

文章编号:0253-9985(2012)04-0511-09

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

董国栋,张 琴,朱筱敏,鲜本忠,朱世发,牛花朋,陈青云

(中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249)

摘要:针对目前火山岩储层研究中存在的热点问题,以准噶尔盆地克-夏地区下二叠统火山岩为例进行了探讨。研究认为,火山岩分类方案混乱,不同学者在勘探和开发中采用不同的划分依据,亟需统一认识,找到一种适合中国火山岩油气勘探开发的火山岩分类方案。火山岩相方面,火山岩相非均质性强,火山爆发类型多,火山岩相及相序复杂,非同源火山岩叠置现象普遍,但火山岩探井资料有限,这给目前的火山喷发模式及火山岩相展布规律研究带来了极大的挑战;火山岩储层方面,裂缝尤其是微裂缝的发育特征及成因等研究有待加强;火山岩成岩研究更应注重地表成岩作用;火山岩储层测井解释评价方面,目前的常规测井评价技术已远不能满足火山岩储层研究,需要广泛应用先进的测井新技术来研究火山岩储层特征。

关键词:成岩作用;火山岩分类;火山岩;储层;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Current status and problems of volcanic reservoir study: an example from the Lower Permian volcanic rocks in Ke-Xia area of Junggar Basin

Dong Guodong, Zhang Qin, Zhu Xiaomin, Xian Benzong, Zhu Shifa, Niu Huapeng and Chen Qingyun

(State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Taking the Lower Permian volcanic rocks of Ke-Xia area in Junggar Basin as an example, this paper discussed the problems of volcanic reservoir research. As there is still no commonly accepted classification scheme of volcanic rocks, different classification criteria were adopted in exploration and development of volcanic reservoirs. Thus it is urgent to find a suitable classification scheme of volcanics for exploration and development of volcanic reservoirs in China. There are many big challenges in the study on the volcanic eruption patterns and facies distribution due to strong volcanic facies heterogeneity, variable eruption types, complex volcanic facies and facies sequence, common overlapping of volcanic rocks of different origins, as well as limited drilling data of volcanic reservoirs. The characteristics and genesis of fractures especially micro-fractures in volcanic reservoirs are still poorly understood. To solve these problems, more attentions should be paid to surface diagenesis of volcanic rocks and advanced logging techniques should be applied to research on volcanic reservoirs.

Key words: diagenesis, volcanic classification, volcanics, reservoir, Junggar Basin

1 火山岩储层研究现状

火山岩作为油气储层已经引起广大石油工作者的关注。近年来,许多学者对不同地区火山岩

储层进行了深入研究^[1-6],目前已经在火山岩分类^[7-9]、火山碎屑岩成因机理^[10]、火山岩相及火山喷发模式^[6-7,11]、火山岩储层类型及控制因素^[12-14]和火山岩储层地球物理响应特征^[15-17]方面取得了一定进展,但是火山岩油气勘探才刚刚

收稿日期:2012-05-04;修订日期:2012-06-15。

第一作者简介:董国栋(1986—),男,硕士研究生,沉积学、储层地质学。

起步,火山岩储层地质学研究仍有很多问题需要探索。

2 火山岩储层研究中存在的若干问题

2.1 火山岩储层岩石学分类

不同学者由于认识和研究目的的不同,对火山岩的分类存在差异。目前对于火山熔岩类和火山碎屑沉积岩类(沉火山碎屑岩类)的划分已经取得了一致认识,而对火山岩碎屑岩的定义还存在分歧。王德滋^[9]、孙善平等^[8]、王璞珺^[6]将火山碎屑岩按照成岩方式的差异划分为火山碎屑熔岩和火山碎屑岩,而国际地科联把火山碎屑熔岩和正常火山碎屑岩都归为火山碎屑岩这一大类中^[7]。在实际勘探和开发中,不同学者根据各自研究的方便和认识的不同,采用不同的火山岩分类方案,这给勘探带来了诸多不便。这种问题已经在渤海湾盆地、二连盆地、海拉尔盆地和苏北盆地的火山岩勘探中显得比较突出^[6]。

以准噶尔盆地克-夏地区下二叠统火山岩储层研究为例(图 1)。从图中可以看出,在 2 584 ~ 2 610 m 深度段岩性剖面上是正常的火山碎屑岩

(凝灰岩),而在 2 654 ~ 2 668 m 深度段,岩性剖面上是熔结凝灰岩,即在对克-夏地区火山岩储层研究中我们采用的是王德滋等的分类方案。而在原始的录井资料中,2 654 ~ 2 668 m 深度段是正常的火山碎屑岩(凝灰岩),即录井中借鉴了国际地科联的分类方案,将空落形成的正常的凝灰岩和热碎屑流形成的凝灰熔岩都归为火山碎屑岩类中。

笔者认为正常火山碎屑岩和火山碎屑熔岩无论是从形成机制上还是从成储机理上都存在差异,因此王德滋等的火山岩分类方案能更好的对火山岩储层展开研究,应该推广。

2.2 火山岩相研究

2.2.1 火山岩相非均质性

火山岩相非均质性强是目前火山岩相研究面临的一个重要的问题。吴颜雄等对松辽盆地营城组火山岩相量化研究表明,火山岩相平面展布基本都小于 2 km,尤其是侵出相,岩相的延伸不到 0.5 km^[18];黄玉龙等认为中基性火山岩平面展布也很小,玄武岩延伸范围一般为 10 ~ 22 km,粗面岩延伸范围一般为 3.1 ~ 6.3 km^[19]。我们通过对准噶尔盆地克-夏地区下二叠统火山岩相分析总

