

柴达木盆地超深层基岩气藏勘探发现及启示

王波¹, 宋光永^{1,2}, 张荣虎², 曾庆鲁², 王艳清², 孙秀建³,
吴志雄¹, 李森明², 李雅楠¹, 宫清顺²

1 中国石油青海油田公司; 2 中国石油杭州地质研究院;

3 中国石油勘探开发研究院西北分院

摘要 在大量岩心、铸体薄片、扫描电镜、X衍射全岩矿物、测井等资料分析的基础上,系统研究了柴北缘超深层(深度超过7 000 m)基岩油气藏的储层主控因素及成藏条件。研究表明:①中酸性花岗质基岩作为储层的优质岩性,在长期变质、构造成缝、风化剥蚀等有利成储因素的耦合效应下,形成以裂缝及溶蚀孔为主要储集空间且受埋藏压实影响小的风化壳与内幕2类成因的有效储层;②侏罗系碳质泥岩(亦是烃源岩)与古近系路乐河组膏质泥岩2套有效盖层为油气长距离运移和有效聚集创造了条件;③生烃期与输导断层及圈闭形成期同步是油气富集成藏的关键因素;④主要分布于凹陷区的侏罗系高成熟煤型气源岩与下伏基岩储层构成侧接式上生下储源储组合,并以断层和基岩顶部的不整合面为烃类运移通道,形成源外、源内2类油气藏。受接替式油气运移机制及盖层条件控制,形成构造高部位聚集石油且充满度与丰度低,构造中—低部位聚集天然气且充满度与丰度高的成藏特点。认为柴北缘超深层基岩具备较大的油气勘探潜力。

关键词 超深层; 基岩; 储层特征; 成藏条件; 柴达木盆地

中图分类号: TE122.3 **文献标识码**: A

引用: 王波, 宋光永, 张荣虎, 等. 柴达木盆地超深层基岩气藏勘探发现及启示[J]. 海相油气地质, 2025, 30(1): 59-70.

WANG Bo, SONG Guangyong, ZHANG Ronghu, et al. Discovery and geological significance of ultra-deep bedrock gas reservoirs in the Qaidam Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2025, 30(1): 59-70.

0 前言

柴达木盆地基底历来是青海油田油气勘探的重要领域^[1-3]。2010年以来,相继在昆北、东坪、牛中和尖北等地区获得不同程度的突破,累计探明油气当量超过1亿吨^[4-5]。在浅层勘探目标相继被钻探的现实情况下,随着勘探实践及地质认识的不断深入,青海油田公司已将勘探对象瞄准在柴达木盆地北缘(以下简称柴北缘)深层—超深层基岩气田上^[6]。2019年以来,在埋藏深度超过7 000 m的昆特依地区发现了整装高丰度基岩气藏^[7]。迄今为止,该气田为世界上埋藏深度最大的基岩气田,不仅展示了柴北缘深层—超深层基岩良好的勘探前景,为后续钻探增强了信心,也标志着我国深层—超深层基岩的油气勘探实践及地质理论取得新发展。

统计全球数据发现,绝大多数基岩油气藏的勘探深度小于4 500 m。而前人的研究表明,基岩是一种非均质性较强的储层类型^[4]。但是,基岩在深层—超深层成储及成藏特征方面与浅层是否相似,基岩在深层—超深层是否具有勘探潜力,对这些问题的研究尚未见于公开文献。解剖柴北缘超深层基岩气藏,将有助于回答这些问题。本文回顾了柴北缘深层—超深层基岩气田的勘探发现历程,分析了其油气地质条件、油气藏特征,剖析了成藏主控因素及时空配置,指出了有利油气勘探靶区。同时冀望本文对其他地区深层—超深层基岩成储成藏研究和油气勘探有所裨益及参考。

1 地质背景

昆特依气田位于柴北缘阿尔金山系南侧。阿尔金山为一近NEE向的走滑断裂带,自新生代以来

收稿日期: 2024-10-10; 改回日期: 2025-01-02

本文受中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“叠合盆地中下组合规模储层形成机制与分布规律研究”(编号:2023ZZ0204)资助

第一作者: 王波, 硕士, 高级工程师, 主要从事石油地质综合研究工作。通信地址: 736202 甘肃省酒泉市敦煌市昆仑中路7号 勘探开发研究院; E-mail: wboqh@petrochina.com.cn

通信作者: 宋光永, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气储层地质研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号杭州地质研究院; E-mail: songgy_hz@petrochina.com.cn

持续隆升,与祁连山、昆仑山一起构成了柴达木新生代盆地的边界^[8]。现今基岩顶面构造纲要图(图1)显示,从阿尔金山山系东段向盆地内部呈斜坡或断阶-凹陷的构造背景,被东西向与南北向2组断层分割形成“两个鼻隆、三个斜坡”的构造格局,自西向东

分别为尖北斜坡、东坪鼻隆、牛中斜坡、牛东鼻隆和冷北斜坡^[9]。各个次级构造单元内部又受一系列断层控制形成背斜、断背斜和断块等构造圈闭。昆特依气田位于冷北斜坡,向东为冷东斜坡和平台凸起,向西为牛东鼻隆,向南则为昆伊特凹陷和坪东凹陷。

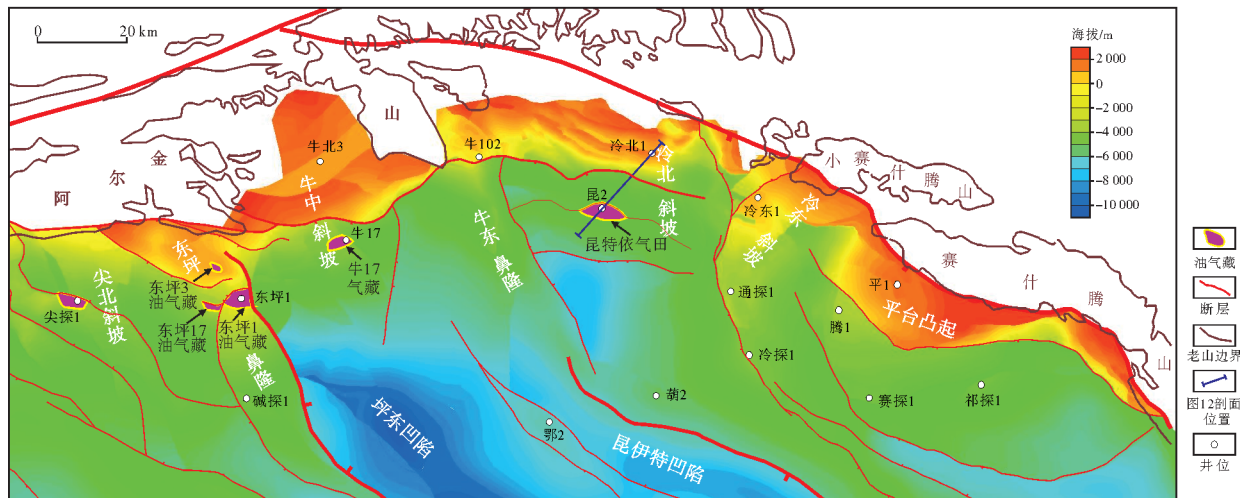


图1 柴北缘基岩顶面构造纲要图

Fig. 1 Structural outline map of the bedrock top surface in the northern Qaidam Basin

昆2井钻探揭示,在盆地结晶基底之上先后沉积侏罗系(J)、古近系(E_{1+2} 、 E_3^1 、 E_3^2)、新近系(N_1 、 N_2^1 、 N_2^2 、 N_2^3)、第四系(Q_{1+2})等中-新生代地层(图2),沉积岩总厚度达7 040 m,向阿尔金山山前地层整体抬升减薄。在大部分区域,基岩之上的直接沉积盖层为侏罗系和路乐河组(E_{1+2})。目前已发现基岩、侏罗系、古近系和新近系4套含气层系,其生气母质均为侏罗系煤系腐殖型有机质^[10-11]。

