

中-基性火山岩孔缝储集体形成控制因素 ——以准噶尔盆地金龙区块石炭系为例

孔垂显^{1,2}, 陈 轩¹, 秦 军², 卢志远², 高 阳², 申 波¹, 陈爱章¹

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100;

2. 中国石油 新疆油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:以金龙区块石炭系中基性火山岩为例,综合岩心、薄片、测井、地震及分析化验资料,分析火山岩储集空间特征及形成过程:①火山喷发间隙期,火山旋回上部斜长石等矿物向方沸石、绿泥石蚀变,形成不稳定层;②石炭纪晚期构造运动造成断裂-裂缝发育及不整合面的形成,大气水沿着断裂-裂缝及旋回顶部不稳定层发生纵向及横向溶蚀,形成孔缝储集体雏形;③侏罗纪末期构造挤压再次形成断裂-裂缝,孔缝储集体被分割,储集空间基本定型。在断裂裂缝、古地貌及火山旋回界面控制下,孔缝储集体纵向上表现出分带性,横向上表现为古地貌高地储层厚、古斜坡储层薄的透镜状特征,整体表现出由裂缝、溶蚀孔及溶蚀缝构成的“多层楼式”复杂储集体。形成的孔缝型火山岩储层地质模型对火山岩储层预测及油气勘探提供有价值的参考。

关键词:裂缝;溶蚀孔;火山旋回;中-基性火山岩;石炭系;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Controlling factors for the formation of pore-fracture reservoirs in intermediate-basic volcanic rocks: A case study of the Carboniferous Jinlong Block, Junggar Basin

Kong Chuixian^{1,2}, Chen Xuan¹, Qin Jun², Lu Zhiyuan², Gao Yang², Shen Bo¹, Chen Aizhang¹

[1. Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technology (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China]

Abstract: This paper analyzed the characteristics of volcanic reservoir space and its formation process in the case of intermediate-basic volcanic rock in the Carboniferous Jinlong Block, by integrating the core, thin section, logging, seismic and analytical data. The results show that: (1) feldspar and other minerals in the upper volcanic cycle altered to zeolite and chlorite and formed an unstable layer during the volcano eruption quiescent intervals; (2) tectonic movement at the Late Carboniferous developed fault-fracture and unconformity, and then meteoric freshwater could cause vertical and transverse dissolution along the fault-fracture and the unstable layer at the top of the cycle; (3) new fault-fracture formed through the tectonic activity of the Late Jurassic period, and the pore-fracture reservoir was compartmentalized and the accumulation space was basically finalized. Under the control of fault-fracture, palaeo-geomorphology and contact surfaces of the volcanic cycles, the reservoirs are characterized by zonation in the vertical direction and by lenticular geometry with greater thickness in the paleo high and lesser thickness down the paleo-slope. As a whole, the reservoir is a complex “multi-zone overlapping” reservoir, composed of fractures, dissolved pores, and dissolved fractures. The geological model of pore-fracture volcanic reservoir is of great value for volcanic reservoir prediction and oil/gas exploration.

Key words: fracture, dissolved pore, volcanic cycle, intermediate-basic volcanic rock, Carboniferous, Junggar Basin

收稿日期:2017-06-26;修订日期:2018-01-20。

第一作者简介:孔垂显(1975—),男,高级工程师,油田开发。E-mail:kchuixian@petrochina.com.cn。

通讯作者简介:陈轩(1983—),男,博士,副教授,沉积储层和油气田勘探。E-mail:chenxuanwolf@163.com。

基金项目:中石油重大科技专项(2017E-0405);中石油股份公司科技项目(k2017-18-05);国家自然科学基金项目(41504103)。

近些年,我国火山岩油气藏勘探相继在准噶尔盆地、松辽盆地、三塘湖盆地及渤海湾盆地等盆地取得重大突破,展现出良好的潜力^[1]。火山岩储层具有岩性复杂、孔隙结构复杂、多裂缝发育及非均质性强的特点^[2-4]。火山岩储集空间的形成控制因素是复杂的,一般受冷凝作用、火山间隙期暴露作用、风化壳岩溶作用、烃类充注作用、热液活动及断裂-裂缝作用的影响^[5-6]。不同区域不同储集空间类型的火山岩储层形成控制因素也不尽相同。前人在这个方面做了大量的探讨,如火山岩岩相与储层^[7]。溶蚀作用与火山岩储集体^[8-14],烃类充注及热液活动与火山岩溶蚀孔^[10,13-14],火山旋回/期次与火山岩孔隙^[15],冷凝缝、成岩缝、风化破裂缝及构造缝与火山岩裂缝储层^[16],这些认识极大地丰富了火山岩储层的内涵。随着勘探开发研究的深入,尤其是准噶尔盆地火山岩储层认识的深入,发现多数火山岩储集空间为双重介质型。针对该类型储层的认识,前人多从地质特征描述及渗流特征、开发响应方面开展工作^[6,17-18],而从地质成因角度探讨孔隙、裂缝及孔缝耦合关系,揭示孔缝体形成过程、控制因素及发育规律的研究还比较薄弱。

金龙区块目前有钻井20多口,其中取心井8口,分析化验资料1 000余块,三维地震全覆盖。笔者基于地质、测井、地震及分析化验资料的分析,从储层特征描述出发,探讨孔缝型火山岩储层形成过程、控制因素及分布规律,以求为发展储层地质学及指导火山岩油气勘探开发提供有价值的参考。

