区源外油藏; ②斜坡区岩性油藏; ③源内页岩油藏; ④晚期构造带源上油气藏; ⑤致密气藏; ⑥源内页岩气藏;
⑦盆缘古隆起区源外气藏

藏成藏模式基础上,明确了咸化湖盆中心源内及“凹中隆”源外油气差异聚集规律^[13-15],指导勘探部署获得了英西—英中碳酸盐岩油藏、昆特依构造“凹中隆”基岩气藏等重大发现。

2.2.1 加强基础研究,柴西碳酸盐岩获新发现

柴西地区古近系下干柴沟组上段(E_3^2)发育全盆地最优质的咸化湖相烃源岩,勘探面积近3000km²。现今地面以风蚀山地为主,沟壑纵横,海拔为3000~3900m。20世纪80年代在下干柴沟组上段(E_3^2)曾获高产,但随后钻探均失利,当时认为油藏受裂缝控制,难以扩展。

“十三五”期间,研究发现咸化湖相碳酸盐岩发育溶蚀孔洞、晶间孔、裂缝等多重储集空间,具备油气储集能力^[16-18]。据此,利用山地三维地震攻关成果,精细刻画构造特征,在英西—英中地区整体部署,先后钻遇8口千吨级高产井,纵向上落实盐间、盐下共6套含油层系,平面上落实6个油气富集区,累计探明石油地质储量超6500×10⁴t。

勘探证实,柴西古近系碳酸盐岩油藏在有利相带、多期应力、连续充注的共同作用下,受控于低隆起背景、高效盐岩盖层、广覆式孔—洞—缝储层,整体含油,局部高产(图6)。

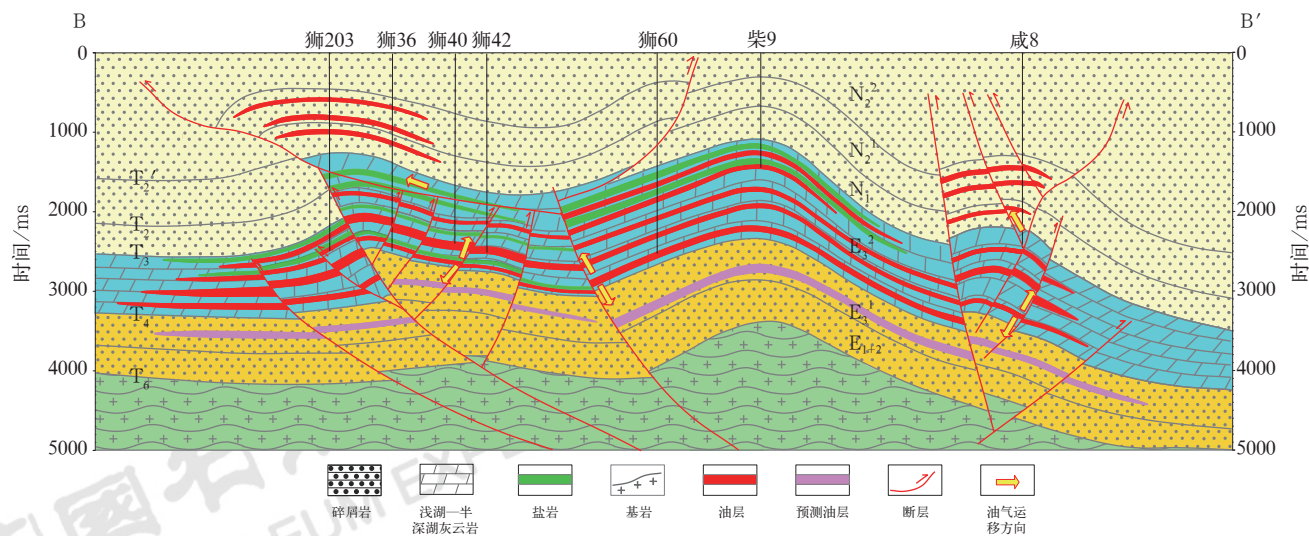


图 6 柴西古近系碳酸盐岩油藏成藏模式图 (剖面位置见图 1)

Fig.6 Hydrocarbon accumulation pattern of the Paleogene carbonate oil reservoir in the western Qaidam Basin (section location is in Fig.1)

2.2.2 风险预探结合，阿尔金山前带落实规模气区

阿尔金山前带东段自北向南呈现高断阶—中斜坡—深凹陷的地质结构；自西向东依次发育尖北斜坡、东坪鼻隆带、牛中斜坡、牛东鼻隆带、冷北斜坡5个次级构造单元，具有“两隆起三斜坡”构造格局，有效勘探面积为9000km²。“十二五”期间，在东坪鼻隆带高断阶钻探东坪1井获重大突破，发现了基岩气藏，拉开了阿尔金山前带天然气勘探的序幕，之

后，牛东鼻隆带高断阶勘探再获成功，发现了侏罗系气藏^[19]。

“十三五”期间，根据源外成藏研究认识，按照风险勘探尖北斜坡，甩开预探冷北斜坡，谋求突破中斜坡、深凹陷的思路，分别针对尖北斜坡断背斜构造、冷北斜坡凹陷区“凹中隆”昆特依断背斜构造开展钻探，发现了基岩气藏，证实高断阶—中斜坡—深凹陷均有利于形成源外油气藏（图7）。

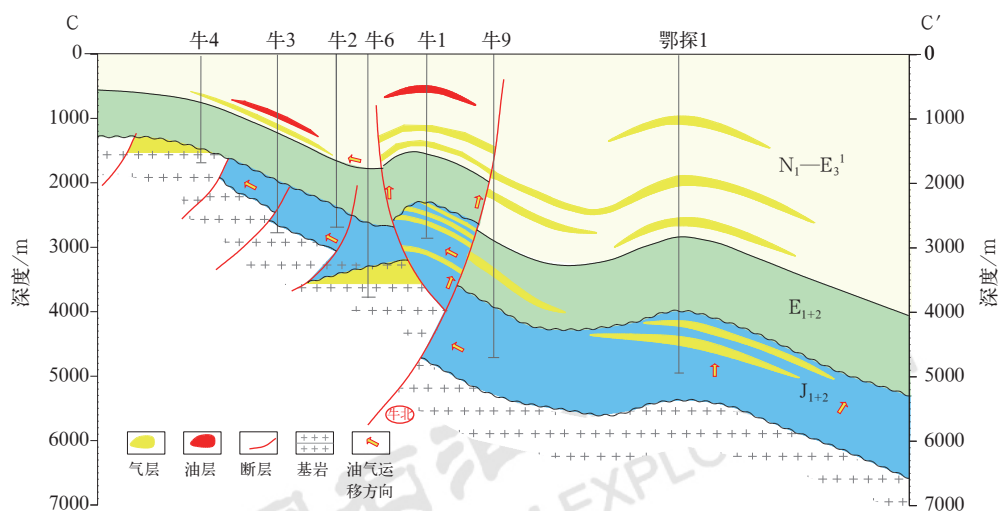


图7 阿尔金山前带高断阶—中斜坡—深凹陷油气成藏模式图（剖面位置见图1）

Fig.7 Hydrocarbon accumulation pattern in the upper fault terrace-middle slope-deep sag in Frontbelt of Altun Mountain (section location is in Fig.1)

目前，阿尔金山前带已发现基岩、侏罗系、古近系3套含气层系，探明东坪、尖北、牛东、昆特依气藏，探明天然气地质储量超过 $800 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.2.3 下凹精细勘探，柴西南碎屑岩岩性勘探见成效

柴西南区继承性发育乌南、红柳泉、跃进三大古斜坡和扎哈泉、英雄岭两大富烃凹陷，勘探面积为5000km²，石油资源量为 $16.5 \times 10^8 \text{ t}$ ，发现尕斯库勒、昆北、红柳泉、跃进二号等规模储量区，探明石油地质储量 $4.4 \times 10^8 \text{ t}$ ，是盆地石油资源最为丰富的地区，勘探程度较高^[20]。

随着勘探由构造油藏向岩性油藏拓展，“十三五”期间，精细刻画柴西南斜坡区及凹陷区沉积微相，通过水槽实验模拟咸化湖盆砂体展布，发现细碎屑受咸水浮力顶托影响，分布范围较淡水湖盆更广。据此，在切克里克凹陷部署钻探切探2井，于上干柴沟组(N₁) 4850~4856m井段常规射孔获高产工业油流，证实深层发育较好碎屑岩储层。勘探发现，切克里克凹陷发育滩坝砂体，纵向上由深至浅向东扩展迁移，平面上南北向条带状展布，单层厚4~6m，孔隙度达15%，油藏受砂体控制，呈现叠合连片特征（图8）。

切克里克凹陷的突破揭示柴西南凹陷区具备良好岩性油藏勘探潜力。

2.2.4 构造—岩性并重，柴西北碳酸盐岩展现良好苗头

柴西北区发育红沟子、南翼山、小梁山、大风山等多个晚期背斜构造带，勘探面积为3800km²，新近系广泛发育咸化湖相混积型碳酸盐岩，渗透率低、物性差。前期主要围绕南翼山、小梁山等地面构造新近系中—浅层开展工作，探明石油地质储量 $1.1 \times 10^8 \text{ t}$ ，但由于油藏普遍低渗难采，勘探长期未取得明显拓展。

为实现效益勘探开发，“十三五”期间，在岩心精细描述基础上，研究物性相对较好的藻灰岩沉积展布特征，优选风西构造开展部署：一是针对中浅层下油砂山组(N₂¹)构造油藏，开展水平井提产实验，已见到良好效果；二是在构造外围甩开部署，E₃²—N₂¹发现10个油层集中段，平面上落实有利含油面积120km²，初步形成亿吨级规模储量区，展现出南翼山—风西—大风山地区油藏连片的良好勘探前景，柴西北区碳酸盐岩成为勘探重要接替领域（图9）。

