

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.008>



阿尔金山前带东段基岩储层主要特征及评价

李欣^{1,2}, 谢庆宾^{1,2*}, 牛花朋^{1,2}, 张永庶³, 李俊巍^{1,2},
吴志雄³, 李传龙^{1,2}, 席斌^{1,2}, 王波³, 袁翰林^{1,2}

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249
2. 中国石油大学地球科学学院, 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: 为了解阿尔金山前带东段基岩储层主要特征, 对储层进行评价. 在野外露头踏勘、岩心观察描述、薄片鉴定及相关分析测试的基础上, 结合普通测井资料、成像测井资料及孔渗密实验数据等进行分析. 结果表明, 阿尔金山前带东段基岩储层岩性主要是岩浆岩和变质岩, 岩浆岩以花岗岩为主, 变质岩以片麻岩为主. 储集空间类型主要包括未完全充填裂缝、溶蚀孔洞和基质微孔 3 类. 基岩储层孔隙度介于 0.004%~9.760%, 平均孔隙度在 1.663%~3.844%; 渗透率介于最大值 0.002~33.239 mD, 平均渗透率在 0.020~3.836 mD, 片麻岩类物性整体好于花岗岩类, 孔隙度和渗透率之间没有明显的相关性. 基岩储层主控因素包括岩性及矿物组合、古地貌、先存断裂及破碎带、后期岩浆侵入及热液作用 4 个方面. 结合基岩储层的物性特征及形成的主控因素, 建立了多因素控制的基岩储层评价标准, 将储层分为好、中等、较差、差 4 类. 评价结果表明, 研究区多以 II 类储层为主, 主要见于花岗岩片麻岩, 其次是花岗岩、黑云母斜长片麻岩等. 东坪鼻隆、牛中-牛北斜坡可见 I 类储层; 尖北斜坡、牛东鼻隆、冷北斜坡多为 II 类储层.

关键词: 基岩储层; 储集空间; 主控因素; 储层评价; 阿尔金山前带东段; 油气地质.

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2020)02-617-17

收稿日期: 2019-01-26

Main Characteristics and Evaluation of Bedrock Reservoirs in the Eastern Segment of Altun Piedmont

Li Xin^{1,2}, Xie Qingbin^{1,2*}, Niu Huapeng^{1,2}, Zhang Yongshu³, Li Junwei^{1,2},
Wu Zhixiong³, Li Chuanlong^{1,2}, Xi Bin^{1,2}, Wang Bo³, Yuan Hanlin^{1,2}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Exploration and Development Institute of Qinghai Oilfield Company, Petro-China, Dunhuang, Gansu 736202, China

Abstract: Based on the field outcrop survey, core observation, section identification, scanning electron microscopy and cathodoluminescence method, combined with conventional logging, image logging, pore infiltration test data, etc., main characteristics and evaluation of bedrock reservoirs in the eastern segment of the Altun Piedmont were studied. The results show that the lithology of the bedrock reservoirs in the eastern segment of Altun Piedmont mainly includes magmatic rocks and metamorphic rocks. The magmatic rocks are mainly granite, and the metamorphic rocks are mainly gneiss and schist. The types of

基金项目: 国家自然科学基金项目“辉绿岩热液作用对围岩储层的影响机理研究”(No. 41272162); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“柴达木盆地建设高原大油气田勘探开发关键技术研究与应用”(No. 2016E-0102).

作者简介: 李欣(1992—), 女, 硕士, 主要从事油气地质储层研究工作. ORCID: 0000-0003-3467-0080. E-mail: lixin15619940816@163.com

* **通讯作者:** 谢庆宾, ORCID: 0000-0002-4299-1215. E-mail: xieqingbin@cup.edu.cn

引用格式: 李欣, 谢庆宾, 牛花朋, 等, 2020. 阿尔金山前带东段基岩储层主要特征及评价. 地球科学, 45(2): 617-633.

reservoir space mainly include incompletely filled fractures, dissolved pores and matrix micropores. The maximum porosity of bedrock reservoir is 9.76%, the minimum is 0.004%, and the average is 1.663%~3.844%. The maximum permeability of bedrock reservoir is 33.239 mD, the minimum is 0.002 mD, and the average permeability is 0.020~3.836 mD. There is no obvious correlation between porosity and permeability. The main controlling factors of bedrock reservoirs include lithology and mineral combination, paleogeomorphology, pre-existing faults and fracture zones, late magmatic intrusion and hydrothermal action. Combined with the physical properties and the main controlling factors of the bedrock reservoir, the evaluation criteria of bedrock reservoir controlled by many factors are put forward. The reservoir is divided into four categories: good, average, fair, and poor. The results of evaluation show that the study area is mainly composed of type II reservoirs, mainly found in granitic gneiss, followed by granite, plagioclase gneiss, feldspar hornblende schist, etc. The Dongping nasal and Niuzhong-Niubei slopes are mostly type I reservoirs, the Jianbei slope, Niudong nasal and Lengbei slope are mostly type II reservoirs.

Key words: bedrock reservoir; reservoir space; main controlling; reservoir evaluation; eastern segment of Altun Piedmont; oil-gas geology.

0 引言

目前,常规沉积岩储层已进入高勘探阶段,勘探难度大,勘探成效低,作为非沉积储层形成的大型油气藏,基岩中的油气勘探成为非常规油气勘探的又一个重要领域(维谢洛夫和米哈伊洛夫,1995;马龙等,2006;杨飞和徐守余,2011).自20世纪初美国俄亥俄州发现基岩油气藏以来,世界各地陆续有了发现(Nelson,2000;Sircar,2004;Coung,2009).我国于20世纪70年代加大了对基岩油气藏的勘探开发力度,打开了基岩油气藏研究的序幕,经过近50年的研究,取得了显著的勘探成果,对我国油气储量的增长起到了重要的作用(谢恭俭,1981;程立华等,2018).

国内外学者对基岩有多种定义(Walters,1953;North,1990;陈文玲和周文,2012),本文将基岩描述为:以盆地的发育时期为界限,将与盆地发育时期同期沉积形成的地层作为“沉积盖层”,将盆地形成之前基底中的岩层作为基岩.基岩油气藏的发现开拓了一个寻找高含油层系的新领域,随着国内外基岩油气藏勘探热度的增加以及大型基岩油气藏的陆续投产,对基岩储层主要特征的研究和评价成为必然.阿尔金山前带东段地处柴达木盆地西北部,西至月牙山斜坡,东至冷湖斜坡,勘探面积约5 000 km²,是近年来柴达木盆地油气勘探中取得重大发现的区带之一(付锁堂等,2015).研究区整体呈北东东—南西西向延伸,形成了“三斜坡夹两鼻隆”的构造格局,自西向东依次是尖北斜坡、东坪鼻隆、牛北—牛中斜坡、牛东鼻隆、冷北斜坡(图1)(付锁堂等,2015).前人对阿尔金山前带东段基岩储层的研究主要集中在东坪地区,对储集空间类型的研究主

要以裂缝为主、溶蚀孔洞次之,对基质微孔的研究很少,储集空间性能以定性描述

为主(马峰等,2015;寇福德等,2017;李翔等,2018).目前存在的问题主要有阿尔金山前带东段基岩岩性复杂,时空分布不明,侵入、变质模式不清;基岩储集空间类型、物性特征及不同类型储集空间对基岩储层的重要程度不明;对基岩储层评价尚未提出适用范围广、认可度高的评价标准.基于野外露头踏勘、岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜与能谱分析等,结合普通测井资料、成像测井资料及氦孔隙度—空气渗透率实验数据、压汞实验数据等,对基岩储层储集空间类型及特征、物性特征、主控因素等进行了全面分析,在此基础上建立了适合研究区基岩储层的评价标准,以期为阿尔金山前带东段基岩储层特征研究提供理论依据.

1 阿尔金山前带东段基岩储层主要岩石类型及分布

阿尔金山前带东段基底岩性组成复杂,早元古代基岩岩性以片麻岩、片岩、板岩为主,由盆地内部向山前带变质程度逐渐加深.从新元古代开始发生多期岩浆侵入,对典型井取样进行U-Pb测年实验,结合研究区构造运动可知,新元古代带早期(约837 Ma)弧后碰撞—弧前消减作用及晋宁运动使得牛4井附近首先发生岩浆侵入.约在400 Ma时,受古生代奥陶纪晚期加里东运动的影响,东坪1井附近发生花岗岩侵入(约406.9±4.4 Ma)、尖探1井附近发生闪长岩侵入(约444±2 Ma).约220 Ma时,受海西期后造山挤压—伸展转换作用的影响,牛3井附近在中三叠世(约229.4±3.2 Ma)发生花岗岩岩浆

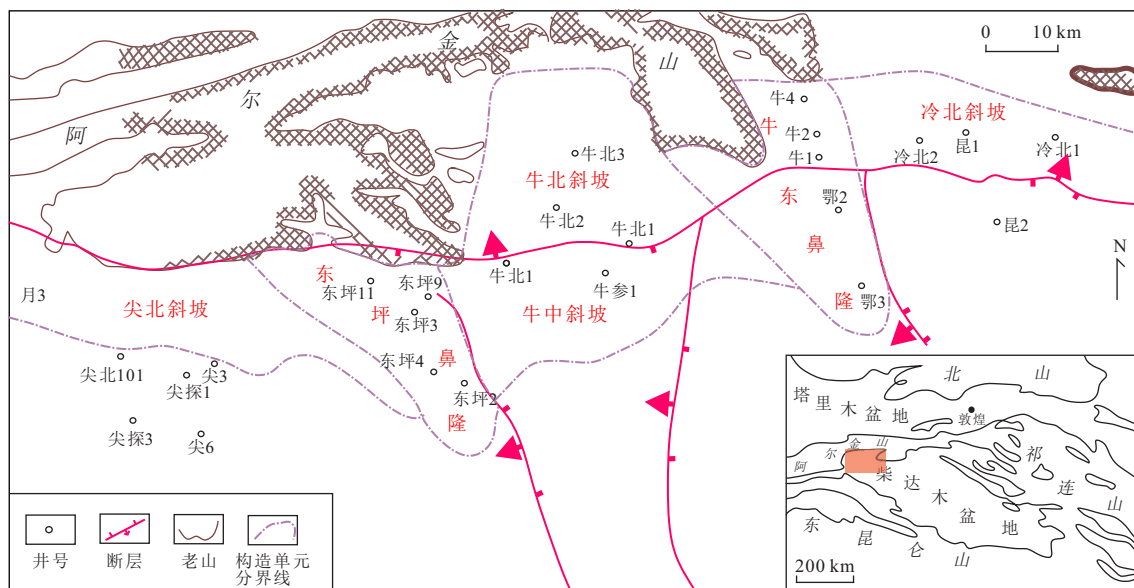


图1 阿尔金山前带东段构造纲要图(据付锁堂,2015,有修改)

