

柴北缘深层天然气成藏条件及有利勘探方向

田继先¹,李剑¹,曾旭¹,孔骅¹,王鹏²,沙威²,王牧²,石正灏²,宋德康²

(1. 中国石油勘探开发研究院,河北廊坊 065007; 2. 中国石油青海油田公司勘探开发研究院,甘肃敦煌 736200)

摘要:柴北缘深层天然气勘探程度低,资源潜力大,天然气成藏条件及勘探方向尚不明确,制约了天然气勘探进程。基于地震、地质、地化及钻井等资料的研究,从烃源岩、储层、构造及输导体系等方面,综合分析柴北缘深层天然气藏的成藏条件,结合已有勘探成果和地质条件,指出了深层天然气有利勘探方向。结果表明,深层侏罗系分布广,阿尔金山前西段存在侏罗系生烃凹陷,深层高-过成熟度烃源岩生气潜力大;基岩风化壳和次生孔隙发育的碎屑岩可作为深层有效储层,基岩储层物性不受深度控制,深层发育碎屑岩优质储层;广泛分布的以断裂为主的输导体系有利于超深层烃源岩生成的天然气纵向和横向运移;多期构造活动使得柴北缘深层形成多种类型的圈闭,烃源岩持续生烃有利于这些深层圈闭早期、多期成藏。在以上研究成果基础上,指出深大断裂发育的生烃凹陷周围圈闭是深层天然气聚集有利区,盆缘古隆起以及晚期构造带上大型背斜圈闭具有良好的勘探前景,其中阿尔金山前深层是最现实的勘探领域。

关键词:成藏条件;输导体系;基岩储层;深层气藏;侏罗系;柴达木盆地北缘

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Accumulation conditions and favorable plays for deep gas exploration at the northern margin of Qaidam Basin

Tian Jixian¹, Li Jian¹, Zeng Xu¹, Kong Hua¹, Wang Peng², Sha Wei², Wang Mu², Shi Zhenghao², Song Dekang²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China;

2. Exploration and Development Research Institute of Qinghai Oilfield Co., Ltd., PetroChina, Dunhuang, Gansu 736200, China)

Abstract: The potential of deep natural gas resources is great at the northern margin of Qaidam Basin, but it is lower in exploration maturity. The gas accumulation conditions and plays for exploration are still to be revealed, restricting the exploration progress of natural gas. Given studies on seismic, geological, geochemical and drilling data, we analyzed the conditions for gas accumulation in deep strata at the northern margin of Qaidam Basin comprehensively in terms of source rock, reservoir, structure, and carrier system, and pointed out the favorable plays for deep gas exploration based on the existing exploration results and geological conditions. The results show that due to the widespread distribution of the Jurassic, a new Jurassic hydrocarbon generation depression is discovered in the western segment of the piedmont of Altun Mountain, featuring high potential of hydrocarbon generation in the deep high-to-over-mature source rocks. Both the weathering crust of bedrocks and clastic rocks with well-developed secondary pores may serve as the effective reservoirs in deep horizons; the physical properties of the former are not controlled by depth, and the latter were well developed characterized by high quality in deep horizons. The fracture-dominated carrier system of wide distribution is conducive to the vertical and horizontal migration of natural gas generated from ultra-deep source rocks. Multi-stage tectonic activities have led to the formation of multiple types of traps in deep layers at the northern margin of Qaidam Basin; meanwhile the continuous hydrocarbon generation of source rocks have facilitated the earlier, multi-stage hydrocarbon accumulation in these deep traps. In view of the above results, it is concluded that the traps around the hydrocarbon generation sag with well-developed deep large faults are favorable for deep gas accumulation, and the paleo-uplift at the basin margin and the large-scale anticlinal traps in the late tectonic zone are prospective areas for hydrocarbon exploration, with the deep layers in the piedmont of the Altun Mountain being the most prospective one.

收稿日期:2018-06-13;修订日期:2019-05-08。

第一作者简介:田继先(1981—),男,工程师,油气地质。E-mail: tjx69@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油重大科技专项(2016E-01);国家科技重大专项(2016ZX05007)。

Key words: accumulation condition, carrier system, bedrock reservoir, deep gas reservoir, Jurassic, northern margin of the Qaidam Basin

随着石油工业的发展,油气勘探领域由浅层向深层—超深层延伸,深层油气藏是当前和未来石油工业发展的重要领域之一^[1-2]。关于深层的定义,不同国家、不同机构的认识有一定差异,但国际上相对认可的深层标准是埋深超过 4 500 m 的层系,中国国土资源部及美国地质调查局等权威机构都认同和采用一标准^[3-4]。目前已有 70 多个国家在深层地层中进行了油气钻探,陆续发现了多个深层油气藏,储量增长较快^[2]。中国近年来在深层—超深层勘探中获得了一系列重大突破,特别是中西部盆地深层成为重要的勘探领域,塔里木盆地、准噶尔盆地以及四川盆地等深层发现了多个大型气田,成为储量增长的重要领域。这些大气田的发现,说明深部高—过成熟度烃源岩生烃潜力依然强劲^[5]。塔里木盆地在 7 000 m 以深碎屑岩储层中发现了工业气流,证实了深部有效储层发育。多个盆地勘探实践证实,深部多期构造活动及广泛发育的深大断裂为深层油气的富集提供了良好条件,展现了深层—超深层油气勘探广阔前景^[6]。

柴北缘主要是侏罗系含油气系统,位于南祁连山前,随着柴西北区东坪和尖顶山发现侏罗系气田,根据研究和生产需求,阿尔金山前东段也划归到柴北缘。长期以来,柴达木盆地柴北缘天然气勘探以中浅层为主,主要集中在冷湖—马仙构造带上,但随着浅层勘探难度的增大,向深层拓展成为必然。近年来,柴北缘部分钻井在深层见到了良好的油气显示,在阿尔金山前的东坪、尖顶山等地区,在 5 000 m 以浅的基岩中获得工业气流,表明柴北缘深层存在天然气成藏地质条件。目前柴北缘以深层为目的层的钻井非常少,主要以深浅兼探为主,深层总体认识程度较低。前人对于柴北缘浅层油气藏的成藏特征与富集规律等方面的研究较多^[7-12],而对深层油气的研究较少^[13-14],天然气成藏条件及勘探方向等方面研究相对薄弱,成为制约深层天然气勘探的主要因素。本文在充分参考前人研究成果及最新钻井结果基础上,重点分析了柴北缘深层气藏形成的有利地质条件并预测了深层气藏的有利勘探方向,以期对柴北缘深层天然气勘探领域的突破及天然气勘探部署提供依据。

1 地质背景

柴达木盆地是在前侏罗纪柴达木地块上发育起来

的一个典型的中新生代内陆湖相沉积盆地,四周为三大山脉所夹持,南界为昆仑山,北界为祁连山,西界为阿尔金山。柴北缘位于南祁连山,是盆地北部的一级构造单元。受燕山期及喜马拉雅期运动影响,构造复杂,发育赛什腾—祁连山前构造带、冷湖—马海构造带、鄂博梁—鸭湖及阿尔金等多个构造带(图 1),在深层形成了大型背斜、断背斜以及构造—岩性等多种类型的圈闭。从老到新,该区揭露的地层单元依次发育了侏罗统(J),古近系的路乐河组(E_{1+2})、下干柴沟组下段(E_3^1)和下干柴沟组上段(E_3^2),新近系的上干柴沟组(N_1)、下油砂山组(N_2^1)、上油砂山组(N_2^2)和狮子沟组(N_2^3),以及第四系的七个泉组(Q_{1+2})。中下侏罗统为柴北缘的主力烃源岩层,中侏罗统的残余地层主要分布在冷湖—南八仙构造带以东及以北的赛什腾凹陷和鱼卡凹陷,下侏罗统主要分布在冷湖—南八仙构造带以南^[15-17]。