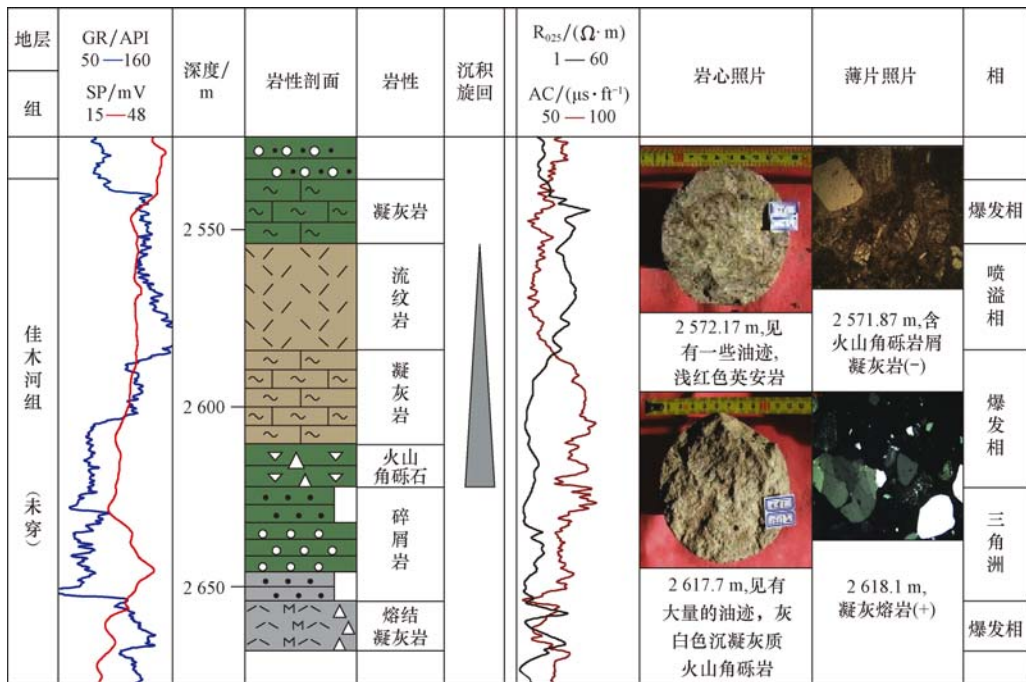


图 1 克-夏地区 481 井下二叠统佳木河组火山岩单井柱状图

Fig. 1 Stratigraphic column of the Lower Permian Jiamuhe Formation in well 481 in Ke-Xia area

结得出爆发相延伸范围小,一般小于5 km,喷溢相延伸相对较远,最大延伸可达20 km。

从图2中可以看出该区探井井距一般都大于2 km,而中国沉积盆地的探井井距也基本都是大于2 km的,显然目前探井资料根本无法准确的对火山岩相展布情况进行准确的预测。因此,需要我们运用地震资料,采用井震结合的方法才能更好的对火山岩相展布情况进行研究。王璞珺等^[6]和伍菁华等^[20]通过地震资料分别对松辽盆地北部和准噶尔盆地东部火山岩相进行识别,已经并取得了良好的应用效果。

2.2.2 火山喷发模式类型多且复杂

根据火山喷发的能量来源将火山爆发分为蒸气爆发和岩浆爆发^[21]。蒸汽爆发主要是岩浆进入含水层、冰层或沉积盆地,在熔浆高温作用下,水体迅速气化,压力升高,将上覆岩层炸碎,其又可以分为潜水爆发、潜水岩浆爆发、水下爆发和滨海爆发;而岩浆爆发则是岩浆中所含的高温气体释放所引起的爆炸,一般会伴随有岩浆喷溢地表,其

中包括气体爆发和岩浆爆发。

不同火山爆发类型,其发育的火山岩相及形成的火山岩相序存在很大的差异,比如蒸气爆发中主要发育爆发相,而对于岩浆爆发可以同时发育爆发相和喷溢相,也可以单独发育喷溢相。对于一个沉积盆地中的火山爆发,不同的地方或同一地方可以发育不同的火山爆发类型,形成不同的火山岩相,并且不同的火山爆发类型,其相序也不同,可以只发育爆发相或只发育喷溢相(图3),同样可以同时发育爆发相和喷溢相(图1),其组合可以是先爆发相再喷溢相,也可以是先喷溢相再爆发相。因此火山喷发模式受火山爆发类型的控制,其火山岩相及火山岩相组合是非常复杂的。

闫林等^[22]和张志强等^[23]通过井震结合分别对松辽盆地徐家围子断陷兴城地区营城组一段和古龙断陷营城组一段火山喷发模式进行过详细研究。研究揭示了工区的火山喷发方式,建立了研究区的火山喷发模式,对火山岩优质储层的预测具有重要的指导意义。所以,综合地质、地震资

