

## 柴达木盆地尖北斜坡基岩储层特征及天然气成藏条件

焦小芹<sup>1,2</sup>, 牛花朋<sup>1,2</sup>, 谢庆宾<sup>1,2</sup>, 张永庶<sup>3</sup>, 李俊巍<sup>1,2</sup>, 吴志雄<sup>3</sup>, 王波<sup>3</sup>, 李欣<sup>1,2</sup>

[1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石油青海油田勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202]

**摘要:**尖北斜坡为柴达木盆地阿尔金山前东段天然气勘探重点区域之一, 目前针对该区域基岩储层发育特征和成藏条件的分析研究尚很薄弱。在岩心观察、薄片鉴定的基础上, 结合常量元素分析、XRD、SEM、压汞测试和井震资料分析, 对柴达木盆地尖北斜坡基岩储层的发育特征及天然气成藏的有利地质条件进行了研究。结果表明, 尖北斜坡基岩储层岩石类型主要为花岗岩长岩、花岗岩和片岩; 发育风化壳型储层, 其中半风化层孔渗物性最好; 储集空间为基质微孔、溶蚀孔和裂缝, 储层孔隙度主要分布在 2.23% ~ 3.77%, 渗透率均值为  $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 以 II 类中等储层为主; 基岩储层临近坪东以西侏罗系生烃凹陷, 天然气自生烃凹陷沿基岩基底发育的深大断裂和不整合发生运移, 经基岩顶部古近纪咸湖环境下形成的膏泥岩有效封堵, 最终在更新世晚期形成的断背斜圈闭内富集成藏, 发育基岩顶部风化壳型气藏。该研究成果对指导尖北斜坡基岩气藏下一步勘探具有重要的指导意义。

**关键词:**基岩; 储层; 成藏条件; 天然气; 尖北斜坡; 柴达木盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

## Characteristics of basement reservoirs and setting for natural gas accumulation in Jianbei slope, Qaidam Basin

Jiao Xiaojin<sup>1,2</sup>, Niu Huapeng<sup>1,2</sup>, Xie Qingbin<sup>1,2</sup>, Zhang Yongshu<sup>3</sup>, Li Junwei<sup>1,2</sup>, Wu Zhixiong<sup>3</sup>, Wang Bo<sup>3</sup>, Li Xin<sup>1,2</sup>

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development of Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202, China]

**Abstract:** Jianbei slope is one of the key areas for natural gas exploration in the eastern segment of the Altun Piedmont, Qaidam Basin, but the analysis of developing characteristics and gas accumulation conditions of the basement reservoirs in this area is still rarely seen. Based on observation of cores and thin sections, combined with major element analysis, XRD, SEM, MIP (mercury intrusion porosimetry) and log-seismic data analysis, we analyzed the developing characteristics of basement reservoirs and the favorable conditions for natural gas accumulation in Jianbei slope, Qaidam Basin. The results show that the basement reservoirs in the study area are dominated by granodiorite, granite and schist. The reservoirs of weathering crust type are developed there, with the semi-weathering crust reservoirs being the best in porosity and permeability. The reservoir space is mainly matrix micropores, dissolved pores and cracks, with a reservoir porosity ranging between 2.23% and 3.77% and an average permeability of 0.06mD. So the reservoirs are mainly Type II reservoirs of medium permeability. The distribution area of the basement reservoirs is adjacent to the Jurassic hydrocarbon kitchen to the west of Pingdong area. The natural gas generated in the kitchen migrated along the well-developed deep-rooted large faults and unconformities at the bottom of basement; then got effectively sealed by the gypsiferous mudstones deposited under the Paleogene saline lacustrine environment on the basement top; and ultimately got accumulated in the faulted anticline trap formed during the Late Pleistocene, resulting in the formation of weathering crust gas reservoir on the basement top. In all, the research results are of instructional significance to further exploration of basement gas reservoirs in

收稿日期: 2019-01-29; 修订日期: 2020-01-08。

第一作者简介: 焦小芹 (1995—), 女, 硕士研究生, 岩石学与储层地质学。E-mail: jiaoxiaoqin0109@163.com。

通讯作者简介: 牛花朋 (1979—), 女, 博士、副教授, 矿物岩石学与储层地质学。E-mail: niuhuapeng@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项 (2017ZX05063002-006); 北京高等学校青年英才计划项目 (YETP0669); 中国石油大学 (北京) 科研基金 (KYJJ2012-01-22)。

Jianbei slope, Qaidam Basin.

**Key words:** basement, reservoir, accumulation condition, natural gas, Jianbei slope, Qaidam Basin

随着油气勘探的不断深入,非沉积岩系中的油气藏引起人们广泛关注<sup>[1]</sup>。其中,基岩油气藏指油气于结晶基底岩系中富集成藏<sup>[2]</sup>,在国内外均有分布,如委内瑞拉的马拉开波盆地<sup>[3]</sup>、越南的湄公盆地<sup>[4]</sup>、利比亚的锡尔特盆地<sup>[5]</sup>以及美国的堪萨斯盆地探明出亿吨级的基岩油气储量<sup>[6]</sup>,中国酒西盆地的鸭儿峡<sup>[7]</sup>、渤海湾盆地的兴隆台<sup>[8]</sup>和海拉尔盆地的苏德尔特油气田均发现了大型基岩油气藏<sup>[9]</sup>。

全球大多数基岩储层岩石类型主要为花岗岩类的火成岩和片麻岩类的变质岩<sup>[10]</sup>;受构造断裂及风化淋滤作用影响<sup>[6]</sup>,储集空间主要为构造缝和次生孔隙,孔隙度小于10%,渗透率小于 $1\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ <sup>[11]</sup>;基岩油气藏受烃源条件、储盖组合、输导体系和圈闭条件这四个因素所控制<sup>[2,12-14]</sup>,其中,储集层物性的好坏直接影响储存油气的数量<sup>[14]</sup>,是基岩油气藏评价最关键的因素<sup>[10]</sup>。

自2012年在柴达木盆地阿尔金山前东坪地区发现中国陆上地质储量最大的基岩气藏以来<sup>[10]</sup>,阿尔金山前近年来成为柴达木盆地基岩天然气勘探的重要领域<sup>[15]</sup>。2016年,尖北和尖顶山构造带基岩内均获得了工业天然气流显示,成为柴达木盆地阿尔金山前基岩气藏勘探的重要目标。但尖北斜坡的基岩气藏勘探还处于起步阶段,前人对该区基岩储层特征和成藏条件的研究还很薄弱。本文通过岩心观察、薄片鉴定,结合常量元素等分析测试和井震资料解析,重点研究了柴达木盆地阿尔金山前尖北斜坡基岩储层特征,并分析了天然气成藏的有利地质条件。该研究成果对指导尖北斜坡基岩气藏下一步勘探具有重要的指导意义。

## 1 地质概况

柴达木盆地具有古生代褶皱基底和元古代结晶基底的双重基底结构,基底顶面分布有古生代浅变质岩及中-浅变质岩、元古代中-深变质岩和侵入火成岩体<sup>[16]</sup>。尖北斜坡广泛发育花岗闪长岩,岩体沿早期形成的NW向断裂展布,最早见于尖探1井4 637 m基岩顶部,针对该井基岩段解释基岩气层162 m;随后尖探2井、尖北101井、尖北1-1井相继钻探至花岗闪长岩基岩层段,完钻井深4 765~4 900 m,试气后可见工业气流显示;尖北斜坡局部发育有花岗岩及片岩,在尖探4井3 500 m基岩顶钻遇花岗岩,钻深130 m,基

岩段未解释出油气层,尖北1-1井上部基岩段发育角闪石片岩,气测显示稍弱。

柴达木盆地在新生代时期,受喜马拉雅多期构造运动影响,构造变形复杂,发育多个盆缘冲断古隆起和盆内晚期构造带<sup>[17-18]</sup>。其中,柴西隆起在东昆仑山造山带和阿尔金山的挤压-走滑区域应力背景下形成,构造变形强烈,断层和背斜呈带状展布,近NW或NNW向<sup>[18-20]</sup>。尖北斜坡位于柴西隆起阿尔金山前的大风山凸起,面积达1 344 km<sup>2</sup>,表现出北高南低的构造斜坡,受尖顶山、尖北及尖南断层的控制,发育尖顶山和尖北构造<sup>[18-19]</sup>(图1)。喜马拉雅运动晚期,周缘造山带构造运动强烈,盆缘、盆内构造急剧隆升,发育尖顶山冲断古隆起,于喜马拉雅运动晚期末得以定型,控制了尖顶山、尖北构造带的形成<sup>[20-22]</sup>。