此外，围绕柴西和阿尔金山前带东段等含油气构造区，探索了油—钾、油—铀、气—氦等协同勘探方

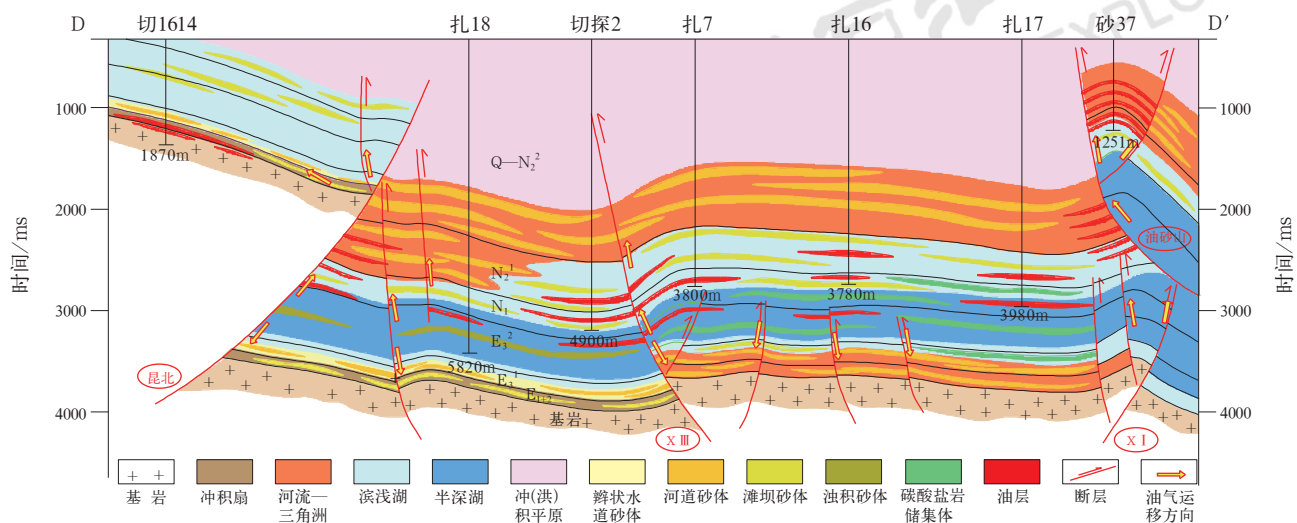


图8 柴西南切克里克凹陷油气成藏模式图(剖面位置见图1)

Fig.8 Hydrocarbon accumulation pattern in Chekrik Sag, southwestern Qaidam Basin (section location is in Fig.1)

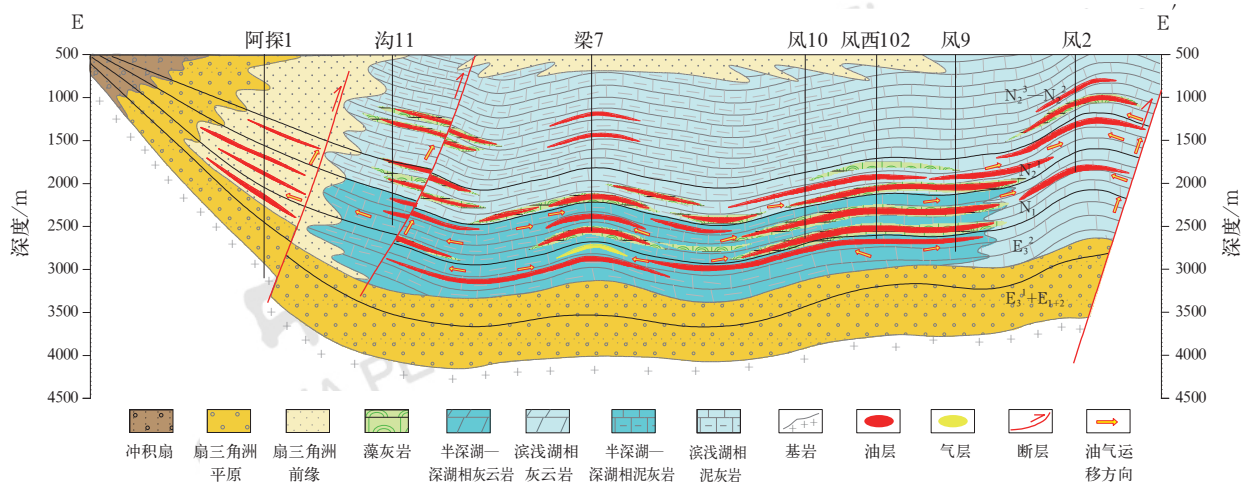


图9 柴西北碳酸盐岩油气成藏模式图(剖面位置见图1)

Fig.9 Hydrocarbon accumulation pattern of carbonate reservoir in the northwestern Qaidam Basin (section location is in Fig. 1)

式,发现了深层卤水钾、锂、硼矿(南翼山和英西等)、砂岩型铀矿(七个泉和跃进二号等)和氦气(东坪和尖北等)多个矿点,资源禀赋好,可利用潜力大,取得了一定的进展和认识,证实盆地具备全面实施多矿种协同勘探的先天优势,未来可期。

3 勘探方向

纵观柴达木盆地油气勘探历史,虽历经近70年探索,但石油、天然气探明率分别仅为27.1%和13.7%,仍处于勘探早期,资源勘探前景良好。总结前期实践成果,石油勘探以寻找构造或构造断块型次生油藏的盆缘勘探为主,也就是按照构造或断裂带控藏的思路开展工作,并未对源内给予足够关注,所发现的尕斯库勒、昆北、英东等均属于此类油藏,故有

“金角银边草肚皮”的说法;天然气发现主要以第四系和基岩层系为目的层,对侏罗系、古近系鲜有关,故有“一老一新”的说法。进入新时代,跟踪近年国内外油气勘探理论与实践进展,分析盆地现状,提出当前盆地油气勘探“四个转变”的思路,即浅层勘探向深浅层结合转变、构造勘探向构造—岩性结合转变、碎屑岩勘探向多种岩性复合转变及常规勘探向常规与非常规结合转变,也就是在重视常规构造、岩性等源外油气藏勘探的同时,更加重视页岩油、页岩气等源内勘探,努力打造“金角银边油肚皮”和“老中新”全面开花的局面。结合四大含油气系统成藏主控要素,按照战略展开、战略突破和战略准备3个勘探层次,共梳理出13个有利油气勘探方向(表1)和3个非油气矿产的勘探方向。

表 1 柴达木盆地下一步勘探方向及预期成果表
Table 1 Exploration orientation and expected results in Qaidam Basin in the near future

油气系统	勘探方向	勘探区带	勘探层次	剩余资源量	勘探类型	目的层埋深 /m	预期成果
柴东第四系生物气含气系统	凹陷—斜坡区泥岩生物气	中央凹陷区及三大气田周缘平缓区	战略突破	天然气：6500×10 ⁸ m ³	疏松岩性非常规气藏	500~2000	探明天然气地质储量 1000×10 ⁸ m ³
	三湖凹陷斜坡区滩坝砂体岩性气藏	南斜坡及三大气田周缘斜坡区	战略展开	天然气：2000×10 ⁸ m ³	碎屑岩岩性气藏	500~2000	探明天然气地质储量 500×10 ⁸ m ³
	柴西坳陷页岩油	英雄岭凹陷 E ₂ ³ 、小梁山凹陷 N ₁ 及扎哈泉凹陷 E ₃ ²	战略突破	页岩油：44.5×10 ⁸ t	碳酸盐岩页岩油藏	4000~6000	落实 (10~15)×10 ⁸ t 页岩油资源
	柴西地区构造油气藏	柴深构造带、柴西北构造带、英东—油南构造区、黄瓜卯	战略展开	石油：5.0×10 ⁸ t 天然气：1000×10 ⁸ m ³	背斜油气藏、断背斜油气藏、断鼻油气藏	2500~6500	探明石油地质储量 5000×10 ⁴ t
古近系—新近系含油气系统	柴西南斜坡岩性油藏	七个泉—跃进辫状河三角洲前缘水下分流河道砂体、跃东—切克里克滩坝砂体	战略展开	石油：12.0×10 ⁸ t	岩性油藏	2000~5000	探明石油地质储量 5000×10 ⁴ t
	阿尔金山西段斜坡带扇三角洲岩性油藏	红沟子—月牙山斜坡、狮子沟—咸水泉斜坡	战略突破	石油：5.0×10 ⁸ t	岩性油藏	2500~5500	探明石油地质储量 5000×10 ⁴ t
	柴西茫崖凹陷页岩气	开特米里克—油墩子、盐山及周缘斜坡区	战略准备	页岩气：5000×10 ⁸ m ³	碳酸盐岩页岩气藏	4000~5000	落实 1000×10 ⁸ m ³ 页岩气资源
	中央鼻隆带	大风山—碱石山—鄂博梁—黄石	战略准备	石油：1.0×10 ⁸ t 天然气：500×10 ⁸ m ³	构造油气藏、微生物岩性油气藏	3500~6000	探明石油地质储量 1000×10 ⁴ t
侏罗系含油气系统	山前基岩气藏	牛中斜坡、冷北斜坡、平台凸起区	战略展开	天然气：7000×10 ⁸ m ³	构造气藏	2500~8000	探明天然气地质储量 1000×10 ⁸ m ³
	柴北缘侏罗系内幕地层—岩性油气藏	牛东高断阶、冷湖凹陷源内、昆特依凹陷斜坡	战略突破	石油：2.5×10 ⁸ t 天然气：1000×10 ⁸ m ³	地层—岩性油气藏	3500~5000	探明石油地质储量 3000×10 ⁴ t， 探明天然气地质储量 500×10 ⁸ m ³
	柴北缘腹部古近系碎屑岩岩性油气藏	冷东斜坡古近系、冷湖—鄂博梁构造带翼部、仙乐斜坡路乐河组	战略突破	石油：1.2×10 ⁸ t 天然气：2000×10 ⁸ m ³	碎屑岩岩性油气藏	3000~6000	探明石油地质储量 1000×10 ⁴ t， 探明天然气地质储量 500×10 ⁸ m ³
	盆地腹部深层	鄂博梁—鸭湖、一里坪凹陷（古近系）、落雁山—那北	战略准备	天然气：1000×10 ⁸ m ³	构造气藏、碎屑岩岩性气藏	4500~7500	探明天然气地质储量 200×10 ⁸ m ³
石炭系含油气系统	盆地石炭系	柴北缘冷湖地区、德令哈、昆仑山前带	战略准备	石油、天然气 3.6×10 ⁸ t 油当量	构造—岩性复合油气藏	100~6000	明确源储条件及有利勘探区
	阿尔金山前带东段基岩含氨气藏	尖北斜坡、东坪鼻隆、牛中斜坡、冷北斜坡	战略准备	氨气资源量近 5×10 ⁸ m ³	构造含氨气藏	3500~7500	形成富氨气藏提氨工艺体系
综合勘探	柴西坳陷深层卤水钾、锂、硼矿	英西—南翼山—大风山、尖北—东坪—长尾梁	战略准备	卤水量约 80×10 ⁸ t， 钾：约 6000×10 ⁴ t， 锂：约 400×10 ⁴ t， 硼：约 1700×10 ⁴ t	孔隙—裂隙型矿床	300~5400	形成锂、钾、硼综合利用产业链
	柴西南区砂岩型铀矿	七个泉—昆北	战略准备	超万吨远景资源量	潜水氧化型矿床、层间氧化型矿床	< 500	发现大型地浸砂岩型铀矿床 2~3 个