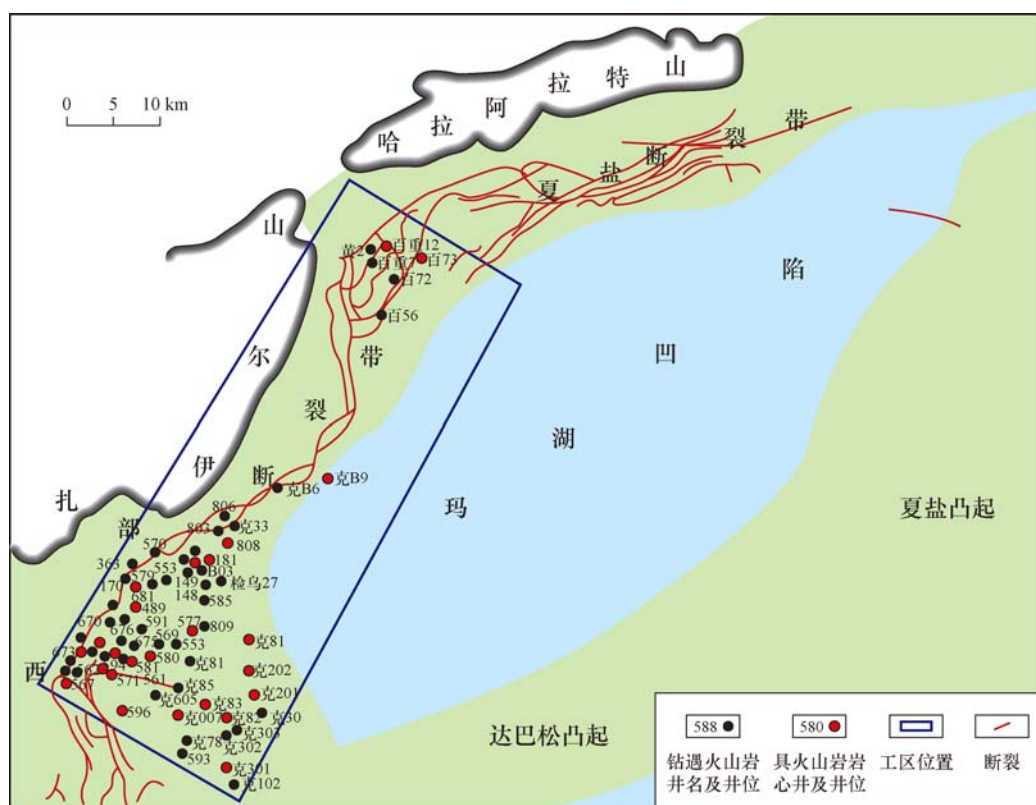


图2 克-夏地区下二叠统钻遇火山岩的探井分布

Fig. 2 Locations of exploratory wells encountering the Lower Permian volcanic rocks in Ke-Xia area

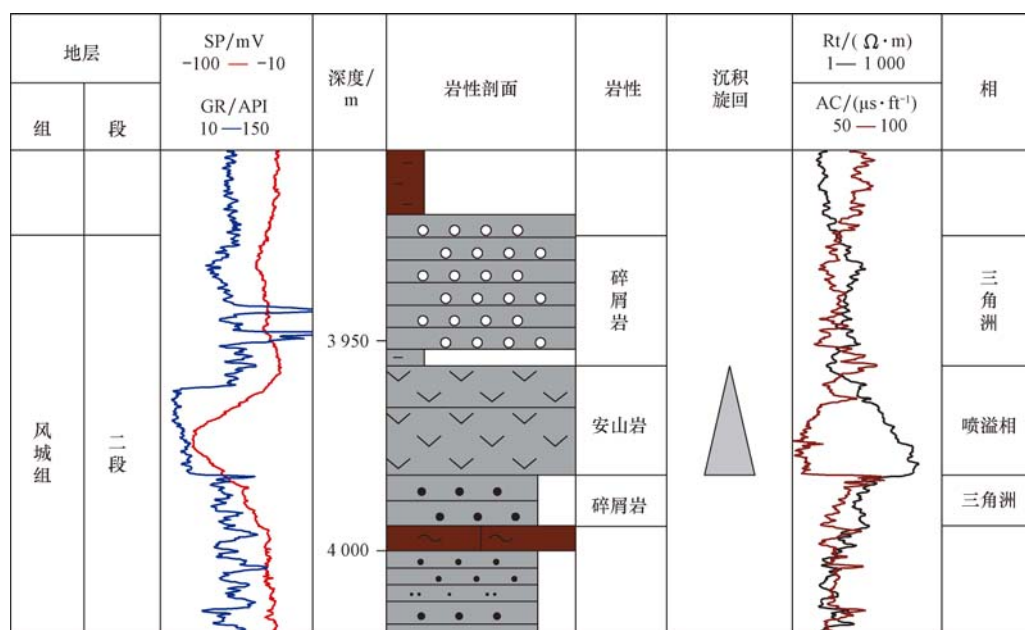


图3 克-夏地区克202井下二叠统风城组二段火山岩单井柱状图

Fig. 3 Stratigraphic column of volcanic rocks in the 2nd member of the Lower Permian Fengcheng Formation in well Ke-202 in Ke-Xia area

料,明确某一地区火山喷发模式必将对火山岩气藏的勘探开发起到积极的作用。

2.2.3 非同源火山岩相叠置

吴颜雄等认为在野外露头 and 盆地内,非同源火山岩相之间的叠置是非常普遍的^[18]。火山岩的同源是指火山喷发物源于同一火山喷口区,而火山岩相是指同源火山物质及其叠置关系^[6]。非同源火山岩相叠置是盆地火山岩相研究中需要特别注意的问题,并且对于我们目前同源火山岩相模型不适用于这种情况。