## 2 储层特征

### 2.1 岩石学特征

通过岩心观察、薄片鉴定、元素分析、XRD测试、锆石U-Pb测年和测录井资料分析可知,尖北斜坡基底岩性主要为早古生代花岗闪长岩、少量花岗岩和角闪石片岩。

#### 2.1.1 花岗闪长岩

花岗闪长岩主要见于尖探1井,LA-ICP-MS锆石U-Pb定年法获得结晶年龄为 $444 \pm 2 \text{ Ma}$ (图2),与东坪3井区花岗岩属于同一时期花岗质岩浆作用,为奥陶纪晚期南阿尔金洋盆向北俯冲闭合,形成此类火山弧岩浆岩<sup>[23]</sup>。岩石整体呈灰白色,主要矿物由斜长石(约45%)、碱性长石(约30%)和石英(约12%)组成,次要矿物为角闪石(约8%)、黑云母(约5%),可见副矿物磷灰石(图3c);矿物晶粒粒径在0.8~2.3 mm,呈半自形中细粒结构;岩石中各矿物颗粒分布均匀,排列紧密,无明显定向性,块状构造(图3a);发育裂缝,裂缝被次生矿物硬石膏和方解石半充填(图3a,3b),受岩浆热液作用影响,钾长石矿物晶体蚀变为绢云母和黏土矿物的混合物(图3b)。

测井曲线上表现为高自然伽马、高密度、低中子,深浅电阻率具有明显的幅度差,电阻率140~668  $\Omega \cdot \text{m}$ ,基岩密度大于2.6 g/cm<sup>3</sup>,呈现高密高阻特征,铀-钾元素交汇变化小,钍元素呈明显高值(图4a,图5)。

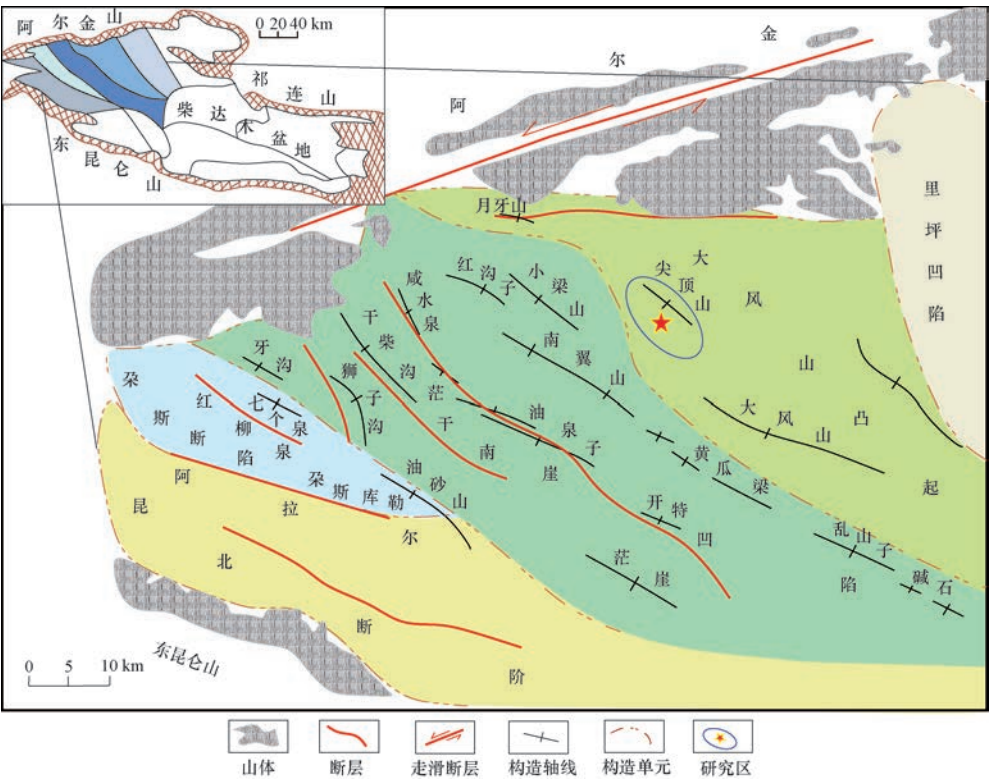


图1 柴西隆起构造单元划分及研究区位置(据文献[22],修改)

Fig.1 The structural unit division in Chaixi uplift, and the location of the study area(modified after reference[22])

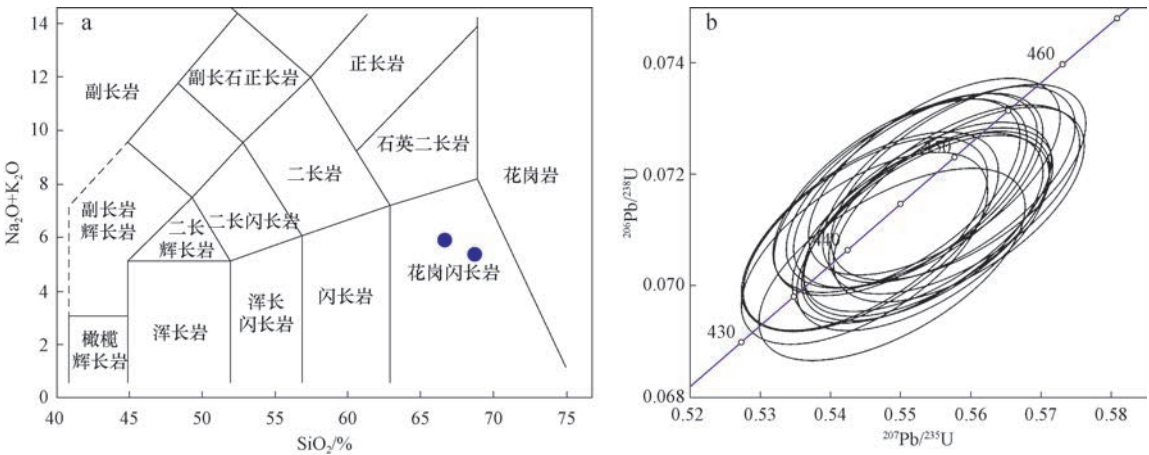


图2 柴达木盆地尖探1井花岗闪长岩 TAS 图解和锆石 U - Pb 测年谐和图

Fig.2 TAS and Zircon U - Pb dating harmonic diagrams of the granodiorite in Well Jiantan 1, Qaidam Basin

a. 尖探1井基岩 TAS 识别图版;b. 尖探1井花岗闪长岩锆石 U - Pb 测年谐和图

2.1.2 花岗岩

灰白色花岗岩分布于尖探4井(图3d),石英含量约30%,含大量碱性长石(正长石、微斜长石)和酸性斜长石,碱性长石多于酸性斜长石,占长石总量的2/3以上,次要矿物为黑云母(约4%)和角闪石(约6%),少量磁铁矿副矿物(约2%)。晶体粒径在0.9mm左右,为等粒半自形细粒结构,半自形

的斜长石和他形的石英颗粒充填于不规则的结晶间隙中呈现花岗结构。角闪石经纤闪石化后变为绿泥石。

测井曲线上表现出低密高阻的特征(图5),密度小于2.6 g/cm<sup>3</sup>,电阻率值大于2 000 Ω·m,测井顶部钾、钍、铀元素含量降低,自然伽马和铀值在3 536 ~ 3 540 m层段呈现异常高值,说明粘土矿物大量发育(图4b)。