柴北缘的结晶基底形成于前南华纪^[8],古一中生代经历了多期岩浆侵入及变质等复杂的演化过程^[12-13]。早一中侏罗世开始进入相对稳定的陆内断陷盆地发展阶段^[14],下一中侏罗统为一套河流到湖泊相含煤碎屑岩建造,形成研究区的主力烃源岩^[15]。晚侏罗世湖盆逐渐萎缩,主要发育河流冲积平原和滨浅湖,而沼泽相和深湖一半深湖相不发育,湖泊面积较早一中侏罗世减小,并向东迁移,形成几个分割的滨浅湖沉积区^[16-17]。燕山末期的构造活动造成差异剥蚀,侏罗系遭受广泛剥蚀,但中一下侏罗统优质烃源岩保存相对完整^[18]。新生代在印度板块与欧亚大陆碰撞造山的大规模构造挤压背景下,阿尔金山前呈现出沉积-抬升剥蚀分异的特征,形成南低北高的构造格局^[19]。沉积物也以陆上环境为主,只在凹陷区发育少许湖相沉积物,但并没有形成足够规模的烃源岩^[14]。

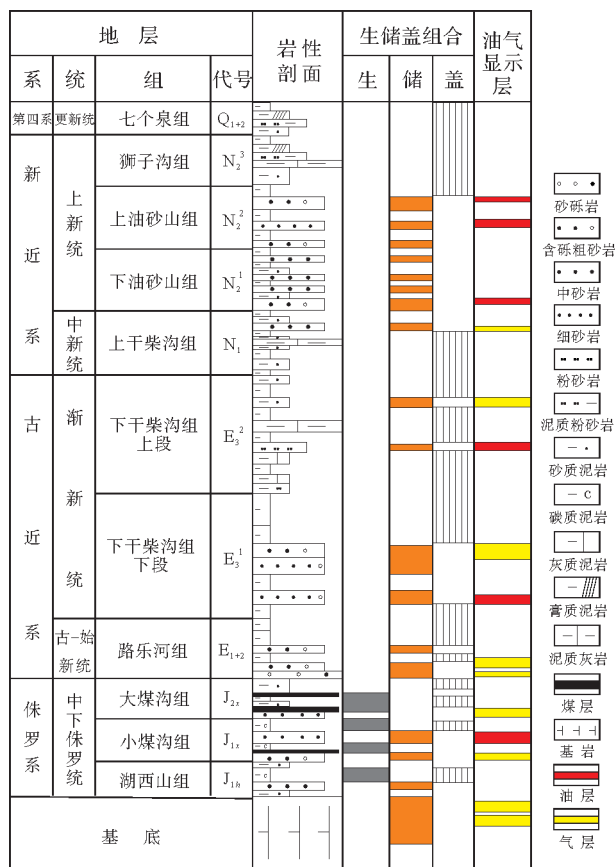


图2 柴北缘地层柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of the northern Qaidam Basin

2 基岩油气勘探发现历程

柴北缘基岩的油气勘探始于20世纪60年代,前期的钻探目标以地面构造为主,主要聚焦于靠近阿尔金山前的高断阶区域,如昆特依气田北部的冷北地区^[1,20],埋藏较浅,但均未见成效。20世纪80年代开始在该区域开展二维地震勘探,落实了一批基岩圈闭。此后,柴达木盆地阿尔金山前的基岩勘探及研究工作近乎停滞^[4]。21世纪以来,对阿尔金山前基岩成藏条件开展系统研究^[21-22]。随着国内外基岩油气藏勘探方法和技术的不断进步,柴达木盆地基岩勘探也迎来了新阶段。2003年,在马北三号构造钻探马北3井,完钻后在1 685~1 709 m基岩井段射孔试油获得工业油流;2013—2015年,阿尔金山前东段东坪鼻隆东坪1井区、东坪3井区和东坪17井区先后获得几百亿方天然气地质储量,掀起了柴北缘基岩天然气勘探的热潮,揭示了阿尔金山前带的广阔勘探前景;2017—2018年,在源外古隆起成藏理论的指导下,连续发现尖北、昆特依等多个气田及含气构造,这增添了向深层—超深层基岩勘探的信心^[23]。

2017年,优选部署于低断阶带的昆特依一号构造的昆2井进行加深钻探,钻探至7 015 m完钻,钻入基岩205 m,气测显示活跃。对基岩2个层组进行常规试气获高产气流:I层组(埋深7 002.0~7 009.0 m)3 mm油嘴日产气 $10.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,II层组(埋深6 875.0~6 888.0 m)4 mm油嘴日产气 $11.85 \times 10^4 \text{ m}^3$,实现了深层—超深层基岩勘探的重大突破。昆2井获得突破后,2018年在冷北斜坡部署三维地震,进一步落实了低断阶的构造面貌,先后钻探了昆1-1井、昆101井,均获得工业气流。其中,昆1-1井完钻井深7 310 m,钻遇基岩257 m,解释气层152.3 m;昆101井完钻井深7 350 m,钻遇基岩290 m,解释气层188.1 m。

回顾柴北缘基岩油气勘探的历程可知:柴北缘基岩油气藏的发现历时长,经历了由易至难、由浅入深的艰苦探索过程,是在地震、钻井、试油等勘探技术进步的推动下取得成功的,是在构造地质、储层地质及成藏地质理论的创新引领下取得突破的。

3 基岩气藏成藏条件

在大量岩心、铸体薄片、扫描电镜、X衍射全岩

矿物、测井等资料分析的基础上,明确了柴北缘基岩有利储层类型及成储主控因素,建立了储层发育模式,厘定了基岩气藏有利成藏条件。

3.1 基岩储层特征与主控因素

3.1.1 储层特征

柴北缘的基岩可分为2种主要岩石类型:一类是加里东期—印支期侵入的花岗岩、闪长岩等中酸性花岗质岩类,另一类是花岗片麻岩、片岩、变质灰岩等变质岩类。另外,局部发育辉长岩、辉绿岩、玄武岩以及安山岩等中基性岩类。目前已知的储层均为中酸性岩浆经变质形成的花岗片麻岩,其主要矿物为具粒状结构的石英、长石和黑云母,次要矿物为角闪石、辉石等,岩心上显示片麻状构造。岩石铸体薄片与X衍射全岩分析显示:昆2井基岩井段花岗片麻岩的石英含量平均约为27%;长石含量平均为40%,主要为钠长石;另有少量辉石和角闪石,裂隙中含有少量碳酸盐矿物和硬石膏等后期胶结物(图3)。

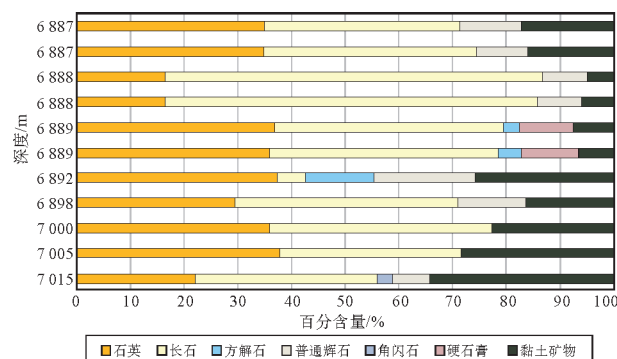


图3 柴北缘昆2井基岩井段花岗片麻岩的X衍射全岩矿物组成

Fig. 3 X-ray diffraction whole-rock mineral composition of granite gneiss in the bedrock section of Well Kun-2 in the northern Qaidam Basin

岩心观察表明,柴北缘花岗质岩类发育不同尺度、不同倾角的多期裂缝,表现在岩心破碎严重,完整的岩心较少。岩心上可见网状缝、微裂缝发育,易形成裂缝网络,沿裂缝均发育不同程度的溶蚀,提高了裂缝的有效性(图4a,4b);在成像资料上,昆2井区块的基岩储层以块状结构为主,裂缝整体较发育,其走向以北东—南西向为主,多表现为中—高角度的高导缝,沿裂缝边缘见明显的溶蚀特征(图4c)。

昆特依地区测井解释裂缝孔隙度主要分布在0%~0.1%之间,平均值为0.015%;裂缝宽度在10~

600 μm 之间,平均值为 106.3 μm ;裂缝密度在 0~10 条/m 之间,平均值为 3.1 条/m;裂缝长度在 0~6 m/m² 之间,平均值为 1.7 m/m² (图 5)。这表明昆特依地区裂缝的有效性较好。