柴北缘油气勘探起步早,1957 年至 1959 年该区发现了冷湖三号、四号和鱼卡油田及马海气田,1995 年发现了南八仙油气田^[18],2007 年以来,相继发现了平台、东坪、牛东及冷湖五号等多个油气藏和油气显示井,目的层都以浅层为主。近年来,在阿尔金山前及盆内晚期构造带深层见到不同程度的油气显示,部分井获得了工业气流,深层资源潜力大。虽然柴北缘深层天然气勘探尚未发现大量气田,但其存在天然气运聚成藏条件和广阔的勘探前景不容置疑。

2 深层天然气成藏条件

2.1 侏罗系高成熟度烃源岩生气潜力大

对于深层天然气气源来说,深层高演化阶段烃源岩具有生气能力是普遍接受的,但对于生气能力或者生烃强度看法不一。塔里木盆地与鄂尔多斯等盆地的大量勘探实践证实,深层烃源岩特别是煤系烃源岩在高成熟—过成熟演化阶段依然具有良好的生烃潜力。柴北缘主要发育侏罗系煤系烃源岩,岩性以泥岩和煤为主。在前人工作基础上,结合最新钻井成果,通过地震资料重新处理与解释,落实了侏罗系烃源岩分布(图 2)。总体上侏罗系烃源岩分布广泛,主要发育赛什腾凹陷、冷湖凹陷、伊北主力凹陷、昆特依及坪东主力凹陷,在阿尔金山前新发现了坪西侏罗系凹陷,埋深在 6 000 m 以上,分布面积达 1 200 km²,尖探 1 及东坪 17 井的天然气主要来自于坪西凹陷。山前地区侏

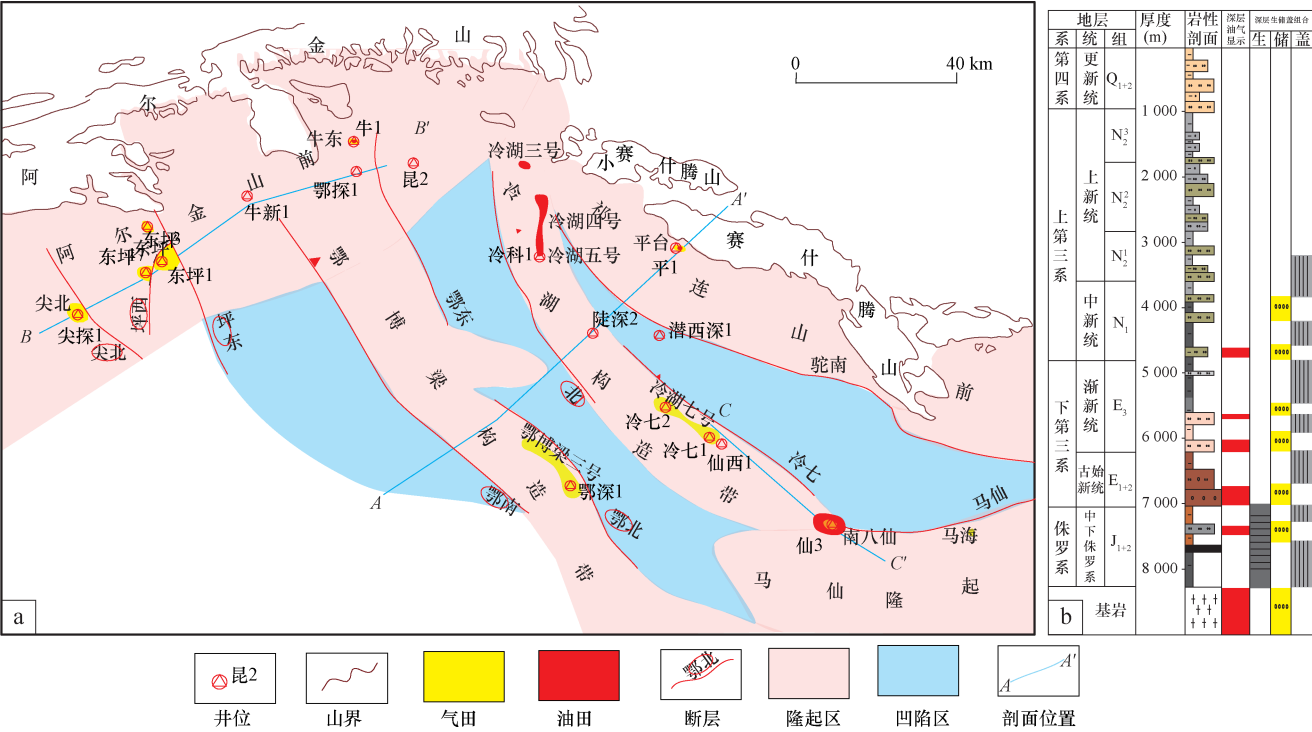


图 1 柴达木盆地北缘研究区位置(a)与深层生-储-盖组合(b)

Fig. 1 The location of the study area at the northern margin of Qaidam Basin(a), and the source rock-reservoir-caprock assemblage in its deeper horizons(b)