以准噶尔盆地克-夏地区567井下二叠统佳木河组火山岩为例(图4)。从岩性剖面中可以看出,在深度2170 m以下至少有300 m以上的凝灰岩段。对于凝灰岩主要发育在爆发相中,而吴颜雄等研究表明无论是空落亚相、热基浪亚相还是热碎屑流亚相,其沉积厚度一般为几十米^[18],形成几百米厚的凝灰岩的情况比较少见,因此对于发育的300多米的凝灰岩极有可能是多个火山口爆发叠置引起的,而不同火山口喷发形成的凝灰岩储层也存在一定差异。

综合考虑非同源火山物质的叠置,并建立相关的岩相模型,对火山岩相展布研究及有利储层

的预测具有重要意义。目前非同源火山岩相研究的主要方法有:宏观上通过火山岩体的分布和构造关系;微观标志主要是火山岩岩性和相序的差异,包括其地球化学成分、结构构造、矿物组合和岩性序列组合等方面的差异^[18]。

2.3 火山岩储层研究

2.3.1 火山岩储层微裂缝研究

微裂缝对火山岩储层的重要性已经引起许多学者的关注,微裂缝的特征及成因研究也取得了一定进展^[24-26]。目前对于构造缝可以通过岩心、测井和地震等方法综合对其进行研究,但对于微裂缝宽度多小于0.1 mm,只能在薄片下才能观测到,这也使得我们忽略了微裂缝对储层的改造作用。

我们对准噶尔盆地克-夏地区下二叠统火山岩和火山熔岩类孔隙类型进行了分析(图5)。研究表明火山岩中微裂缝对储层贡献大,占到所有孔隙的26.73%,尤其是在火山熔岩中,微裂缝的贡献占到了43.8%。

对于微裂缝不仅可以作为储集空间,更重要的是可以起到连通孔隙的作用,这在熔浆胶结的

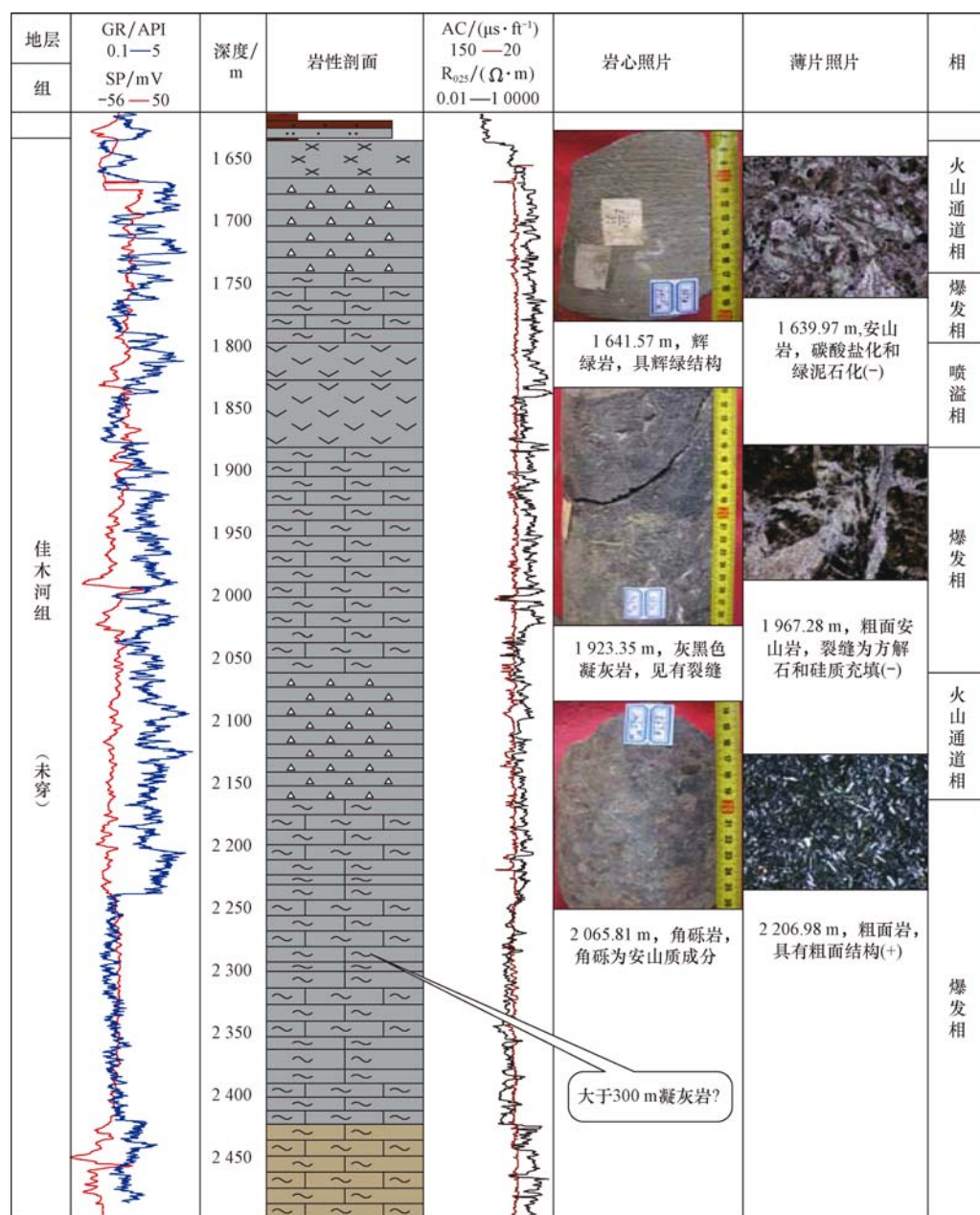


图4 克-夏地区567井下二叠统佳木河组单井柱状图

Fig. 4 Stratigraphic column of the Lower Permian Jiamuhe Formation in well 567 in Ke-Xia area