1 地质背景

金龙区块位于准噶尔盆地西北缘中拐凸起北部,毗邻沙湾凹陷及玛湖凹陷两个生烃区,是富油气聚集区^[19]。该区发育石炭系中-基性火山岩和二叠系-白垩系碎屑岩,主要经历了石炭纪末期及侏罗纪末期挤压构造运动,石炭系顶部见明显的削蚀及超覆地震反射,具有区域角度不整合的特征(图1)。2012年金龙W1井在石炭系试油,日产油17.28 t,金龙区块油藏发现。一批预探井及评价井钻探后,在2014年上交控制储量 $4\,117 \times 10^4$ t,含油面积20.1 km²。

2 中-基性火山岩储集空间特征

2.1 孔隙

金龙区块主要发育溶蚀孔及残余杏仁孔。溶蚀孔

主要发育在玄武岩、安山岩及火山角砾岩中,包括斜长石粒内溶孔、辉石溶孔及火山角砾粒内溶孔(图2a-d);残余杏仁孔主要发育在玄武岩及安山岩中,且残余孔隙中仍见溶蚀作用(图2c)。孔隙发育段在测井曲线上对应的“三孔隙度”曲线中,AC及CNL值较高,DEN值较低(图3)。

2.2 裂缝

构造缝指火山岩固结成岩后,在构造应力作用下形成的裂缝。本区构造缝具有高角度、平直规则、充填程度不均一及含油性好的特征(图4a,b),成像测井显示正弦曲线,常规测井响应规律不明显(图3)。溶蚀缝是在原始隙缝(如冷凝收缩缝、破裂微裂缝、风化破裂缝及构造缝)的基础上扩大溶蚀,该类缝多与溶蚀孔共生,表现为溶蚀孔缝的复合体(图2b,图2c,图4c,图4d)。工区内有成像测井资料井7口,裂缝解释成果表明,本区以中-高角度裂缝为主,倾角大于45°的占总裂缝条数的74%;有效缝中倾角大于45°的裂缝占总裂缝条数的68%(表1)。结合裂缝参数解释成果分析,明确工区内发育NNE走向及近EW走向两组裂缝,与两组断裂走向耦合关系明显,进而认为本区裂缝主要是两个期次的产物(图1)。

综合上述分析,本区主要的储集空间类型为孔隙及裂缝,而孔隙既可以在爆发相的角砾岩中发育,也可以在溢流相的安山岩和玄武岩中发育。含油性好的岩性,均表现为孔隙及裂缝发育(图2)。薄片鉴定进一步证实溶蚀孔多有溶蚀缝连通(图2b,c)。因此,可以认为本区储集空间主体为裂缝、溶蚀孔及溶蚀孔缝体,统称为孔缝复合储集体。

3 孔缝储集体形成过程及发育规律

3.1 孔缝储集体形成过程

1) 早期火山旋回间断面对孔缝储集体的影响

由于火山活动的复杂性,目前在火山旋回、火山期次识别划分上没有形成较为统一的认识^[20]。旋回界面一般包括风化壳、沉积夹层及火山灰,凝灰岩层或火山角砾岩层代表一次火山活动的终止或开始,是常见的火山旋回界面^[15]。金龙W5井取心段分析表明:宏观上,可以看到两套爆发相夹一套溢流相地层,表明一个火山旋回(或期次)的存在,旋回界面之下的溢流相安山岩中见大量溶蚀孔隙,孔隙度向下有减小的趋势(图3),而对比剖面上可以看到基质储层具有明显的分层性并与旋回界面密切相关(图5);微观上,杂色火