3.1 战略展开勘探方向

3.1.1 山前基岩气藏

阿尔金山前带自中生代以来持续隆升,发育尖北斜坡、东坪鼻隆带、牛中斜坡、牛东鼻隆带和冷北斜坡多个次级构造单元,有效勘探面积为9000km²,是油气运聚的有利指向区(图10)。紧邻的坪东、昆特依下侏罗统生烃凹陷持续生烃、连续充注,为山前基岩气藏富集奠定资源基础^[21-27];山前发育的“丁”字形大型油源断裂和基岩不整合面构成良好的输导体

系,控制油气的运移及成藏;多期岩浆侵入、长期风化淋滤作用形成的裂缝、溶孔多重介质发育的基岩储层和上覆含膏泥岩、泥岩形成了良好的储盖组合,确保了侏罗系煤型气藏的规模聚集和保存;阿尔金山前带东段发育众多基岩圈闭,类型多样,背斜、断背斜、断鼻和地层圈闭均有发育,控制了气藏规模。目前阿尔金山前带已发现基岩气藏5个,探明+控制天然气地质储量830×10⁸m³。同时已落实未钻探有利圈闭23个,T₆层(基岩顶)总面积为218km²,具备新增探明地质储量千亿立方米级气藏群的潜力。

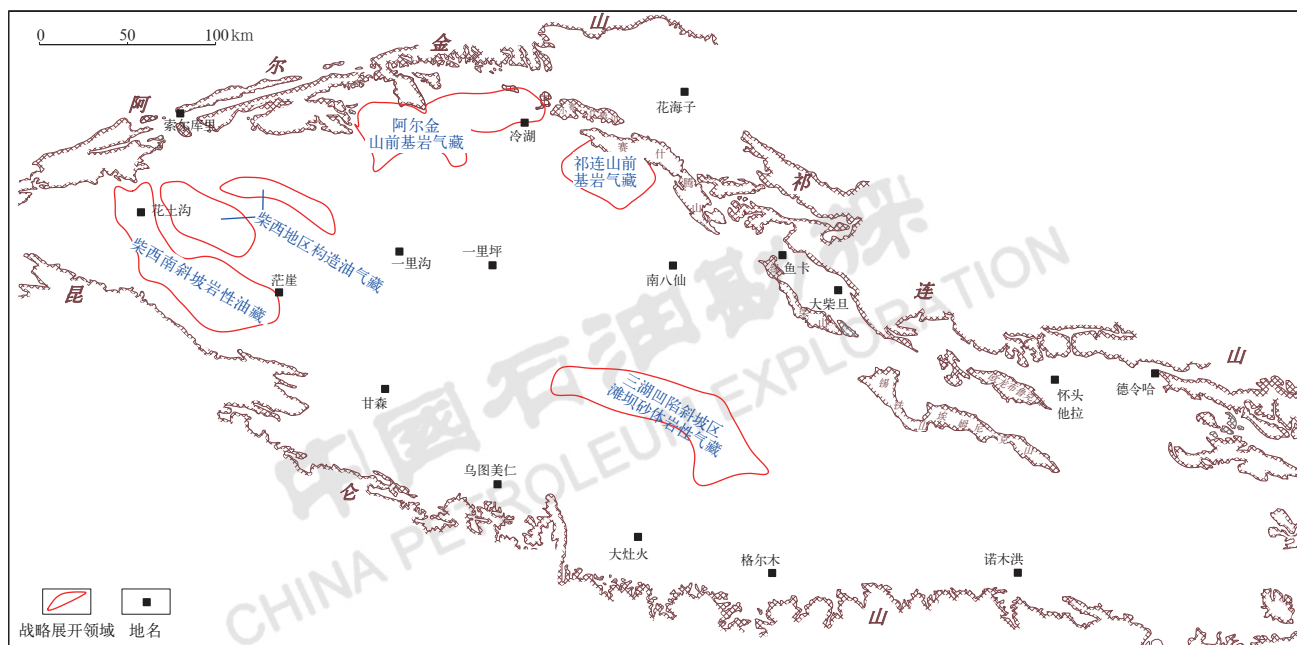


图10 柴达木盆地油气勘探战略展开层次区带分布概略图

Fig.10 Distribution of strategic deployment zone in petroleum exploration in Qaidam Basin

3.1.2 柴西地区构造油气藏

实践证实,构造油气藏仍是践行高效勘探的目标,也是油田实现快速增储上产的重要途径。前期围绕英雄岭生烃凹陷,先后发现了尕斯、狮子沟、英东等高丰度构造油藏,围绕小梁山生烃凹陷探明了多层系的南翼山构造油气藏。分析认为,构造油气藏勘探具有两种类型:一类是生烃凹陷之上的常规碎屑岩构造圈闭,具有发育油源断裂、埋藏较浅、储层物性好、储量丰度高等勘探优势;另一类是生烃凹陷内部碳酸盐岩构造圈闭,具有更加靠近油源、裂缝—溶孔—晶间孔多元储集空间发育、膏盐层发育、埋藏深和油品性质好等特点,容易形成高压、高产型碳酸盐岩油藏。近期加强英雄岭地区、柴西北地区的三维地震部署,基本实现了柴西地区三维地震全覆盖,目前正积极开

展新老三维地震连片处理解释攻关,一方面寻找浅层高效的碎屑岩构造圈闭,同时加大柴深构造带、英东—油南等复杂构造区的断裂精细刻画和优质储层预测等技术攻关力度,优选勘探目标(图10),有利勘探面积为600~1500km²。有望通过2~3年的攻关,明确3~5个有利勘探区带,落实5~10个勘探目标,新增探明石油地质储量5000×10⁴t。

3.1.3 柴西南斜坡岩性油藏

柴西南区勘探面积为5000km²,资源量为16.5×10⁸t,发现了尕斯库勒、昆北等规模储量区,探明石油地质储量4.4×10⁸t,占全盆地的67%,是石油勘探的主战场。柴西南区继承性发育乌南、红柳泉、跃进三大斜坡,整体倾没于英雄岭、扎哈泉下干柴沟组上段(E₃²)优质生烃凹陷,具有优先成藏条件^[28-31];

三大斜坡 E_3^1 、 N_1 、 N_2^1 均发育大型辫状河三角洲前缘水下分流河道砂体和滨浅湖滩坝砂体^[32]， E_3^2 发育藻丘—灰云坪碳酸盐岩储集体，各类储层纵向叠置、横向连片分布，为岩性油藏的形成创造了有利的储集条件。柴西南区三维地震全覆盖，勘探和认识程度整体较高，但仍有 $12 \times 10^8 \text{t}$ 资源待发现。通过持续加强砂体精细描述和岩性圈闭刻画，初步落实 600km^2 辫状河三角洲前缘水下分流河道砂体、 750km^2 的滩坝砂体和 200km^2 的碳酸盐岩储层勘探有利区，可新增 $5000 \times 10^4 \text{t}$ 以上探明石油地质储量（图 10）。

3.1.4 三湖凹陷斜坡区滩坝砂体岩性气藏

柴东三湖地区第四系为生物气含气系统，资源量为 $9194 \times 10^8 \text{m}^3$ ，已探明国内最大的第四系生物气藏，

地质储量近 $3000 \times 10^8 \text{m}^3$ 。气藏具有典型的第四系生物气成因、层状疏松砂岩和低幅度构造控藏的特点。最新研究认为，三湖地区第四系整体为“自封闭”的动态平衡系统，生物气边生成、边运移、边成藏，并以游离气、吸附气、水溶气多相态赋存于砂岩、泥岩中，在构造—凹陷区多相态连续动态成藏（图 11），具有运移与滞留并存，高点相对富集的成藏规律^[33-35]。通过精细刻画第四系沉积微相，认为受微古地貌和湖流的影响，三湖地区第四系湖区带状滩坝砂体与烃源岩共生，其中斜坡区薄层滩坝砂体易受侧向泥岩遮挡，空间上形成孤立储集空间和聚集—散失近平衡的岩性气藏。初步预测有利勘探面积为 1800km^2 ，有望增储 $500 \times 10^8 \text{m}^3$ （图 10）。