Fig.1 Tectonic outline of eastern segment of Altun Piedmont

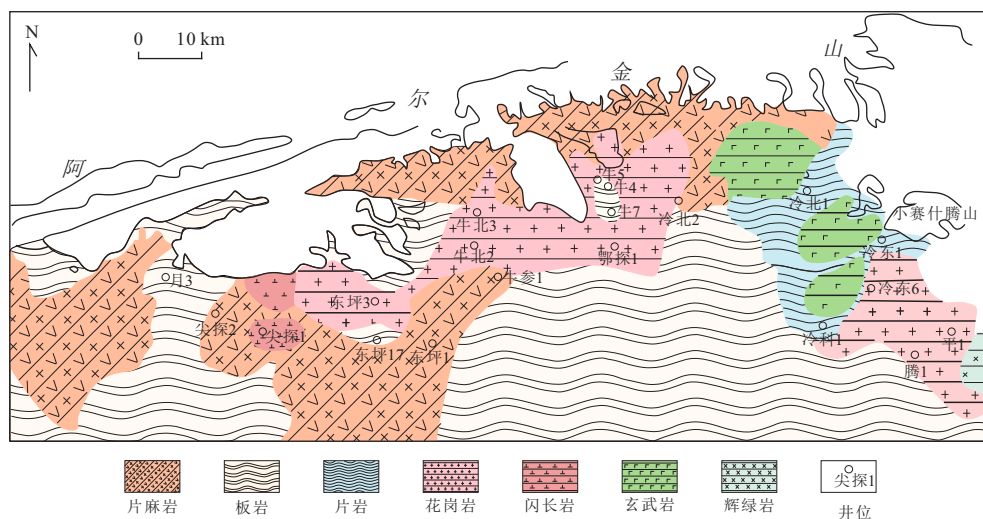


图2 阿尔金山前带东段现今基岩岩性分布图

Fig.2 The current distribution diagram of the bedrock lithology in the eastern segment of the Altun Piedmont

侵入;牛北1井附近在晚二叠世(约 253 ± 3 Ma到 276 ± 3 Ma)发生花岗岩岩浆侵入.综上,通过U-Pb测年可知,阿尔金山前带东段主要发生了3期岩浆侵入,综合利用野外露头、钻井岩心、岩电关系、薄片鉴定等资料确定了该区现今的基岩岩性平面分布模式(图2),储集岩类主要有花岗岩类和片麻岩类两大类.

从图2可见基岩岩性宏观分布,结合薄片观察可知,花岗岩主要分布在东坪3井区、牛中斜坡、牛东鼻隆,镜下主要由斜长石(36%)、钾长石(33%)、石英(19%)、黑云母(8%)、少量角闪石(3%)和方

解石(1%)组成,花岗结构明显,部分发生轻微蚀变.片麻岩类主要分布在尖北斜坡、牛北斜坡、牛东鼻隆北部和冷北斜坡西北部,镜下除石英长石含量较多外,花岗片麻岩中角闪石(3.5%)、黑云母(3.5%)、绿泥石(3.5%)含量较多;黑云母斜长片麻岩中黑云母(22.45%)和角闪石(5.78%)含量较多;钙质片麻岩中方解石(16.11%)和石膏(5.56%)含量较多.片岩主要分布在冷北斜坡,以云母石英片岩为主,片状构造发育,石英含量65%,云母含量33%,含有极少量的长石和方解石.闪长岩、花岗闪长岩主要分布在尖北斜坡,以钾长石(35%)、斜长

表 1 阿尔金山前带东段裂缝成因分类表

Table 1 Classification of fracture of the eastern segment of the Altun Piedmont on Genesis

裂缝类型	成因	特征
构造缝	受应力作用形成的剪切和拉张缝	组系分明、缝壁平直、切割力较强、延伸较远
解理缝	由于长石类晶体的解理发育,基岩表面经受构造应力或风化时沿解理面形成裂缝	呈现沿一定方向平行排列的细缝
溶蚀缝	构造缝和解理缝形成后暴露于地表遭受淡水淋滤,基岩中相对不稳定的矿物成分晶体结构发生改变,形成溶蚀缝	呈串珠状、蛇曲状,缝壁凹凸不平;构造溶蚀缝延伸方向一致,延伸较远;解理溶蚀缝无方向性,延伸较短

表 2 阿尔金山前带东段裂缝物性统计表(据李建明,2011)

Table 2 Statistics of fracture physical properties of the eastern segment of the Altun Piedmont on Genesis

井名	裂缝密度(1/m)	裂缝长度(1/m)	裂缝宽度(μm)	裂缝孔隙度(%)	
东坪3井区	东坪3井	17.80	18.90	16.8	0.078
	东坪6井	15.60	18.20	26.5	0.139
	东坪9井	6.78	8.15	49.5	0.198
	东坪11井	5.46	3.85	47.5	0.223
	东坪306井	18.20	14.85	18.7	0.312
	东坪H301井	16.56	18.40	14.4	0.603
东坪1井区	东坪4井	19.70	14.10	20.7	0.138
	东坪103井	9.14	7.10	45.6	0.412
	坪1-2-3	6.54	5.83	41.7	0.140

石(25%)、石英(20%)和黑云母(10%)为主,含少量方解石(5%)和角闪石(5%),花岗结构,长石高岭土化和绢云母化明显.在断层带附近岩石多因动力变质作用发生破碎形成碎裂岩.

2 阿尔金山前带东段基岩储层储集空间特征和物性分析

2.1 基岩储层储集空间主要特征

研究区基岩自太古界经历了漫长的地质演化,风化壳对储层的形成具有重要的作用,依据岩心观察及风化壳不同纵向结构层在常规测井和成像测井中的典型特征(邹才能等,2011;黄建红等,2016;伍劲等,2017),对研究区 25 口井进行了风化壳纵向结构划分,观察发现风化壳不同纵向结构带的储集空间类型及发育程度不同.从野外露头、岩心观察及测井资料可知,古土壤层基本无有效储集空间,大部分被剥蚀殆尽;完全风化层储集空间类型以孔隙为自主,物性较差;半风化层对基岩储层贡献最大,半风化层溶蚀带以孔隙型、裂缝—孔隙型为主,半风化层崩解带以裂缝型、孔隙—裂缝型为主,为基岩提供了大量有效的储集空间及渗流通道;未风化层仅少量微裂缝,不足以成为有效的储集空间;基质微孔在四个带中普遍发育.因此,将阿尔金山

前带东段基岩储集空间类型划分为未完全充填裂缝、溶蚀孔洞和基质微孔.

2.1.1 未完全充填裂缝 通过对阿尔金山前带东段的野外地质调查、岩心观察、薄片坚定,结合裂缝在常规测井和成像测井资料中的特征,按照裂缝成因将其细分为构造缝、解理缝、溶蚀缝(表 1).构造缝多为剪切缝,组系分明、缝壁平直、切割力较强、延伸较远.解理缝多见于基岩表面,由构造作用或风化作用沿晶体解理面形成,呈现沿一定方向平行排列的细缝.溶蚀缝是易溶矿物在风化淋滤作用下沿裂缝发生溶蚀形成,呈串珠状、蛇曲状,缝壁凹凸不平;构造溶蚀缝延伸方向一致,延伸较远;解理溶蚀缝无方向性,延伸较短.该区 3 类裂缝均很发育,主要以中—高角度裂缝和近水平缝为主.岩心宏观描述可见宽缝多在 0.5~1.5 cm,还发育很多细小的微裂缝;镜下宽缝约 0.5~1.2 mm,窄缝约 0.02~0.05 mm,有的破碎严重,无法统计(图 3).受多期构造作用的影响,多为交叉缝和网状缝.在花岗岩等较为致密的地层中构造成因的高导缝发育,沿裂缝溶蚀作用程度较弱,整体以高导缝、低角度缝为主,网状缝次之(图 4);在变质岩地层中也普遍发育构造成因的高导缝,因溶蚀程度强,裂缝宽度较花岗岩大,整体以网状缝为主,其次是中—高角度裂缝(图 5).

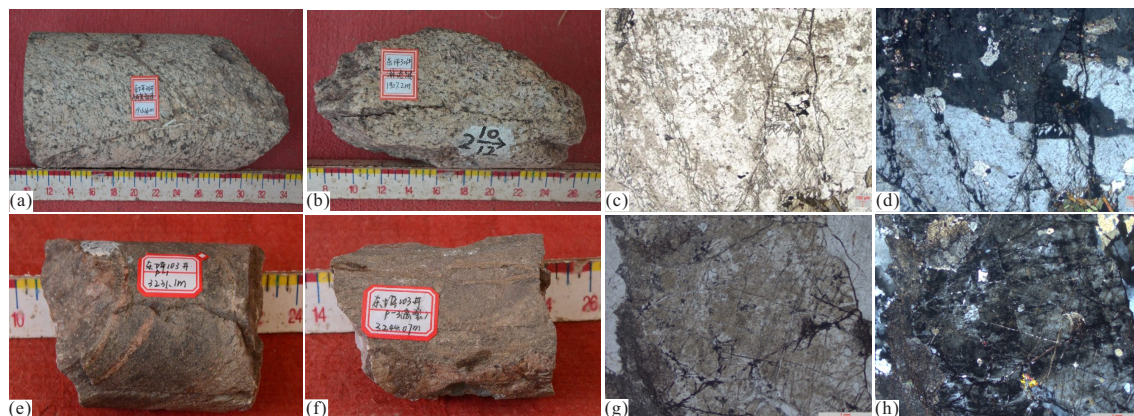


图3 阿尔金山前带东段基岩裂缝发育特征

Fig.3 Characteristics of bedrock fractures in the eastern segment of the Altun Piedmont

a. 东坪306井, 1 916.46 m, 花岗岩, 高角度斜交缝(70°)和近水平缝, 宽约0.2 cm, 延伸较好; 网状缝发育较少; b. 东坪306井, 1 907.20 m, 花岗岩, 沿构造缝发生风化淋滤形成的高角度淋滤缝, 宽约0.5 cm; c. 东坪306井, 1 908.85 m, (—)2.5×10, 花岗岩, 裂缝和微裂缝发育, 宽0.05~0.10 mm, 未被充填; d. 东坪306井, 1 908.85 m, (+)2.5×10, 花岗岩, 裂缝和微裂缝发育, 宽0.05~0.10 mm, 未被充填; e. 东坪103井, 3 231.10 m, 片麻岩, 发育高角度构造缝, 宽约1 cm, 沿裂缝发生风化淋滤; f. 东坪103井, 3 244.07 m, 片麻岩, 发育高角度裂缝及网状缝, 宽度介于0.05~0.50 cm; g. 坪1-2-3, 3 411.33 m, (—)2.5×10, 花岗片麻岩, 发育两组近于正交的解理缝, 宽0.2~0.4 mm, 微裂缝发育; h. 坪1-2-3, 3 411.33 m, (+)2.5×10, 花岗片麻岩, 发育两组近于正交的解理缝, 宽0.2~0.4 mm, 微裂缝发育

整体而言, 研究区裂缝发育, 延伸远, 连通性好, 花岗岩裂缝的密度、长度、宽度、孔隙度都较片麻岩更大(表2)。研究区多为中—高角度裂缝, 倾角大于60°, 此类裂缝规模大, 纵横向延伸远、连通程度较好, 以网络状交叉出现, 大大提升了对上覆地层的承载能力, 在上覆载荷作用下不易闭合, 不仅为基岩提供了有效的储集空间, 也可以很大程度的改善储集层的储集性能。选择资料较全、不需要加权系数的深浅侧向参数 $|R_s/R_d-1|$ 对裂缝进行识别(张孝富等, 2011)。 $|R_s/R_d-1|$ 的值越接近于0时裂缝发育概率越低, 越接近于1裂缝发育概率越高。通过计算研究区 $|R_s/R_d-1|$ 值多在0.3~0.8, 裂缝发育, 非均质性很强, 变质岩裂缝发育程度较岩浆岩均衡, 岩浆岩中多见局部裂缝发育段, $|R_s/R_d-1|$ 值达到0.9, 局部段岩层致密, $|R_s/R_d-1|$ 接近于0, 差异较大(表3)。

