

魏嘉怡, 孟凡超, 林会喜, 等. 准噶尔盆地车排子凸起东翼石炭系火山岩储层主控因素定量评价[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(4): 462-472.

WEI Jia-yi, MENG Fan-chao, LIN Hui-xi, et al. Quantitative Evaluation of the Main Control Factors of Carboniferous Volcanic Reservoirs in the Eastern Margin of Chepaizi Uplift, Junggar Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(4): 462-472.

## 准噶尔盆地车排子凸起东翼石炭系 火山岩储层主控因素定量评价

魏嘉怡<sup>1</sup>, 孟凡超<sup>1,2\*</sup>, 林会喜<sup>3</sup>, 石好果<sup>3</sup>, 徐佑德<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室  
海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国石化胜利油田  
分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257000)

**摘要:**以准噶尔盆地车排子凸起东翼石炭系火山岩储层为研究对象,利用测井、录井、钻井、试油、岩芯、岩屑、薄片等资料,分析研究区火山岩储层主控因素。在此基础上,运用灰色关联分析对储层主控因素进行定量评价;选用油气累积产量作为母因素,与油气累积产量相关性较高的主控因素作为子因素,衡量火山岩储层质量。结果表明:影响车排子凸起石炭系火山岩储层形成的主控因素包括岩性和岩相类型、裂缝发育程度以及风化淋滤作用;通过对各评价参数权重系数计算,风化淋滤作用权重系数最大,为0.271,其次为裂缝密度,权重系数为0.261,最后是岩相和岩性类型,权重系数分别为0.247、0.222;根据储层综合评价指标( $I_{REI}$ )结果,将 $I_{REI} \geq 0.6$ 定为I类储层, $0.3 \leq I_{REI} < 0.6$ 定为II类储层。运用该储层定量评价标准对单井储层进行综合评价验证,结果与实际油气累积产量吻合率高达90%;单井储层定量评价分类结果与实际油气累积产量及研究区有利储层平面分布预测吻合度较高,评价结果可靠。

**关键词:**火山岩储层;主控因素;定量评价;灰色关联分析;综合评价指标;石炭系;车排子凸起;准噶尔盆地

中图分类号:P618.13;TE121.1 文献标志码:A 文章编号:1672-6561(2018)04-0462-11

## Quantitative Evaluation of the Main Control Factors of Carboniferous Volcanic Reservoirs in the Eastern Margin of Chepaizi Uplift, Junggar Basin, China

WEI Jia-yi<sup>1</sup>, MENG Fan-chao<sup>1,2\*</sup>, LIN Hui-xi<sup>3</sup>, SHI Hao-guo<sup>3</sup>, XU You-de<sup>3</sup>

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, Shandong, China)

**Abstract:** Taking Carboniferous volcanic reservoirs in the eastern margin of Chepaizi uplift, Junggar Basin as research object, the main control factors of the volcanic reservoirs were analyzed by various types of data, including logging, drilling, testing for oil, cores, cuttings and thin

收稿日期:2018-04-02;修回日期:2018-05-25 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41302102);中央高校基本科研业务费专项资金项目(15CX05007A)

作者简介:魏嘉怡(1993-),女,陕西宝鸡人,理学硕士研究生,E-mail:1459796096@qq.com。

\* 通讯作者:孟凡超(1982-),男,河北承德人,副教授,理学博士,E-mail:mfc1982@126.com。

sections. The gray correlation analysis was applied to quantitatively evaluate the main control factors of reservoirs; the cumulative oil and gas production was selected as the parent factor, and the main control factors which have high correlation with the cumulative oil and gas production were selected as the sub factors to measure the quality of the volcanic reservoirs. The results show that the main control factors affecting the formation of Carboniferous volcanic reservoirs in Chepaizi uplift include lithology, lithofacies, fracture development, weathering-leaching; by calculating the weight coefficient of each evaluation parameter, the weight coefficient of weathering-leaching is the biggest with the value of 0.271, followed by fracture density with the weight coefficient of 0.261, and the weight coefficients of the lithology and lithofacies are the smallest with the values of 0.222 and 0.247, respectively; the volcanic reservoirs in the study area can be generally divided into two different types based on comprehensive evaluation index ( $I_{REI}$ ) of reservoirs, as for type I, the  $I_{REI}$  is greater than 0.6, and as for type II, the  $I_{REI}$  ranges from 0.3 to 0.6. The reservoir quantitative evaluation criteria were used to verify the comprehensive classification and evaluation of single well reservoirs, the results coincide with the actual cumulative oil and gas production rate as high as 90%; the quantitative evaluation classification results of single well reservoirs and actual cumulative oil and gas production are in good agreement with the favorable reservoir plane distribution prediction in the study area, the evaluation results are reliable.