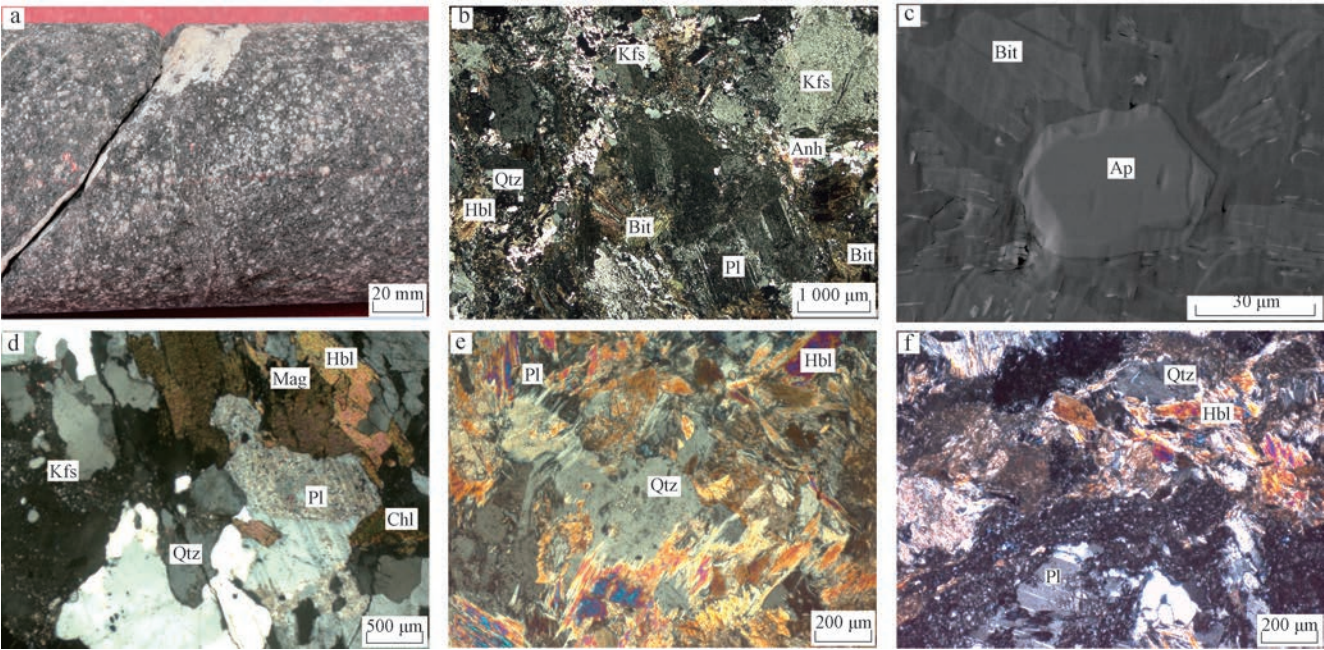


图 3 柴达木盆地尖北斜坡基岩岩石学特征

Fig. 3 Petrological characteristics of the basement in Jianbei slope, Qaidam Basin

a. 花岗闪长岩, 尖探 1 井, 埋深 4 642.5 m, 岩心照片; b. 花岗闪长岩, 尖探 1 井, 埋深 4 642.5 m, 普通薄片 (+) × 25; c. 花岗闪长岩, 尖探 1 井, 埋深 4 645.9 m, 扫描电镜; d. 花岗岩, 尖探 4 井, 埋深 3 503 m, 普通薄片 (+) × 50; e. 角闪石片岩, 尖北 1-1 井, 埋深 4 870.1 m, 普通薄片 (+) × 100; f. 角闪石片岩, 尖北 1-1 井, 埋深 4 870.1 m, 普通薄片 (+) × 100  
Qtz. 石英; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Bit. 黑云母; Hbl. 角闪石; Anh. 硬石膏; Mag. 磁铁矿; Ap. 磷灰石; Chl. 绿泥石

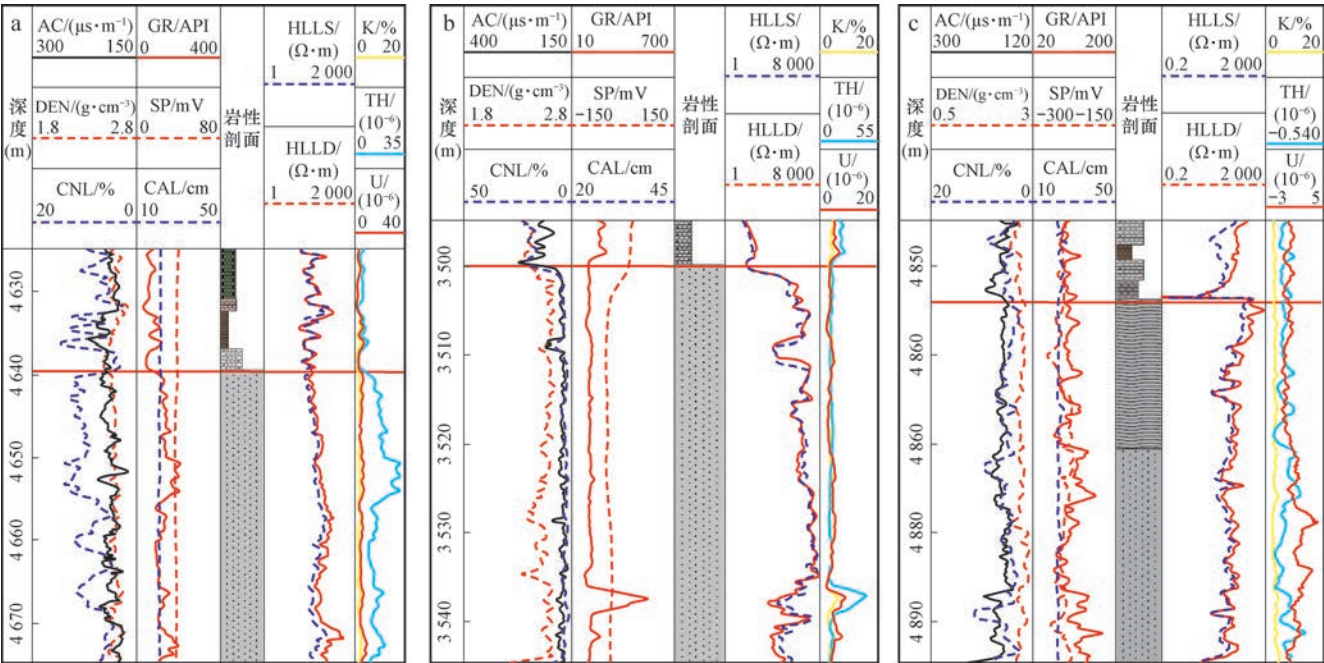


图 4 柴达木盆地尖北斜坡基岩测井响应特征

Fig. 4 Logging response characteristics of the basement in Jianbei slope, Qaidam Basin

a. 花岗闪长岩测井响应特征; b. 花岗岩测井响应特征; c. 角闪石片岩测井响应特征

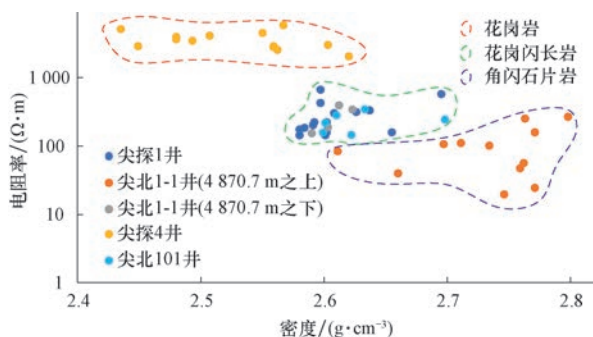


图5 柴达木盆地尖北斜坡基岩电阻率-密度交会图版

Fig. 5 The cross-plot between resistivity and density of the basement in Jianbei slope, Qaidam Basin

### 2.1.3 角闪石片岩

尖北1-1井下部发育角闪石片岩,主要矿物为石英碎屑(约50%),其次为角闪石(约45%)、斜长石(约5%)(图3e)。角闪石不规则发育在石英颗粒之间,粒径为0.2~0.6 mm,晶体呈半自形片状(图3e)。角闪石片岩为鳞片粒状变晶结构,角闪石定向排列,具有片状构造(图3f)。在岩浆期后热液作用下,部分角闪石绿泥石化,原岩中的长石、部分泥质填隙物发生绢云母化(图3e)。

片岩表现为高声波时差、低中子、高密度和浅电阻率的异常低值,呈高密中阻的特征(图5),密度大于 $2.6 \text{ g/cm}^3$ ,电阻率约 $102 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ ,铀元素略高,钍-钾元素交汇变化小(图4c)。

## 2.2 储集空间特征

上新世末到更新世初为尖北斜坡基岩储层发育的主要阶段,储层储集空间分为孔隙和裂缝,有原生和次生两种成因类型。其中,解理缝为原生储集空间,溶蚀孔、溶蚀缝和构造缝为次生储集空间,基质微孔有原生和次生两种成因。