2.1.2 溶蚀孔洞 溶蚀孔洞是研究区另一类重要的储集空间, 其成因主要有两种, 一是裂缝性溶蚀溶洞, 主要指在风化壳或构造活跃部位沿早期张开缝或解理缝两侧发生溶蚀, 形成串珠状、拉长状的溶蚀孔洞, 其产状与裂缝产状基本一致。二是孔隙性溶蚀孔洞, 包括后期成岩过程中不稳定暗色矿物在高温高压下发生溶蚀产生的溶蚀孔洞及岩石易溶组分被烃类演化时释放的有机酸溶蚀而形成的溶蚀孔洞, 主要呈针状、片状发育。薄片观察显示研究

区两种类型的溶蚀孔洞均有发育, 但变质岩中的发育程度明显好于花岗岩, 如东坪H301井花岗岩中的裂缝较平直, 稍有溶蚀加大, 暗色矿物溶解形成的溶蚀孔洞数量少, 可容空间小(图6a~6d), 新产生的可作为有效储集空间的溶蚀孔洞较少; 东坪105井黑云母斜长片麻岩由于黑云母、角闪石等易溶矿物含量较多, 裂缝性溶蚀孔洞和孔隙性溶蚀孔洞都较发育, 且溶蚀孔洞半径大, 连通性好(图6e~6f)。

就研究区而言, 花岗岩中裂缝性溶蚀孔洞较孔隙性溶蚀孔洞发育程度好, 变质岩中两者发育程度均较好。整体而言, 变质岩溶蚀孔洞较花岗岩类发育规模大, 可容空间大, 连通性好。溶蚀孔洞的发育加大了储集空间, 提高了储层渗流能力, 有利于油气富集甜点区的发育, 是油田稳产的主要因素。

2.1.3 基质微孔 基岩基质微孔指用压汞实验和岩石氦气法测量岩石储集空间体积时, 液态汞无法进入而氦气可以进入的孔隙空间, 大小一般为几十到几百纳米。扫描电镜/能谱分析作为微区分析的主要手段之一, 具有放大倍数大、分辨率高、景深大、图像立体感强等优点(刘伟新, 2001; 刘伟新, 2006)。近年来, 借助扫描电镜在储层研究中的优势, 前人对基岩储集空间基质微孔的研究力度不断加大, 认为除裂缝和溶蚀孔洞外, 基质微孔也是基岩储层的重要储集空间类型之一(陈文玲和周文, 2012; 马峰等, 2015)。通过扫描电镜观察, 发现研究区基质微孔

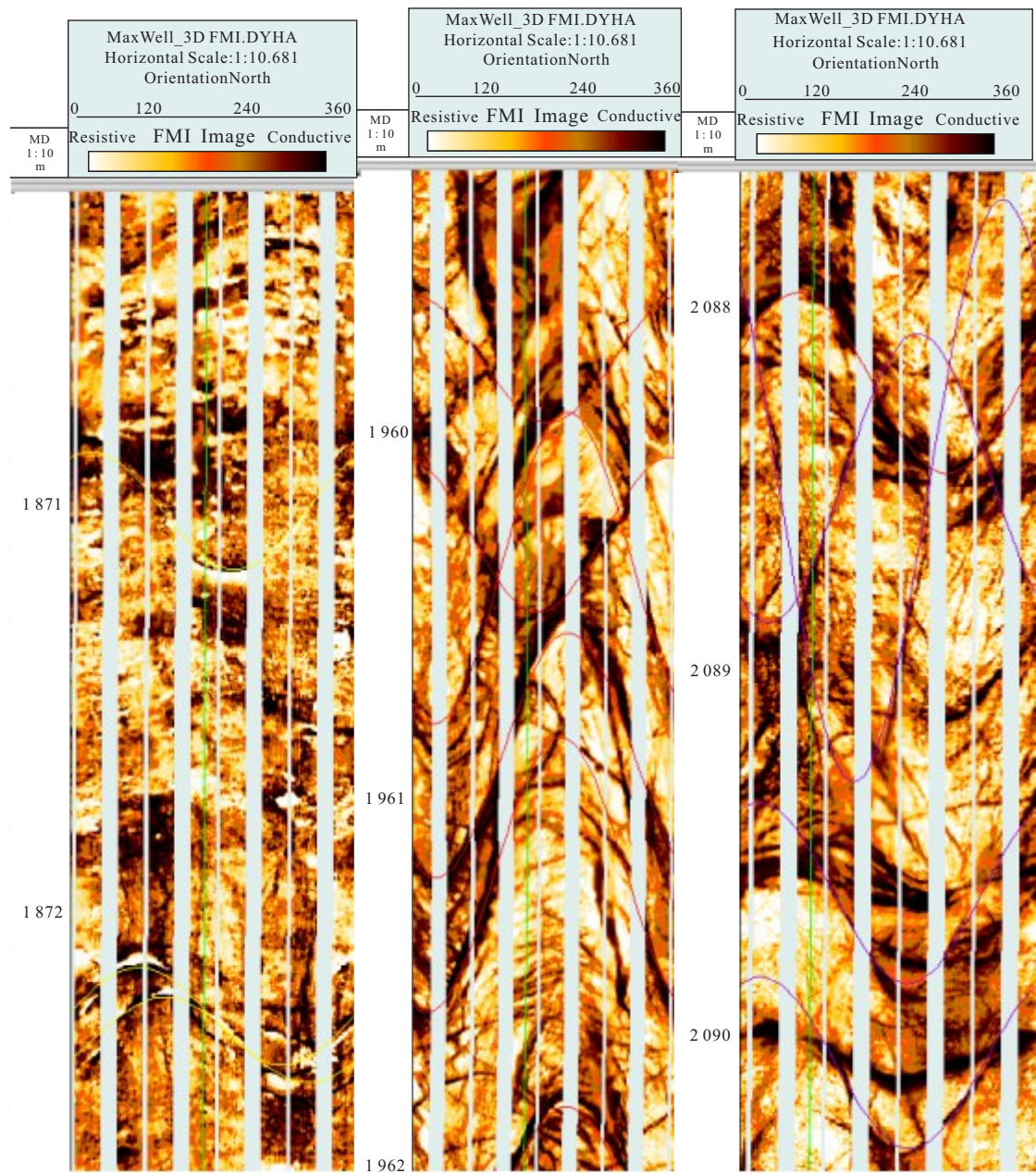


图4 东坪3井区东坪306井基岩段成像测井特征

Fig.4 FMI imaging logging features from well DP306 in Dongping 3Block

广泛发育.结合能谱分析按成因将基质微孔分为3类,花岗岩铁镁矿物中的基质微孔、变质岩云母片晶间孔及其他易溶矿物产生的大小在几十到几百纳米的孔洞.如尖探1井4 645.9 m处可见铁镁质矿物中的基质微孔,宽度约200~300 nm(图7a,7b);东坪7井2 170.6 m云母石英片岩中可见云母片晶间孔,宽多在2~5 μm (图7c,7d);东坪105井3 454.3 m黑云母斜长片麻岩中可见充填裂缝的方解石自身溶蚀产生宽度在2~3 μm 的基质微孔(图7e,7f).整体而言,花岗岩类基质微孔的孔径小于变质

岩类,基质微孔的存在可成为良好的天然气储集空间,对基岩储层能够稳产有重要的作用.

2.2 基岩储层物性分析

按照测试原理可将孔隙度测试方法分为四大类:一是根据瓦市伯恩(Washburn)方程,如压汞法测孔隙度(陈悦和李东旭,2006);二是根据阿基米德原理,如饱和煤油法测孔隙度(刘世超,2017);三是根据波义尔定理,如氦气注入法测孔隙度(刘世超,2017);四是根据弛豫时间,如核磁测井法(杨正明等,2017).这4种方法中,压汞法是测定部分中孔