**Key words:** volcanic reservoir; main control factor; quantitative evaluation; gray correlation analysis; comprehensive evaluation index; Carboniferous; Chepaizi uplift; Junggar Basin

## 0 引言

自20世纪初以来,随着盆地向深层勘探的深入,火山岩油气藏储量增加较快,约占地层油气藏探明储量的50%以上,火山岩油气藏已逐渐成为中国石油勘探的一个重要领域<sup>[1-2]</sup>。2000年以来,火山岩油气勘探在准噶尔、塔里木、三塘湖、松辽、渤海湾等盆地都取得了重大突破<sup>[3-4]</sup>。准噶尔盆地自1956年在石炭系火山岩中首见油气显示以来,在石炭系一二叠系火山岩中探明油气当量已超过 $3.6 \times 10^8$  t<sup>[5]</sup>,火山岩已成为准噶尔盆地西北缘石炭系一二叠系的主力储层<sup>[6-8]</sup>。目前,中国石化在准噶尔盆地车排子凸起石炭系已发现规模油气储量,并上报控制储量和预测储量分别超过 $6 \times 10^7$  t和 $1 \times 10^7$  t<sup>[9]</sup>,证实该区是有利的油气富集区带。因此,明确石炭系火山岩储层主控因素,落实有利储层发育区,是车排子凸起油气勘探的关键。

火山岩作为一种特殊的油气储层,岩石类型多样,孔隙结构复杂,储层非均质性强,控制因素复杂<sup>[10-13]</sup>。前人对火山岩储层控制因素的研究多限于定性分析<sup>[14-24]</sup>,进而得出主控因素。其中,岩性和岩相类型<sup>[6,9,13,15-16]</sup>、构造运动<sup>[17-21]</sup>、风化淋滤作用<sup>[22-25]</sup>、成岩作用<sup>[26-28]</sup>、古地貌形态<sup>[12,29]</sup>等都是一直关注的火山岩储层主控因素。值得注意的是,不同地区、不同

地质条件下火山岩储层的主控因素可能相同,但多个主控因素的排序一定存在差异。因此,储层主控因素的排序是寻找优质储层的关键。储层主控因素定量评价可以解决定性研究工作中常出现的研究结果相互矛盾、交叉以及不唯一等问题<sup>[30-31]</sup>。主控因素的量化表征能在最大程度上使研究结果与实际地质情况吻合,有利于对储层进行准确分类与评价,从而实现对油气勘探的现实指导意义。本文以准噶尔盆地车排子凸起东翼石炭系火山岩储层为研究对象,在29口井的测井、录井、钻井、试油、岩芯、岩屑、薄片等资料综合分析基础上,对储层控制因素进行系统研究,选用灰色关联法对储层主控因素进行定量评价,并对储层进行准确分类,从而为研究区油气勘探提供借鉴。

## 1 区域地质概况

车排子凸起位于新疆维吾尔自治区沙湾县,一级构造单元属于准噶尔盆地西部隆起。东部以红车断裂带与沙湾凹陷及中拐凸起相接(图1),南部紧邻四棵树凹陷,西北部伸入扎伊尔山山前<sup>[9,13,20-21]</sup>。该凸起是一个海西晚期形成并长期继承性发育的古凸起,现今的构造格局为喜山运动后的面貌,平面上呈三角形。这种构造格局使车排子凸起主体部位接受的沉积层厚度有限,大部分区域缺失二叠系、三叠系和侏罗系沉积<sup>[32-33]</sup>。石炭系储层主要为火山岩,