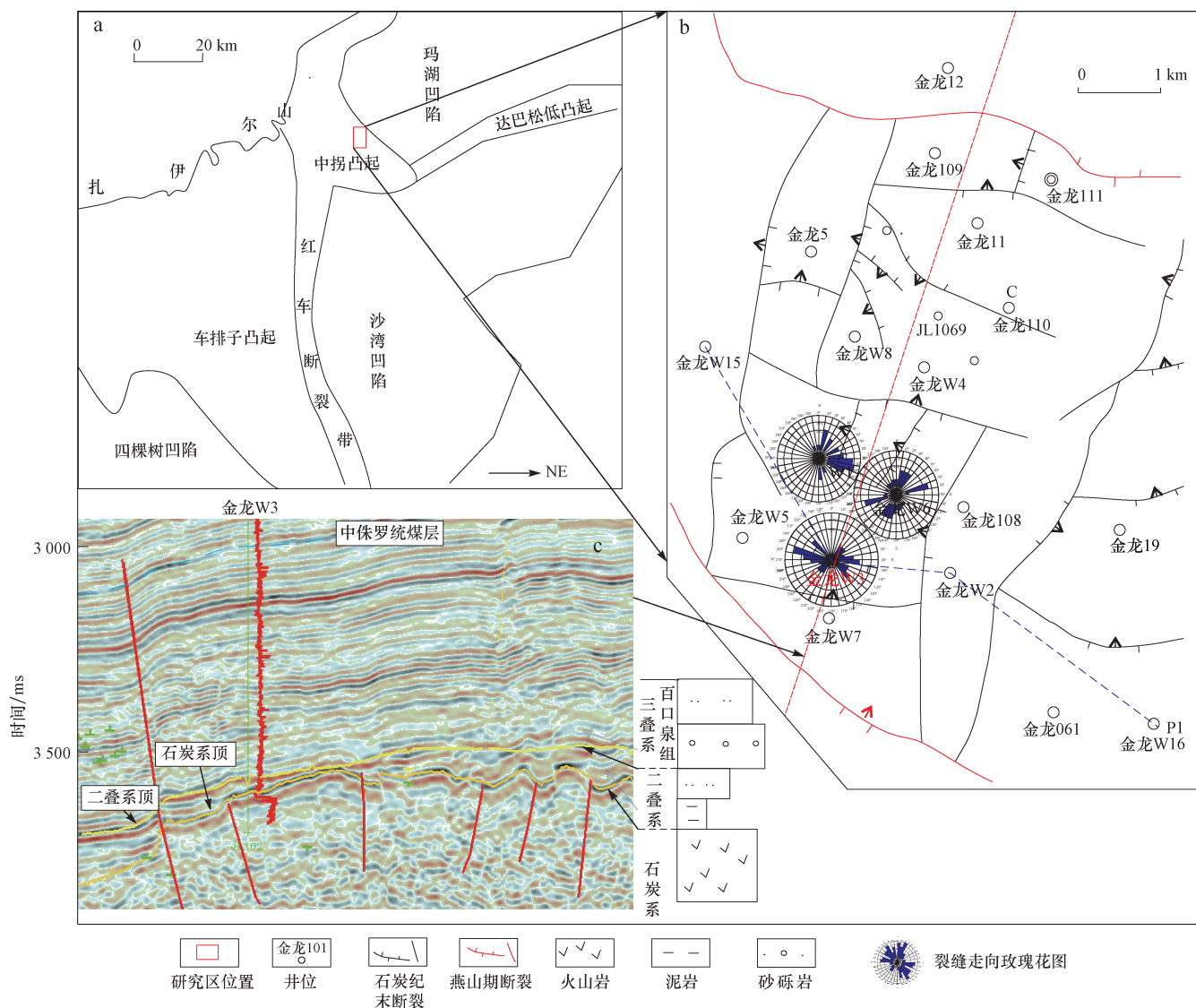


图1 研究区构造划分及位置

Fig. 1 Division and location of structural units in the study area

a. 金龙区块区域位置; b. 金龙区块地质背景; c. 过金龙 W3 井地震剖面

山角砾岩松散且粘土化程度高(图3a,b),凝灰岩中斑晶呈现褐黄色粘土化特征,且基质及裂缝含油(图3c),氧化蚀变特征明显。在角砾岩之下的安山岩中见斜长石内溶孔及绿泥石化现象,且扫描电镜中发现长石粒内溶孔与丝状绿泥石共生(图2f),斜长石、粘土矿物、方沸石与溶蚀孔共存(图2e)。通过这一系列现象,不难重构出一条认识:火山喷发间隙期,在大气淡水、低温及弱碱性成岩环境下,火山旋回上部中-基性火山岩中的斜长石、辉石及角闪石等主要造岩矿物发生蚀变,部分转化形成绿泥石及方沸石等矿物,与此同时也可以形成部分溶蚀孔缝,这一过程造成了旋回上部的不稳定性,为后期建设性成岩作用奠定了基础。这个论证过程最大的薄弱点在于难以区分后期火

山岩顶部风化壳作用的叠加影响。一般来说,粘土化、绿泥石化及方沸石的存在可以支撑低温、弱碱性早期成岩环境的认识,宏观上基质储层多层分带性且与旋回界面密切相关,加之前人关于火山旋回界面与储层关系的认识^[10-15],能够支撑本火山旋回界面对基质储层形成影响的认识。

2) 石炭系顶部风化壳对孔缝储集体形成的影响

本区石炭纪末期经历了明显的构造运动,并造成数百万年的暴露,为储层形成奠定了基础^[8-9]。裂缝成像测井解释成果及区域断裂特征分析表明,本区主要发育石炭纪末期逆断裂及侏罗纪逆断裂,并形成了两组不同走向的裂缝系统,可以看出裂缝的形成明显受构造断裂作用的影响(图1)。分析基质裂缝储层