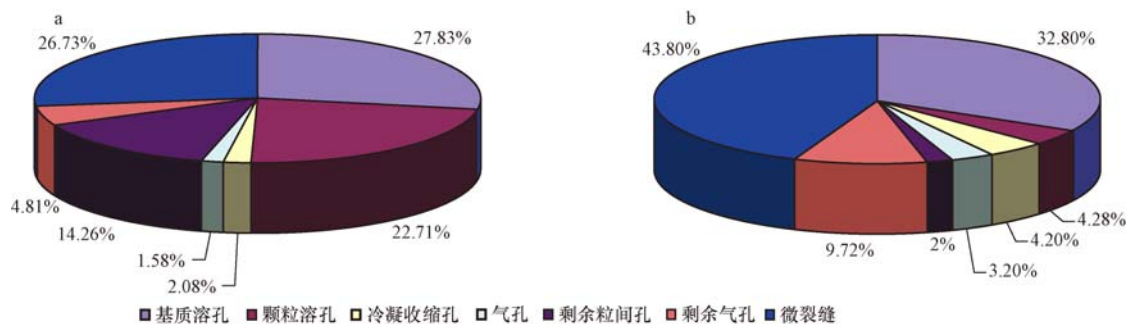


图5 克-夏地区下二叠统火山岩与火山熔岩孔隙类型

Fig. 5 Porosity types of the Lower Permian volcanic rocks and volcanic lava in Ke-Xia area

a. 火山岩, 样品 51 块; b. 火山熔岩, 样品 25 块

火山岩中显得更为重要。国内外对于火山岩微裂缝研究还很少,王拥军等认为识别微裂缝最好的方法是铸体薄片,以此为观察基础,综合应用全直径岩心、压汞曲线及测井资料可以较好地对微裂缝进行研究^[24]。

2.3.2 火山岩储层成岩作用研究

前人已经对火山岩的成岩作用进行过大量研究^[27-30]。与碎屑岩相比,火山岩的成岩作用具有其特殊性,即熔浆从喷出地表即已经开始成岩。赵澄林等^[31]对二连盆地阿北地区火山熔岩进行研究,将该区火山岩成岩划分为冷凝成岩阶段、热液作用阶段、表生作用阶段(表生早期和表生晚期)、埋藏阶段(埋藏早期、埋藏中期、埋藏后期)4个阶段^[31],其中前3个阶段主要是在地表进行的。

研究成岩作用的目的是为了研究储层的成因及演化机理。但是受传统沉积岩成岩作用研究的影响,许多学者忽略了火山岩地表成岩作用研究。对于火山(碎屑)熔岩类在冷凝成岩阶段、热液作用阶段和表生作用阶段3个地表成岩阶段过程中不仅可以形成气孔和冷凝收缩缝,还会产生矿物、基质等的溶蚀作用及矿物的破裂作用^[32-34],形成火山熔岩的主要储集空间(图5b);而对于火山碎屑岩而言,在表生作用阶段中一些不稳定的晶屑、玻屑和矿物颗粒等会发生地表的溶蚀,产生一些溶蚀孔,从而对储层储集性能起到很好的改善作用。我们对准噶尔盆地克-夏地区火山碎屑岩类孔隙类型进行了统计(图6),统计结果显示溶孔对火山碎屑岩储集空间的贡献达50%以上,也很好的说明了表生成岩作用的重要性。

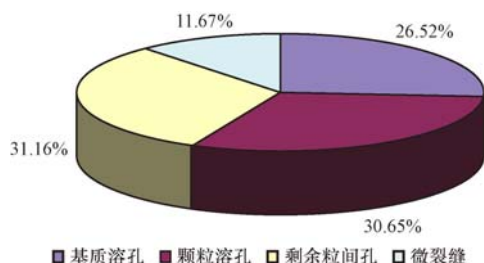


图6 克-夏地区下二叠统火山碎屑岩类孔隙类型(样品23块)

Fig. 6 Porosity types of the Lower Permian pyroclastic rocks in Ke-Xia area

总之,应加强火山岩地表成岩作用研究,或者说火山岩喷发的表层岩石(火山期次顶部)往往更能成为优质储层。因此,寻找火山岩的这一快速冷凝和淋滤带也为寻找有利储层提供了一种研究思路。

2.4 火山岩储层测井解释评价

国内许多学者对火山岩储层测井响应特征做了大量的工作^[15-17]。通过火山岩的测井响应特征可以对钻孔中没有取心的井段进行岩性识别和储层预测。一般盆地内火山岩发育于盆地断陷早期,埋藏较深,取心成本高,因此火山岩储层测井解释评价研究就显得尤为重要。