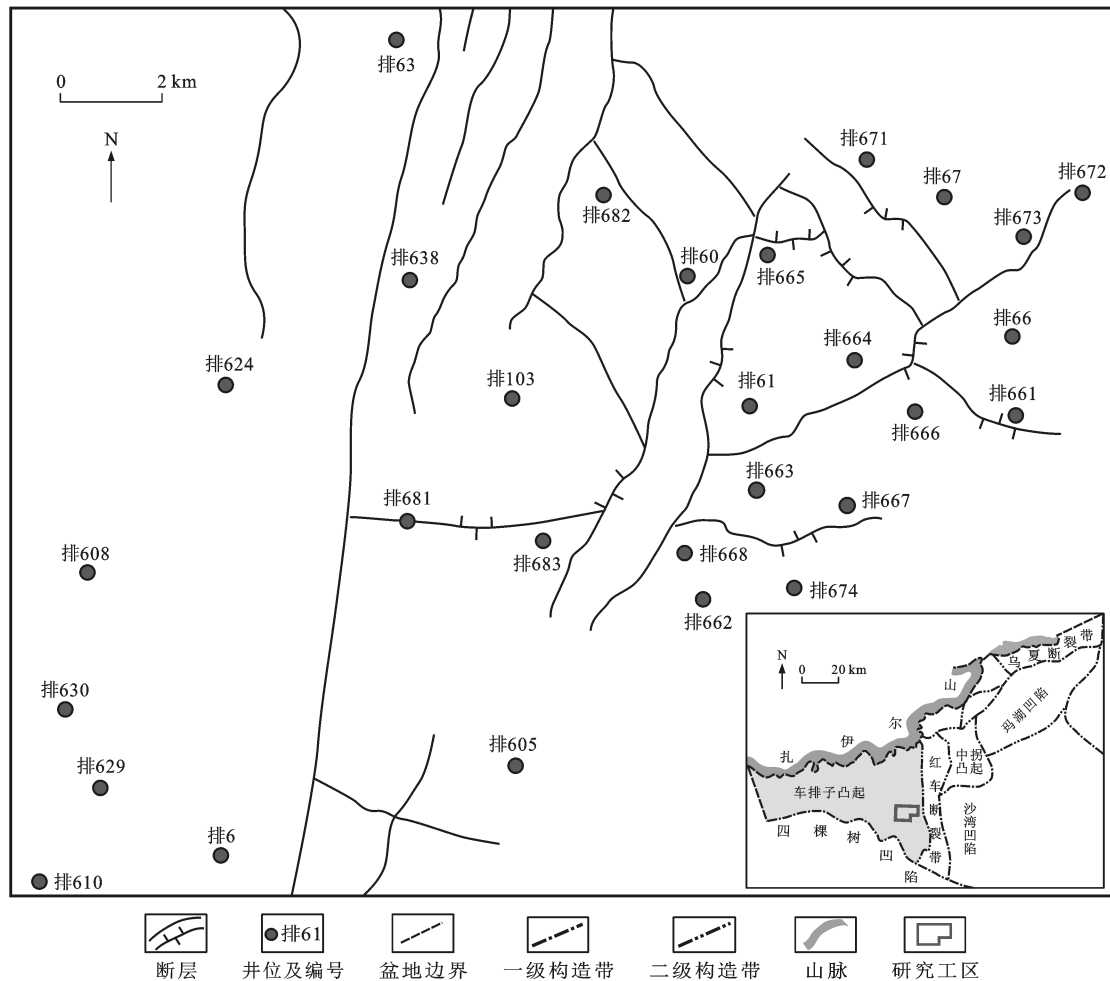


图1 准噶尔盆地车排子凸起构造位置及主要井位分布

Fig. 1 Tectonic Position and Main Wells Distribution in Chepaizi Uplift of Junggar Basin

火山岩受海西、印支以及燕山运动影响改造严重<sup>[34]</sup>,并且发育多条NW向、NE向和近EW向断裂。同时,海西晚期以来,凸起区一直为车排子地区构造的最高部位,长期处于沙湾和四棵树两个生烃凹陷的油气运移指向区<sup>[35-37]</sup>,油气勘探前景较好。

## 2 主控因素

通过对29口井的岩芯观察、铸体薄片鉴定以及孔渗研究等发现,影响准噶尔盆地车排子凸起火山岩储层形成的因素较多,但主控因素包括岩性和岩相类型、裂缝发育程度及风化淋滤作用<sup>[9,13,38-39]</sup>。

### 2.1 岩性和岩相类型

车排子凸起石炭系火山岩岩性和岩相类型复杂。岩性包括火山熔岩类、火山碎屑岩类、火山碎屑熔岩类和火山碎屑沉积岩类4种;岩相划分为4相8亚相<sup>[7]</sup>,4相分别为爆发相、溢流相、火山通道相和火山沉积相。不同岩性和岩相类型与孔隙度、渗透率关系(图2)表明,研究区火山岩储层发育的优势岩性是角

砾熔岩,优势岩相是溢流相的角砾熔岩流亚相。

火山岩的岩性和岩相类型影响原生孔隙发育类型和程度,同时也制约着次生孔隙组合。车排子凸起石炭系火山岩近源相组合中的火山熔岩类(玄武安山岩、安山岩、角砾熔岩、自碎角砾熔岩)、火山碎屑岩类(火山角砾岩)比远源相组合中的凝灰岩、沉凝灰岩原生孔隙发育(表1)。不同岩相类型的孔隙度变化(图3)显示,孔隙度从火山口相组合到近源相组合再到远源相组合依次减小,储层物性逐渐变差。因此,岩性和岩相类型是储层形成的基础。