### 2.2.1 孔隙

基质微孔。当岩石中裂缝不太发育时,基质孔隙对岩石总孔隙体积的贡献率在70%以上<sup>[24]</sup>,是基岩气藏稳产的重要原因<sup>[10]</sup>。通过SEM研究发现尖北斜坡的基岩中发育大量的基质微孔,基质微孔的面孔率约15%,有原生和次生两种成因。原生基质微孔形成于基岩成岩过程,在岩浆冷凝结晶阶段,铁镁质矿物发育晶内原生微孔,云母片在变质成岩过程中也形成了大量的晶间残余微孔隙,大小约 $2.4 \sim 15.3 \text{ } \mu\text{m}$ (图6b)。

柴西地区阿尔金山前一带在喜马拉雅运动Ⅲ期发生了浅部褶皱及深部断裂活动,使柴西地区大面积抬升剥蚀,形成了 $N_2^3$ 顶区域性剥蚀面<sup>[25]</sup>,为尖北斜坡基岩储层的发育提供了关键条件。在 $N_2^3$ 不整合面形成过程中,大气淡水沿剥蚀面缝隙下渗,使下伏岩层发生风化淋滤作用,促进了铝硅酸盐矿物溶蚀,从而形成次生基质溶蚀孔。多见于花岗岩和花岗闪长岩,如在尖探1井的粘土矿物伊利石中大量发育有基质微孔,大小 $62 \sim 557 \text{ nm}$ (图6a)。

溶蚀孔。溶蚀孔可进一步增加裂缝的张开度,扩大储集空间,提高渗流能力。尖北斜坡溶蚀孔发育程度中等,根据其发育特点可分为粒内溶孔和粒间溶孔,前者为碱性长石在高岭土化和绢云母化过程中,沿粘土矿物发生溶蚀,进而在长石颗粒内部发育的溶蚀孔隙,相互连通呈筛状或片状,如在尖北101井的花岗闪长岩中,长石内的溶蚀孔与粒缘溶蚀缝相连通,平均孔径 $0.05 \text{ mm}$ (图6c);后者常沿构造缝、溶蚀缝、矿物颗粒边缘发育,暗色矿物颗粒的接触边缘易受流体淋滤作用而发生蚀变,从而为粒间溶蚀孔的形成提供了条件,花岗闪长岩、花岗岩中的溶蚀孔沿黑云母颗粒边缘分布,呈串珠状(图6d),溶蚀孔可作为该区基岩有效储层。

### 2.2.2 裂缝

构造缝。柴达木盆地在燕山运动晚期的构造背景下,周源山系表现为向盆地方向的逆冲挤压特征,后经喜山运动Ⅰ期,柴西地区阿尔金断裂带的走滑作用,导致了盆地内的张裂,尖北斜坡经历多期次构造运动的强烈改造,发育张性裂缝<sup>[20]</sup>,构造缝密度约 $1.5 \sim 8$ 条/m,其缝宽多在 $0.18 \sim 0.22 \text{ mm}$ ,缝壁较平直,多被地层水溶液中部分化学元素沉淀生成的矿物所填充。通过研究发现,在碳酸盐孔隙水介质作用下,尖北斜坡早期构造裂缝多充填方解石,随着孔隙水中硫酸盐介质增多,硫酸盐发生化学沉淀生成硬石膏充填构造裂缝,故早期发育的构造缝多为充填-半充填缝(图3a,图6e),储集性能差。未充填缝为平均缝宽 $0.04 \text{ mm}$ 的构造微裂缝,其在剪切应力下形成,具有多期的特点,常切穿早期充填的硬石膏、有机质和石英等颗粒,与溶蚀缝交错呈网状(图6g),但其发育规模小、孔渗性较差,不能作为尖北地区基岩气藏的有效储层。

解理缝。该区解理缝组系分明,多为微裂缝,缝壁平直,最大缝宽 $0.05 \text{ mm}$ ,易沿长石解理面错动或位移形成裂缝,如尖北101井的长石矿物中,解理缝

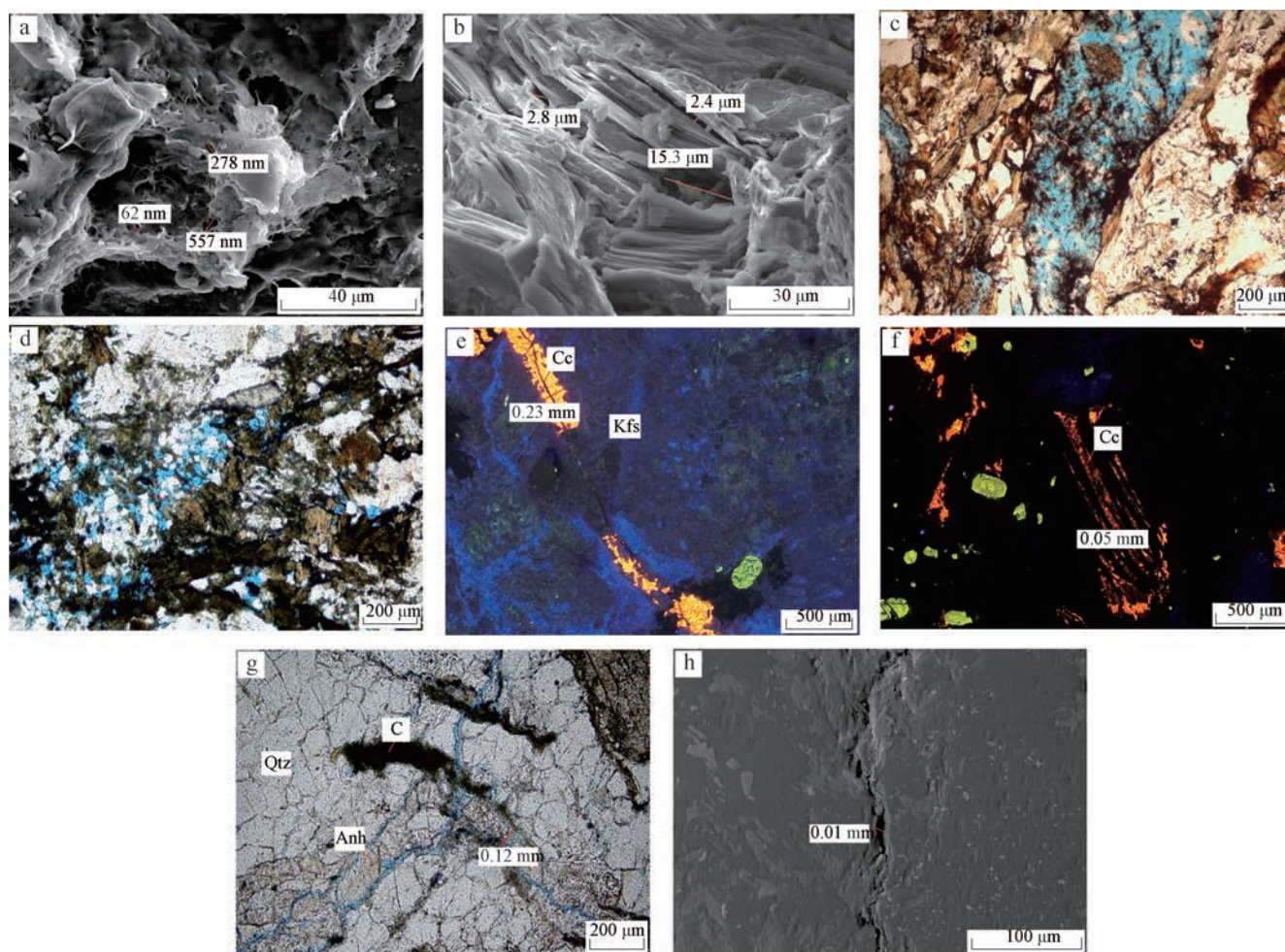


图6 柴达木盆地尖北斜坡基岩储层特征

Fig. 6 Characteristics of the basement reservoir in Jianbei slope, Qaidam Basin

a. 花岗闪长岩, 粘土矿物伊利石发育基质微孔, 尖探1井, 埋深4 645.9 m, 扫描电镜; b. 花岗闪长岩, 云母片间发育基质微孔, 尖探1井, 埋深4 945.87 m, 扫描电镜; c. 花岗闪长岩, 粒内溶蚀孔, 尖北101井, 4 751.68 m, 铸体薄片(—)X100; d. 花岗闪长岩, 粒间溶蚀孔, 尖探1井, 埋深4 645.44 m, 铸体薄片(—)X100; e. 花岗闪长岩, 构造缝, 尖探1井, 埋深4 645.87 m, 阴极发光; f. 花岗闪长岩, 云母内发育解理缝, 尖探1井, 埋深4 641.86 m, 阴极发光; g. 花岗闪长岩, 溶蚀缝, 尖探1井, 4 644.22 m, 铸体薄片(—)X100; h. 花岗闪长岩, 长石内溶蚀缝, 尖探1井, 埋深4 645.9 m, 扫描电镜