目前,准噶尔盆地克-夏地区测井资料主要以常规测井曲线如SP、GR、AC、Rt等为主(图1,图3,图4),但由于研究区火山岩类型多,结构构造复杂、储集空间多样化(表1),所以目前的常规储层测井评价技术已远不能满足勘探的需求。

针对上述问题应该引进一些先进的测井新技术,结合常规测井方法对火山岩储层进行综合研究。如目前火山岩岩性、火山岩相识别的FMI成像测井技术^[17,35],综合常规测井进行精确岩性识别的ECS元素俘获测井技术^[36],以及针对火山岩储层流体定性识别的核磁共振测井技术^[37],这三种新的测井技术已经在松辽盆地深层火山岩勘探中显示了良好的应用前景。

3 结论

火山岩储层地质学研究虽取得了一些进展,但尚存在下面急需解决的问题:

1) 火山岩分类方案混乱,亟需学者统一认识,找到一种适合于中国火山岩油气勘探和开发的火山岩分类方案。

2) 火山岩相非均质性强,火山爆发类型多,火山岩相及相序复杂,并且非同源火山岩叠置现象普遍,因此火山喷发模式及火山岩相展布规律研究也异常困难。

3) 火山岩储层中裂缝尤其是微裂缝研究薄弱,而火山岩成岩研究应注重地表成岩作用。

4) 由于火山岩类型多,结构构造复杂,储集空间多样化,常规测井评价技术已远不能满足火

表1 克-夏地区下二叠统火山岩类型

Table 1 Volcanic rock types of the Lower Permian in Ke-Xia area

岩石分类		火山碎屑含量/%	岩石名称	固结成岩方式	结构特征	储集空间类型	代表井段(取心)
类	亚类						
火山熔岩	喷出岩	<10	玄武岩	熔浆冷凝固结	斑状结构, 隐晶质结构	溶蚀的杏仁体和裂缝	百 73 井(2 140.0 ~2 143.6 m)
			安山岩				克 202(3 960.6 ~3 968.6 m)
			流纹岩				808 井(3 051.00 ~3 053.14 m)
			珍珠岩		玻璃质结构	无气孔	玛东 1 井(4 268.00 ~4 269.58 m)
	浅成岩/次火山岩		辉绿岩		斑状结构	无气孔	克 202 井(3 968.60 ~3 976.47 m)
			闪长玢岩				567 井(2 446.30 ~2 446.85 m)
	玢岩		安山玢岩		斑状结构, 隐晶质结构	杏仁体溶蚀、长石溶蚀和裂缝	克 82(4 200.00 ~4 201.26 m)
火山碎屑岩	火山碎屑熔岩	10 ~90	安山质火山角砾熔岩	熔浆胶结	碎屑熔结结构	颗粒间孔, 气孔, 杏仁体溶蚀和裂缝	百重 12 井(944.51 ~945.87 m)
			安山质凝灰熔岩				百 73(1 447.66 ~1 451.86 m)
			隐爆角砾岩				无气孔
	熔结火山碎屑岩	>90	(流纹质)熔结火山角砾岩			颗粒间孔, 气孔, 杏仁体溶蚀和裂缝	481 井(2 661.24 ~2 664.07 m)
			(流纹质)熔结凝灰岩				克 202 井(4 169.60 ~4 172.99 m)
	正常火山碎屑岩	>90	火山灰球凝灰岩	压实固结	火山碎屑结构	颗粒的原生孔隙及颗粒间和颗粒内的溶蚀孔和缝	克 202 井(3 960.6 ~3 968.6 m)
			普通凝灰岩				夏 76 井(3 646.7 ~3647.0m)
			火山角砾岩				百 73(1 447.66 ~1 451.86 m)
	火山-沉积岩	10 ~90	沉凝灰岩		沉火山碎屑结构	碎屑颗粒的原生孔和各种次生孔、缝	夏 87(4 231.2 ~4 237.1 m)
			沉火山角砾岩				583(1 602.24 ~1 603.44 m)
			熔积岩	玻璃质、隐晶质或斑状结构	少气孔	夏 201 井(4 922 ~4 925 m)	

山岩储层研究需求,需要我们引进一些先进的测井新技术如 FMI 成像测井、ESC 元素俘获测井技术、核磁共振测井技术等来更好的服务于火山岩油气勘探。

参 考 文 献

[1] 杨双玲,刘万洙,于世泉,等. 松辽盆地火山岩储层储集空间特征及其成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2007,37(3):506-512.
Yang Shuangling,Liu Wanzhu,Yu Shiquan,et al. Pore textures and its causes of volcanic reservoir in Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2007,37(3):506-512.

[2] 陈永波,潘建国,许多年,等. 准噶尔盆地西北缘火山岩储层的综合地球物理预测[J]. 石油物探,2010,49(4):364-372.
Chen Yongbo,Pan Jianguo,Xu Duonian,et al. Integrated geo-

physical prediction of volcanic reservoir in Northwestern margin area of Junggar Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum,2010,49(4):364-372.

[3] 蔡国钢,张坤,刘立,等. 辽河盆地东部凹陷中部火山岩储层特征研究[J]. 海洋石油,2003,23(2):32-37.
Cai Guogang,Zhang Kun,Liu Li,et al. The reservoir characteristics of the middle section volcanic rock of the eastern sag on Liaohe Basin [J]. Offshore Oil,2003,23(2):32-37.