除了裂缝,基质孔也是基岩储层的重要储集空间类型,包括溶蚀孔和晶间微孔(图 6)。被溶蚀矿

物主要为长石和暗色矿物黑云母,晶间微孔主要为云母晶间孔。诚然,裂缝的发育对溶蚀孔的形成提供了前提条件,对于改善基岩储层的渗流能力起到了重要作用。

根据实测孔渗数据结合测井解释统计,昆 2 井区的基岩储层的孔隙度分布范围为 2.0%~12.6%,平

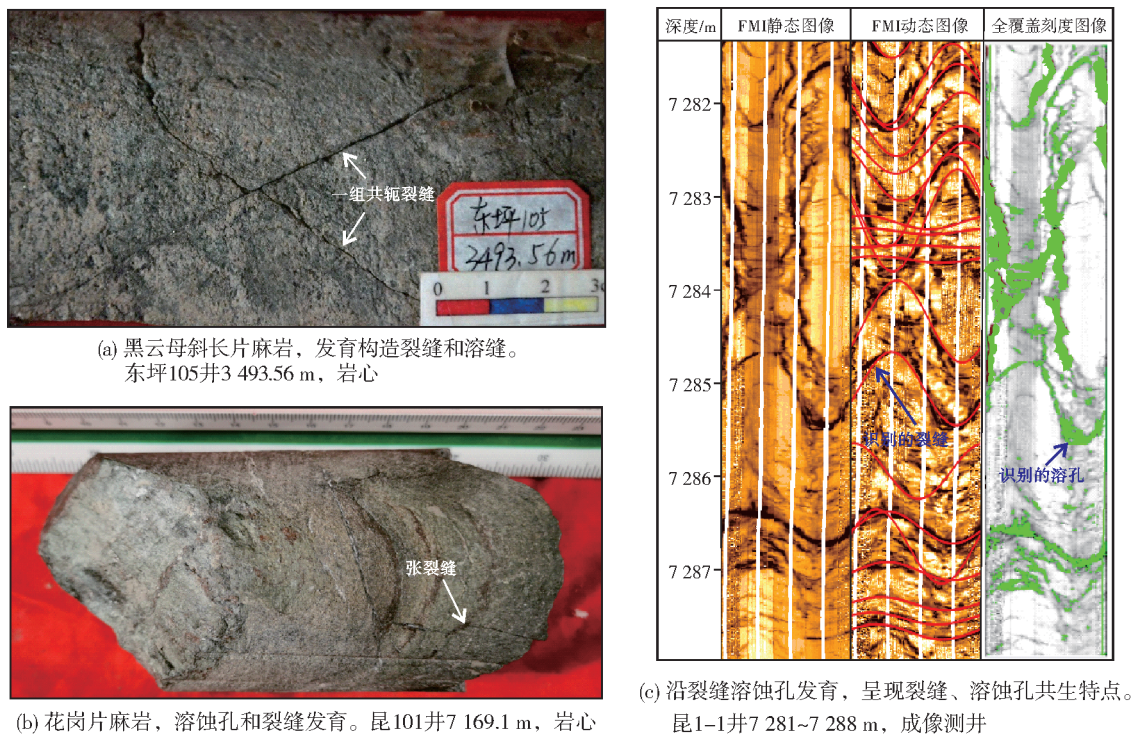


图4 柴北缘昆特依气田基岩裂缝发育特征图

Fig. 4 Characteristics of fractures in the bedrock of Kunteyi gas field in the northern Qaidam Basin

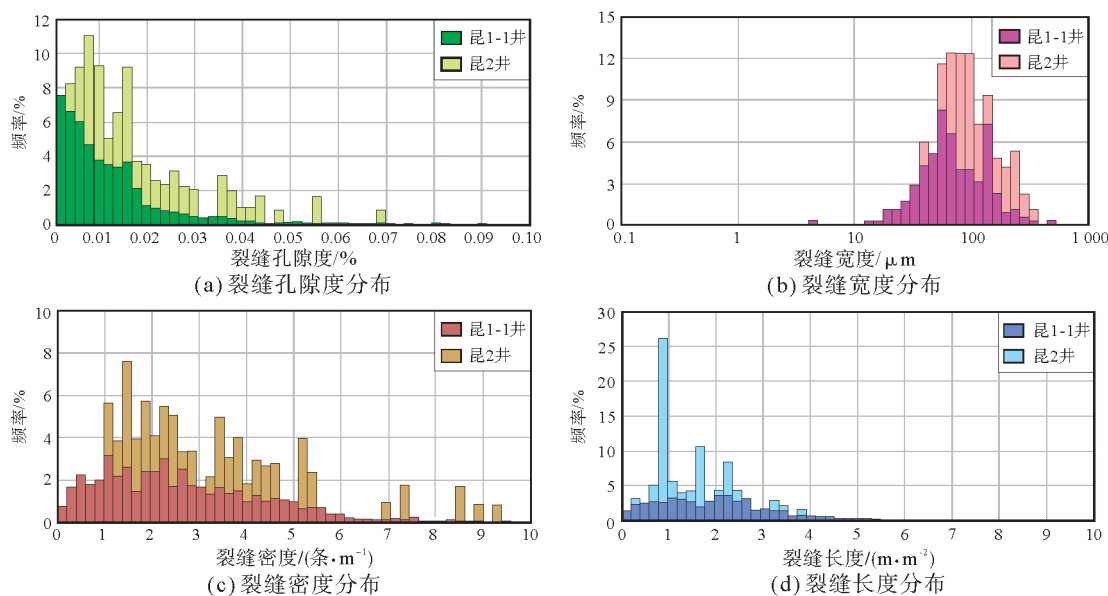
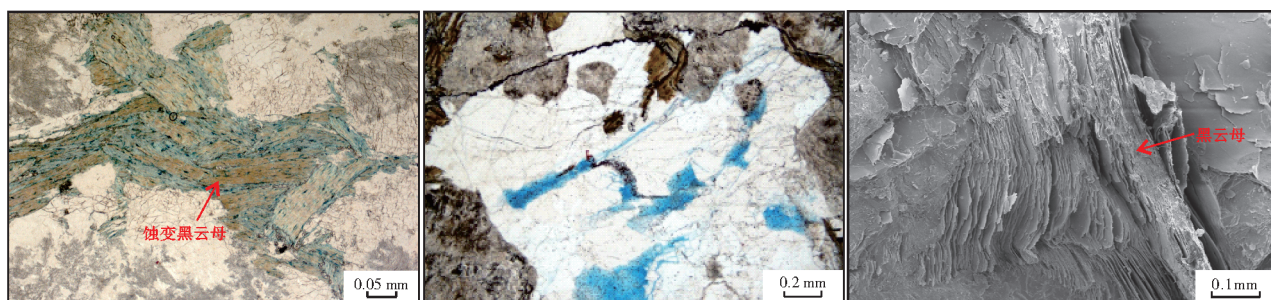


图5 柴北缘昆特依气田基岩储层测井解释裂缝参数分布直方图

Fig. 5 Histograms of fracture parameters based on logging interpretation in the bedrock reservoir of Kunteyi gas field in the northern Qaidam Basin



(a) 黑云母斜长片麻岩, 沿黑云母解理缝溶蚀。(b) 花岗片麻岩, 溶蚀孔、缝发育。昆101井 东坪105井3 465.88 m。蓝色铸体, 单偏光
(c) 花岗片麻岩, 云母片理孔。东坪105井 3 458.58 m。扫描电镜

图6 柴北缘基岩储层孔隙类型微观特征图

Fig. 6 Microphotos showing pore types of the bedrock reservoir in the northern Qaidam Basin

均值为5.4%, 中值为5.2%; 测井计算渗透率分布范围为 $(0.02 \sim 3.5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均值为 $0.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 中值为 $0.09 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。储层物性与相对浅埋藏区的牛北、尖北、东坪等地区的物性相似(图7), 可以看出基岩储层的孔隙度与埋深相关性不大。