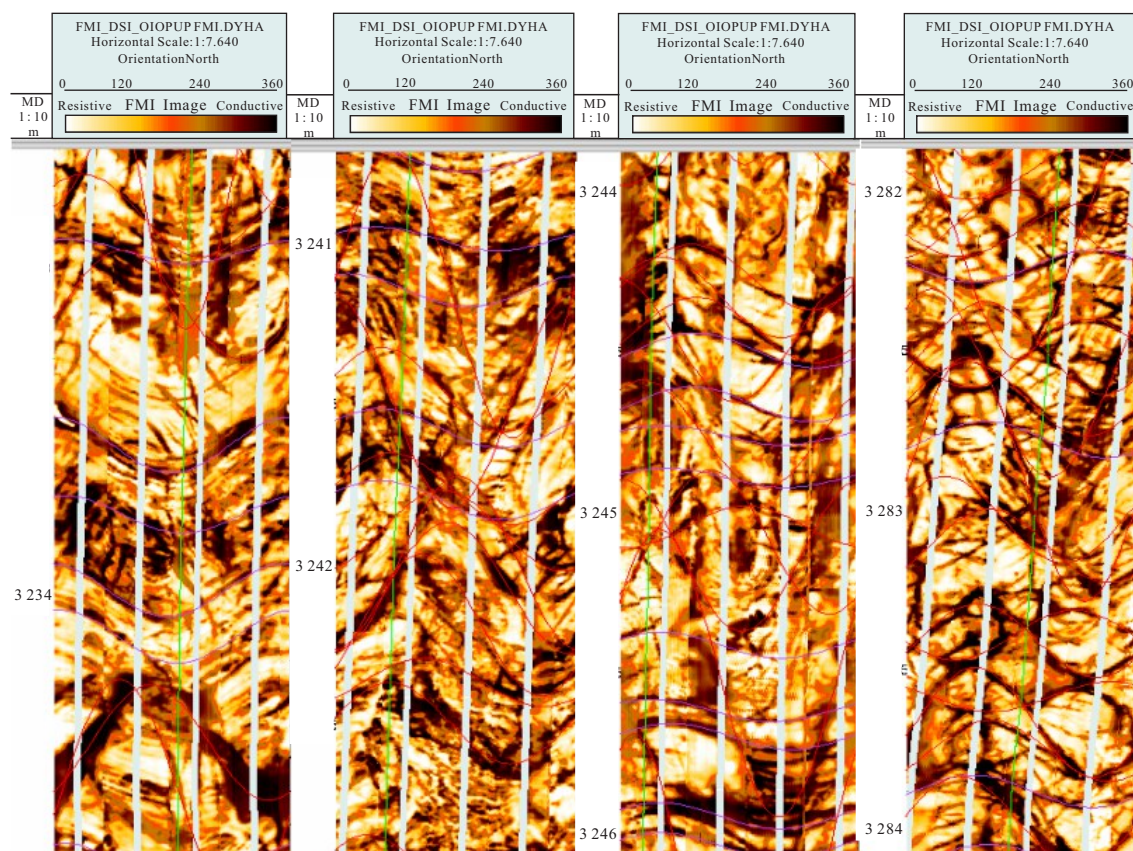


图5 东坪1井区东坪103井基岩段成像测井特征

Fig.5 FMI imaging logging features from well DP103 in Dongping 1 Block

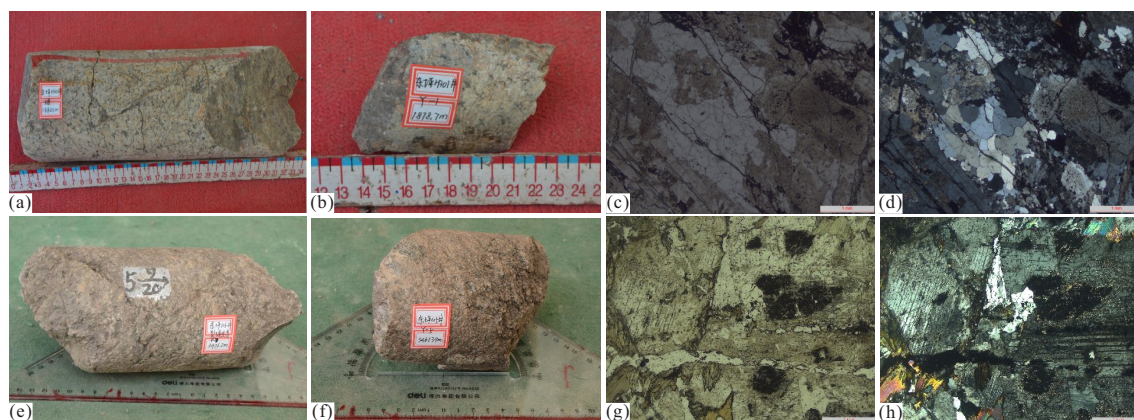


图6 阿尔金山前带东段基岩溶蚀孔洞发育特征

Fig.6 Characteristics of bedrock dissolution pores in the eastern segment of the Altun Piedmont

a. 东坪H301井,花岗岩,1 880.5 m,沿裂缝发生轻微的溶蚀作用,溶蚀孔洞发育规模较小;b. 东坪H301井,花岗岩,1 878.7 m,暗色矿物发生轻微溶解,形成规模较小的溶蚀孔洞;c. 东坪H301井,1 880.8 m,(-)2.5×10,花岗岩,裂缝较平直,沿裂缝溶蚀程度较弱,溶蚀孔洞规模较小;d. 东坪H301井,1 880.8 m,(+)2.5×10,花岗岩,裂缝较平直,沿裂缝溶蚀程度较弱,溶蚀孔洞规模较小;e. 东坪105井,3 476.6 m,黑云母斜长片麻岩,沿早期张开缝两侧发生溶蚀形成溶蚀孔洞;f. 东坪105井,3 467.28 m,黑云母斜长片麻岩,暗色矿物发生溶解形成溶蚀孔洞;g. 东坪105井,3 476.6 m,(-)2.5×10,黑云母斜长片麻岩,沿裂缝发生溶蚀形成串珠状溶蚀孔洞;h. 东坪105井,3 476.6 m,(-)2.5×10,黑云母斜长片麻岩,沿裂缝发生溶蚀形成串珠状溶蚀孔洞

表3 双侧向电阻率参数识别阿尔金山前带东段基岩储层
裂缝发育概率统计表

Table 3 Identification of fracture development probability of
bedrock reservoir of the eastern segment of the Al-
tun Piedmont by bilateral resistivity Parameters

井号	井段(m)	$ R_s/R_d-1 $		
		max	ave	min
东坪1井	3 100~3 230	0.319	0.086 2	0.000 024
东坪2井	3 750~3 880	0.607	0.082 7	0.000 580
东坪4井	3 530~3 630	0.376	0.232 0	0.084 100
东坪103井	3 230~3 350	0.570	0.318 0	0.020 000
东坪106井	3 240~3 550	0.677	0.205 7	0.000 055
坪1-2-3井	3 240~3 430	0.620	0.291 0	0.014 700
坪1H-2-3井	3 080~3 580	0.489	0.205 0	0.001 010
东坪3井	1 842~1 962	0.515	0.131 0	0.000 090
东坪5井	2 652~2 855	0.806	0.139 0	0.000 230
东坪6井	2 176~2 350	0.250	0.089 3	0.000 060
东坪9井	2 208~2 356	0.339	0.113 0	0.000 140
东坪11井	2 115~2 320	0.720	0.120 0	0.000 120
东坪12井	1 992~2 086	0.744	0.194 0	0.000 290
东坪306井	1 905~2 098	0.573	0.070 0	0.000 190
东坪307井	1 970~1 995	0.589	0.142 0	0.001 400
牛5井	2 400~2 713	0.452	0.124 0	0
牛4井	980~1 195	0.847	0.117 0	0.000 030
牛北1井	3 700~3 848	0.378	0.100 0	0.000 120
牛北2井	670~870	0.275	0.096 0	0.081 000
牛北3井	1 876~2 013	0.293	0.099 7	0.000 290
冷北1井	1 942~2 327	0.393	0.111 0	0.000 100
冷北2井	3 620~3 800	0.851	0.274 0	0.000 032
尖3井	4 653~5 042	0.887	0.337 0	0.000 130
尖探1井	4 720~4 970	0.946	0.517 0	0.002 500

和大孔孔径分布的方法;此外,在室内岩心分析中采用液体饱和法重复测量岩心孔隙度的可信度为99%,远高于核磁测量的结果(周宇等,2011);氦孔隙度法较饱和煤油法高出2.0%~6.4%。综上,经过综合分析在研究中采用氦孔隙度。与氦孔隙度对应的渗透率选用空气作为渗流介质,称为空气渗透率。通过阿尔金山前带东段4个地区15口井的氦孔隙度—空气渗透率进行统计,可知孔隙度介于0.004%~9.760%,平均孔隙度1.663%~3.844%;渗透率介于0.002~33.239 mD,平均渗透率0.020~3.836 mD,差异大(表4)。将以上数据按岩性分类,挑选物性较好的几种岩性,绘制不同岩性孔隙度、渗透率分布直方图,可知花岗岩储层孔隙度主要在1%~7%,峰值在1%~3%、5%~6%内,约占56%,均值为3.2%;储层渗透率主要在0.05~1.00

mD之间,约占70%,均值为1.1 mD(图8a,8b)。黑云母斜长片麻岩储层孔隙度主要在1%~6%,峰值在1%~5%,约占45%,均值为2.5%;储层渗透率主要在0.1~0.5 mD、1~10 mD,约占21%,均值为1.39 mD(图8c,8d)。花岗片麻岩储层孔隙度主要在1%~6%、>7范围内,峰值在2%~4%、>7,约占77%,均值为3.84%;储层渗透率主要在0.1~0.5 mD、1~10 mD之间,约占56%,均值为3.84 mD(图8e,8f)。从以上分析可知,阿尔金山前带东段基岩储集岩类型多样、储集空间类型多样,孔隙度和渗透率之间相关性不明显。其中花岗片麻岩孔渗参数最好,是研究区最主要的储集岩类之一,其次是花岗岩、黑云母斜长片麻岩等。

3 阿尔金山前带东段基岩储层发育 主控因素

许多学者对基岩储层储集性能的影响因素提出了不同的观点,周心怀等将渤海锦州基岩储层控制因素总结为潜山岩性、构造应力作用及古地貌作用(周心怀等,2005);李建明等将昆北断阶带基岩储层控制因素总结为基岩岩性、构造运动及成岩作用(李建明等,2011);王昕等认为渤海海域花岗岩潜山储层主控因素有微古地貌、有机酸溶解作用及构造变形作用(王昕等,2015)。基岩储层由多因素综合控制,岩性不同、构造位置不同、所处附近断层的发育程度不同、后期岩浆侵入和热液作用的发育程度不同,都会导致储层储集空间发育类型不同,物性差异不同。根据阿尔金山前带东段基岩储层的特点,结合前人研究成果,主要从岩性及矿物组合、古地貌、先存断裂及破碎带、后期岩浆侵入及热液作用4个方面来总结研究区基岩储层的主控因素。

3.1 岩性及矿物组合

原岩的性质对岩石储集空间的发育至关重要,无论何种成因的储集空间,其发育均受原岩的控制。原岩矿物组合不同、各矿物变质深浅不同,会导致储集空间类型及发育程度不同,因此岩性及矿物组合是基岩储层发育的根本性因素(李晓光等,2009)。如前所述,研究区基岩储层主要由花岗岩和变质岩类组成,花岗岩较变质岩类含更多的石英、长石等脆性矿物,易在构造应力作用下形成裂缝(图3);变质岩较花岗岩含较多的不稳定矿物,易于发生溶蚀和蚀变形成溶蚀孔洞和基质微孔(图6)。此外,按照控制变量原则,仅选择东坪1井区变质岩和东坪3

表 4 阿尔金山前带东段基岩储集物性统计表									
Table 4 Statistics of bedrock reservoir property in the eastern segment of the Altun Piedmont									
参数	岩性	灰岩	花岗岩	长石角闪石片岩	闪长岩类		片麻岩类		
					花岗闪长岩	闪长岩	钙质片麻岩	花岗片麻岩	黑云母斜长片麻岩
孔隙度(%)	最大	2.109	7.150	4.712	5.281	7.23	5.367	9.763	8.417
	最小	1.183	0.498	1.192	1.562	0.81	1.795	0.825	0.004
	平均值	1.663	3.316	2.680	3.191	5.29	3.314	3.844	2.510
渗透率(%)	最大	0.110	13.966	3.206	0.092	3.81	0.304	33.239	17.476
	最小	0.020	0.050	0.050	0.013	0.05	0.050	0.020	0.020
	平均值	0.065	1.206	2.052	0.035	2.23	0.171	3.836	1.392