Qtz. 石英; Kfs. 钾长石; Anh. 硬石膏; Cc. 方解石; C. 有机质

交叉状切割长石晶体(图6c)。同时, 在尖探1井的云母矿物中可见解理缝成组平行发育, 解理缝相互不连通, 缝内局部被方解石充填(图6f), 孔渗性一般。

**溶蚀缝。**尖北斜坡溶蚀缝在 $N_2^3$ 不整合面形成过程中发育, 受风化淋滤作用影响, 不具有方向性, 呈溶蚀港湾状, 常发育在矿物晶粒边缘或切穿矿物晶体, 缝宽0.005~0.01 mm, 部分溶蚀缝与缝缘溶孔相连通(图6h), 但因分布规模小而不具备良好的储集性能。花岗闪长岩埋深较浅时, 在酸性介质流体作用下, 沿早期构造缝发生溶蚀, 同时生成硬石膏等胶结物充填溶蚀缝, 仅在胶结物边缘残余缝宽0.02 mm的溶蚀微裂缝(图6g)。随埋深增加, 碱性化学流体作用更为强烈,

早期构造缝发生溶蚀后, 充填方解石胶结物, 缝宽约0.23 mm(图6e)。

## 2.3 物性特征

尖探1井为尖北斜坡勘探的重点井位, 由该井的10块花岗闪长岩压汞分析显示, 最大压汞饱和度介于54.38%~82.33%, 退汞效率17.8%~30.0%, 整体孔喉半径分布不均, 为中—小型孔喉(表1)。根据铸体薄片观察以及核磁分析结果显示, 该区孔隙表现出双峰特征(图7), 发育两类特征不同的孔隙, 分别是基质微孔和溶蚀孔, 均具备良好的储集性能。

岩心孔渗分析显示尖北斜坡基岩储层物性中等, 样品孔隙度峰值达5.63%, 主要分布在2.23%~

3.77%,渗透率主要为 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 2.18 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,均值 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔渗显示出一定相关性(图8)。通过尖北斜坡基岩常规测井响应特征(图10),识别出基岩风化壳储层。纵向上,储集性能良好的孔喉主要集中在风化壳中部(半风化层)(图11),孔隙度为2.2%~5.3%,个别井段受裂缝以及所处风化层段的影响孔渗呈高值。

表1 柴达木盆地尖北斜坡花岗闪长岩储层孔隙结构  
Table 1 Pore structure of granodiorite reservoirs in  
Jianbei slope, Qaidam Basin

| 样品   |          | 孔隙度/<br>% | 渗透率/<br>$10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 最大连通<br>孔喉半径/<br>$\mu\text{m}$ | 最大进汞<br>饱和度/<br>% | 退汞<br>效率/<br>% |
|------|----------|-----------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------|
| 井名   | 深度/m     |           |                                 |                                |                   |                |
| 尖探1井 | 4 639.73 | 2.31      | 0.04                            | 3.868                          | 66.52             | 28.1           |
| 尖探1井 | 4 640.33 | 3.18      | 0.03                            | 0.758                          | 77.37             | 23.2           |
| 尖探1井 | 4 640.82 | 3.57      | 0.03                            | 0.468                          | 73.61             | 30.0           |
| 尖探1井 | 4 641.98 | 4.95      | 0.03                            | 0.714                          | 73.62             | 25.9           |
| 尖探1井 | 4 642.95 | 1.98      | 0.03                            | 1.267                          | 61.43             | 20.4           |
| 尖探1井 | 4 644.22 | 2.43      | 0.03                            | 1.289                          | 63.49             | 25.7           |
| 尖探1井 | 4 645.25 | 4.78      | 0.03                            | 0.799                          | 57.58             | 23.9           |
| 尖探1井 | 4 645.93 | 2.68      | 0.02                            | 1.148                          | 54.38             | 17.8           |
| 尖探1井 | 4 646.36 | 3.52      | 0.02                            | 3.341                          | 82.33             | 21.9           |
| 尖探1井 | 4 647.70 | 2.14      | 0.01                            | 4.083                          | 76.74             | 22.9           |

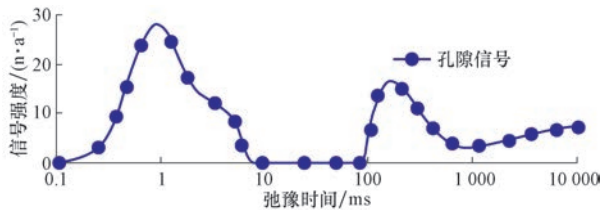


图7 孔渗核磁分析频谱图  
Fig.7 The spectrogram showing the analysis of  
porosity and permeability with NMR

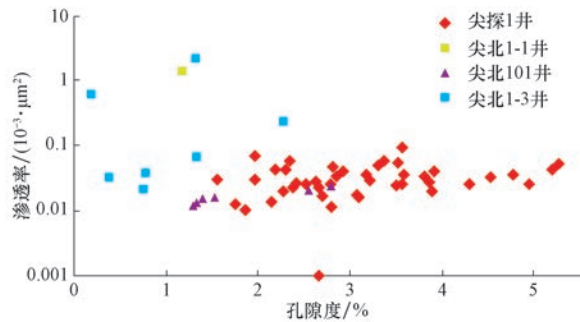


图8 柴达木盆地尖北斜坡基岩孔渗相关性  
Fig.8 Porosity and permeability correlation of  
basement in Jianbei slope, Qaidam Basin

表2 柴达木盆地尖北斜坡基岩储层评价  
Table 2 Assessment of the basement reservoir in  
Jianbei slope, Qaidam Basin

| 储层<br>类型 | 储集空间类型               | 岩心<br>孔隙度/<br>% | 岩心<br>渗透率/<br>$(10^{-3} \mu\text{m}^2)$ | 最大连通<br>孔喉半径/<br>$\mu\text{m}$ | 面孔<br>率/% |
|----------|----------------------|-----------------|-----------------------------------------|--------------------------------|-----------|
| I类       | 基质微孔为主,溶蚀孔、<br>构造缝次之 | >4              | >1                                      | 3~5                            | >10       |
| II类      | 溶蚀孔为主,溶蚀缝次之          | 2~4             | 0.03~1                                  | 1~3                            | 5~10      |
| III类     | 发育溶蚀缝、解理缝,少<br>量溶蚀微孔 | <2              | <0.03                                   | <1                             | <5        |

2.4 储层评价

前人对于基岩储层质量的评价研究多从储层孔喉特征、测井或岩心孔渗物性分析结果、含油性与储集空间类型等方面开展储层评价<sup>[10,30-32]</sup>。在有效储集空间类型分析的基础上,结合研究区基岩储层的岩心孔隙度、渗透率、孔喉结构及泥质含量,可将尖北斜坡基岩储层划分为三类(表2)。

受风化淋滤作用影响,尖北斜坡具有高产工业气流显示的基岩储层内发育大量次生成因的基质微孔隙,加上在成岩过程中形成的原生成因微孔,基质微孔面孔率高达15%,是尖北斜坡基岩气藏最重要的、也是对总孔隙体积贡献率最高的储集空间,主要发育在I类基岩储层中,其岩心孔隙度大于4%,渗透率大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔喉连通性好。II类储层以溶蚀孔为主,孔隙度介于2%~4%,具有较高的面孔率,虽发育少量溶蚀缝,但岩心渗透率并不高,可作为中等基岩储层。III类储层中很少发育基质微孔和溶蚀孔,主要以溶蚀缝和解理缝为主,孔渗性较差,面孔率低,最大连通孔喉半径小于1  $\mu\text{m}$ ,不具备良好的基岩储层储集条件。研究结果显示,尖北斜坡基岩储层多为II类中等储层,经试气可见工业气流显示,仅在部分井位和层段发育具有高产、稳定工业气流的I类优质基岩储层,以及气测显示弱的III类差储层。

3 天然气成藏有利地质条件

3.1 天然气源条件

近年来的勘探结果表明,大多数基岩油气藏具有“新生古储”的成藏特征<sup>[13]</sup>。研究区尖探1井 $R_o$ 值分布在2.5%~2.7%<sup>①</sup>,有机质成熟度较高,具有持续供

① 谢梅,朱军,王波,等. 阿尔金山前基岩气藏类型及勘探前景分析[R]. 甘肃:青海油田勘探开发研究院(内部报告),2018:1-87.