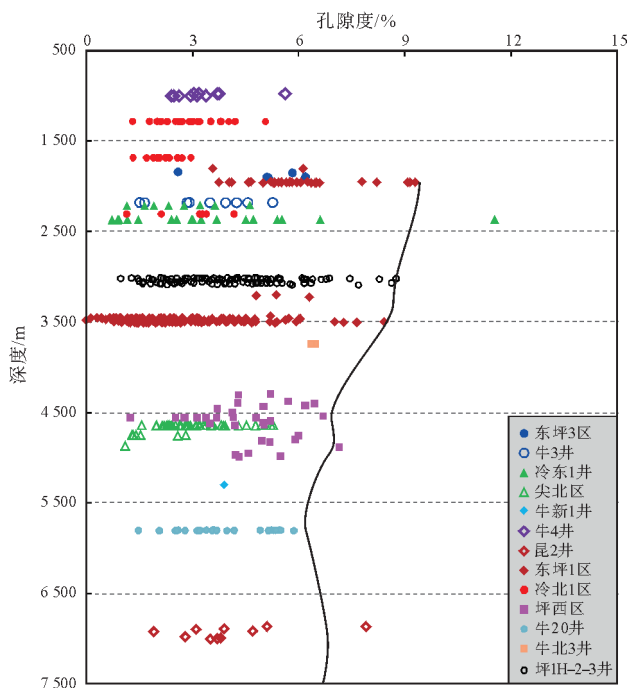


图7 柴北缘基岩储层孔隙度-深度关系图

Fig. 7 Porosity-depth relationship diagram of the bedrock reservoir in the northern Qaidam Basin

3.1.2 储层主控因素

对柴北缘基岩储层的储集空间成因及分布特征的研究表明, 基岩储层的储集性能与优势岩性、构造成缝和风化作用这3个关键因素密切相关, 它们共同促进规模有效基岩储层的形成及发育。

(1) 优势岩性叠加多期变质作用是柴北缘基岩

规模有效成储的基础。

统计结果表明, 基岩岩性与储层孔、缝发育有着密切的关系。长英质矿物含量高的花岗岩、花岗片麻岩、混合片麻岩的脆性强, 孔、缝发育, 为基岩规模有效成储的优势岩性。相反, 火山喷发岩、暗色矿物含量高的片麻岩、变粒岩、辉长岩、辉绿岩, 以及浅变质沉积岩, 如板岩、千枚岩-片岩类的孔、缝欠发育, 物性较差, 不利于成储。经历了多期次变质改造的中-新元古代基岩储层品质最佳, 孔隙度达4%~8%; 浅变质的早古生代基岩次之, 孔隙度为4%~6%, 未经受变质改造的基岩稍差, 孔隙度一般为3%~4%。如东坪3井区二叠纪未变质花岗岩储层质量明显低于东坪1井区新元古代花岗片麻岩。

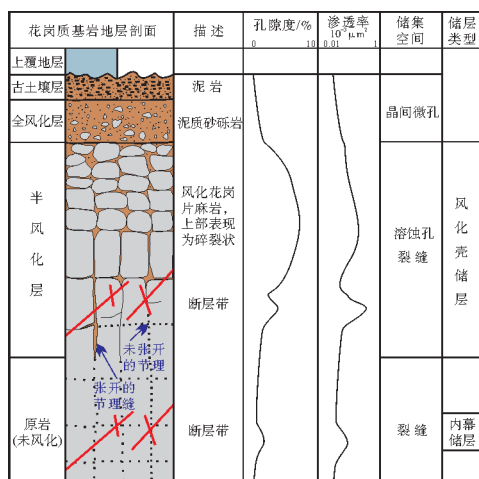
(2) 构造成缝和风化作用是柴北缘基岩规模有效成储的必要条件。

构造应力是基岩中流体得以高效流动, 同时又能促进溶孔发育的关键因素。构造挤压应力作用下岩石破裂形成的构造裂缝是基岩内幕储层的主要储集空间。构造应力的性质、强度、作用时间控制了岩石碎裂的强度^[24]。经历复杂或多期构造应力作用形成的裂缝具有多组、多期发育的特点, 易形成裂缝网络, 从而大大提高基岩储层的流体流动能力。如东坪1井区主要发育2组裂缝, 主裂缝方位主要为近南北向, 次为近东西向, 以低角度斜交缝发育最多; 并且除了主断裂产生裂缝外, 其伴生的次级断裂又会伴生裂缝。统计分析表明, 在东坪1井区, 这种多组、多期发育的裂缝一般集中分布于距离主断裂1 km的范围之内。

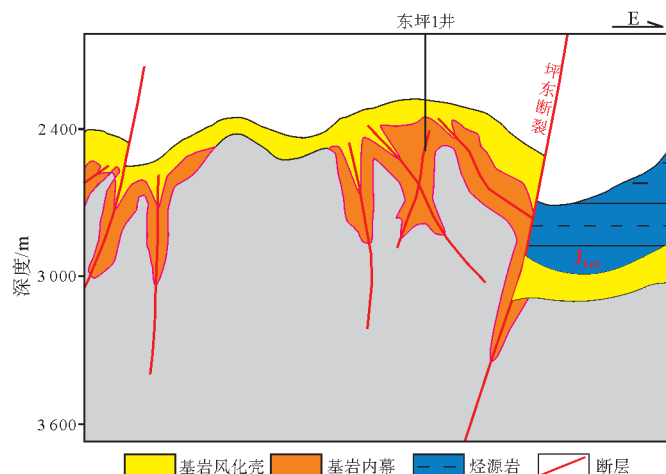
基岩在隆升至地表后, 会沿着早期产生的缝网系统产生强烈的风化淋滤作用, 这是基岩风化壳储层成储的必要过程。在花岗岩矿物组成中, 易风化

的矿物主要有黑云母和斜长石^[25]。其中黑云母风化反应表现为解理缝的张开以及沿解理缝的溶蚀(图6)。这种风化溶蚀机制或过程不但显著加速了风化反应速率,有力增强了黑云母的溶蚀增孔效应,提高了基岩储层的孔隙度,更为重要的是,为地表水渗入基岩内部深处提供了新的通道,拓展了基岩有效储层的纵向发育范围。基岩中斜长石类矿

物的大规模溶蚀即是在此成储条件下发生的。风化反应在基岩中自上向下的方向性以及溶蚀强弱的差异性,最终导致了基岩的风化壳储层呈现为分层结构(图8)。自上而下,依次为古土壤层、全风化层、半风化层和未风化层(原岩层)。其中物性较好的储层段位于半风化层(即风化壳储层段)和未风化层的断层破碎带(即内幕储层段)。



(a) 基岩储层纵向地质结构及物性分布剖面



(b) 基岩储层横向地质结构剖面

图8 柴北缘基岩储层地质结构

Fig. 8 Geological structure of the bedrock reservoir in the northern Qaidam Basin

3.2 区域性泥岩盖层分布与油气长距离运移

柴北缘基岩储层上覆2套有效盖层。第1套是下侏罗统底部的泥岩,主要分布在昆特依、牛东至盆地腹部等广大地区。如昆特依地区昆2井下侏罗统底部发育约100 m的以泥岩、砂质泥岩为主的地层,泥地比为80%,且发育单层厚达7 m的泥岩直接盖层。牛东鼻隆区牛102井下侏罗统泥岩实测突破压力为25.6 MPa,昆特依气藏气柱高度大于500 m、压力系数达1.63,均证实下侏罗统底部泥岩具备优越的封盖条件。第2套是古近系路乐河组底部的膏质泥岩,主要分布于东坪、牛中、尖北等缺失侏罗系的地区。这套膏质泥岩的突破压力为30.5~38.5 MPa,其封盖条件比下侏罗统底部泥岩还要优越;这套区域性膏质泥岩盖层厚度介于46~173 m,分布范围达5 300 km²。平面上,以坪东断层为界,坪东断层以东主要以侏罗系泥岩为盖层;坪东断层以西主要以路乐河组泥岩和底部的膏质泥岩为盖层(图9)。在高断阶区,由于盖层发育程度差,基岩气藏保存条件变差。