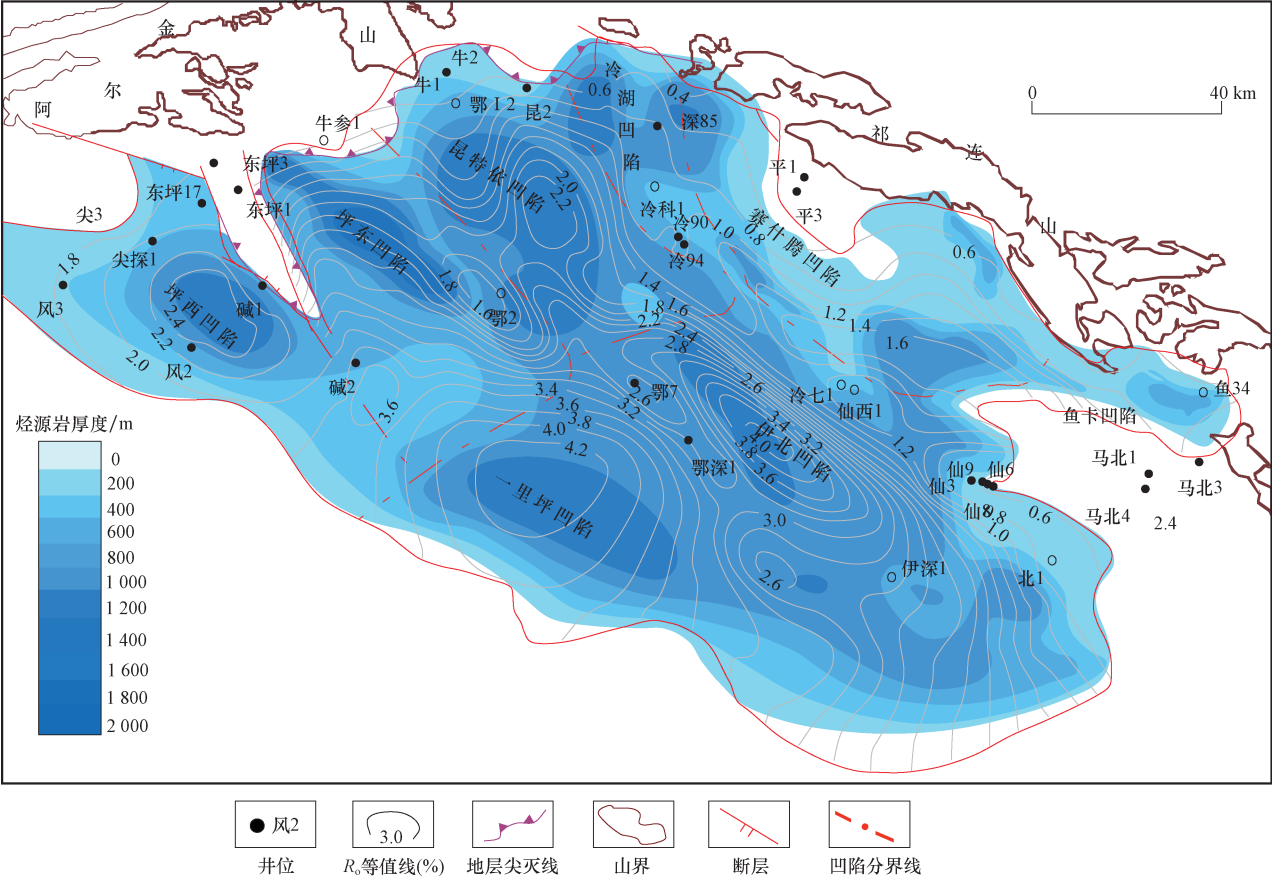


图 2 柴达木盆地北缘中-下侏罗统烃源岩综合评价

Fig. 2 A map showing the comprehensive evaluation of the Middle-to-Lower Jurassic source rocks at the northern margin of Qaidam Basin

罗系埋藏较浅,以生油为主,大部分侏罗系地层埋深超过4 500 m, R_o 在1.4%以上,最高达4.0%以上,处于高成熟—过成熟阶段,以生气为主。大量地质样品模拟实验结果表明,煤的生气界限可以由以往认为的 $R_o=2.5\%$ 延伸到 $R_o=5.0\%$,煤的最大生气量可达300 mL/g,比过去的认识增加1倍^[3]。另外根据“有机质接力生气”理论^[5],泥质烃源岩在深层存在二次裂解生气高峰期,扩大了深层烃源岩的生气能力。因此深埋的侏罗系烃源岩来说,其生烃潜力巨大,具备形成大、中型深层气田的有利气源条件。

根据东坪和尖顶山已发现的深层天然气地球化学分析(表1),东坪地区在钻遇的深层天然气组成中(东坪171和174井为东坪17井附近评价井),CH₄含量高达95%以上,C₂₊含量较低,为1.8%~2.8%,非烃气体含量较低,仅为0.39%~0.71%。尖探1井同样以CH₄为主,含量较低,为83.71%,C₂₊含量同样较低,为2.6%,但该地区N₂含量较高,达到13.04%,可能与不同凹陷的母质类型差异有关。上述深层天然

气干燥系数(C_1/C_{1-5})高达0.97以上,表现为典型的干气特征,天然气碳同位素分析表明,其 $\delta^{13}C_1$ 值为-25.3‰~-32.6‰, $\delta^{13}C_2$ 值为-20.5.3‰~-22.7‰。根据天然气成因分析,可以确定该地区天然气属于煤型气,根据天然气碳同位素计算的成熟度高达1.36%~2.65%,为成熟—高成熟偏腐殖型天然气,来自于坪西凹陷高成熟—过成熟源岩。

柴北缘钻遇的深层天然气主要来自于深层高—过成熟烃源岩,与浅层天然气存在一定差异。东坪—尖顶山地区基岩天然气干燥系数从深层到浅层逐渐变大(图3),深层天然气干燥0.96左右,而浅层达到0.98。在甲烷同位素上,深层天然气同位素较重,而浅层较轻,换算成成熟度后,深层天然气成熟度相对较低,而浅层东坪3基岩成熟度高,达到4%,达到过成熟阶段。浅层成熟度高,与坪东凹陷烃源岩成熟度较为一致,表明浅层气源主要来自于坪东凹陷晚期生成的天然气,而深层天然气成熟度低,干燥系数相对小,表明深层成藏时期相对较早,深层圈闭利于早期聚集成藏。

表1 柴达木盆地北缘深层天然气组分与碳同位素特征

Table 1 The compositions and carbon isotopic characteristics of deep gases at the northern margin of Qaidam Basin

地区	井号	深度/m	$\delta^{13}C/\text{‰}$			组分含量/%			非烃含量/%		干燥系数	成熟度(R_o)/%
			C ₁	C ₂	C ₃	甲烷	乙烷	丙烷	CO ₂	N ₂		
东坪17井区	东坪17	4 345	-31.20	-23.10	-25.10	93.71	2.67	0.58	0.39	0.76	0.96	1.45
	东坪171	4 782	-30.80	-21.90	-25.20	95.01	2.45	0.38	0.88	1.58	0.96	1.51
	东坪172	4 480	-33.10	-21.60	-19.70	91.86	2.53	0.34	0.71	0.64	0.97	1.19
尖北	尖探1	4 640	-25.30	-20.50	-21.00	83.71	2.40	0.20	0.59	13.04	0.96	2.65
	尖探2	4 605	-26.30	-20.70	-18.00	83.18	2.34	0.18	0.6	13.6	0.97	2.39

注: R_o 采用刘文汇等公式: $\delta^{13}C_1=22.42\lg R_o-34.8(R_o>0.9\%)^{[19]}$ 。

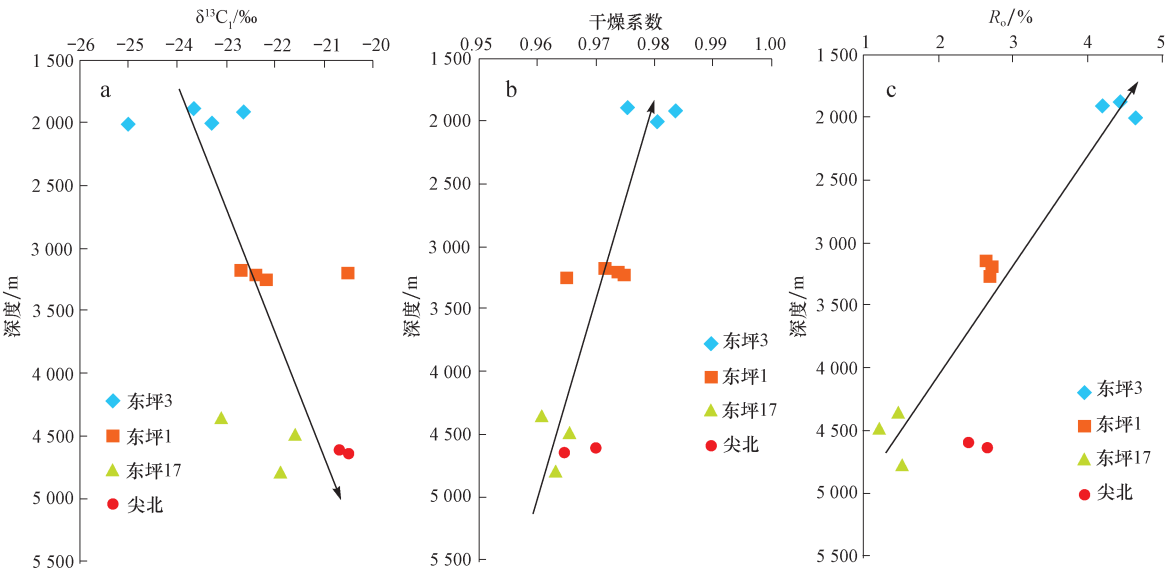


图3 柴达木盆地北缘东坪地区基岩中天然气甲烷碳同位素(a)、干燥系数(b)、成熟度(c)与气藏深度关系

Fig.3 The relationship of methane carbon isotope(a), drying coefficient(b), maturity(c) to gas reservoir depth in the bedrock of Dongping area at the northern margin of Qaidam Basin