### 2.2 裂缝发育程度

根据岩芯录井资料统计每口取芯井段的裂缝密度、长度、宽度,结果表明,火山岩岩性和岩相一致情况下,车排子凸起石炭系火山岩平均裂缝密度与渗透率、油气累积产量具有很好的相关性(图4)。这说明裂缝的存在一方面沟通了互不连通的原生孔隙,另一方面促进了次生孔隙的发育,使储层渗透率增大,从而影响储层的含油性。储层物性与裂缝发育

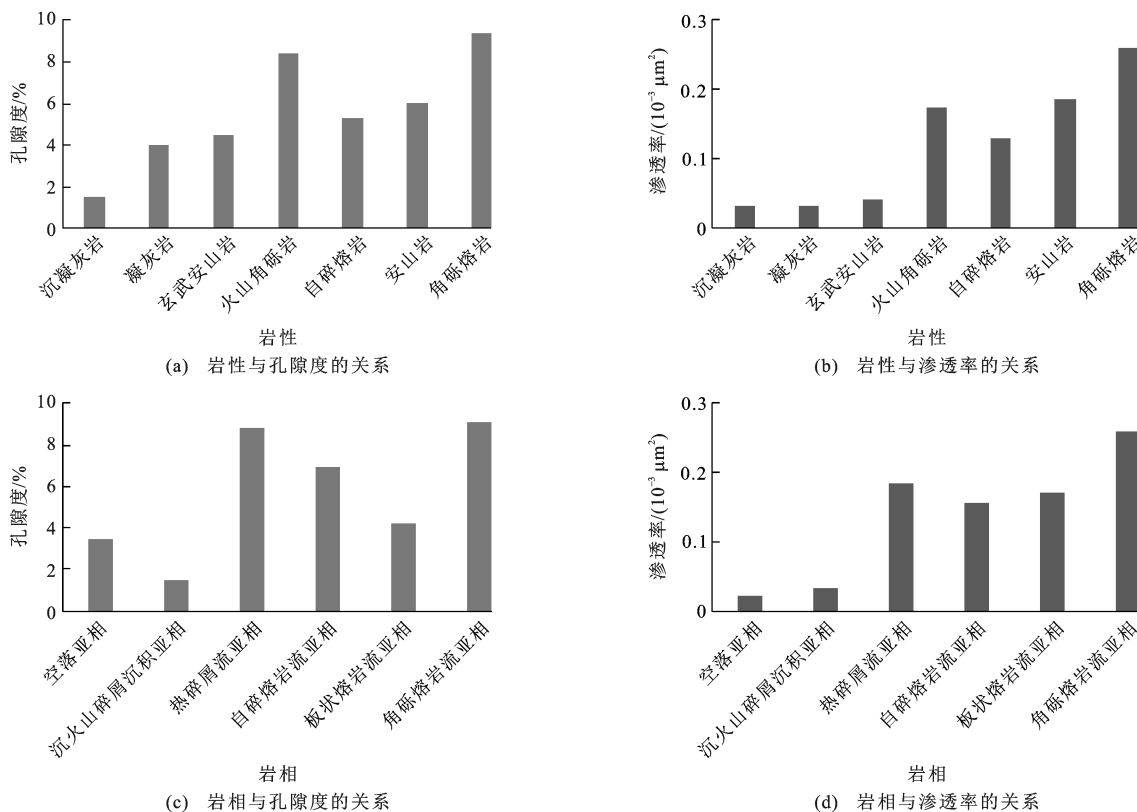


图 2 不同岩性和岩相类型与物性的关系

Fig. 2 Relationships Between Different Lithology, Lithofacies Types and Physical Properties

表 1 火山岩中不同岩性和岩相类型储集空间发育类型

Tab. 1 Reservoir Space Development Types in Different Lithology and Lithofacies Types of Volcanic Rocks