在上述2套优质盖层的封盖下,凹陷区煤系烃

源岩生成的油气沿基岩顶部的不整合面进行长距离横向运移,为油气大范围聚集成藏创造了条件。油气源对比分析表明,昆2井气藏有效运聚距离超过50 km。

3.3 烃源岩分布与侧接式上生下储成藏组合

根据甲烷碳同位素计算,昆2井天然气成熟度(R_o)为1.30%~1.50%,属于高成熟度煤型气。油气地球化学特征研究表明该煤型气来自中下侏罗统生烃凹陷内发育的煤、碳质泥岩和暗色泥岩3种产气岩性。气源岩有机碳含量一般为2%~8%,干酪根母质类型以Ⅱ₂—Ⅲ型为主。柴北缘中下侏罗统生烃凹陷主要分布在坪东断层以东,有效烃源岩厚度为500~700 m,最大厚度位于伊北凹陷,达1 000 m,具有分布广、厚度大的特点。其中,湖西山组(J_{1h})烃源岩形成于断陷期,以湖相泥岩为主,发育少量碳质泥岩、煤,面积合计4 800 km²,烃源岩累计厚度达50~400 m(图10a)。小煤沟组(J_{1x})和大煤沟组(J_{2x})烃源岩形成于拗陷期,以碳质泥岩、煤为主,分布面积为6 300 km²,累计厚度达50~500 m(图10b)。

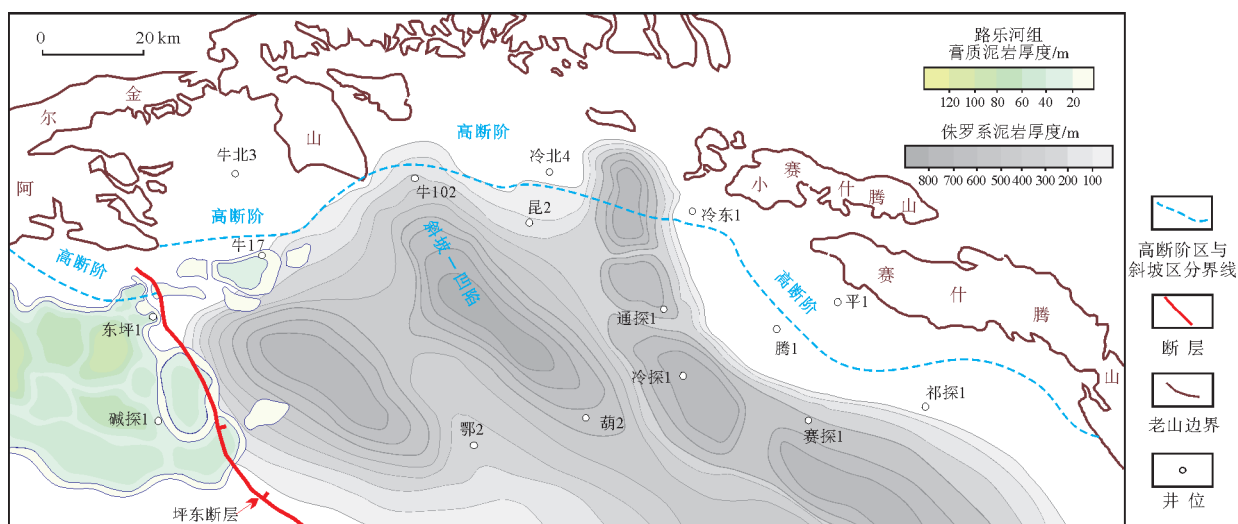


图9 柴北缘基岩上覆盖层厚度等值线图

Fig. 9 Thickness contour map of the caprock overlying bedrock in the northern Qaidam Basin

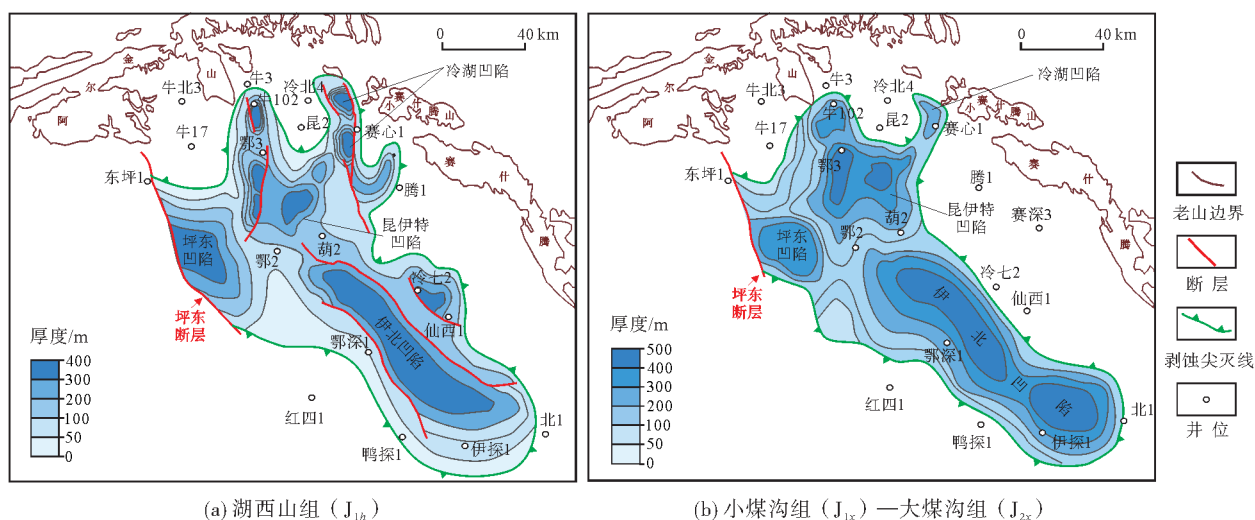


图10 柴北缘侏罗系煤系烃源岩厚度等值线图

Fig. 10 Thickness contour map of Jurassic source rocks in the northern Qaidam Basin

断陷期形成的一系列近南北向断裂,成为沟通源储的输导断层。主要分布于凹陷区的基岩上覆侏罗系高成熟煤型气源岩与下伏基岩储层构成侧接式上生下储源储组合,并以断层和基岩顶部的不整合面为烃类运移通道,形成源外、源内2类油气藏。

据估算,柴北缘侏罗系天然气资源量为 $1.15 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[1],目前探明率仅9.4%,仍有较大勘探潜力。这些天然气资源主要分布于坪东、昆伊特、冷湖、伊北等多个生烃凹陷及周缘,具有多个生烃中心的特点。冷北斜坡紧邻昆伊特和冷湖2个生烃凹陷,为该区形成源外油气藏创造了条件。

4 油气藏特征及成藏过程

根据地层测试资料分析,昆2井深6 331.35 m处实测温度为179.023℃,静压为110.14 MPa,压力系数为1.63,地层压力梯度为1.59 MPa/100 m,地温梯度为2.83℃/100 m,属于异常高温、高压系统。3口井23个天然气样的分析结果显示,天然气的相对密度平均为0.596 7,甲烷含量平均值为95.02%,乙烷含量平均值为3.97%,丙烷含量平均值为0.43%,属于干气。已探明的气田证实,基岩气藏均为构造圈闭型气藏,单个圈闭均具有统一的气水界面。

柴达木盆地的构造演化分析表明,在基岩经历约

50~140 Ma 的长期风化剥蚀后,柴北缘进入中生代断陷盆地发育阶段^[4],同时形成了一组近南北向断入基底的拉张正断层,使得阿尔金山前呈现隆凹相间的地貌格局^[26],为侏罗系烃源岩发育提供了可容空间。其中,坪东凹陷和昆伊特凹陷沉积了相对优质的侏罗系煤系烃源岩,且与东坪鼻隆、冷北斜坡等隆起区的基岩储层形成侧向对接(图1,图8,图10)。生烃凹陷埋藏史与生烃史分析表明,昆伊特凹陷侏罗系煤系烃源岩自古近纪路乐河组沉积期开始进入生烃门限,于下干柴沟组—上干柴沟组沉积期达到生油高峰,于油砂山组沉积期至今为过成