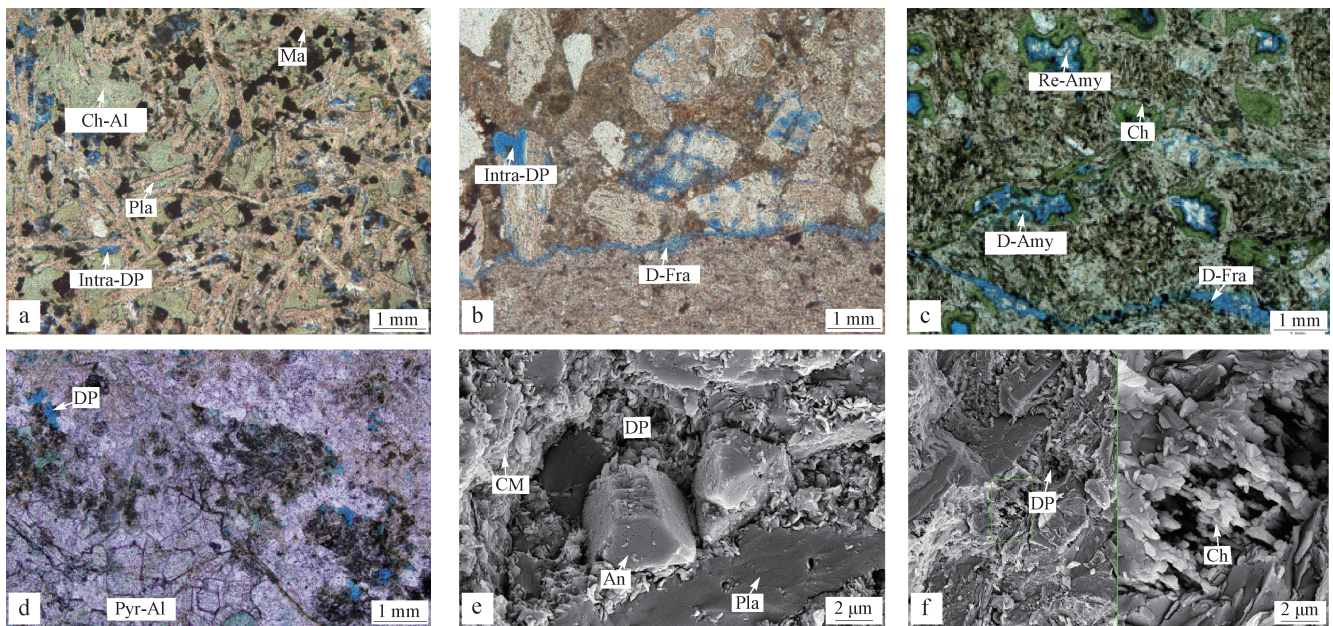


图2 准噶尔盆地金龙区块储集空间镜下特征

Fig. 2 Microscopic characteristics of reservoir space in the Jinlong Block, Junggar Basin

a. 安山岩,斜长石(Pla)表明污浊,粘土矿物化严重,见斜长石粒内溶孔(Intra-DP),见绿泥石化(Ch-Al),单偏光,金龙 W5 井,埋深 3 041.74 m; b. 火山角砾岩,粒内溶蚀孔(Intra-DP)孔及不规则溶蚀缝(D-Fra),溶蚀孔缝连通,构成溶蚀孔缝体,单偏光,金龙 W4 井,埋深 3 171 m; c. 玄武岩,残余杏仁孔(Re-Amy)、杏仁溶孔(D-Amy)及溶蚀缝(D-Fra),杏仁孔内绿泥石充填(Ch),单偏光,金龙 W5 井,埋深 3 035 m; d. 玄武岩,辉石发生蚀变(Pyr-Al),见辉石内溶蚀孔(DP),单偏光,金龙 W2 井,埋深 3 279.4 m; e. 斜长石(Pla)边缘见粘土矿物(CM)、方沸石(An),见溶蚀孔(DP),扫描电镜,金龙 W5 井,埋深 3 039.5 m; f. 斜长石内溶蚀孔(DP),绿溶蚀孔内泥石充填(Ch),扫描电镜,金龙 W5 井,埋深 3 041.74 m

微观及宏观响应特征表明:①岩心中发育平直高角度裂缝(构造缝)与溶蚀孔共生(图 4a,b),构成溶蚀孔缝储集体;②薄片中可以见到火山角砾岩及玄武岩中溶蚀孔与溶蚀缝共生(图 2b,c);③宏观上,断裂裂缝发育强度大的古地貌高地,基质及裂缝储层发育程度也比较高;古斜坡基质孔发育程度比较低(图 5)。由此不难重构出:石炭纪末期构造运动形成断裂裂缝系统及风化壳,大气水沿着断裂-裂缝系统进行垂向溶蚀,并流经早期旋回顶部不稳定层进行侧向溶蚀,形成孔缝储集体的雏形。

该现象的解析过程还存在一个争议:溶蚀孔缝的形成是否还受其它溶蚀作用影响?如有机酸或深部酸性热液的溶蚀作用。储层对比剖面上可以看出距离石炭系顶部不整合面之下 200 多 m 的位置仍有基质储层发育,且断裂裂缝发育强度大的古地貌高地,基质及裂缝储层发育程度也比较高,古斜坡基质孔发育程度比较低(图 5)。前人研究认为,准噶尔盆地西北缘石炭纪火山岩油藏成藏期次有中三叠世、三叠纪末一早侏罗世及中-晚侏罗世^[21],也肯定了油气充注过程中有机酸与水岩反应对火山岩溶蚀储层形成的贡献^[2,22],深部热液对火山岩储层形成的影响也有报道^[10]。相对于表生溶蚀(风化壳岩溶及火山

喷发间隙期岩溶),不论是有机酸作用还是深部热液作用,两者均在埋藏成岩阶段,而这一过程的成岩效应是极其复杂的,其对溶蚀空间形成的贡献目前还没有形成定论^[2,10,13,22]。因此,根据本区溶蚀空间发育特征及前人风化壳溶蚀作用的认识^[5,8,9,22],可以认为表生岩溶是本区溶蚀储集空间形成的主控因素。

3) 晚期构造运动对孔缝储集体形成的影响

侏罗纪末期构造挤压再次形成断裂-裂缝,孔缝储集体被分割,储集空间基本定型。该认识形成的主要证据有:①高角度开启裂缝中见方解石充填,且含油(图 4a,b);②地震剖面上断裂解释表明侏罗纪之后的构造运动对本区影响较小(图 1)。该认识形成的难点在于构造裂缝形成期次的厘定。从高角度裂缝中提取方解石开展碳氧同位素及流体包裹体均一温度测试,运用碳氧同位素恢复成岩古地温^[23]及均一温度,测试结果表明方解石形成的成岩温度在 90 ℃ ~ 120 ℃(图 4),结合本区埋藏热史的分析^[24],可以厘定裂缝形成于侏罗纪。