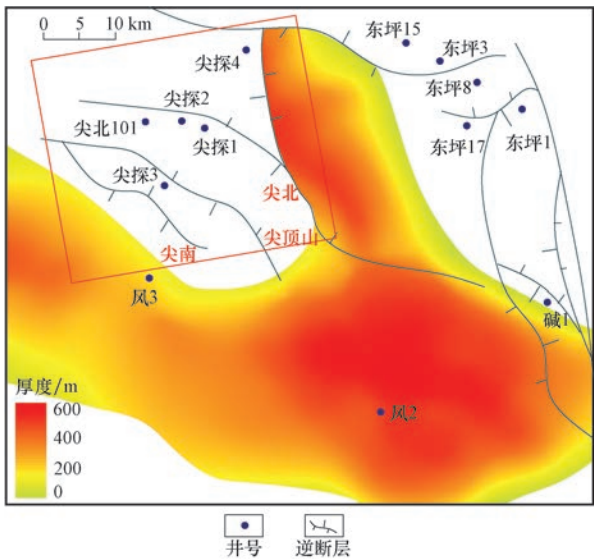


图9 柴达木盆地尖北-东坪地区侏罗系烃源岩厚度  
Fig. 9 Isopach map of the Jurassic source rocks in Jianbei-Dongping areas, Qaidam Basin

烃、多期次成藏的特征。 $\delta^{13}\text{C}_2$  值在  $-20.6\%$  左右,显示尖北斜坡天然气类型主要为煤型气,来源于侏罗系 II-III 型有机质。根据坪东以西侏罗系地层的展布范围 (图9),发现尖北、尖顶山断裂构造带有效沟通了坪西

生烃凹陷,为尖北斜坡天然气源的运移提供了条件。

3.2 良好的储盖组合

尖北斜坡的风化壳储层是基岩气藏成藏的主控条件。风化壳受古地貌影响,平面厚度分布不均,垂向上由风化淋滤强度的不同,可分为土壤层、半风化层和未风化层,其中的半风化层为有利储层发育带<sup>[25]</sup>。根据测井响应特征显示,土壤层的 AC 和 CNL 曲线向低值递变,GR、LLD 曲线变大,AC、DEN、GR 和电阻率曲线在土壤层和半风化层之间存在明显的突变台阶 (图 10)。半风化层溶蚀带中的 AC、CNL 曲线“尖峰”状跳跃,跳跃幅度小,曲线局部突起增大呈圆滑状和箱状,DEN、GR 和 SP 曲线逐渐增大,为低幅齿状。半风化层裂缝带的 GR 曲线基线值较高,局部具有低值的平台为裂缝集中发育处。在未风化层位,GR、电阻率曲线基线值明显变化,DEN 呈中幅突变,接近母岩的测井响应特征。

由岩心孔渗分析和测井识别结果显示,储集性能良好的层段位于基岩风化壳的半风化层 (图 11),尖探 1 井在 4 637~4 647 m 的半风化层井段经压裂试气,也发现了工业气流显示,因此半风化层可作为基岩风化壳储层的有利发育带。

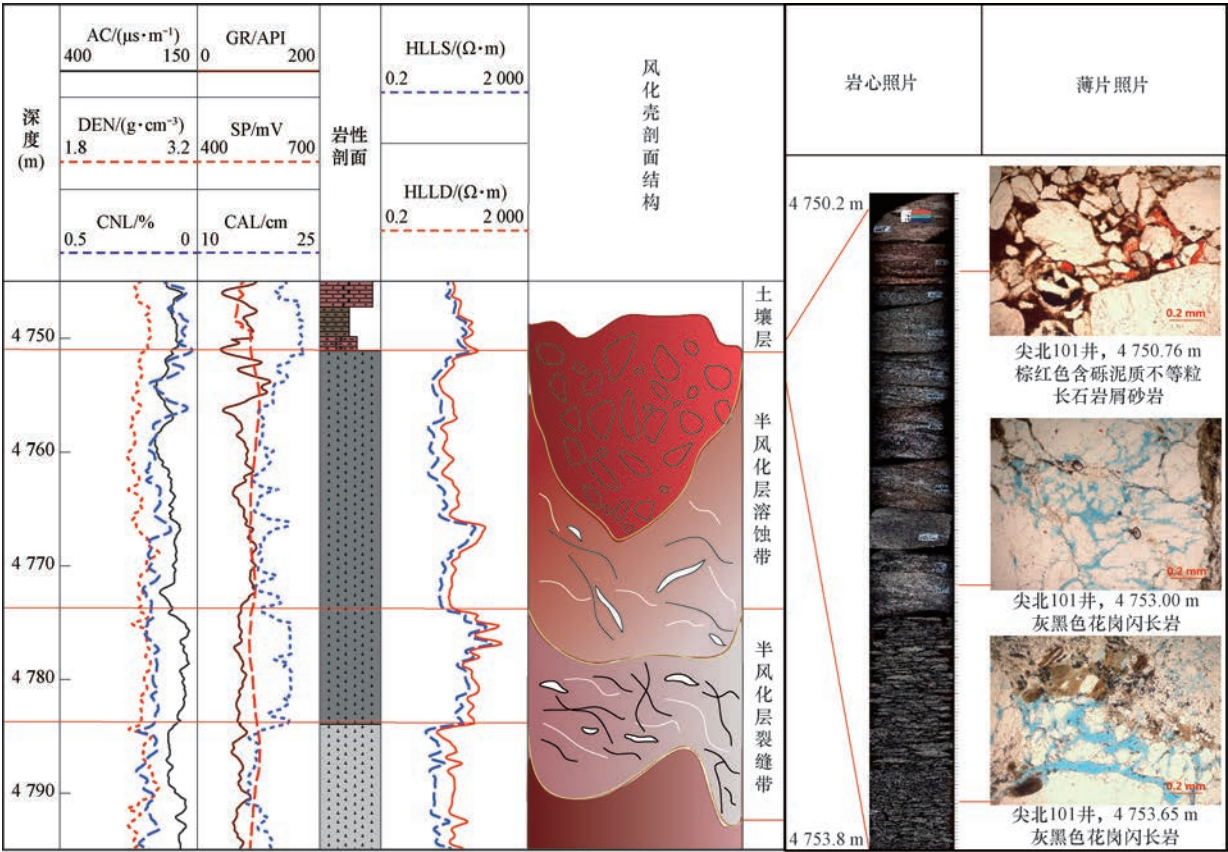


图 10 风化壳结构剖面划分  
Fig. 10 A diagram showing the profile hierarchy of the weathering crust

基岩上覆地层  $E_{1+2}$  底部发育有膏岩、含膏泥岩,成为尖北斜坡基岩油气藏的区域性盖层。同时,受古近纪咸湖环境影响,基岩顶部风化壳裂缝及基底孔隙被石膏充填,表现出局部盖层,分布在基岩顶下部 0 ~ 20 m。由该区膏泥岩测井响应特征显示(图 12),尖北膏泥岩平均厚度在 140 m 左右,尖探 1 井盖层厚度高达 219 m,为基岩油气的保存起到了良好的封闭作用。

### 3.3 优越的天然气输导体系

断裂和不整合是油气输导的主要途径,柴西地区在喜山运动早期受阿尔金断裂带的走滑作用,导致盆地内地块的张裂<sup>[26]</sup>,形成了北高南低的古斜坡背景。同时,尖北斜坡受到 SW - NE 向挤压作用,尖顶山、尖南和尖北断层开始活动,在喜马拉雅中晚期挤压反转阶段,早期断层继续活动,并发育浅层反冲断层,控制

了尖顶山、尖北构造带的形成,有效沟通坪东以西生烃凹陷,为侏罗系煤型气的运移提供了条件,尖北斜坡也成为油气运移的优势指向区。

该区地层在喜马拉雅运动末期遭受抬升、剥蚀,形成了区域性剥蚀面<sup>[25]</sup>,  $E_{1+2}$  膏泥岩作为该区基岩风化壳不整合面的上覆盖层,其下部常发育有风化残余的孔渗性高的岩石碎屑,经历多期风化剥蚀和淋滤作用,提高了基岩储层的连通性,改善了储集空间孔喉的发育程度,为油气运移和聚集创造了条件。