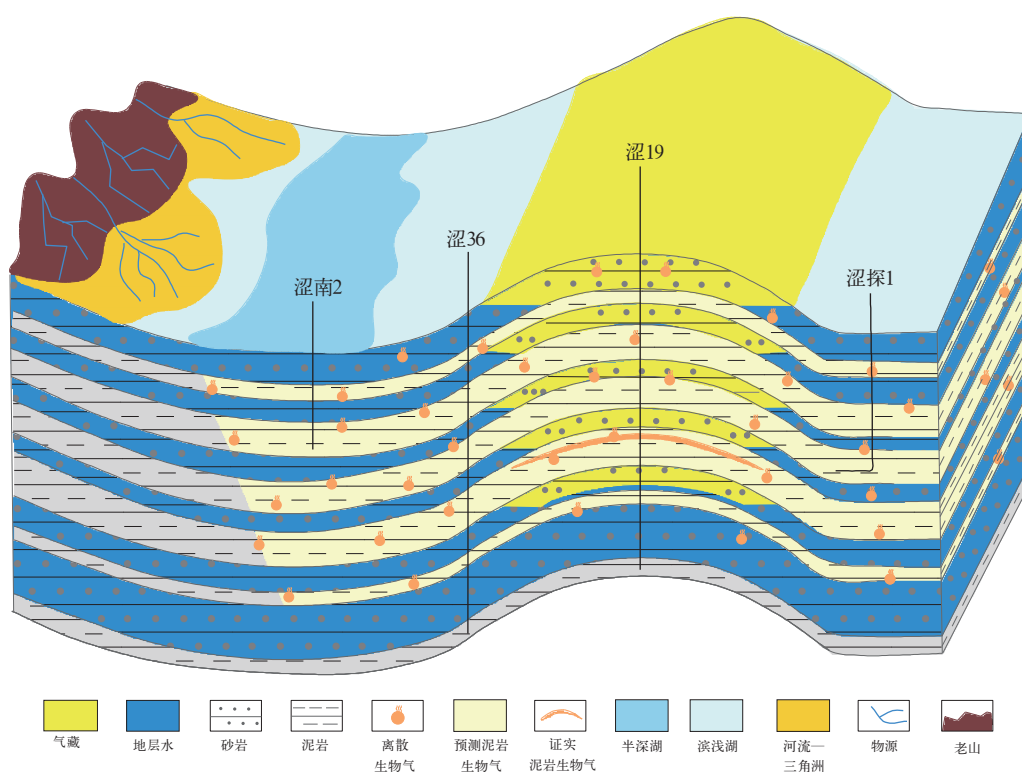


图 11 三湖地区构造—凹陷区多相态连续成藏模式图

Fig.11 Multiphase continuous hydrocarbon accumulation pattern in structural-sag zone in Sanhu area

3.2 战略突破勘探方向

3.2.1 柴西拗陷页岩油

研究证实，古近纪以来柴西地区整体为大型沉积拗陷，湖盆具有封闭、咸化、还原和迁移的特征，形成了英雄岭、扎哈泉两个下干柴沟组上段（ E_3^2 ）生油凹陷和小梁山、茫崖上干柴沟组（ N_1 ）生烃凹陷^[36-38]。其中英雄岭凹陷、扎哈泉凹陷和小梁山凹陷纹层状碳酸盐岩及黏土质页岩分布面积超过

6000km^2 （图 12），烃源岩厚度为 $400 \sim 1000 \text{m}$ ，TOC 普遍大于 0.6% ，最高达 3.8% ， $S_1 + S_2$ 为 $2 \sim 30 \text{mg/g}$ ，有机质类型为 I—II₁ 型， R_o 介于 $0.7\% \sim 1.3\%$ ，处于生油高峰期，产烃率最高达到 650mg/g （HC/TOC）。该套烃源岩是柴西地区古近系—新近系含油气系统的主要生烃灶，已探明常规石油地质储量超过 $7.0 \times 10^8 \text{t}$ 。2021 年按照常规勘探向常规与非常规结合转变的勘探思路，优选英雄岭凹陷埋藏相对浅的干柴沟地区开展页岩油部署，先后钻探直

井12口、水平井2口。已完试的7口井10层组全部获工业油流。其中水平井柴平1井前期4mm油嘴日产油104m³，日产气15000m³，目前3mm油嘴控制放喷，油压为22.5MPa，日产油41m³，日产气6000m³，150天累计产油7240m³，累计产气113×10⁴m³，实现了青藏高原页岩油勘探的重大突

破。干柴沟地区已落实页岩油井控面积42km²，井控储量达3×10⁸t以上。依据地质条件，初步估算柴西坳陷英雄岭凹陷、扎哈泉凹陷和小梁山凹陷页岩油资源量达44.5×10⁸t，“十四五”期间通过加强岩相刻画和烃源岩分布研究，有望落实(10~15)×10⁸t规模储量。

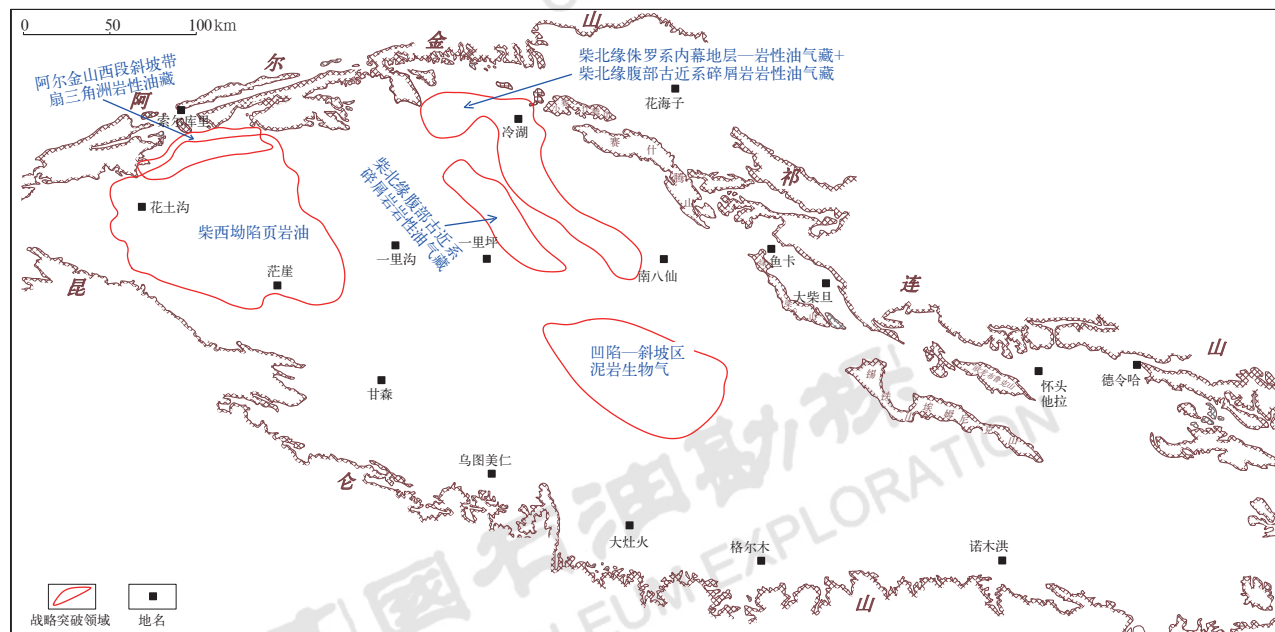


图12 柴达木盆地油气勘探战略突破层次区带分布概略图

Fig.12 Distribution of strategic breakthrough zone in petroleum exploration in Qaidam Basin

3.2.2 阿尔金山西段斜坡带扇三角洲岩性油藏

阿尔金山西段斜坡带西起七个泉，东至月牙山，面积约2000km²，整体属于持续发育的盆缘古斜坡区，地形由山前向盆内逐渐变缓（图12）。古近系连片发育干柴沟、红沟子和月牙山3个扇三角洲沉积体系。受古地形控制，阿尔金山西段斜坡带形成古鼻隆、古斜坡和古凹陷3个构造台阶，并对应发育冲积扇、扇三角洲和断坡扇3类砂体。其中古斜坡区大面积发育扇三角洲群，扇三角洲前缘水下分流河道砂体发育，储层岩性以中、粗砂岩为主，储集空间主要为粒间孔、溶蚀孔，孔隙度为5%~15%，渗透率为0.5~50mD。该套优势砂体上倾方向发育扇三角洲平原和冲积扇沉积，岩性为含砾砂岩和含泥砂质砾岩，分选差，方解石胶结，孔隙度平均为3.03%，渗透率平均为0.23mD，总体较为致密；下倾方向对接英雄岭和小梁山两大生烃凹陷。综合分析认为，阿尔金山西段斜坡带扇三角洲前缘水下分流河道砂体具备形成规模岩性油藏的潜力，2021年优选月牙山物源体系实施的阿探1井日

产油4.3m³，实现了该领域的突破，“十四五”期间加强干柴沟、红沟子等物源体系和砂体的刻画，有望新增5000×10⁴t探明石油地质储量。

3.2.3 柴北缘侏罗系内幕地层—岩性油气藏

勘探证实，侏罗系是一套重要的烃源岩层系，经历了燕山期的差异剥蚀，目前地层残余分布于柴北缘地区，井震结合落实了下侏罗统（J₁）坪东、昆特依、冷湖、伊北和中侏罗统（J₂）鱼卡等主要生烃凹陷。其中冷湖凹陷湖西山组（J₁h）暗色泥岩集中发育，厚度超过1000m，面积为1850km²，TOC介于1%~8%，S₁+S₂为5~20mg/g，有机质类型为Ⅱ₁—Ⅱ₂型，R_o介于0.5%~1.2%；坪东凹陷、昆特依凹陷和伊北凹陷的小煤沟组—大煤沟组二段（J₁x—J₁d²）发育碳质泥岩，厚度为1600m，面积为14260km²，TOC介于10%~30%，S₁+S₂为20~60mg/g，有机质类型为Ⅱ₂—Ⅲ型，R_o>2.0%。近期利用格架二维和部分三维地震重新开展昆特依、冷湖两大侏罗系凹陷结构、沉积演化和岩相古地理等研究，认为侏罗系沉