在此基础上,结合裂缝特征描述以及两期构造裂缝特征(图 4),可以明确开启、含油且未见明显溶蚀现象的高角度缝为侏罗纪构造缝,进而认为溶蚀缝与溶

a. 灰绿色安山岩,高角度开启裂缝,方解石不均一充填,油沿裂缝外溢,构造缝,未见沿裂缝的溶蚀现象,金龙 W2 井,埋深 3 319.92 m; b. 灰色安山岩,高角度,含油,构造缝,未见沿裂缝的溶蚀现象,金龙 W5 井,埋深 3 047 m; c. 灰褐色安山岩,溶蚀孔与溶蚀缝共生,基质裂缝含油,金龙 W2 井,埋深 3 279.1; d. 灰色凝灰岩,溶蚀孔缝发育,基质裂缝含油,金龙 W5 井,埋深 3 051.8 m

表 1 准噶尔盆地金龙区块裂缝参数解释成果
Table 1 Interpretation of fracture parameters in the Jinlong Block, Junggar Basin

井号	分布	裂缝密度/(条·m ⁻¹)	裂缝长度/m	裂缝宽度/mm	裂缝孔隙度/%	裂缝倾角/(°)
金龙 W1	范围	0.03 ~ 11.43	0.04 ~ 1.50	0.002 ~ 1.804	0.01 ~ 1.01	12.5 ~ 84.2
	平均	2.46	0.73	0.106	0.22	55.8
金龙 W2	范围	0.30 ~ 10.94	0.073 ~ 1.76	0.001 ~ 0.231	0.02 ~ 0.38	23.1 ~ 81.3
	平均	2.83	0.56	0.022	0.03	55.3
金龙 W3	范围	0.11 ~ 13.57	0.03 ~ 2.01	0.004 ~ 0.087	0.01 ~ 0.11	25.8 ~ 83.1
	平均	3.31	0.59	0.016	0.03	59.7
金龙 W4	范围	0.36 ~ 13.09	0.16 ~ 1.93	0.008 ~ 0.052	0.01 ~ 0.11	26.9 ~ 87.3
	平均	2.51	0.70	0.023	0.04	57.6
金龙 W5	范围	0.43 ~ 37.64	0.06 ~ 4.93	0.004 ~ 2.591	0.04 ~ 2.30	17.0 ~ 85.9
	平均	5.74	1.49	0.150	0.29	54.2
金龙 W6	范围	0.32 ~ 20.29	0.06 ~ 5.16	0.009 ~ 4.302	0.01 ~ 2.57	8.5 ~ 76.6
	平均	6.02	1.70	0.154	0.53	44.0
金龙 W8	范围	0.10 ~ 12.96	0.11 ~ 2.34	0.001 ~ 3.323	0.01 ~ 2.29	19.6 ~ 84.2
	平均	3.52	0.58	0.400	0.44	50.3

蚀孔共生且含油的高角度缝为石炭纪末期的构造缝。由此,可以进一步证明溶蚀孔缝复合体多受石炭纪末期大气水溶蚀作用而形成。

3.2 孔缝储集体发育规律

建立井震结合对比剖面,将二叠系顶面层拉平,镜像反映石炭系顶面古地貌特征。金龙 W2 及金龙 W3 井为古地貌高地区,金龙 W16 井及金龙 W15 井为古斜坡区。地震剖面指导断裂裂缝认识,古地貌高地区发育较多的断裂裂缝,斜坡区断裂裂缝较少。

1) 储层垂向上具有明显分带性

从上至下发育土壤层—水解带—淋滤带—崩解带—未风化带,其中淋滤带储层最好,崩解带次之。石炭系顶部与二叠系之间为明显的区域不整合面。受该不整合面的影响,风化壳岩溶作用在本区十分发育,至上而下形成土壤层—水解带—淋滤带—崩解带—未风化带(图 5)。土壤层是火山岩完全强蚀变后的产物,成土状,储集性能差(图 5c);水解带是火山岩强蚀变后的产物,以火山岩细小颗粒和泥岩为主,储集性能较差(图 5d);溶蚀是火山岩较强蚀变后的产物,次生孔隙和裂缝发育(图 5e);崩解带是火山岩中等蚀变产物,以较大火山岩碎块为主,常见角砾岩化,次生孔隙和裂缝较发育,但裂缝和孔隙常被充填或半充填(图 5f),崩解带之下为未风化母岩。

2) 储层横向上具有明显分块性

储层横向上表现出古高地储层厚、古斜坡储层较薄的透镜状。古地貌高部位石炭纪末期断裂裂缝比较发育,有利于大气水向下渗流,溶蚀作用波及深度大,形成较厚的溶蚀储层段。而古斜坡区断裂裂缝欠发育,溶蚀储层段比较薄(图 5),整体呈现出透镜状特征。碳酸盐岩由于本身容易被溶解的特性,可以发生大规模的顺层岩溶^[25],而火山岩由于本身难于被溶解,是否能像在碳酸盐岩地层中那样发生顺层溶蚀,形成横向溶蚀孔隙发育带,这难以评价。工区火山岩风化壳顺层溶蚀作用有可能在早期火山喷发间隙期相关的不稳定带发生,但整体顺层溶蚀作用仍然不强(图 5)。因此,可以推断从古高地到斜坡区储层横向连通性较差,但在古高地由于受断裂及其相关的裂缝沟通作用,可以形成网格状的溶蚀通道,造成储层横向及纵向连通性较好。这一认识对储层对比及开发方案制定有一定的借鉴意义。