2.2 基岩风化壳和次生孔隙发育的碎屑岩可作为有效储层

勘探实践表明,深部岩石的原生孔隙随埋深增大而大幅减少,深层储层是否发育是天然气藏能否富集的关键因素之一。受继承性沉积地层演化影响,柴北缘深层发育多套储盖组合(图1),形成基岩和碎屑岩两类储集体及多套天然气勘探目的层。柴北缘基岩分布广泛,岩性多样,主要有岩浆岩(闪长岩类、花岗岩类)和变质岩(板岩、片岩、片麻岩等)两大类,以变质

岩为主^[20]。受燕山运动影响,柴北缘基底隆升,长期遭受风化剥蚀,形成大面积分布的基岩缝洞型储集体,经后期深埋,与上覆第三系泥质岩形成了有效配置。钻探证实,不同岩性均可成藏,目前发现的东坪及尖顶山深层气藏储层便是基岩储层。岩心薄片鉴定结果表明,基岩储集空间类型主要包括溶蚀缝、溶蚀孔和构造缝等(图4),受多期构造运动影响,基岩中裂缝极为发育,裂缝周围溶蚀作用增强,极大改善了基岩的储层空间。深层基岩储层孔隙度分布在1.9%~9.1%,平均为3.7%,渗透率以低渗为主,平均值为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

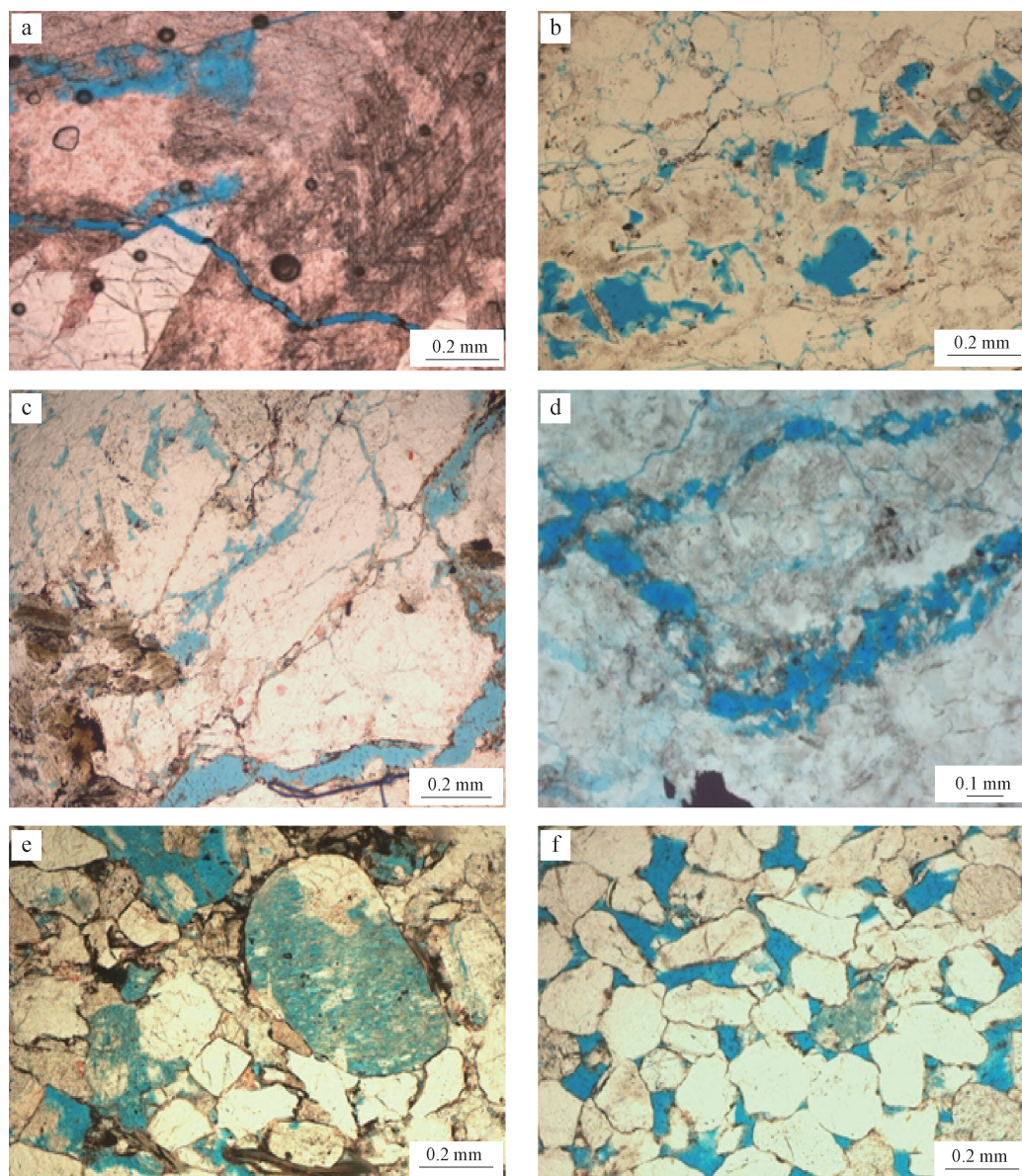


图4 柴达木盆地北缘深层储层空间特征

Fig. 4 Spatial characteristics of deep reservoirs at the northern margin of Qaidam Basin

a. 东坪17井,埋深4 559.35 m,钙质片岩,溶蚀缝;b. 尖探1井,埋深4 648.3 m,花岗闪长岩,溶蚀缝;c. 尖北101井,埋深4 752.98 m,花岗闪长岩,裂缝;d. 南10井,埋深4 512 m,中砂岩,沿裂缝见溶蚀孔隙;e. 昆2井,埋深6 616.00 m,中粗粒长石岩屑砂岩,粒内溶蚀孔;f. 仙西1井,埋深4 852.07 m,细-中粒岩屑长石砂岩,原生孔

相对于构造高部位基岩,深层基岩储层岩性与物性变化不大,深层储层物性不受深度控制(图5a),深层仍具有较好的储集空间。基岩深层有效储层纵向分布超过500 m,横向分布稳定,尽管岩性变化较快,但受多期构造运动及长期风化淋滤作用的影响,裂缝及溶蚀孔非常发育,极大改善了基岩的储集性能,广泛发育的基岩储层具备广阔的勘探前景。

柴北缘北缘碎屑岩储层包括侏罗系及第三系的河流、三角洲相砂岩储层^[21-22],总体上浅层储层物性较好,深层储层物性逐渐变差(图5b)。受岩性、岩相及次生作用等影响,同一深度物性变化较大,比如南八仙地区埋藏较浅,原生孔隙发育,分选较好的河流相砂岩物性好于细、粉砂岩储层。受压实作用影响,深层原生孔隙不发育,但受构造运动及溶蚀等作用影响,深层部分地区次生孔隙发育,昆2井在6 616 m发现了非常好的溶蚀孔(图4),孔隙度达10%左右,仙西1井在接近5 000 m储层中发现好的储层孔隙,孔隙度达10%(图5b),渗透率在 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上,南翼山构造带的南10井裂缝及溶蚀孔非常发育,储层物性较好。因此,深层碎屑岩储层受改造作用的影响,可形成原生孔隙、次生孔隙及混合孔隙等多种类型的储集空间。柴

北缘受多期构造运动影响明显,大部分深层圈闭受断裂控制,在构造或断裂比较活跃的区域,裂缝可能比较发育,这些裂缝不但使孤立的原生孔隙得以联通,成为油气运移的有利通道,而且还增大了深层储层的储集空间,同时也是地下水和有机酸的重要通道,对于次生孔隙的形成起到重要作用,能明显优化和改善储层,从而形成有效的储集体。综上所述,可以预测该区深层基岩及碎屑岩存在较好储集层,有利于天然气的聚集。