熟生干气阶段(图11)。在烃源岩进入生烃门限的同时,在南北向构造挤压应力作用下,阿尔金山前产生多组近东西向的逆断层,由阿尔金山向盆地内依次形成高断阶—中斜坡—凹陷3个台阶的构造格局以及一系列与断层相关的圈闭。此构造格局为油气运移提供了势能,油、气分子先后由生烃凹陷经北西向、近南北向断层向构造高部位运移,后经基岩上部的不整合面以及东西向断层进一步向中斜坡、高断阶运移(图12),途经之处凡是有效的构造圈闭均能形成油气藏^[27-28]。现今已发现油气多分布于中斜坡及高断阶区的局部构造高点,背斜或断

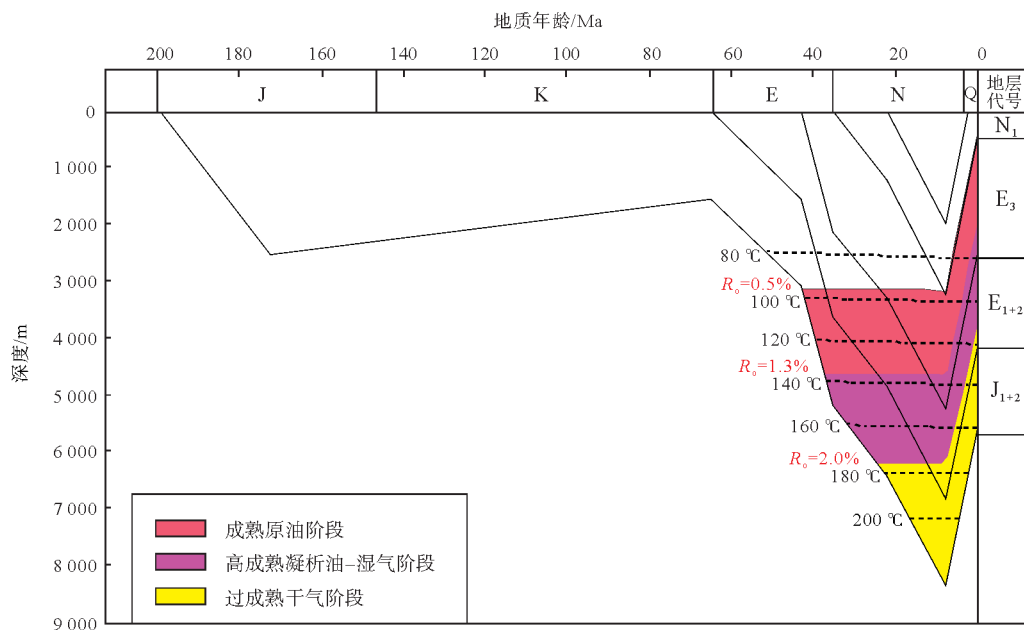


图11 昆伊特凹陷侏罗系烃源岩埋藏史、热史与生烃史

Fig. 11 Burial history, thermal history, and hydrocarbon generation history of the Jurassic source rocks in Kunyite Depression

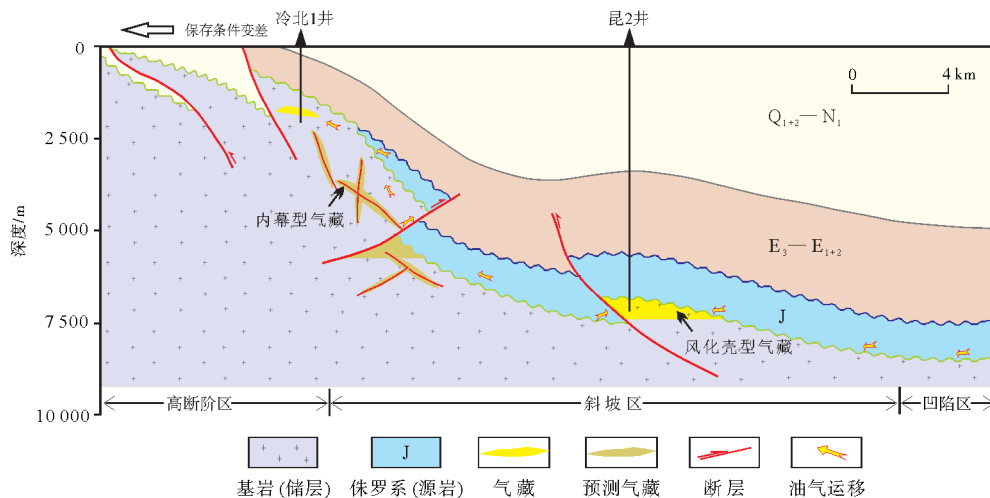


图12 柴北缘冷北斜坡带天然气成藏模式图

Fig. 12 Natural gas accumulation model in Lengbei slope zone of the northern Qaidam Basin

背斜构造是油气聚集的有利位置。位于构造低部位的昆2圈闭先被油充满,后天然气置换油,驱使油不断向高断阶区运聚,并因此导致中斜坡区以干气气藏为主(如昆2气藏),高断阶区以湿气气藏及凝析油气藏为主(如东坪3气藏)。

在东坪103井(东坪1油气藏)基岩石英颗粒的粒内裂纹中检测到3期含烃类包裹体:第1期均一温度为93.2℃,第2期均一温度范围为117.8~135.5℃、平均值为126.1℃,第3期均一温度范围为142.4~146.0℃、平均值为143.7℃。这证实了东坪1油气藏在古近纪期间持续成藏的特点。由于中斜坡区靠近烃源灶,其气藏充注压力更大,往往具有超压特征;而高断阶区均表现为常压油气藏特征,且由于高断阶区基岩顶部的盖层欠发育,基岩内的油气继续向上覆古一新近系运移聚集,导致高断阶区基岩油气藏规模有限。

5 勘探启示

从利用柴北缘13口井的608块基岩样品实测数据编制的孔隙度-深度散点图(图7)可以看出,随着埋藏深度增大,基岩储层孔隙度在深层—超深层基本保持稳定。究其原因,与储集空间一般以粒间孔为主的砂岩储层不同,基岩储层以裂缝及其伴生的溶蚀孔为主要储集空间,由于基岩储层固体骨架的较强抗压性,即使在深埋成岩阶段,储集岩石承受上覆静岩负荷的能力较大而使储集空间得以完好保持,或者说深埋过程中压实作用对储层储集空

间的影响微乎其微。因此,对于深层、超深层油气勘探而言,基岩储层是比砂岩储层更有利的储层类型。此外,基岩储层顶面普遍发育大规模的不整合面,是油气运聚的优势通道。

从目前的油气藏分布来看,位于埋藏深度相对较浅的高断阶区域大多只存在油气显示,具规模储量的油气发现均位于埋藏深度相对大的斜坡区(图1),如位于东坪鼻隆区的东坪3气藏的储量远小于位于冷北斜坡区的昆2气藏。这表明构造低部位气藏除了离烃源岩较近,具有近源成藏、充注压力大的优势外,其保存条件也更好。从基岩储层来看,中斜坡区及凹陷区虽然埋藏深度更大,但仍然发育有效储层。从盖层质量来看,中斜坡区及凹陷区的盖层厚度更大。综合上述分析,中斜坡区或者凹陷内部的局部构造高点更为有利,是下一步深层—超深层天然气勘探拓展的方向。从平面上看(图13),冷北斜坡—牛东鼻隆—牛中斜坡区的圈闭最具潜力,该区带总体岩性以花岗岩、片麻岩为主,物性较好,而该区带以东发育辉绿岩和各类喷发岩,物性偏差,且盖层发育程度也变差(图9)。

柴北缘基岩油气勘探经历了由浅入深的漫长探索过程。这一方面客观上缘于研究区基岩盖层沉积期多期次较强的构造活动主导的成藏作用的复杂性;另一方面主观上受限于对基岩储集空间的形成机制及成藏规律认识的不足。本文实例剖析对基岩油气勘探的启示是埋藏深度对基岩油气勘探并不重要,只要具备良好的成烃-成储-成藏条