岩相组合	岩相	岩性	原生孔隙组合	次生孔隙组合
近源相组合	板状熔岩流亚相	玄武安山岩、安山岩	原生气孔+杏仁收缩缝	杏仁体内孔、斑晶溶蚀孔、杏仁溶蚀残余孔
	角砾熔岩流亚相	角砾熔岩	角砾间缝+原生气孔+杏仁收缩缝	角砾溶蚀、斑晶溶蚀
	自碎熔岩流亚相	自碎角砾熔岩	自碎角砾间缝+原生气孔+杏仁收缩缝	角砾溶蚀、斑晶溶蚀
	热碎屑流亚相	火山角砾岩	角砾间孔(缝)+砾间孔+晶粒间孔	角砾溶蚀、斑晶溶蚀、角砾间凝灰岩溶蚀
远源相组合	空落亚相	凝灰岩	冷凝收缩缝	基质溶蚀孔
	沉火山碎屑沉积亚相	沉凝灰岩	不发育	凝灰岩溶蚀微孔
	含火山碎屑沉积亚相	凝灰质砂砾岩	砾间孔	溶蚀孔

程度成正相关关系,裂缝越长、越宽、密度越大,储层物性越好。

### 2.3 风化淋滤作用

车排子凸起石炭系火山岩经历了长期风化淋滤作用,形成巨厚的风化壳。风化壳由上向下依次划分为土壤层、水解带、淋滤带、崩解带、母岩带等 5 层<sup>[13,25]</sup>,储层物性受风化淋滤作用影响较大。同一岩相(板状熔岩流亚相)中的安山岩类孔隙度与距不整合面距离关系(图 5)表明,同一岩性和岩相火山岩随着距石炭系不整合面距离的增加,孔隙度呈规律性变化。距不整合面 50 m 以上主要为土壤层和水解带发育区,物性较差,可作为石炭系油气藏的盖

层。淋滤带之下,储层物性与距不整合面距离成负相关关系,淋滤带的储集性能最好,崩解带次之。此外,研究区大部分油气出现在距不整合面 50 m 以下和距不整合面 350 m 以上的范围<sup>[13]</sup>。

## 3 定量评价

### 3.1 评价方法

影响储层质量的多因素权重系数确定是储层主控因素定量评价工作的关键<sup>[30-31]</sup>。目前常用的确定权重系数方法主要有专家打分、层次分析、灰色关联分析、主成分分析和神经网络分析等<sup>[31,40-44]</sup>。专家打分和层次分析在确定权重系数时会加入主观判