### 3.4 有效的圈闭类型

尖北斜坡总体表现为北高南低的构造背景,浅部为逆冲断层控制的大型断层传播褶皱,深部由中生界的箕状断陷构成<sup>[27-29]</sup>,自渐新世起经历了多期次断裂褶皱活动,受尖顶山、尖南及尖北断层的控制,发育尖顶山与尖北两排构造。通过三维地震叠前深度资料精细解释,尖顶山构造深层是受尖顶山和尖南断层的控制形成的断背斜构造,该构造深浅层有一定的继承性,浅层受滑脱断层的控制形成完整的背斜构造。尖北构造为主要受尖北断层控制形成的东西向背斜构造,构造上下继承性好,浅层背斜构造形态完整,为尖北斜坡的天然气富集提供了场所。尖顶山、尖北两个构造带发育有断背斜、断鼻、断块、背斜圈闭,圈闭内发育基岩风化壳储层,风化壳储层的半风化层可作为该区基岩气藏有效储层,主要为粘土矿物、铁镁质暗色矿物及碱性长石晶体发生次生蚀变过程中形成的基质微孔、溶蚀孔,储层发育段的基岩呈现 DEN、GR 低幅齿状增大的测井响应特征,结合地震资料解析,显示该区基岩天然气藏在有效圈闭中聚集成藏。

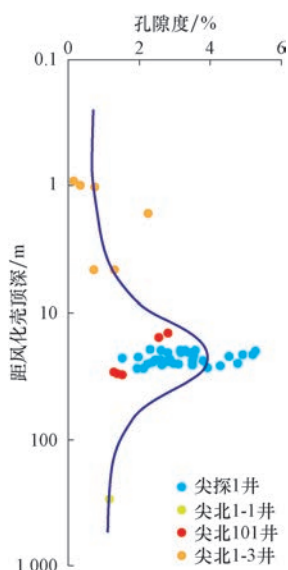


图 11 基岩储层孔隙度距风化壳顶距离关系

Fig. 11 Relationship between the porosity and the distance to the weathering crust top in basement reservoirs

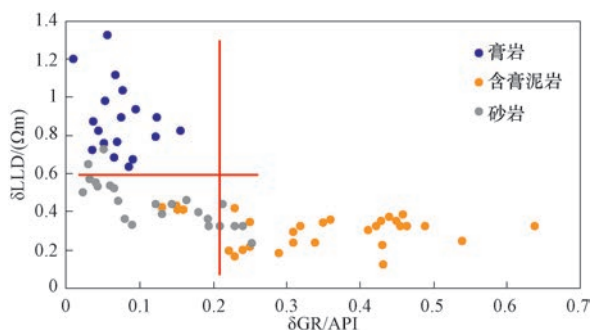


图 12 膏泥岩识别图版

Fig. 12 The chart for gypsiferous mudstone identification

## 4 基岩气藏类型

尖北斜坡基岩气藏成藏受侏罗系生烃凹陷和与烃源岩相连通的尖北等深大断裂控制,紧邻生烃凹陷的构造断裂附近天然气更为富集。多期次的构造活动和不整合面之上的风化淋滤作用控制基岩风化壳储层内基质微孔、溶蚀孔和构造缝等储集空间的发育。古近纪的膏泥岩盖层为基岩储层提供良好的封堵条件,有效控制了构造高点处天然气的富集。研究认为:该区基岩气藏类型为基岩顶部风化壳型气藏,天然气主要储集在盖层底面之下的构造高部位,在基岩风化壳储层内富集成藏,受风化淋滤作用控制明显,大的构造断裂有效沟通了深部生烃凹陷,为该区基岩气藏提供必要的成藏条件(图 13)。

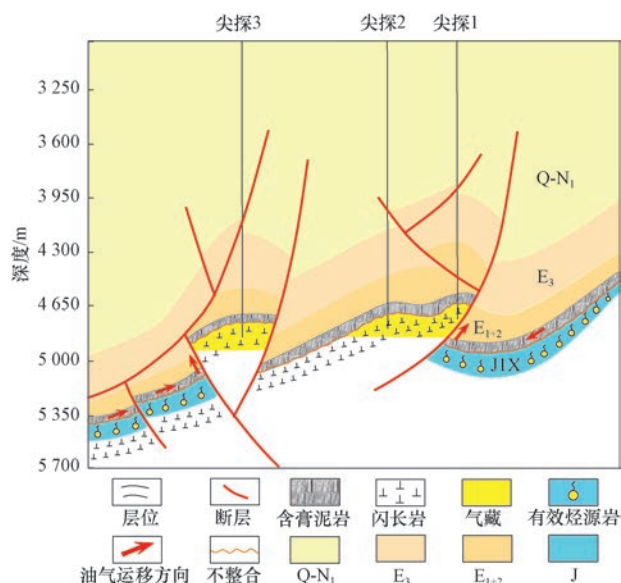


图13 柴达木盆地尖北斜坡基岩气藏成藏模式

Fig. 13 The gas accumulation model of the basement reservoirs in Jianbei slope, Qaidam Basin

## 5 结论

1) 柴达木盆地尖北斜坡基岩储层岩性主要为花岗闪长岩、花岗岩和片岩,于上新世到更新世发育基岩风化壳储层,其中半风化层孔隙物性最好,以Ⅱ类中等储层为主。储集空间为基质微孔、溶蚀孔和裂缝,基质微孔和溶蚀孔是该区天然气藏高产的主控因素。

2) 尖北斜坡临近坪东以西侏罗系生烃凹陷,基底经历长时间风化淋滤和多期次断裂构造运动,发育深大断裂,有效沟通了风化壳储层和生烃凹陷。受控于古近纪咸湖环境,膏泥岩有效封堵了基岩储层顶部,具备良好的储盖配套条件。

3) 天然气自生烃凹陷沿断裂和不整合发生运移,最终在更新世晚期形成的断背斜圈闭内富集成藏,形成了基岩顶部风化壳型气藏,受风化淋滤作用控制明显。

## 参考文献

- [1] 马龙,刘全新,张景廉,等.论基岩油气藏的勘探前景[J].天然气工业,2006,26(1):8-11.  
Ma Long, Liu Quanxin, Zhang Jinglian, et al. Discussion on exploration prospects of basement rock reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 8-11.
- [2] Amorus K J J, Landes K. Petroleum resources in basement rocks[J]. AAPG Bulletin, 1960, 44(10): 1682-1691.
- [3] Smith J E. Basement reservoir of La Paz-Mara Oil Fields, Western Venezuela; Geological Notes [J]. AAPG Bulletin, 1956, 40(2):

380-385.