2.3 以断裂为主的多种输导体系提供了优质的运移通道

柴北缘烃源岩以侏罗系为主,侏罗系埋深大,生烃中心最深达15 000 m,而大部分深层储层主要位于烃源岩上部以及远离生烃中心的山前带,两者最大垂直距离可达7 000 m以上,最大水平距离可达30 km,油气运移距离远,沟通油气源的断裂及输导体系是成藏的关键。柴北缘已发现的油气藏绝大多数沿大断裂呈线状或带状分布,充分证明断裂对油气运聚成藏的控制作用。受多期构造活动影响,柴北缘深层发育大量沟通油气源的断裂,如北1断裂、赛南断裂、鄂北断裂与坪东断裂等(图1),这些油源断裂与不整合、砂层及

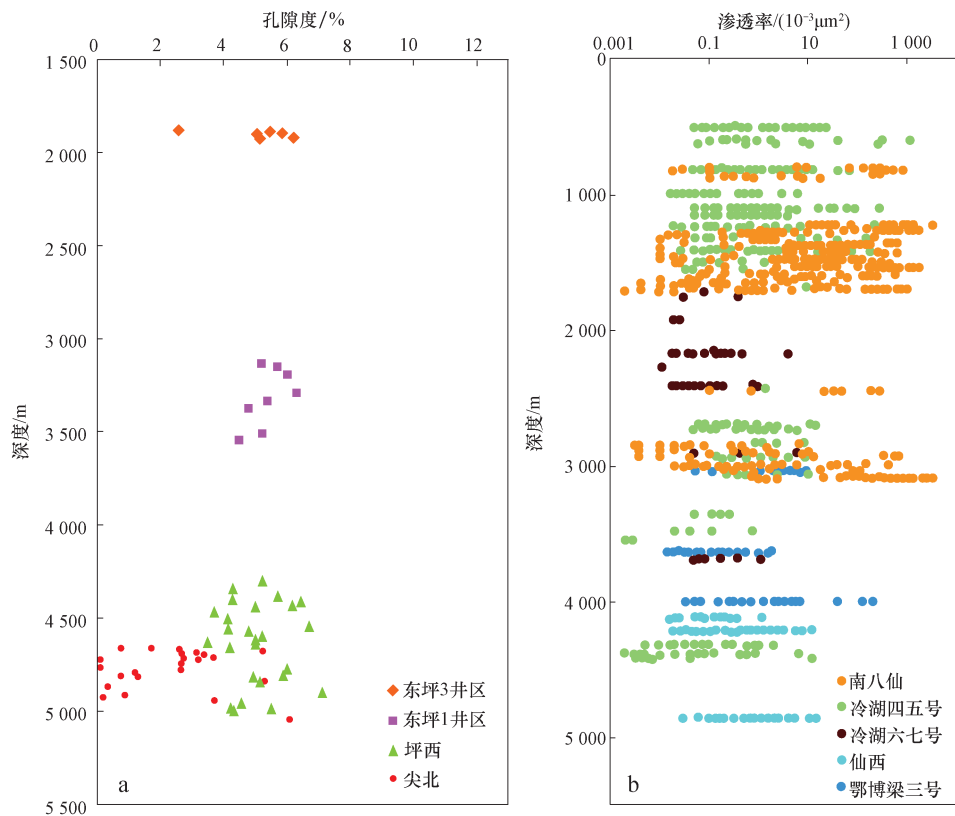


图5 柴达木盆地北缘储层物性与深度之间的关系

Fig. 5 The relationship between physical property and depth of reservoirs at the northern margin of Qaidam Basin

a. 孔隙度; b. 渗透率

裂缝等组成多种类型的复合输导体系,从而使得深部侏罗系生成的天然气向盆缘区或者上部圈闭聚集成藏。在盆缘古隆起区,天然气运移通道主要为断层断裂与不整合组成的输导体系,比如东坪深层气田(图6),附近坪东凹陷生成的天然气通过坪东断裂与基岩不整合组成的输导体系运移至深层圈闭中聚集成藏。在盆地内部,深层气藏的运移通道主要为有源断裂与砂层及裂缝等组成的输导体系,比如在鄂博梁及冷湖六、七号构造带,相对于浅层断裂,深层断裂形成早,多期构造运动中,这些断层具有继承性,为深层油气藏的长期运聚提供了便利。另外,断层附近裂缝发育,为流体的流动提供了通道,为深层储层改善提供了优越条件。总之,柴北缘广泛发育的深大断裂为深层气藏的形成提供了优越的垂向运移通道,也在一定程度上扩大了天然气在空间上的富集,使得凹陷深部生成的天然气能够在多种类型的深层圈闭中聚集,形成多种类型的深层油气藏。

2.4 持续生烃有利于深层圈闭早期、多期成藏

柴北缘深层圈闭形成期与生气期是否匹配是深层能否成藏的关键因素之一。从构造演化来看(图7),侏罗世地层沉积(E_{1+2} 沉积前)表现为明显的坳陷盆地特征,局限于伊北凹陷分布,向北以冷湖构造带为界,向西南超覆减薄。而新生代的地层沉积在此坳陷的基础上继承性发育($E_3-N_2^1$ 期间),只是湖盆范围扩大,早期的压扭性基底断裂对地层的沉积控制作用不明显,山前带为继承性古隆起。喜马拉雅期的构造运动强烈(N_2^1 末期),形成了盆地凹陷相间的构造格局,同时由于山前带的挤压作用更加强烈,形成了

一系列的逆冲推覆构造,以鹊南断层、驼南断层向山前推覆,山前沉积地层遭受严重剥蚀,此时冷湖等构造带的深层圈闭已经形成。喜马拉雅晚期的构造运动奠定了该区的构造格局,盆地内部鄂博梁等构造在此时定型。多期的构造运动,使得柴北缘深层大型背斜、断背斜及构造-岩性等多种类型的圈闭。不同构造带发育不同类型的深层圈闭,山前盆缘带主要发育断背斜和构造-岩性圈闭,这些圈闭形成早,面积大,数量多。而冷湖与鄂博梁等晚期构造带深层主要发育大型背斜圈闭,构造完整,圈闭面积及构造幅度大。

侏罗系烃源岩的演化,有利于深层圈闭的成藏。伊北凹陷是柴北缘重要供烃凹陷(图8),在 E_{1+2} 沉积时期进入生烃门限, E_3-N_1 沉积时期为生油气高峰期, N_1 沉积末期 R_o 已达到1.3%,进入大量生气阶段,现今 R_o 在3.0%以上,为过成熟干气阶段(图5),且至今持续生气。因此,北缘盆缘深层古隆起及古斜坡上圈闭形成早,具有早期充注、持续充注特征。盆地内部冷湖及鄂博梁构造带圈闭定型较晚,但深层断裂发育,有利于早期岩性油气藏的充注,晚期伊北凹陷生气强度仍然较大,天然气仍然可以成藏。综上所述,侏罗系煤系源岩从 J_{1+2} 以来开始生气,在构造演化的各个阶段均有油气充注,深层圈闭具有早充注、持续充注的特征。因此,相对于浅层气层,深层天然气藏具有干燥系数低,成熟度低的特征(图3),油气早期、长期期的充注也为深层储层的改善提供了条件。现今侏罗系深层高-过演化阶段生成的天然气依然能够为晚期深层构造提供优质气源,生烃期与深层构造形成期匹配良好,具备形成深层气田的优越条件。