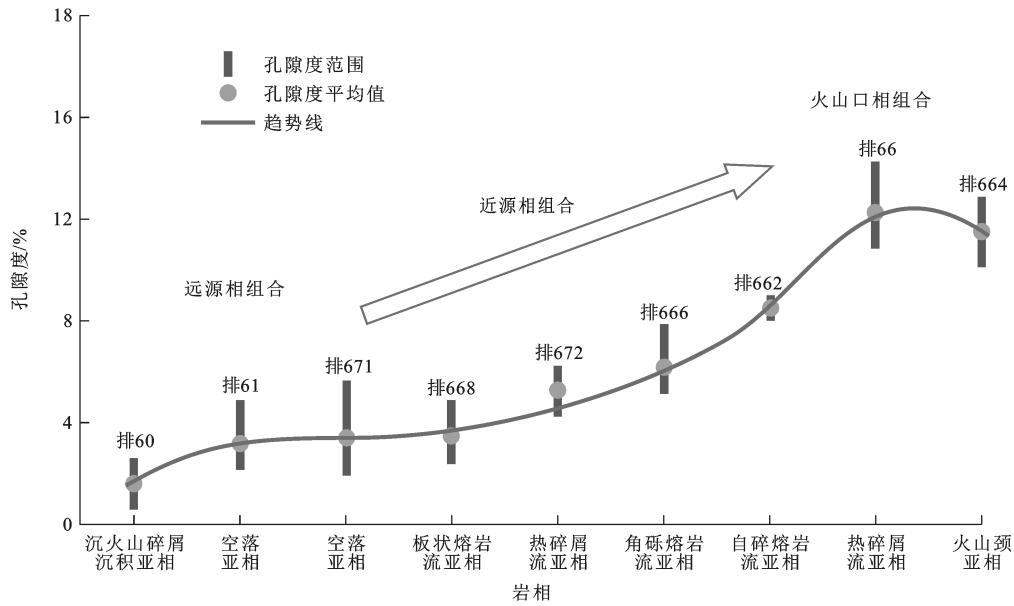


图3 不同岩相类型的孔隙度变化

Fig. 3 Variations of Porosity in Different Lithofacies Types

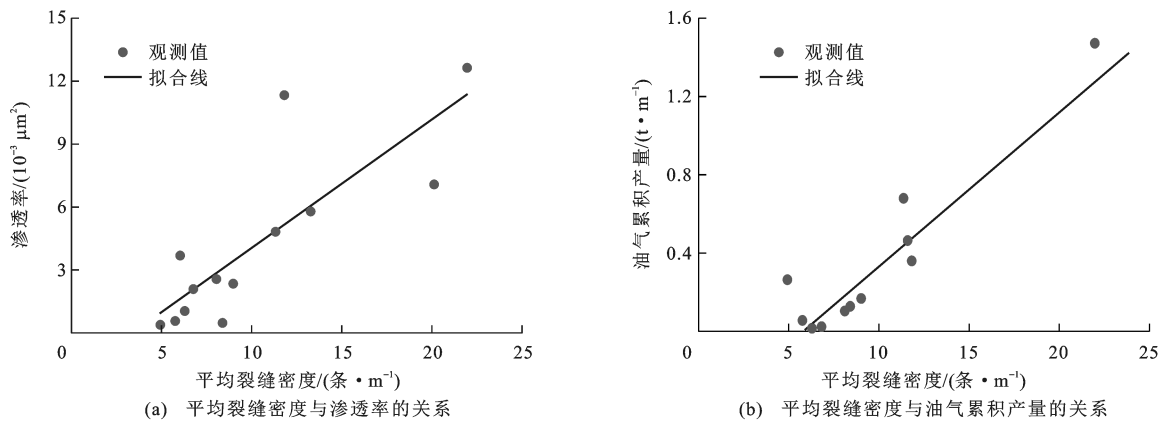


图4 平均裂缝密度与渗透率、油气累积产量的关系

Fig. 4 Relationships Between Average Fracture Density and Permeability, Cumulative Oil and Gas Production

断,主成分分析不能明确单一控制因素的影响,神经网络分析需要大量的训练数据,而灰色关联分析是一种完全通过数学计算确定权重系数的定量分析方法,其在应用时所需要的数据量小,运算量也不大,具有简单、易于操作、直观等优点,评价结果更为客观、科学和合理。因此,本次研究选用灰色关联分析确定权重系数。

### 3.2 评价过程

#### 3.2.1 依据影响火山岩储层质量的因素选择评价参数

油气累积产量可以用来衡量火山岩储层质量。选用油气累积产量作为母因素,影响车排子凸起火山岩储层质量的岩性、岩相、裂缝密度、裂缝长度、裂缝宽度、风化淋滤作用作为子因素。依据研究区不

同岩性、岩相的物性测试结果和油气累积产量数据,并结合经验对岩性、岩相进行赋值。1~7依次赋值给沉凝灰岩、凝灰岩、自碎熔岩、玄武安山岩、火山角砾岩、安山岩、角砾熔岩;1~6依次赋值给沉火山碎屑沉积亚相、空落亚相、热碎屑流亚相、自碎熔岩流亚相、板状熔岩流亚相、角砾熔岩流亚相。用距石炭系顶的不整合面距离来刻画风化淋滤作用的程度。采用计算机拟合火山岩储层母因素与子因素相关关系(图6),探讨子因素与油气累积产量的相关性。结果表明,岩性、岩相、裂缝密度、风化淋滤作用这4个评价参数可作为本次研究的子因素。

#### 3.2.2 各评价参数的原始数据标准化及单项评价指标的计算

为了消除岩性、岩相、裂缝密度、风化淋滤作用

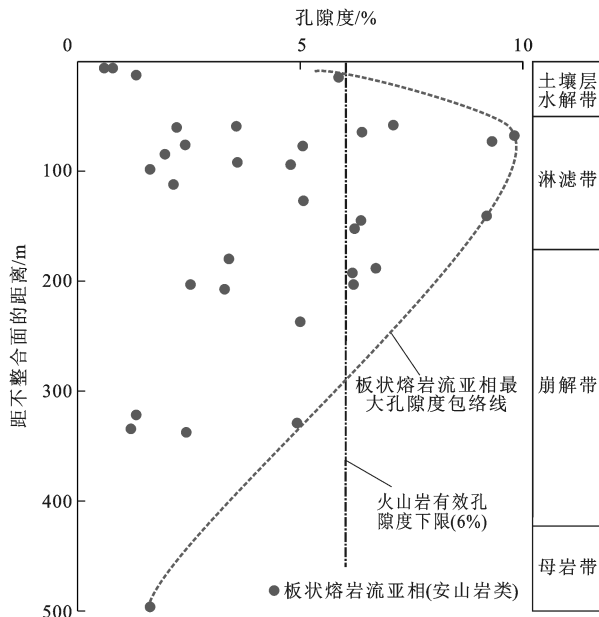


图 5 板状熔岩流亚相中的安山岩类孔隙度与距不整合面的距离关系

Fig. 5 Relationship Between Porosity and Distance from Unconformity of the Andesites in the Tabular Lava Flow Subfacies