积期大型断陷湖盆群发育, 盆缘斜坡水下分流河道砂体对接湖盆中心优质烃源岩^[22-27], 在构造稳定区易形成侏罗系源内自生自储型的地层—岩性油气藏(图13),

并落实埋深小于5000m的有利面积达800km²(图12), 目前在牛东地区已获得重要突破, 初步分析在牛东—冷湖一带具备 1×10^8 t油当量增储潜力。

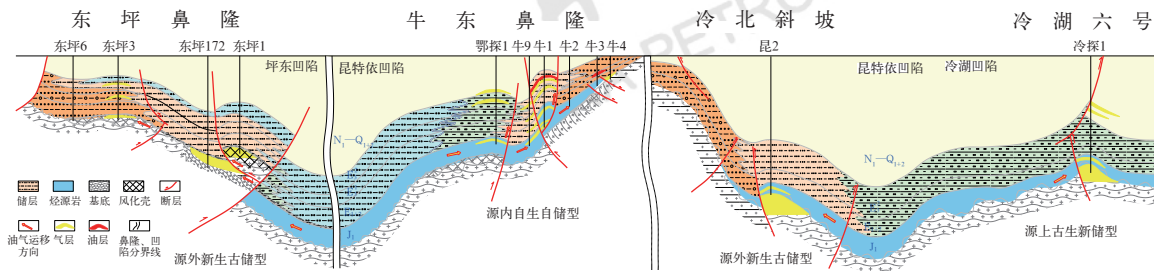


图13 柴北缘山前带油气成藏模式图

Fig.13 Hydrocarbon accumulation pattern in piedmont zone in the northern margin of Qaidam Basin

3.2.4 柴北缘腹部古近系碎屑岩岩性油气藏

柴北缘侏罗系含油气系统发育多种成藏模式, 源外新生古储型、源内自生自储型油气藏均有突破(图13), 源上古生新储型油气藏目前尚未取得重要进展。前期在冷湖、鄂博梁构造带高部位见到频繁的油气显示, 但由于构造圈闭被断裂复杂化, 保存条件差, 没有形成规模富集。通过积极转变思路, 认为构造稳定的古近系大型斜坡区砂体大面积分布, 深大断裂沟通烃源岩, 优质砂体侧向输导, 是岩性勘探有利区。同时中浅层新近系快速沉降和持续水进, 容易形成大范围的超压, 抑制天然气的纵向运移、散失, 有利于岩性油气藏保存。优选埋藏较浅的冷湖生烃凹陷, 开展沉积体系和砂体展布研究, 明确冷湖构造带东西斜坡古近系岩性勘探有利面积为1200km²(图12), 具备新增 1×10^8 t油当量储量的基础。

3.2.5 凹陷—斜坡区泥岩生物气

三湖第四系生物气成藏独具特色, 目前砂岩构造型气藏认识程度和勘探程度均较高, 砂体尖灭等岩性气藏也正在积极探索。近期通过借鉴页岩气勘探思路, 转变研究方向, 发现整体疏松的泥岩同样具有较好的储集性能, 储集空间具有全尺度孔径分布的特征: 粒间孔、溶蚀孔的孔径介于1~40μm, 晶间孔、黏土矿物层间孔等微孔隙孔径介于15~160nm。同时泥岩具有相对高的有机质丰度, 既是生物气主力的烃源岩层, 也是主要的储层。凹陷区或构造翼部的缓坡区有利于泥岩生物气的富集。结合生物气形成机理, 依据最佳生气温度(35~65℃)、有效烃源岩有机质丰度下限(TOC>0.2%)和泥岩平面分布特征(泥地比大于60%)等指标, 落实有利面积3200km²(图12), 估算资源量为 6500×10^8 m³, 目前针对该领域正在开

展风险勘探。

3.3 战略准备勘探方向

3.3.1 柴西茫崖凹陷页岩气

茫崖凹陷为柴西大型坳陷最东部的生烃次凹(图14), 是目前勘探和认识程度最低的凹陷。沉积体系演化研究认为, 茫崖凹陷N₁沉积时期为稳定的滨浅湖沉积, 受湖平面高频振荡影响, 广泛发育灰云岩储层和灰质泥岩、泥灰岩烃源岩, 纵向上互层叠置, 横向广覆式连片, 形成良好的配置组合。茫崖凹陷N₁烃源岩TOC介于0.41%~1.73%, 平均为0.74%, 为中等烃源岩, 有机质类型为II—III型, 现今热演化程度高, R_o介于1.2%~2.0%, 处于生气高峰期, 盆地模拟显示, 生气强度最高达 37×10^8 m³/km², 总生气量为 33.4×10^{12} m³, 与烃源岩共生的灰云岩储集体晶间孔集群发育, 具备形成大面积页岩气藏的条件。目前钻遇N₁的3口井均见天然气显示, 试气获气流, 2022年计划强化钻井取心, 地质工程结合加强甜点评价, 积极探索茫崖页岩气水平井效益动用方式, 如获成功, 将形成新的千亿立方米级大气区。

3.3.2 盆地石炭系

柴北缘石炭系为海陆过渡相沉积, 发育泥页岩、生屑灰岩和碳质泥岩3种类型烃源岩, 根据露头岩性组合, 预测盆地有效烃源岩厚度为800~1000m, TOC整体大于0.4%, 局部达到4.0%以上, S₁+S₂为0.1~2mg/g, 达到中等—好标准, 有机质类型以II₂—III型为主, 现今处于高成熟—过成熟阶段, 指示烃源岩正在进行或已经发生生排烃作用。柴达木盆地石炭系同时发育碎屑岩和碳酸盐岩两类有效储层, 碎屑岩储层储集空间以溶蚀孔为主, 孔隙度平均为

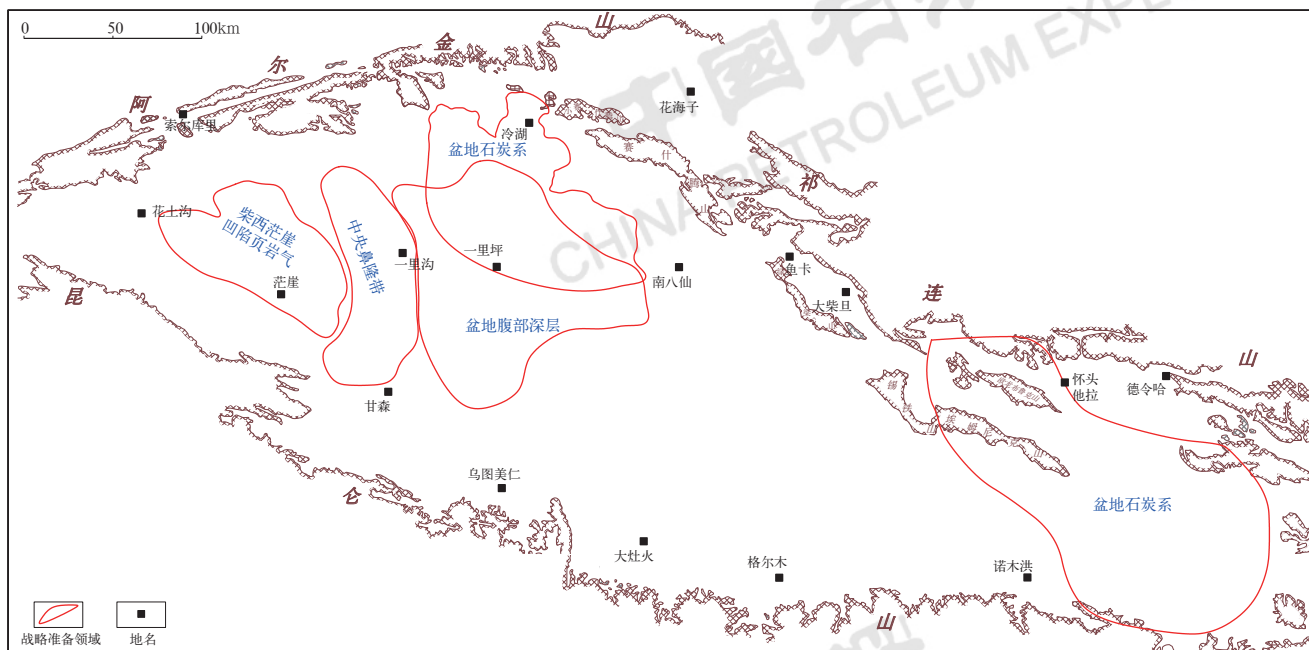


图 14 柴达木盆地油气勘探战略准备层次区带分布概略图

Fig.14 Distribution of strategic preparation zone in petroleum exploration in Qaidam Basin

5.5%；碳酸盐岩储层发育少量裂缝和溶蚀孔，孔隙度平均为 4.2%，分布面积约为 20000km²（图 14），最大地层厚度超过 4000m。总体来看，盆地石炭系具备基本成藏条件，是潜在的含油气系统，初步估算资源量为 8.0×10⁸t 油当量，可作为盆地战略准备勘探方向。受勘探、认识程度较低的影响，石炭系含油气系统下一步勘探方向尚未明确，主要以基础地质研究为主，重点开展两个方面的工作：一是通过强化地震和非地震工作量部署，加强古生界盆山关系、演化过程和残余地层分布的整体研究；二是持续开展岩相古地理刻画和烃源岩评价，为明确勘探类型、方向奠定基础。

3.3.3 中央鼻隆带

通过构造演化和古地貌恢复，揭示盆地发育中央鼻隆带，由北部大风山鼻隆和南部黄石鼻隆向盆地延伸的结合部组成（图 14），自 E₁₊₂ 沉积期持续继承性发育，呈北西—南东向展布，其主要证据表现为：一是鼻隆带两侧岩石组合特征存在差异，西侧柴西坳陷周缘以碳酸盐岩岩相组合为主，东侧一里坪坳陷周缘以碎屑岩岩相为主，两者差异显著；二是古盐度分布存在差异，大量元素地球化学分析表明西侧柴西坳陷为高盐度咸化湖盆，东侧一里坪坳陷为低盐度淡水湖盆，揭示两大凹陷中间存在地貌隆起，对湖盆水体起到障壁作用，也是岩性分异的主要原因；三是沉积速率研究表明，中央鼻隆带沉降—沉积速率较低，两