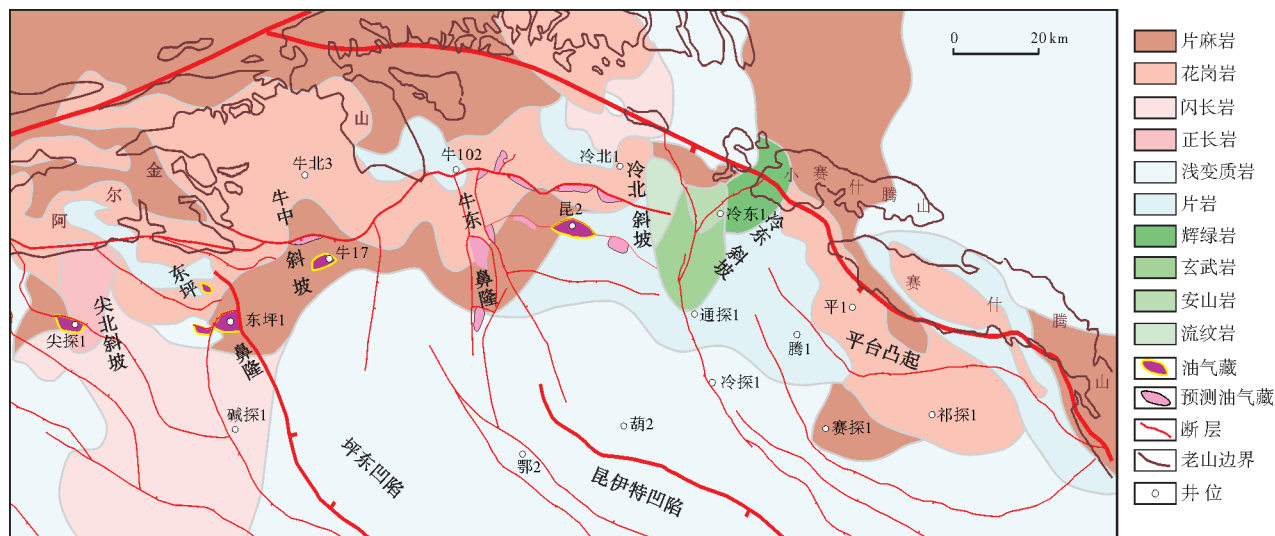


图13 柴北缘基岩岩性分布及有利目标预测平面图

Fig. 13 Planar map of bedrock lithology distribution and favorable target prediction of the northern Qaidam Basin

件,即使是深层—超深层,也可获得规模有效甚至高效的油气勘探发现。因此对于新盆地或者新区块而言,基岩的油气勘探并非一定要遵循由浅层到深层的常规找油气模式,可以在成藏条件更优的深层优先寻找钻探目标。

6 结 论

柴北缘基岩储层是优势岩性、构造成缝、风化溶蚀3个主控因素综合作用效应的结果。花岗质基岩为构造成缝和风化溶蚀奠定了有利的物质基础,多期构造缝既直接成储又为风化溶蚀提供了流体通道。在上述3个主控因素的综合作用下形成风化壳与内幕2类储集性质有较大差异的基岩储层。物性较好的风化壳储层主要发育在基岩的半风化层,储集空间以溶蚀孔和裂缝为主;孔隙度较低、而渗透率仍较高的内幕储层主要发育于基岩的未风化层的断层带,储集空间以裂缝为主。

柴北缘油气地质背景较复杂,基岩沉积盖层形成期发生的多期构造活动对成藏作用产生重要影响。研究区基岩能够规模成藏取决于有效成储作用发生后,生烃期与输导断层及圈闭形成期同步这一关键因素。此外,广泛分布的优质盖层与经历长期风化的不整合面为油气大范围运聚创造了条件,也意味着柴北缘基岩具有较广阔的油气勘探前景。综合分析,柴北缘中斜坡区和凹陷内部的隆起区是下一步油气勘探的有利方向。该研究成果也有助于加深对柴北缘乃至西部叠合盆地深层—超深层基岩成储、成藏的理解和认识。

参 考 文 献

- [1] 马达德,袁莉,陈琰,等.柴达木盆地北缘天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J].天然气地球科学,2018,29(10): 1486-1496.
MA Dade, YUAN Li, CHEN Yan, et al. Geological conditions of natural gas, resource potential and exploration direction in the northern margin of Qaidam Basin [J]. Natural gas geoscience, 2018, 29(10): 1486-1496.
- [2] 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.
- [3] 陈琰,雷涛,张国卿,等.柴达木盆地石油地质条件、资源潜力及勘探方向[J].海相油气地质,2019,24(2): 64-74.
CHEN Yan, LEI Tao, ZHANG Guoqing, et al. The geological conditions, resource potential and exploration direction of oil in Qaidam Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2019, 24(2): 64-74.
- [4] 李江涛,付锁堂,王任一,等.柴达木盆地阿尔金山前深层基岩气藏储集空间再认识与成储潜力区探讨[J].天然气工业,2020,40(2): 90-96.
LI Jiangtao, FU Suotang, WANG Renyi, et al. Reservoir space and potential reservoir-formation areas in deep bedrock gas reservoirs in Altun forelands, Qaidam Basin: recognition and discussion [J]. Natural gas industry, 2020, 40(2): 90-96.
- [5] 李国欣,石亚军,张永庶,等.柴达木盆地油气勘探、地质认识新进展及重要启示[J].岩性油气藏,2022,34(6): 1-18.
LI Guoxin, SHI Yajun, ZHANG Yongshu, et al. New progress and enlightenment of oil and gas exploration and geological understanding in Qaidam Basin [J]. Lithologic reservoirs, 2022, 34(6): 1-18.
- [6] 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.
- [7] 郭少璞,孙梦星.昆2加深试采井施工难点和解决方案[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(20): 53-55.
GUO Shaopu, SUN Mengxing. Difficulties and solutions in the construction of Kun-2 deepened production test well [J]. China petroleum and chemical standard and quality, 2020, 40(20): 53-55.
- [8] 栗兵帅,颜茂都,张伟林.柴北缘早新生代旋转变形特征及其构造意义[J].地学前缘,2022,29(4): 249-264.
LI Bingshuai, YAN Maodou, ZHANG Weilin. Early Cenozoic rotation feature in the northern Qaidam marginal thrust belt and its tectonic implications [J]. Earth science frontiers, 2022, 29(4): 249-264.
- [9] 王小东.东昆仑—柴北缘造山带新元古代—早古生代构造演化[D].兰州:兰州大学,2023.
WANG Xiaodong. Neoproterozoic to Early Paleozoic tectonic evolution in the east Kunlun orogen and the north Qaidam orogen [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [10] 马明,范桥辉.常规天然气伴生氦气成藏条件:以柴达木盆地北缘地区为例[J].天然气地球科学,2023,34(4): 587-600.
MA Ming, FAN Qiaohui. Accumulation conditions of helium in natural conventional gas reservoirs: case study of the northern margin of Qaidam Basin [J]. Natural gas geoscience, 2023, 34(4): 587-600.
- [11] 刘雨桐,段堃,张晓宝,等.基岩型富氦气藏形成条件:以柴达木盆地东坪气田和美国中部潘汉德—胡果顿气田为例[J].天然气地球科学,2023,34(4): 618-627.
LIU Yutong, DUAN Kun, ZHANG Xiaobao, et al. Formation conditions of helium-rich gas in bedrock reservoirs: taking