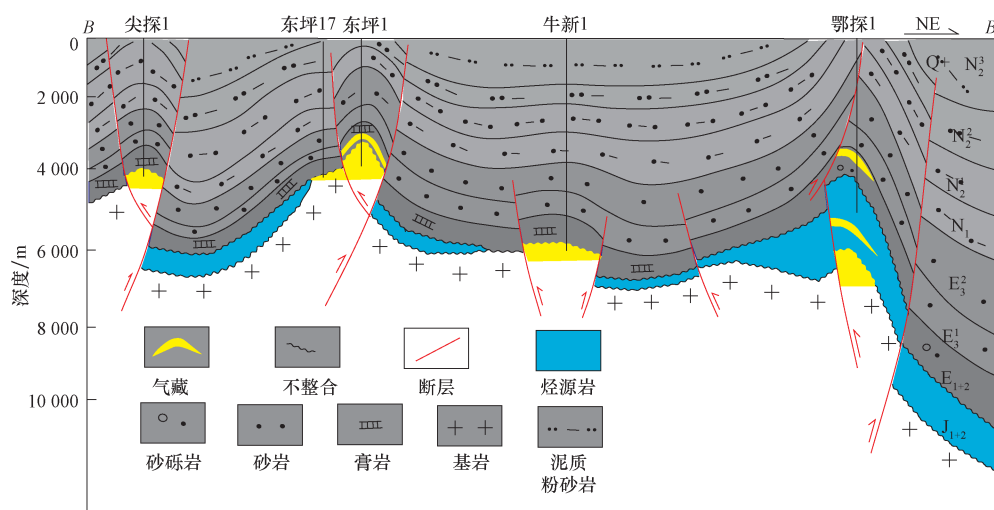


图6 阿尔金山前尖顶山-鄂博梁I号综合地质剖面(剖面位置见图1B-B')

Fig. 6 The composite geological section of No. 1 area from Jiandingshan to Eboliang in the piedmont of the Altun Mountain (see Fig. 1 B-B' for the location of the section)

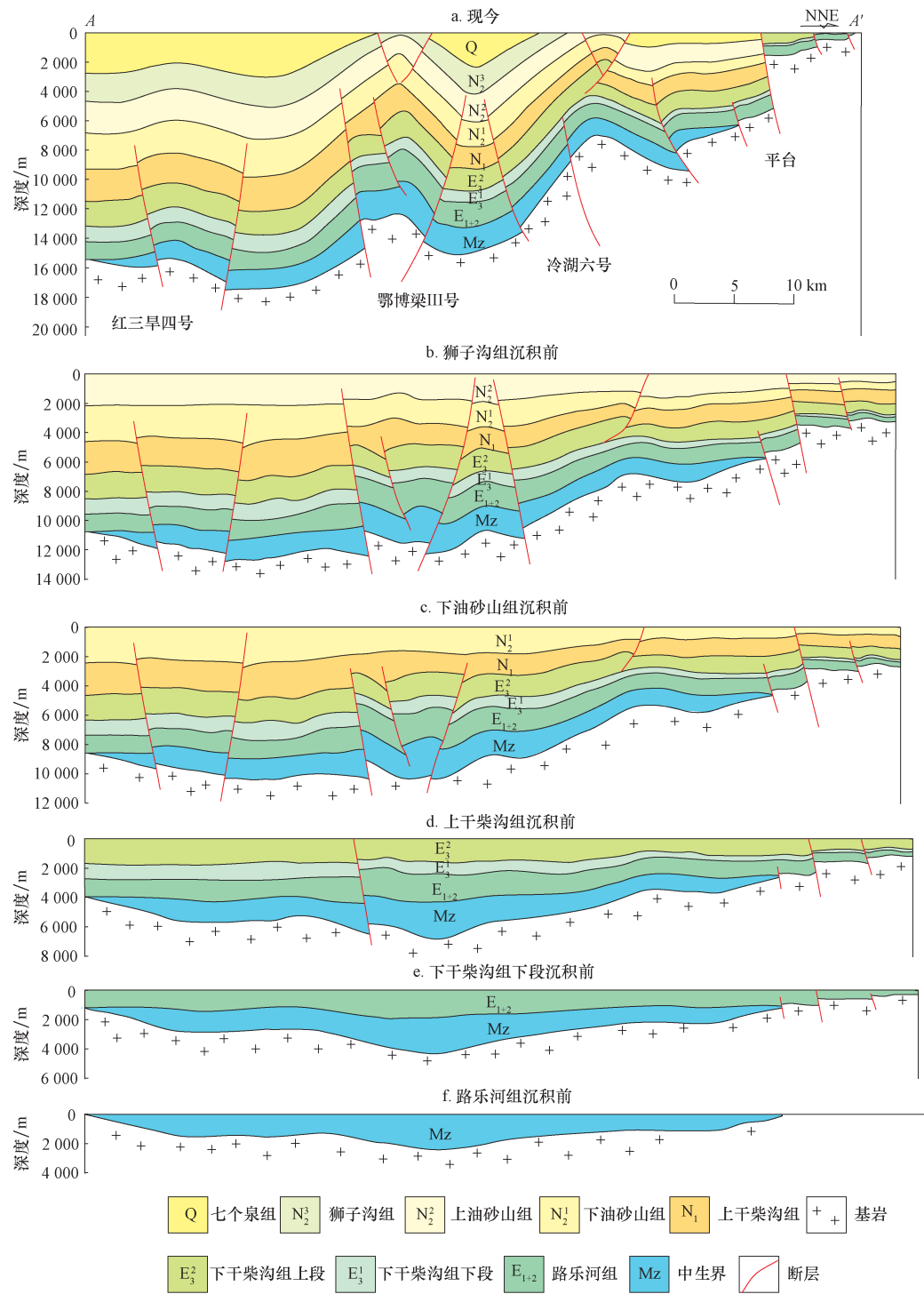


图 7 柴达木盆地北缘 CDM200 测线构造演化史(剖面位置见图 1 A-A')

Fig. 7 The tectonic evolution history along seismic line CDM200 at the northern margin of Qaidam Basin(see Fig. 1 A-A' for the location of the section)

3 有利勘探方向

随着柴北缘深层天然气藏不断的发现,深层成为重要的天然气勘探领域。柴北缘侏罗系烃源岩分布广,埋深大,演化程度高的生烃凹陷周围有利于深层天

然气聚集。沟通深层油气源的断裂及输导体系是否是油气成藏的关键,广泛分布的深大断裂为深层圈闭的成藏提供了优越的运移条件。盆缘深层古隆起既是优质储层发育区,又是多类型圈闭发育区,有利于油气早期、长期充注。因此深大断裂发育的的生烃凹陷周围圈闭是深层天然气聚集有利区,古隆起以及晚期构

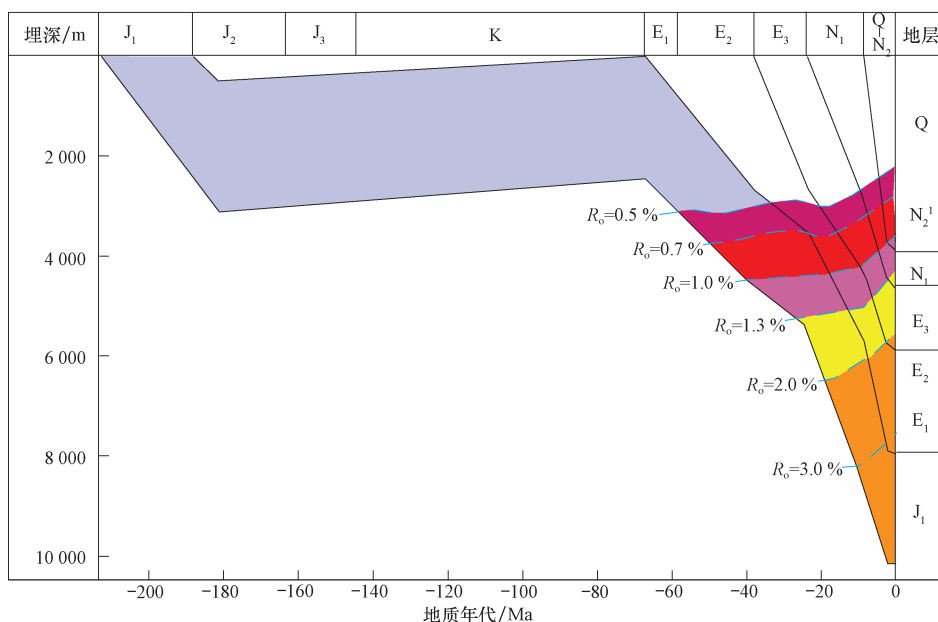


图8 柴达木盆地北缘伊北凹陷侏罗系烃源岩演化史

Fig. 8 The evolution history of the Jurassic source rocks in Yibei Sag at the northern margin of Qaidam Basin