[4] 王仁冲,徐怀民,邵雨,等. 准噶尔盆地陆东地区石炭系火山岩储层特征[J]. 石油学报,2008,29(3):350-355.
Wang Renchong,Xu Huaimin,Shao Yu,et al. Reservoir characteristics of Carboniferous volcanic rocks in Ludong area of Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica,2008,29(3):350-355.

[5] 左国平,屠小龙,夏九峰,等. 大丰兴化地区火山岩地震识别方法研究[J]. 石油物探,2011,50(3):252-259.
Zuo Guoping,Tu Xiaolong,Xia Jiufeng,et al. Seismic identification of volcanic in Dafengxinghua area[J]. Geophysical Pros-

- pecting for Petroleum, 2011, 50(3): 252–259.
- [6] 王璞珺, 冯志强. 盆地火山岩[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Wang Pujun, Feng Zhiqiang. Volcanic Rocks in Petroliferous Basin [M]. Beijing Science Press, 2008.
- [7] 邱家骧. 国际地科联火成岩分类学分会推荐的火山岩分类简介[J]. 现代地质, 1991, 5(4): 457–468.
Qiu Jiaxiang. Brief introduction of a classification of volcanic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks [J]. Geoscience, 1991, 5(4): 457–468.
- [8] 孙善平, 刘永顺, 钟蓉, 等. 火山碎屑岩分类评述及火山沉积学研究展望[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 313–328.
Sun Shanping, Liu Yongshun, Zhong Rong, et al. Classification of pyroclastic rocks and trend of Volcanic sedimentology: a review [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2001, 20(3): 313–328.
- [9] 王德滋, 周新民. 火山岩岩石学[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
Wang Dezi, Zhou Xinmin. Volcanic Rocks [M]. Beijing Science Press, 1982.
- [10] 谢家莹. 火山碎屑流与火山碎屑流堆积[J]. 火山地质与矿产, 1994, 15(3): 53–54.
Xie Jiaying. Pyroclastic flow and pyroclastic flow deposits [J]. Volcanology & Mineral Resources, 1994, 15(3): 53–54.
- [11] 徐佑德, 王德喜, 肖永军, 等. 长岭断陷营城组火山岩特征及喷发模式[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(4): 223–226.
Xu Youde, Wang Dexi, Xiao Yongjun, et al. Characteristics of volcanic rocks and volcanic eruptions mode of Ying Cheng Formation in Chang Ling Fault Depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(4): 223–226.
- [12] 杨少春, 郭智, 刘金华, 等. 商741火成岩区构造应力场模拟及裂缝预测[J]. 断块油气田, 2011, 18(3): 277–280.
Yang Shaochun, Guo Zhi, Liu Jinhua, et al. Tectonic stress field simulation and fracture prediction in Shang 741 igneous rock area [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(3): 277–280.
- [13] 陈孔全, 陆建林, 张玺, 等. 松辽盆地南部长岭断陷火山岩储层的特征与勘探潜力[J]. 地质通报, 2011, 30(2–3): 228–234.
Chen Kongquan, Lu Jianlin, Zhang Xi, et al. Volcanic reservoir features and exploration potential of Changling faulted depression in the southern Songliao Basin, China [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2–3): 228–234.
- [14] 李小燕, 王琪, 史基安, 等. 准噶尔盆地陆西地区石炭系火山岩储层发育主控因素分析[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 449–457.
Li Xiaoyan, Wang Qi, Shi Jian, et al. Principal controls on the formation of volcanic reservoir (Carboniferous) in Luxi Area of Junggar Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 449–457.
- [15] 侯启军, 赵志魁, 王立武, 等. 火山岩气藏—松辽盆地南部大型火山岩气藏勘探理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
Hou Qijun, Zhao Zhikui, Wang Liwu, et al. Volcanic gas reservoirs principle & exploration: examples from southern Songliao Basin [M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [16] 中国石油勘探与生产分公司. 火山岩油气藏测井评价技术及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
China Petroleum Exploration and Production Company. Well-logging evaluation techniques and application of volcanic reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [17] 李宁, 乔德新, 李庆峰, 等. 火山岩测井解释理论与应用[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(6): 683–692.
Li Ning, Qiao Dexin, Li Qingfeng, et al. Theory on logging interpretation of igneous rocks and its application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(6): 683–692.
- [18] 吴颜雄, 王璞珺, 闫林, 等. 松辽盆地营城组火山岩相量化表征与应用[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 73–81.
Wu Yanxiong, Wang Pujun, Yan Lin, et al. Quantitative modeling and application of volcanic facies of Lower Cretaceous Yingcheng Formation of the Songliao Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 73–81.
- [19] 黄玉龙, 王璞珺, 舒萍, 等. 松辽盆地营城组中基性火山岩储层特征及成储机理[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 82–92.
Huang Yulong, Wang Pujun, Shu Ping, et al. Characteristics and formation mechanism of the Cretaceous intermediate and mafic volcanic reservoirs in Songliao Basin, NE China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 82–92.
- [20] 伍菁华, 黄芸, 张继武, 等. 火山岩相地震识别方法在准噶尔盆地东部的应用[J]. 天然气工业, 2007, 27(增刊A): 481–482.
Wu Jinghua, Huang Yun, Zhang Jiwu, et al. The application of seismic Recognition Method in the eastern Junggar Basin [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(Supplement A): 481–482.
- [21] 邱家骧, 陶奎元, 赵俊磊, 等. 火山岩[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
Qiu Jiaxiang, Tao Kuiyuan, Zhao Junlei, et al. Volcanic Rocks [M]. Beijing Geological Publishing House, 1996.
- [22] 闫林, 胡永乐, 冉启全, 等. 松辽盆地徐家围子断陷兴城地区营城组一段火山岩特征及火山喷发模式[J]. 天然气地质学, 2008, 19(6): 811–825.
Yan Lin, Hu Yongle, Ran Qiquan, et al. Volcanic characteristics and eruption models of Yingcheng Formation No. 1 Member in Xingcheng Area, Xujiaweizi Fault-Depression of Songliao Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(6): 811–825.
- [23] 张志强, 崔芹锋, 曲文凯, 等. 古龙断陷营城组一段火山岩特征与火山喷发模式[J]. 科技导报, 2010, 28(21): 43–47.
Zhang Zhiqiang, Cui qinfeng, Qu Wenkai, et al. Volcanic characteristics and eruption models of Yingcheng Formation No. 1 Member in Gulong Fault-Depression of Songliao Basin [J].