- [4] Arechev E G, Dong T L, San N T, et al. Reservoirs in fractured basement on the continental shelf of southern Vietnam [J]. Journal of Petroleum Geology, 2010, 15(4): 451-464.
- [5] 田纳新,陈文学,霍红,等.利比亚锡尔特盆地油气地质特征及有利区带预测[J].石油与天然气地质,2008,29(04):485-490.  
Tian Naxin, Chen Wenxue, Huo Hong, et al. Petroleum geological characteristics and favorable hydrocarbon accumulation zone prediction in the Silt Basin, Libya [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(04): 485-490.
- [6] Walters R F. Oil production from Precambrian basement rocks in Central Kansas; Abstract [J]. AAPG Bulletin, 1950, 34(2): 300-312.
- [7] 景士宏,李炼文,敬晓峰,等.酒西盆地鸭儿峡油田志留系变质岩油藏的裂缝特征[J].河南科学,2015,33(10):1832-1837.  
Jing Shihong, Li Lianwen, Jing Xiaofeng, et al. Fracture characteristics of the Silurian metamorphic reservoirs in the Ya' erxia Oilfield, Jiuxi Basin [J]. Henan Sciences, 2015, 33(10): 1832-1837.
- [8] 宋柏荣,胡英杰,边少之,等.辽河拗陷兴隆台潜山结晶基岩油气储层特征[J].石油学报,2011,32(01):77-82.  
Song Borong, Hu Yingjie, Bian Shaozhi, et al. Characteristics of oil and gas reservoirs of crystalline basement rock in Xinglongtai buried hill, Liaohe depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(01): 77-82.
- [9] 施尚明,付红军,樊自立.海拉尔盆地苏德尔特油田布达特潜山油藏成藏规律[J].科学技术与工程,2011,11(14):3178-3181.  
Shi Shangming, Fu Hongjun, Fan Zili. Accumulation rules of Budate buried hill reservoir in Sudelt Oilfield, Hailaer Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(14): 3178-3181.
- [10] 田继先,李剑,曾旭,等.柴北缘深层天然气成藏条件及有利勘探方向[J].石油与天然气地质,2019,40(5):1095-1105.  
Tian Jixian, Li Jian, Zeng Xu, et al. Accumulation conditions and favorable plays for deep gas exploration at the northern margin of Qaidam Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 1095-1105.
- [11] 杨飞,徐守余.全球基岩油气藏分布及成藏规律[J].特种油气藏,2011,18(01):7-11.  
Yang Fei, Xu Shouyu. Global basement rock reservoir distribution and accumulation Rules [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011, 18(01): 7-11.
- [12] 吴振林.略论辽河西部凹陷油气藏类型及其分布规律[J].石油与天然气地质,1982,3(02):149-157.  
Wu Zhenlin. Brief discussion on the types and distribution of Oil and Gas Reservoirs in the West of Liaohe Depression [J]. Oil & Gas Geology, 1982, 3(02): 149-157.
- [13] 范泰雍,谢恭俭.我国基岩油藏的勘探现状和前景[J].石油与天然气地质,1985,6(01):113-116.  
Fan Taiyong, Xie Gongjian. Exploration status and prospects of basement rock reservoirs in China [J]. Oil & Gas Geology, 1985, 6(01): 113-116.
- [14] 张继伟,田海川,吕鹏估.渤海湾盆地潜山内幕油气藏研究进展与启示[J].中外能源,2014,19(08):35-39.  
Zhang Jiwei, Tian Haichuan, Lu Pengjie. Research progress and enlightenment of the inner reservoir of buried hills in Bohai Bay Basin [J]. Sino-Global Energy, 2014, 19(08): 35-39.

- [15] 陈磊,田景春,文怀军,等.柴达木盆地北缘鱼卡煤田侏罗系煤层气特征及含气性评价[J].石油实验地质,2019,41(2):215-221.
- Chen Lei,Tian Jingchun,Wen Huaijun,et al. Jurassic coal bed methane characteristics and gas-bearing property evaluation in Iqe Coalfield,northern Qaidam Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment,2019,41(2):215-221.
- [16] 孙秀建,杨巍,白亚东,等.柴达木盆地基岩油气藏特征与有利区带研究[J].特种油气藏,2018,25(6):49-54.
- Sun Xiujian,Yang Wei,Bai Yadong,et al. Bedrock Reservoir Characterization and Favorable Zones in Qaidam Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs,2018,25(6):49-54.
- [17] 赵栋,张霁阳.柴达木盆地英雄岭构造带构造特征及油气成藏研究进展[J].石油地质与工程,2017,31(3):5-9.
- Zhao Dong,Zhang Jiyang. Tectonic characteristics of Yingxiongling structural belt in Qaidam basin and research progress of hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Geology & Engineering,2017,31(3):5-9.
- [18] 张津宁.柴达木盆地西部生储盖岩系构造演化与油气成藏特征[D].陕西 西安:西北大学,2016.
- Zhang Jingning. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation characteristics of the reservoir-rock-bearing strata in the western Qaidam Basin[D]. Shanxi Xian:Northwest University,2016.
- [19] 王光华.柴达木盆地阿尔金山前带东段断裂特征及演化[D].四川 成都:西南石油大学,2015.
- Wang Guanghua. Fault characteristics and evolution of the eastern segment of the Altun Mountains in the Qaidam Basin[D]. Sichuan Chengdu:Southwest Petroleum University,2015.
- [20] 寇福德,陈园园,赵国忠,等.柴达木盆地东坪地区基岩气藏特征及模式构建[J].石油地质与工程,2017,31(2):6-8.
- Kou Fude,Chen Yuanyuan,Zhao Guozhong,et al. Characteristics and pattern construction of bedrock gas reservoir in Dongping area of Qaidam basin[J]. Petroleum Geology & Engineering,2017,31(2):6-8.
- [21] Howard J H,Nolen-Hoeksema R C. Description of natural fracture systems for quantitative use in petroleum geology[J]. AAPG Bulletin,1990,74(2):151-162.
- [22] 于冬冬,张永生,侯献华,等.柴西南翼山构造形成演化及其对油气成藏的控制[J].断块油气田,2017,24(06):740-744.
- Yu Dongdong,Zhang Yongsheng,Hou Xianhua,et al. Formation and evolution of the southwestern wing of Chaixi and its control over hydrocarbon accumulation[J]. Fault-Block Oil and Gas Field,2017,24(06):740-744.
- [23] 覃小锋,杨文,许华,等.阿尔金构造带西段早古生代侵入岩地球化学特征及构造意义[J].新疆地质,2015,33(02):167-176.
- Tan Xiaofeng,Yang Wen,Xu Hua,et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of the Early Paleozoic intrusive rocks in the western segment of the Altun tectonic belt[J]. Xinjiang Geology,2015,33(02):167-176.
- [24] 吴丽荣,黄成刚,袁剑英,等.咸化湖盆高效基岩气藏储层中基质孔隙的发现及意义[J].地球科学与环境学报,2015,37(04):54-62.
- Wu Lirong,Huang Chenggang,Yuan Jianying,et al. Discovery and significance of matrix pores in reservoirs of high-efficiency basement rock gas reservoirs in the Xianhua Lake Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2015,37(04):54-62.
- [25] 陈新领.柴达木盆地柴西地区喜马拉雅运动与油气成藏研究[D].四川 成都:西南石油大学,2004.
- Chen Xinlin. Himalayan movement and hydrocarbon accumulation in the Chaishi area of the Qaidam Basin[D]. Sichuan Chengdu:Southwest Petroleum University,2004.
- [26] 邹才能,侯连华,陶士振,等.新疆北部石炭系大型火山岩风化体结构与地层油气成藏机制[J].中国科学:地球科学,2011,41(11):1613-1626.
- Zou Caineng,Hou Lianhua,Tao Shizhen,et al. Weathering structure and hydrocarbon accumulation mechanism of large-scale volcanic rocks in the Carboniferous in northern Xinjiang[J]. Scientia sinica terrae,2011,41(11):1613-1626.
- [27] 刘志宏,王芃,刘永江,等.柴达木盆地南翼山—尖顶山地区构造特征及变形时间的确定[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(05):796-802.
- Liu Zhihong,Wang Peng,Liu Yongjiang,et al. Structural characteristics and deformation time of the South Wingshan-Jiandingshan area in the Qaidam Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),2009,39(05):796-802.
- [28] 毛黎光,肖安成,王亮,等.柴达木盆地西北缘始新世晚期古隆起与阿尔金断裂的形成[J].岩石学报,2013,29(08):2876-2882.
- Mao Liguang,Xiao Ancheng,Wangliang,et al. Late Eocene paleo-uplift and formation of the Altun fault in the northwestern margin of the Qaidam Basin[J]. Acta Petrologica Sinica,2013,29(08):2876-2882.
- [29] Zeqing G,Yinsheng M,Weihong L,et al. Main factors controlling the formation of basement hydrocarbon reservoirs in the Qaidam Basin, western China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2017,149(3):244-255.
- [30] Topal T. Quantification of weathering depths in slightly weathered tuffs[J]. Environmental Geology,2002,42(6):632-641.
- [31] 宋柏荣,胡英杰,边少之,等.辽河坳陷兴隆台潜山结晶基岩油气储层特征[J].石油学报,2011,32(01):77-82.
- Song Borong,Hu Yingjie,Bian Shaozhi,et al. Characteristics of oil and gas reservoirs of crystalline basement rock in Xinglongtai buried hill,Liaohe depression[J]. Acta Petrologica Sinica,2011,32(01):77-82.
- [32] 唐华凤,孔坦,刘祥,等.松辽盆地白垩统沉火山碎屑岩优质储层特征和形成机理[J].石油学报,2016,37(05):631-643.
- Tang Huafeng,Kong Tan,Liu Xiang,et al. Characteristics and formation mechanisms of high quality reservoir of volcanoclastic sedimentary rocks of Early Cretaceous in Songliao Basin[J]. Acta Petrologica Sinica,2016,37(05):631-643.