侧的柴西和一里坪在 E₃² 沉积期沉降—沉积速率大，地震层拉平剖面显示，南北向鼻隆带现今整体表现为中部低、两边高的构造形态，受断层控制，形成多个断背斜。目前在柴西已经明确发育全油气系统，在内环带英西—英中—干柴沟、中环带西侧南翼山—风西等地区连续获勘探突破，展现广阔勘探前景，而中环带东侧中央鼻隆带勘探程度低，与风西—南翼山具有相似沉积成储条件，发育藻灰岩—灰云岩储集体，有利勘探面积达 1500km²，是湖相碳酸盐岩未来有利接替区。

3.3.4 盆地腹部深层

盆地腹部地区，面积广阔，约 18000km²（图 14），受南北向持续挤压作用，形成一系列逆冲断层，被分割成不同的构造单元，发育碱石山、斧头山、落雁山、土疙瘩、鄂博山、弯梁、土林堡、平山梁、红三旱三号、红三旱四号、鄂博梁、鸭湖等地面构造，表现为“东西凹相连，南北隆相间”的构造格局。目前整体勘探程度较低，零星钻探了 20 余口井，均在新近系见到好的油气显示，天然气同位素分析多为热成因气；地球化学分析化验表明，一里坪地区新近系暗色泥岩已进入生气阶段，有望成为柴达木盆地潜在的天然气勘探领域；同时深层侏罗系烃源岩也具有很大资源潜力，且已在落雁山落深 1 井见到煤型气显示，并取到样品；最新盆地二维格架线也表明，一里坪—

鸭湖地区深层发育侏罗系，厚度大于1000m，埋深超过9000m，随着工程技术的进步，盆地腹部深层有望成为未来天然气勘探的重要接替领域。

3.4 柴达木盆地多矿种协同勘探

除石油、天然气外，盆地还蕴含钾、锂、硼、铀、氦等共伴同存的国家紧缺或战略矿产资源。在油气勘探的同时，按照综合勘探协同找矿的思路，按照油田建设新时代综合能源新高地的目标，未来应该加强多矿种协同勘探。根据目前对成矿条件及规律的认识，预测存在3个有利勘探方向（图15）。

一是阿尔金山前带东段基岩含氦气藏。气样分析表明，柴达木盆地各气田或气藏普遍混有氦气，以阿尔金山前带东段东坪和尖北基岩气藏中氦气含量最高，超工业品位2~5倍，初步认为基岩气藏中氦气为壳源成因，与基底岩岩浆岩和变质岩中的放射性元素含量及衰变有关。“十三五”油气资源评价初步估算了阿尔金山前东段氦气资源量。由于天然气藏的规模发现及稳产条件直接影响氦气的规模大小及可利用价值，综合柴达木盆地天然气藏地质条件、气藏规模、氦气含量及成因机理，认为阿尔金山前带东段具有形成规模含氦气藏的地质条件。

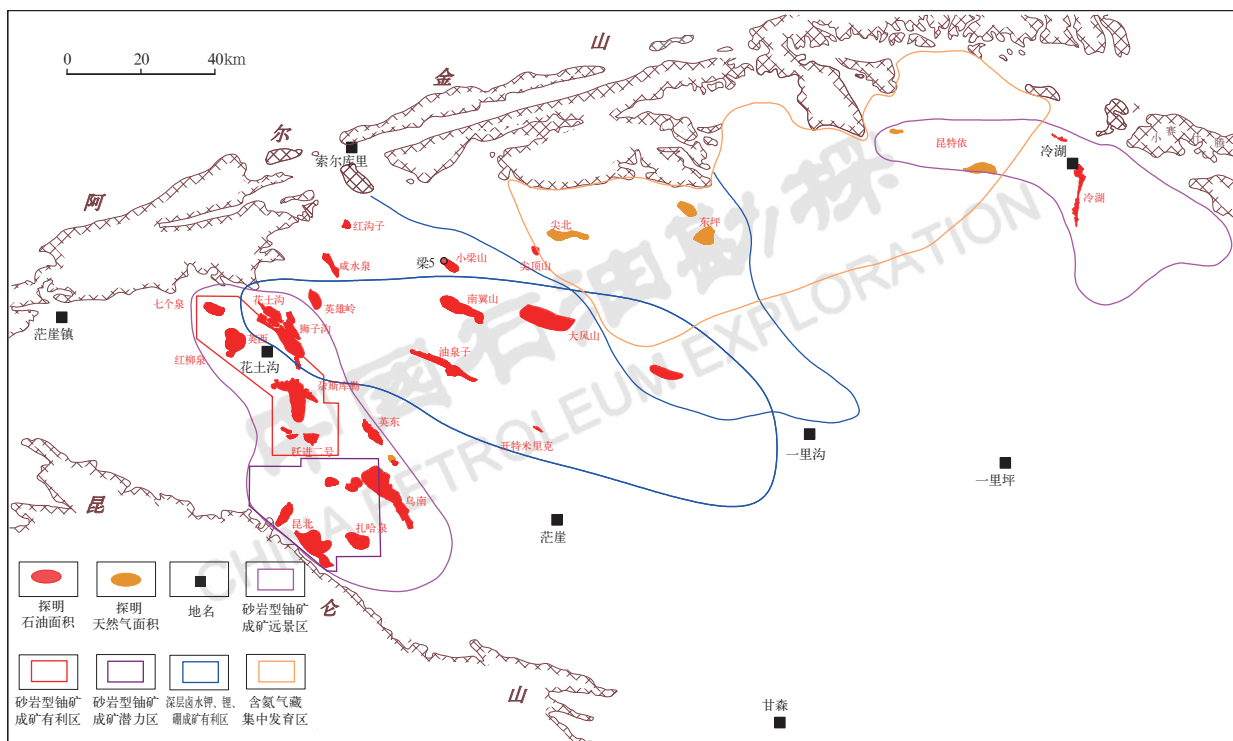


图15 柴达木盆地非油气矿产资源分布概略图

Fig.15 Distribution of non-oil and gas mineral resources in Qaidam Basin

二是柴西坳陷深层卤水钾、锂、硼矿。柴西坳陷古近系—新近系长期处于干旱咸化环境，利于盐类及钾、锂、硼等矿产的浓缩富集。多个含油气构造区勘探证实，深层卤水为中—高矿化度地层水，与油气呈互层、边水或底水方式分布，普遍富含钾、锂、硼等资源。目前揭示 E_3^2 、 N_1 、 N_2^1 、 N_2^2 为富矿层系，最大埋深为5400m，其中 E_3^2 的矿产资源普遍优于其他层系，埋深普遍大于2500m，尤其锂资源品位可超过工业标准3~5倍，硼资源品位普遍超过工业标准2~4倍。依据水质资料及认识程度，初步圈定英西—南翼山—大风山古近系—新近系以及尖北—东坪—长

尾梁深层卤水钾、锂、硼矿成矿有利区，叠合面积为8500km²。

三是柴西南区砂岩型铀矿。依托油气井自然伽马异常筛查及查证钻探，柴达木盆地柴西、柴北缘及三湖地区圈定多个铀成矿远景区，尤其柴西南区具有下油上铀特点，氧化还原条件最为优越，也是现阶段钻探成功率最高的地区。目前揭示矿层埋深普遍小于500m，局部油气区已初步落实一定规模的砂岩型铀矿床。依据铀异常、砂体展布及勘探程度，初步圈定七个泉—昆北成矿远景区。

此外，柴达木盆地为高原热盆，平均地温梯度

为 $3.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,以南翼山—大风山为代表的部分地区地温梯度甚至高达 $4.4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,南6井在3018m处温度高达 134°C ,揭示柴达木盆地具有丰富的地热、干热岩资源,有待勘探开发利用。

4 油气勘探面临的主要挑战及对策举措

在新形势下,为适应“深浅层结合,构造—岩性结合,多种岩性复合,常规与非常规结合”的油气勘探新思路、多矿种结合勘探需要,必须大力实施高效勘探工程,获得更大突破,当前面临着地质、工程技术、管理等多方面挑战,需要针对性的解决方法及对策举措。

4.1 地质理论

主要挑战:一是对古生代至新生代盆地构造演化及岩相古地理变迁的研究仍不系统,导致古生代及中生代原型盆地认识不清;二是柴西古近系—新近系咸化湖相低有机质丰度的烃源岩成烃母质不清、生烃机理不明;三是湖相碳酸盐岩、深埋碎屑岩、基岩等有效储层评价、预测难度大^[39-41];四是英雄岭页岩油成因机理仍不明确,评价标准尚未建立,“甜点”难以确定。目前针对柴西拗陷古近系—新近系页岩油的滞留形成机理、多重介质成储机理、页岩油赋存及流动机理等研究均严重不足。

对策举措:一要强化研究顶层设计,以油田为主导,组织协调各研究部门,充分发挥专业特长,联合攻关,解决制约勘探的关键问题;二要加强基础研究,重视基础实验,创新实验方法,注重研究的系统性和整体性,针对高原强改造盆地实际难题开展科技攻关,形成具有柴达木盆地特色的油气勘探地质理论;三要勇于创新,要积极引进最新理论理念,学习借鉴其他盆地经验,解放思想,突破传统观念的束缚,大胆设想、小心求证;四要与国内高水平科研院所及院校合作,共同打造创新联合体,通过联合办院,实现高技术人才引进和油田科技人员送外培养,不断提升整体研究水平和攻关能力。

4.2 地震技术

主要挑战:一是盆地地震资料准备不足,三维地震覆盖率为9.5%,二维地震测网低于 $2\text{km}\times 2\text{km}$ 的面积占勘探总面积的43%,地震勘探程度较低,严重制约了盆地油气勘探;二是强改造盆地地表地下“双复杂”区及深层的地震成像精度不高,资料品质不佳,

断裂及构造圈闭难落实;三是咸化湖相碎屑岩沉积具有砂体单层厚度较薄、纵横向非均质性强的特点,岩性圈闭难预测;四是咸化湖相页岩以混积型灰云质页岩为主,矿物成分多样,有机质丰度及储集性能变化快,非常规油气甜点难判识。