造带上大型背斜圈闭是柴北缘深层天然气有利勘探方向。

3.1 盆缘古隆起区

柴北缘盆缘古隆起主要包括阿尔金山前、祁连山前及马仙古隆起深层。阿尔金山前古隆起西起月牙山,东至冷湖四号,分为西段、中段和东段,西段主要包括东坪和尖顶山地区,深层以基岩储层为主,紧邻坪西和坪东生烃凹陷,烃源岩成熟度高,生烃潜力大,深层基岩储层与上覆膏泥岩储盖组合配置好,沟通油气源的深大断裂发育(图8),成藏条件优越。目前该段在浅层已发现东坪和尖顶山气藏,深层多口井见到工业气流,深层基岩圈闭数量多,面积大,勘探潜力广阔。东段主要是指牛东地区及鄂博梁Ⅰ号,该地区处于昆特依生烃凹陷之上,处于生烃高峰期,深层基岩储层和侏罗系砂岩储层发育,有源断裂可沟通深层气源,成藏条件优越。目前浅层已发现牛东气田,深层的鄂探1井在侏罗系见到良好的油气显示,昆2井侏罗系见到良好的砂岩储层,基岩见到工业气流,是深层天然气勘探有利地区。中段主要是牛中地区,紧邻坪东凹陷,基岩埋深较大,深层圈闭数量多,断裂发育,成藏条件好,目前该地区牛新1井在深层基岩见到良好的油气显示,是深层天然气勘探有利接替区。总之,阿尔金山前古隆起区深层成藏条件好,多口井见到工业气流,是柴北缘深层天然气勘探的最现实领域。马仙古隆起北起马仙断裂,南邻陵间断裂,包括马北和南八仙地区,浅层已发现南八仙油气田和马北油气田,断裂下盘深层

没有钻探,勘探潜力大。该地区紧邻鱼卡凹陷和伊北凹陷,生气能力强,沟通油源的断裂发育,深层基岩储层发育,第三系泥岩可作为良好的盖层,断裂下盘圈闭类型多样,数量多,成藏条件优越,资源潜力大,是深层天然气勘探的有利地区,特别是南八仙深层基岩圈闭多,沟通伊北凹陷烃源岩的断裂发育(图9),是深层天然气勘探的有利目标区。祁连山前带深层领域包括赛什腾凹陷、平台地区及冷湖3-5号深层,冷湖及赛什腾凹陷侏罗系烃源岩较为发育,生烃能力较强,深层储层包括基岩及次生孔隙发育的碎屑岩,该地区深层断裂发育(图6),圈闭数量多,资源潜力较大,冷科1井等深层储层见到较好的油气显示,深层具备成藏条件,是深层天然气勘探的潜力区。总之,柴北缘盆缘古隆起紧邻侏罗系生烃凹陷,深层断裂、不整合等输导体系的发育,盆内深层侏罗系高成熟度烃源岩生成的天然气能够向深层圈闭运移聚集。盆缘古隆起深层圈闭形成相对较早,后期相对稳定,早期基岩储层与第三系泥岩组成良好的储盖组合,油气具有早期充注、多期充注的特点,成藏条件优越,勘探前景广阔。

3.2 盆内晚期构造

该构造带主要包括盆地腹部的鄂博梁Ⅱ、Ⅲ号以及冷湖六、七号等地区,盆内构造形成于晚喜马拉雅期之后(图6),以大型背斜为主,圈闭面积大,幅度高,深层断裂发育(图9),以主要以碎屑岩储层为主,部分地区发育埋深较大的基岩储层。盆内晚期构造带处于伊北凹陷之上,侏罗系烃源岩成熟度高,生烃能力强。晚

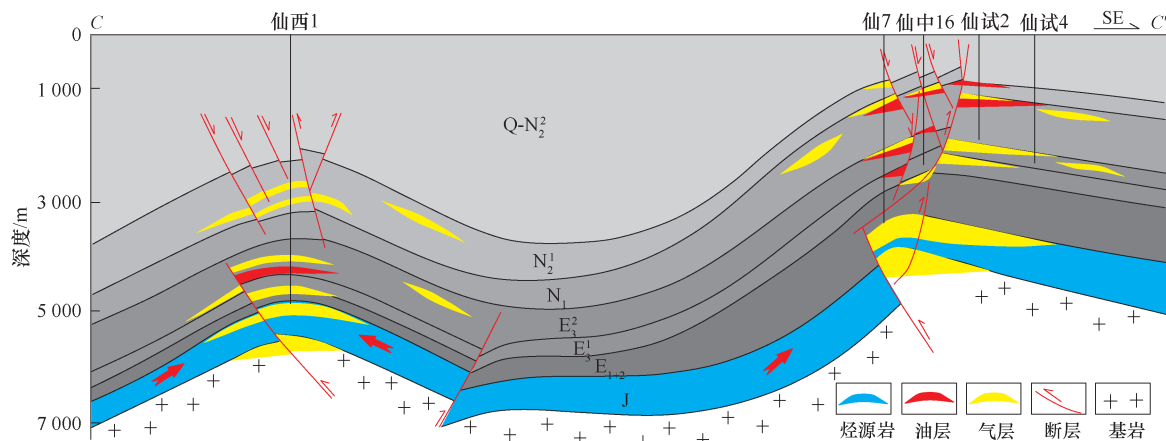


图9 柴达木盆地北缘冷湖七号-南八仙地质剖面(剖面位置见图1 C-C')

Fig. 9 The geological section crossing Lenghu 7-Nanbaxian area at the northern margin of Qaidam Basin (see Fig. 1 C-C' for the section location)

期构造带上深层储层以碎屑岩为主,侏罗系和第三系河流相砂泥岩储盖组合发育,部分层段储层物性好,新钻井仙西1井在接近5 000 m储层中发现好的储层孔隙,孔隙度达10%(图4b),渗透率在 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上,证实深层碎屑岩储层勘探前景广阔。该构造带构造定型晚,主要以晚期成藏为主,伊北凹陷高-过成熟度源岩生成的天然气通过深大断裂沟通,可在深层大型背斜圈闭中聚集成藏。晚期构造带上的冷湖七号的仙西1在深层 E_3^2 见到低产工业气流,鄂博梁Ⅲ号上钻探的鄂深1井在深层4 600 m以下的下油砂山组(N_1)中见到良好的油气显示^[7],并解释出多个气层,展示了晚期构造带深层具有良好的勘探前景,是深层天然气勘探的有利地区。

4 结论

1) 侏罗系深层发育高-过成熟度烃源岩,生气潜力大,从 J_{1+2} 以来持续生气,从 E_3^2 到 N_1 跳跃式增大, N_1 达到最高峰,生气期与深层构造形成期匹配良好,持续生气有利于深层圈闭早期、多期成藏。

2) 柴北缘深层发育基岩和碎屑岩两类储层,形成多套储盖组合,含气层系多。不同岩性的基岩均可成藏,储集空间类型主要包括溶蚀缝、溶蚀孔和构造缝等,物性不受深度控制,深层发育优质储层。受构造活动及溶蚀作用影响,深层碎屑岩储层的溶蚀孔、裂缝等次生孔隙发育,可为深层碎屑岩气藏的形成提供了有效的储集空间。