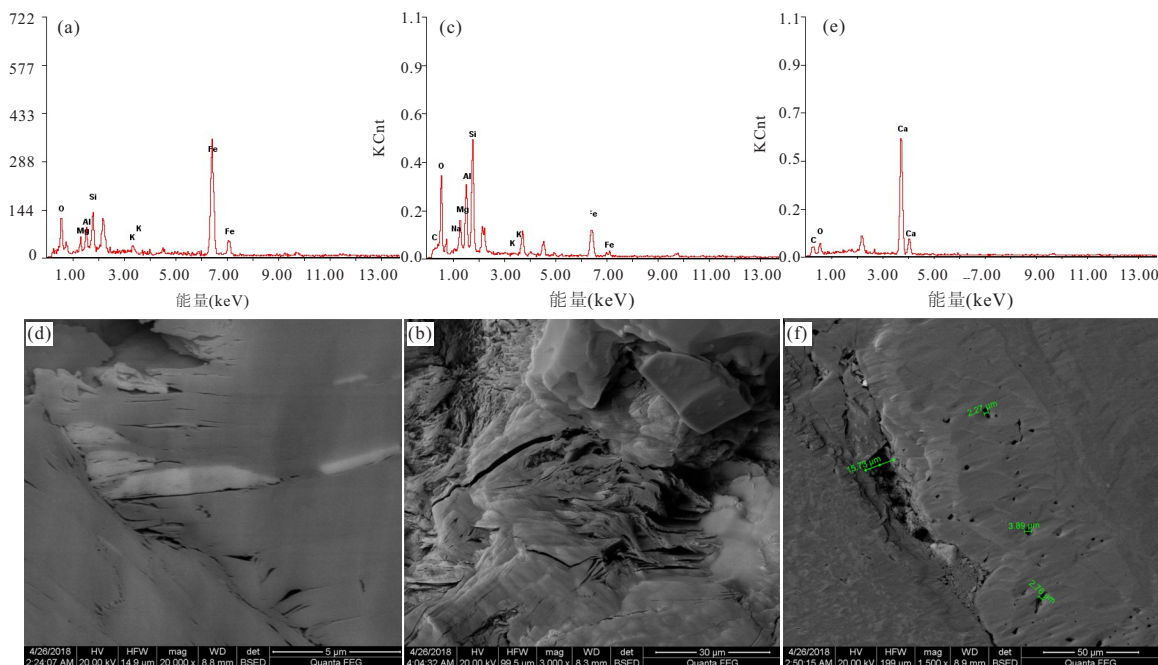


图 7 阿尔金山前带东段基岩基质微孔发育特征

Fig.7 Characteristics of bedrock matrix pores in the eastern segment of the Altun Piedment

a. 尖探 1 井, 4 645.9 m, 花岗闪长岩能谱图, 显示矿物为铁镁质; b. 尖探 1 井, 4 645.9 m, 花岗闪长岩, SEM, 铁镁质矿物中的基质微孔, 宽度 200~300 nm; c. 东坪 7 井, 2 170.6 m, 云母石英片岩能谱图, Si、Al、Mg、Fe 元素含量高, 该颗粒为云母; d. 东坪 7 井, 2 170.6 m, 云母石英片岩, SEM, 可见云母片晶间孔, 宽多在 2~5 μm 之间; e. 东坪 105 井, 3 454.3 m, 黑云母斜长片麻岩能谱图, 显示矿物为方解石; f. 东坪 105 井, 3 454.3 m, 黑云母斜长片麻岩, SEM, 充填裂缝的方解石自身溶蚀产生宽度在 2~3 μm 的基质微孔

井区花岗岩为研究对象,分别统计两种岩性中风化壳纵向分带各层的厚度(表 5),可知由于片麻岩易风化矿物含量较多,花岗岩相对较少,因此片麻岩更容易发生风化淋滤作用,风化壳各层厚度均大于花岗岩风化壳各层的厚度.

3.2 古地貌

基岩属于低孔低渗的非沉积岩,基岩成为储层最重要的原因就是风化壳的存在,风化壳的发育情

况主要受控于古地貌(伍劲等,2017).据研究,地形地貌对风化壳厚度的控制主要体现在两个方面,一是不同坡度的斜坡地形,汇水系统路径不同,二是不同坡度的斜坡地形风化淋滤作用的强度不同(侯中帅等,2018).从各井风化壳不同纵向结构带厚度可知,风化壳不同纵向结构带在不同地貌条件下保存的厚度不同.在鼻隆部位,由于剥蚀作用较强、淋滤作用较弱,土壤层被剥蚀,完全风化层底部及半

表 5 阿尔金山前带东段东坪 1 井区片麻岩和东坪 3 井区花岗岩风化壳各结构层厚度统计表

Table 5 Statistics of thicknesses of structural layers of Weathering Crust of gneiss in Dongping 1 Block and granite in Dongping 3 in the eastern segment of the Altun Piedmont

岩性	完全风化层(m)			半风化层溶蚀带			半风化层崩解带(未钻穿)		
	max	min	ave	max	min	ave	max	min	ave
花岗岩类	9.8	2.3	6.2	122.5	57	98.5	135.0	42.5	84.1
片麻岩类	15.0	3.5	7.2	189.5	41	109.5	193.2	29.5	134.7

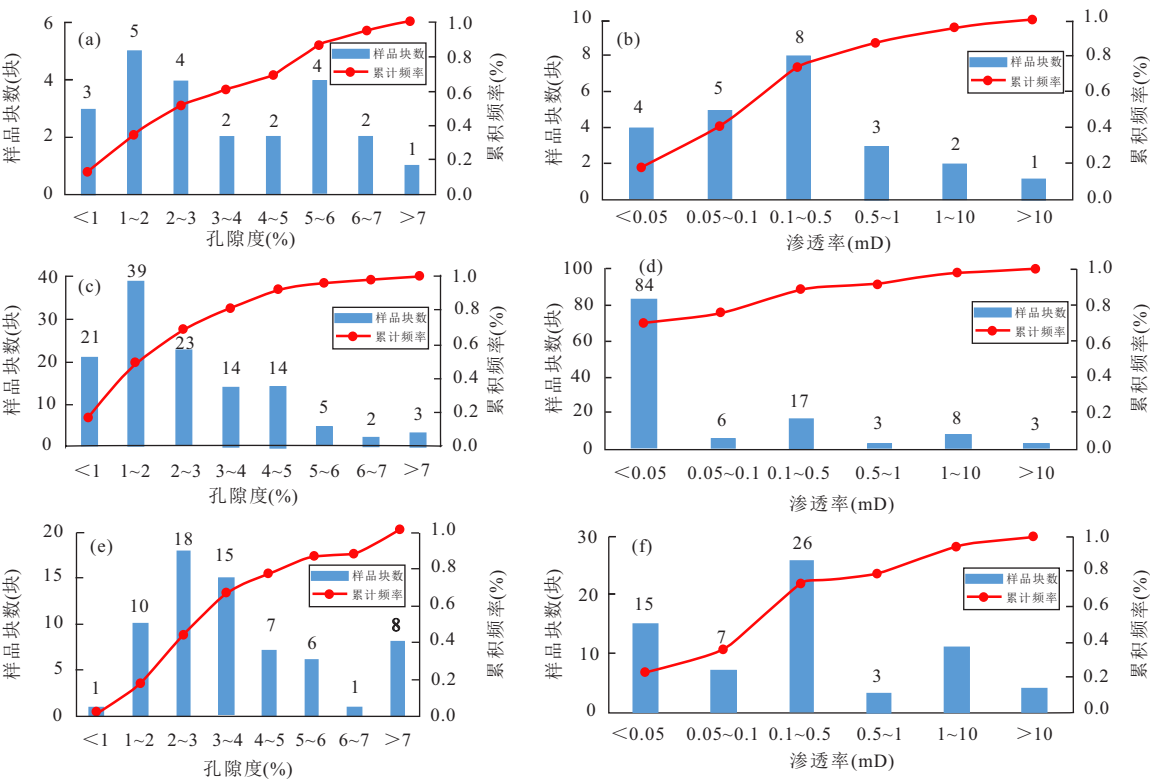


图 8 阿尔金山前带东段主要岩性孔渗分布直方图

Fig.8 Histogram of main bedrock pore and permeability distribution in the eastern segment of the Altun Piedmont

a. 阿尔金山前带东段花岗岩孔隙度分布直方图; b. 阿尔金山前带花岗岩渗透率分布直方图; c. 阿尔金山前带东段黑云母斜长片麻岩孔隙度分布直方图; d. 阿尔金山前带东段黑云母斜长片麻岩渗透率分布直方图; e. 阿尔金山前带东段花岗岩片麻岩孔隙度分布直方图; f. 阿尔金山前带东段花岗岩片麻岩渗透率分布直方图

风化层得以保存;在斜坡部位,完全风化层和半风化层能得到保存,局部低洼地带还可见厚度很薄的古土壤层(表 6). 研究区由于经历了漫长的地质时间且构造运动复杂,故风化壳纵向结构带均有所缺失,自西向东以尖北斜坡、东坪鼻隆为例,尖北斜坡较东坪鼻隆完全风化层和半风化层溶蚀带厚度均大,主要是由于东坪鼻隆古地貌位于高点,淋滤剥蚀程度大,完全风化层仅底部保留下来,大气水沿完全风化层向半风化层溶蚀带渗流,致使半风化层溶蚀带顶部被剥蚀,厚度减少.

3.3 先存断裂及破碎带

构造作用是基岩储层储集空间形成、发育的主要动力. 岩石脆性越大,最大承载限度越小,越容易破碎. 先存断裂及破碎带使基岩中裂缝密度、宽度加大,产生了有效的储集空间,同时增强了各储集空间之间的连通性,为酸性溶液及油气提供了运移通道(Fookes, 1997). 酸性水溶液在流动过程中可进一步溶解岩石中的易溶组分,进一步加大储层的渗流能力,对改善储层性能具有递进式的正向影响,可有效的扩大储层的规模. 因此,先存断裂及破碎带是基岩储层形成的主要原因之一. 以尖北斜坡、

表 6 不同构造带典型井风化壳各结构层厚度统计表
Table 6 Statistics of thickness of different zones in weathering crust of typical well

井号	构造位置	完全风化层厚度(m)	半风化层溶蚀带厚度(m)	半风化层崩解带厚度(m)(未钻穿)
尖探 1 井	尖北斜坡	7.00	117.5	138.0
尖北 101 井		6.00	146.5	126.5
尖探 3 井		6.00	189.5	132.5
厚度均值		6.30	151.2	132.3
东坪 11 井	东坪鼻隆	4.00	122.5	83.5
东坪 6 井		8.60	91.9	78.0
东坪 9 井		3.50	92.5	77.5
东坪 306		9.80	119.5	88.0
东坪 12 井		3.50	57.0	42.5
东坪 5 井		2.30	107.5	135.0
厚度均值		5.30	98.5	84.1
牛北 1 井	牛北斜坡	4.00	84.0	81.0
牛北 2 井		2.00	115.0	85.0
牛 4 井		3.00	165.8	82.2
牛 5 井		2.00	156.0	117.0
厚度均值		2.75	130.2	91.3

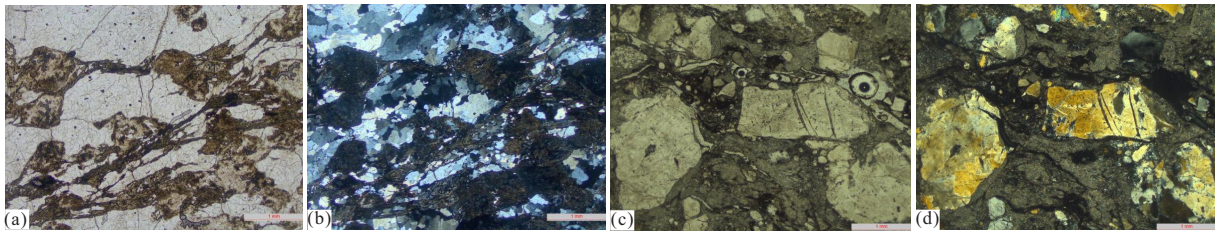


图 9 阿尔金山前带东段基岩储层碎裂岩发育特征

Fig.9 Characteristics of bedrock cataclastic rock in the eastern segment of the Altun Piedment

a. 牛 4 井,975.8~978.7 m,(−)2.5×10,花岗片麻岩,岩石破碎,裂缝发育;b. 牛 4 井,975.8~978.7 m,(+)2.5×10,花岗片麻岩,岩石破碎,裂缝发育;c. 坪 1-2-3 3 426.44 m,(−)2.5×10,花岗片麻岩,岩石破碎,裂缝发育;d. 坪 1-2-3,3 426.44 m,(−)2.5×10,花岗片麻岩,岩石破碎,裂缝发育,未被充填

东坪鼻隆、牛北斜坡为例,前以描述尖北斜坡和东坪鼻隆完全风化层和半风化层溶蚀带厚度差异的原因是古地貌的影响,牛北斜坡和东坪鼻隆的差异也受古地貌的控制,但由于牛北斜坡断裂发育,且牛北 1 井、牛北 2 井均位于断层边缘,断裂的影响占主导地位,断层的出现加剧了风化剥蚀的进程,导致厚度减少.因此牛北斜坡完全风化层厚度小于东坪鼻隆.此外,研究区还可见碎裂岩(图 9),典型井如坪 1-2-3 井、东坪 105 井、牛 4 井等,岩石破碎,镜下可见大量微裂缝四通八达,可作为油气运移的良好通道.