3) “多层楼式”复杂储集体

在多期断裂裂缝叠加作用下,最终形成由裂缝、溶蚀孔及溶蚀缝构成的“多层楼式”复杂储集体。该认识的内涵表现为早期火山喷发间隙期形成旋回顶部不稳定层,风化壳岩溶作用在早期不稳定层及断裂裂缝带进一步发育,侏罗纪晚期断裂裂缝叠加改造。由此可以得出,风化壳之下的淋滤带最有利,向下可以发育多套储集层,深度下限可达数百米。

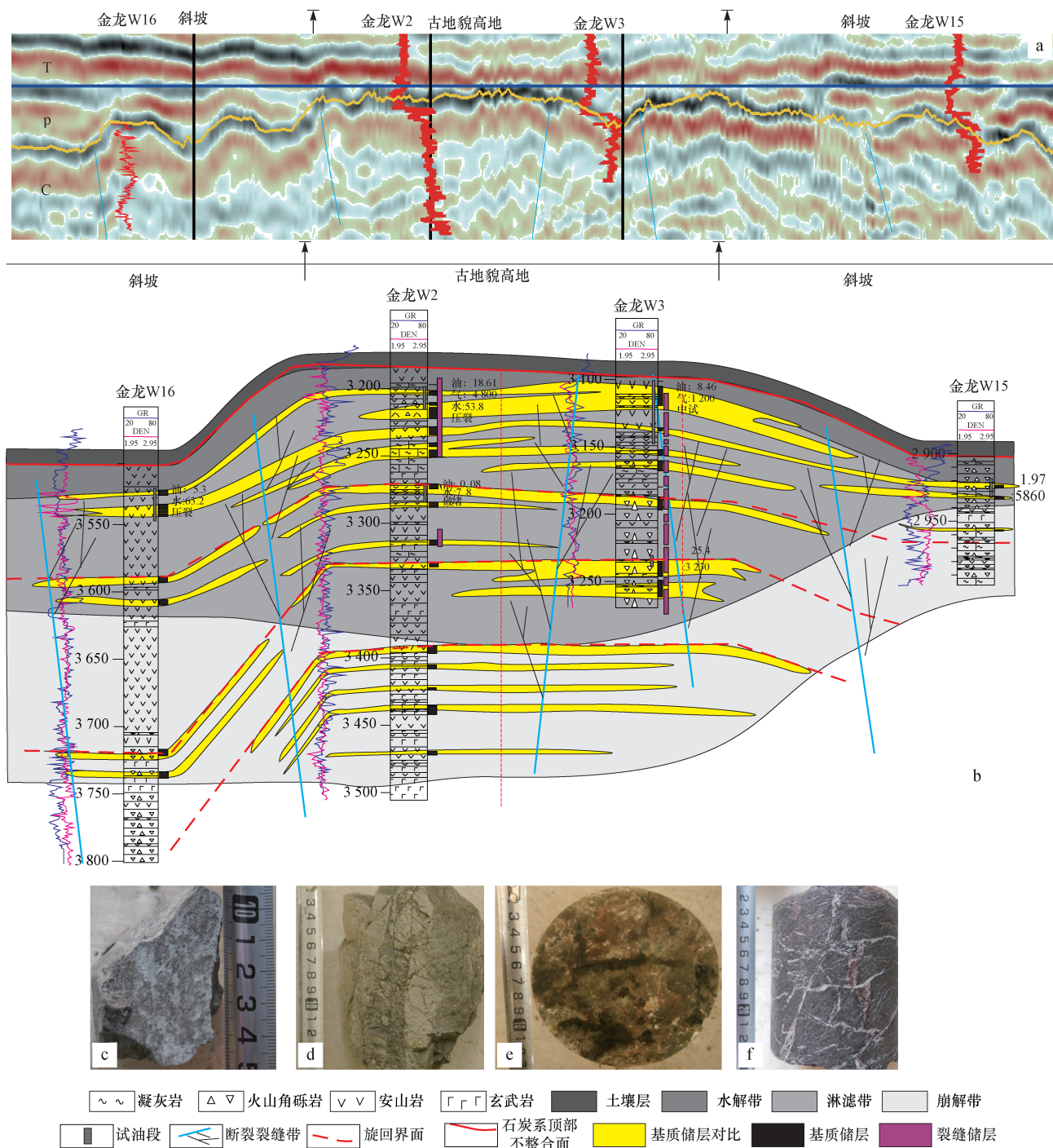


图 5 准噶尔盆地金龙区块火山岩储集空间发育特征解析图

Fig. 5 Analysis plot of volcanic reservoir space development characterization in the Jinlong Block, Junggar Basin

a. 过金龙 W16 井—W15 井地震解释剖面;b. 过金龙 W16 井—W15 井储层地质解释剖面;c. 褐灰色安山岩, 粘土化程度高, 土壤层, 金龙 W16 井, 埋深 3 507 m;d. 灰褐色安山岩, 染手(粘土化), 见裂缝, 溶蚀现象不发育水解带, 金龙 W2 井, 埋深 3 200.5 m;e. 灰色安山岩, 溶蚀孔缝, 含油, 淋滤带, 金龙 W2 井, 埋深 3 200.5 m;f. 深灰色玄武岩, 不规则裂缝角砾化原岩, 方解石及红色氧化物充填裂缝, 崩解带, 金龙 W15 井, 埋深 2 947.1 m

表 2 准噶尔盆地金龙区块高角度开启缝中方解石同位素及均一温度

Table 2 Isotopic and homogenization temperature analysis of calcite at high angle opening fractures in the Jinlong Block, Junggar Basin