的物理意义,使之成为具有独立意义的参数,本文选用极大值标准化法来消除这 4 个不同量纲间的差异。对于评价数据值越大,反映储层质量越好的指标,用单个参数数据除以本参数的极大值;而对于评价数据值越小,反映储层质量越好的指标,先用本参数的极大值减去单个参数数据,再用其差值除以极大值。根据此原理对岩性、岩相、裂缝密度采用参数值除以同类参数极大值的方法进行标准化;而对风

化淋滤作用采用同类参数极大值减去单个参数数据后的差值再除以极大值的方法进行标准化(表 2)。标准化后的数据即为各参数的单项评价指标。

### 3.2.3 各评价参数权重系数的计算

首先计算各子因素与母因素之间的绝对差值,通过计算得到绝对差值的最大值是 0.936,最小值是 0,然后计算关联度(表 2)。对不同井的同一评价参数相对于母因素的关联度求取平均值,得到岩性、岩相、裂缝密度以及风化淋滤作用的关联度依次为 0.530、0.589、0.622、0.646。最后对关联度进行归一化处理,得到每个评价参数的权重系数分别为 0.222、0.247、0.261、0.271。从权重系数的大小来看,风化淋滤作用对储层的控制作用最为明显,其次是裂缝密度,最后是岩相、岩性类型。