- Dongping gas field in Qaidam Basin and Panhandle-Hugoton gas field in central United States as examples[J]. *Natural gas geoscience*, 2023, 34(4): 618-627.
- [12] 李平, 高晓峰, 吕鹏瑞, 等. 祁连山—柴北缘地区岩浆活动的时空分布、成因演变及构造岩浆演化[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 283-317.
- LI Ping, GAO Xiaofeng, LÜ Pengrui, et al. Spatial-temporal distribution, petrogenetic evolution and tectono-magmatic evolution in Qilian Mountains and northern margin of Qaidam [J]. *Northwestern geology*, 2023, 56(4): 283-317.
- [13] 王秉璋, 付长垒, 潘彤, 等. 柴北缘赛什腾地区早古生代岩浆活动与构造演化[J]. *岩石学报*, 2022, 38(9): 2723-2742.
- WANG Bingzhang, FU Changlei, PAN Tong, et al. Early Paleozoic magmatism in the Saishiteng area, north Qaidam and their constraint on tectonic evolution[J]. *Acta petrologica sinica*, 2022, 38(9): 2723-2742.
- [14] 曹方达. 柴达木盆地北缘侏罗系层序地层与沉积体系研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- CAO Fangda. Sequence stratigraphy and sedimentary system of Jurassic in the northern margin of Qaidam Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2021.
- [15] 向功勤. 柴达木盆地柴北区中下侏罗统烃源灶和油气形成[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- XIANG Gongqin. Middle and Lower Jurassic source rocks and oil and gas formation in the northern Qaidam Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2022.
- [16] 王波, 王艳清, 马进业, 等. 柴达木盆地九龙山地区中侏罗统湿地型辫状河三角洲沉积特征及油气勘探意义[J]. *海相油气地质*, 2023, 28(3): 250-260.
- WANG Bo, WANG Yanqing, MA Jinye, et al. Sedimentary characteristics of the Middle Jurassic wetland braided river delta in Jiulongshan area, Qaidam Basin and its significance for oil and gas exploration[J]. *Marine origin petroleum geology*, 2023, 28(3): 250-260.
- [17] 张晨雨. 柴达木盆地北缘晚中生代沉积-构造演化及其大地构造意义[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- ZHANG Chenyu. Late Mesozoic tectonic - sedimentary evolution of the northern Qaidam Basin and its dynamic meaning [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [18] 李剑, 田继先, 王波, 等. 柴达木盆地深层天然气富集条件及勘探潜力[J]. *地质力学学报*, 2023, 29(5): 618-630.
- LI Jian, TIAN Jixian, WANG Bo, et al. Accumulation conditions and exploration potential of deep natural gas in the Qaidam Basin [J]. *Journal of geomechanics*, 2023, 29(5): 618-630.
- [19] 孙波, 王金铎, 王大华, 等. 柴北缘东段中—新生代构造演化及其对油气的控制作用[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(3): 351-360.
- SUN Bo, WANG Jinduo, WANG Dahua, et al. Mesozoic-Cenozoic structural evolution and its control over oil and gas in the eastern section of the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *China petroleum exploration*, 2019, 24(3): 351-360.
- [20] 杨鑫. 柴西北缘阿尔金山前带东段基岩时空分布规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- YANG Xin. Temporal and spatial distribution of bedrock in the eastern part of the Altun Mountains in the northwestern Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [21] 李红哲, 马峰, 谢梅, 等. 柴达木盆地阿尔金东段基岩气藏盖层特征及控藏机制[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(8): 1102-1110.
- LI Hongzhe, MA Feng, XIE Mei, et al. Caprocks characteristics and their control on hydrocarbon accumulation of bedrock gas reservoirs in eastern segment of Alkin Piedmont, Qaidam Basin [J]. *Natural gas geoscience*, 2018, 29(8): 1102-1110.
- [22] 焦小芹. 柴西北缘阿尔金山前基岩储层特征及成藏条件研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- JIAO Xiaoqin. The characteristics of basement reservoir and natural gas accumulation conditions for the Altyn Mountain, NW China [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [23] 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.
- [24] 李军亮. 柴北缘马海东地区元古界基岩储层发育特征及控制因素[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(2): 15-22.
- LI Junliang. Characteristics and controlling factors of reservoirs in Proterozoic bedrock in Mahaidong area, northern margin of Qaidam Basin [J]. *Petroleum geology and recovery efficiency*, 2022, 29(2): 15-22.
- [25] 伍劲, 高先志, 周伟, 等. 柴达木盆地东坪地区基岩风化壳与油气成藏[J]. *新疆石油地质*, 2018, 39(6): 666-672.
- WU Jin, GAO Xianzhi, ZHOU Wei, et al. Base rock weathering crusts and petroleum accumulation in Dongping area, Qaidam Basin [J]. *Xinjiang petroleum geology*, 2018, 39(6): 666-672.
- [26] 孙秀建, 马峰, 白亚东, 等. 柴达木盆地阿尔金山山前带基岩气藏差异富集因素[J]. *新疆石油地质*, 2020, 41(4): 394-401.
- SUN Xiujian, MA Feng, BAI Yadong, et al. Differentiated hydrocarbon enrichment factors of bedrock gas reservoir in piedmont belt of Altun Mountain, Qaidam Basin [J]. *Xinjiang petroleum geology*, 2020, 41(4): 394-401.
- [27] 曹秦智. 阿尔金山前东坪隆起基岩天然气运移动力演化特征研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.
- CAO Qinzhi. Study on the evolution characteristics of natural gas migration dynamics in the bedrock of Dongping Uplift in front of the Altun Mountains [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.

- [28] 田光荣, 白亚东, 裴明利, 等. 柴达木盆地阿尔金山前东段
输导体系及其控藏作用[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(3):
348–357.

TIAN Guangrong, BAI Yadong, PEI Mingli, et al. The trans-

port system and its control on reservoir formation in the east-
ern front of the Altun Mountain, Qaidam Basin [J]. Natural
gas geoscience, 2020, 31(3): 348–357.

编辑: 黄革萍

Discovery and geological significance of ultra-deep bedrock gas reservoirs in the Qaidam Basin

WANG Bo¹, SONG Guangyong^{1,2}, ZHANG Ronghu², ZENG Qinglu², WANG Yanqing²,
SUN Xiujian³, WU Zhixiong¹, LI Senming², LI Yanan¹, GONG Qingshun²

1. PetroChina Qinghai Oilfield Company; 2. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology;
3. Northwest Branch of PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development

Abstract: Based on analysis of a large number of core samples, thin sections, scanning electron microscopy, X-ray diffraction of whole-rock minerals, and well logging data, a systematic study is conducted on the favorable geological factors and conditions for hydrocarbon accumulation in the bedrock (at depths exceeding 7 000 m) reservoirs in the northern Qaidam Basin. The specific findings are as follows: (1) Intermediate-acidic granitic bedrocks serve as high-quality reservoir lithologies. Under the coupled effects of multiple phases of metamorphism, tectonic fracturing, weathering and erosion, and other favorable reservoir-forming factors, two genetically distinct effective reservoirs have formed: weathering crust and interior reservoirs, with fractures and dissolution pores as the main storage spaces and minimal impact from burial compaction. (2) Two effective sealing layers, namely Jurassic carbonaceous mudstones (which are also source rocks) and Paleogene Lulehe Formation gypsiferous mudstones, provide condition for long-distance hydrocarbon migration and effective accumulation. (3) The synchronization of hydrocarbon generation periods with conductive faults and trap formation periods offers excellent conditions for hydrocarbon enrichment and reservoir formation. (4) The Jurassic high-maturity coal measure gas source rocks, primarily distributing in the depression area and overlying the bedrocks, form a laterally adjacent source-reservoir association with the bedrock reservoirs, with faults and the unconformity at the top of the bedrock serving as hydrocarbon migration pathways, resulting in two types of hydrocarbon reservoirs: extra-source and intra-source. Controlled by differential or successive hydrocarbon migration mechanisms, the reservoirs exhibit characteristics of oil accumulation at structurally high positions with low fullness and abundance, and gas accumulation at structurally medium to low positions with high fullness and abundance. The research indicates that the ultra-deep bedrocks still hold significant potential for hydrocarbon exploration. The analysis of the favorable conditions for hydrocarbon accumulation and their spatiotemporal configuration in these ultra-deep bedrocks can provide target areas for hydrocarbon exploration in this region and also contribute to a deeper understanding of the reservoir-forming and hydrocarbon accumulation processes in deep to ultra-deep bedrocks.

Key words: ultra-deep; bedrock; reservoir characteristics; conditions for hydrocarbon accumulation; Qaidam Basin

WANG Bo, First author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in comprehensive research on petroleum geology. Add: Exploration and Development Research Institute, No. 7 Kunlun Middle Road, Dunhuang, Jiuquan, Gansu 736202, China. E-mail: wboqh@petrochina.com.cn

SONG Guangyong, Corresponding author: MSc, Senior Engineer, mainly engaged in research on hydrocarbon reservoir geology. Add: No. 920 Xixi Road, Xihu District, Hangzhou, Zhejiang 310023, China. E-mail: songgy_hz@petrochina.com.cn