井号	深度/m	岩性	裂缝类型	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	恢复温度/℃	均一温度/℃
金龙 W2 井	3 319.9	安山岩	高角度开启缝	-7.3	-17.3	117	—
金龙 W3 井	3 105.2	玄武岩	高角度开启缝	-9.4	-18.2	123	90 ~ 120

注:两种测试由长江大学油气储层地质实验室完成。

4 结论

1) 金龙区块火山岩储集空间类型主要为溶蚀孔、溶蚀缝及裂缝,表现出孔缝储集体的特征。

2) 火山喷发间隙期,火山旋回上部斜长石等矿物向方沸石、绿泥石蚀变,形成不稳定层;石炭纪晚期构造运动造成断裂-裂缝发育及不整合面的形成,大气水沿着断裂-裂缝及旋回顶部不稳定层发生纵向及横向溶蚀,形成孔缝储集体雏形;侏罗纪末期构造挤压再次形成断裂-裂缝,孔缝储集体被分割,储集空间基本定型。

3) 孔缝储集体纵向上表现出分带性,横向上表现为古地貌高地储层厚、古斜坡储层薄的透镜状特征,整体表现出由裂缝、溶蚀孔及溶蚀缝构成的“多层楼式”复杂储集体。

参 考 文 献

- [1] 侯连华,朱如凯,赵霞,等. 中国火山岩油气藏控制因素及分布规律[J]. 中国工程科学,2012,14(6):77-86.
Hou Lianhua, Zhu Rukai, Zhao Xia, et al. The control factors and distribution laws of volcanic oil and gas reservoir in China[J]. Chinese Engineering Science, 2012, 14(6): 77-86.
- [2] 孟元林,胡越,李新宁,等. 致密火山岩物性影响因素分析与储层质量预测-以马朗一条湖凹陷条湖组为例[J]. 石油与天然气地质,2014,35(2):244-253.
Meng Yuanlin, Hu Yue, Li Xinning, et al. Controlling factors on physical property of tight volcanic rocks and reservoir quality prediction: a case study of the Tiaohu Formation in Marlang-Tiaohu Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 244-253.
- [3] Sruga P, Rubinstein N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquen basins. Argentina[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91: 115-129.
- [4] Feng Z. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: a case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25: 416-432.
- [5] 董国栋,张琴,朱筱敏,等. 火山岩储层研究现状及存在问题-以准噶尔盆地克-夏地区下二叠统火山岩为例[J]. 石油与天然气地质,2012,33(4):511-520.
Dong Guodong, Zhang Qin, Zhu Xiaomin, et al. Current status and problems of volcanic reservoir study: An example from the Lower Permian volcanic rocks in Ke-Xia area of Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4): 511-520.
- [6] 赵宁,石强. 裂缝孔隙型火山岩储层特征及物性控制因素:以准噶尔盆地陆东五彩湾地区石炭系火山岩为例[J]. 天然气地球科学,2012,32(10):14-23.
Zhao Ning, Shi Qiang. Characteristics of fractured and porous volcanic reservoirs and the major controlling factors of their physical properties: A case of Carboniferous volcanic rocks in Ludong-Wucaiwang, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 82-87.
- [7] 王小军,赵飞,张琴,等. 准噶尔盆地金龙油田佳木河组火山岩储层孔隙类型及特征[J]. 石油与天然气地质,2017,38(1):144-152.
Wang Xiaojun, Zhao Fei, Zhang Qin, et al. Pore types and characteristics of volcanic reservoirs of the Jiamuhe Formation in Jinlong oil-field, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 144-152.
- [8] 宋明永,赵乐强,吴春文,等. 准噶尔盆地车排子地区石炭系顶部风化壳结构及其控藏作用[J]. 石油与天然气地质,2016,37(3):313-322.
Song Mingyong, Zhao Yueqiang, Wu Chunwen, et al. Structure and reservoir-controlling of top Carboniferous weathering crust in Chepaizi area, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3): 313-322.
- [9] 侯连华,罗霞,王京红,等. 火山岩风化壳及油气地质意义——以新疆北部石炭系火山岩风化壳为例[J]. 石油勘探与开发,2013,40(3):257-265.
Hou Lianhua, Luo Xia, Wang Jinghong, et al. Weathered volcanic crust and its petroleum geologic significance: A case study of the carboniferous volcanic crust in northern Xinjiang [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 257-265.
- [10] 朱世发,朱筱敏,吴冬,等. 准噶尔盆地西北缘下二叠统油气储层中火山物质蚀变及控制因素[J]. 石油与天然气地质,2014,35(1):77-86.
Zhu Shifa, Zhu Xiaomin, Wu Dong, et al. Alteration of volcanics and its controlling factors in the Lower Permian reservoirs at northwestern margin of Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 77-86.
- [11] 孙玉善,刘新年,张艳秋,等. 中国西部地区方沸石胶结相与碎屑岩次生优质储集层形成机制[J]. 古地理学报,2014,16(4):517-527.
Sun Yushan, Liu Xinnian, Zhang Yanqiu, et al. Analcite cementation facies and forming mechanism of high-quality secondary clastic rock reservoirs in western China [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(4): 517-527.
- [12] 刘万涛,黄玉龙,庞彦明,等. 松辽盆地营城组中基性火山岩成岩作用:矿物晶出序列、杏仁体充填和储层效应[J]. 岩石学报,2010,26(1):158-164.
Liu Wanzhu, Huang Yulong, Pang Yanming, et al. Diagenesis of intermediate and mafic volcanic rocks of Yingcheng Formation in the Songliao basin: Sequential crystallization, amygdule filling and reservoir effect [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 158-164.
- [13] 赵海玲,王成,刘振文,等. 火山岩储层斜长石选择性溶蚀的岩石学特征和热力学条件[J]. 地质通报,2009,28(4):412-419.
Zhao Hailing, Wang Cheng, Liu Zhenwen, et al. Characteristics of petrology and thermo dynamics of selective dissolution of plagioclase in volcanic reservoir rocks [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(4): 412-419.
- [14] 雷天柱,石新璞,孔玉华,等. 溶蚀在形成碱性火山岩优质储集层中的作用——以准噶尔盆地陆西地区石炭系火山岩为例[J]. 新疆石油地质,2008,29(3):412-419.
Lei Tianzhu, Shi Xinpu, Kong Yuhua, et al. Effect of dissolution on