对策举措:一要加强地震勘探力度,提高三维地震覆盖率,“十四五”期间,预计每年新增三维地震 $600\sim 1000\text{km}^2$;二要开展“双复杂”区及深层地震采集、多信息约束高精度速度建模、可控震源资料低频保护处理、叠前深度偏移算法优化等关键技术攻关,强化实验,努力提高地震资料信噪比,准确落实构造细节,形成强改造盆地地震采集、处理、解释配套技术;三要开展全频带高保真处理、高分辨率高精度处理、地震大数据人工智能储层预测等关键技术攻关,井震结合提高储层预测符合率,探索适合柴达木盆地的岩性圈闭判识技术;四要针对地表地貌复杂导致地震资料信噪比低,地下沉积相变快导致的横向分辨难题,在攻关适合的地震采集处理技术、提高地震分辨率的同时,开展地球物理正演模拟,逐次降频,寻找工业界常用频率下非常规甜点的地震响应特征,提高“甜点”预测准确率。

4.3 测井技术

主要挑战:一是针对英雄岭咸化湖相混积型页岩油,目前测井资料对烃源岩识别与有机碳含量评价精度不高,地球化学参数测井定量评价能力不足,测井资料对有效孔隙度、含油饱和度等参数解释精度不够,无法满足“甜点”评价及优选需求;二是柴西地区古近系—新近系岩性混杂,“砂、泥、灰、云、膏、盐”共存,优势岩性岩相不明确,存在多尺度储集空间,孔隙结构复杂,孔渗相关性差,薄互层发育,优势储层不明,横向非均质性极强,有效储层测井表征难;三是柴达木盆地油气储层普遍具有非均质性强、孔隙结构复杂、含油饱和度较低及油水层差异小的特点,导致流体识别困难,特别是油水产出比评价难度大。

对策举措:一要系统开展岩心岩石物理实验,明确英雄岭页岩油三品质七性参数测井响应特征,建立测井评价解释模型;二要充分发挥核磁共振测井新技术优势,开展微孔结构研究,提高储层有效性评价精度;三要建立储层含水率分级评价解释标准,探索介电扫描、氯离子含量等非电法流体识别技术,结合核磁孔隙结构开展低饱和度流体判识研究,提高流体解释符合率。

4.4 钻探技术

主要挑战：一是浅表层疏松恶性井漏严重，目前常规堵漏工艺难以应对复杂地质条件带来的挑战，工艺针对性不强，堵漏成功率低；二是盆地中深层普遍发育高压水层，且横向非均质性强，井间差异大，其分布无明显规律可循，导致地层压力系数预测不准，钻井过程中遭遇战频发，造成“出水—溢流—井漏—卡钻”连锁反应复杂，处理难度大；三是超深井钻井提速困难，深部强压实地层、混合岩性、基岩等特殊地层综合提速尚未取得突破进展，机械钻速较低；四是柴达木盆地为高原热盆，平均地温梯度为 $3.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，5500m以深地层温度大多超过 175°C ，碱探1井在井底6343m处温度高达 240°C 。由于异常高温钻探技术欠缺，导致入井流体、导向工具、测井仪器等难以满足技术需求，制约了深层勘探进展。

对策举措：一要持续开展井身结构优化；二要分析目标区块漏失特征，明确漏失机理，优化防漏堵漏技术工艺及高温钻井液、水泥浆体系；三要完善高压气水层安全钻井措施，形成柴达木盆地高温深井安全钻井配套技术；四要针对不同地层提速难点，推广提速工具，为深井、超深井及水平井的快速钻井提供保障。

4.5 储层改造技术

主要挑战：一是复杂叠置地层精细地质力学建模难度大；二是中高频旋回地层裂缝起裂及扩展机理不清；三是多层系非均质地层高效改造技术不完善；四是工厂化平台式立体压裂缺水；五是低饱和度气藏采排工艺不明，难以实现有效动用。

对策举措：一要加强岩石力学地应力基础实验及裂缝机理研究；二要建立并不断完善地质力学模型，优化部署方案；三要重视平台式立体压裂配套工艺研究；四要开展高矿化度压裂液体系评价及试验；五要加强排水采气工艺实验，探索低饱和度气藏动用方法，实现“与水共舞”，适应柴达木盆地独特油气藏类型需要。

4.6 勘探管理

主要挑战：随着柴达木盆地油气勘探快速进入非常规油气勘探阶段，传统油气行业接力式的勘探开发阶段划分、总体开发方案编制理念及审批制度等，已经不适应非常规油气快速反应、及时调整的需求。

对策举措：一要在项目管理上，全面推行全生命周期管理模式，建立学习曲线，不断积累、不断迭代，保证项目风险可控、效益可观；二要在队伍组织上，采用一体化运作模式，整体统筹勘探开发、地质工程、地面地下、科研生产、生产经营、设计监督等各专业人员，提高工作效率，实现效益最大化；三要在研究组织上，充分发挥中国石油长期以来在页岩油勘探开发上积累的技术优势和人才优势，搭建多单位、多专业联合攻关平台和英雄岭页岩油勘探开发数据平台，实现各专业资源、数据、成果实时共享，及时开展应用效果反馈分析，加速研究认识迭代^[42]。

5 结论

(1) 青海油田紧紧围绕制约柴达木盆地油气勘探的关键地质技术瓶颈，针对盆地油气勘探存在的薄弱环节，深化基础地质研究，总结油气成藏规律，转变油气勘探思路，加大先进实用技术推广应用，加强复杂地区地震采集处理解释、复杂油气层识别、多压力系统钻井、致密储层改造技术攻关，全方位推行油气勘探项目管理，在盆缘断阶源外、斜坡区岩性、盆内凹陷页岩油气、晚期隆起区等勘探领域取得较好成效。

(2) 总结近年来取得的勘探成果，主要有五方面启示：一是思想观念的转变，拓展了勘探领域；二是地质认识的提升，推动了勘探突破；三是工程技术的进步，解放了勘探目标；四是管理模式的革新，提升了勘探实效；五是优秀团队的建设，保障了勘探发展。

(3) 按照战略准备盆地石炭系油气藏、柴西茫崖凹陷页岩气、中央鼻隆带及盆地腹部深层；战略突破柴北缘腹部古近系碎屑岩岩性油气藏、柴北缘侏罗系内幕地层—岩性油气藏、阿尔金山西段斜坡带扇三角洲岩性油藏、柴西坳陷页岩油、凹陷—斜坡区泥岩生物气；战略展开山前基岩气藏、柴西地区构造油气藏、柴西南斜坡岩性油藏、三湖凹陷斜坡区滩坝砂体岩性气藏3个层次13个有利油气勘探方向和阿尔金山前带东段基岩含氦气藏、柴西坳陷深层卤水钾、锂、硼矿、柴西南区砂岩型铀矿3个非油气矿产的勘探方向。

(4) 柴达木盆地油气勘探将面临更为复杂的地质条件、更新的油气藏类型、更具挑战的工程技术难题，只有不断深化油气成藏理论研究和工程技术攻关，突破思维禁锢，创新勘探思路，才能获得更大的勘探突破。