3.4 后期岩浆侵入及热液作用

岩浆活动在世界上各类油气藏中广泛可见(Einsele,1980;Wu *et al.*,2006).岩浆侵入为不稳定

组分及液态溶液与围岩发生水岩反应提供了充足的热动力,同时高温烘烤加速了围岩的变质作用,因此岩浆侵入对围岩必然具有改造(刘超等,2015).以往认为岩浆热液侵入导致围岩受压实和胶结作用的影响,储层孔隙度降低,影响的储集性能(刘超等,2015).但近年的勘探研究表明,岩浆侵入活动对增大储集空间、改善储集性能也具有积极的影响(刘超等,2015).前已述及,研究区共有多期岩浆侵入,一方面导致周围基岩发生塑性变形和破碎,产生了构造裂缝;另一方面水岩反应致使不稳定矿物被溶蚀,增大了储集空间.另外,由于侵入的岩浆岩较为致密且储集物性差,可作为基岩储层的盖层.以东坪 306 井为例(图 10),通过薄片观察及成像测井资料可知花岗岩基底中有辉绿岩和闪长岩侵入,

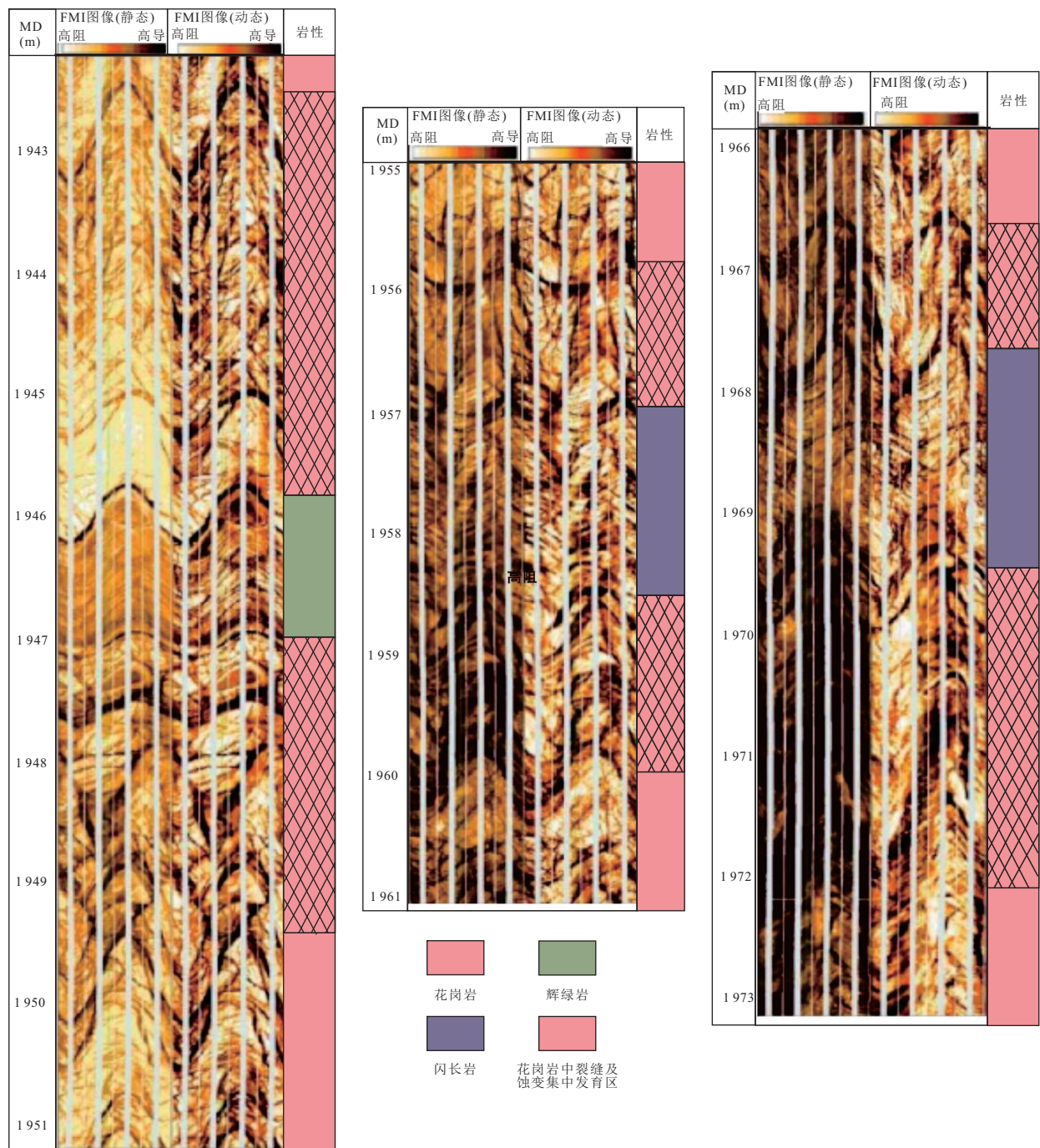


图 10 东坪 306 井岩浆侵入及热液作用导致花岗岩的破碎现象(据中国石油青海油田公司)
Fig.10 Phenomenon of fragmentation of the granite rock caused by magma and hydrothermal intrusion in the well DP306

使得周围花岗岩裂缝密集程度加大,距离侵入体的距离越近,裂缝密度越大.此外,闪长岩、辉绿岩等物性差,可对下方的油气进行封堵成为隔层或盖层.

4 阿尔金山前带东段基岩储层评价与优选

储层研究的意义就是对储层进行符合地质实

际及生产需要的分类与评价(侯瑞云和刘忠群, 2012;陈欢庆等, 2015;朱如凯等, 2018).目前,关于低孔低渗储层的评价标准多是针对某一特定地区建立的,其应用条件及参数选择往往具有一定的特殊性.关于基岩储层的评价标准很少,主要是以孔隙度和渗透率作为评价标准的(王永健和王延斌,

表 7 阿尔金山前带东段基岩储层评价一览表

Table 7 The list of bedrock reservoir evaluation in the eastern segment of the Altun Piedment

储层分类	I 类		II 类		III 类		IV 类	
储集空间类型	裂缝—孔洞型		孔洞—裂缝型		裂缝型		孔洞类	
储层主要岩类	片麻岩、花岗岩片麻岩、黑云母斜长片麻岩、变质花岗岩		花岗闪长岩、角闪斜长片麻岩、花岗岩、闪长岩		钙质片麻岩、云母石英片岩		致密花岗岩、致密片麻岩、板岩	
构造位置	东坪鼻隆 半风化层溶蚀带		东坪鼻隆、尖北斜坡、牛中斜坡 半风化层溶蚀带、半风化层崩解带		东坪鼻隆、冷北斜坡 半风化层崩解带		原岩带、完全风化层半风化层崩解带	
有效孔隙度(%)	>5		>5 5~2 5~2		>2 2~1 2~1		<1.00	
有效渗透率(mD)	>5		5.00~0.05 >5 5~0.05 0.05~0.01		>0.05 0.05~0.01		<0.01	
基质孔隙度(%)	>4		4~1		1.0~0.1		<0.10	
基质渗透率(mD)	>1		1.0~0.1		0.10~0.02		<0.02	
裂缝孔隙度(%)	>1		1.0~0.5		0.5~0.1		<0.10	
裂缝密度(%)	>15		15~10		10~5		<5.00	
裂缝长度(m)	>15		15~5		5.0~0.5		<0.50	
裂缝开度(um)	>20		10~20		5~10		<5.00	
储层类型	好		中等		较差		差	

2013;吴丽荣等,2015).结合基岩储层的物性特征及形成的主控因素,提出了包括储集空间组合类型、构造位置、储集岩类型、氮孔隙度—空气渗透率实验得到的有效孔渗数据、测井曲线得到的基质孔渗数据和裂缝参数等多因素控制的基岩储层评价标准(表 7),其中储集空间类型、岩性、构造位置为主要的的评价参数,其他参数作为验证.在储集空间类型、岩性、构造位置确定时,其相应的孔渗参数基本确定,如岩性为片麻岩、储集空间类型以裂缝—孔洞型为主、位于构造高点东坪鼻隆、处于半风化层溶蚀带,一定为好储层.为便于实际应用,结合油田生产实际,孔隙度以 5%、2%、1% 为界,渗透率以 5.00 mD、0.05 mD、0.01 mD 为界,将储层分为 I、II、III、IV 类,分别对应好、中等、较差、差. I 类为高孔—高渗型; II 类分为 3 个亚类,分别是高孔—较高渗型、较高孔—高渗型及较高孔—较高渗型; III 类分为 3 个亚类,分别是较低孔—低渗型、低孔—较高渗型及低孔低渗型; IV 类为极低孔—极低渗型.当孔渗数据很差而实际生产中物性较好时考虑用裂缝相关参数进行评价.

利用有效孔渗数据绘制储层评价综合图,结合研究区基岩储层发育的岩性、构造位置来进行检验.从岩性来看,研究区岩性多以 II 类储层为主,随着变质程度不同,4 种类型的储层均有分布.除了致密基岩外,其余岩性均具有程度不同的储集和渗流能力(图 11a).从地区来看:研究区多以 II 类储层为主,东坪鼻隆、牛中—牛北斜坡、尖北斜坡可见 I 类储层;东坪鼻隆、牛东斜坡、冷北斜坡可见 II 类储层;东坪鼻隆致密岩性为 III 类和 IV 类(图 11b).从风化壳纵向分带来看:半风化层溶蚀带多为 I 类和 II 类储层;半风化层崩解带主要为 II 类和 III 类储层;完全风化层以 IV 类储层为主,多为隔夹层(图 11c).总体而言,不同岩类、不同构造部位的储集空间在孔渗上分区明显,说明此划分标准具有很好的评价效果.在此基础上,在绘制阿尔金山前带东段基岩储层孔隙度平面分布图、渗透率平面分布图、半风化层溶蚀带厚度平面分布图的基础上,结合构造等值线图 and 岩性平面分布图,绘制了阿尔金山前带东段基岩储层评价图(图 12),以期油气钻井大方向提供依据.