3) 多期构造运动使得柴北缘深层发育多种类型的圈闭,以断裂和不整合为主的多种输导体系为深层天然气运移聚集提供了良好的垂向和侧向运移通道,

深大断裂发育的的生烃凹陷周围圈闭是深层天然气聚集有利区,盆缘古隆起以及晚期构造带上大型背斜圈闭是柴北缘深层天然气有利勘探领域。阿尔金山前、祁连山前、马仙古隆起下盘及晚期构造带深层下步深层天然气勘探的重点方向,其中阿尔金山前深层是最现实的勘探领域。

参 考 文 献

- [1] 王宇,苏劲,王凯,等. 全球深层油气分布特征及聚集规律[J]. 天然气地球科学,2012,03:526-534.
Wang Yu, Jin Sun Jin, Wang Kai, et al. Distribution and accumulation of global deep oil and gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23 (3): 526-534.
- [2] 白国平,曹斌凤. 全球深层油气藏及其分布规律[J]. 石油与天然气地质,2014,01:19-25.
Bai Guoping, Cao Binfeng. Characteristics and distribution patterns of deep petroleum accumulations in the world [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 19-25.
- [3] 孙龙德,邹才能,朱如凯,等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发,2013,06:641-649.
Sun Longde, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2013, 40(6): 687-695.
- [4] 贾承造,庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报,2015,3:1457-1469.
Jia Chenzaio, Pang Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 12: 1457-1469.
- [5] 赵文智,王兆云,张水昌,等. 有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义[J]. 石油勘探与开发,2005,32(2):01-07.
Zhao Wenzhi, Wang Zhaoyun, Zhang Shuichang, et al. Successive generation of natural gas from organic materials and its significance in future exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 127.

- [6] 朱光有,张水昌. 中国深层油气成藏条件与勘探潜力[J]. 石油学报,2009,30(6):793-802.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of deep reservoirs in china[J]. Acta Petrolei Sinica,2009,30(6):793-802.
- [7] Tian J, Li J, Pan C, et al. Geochemical characteristics and factors controlling natural gas accumulation in the northern margin of the Qaidam Basin [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2018, 160:219-228.
- [8] 田继先,孙平,张林,等. 柴达木盆地北缘山前带平台地区天然气成藏条件及勘探方向[J]. 天然气地球科学,2014,25(4):526-531.
Tian Jixian, Sun Ping, Zhang Lin, et al. Accumulation conditions of natural gas and exploration domains in Pingtai area, piedmont zone of the North Qaidam[J]. Natural Gas Geoscience,2014,25(4):526-531.
- [9] 曹正林,孙秀建,汪立群,等. 柴达木盆地阿尔金山前东坪—牛东斜坡带天然气成藏条件[J]. 天然气地球科学,2013,24(6):1125-1131.
Cao Zhenglin, Sun Xiujian, Wang Liqun, et al. The gas accumulation conditions of Dongping-Niudong slope area in front of Aejin mountain of Qaidam basin [J]. Natural Gas Geoscience,2013,24(6):1125-1131.
- [10] 马峰,乐幸福,王朴,等. 柴达木盆地煤型气成藏条件及勘探领域[J]. 中国石油勘探,2014,03:87-94.
Ma Feng, Le Xinfu, Wang Pu, et al. Accumulation conditions and exploration domain of coal-type gas in Qaidam Basin [J]. China Petroleum Exploration,2014,03:87-94.
- [11] 张正刚,袁剑英,陈启林. 柴北缘地区油气成藏模式与成藏规律[J]. 天然气地球科学,2006,05:649-652.
Zhang Zhengang, Yuan, Jianying, Chen Qiling. Reservoiring patterns and accumulation regularity in northern of qaidam basin [J]. Natural Gas Geoscience,2006,05:649-652.
- [12] 田光荣,阎存凤,妥进才,等. 柴达木盆地柴北缘煤成气晚期成藏特征[J]. 天然气地球科学,2011,22(6):1028-1032.
Tian Guangrong, Yan Cunfeng, Tuo Jincai, et al. Late hydrocarbon accumulation characteristic of coal related gas in northern Qaidam Basin [J]. Natural Gas Geoscience,2011,22(6):1028-1032.
- [13] 付锁堂,汪立群,徐子远,等. 柴北缘深层气藏形成的地质条件及有利勘探区带[J]. 天然气地球科学,2009,20(6):841-846.
Fu Suotang, Wang Liqun, Xu Ziyuan, et al. Geological conditions of deep gas pools and their favorable prospects [J]. Natural Gas Geoscience,2009,20(6):851-846.
- [14] 曾旭,田继先,周飞,等. 柴达木盆地中东部深层天然气成藏条件与勘探潜力[J]. 新疆石油地质,2015,36(1):32-35
Zeng Xu, Tian Jixian, Zhou Fei, et al. Deep gas accumulation conditions and exploration targets in central eastern Qaidam Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology,2015,36(1):32-35.
- [15] Yin A, Dang Y Q, Zhang M, Chen X H, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Qaidam basin and its surrounding regions (part 3): structural geology, sedimentation, and regional tectonic reconstruction [J]. Geological Society of America Bulletin,2008,120(7):847-876.
- [16] Yin A, Dang Y Q, Wang L Q, et al. Cenozoic tectonic evolution of Qaidam Basin and its surrounding regions (Part 1): The southern Qilian Shan-Nan Shan thrust belt and northern Qaidam Basin [J]. GAS Bull,2008,120,813-846.
- [17] 翟志伟,张永庶,杨红梅,等. 柴达木盆地北缘侏罗系有效烃源岩特征及油气聚集规律[J]. 天然气工业,2013,33(9):36-42.
Zhai Zhiwei, Zhang Yongshu, Yang Hongmei, et al. Characteristics of effective source rocks in the Jurassic and hydrocarbon accumulation patterns in the areas near the northern margin of the Qaidam Basin [J]. Natural Gas Industry,2013,33(9):36-42.
- [18] 罗群. 柴北缘西部油气藏分布与成藏特征[J]. 新疆石油地质,2010,31(1):10-13.
Luo Qun. The distribution of petroleum reservoirs and the hydrocarbon accumulation in West part of northern margin of Qaidam Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology,2010,31(1):10-13.
- [19] 田继先,李剑,曾旭,等. 柴达木盆地北缘天然气地球化学特征及其石油地质意义[J]. 石油与天然气地质,2017,38(2):355-362.
Tian Jixian, Li Jian, Zeng Xu, et al. Geochemical characteristics and petroleum geologic significance of natural gas in the north margin of the Qaidam Basin [J]. Oil & Gas Geology,2017,38(2):355-362.
- [20] Guo Z Q, Ma Y S, Liu W H, et al. Main factors controlling the formation of basement hydrocarbon reservoirs in the Qaidam Basin, western China [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering,2016,149:244-255.
- [21] 金振奎,齐聪伟,薛建勤,等. 柴达木盆地北缘侏罗系沉积相[J]. 古地理论,2006,02:199-210.
Jin Zhenkui, Qi Congwei, Xue Jianqin, et al. Sedimentary facies of the Jurassic in northern margin of Qaidam Basin [J]. Journal of Palaeogeography,2006,8(2):199-210.
- [22] 陈吉,史基安,龙国徽,等. 柴北缘古近系-新近系沉积相特征及沉积模式[J]. 沉积与特提斯地质,2013,03:16-26.
Chen Ji, Shi Jian, Long Guohui, et al. Sedimentary facies and models for the Palaeogene-Neogene deposits on the northern margin of the Qaidam Basin, Qinghai [J]. Sedimentary Geology & Tethyan Geology,2013,03:16-26.

(编辑 董立)