参考文献

- [1] 黄立功, 党玉琪, 徐凤银, 等. 柴达木盆地油气勘探现状和突破方向[J]. 中国石油勘探, 2006, 11(6): 1-8.
Huang Ligong, Dang Yuqi, Xu Fengyin, *et al.* Present situation and break through direction of oil and gas exploration in Qaidam Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2006, 11(6): 1-8.
- [2] 付锁堂, 马达德, 陈琰, 等. 柴达木盆地油气勘探新进展[J]. 石油学报, 2016, 37(增刊 1): 1-10.
Fu Suotang, Ma Dade, Chen Yan, *et al.* New advance of petroleum and gas exploration in the Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S1): 1-10.
- [3] 张道伟, 马达德, 陈琰, 等. 柴达木盆地油气地质研究新进展及勘探成果[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(5): 505-512.
Zhang Daowei, Ma Dade, Chen Yan, *et al.* Research progress on oil and gas geology and exploration practice in Qaidam Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(5): 505-512.
- [4] 张英, 李剑, 张奎, 等. 柴达木盆地三湖地区第四系生物气源岩中可溶有机质丰度及地质意义[J]. 地质学报, 2007, 81(12): 1716-1722.
Zhang Ying, Li Jian, Zhang Kui, *et al.* The abundance and geological significance of soluble organic matter in Quaternary biogas source rocks in Sanhu area, Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(12): 1716-1722.
- [5] 林腊梅, 金强. 柴达木盆地北缘和西部主力烃源岩的生烃史[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(6): 677-681.
Lin Lamei, Jin Qiang. Hydrocarbon generation history of main source rocks in the northern and western Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(6): 677-681.
- [6] 刘洛夫, 妥进才, 于会娟, 等. 柴达木盆地北部地区侏罗系烃源岩地球化学特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(1): 64-68.
Liu Luofu, Tuo Jincai, Yu Huijuan, *et al.* Geochemical characteristics of Jurassic source rocks in the northern part of Qaidam Basin[J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2000, 24(1): 64-68.
- [7] 丁安娜, 王明明, 李本亮, 等. 生物气的形成机理及源岩的地球化学特征: 以柴达木盆地生物气为例[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 402-407.
Ding Anna, Wang Mingming, Li Benliang, *et al.* The formation mechanism of biogas and the geochemical characteristics of source rocks: taking biogas in Qaidam Basin as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(5): 402-407.
- [8] 关平, 王大锐, 黄第藩. 柴达木盆地东部生物气与有机酸地球化学研究[J]. 石油勘探与开发, 1995(3): 41-45, 127.
Guan Ping, Wang Darui, Huang Difan. Geochemistry of biogas and organic acids in the eastern Qaidam Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1995(3): 41-45, 127.
- [9] 刘占国, 张永庶, 宋光永, 等. 柴达木盆地英西地区咸化湖盆混积碳酸盐岩岩相特征与控储机制[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 68-80.
Liu Zhanguo, Zhang Yongshu, Song Guangyong, *et al.* Mixed carbonate rocks lithofacies features and reservoirs controlling mechanisms in the saline lacustrine basin in Yingxi area, Qaidam Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 68-80.
- [10] 王建功, 张道伟, 袁剑英, 等. 英西相碳酸盐岩储层成因与含油性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 99-109.
Wang Jiangong, Zhang Daowei, Yuan Jianying, *et al.* Characteristics of reservoir genesis and oil-gas accumulation in lacustrine carbonate in Yingxi area of Qaidam Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 99-109.
- [11] 袁剑英, 黄成刚, 夏青松, 等. 咸化湖盆碳酸盐岩储层特征及孔隙形成机理: 以柴西地区始新统下干柴沟组为例[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 111-126.
Yuan Jianying, Huang Chenggang, Xia Qingsong, *et al.* The characteristics of Carbonate reservoir, and formation mechanism of pores in the saline lacustrine basin: a case study of the lower Eocene Ganchaigou Formation in western Qaidam Basin[J]. Geological Review, 2016, 62(1): 111-126.
- [12] 张永庶, 伍坤宇, 姜营海, 等. 柴达木盆地英西深层碳酸盐岩油气藏地质特征[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(3): 358-369.
Zhang Yongshu, Wu Kunyu, Jiang Yinghai, *et al.* Geological characteristics of deep carbonate hydrocarbon-bearing pool in the western Yingxi area in Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(3): 358-369.
- [13] 张道伟, 薛建勤, 伍坤宇, 等. 柴达木盆地英西地区页岩油储层特征及有利区优选[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(4): 1-11.
Zhang Daowei, Xue Jianqin, Wu Kunyu, *et al.* Shale oil reservoir characteristics and favorable area optimization in Yingxi area, Qaidam Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(4): 1-11.
- [14] 杜江民, 龙鹏宇, 秦莹民, 等. 柴达木盆地英西地区渐新统 E_3^2 储层特征及成藏模式[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(5): 1-10.
Du Jiangmin, Long Pengyu, Qin Yingmin, *et al.* Characteristics and accumulation model of Oligocene E_3^2 reservoir in Yingxi area, Qaidam Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(5): 1-10.
- [15] 李国欣, 朱如凯, 张永庶, 等. 柴达木盆地英雄岭页岩油地质特征、评价标准及发现意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 18-31.
Li Guoxin, Zhu Rukai, Zhang Yongshu, *et al.* Geological characteristics, evaluation criteria and discovery significance of Paleogene Yingxi shale oil in Qaidam Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 18-31.
- [16] 石亚军, 薛建勤, 马新民, 等. 高原咸化湖盆晚期构造高丰度油藏形成机制: 以柴达木盆地英东地区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(5): 1053-1061, 1125.
Shi Yajun, Xue Jianqin, Ma Xinmin, *et al.* Mechanisms of high abundance hydrocarbon accumulation in neotectonics/late-stage tectonics of plateau saline lacustrine basin: taking the Yingdong area of Qaidam basin as an example[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(5): 1053-1061, 1125.
- [17] 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.
- [18] 杨智, 唐振兴, 陈旋, 等. “进源找油”: 致密油主要类型及地质工程一体化进展[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 73-83.
Yang Zhi, Tang Zhenxing, Chen Xuan, *et al.* “Exploring oil inside source kitchen”: main types of tight oil and progress of geology-engineering integration[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 73-83.
- [19] 石亚军, 杨少勇, 郭佳佳, 等. 柴达木盆地深层油气成矿(藏)条件及有利区带[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(3): 506-522.
Shi Yajun, Yang Shaoyong, Guo Jiajia, *et al.* Petroleum accumulation conditions and favorable exploration plays of deeply buried strata in Qaidam Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(3): 506-522.
- [20] 路俊刚, 姚宣同, 王力, 等. 柴达木盆地跃进斜坡区油源判识与原油勘探方向[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(3): 730-740.
Lu Jungang, Yao Yitong, Wang Li, *et al.* Oil source and mature oil exploration potential of Yuejin slope area of Qaidam Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(3): 730-740.

- [21] 李剑, 曾旭, 田继先, 等. 中国陆上大气田成藏主控因素及勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(6): 1-20.
Li Jian, Zeng Xu, Tian Jixian, *et al.* Main controlling factors of gas accumulation and exploration target of large onshore gas fields in China[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(6): 1-20.
- [22] 刘德汉, 张惠之, 戴金星, 等. 煤岩显微组分的成烃实验研究与评价[J]. 科学通报, 2000, 45(4): 346-352.
Liu Dehan, Zhang Huizhi, Dai Jinxing, *et al.* Experimental study and evaluation of hydrocarbon generation of coal rock microscopic components[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(4): 346-352.
- [23] 赵长毅, 赵文智, 程克明, 等. 吐哈盆地煤油源岩形成条件与生油评价[J]. 石油学报, 1998(3): 33-37, 5.
Zhao Changyi, Zhao Wenzhi, Cheng Keming, *et al.* Kerosene source rock formation conditions and oil generation evaluation in Turpan-Hami Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 1998(3): 33-37, 5.
- [24] 冯子辉, 李景坤, 李振广. 大庆探区煤系烃源岩的生烃条件研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 21(5): 1-4, 66.
Feng Zihui, Li Jingkun, Li Zhenguang. Study on hydrocarbon generation conditions of coal-measure source rocks in Daqing exploration area[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002, 21(5): 1-4, 66.
- [25] 陈建平, 赵文智, 秦勇, 等. 中国西北地区侏罗纪煤系油气形成(之一)[J]. 石油勘探与开发, 1998(3): 17-21.
Chen Jianping, Zhao Wenzhi, Qin Yong, *et al.* Jurassic coal measures hydrocarbon formation in northwest China (Part1)[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998(3): 17-21.
- [26] 刘德汉, 傅家谟, 肖贤明, 等. 煤成烃的成因与评价[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 137-141.
Liu Dehan, Fu Jiamou, Xiao Xianming, *et al.* Causes and evaluation of coal-generated hydrocarbons[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(4): 137-141.
- [27] 田光荣, 李红哲, 白亚东, 等. 柴达木盆地侏罗系煤系烃源岩生烃潜力分类评价[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(5): 73-80.
Tian Guangrong, Li Hongzhe, Bai Yadong, *et al.* Classification and evaluation of the hydrocarbon generation potential of Jurassic coal measure of Qaidam Basin[J]. Coal Geology and Prospecting, 2018, 46(5): 73-80.
- [28] 李洪波, 张敏, 张春明, 等. 柴达木盆地西部南区第三系原油成熟度特征[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(1): 27-32, 12.
Li Hongbo, Zhang Min, Zhang Chunming, *et al.* Maturity characteristics of Tertiary crude oil in the southern western part of Qaidam Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2010, 32(1): 27-32, 12.
- [29] 张斌, 何媛媛, 陈琰, 等. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩地球化学特征及成藏意义[J]. 石油学报, 2017, 38(10): 1158-1167.
Zhang Bin, He Yuanyuan, Chen Yan, *et al.* Geochemical characteristics and oil accumulation significance of high-quality source rocks of saline lacustrine facies in the western Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(10): 1158-1167.
- [30] 吴德云, 张国防. 盐湖相有机质成烃模拟实验研究[J]. 地球化学, 1994, 23(增刊1): 173-181.
Wu Deyun, Zhang Guofang. Simulation experiment research on hydrocarbon formation of salt lake phase organic matter[J]. Geochemistry, 1994, 23(S1): 173-181.
- [31] 李术元, 林世静, 郭绍辉, 等. 矿物质对干酪根热解生烃过程的影响[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(1): 69-71.
Li Shuyuan, Lin Shijing, Guo Shaohui, *et al.* The effect of minerals on kerogen pyrolysis and hydrocarbon generation process[J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2002, 26(1): 69-71.
- [32] 钱凯, 屈平彦, 宋凯. 古三角洲砂体入湖距离的动力学预测[J]. 沉积学报, 1984, 2(3): 82-90.
Qian Kai, Qu Pingyan, Song Kai. Dynamic prediction of the distance from the paleo delta sand body into the lake[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1984, 2(3): 82-90.
- [33] 王万春, 刘文汇, 王国仓, 等. 沉积有机质微生物降解与生物气源岩识别: 以柴达木盆地三湖坳陷第四系为例[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 318-327.
Wang Wanchun, Liu Wenhui, Wang Guocang, *et al.* Microbial degradation of sedimentary organic matter and identification of biogas source rocks: taking the Quaternary of Sanhu Depression in Qaidam Basin as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 318-327.
- [34] Shuai Yanhua, Zhang Shuichang, Peng Pingan, *et al.* Occurrence of heavy carbon dioxide of organic origin: evidence from confined dry pyrolysis of coal[J]. Chemical Geology, 2013, 358: 54-60.
- [35] 帅燕华, 张水昌, 赵文智, 等. 陆相生物气纵向分布特征及形成机理研究: 以柴达木盆地涩北一号为例[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37(1): 46-51.
Shuai Yanhua, Zhang Shuichang, Zhao Wenzhi, *et al.* Study on the longitudinal distribution characteristics and formation mechanism of terrestrial biogas: taking Sebei No.1 in Qaidam Basin as an example[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(1): 46-51.
- [36] 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.
- [37] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, *et al.* Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [38] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1-10.
Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, *et al.* Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 1-10.
- [39] 郭佳佳, 孙国强, 门宏建, 等. 柴北缘腹部深层异常高孔一渗储层成因分析[J]. 沉积学报, 2018, 36(4): 777-786.
Guo Jiajia, Sun Guoqiang, Men Hongjian, *et al.* Genetic analysis of anomalously high porosity zones in deeply buried reservoirs in the west of northern edge of Qaidam Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(4): 777-786.
- [40] Taylor T R, Giles M R, Hathon L A, *et al.* Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: models, myths, and reality[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1093-1132.
- [41] 金振奎, 苏奎, 苏妮娜. 准噶尔盆地腹部侏罗系深部优质储层成因[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 25-31.
Jin Zhenkui, Su Kui, Su Nina. Origin of Jurassic deep burial high-quality reservoirs in the central Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 25-31.
- [42] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 1-13.
Li Guoxin, Zhu Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 1-13.