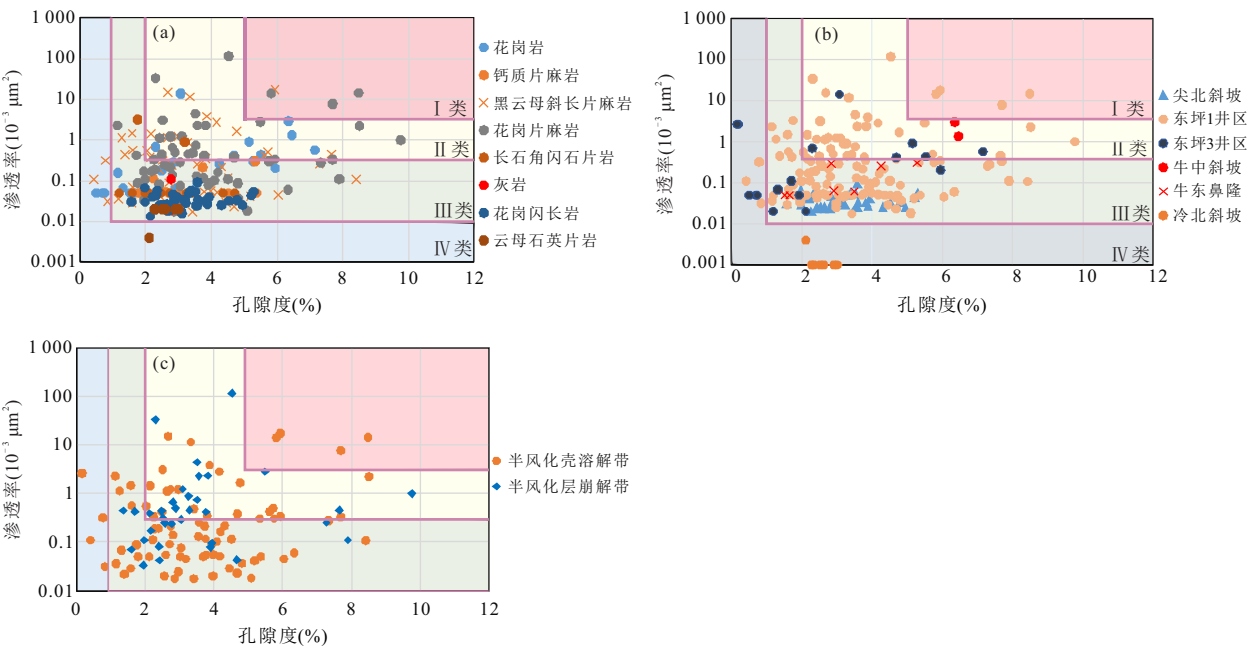


图 11 阿尔金山前带东段储层评价综合图

Fig. 11 Comprehensive map for reservoir evaluation of the eastern segment of the Altun Piedmont
a. 阿尔金山前带东段不同岩性孔隙度渗透率分布; b. 阿尔金山前带东段不同区域孔隙度渗透率分布; c. 阿尔金山前带东段风化层孔隙度渗透率

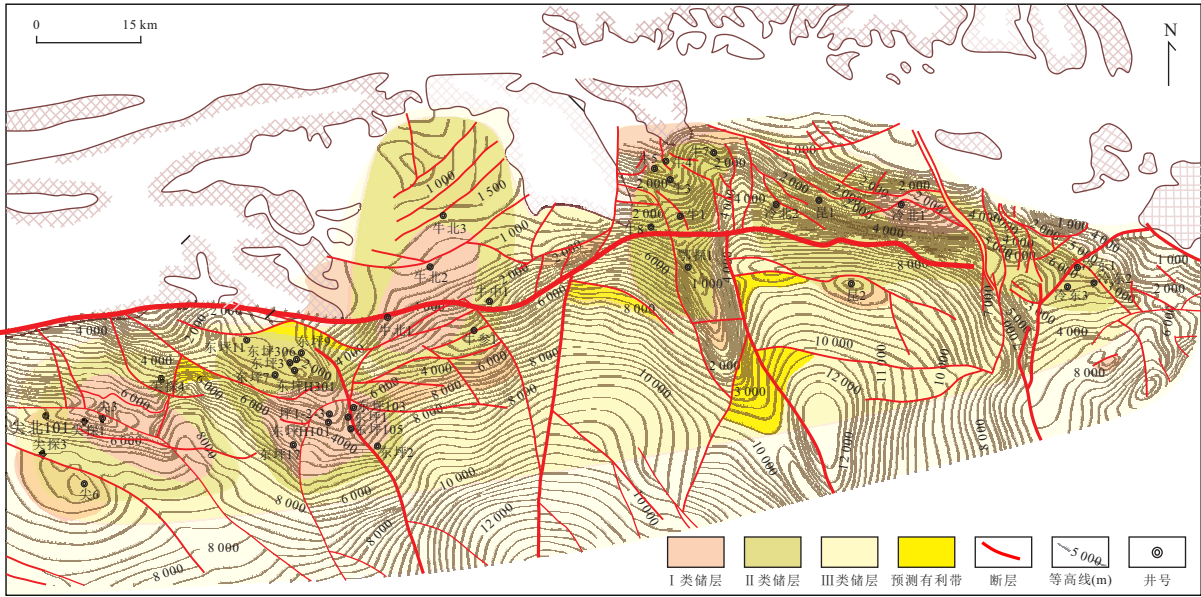


图 12 阿尔金山前带东段基岩储层评价图

Fig. 11 Comprehensive evaluation for bedrock reservoir of the eastern segment of the Altun Piedmont

5 结论与讨论

5.1 结论

(1)研究区基岩类型主要包括岩浆岩和变质岩两种,岩浆岩包括花岗岩、花岗闪长岩,少量玄武岩与辉绿岩,以花岗岩最为重要.变质岩包括片麻岩、片岩、板岩等,以片麻岩最为重要.尖北斜坡主要发

育花岗闪长岩和闪长岩;东坪鼻隆主要发育两种岩性,东坪1井区以片麻岩为主;东坪3井区以花岗岩为主;牛中—牛北斜坡可见花岗岩、花岗片麻岩及少量片麻岩;牛东鼻隆基岩有花岗岩、花岗片麻岩;冷北斜坡可见花岗片麻岩及云母石英片岩.

(2)研究区基岩储集空间包括未完全充填裂缝、溶蚀孔洞和基质微孔3类.裂缝多为中—高角

度,倾角大于 60° ,花岗岩裂缝的密度、长度、宽度及孔隙度较变质岩好.花岗岩中裂缝性溶蚀孔洞较孔隙性溶蚀孔洞发育程度好,但整体发育规模、可容空间、连通性等都没有变质岩好.基质微孔普遍发育,花岗岩类基质微孔的孔径小于变质岩类.基岩储层孔隙度介于 $0.004\%\sim 9.760\%$,平均孔隙度在 $1.663\%\sim 3.844\%$;渗透率介于 $0.002\sim 33.239\text{ mD}$,平均渗透率在 $0.020\sim 3.836\text{ mD}$,片麻岩类物性整体好于花岗岩类,孔隙度和渗透率之间没有明显的相关性.

(3)基岩储层主控因素主要包括岩性及矿物组合、古地貌、先存断裂及破碎带、后期岩浆侵入及热液作用4个方面.以储集空间类型、岩性、构造位置为主要评价参数,裂缝、基质微孔相关参数为辅,建立多因素综合控制的基岩储层评价标准,将储层划分为好、中等、较差、差四类.从岩性来看,研究区岩性多以Ⅱ类储层为主,其中花岗片麻岩是研究区最主要的储集岩类;其次是花岗岩、黑云母斜长片麻岩、长石角闪石片岩等.从构造位置来看,研究区多以Ⅱ类储层为主,东坪鼻隆、牛中—牛北斜坡、尖北斜坡可见Ⅰ类储层;东坪鼻隆、牛东鼻隆、冷北斜坡以Ⅱ类储层为主;东坪鼻隆致密岩性为Ⅲ类和Ⅳ类.从风化壳纵向分带来看:半风化层溶蚀带多为Ⅰ类和Ⅱ类储层;半风化层崩解带主要为Ⅱ类和Ⅲ类储层;完全风化层以Ⅳ类储层为主,多为隔夹层.加之研究区各种储集空间类型均发育,具有很大的勘探潜力.

5.2 讨论

从此项研究来看,基岩作为低孔低渗岩石,仍可成为良好的储集层.阿尔金山前带东段基岩储层主要涉及岩浆岩和变质岩两大类,储层性能存在很大差异,可进一步研究不同岩类储层在矿物组成、地球化学响应、测井响应及储集空间特征等方面的差异,建立基岩岩浆岩储层和变质岩储层的发育模式,讨论不同岩性储层的成藏过程等,以期完善对柴达木盆地基岩储层的研究.

致谢:论文撰写过程中,中国石油青海油田公司勘探开发研究院在地质资料方面给予大力支持,在此致以深切谢意.

References

Веселов, К., Е., Михайлов, И., Н., 1995. Oil and Gas in Deep Crystalline Bedrock. Translated by Ren, Y., *Reservoir Evaluation and Development*, 18(2): 33—37(in

Chinese).

Chen, H. Q., Ding, C., Du, Y. J., et al., 2015 Advance of Reservoir Evaluation Researches. *Geological Science and Technology Information*, 34(5): 66—74(in Chinese with English abstract).

Cheng, L. H., Men, D. W., Yang, Y., et al., 2018. Characteristic and Rational Development Indexes of the Basement Gas Reservoir in the Dongping Block, Qaidam Basin. *Natural Gas Industry*, 38(8): 69—74(in Chinese with English abstract).

Chen, W. L., Zhou, W., 2012. Important Exploration Areas in Petaliferous Basins the Basement Hydrocarbon Reservoirs. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 34(5): 17—24(in Chinese with English abstract).

Chen, Y., Li, D. X., 2006. Analysis of Error for Pore Structure of Porous Materials Measured by MIP. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 25(4): 198—202.(in Chinese with English abstract).

Coung, T. X., Warren, J. K., 2009. Bach Hopfield, A Fractured Granitic Basement Reservoir, Cu Long Basin, Offshore Se Vietnam: A “Buried-Hill” Play. *Journal of Petroleum Geology*, 32(2): 129—156. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2009.00440.x>

Einsele, G., Gieskes, J. M., Curray, J., et al., 1980. Intrusion of Basaltic Sills into Highly Porous Sediments, and Resulting Hydrothermal Activity. *Nature*, 283(5746): 441—445. <https://doi.org/10.1038/283441a0>

Fookes, P. D., 1997. Tropical Residual Soil: A Geological Society Engineering Group Working Party Revised Report Quarterly. *Journal of Engineering Geology*, 30: 1—98. <https://doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1990.023.001.01>

Fu, S. T., Ma, D. D., Chen, Y., et al., 2015. Natural Gas Exploration in Eastern Segment of Alton Piedmont, Northern Qaidam Basin. *China Petroleum Exploration*, 20(6): 1—13(in Chinese with English abstract).

Hou, R. Y., Liu, Z. Q., 2012. Reservoir Evaluation and Development Strategies of Daniudi Tight Sand Gas Field in the Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 33(1): 118—128(in Chinese with English abstract).