- forming high-quality reservoir in alkaline volcanic rocks: An example from carboniferous volcanic rocks in Luxi area in Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 29(3): 412–419.
- [15] 衣健, 王璞珺, 唐华风, 等. 火山地层界面的地质属性、地质内涵和储层意义——以中国东北地区中生代—新生代火山岩为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(3): 324–337.
- Yi Jian, Wang Pujun, Tang Huafeng, et al. Geological property, geological connotation and reservoir significance of volcano stratigraphic boundary: A case study of the Mesozoic & Cenozoic volcanic rocks in Northeastern China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(3): 324–337.
- [16] 范存辉, 秦启荣, 支东明, 等. 准噶尔盆地西北缘中拐凸起石炭系火山岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(1): 82–87.
- Fan Cunhui, Qin Qirong, Zhi Dongming, et al. Controlling factors and characteristic of Carboniferous volcanic reservoir fractures of Zhongguai Uplift in northwestern Margin of Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(1): 82–87.
- [17] 高树生, 钱根宝, 王彬, 等. 新疆火山岩双重介质气藏供排气机理数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(1): 276–281.
- Gao Shusheng, Qian Genbao, Wang Bin, et al. Numerical simulation study of mechanism for gas supplying and draining in volcanic gas reservoir in Xinjiang based on dual media model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 276–281.
- [18] 王洛, 李江海, 师永民, 等. 准噶尔盆地滴西地区石炭系火山岩储集性能分布规律研究[J]. *岩石学报*, 2016, 32(3): 877–891.
- Wang Luo, Li Jianghai, Shi Yongmin, et al. Study on distribution patterns of reservoir property of carboniferous volcanic rocks in Dixi area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 32(3): 877–891.
- [19] 匡立春, 薛新克, 邹才能, 等. 火山岩岩性地层油藏成藏条件与富集规律——以准噶尔盆地克—百断裂带上盘石炭系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(3): 285–291.
- Kuang Lichun, Xue Xinke, Zou Caineng, et al. Oil accumulation and concentration regularity of volcanic lithostratigraphic oil reservoir: A case from upper-plate Carboniferous of KA-BAI fracture zone, Junggar Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(3): 285–291.
- [20] 黄玉龙, 王璞珺, 门广田, 等. 松辽盆地营城组火山岩旋回和期次划分——以盆缘剖面和盆内钻井为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(6): 1184–1191.
- Hang Yulong, Wang Pujun, Men Guangtian, et al. Division of volcanic cycles and stages of the Yingcheng Formation of the Songliao Basin—Take the cross sections at the margin and the boring holes as examples[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(6): 1184–1191.
- [21] 江汝锋, 查明, 陈中红, 等. 克拉玛依油田石炭系火山岩油气成藏期次及成藏演化[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 28(6): 27–34.
- Jiang Rufeng, Zha Ming, Chen Zhonghong, et al. Hydrocarbon accumulation period and evolution of Carboniferous volcanic in Karamay Oilfield[J]. *Journal of Xi'an Petroleum University (Natural Science Edition)*, 2013, 28(6): 27–34.
- [22] 张越迁, 陈中红, 唐勇, 等. 准噶尔盆地克—百断裂带火山岩储层特征研究[J]. *沉积学报*, 2014, 32(4): 754–766.
- Zhang Yueqian, Chen Zhonghong, Tang Yong, et al. Characteristics of volcanic reservoirs in Ke-Bai fault zone of northwestern Junggar Basin, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(4): 754–766.
- [23] 牛海瑞, 杨少春, 汪勇, 等. 准噶尔盆地车排子地区火山岩裂缝形成期次分析[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(1): 74–81.
- Niu Hairui, Yang Shaoyong, Wang Yong, et al. Formation periods of fractures of volcanic reservoirs in Chepaizi area, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(1): 74–81.
- [24] 李振华, 邱隆伟, 孙宝强, 等. 准噶尔盆地中拐地区佳木河组流体包裹体特征及成藏期次划分[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5): 931–938.
- Li Zhenhua, Qiu Longwei, Sun Baoqiang, et al. Fluid inclusion and charging events of natural gas Permian Jiamuhe Formation of Zhongguai, Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5): 931–938.
- [25] 韩长城, 林承焰, 鲁新便, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶斜坡断控岩溶储层特征及形成机制[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(5): 644–653.
- Han Changcheng, Lin Chengyan, Lu Xinbian, et al. Characterization and genesis of fault-controlled karst reservoirs in Ordovician carbonate karst slope of Tahe oilfield, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(5): 644–653.

(编辑 张玉银)