- Science & Technology Review, 2010, 28(21): 43–47.
- [24] 王拥军,李志平,冉启全,等. 火山岩储层微裂缝研究[J]. 国外测井技术, 2006, 21(3): 27–29.
Wang Yongjun, Li Zhiping, Ran Qijun, et al. Study of micro-fractures in volcanic reservoirs [J]. World Well Logging Technology, 2006, 21(3): 27–29.
- [25] 李森明,陈凤来,漆万珍,等. 马朗凹陷下二叠统风化壳特征与油气成藏关系[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(5): 554–556.
Li Senming, Chen Fenglai, Qi Wanzhen, et al. Relationship between weathering crust characteristics and hydrocarbon accumulation of Lower Permian in Malang Sag, Santanghu Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(5): 554–556.
- [26] 侯连华,王京红,邹才能,等. 火山岩风化体储层控制因素研究—以三塘湖盆地石炭系卡拉岗组为例[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 557–568.
Hou Lianhua, Wang Jinghong, Zou Caineng, et al. Controlling factors of weathering volcanic reservoir: an example from the carboniferous Kalagang Formation in Santanghu Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 557–568.
- [27] 胡文婷,柳成志,赵辉,等. 徐家围子断陷火山岩成岩作用与储层质量[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(6): 1176–1181.
Hu Wenting, Liu Chengzhi, Zhao Hui, et al. The diagenesis of volcanic rocks and its effects on the reservoir quality in Xujia-wei Fault Depression, Soliao Basin [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(6): 1176–1181.
- [28] 邱隆伟,姜在兴,席庆福,等. 欧利坨子地区沙三下亚段火山岩成岩作用及孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(2): 139–147.
Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Xi Qingfu, et al. Diagenesis and pore evolution of lower Es₃ volcanic rocks in Oulituozi Region [J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(2): 139–147.
- [29] 高有峰,刘万洙,纪学雁,等. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(6): 1251–1258.
Gao Youfeng, Liu Wanzhu, Ji Xueyan, et al. Diagenesis types and features of volcanic rocks and its impact on porosity and permeability in Yingcheng Formation, Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(6): 1251–1258.
- [30] 刘祥,郎建军,杨清福. 火山碎屑沉积物是油气的重要储层[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(54): 859–866.
Liu Xiang, Lang Jianjun, Yang Qingfu. Pyroclastic deposits: an important reservoir for hydrocarbon accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(54): 859–866.
- [31] 赵澄林,祝玉衡,季汉成,等. 二连盆地储层沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 1996.
Zhao Chenglin, Zhu Yuheng, Ji Hancheng, et al. Reservoir sedimentology in Erlian Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [32] Sruoga P, Rubinstein N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquen basins, Argentina [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(1): 115–129.
- [33] Lenhardt, Nils, G?tz, Annette E. Volcanic settings and their reservoir potential: an outcrop analogue study on the Miocene Tepoztlán Formation, Central Mexico [J]. Volcanology and Geothermal Research, 2011, 204(1–4): 66–75.
- [34] 曾小英,张娟,刘远洋,等. 沉积期火山作用对川西坳陷须家河组优质储层的意义[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 50–60.
Zeng Xiaoying, Zhang Juan, Liu Yuanyang et al. Significance of syndepositional volcanism to high quality reservoirs in the Xujiahe Formation, the western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 50–60.
- [35] 陈克勇. 长岭气田火山岩储层三维岩相建模[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 206–211.
Chen Keyong. Three dimensional lithology modeling of volcanic reservoirs in the Changling gas field [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 206–211.
- [36] 黄晨,潘保芝. 松辽盆地营城组火山岩测井自动识别[J]. 科协论坛, 2011, 第1期(下): 103–105.
Huang Chen, Pan Baozhi. Automatic identification of volcanic logging in the Yingcheng Formation of Songliao Basin [J]. Science & Technology Association Forum, phase 1 (two): 103–105.
- [37] 郑建东. 徐深气田营城组中基性火山岩储层测井评价技术研究[D]. 大庆:东北石油大学, 2010: 58–60.
Zhen Jiandong. The well logging evaluation technique of intermediate-basic volcanic rocks of Yingcheng Group in Xushen gas field [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2010: 58–60.

(编辑 张亚雄)