Hou, Z. S., Zhou, L. H., Chen, S. Y., et al., 2018. Reservoir Types and Controlling Factors of Upper Paleozoic in Dagang Exploration Area. *Journal of China University of Mining & Technology*, 47(5): 1021—1037(in Chinese with English abstract).

Huang, J. H., Tan, X. F., Cheng, C. J., et al., 2016. Structural Features of Weathering Crust of Granitic Basement Rock and Its Petroleum Geological Significance: A Case

- Study of Basement Weathering Crust of Dongping Area in Qaidam Basin. *Earth Science*, 41(16): 2041—2060(in Chinese with English abstract).
- Kou, F. D., Chen, Y. Y., Zhao, G., Z., et al., 2017. Characteristics and Pattern Construction of Bedrock Gas Reservoirs in Dongping Area of Qaidam Basin. *Petroleum Geology and Engineering*, 31(2): 6—8(in Chinese with English abstract).
- Li, J. M., Shi, L. L., Wang, L. Q., et al., 2011. Characteristics of Basement Reservoir in Kunbei Fault Terrace Belt in Southwestern Qaidam Basin. *Lithologic Reservoirs*, 23(2): 20—23(in Chinese with English abstract).
- Li, X., Liu, Y. G., Chai, X. Y., et al., 2018. Patterns and Comprehensive Predications of Fracture Development in Bedrock Gas Reservoirs in Dongping, Qaidam Basin. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 1—8(in Chinese with English abstract).
- Li, X. G., Liu, B. H., Cai, G. G., et al., 2009. Genetic Analysis of Interior Reservoirs in the Metamorphic Buried Hill of Liaohe Depression. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 16(4): 1—7(in Chinese with English abstract).
- Liu, C., Xie, Q. B., Wang, G. W., et al., 2015. The Influence of Igneous Intrusion to Detrital Reservoir: Advances and Outlook. *Advances in Earth Science*, 30(6): 654—667(in Chinese with English abstract).
- Liu, S. C., 2017. Improvement and Application of Helium Porosity Meter. *Scientific Management*, (8): 247—248(in Chinese with English abstract).
- Liu, W. X., Cheng, Q. Q., Wang, Y. B., et al., 2006. Micro Analysis and Its Application of Oil and Gas Reservoir Characteristics. *Petroleum Geology & Experiment*, 28(5): 489—492(in Chinese with English abstract).
- Liu, W. X., Shi, Z. H., Zhu, Y., et al., 2006. Application of SEM/EDX Analysis in Petroleum Exploration and Production. *Petroleum Geology & Experiment*, 28(5): 341—343(in Chinese with English abstract).
- Ma, F., Yan, C. F., Ma, D. D., et al., 2015. Bedrock Gas Reservoirs in Dongping Area of Qaidam Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(3): 266—273(in Chinese with English abstract).
- Ma, L., Liu, Q. X., Zhang, J. L., et al., 2006. A Discussion of Exploration Potentials of Basement Hydrocarbon Reservoir. *Natural Gas Industry*, 26(1): 8—12(in Chinese with English abstract).
- Nelson, R. A., Bueno, E., Moldovanyi, E. P., et al., 2000. Production Characteristics of the Fractured Reservoirs of La Paz Field, Maracaibo Basin, Venezuela. *AAPG Bulletin*, 84(11): 1791—1809. <https://doi.org/10.1306/8626c393-173b-11d7-8645000102c1865d>
- Sircar, A., 2004. Hydrocarbon Production from Fractured Basement Formations. *Current Science*, 87(2): 147—1511.
- Walters, R. E., 1953. Oil Production from Fractured Precambrian Basement Rocks in Central Kansas. *AAPG Bull.*, 37(2): 300—313. <https://doi.org/10.1306/5ceadc59-16bb-11d7-8645000102c1865d>
- North, C. H., 1990. *Petroleum Geology*, Second Edition. Unwin Hyman, Boston.
- Wang, X., Zhou, X. H., Xu, G. S., et al., 2015. Characteristic and Controlling Factors of Reservoir in Penglai 9-1 Large-Scale Oilfield in Buried Granite Hills, Bohai Sea. *Oil & Gas Geology*, (36): 262—271(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Wang, Y. B., 2013. Comprehensive Evaluation of Lower Porosity and Permeability Reservoirs in Upper Paleozoic of Daniudi Gas Field. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 35(5): 57—64(in Chinese with English abstract).
- Wu, C. Z., Gu, L. X., Zhang, Z. Z., et al., 2006. Formation Mechanisms of Hydrocarbon Reservoirs Associated with Volcanic and Subvolcanic Intrusive Rocks: Examples in Mesozoic - Cenozoic Basins of Eastern China. *AAPG Bulletin*, 90(1): 137—147. <https://doi.org/10.1306/07130505004>
- Wu, L. R., Huang, C. G., Yuan, J. Y., et al., 2015. Discovery of Matrix Pore of High Efficiency Bedrock Gas Reservoir in Saline Basin and Its Significance. *Journal of Earth Science and Environment*, 37(4): 54—62(in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Gao, X. Z., Ma, D. D., et al., 2017. Characteristics of the Basement Weathering Crust in Dongping Area, Qaidam Basin. *Geoscience*, 31(1): 129—141(in Chinese with English abstract).
- Xie, G. J., 1981. Occurrence of the Oil Pool in the Metamorphosed Basement in Yaerxia in the Western Part of the Jiuquan Basin. *Acta Petroleum Sinica*, 2(3): 23—30(in Chinese with English abstract).
- Yang, F., Xu, S. Y., 2011. Global Distribution and Hydrocarbon Accumulation of Basement Reservoirs. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 18(1): 7—11(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. M., Zhang, Y. P., Li H. B., et al., 2017. Application Basis of Nuclear Magnetic Technology in the Unconventional Reservoirs. *Earth Science*, 42(8): 1333—1339(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. F., Li, H. F., Jia, F. et al., 2011. Application of Quantitative Identification of Fracture Technology by

- Conventional Logging Data. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 15:101—102(in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., Xiang, H., Yu, S., et al., 2005. Reservoir Characteristics and Development Controlling Factors of JZS Neo Archean Metamorphic Buried Hill Oil Pool in Bohai Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 32(6): 17—20(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Wei, G. Q., Guo, H. Q., 2011. Impact Factors Analysis and Decision Tree Correction of NMR Porosity Measurements. *Well Logging Technology*, 35(3): 210—214(in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. K., Jin, X., Sun, L., et al. 2018. Muti-Scale Digital Evaluation on Complex Reservoir. *Earth Science*, 43(5): 1773—1782(in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Hou, L. H., Tao, S. Z., et al., 2011. Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Structure of Large—Scale Volcanic Weathering Crust of the Carboniferous in Northern Xinjiang. *Earth Science*, 41(11): 1613—1626 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈欢庆,丁超,杜宜静,等,2015.储层评价研究进展.地质科技情报,34(5):66—74.
- 程立华,孟德伟,杨云,等,2018.柴达木盆地东坪基岩气藏的特征及合理开发指标.天然气工业,38(8):69—74.
- 陈文玲,周文,2012.含油气盆地重要勘探领域——基岩油气藏.西南石油大学学报(自然科学版),34(5):17—24.
- 陈悦,李东旭,2006.压汞法测井材料孔结构的误差分析.硅酸盐通报,25(4):198—202.
- 付锁堂,马达德,陈琰,等,2015.柴达木盆地阿尔金山前带东段天然气勘探.石油勘探与开发,20(6):1—13.
- 黄建红,谭先锋,程承吉,等,2016.花岗质基岩风化壳结构与油气地质意义:以柴达木盆地东坪地区基岩风化壳为例.地球科学,41(12):2041—2060.
- 侯瑞云,刘忠群,2012.鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗储层评价与开发对策.石油与天然气地质,33(1):118—128.
- 侯中帅,周立宏,陈世悦,等,2018.大港探区上古生界储层类型及控制因素.中国矿业大学(学报),47(5):1021—1037.
- 寇福德,陈园园,赵国忠,等,2017.柴达木盆地东坪地区基岩气藏特征及模式构建.石油地质与工程,31(2):6—8.
- 李建明,史玲玲,汪立群,等,2011.柴西南地区昆北断阶带基岩油藏储层特征分析.岩性油气藏,23(2):20—23.
- 李翔,刘应如,柴小颖,等,2018.柴达木盆地东坪基岩气藏裂缝发育规律研究.西南石油大学学报(自然科学版),1—8.
- 李晓光,刘宝鸿,蔡国刚,等,2009.辽河拗陷变质岩潜山内幕油藏成因分析.特种油气藏,16(4):1—7.
- 刘超,谢庆宾,王贵文,等,2015.岩浆侵入作用影响碎屑围岩储层的研究进展与展望.地球科学进展,30(6):654—667.
- 刘世超,2017.氮孔隙仪的改进与应用.科学管理,(8):247—248.
- 刘伟新,承秋泉,王延斌,等,2006.油气储层特征微观分析技术及其应用.石油实验地质,28(5):489—492.
- 刘伟新,史志华,朱樱,等,2001.扫描电镜/能谱分析在油气勘探开发中的应用.石油实验地质,23(3):341—343.
- 马峰,阎存凤,马达德,等,2015.柴达木盆地东坪地区基岩储集层气藏特征.石油勘探与开发,42(03):266—273.
- 马龙,刘全新,张景廉,等,2006.论基岩油气藏的勘探前景.天然气工业地质与勘探,26(1):8—12.
- 王昕,周心怀,徐国胜,等,2015.渤海海域蓬莱9—1花岗岩潜山大型油气田储层发育特征与主控因素.石油与天然气地质,36(2):262—271.
- 王永健,王延斌,2013.大牛地气田上古生界低渗储层综合评价.西南石油大学学报自然科学版,35(5):57—64.
- 维谢洛夫,米哈伊洛夫,1995.深部结晶基岩内的油气.任愈,译,石油物探译丛,18(2):33—37.
- 吴丽荣,黄成刚,袁建英,等,2015.威化湖盆高效基岩气藏储层中基质孔隙的发现及意义.地球科学与环境学报,37(4):54—62.
- 伍劲,高先志,马达德,等,2017.柴达木盆地东坪地区基岩风化壳特征.现代地质,31(1):129—141.
- 谢恭俭,1981.酒泉盆地西部鸭儿峡变质基岩油藏的形成条件.石油学报,2(3):23—30.
- 杨飞,徐守余,2011.全球基岩油气藏分布及成藏规律.特种油气藏,18(1):7—11.
- 杨正明,张亚蒲,李海波,等,2017.核磁共振技术在非常规油气藏的应用基础.地球科学,42(8):1333—1339.
- 张孝富,李鸿范,贾帆,等,2011.常规测井资料定量识别裂缝技术应用.内蒙古石油化工,15:101—102.
- 周心怀,项华,于水,等,2005.渤海锦州南变质岩潜山油藏储集层特征与发育控制因素.石油勘探与开发,32(6):17—20.
- 周宇,魏国齐,郭和坤,2011.核磁共振孔隙度影响因素分析与校准.测井技术,35(3):210—214.
- 朱如凯,金旭,孙亮,等,2018.复杂储层多尺度数字岩石评价.地球科学,43(5):1773—1782.
- 邹才能,侯连华,陶士振,等,2011.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.地球科学,41(11):1613—1626.