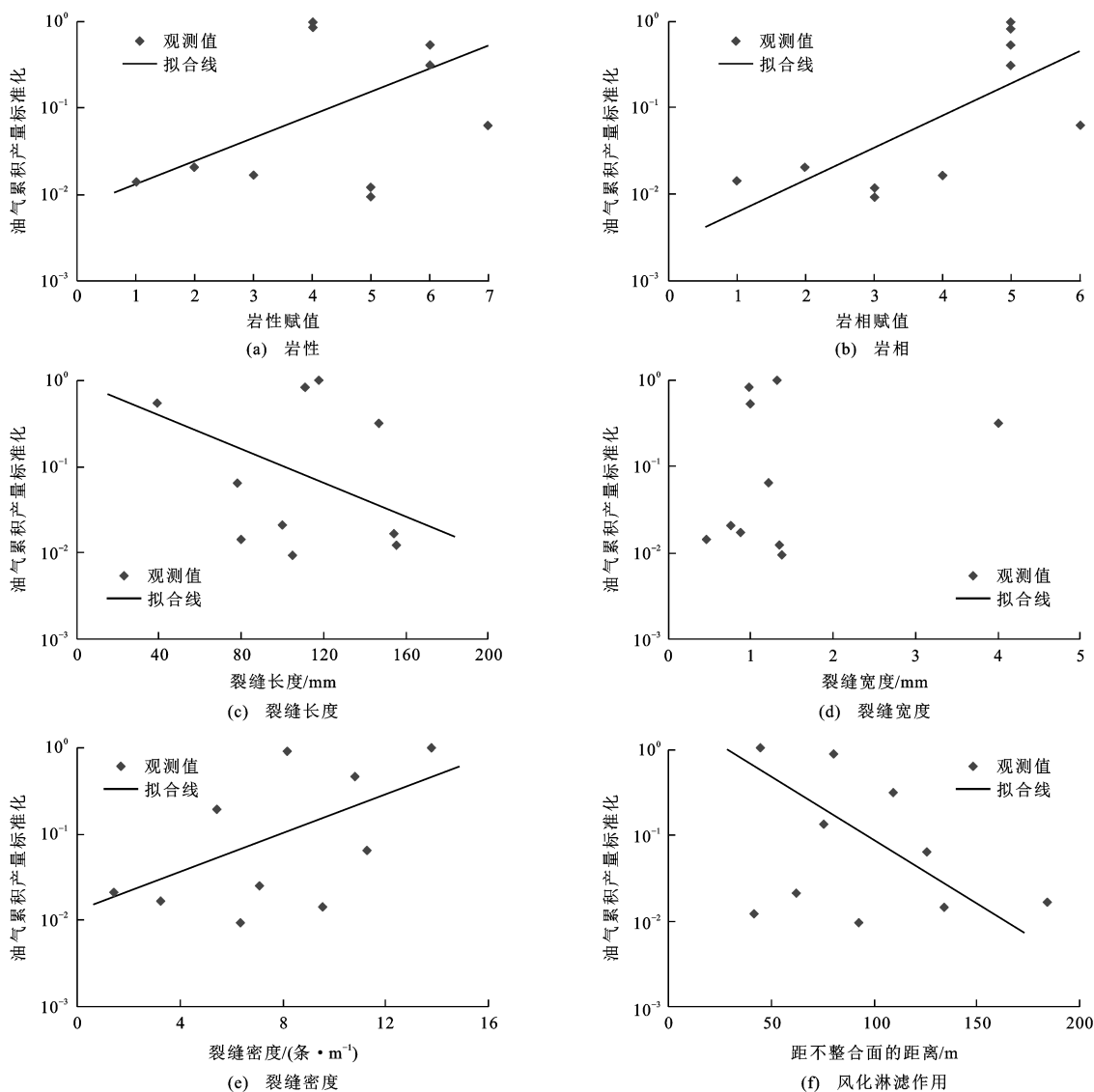
### 3.3 评价结果与验证

将每个参数的单项评价指标分别乘以其权重系数,得到单项权衡指标,然后将各参数的单项权衡指标相加即得到每口井的综合评价指标( $I_{REI}$ )。从综合评价指标分布来看,明显趋于两类,即  $0.3 \leq I_{REI} < 0.6$  和  $I_{REI} \geq 0.6$ 。将  $I_{REI} \geq 0.6$  定为 I 类储层,  $0.3 \leq I_{REI} < 0.6$  定为 II 类储层(表 3)。结果表明,10 口井的综合评价分类结果与实际油气累积产量吻合率高达 90%。此外,在定性研究火山岩储层优势发育区时,根据研究区岩相有利发育区、裂缝有利发育区、风化壳有利发育区,得到了有利储层平面分布预测(图 7)。储层定量评价的 I 类储层恰好分布在平面预测图中的一类、二类储层发育区,定量评价的 II 类储层位于平面预测图中的三类储层发育区,说明储

表 2 火山岩储层原始数据标准化及关联度计算

Tab. 2 Original Data Standardization and Correlation Calculation of Volcanic Reservoirs

井号	原始数据标准化					各子因素对母因素的关联度			
	油气累积产量	岩性	岩相	裂缝密度	风化淋滤作用	岩性	岩相	裂缝密度	风化淋滤作用
排 60	0.014	0.143	0.167	0.695	0.270	0.784	0.754	0.407	0.647
排 61	1.000	0.571	0.833	1.000	0.715	0.522	0.737	1.000	0.621
排 661	0.317	0.857	0.833	0.531	0.407	0.464	0.475	0.686	0.839
排 664	0.064	1.000	1.000	0.819	0.317	0.333	0.333	0.383	0.649
排 666-1	0.844	0.571	0.833	0.371	0.629	0.632	0.978	0.497	0.686
排 666-2	0.017	0.429	0.667	0.238	0.000	0.532	0.419	0.679	0.965
排 668	0.009	0.714	0.500	0.463	0.535	0.399	0.488	0.507	0.471
排 671	0.021	0.286	0.333	0.103	0.661	0.639	0.600	0.851	0.422
排 673	0.541	0.857	0.833	0.723	0.410	0.597	0.616	0.720	0.781
排 674	0.012	0.714	0.500	0.503	0.774	0.400	0.490	0.488	0.380



图(a)、(b)、(e)、(f)符合地质规律;图(c)不符合地质规律;图(d)无地质规律

图6 火山岩储层母因素与子因素相关关系

Fig. 6 Correlations of the Parent and Sub Factors of Volcanic Reservoirs

表3 火山岩储层的综合评价指标与分类评价

Tab. 3 Comprehensive Evaluation Indexes and Classification Evaluation of Volcanic Reservoirs

井号	单项评价指标				综合评价指标	油气累积产量/(t·m <sup>-1</sup> )	分类	评价结果
	岩性	岩相	裂缝密度	风化淋滤作用				
排 666-2	0.429	0.667	0.238	0.000	0.322	0.005	II类 储层	一致
排 60	0.143	0.167	0.695	0.270	0.327	0.004		一致
排 671	0.286	0.333	0.103	0.661	0.352	0.006		一致
排 668	0.714	0.500	0.463	0.535	0.548	0.003		一致
排 666-1	0.571	0.833	0.371	0.629	0.600	0.260	I类 储层	一致
排 674	0.714	0.500	0.503	0.774	0.623	0.004		不一致
排 661	0.857	0.833	0.531	0.407	0.645	0.097		一致
排 673	0.857	0.833	0.723	0.410	0.696	0.167		一致
排 664	1.000	1.000	0.819	0.317	0.769	0.020		一致
排 61	0.571	0.833	1.000	0.715	0.787	0.308		一致

注:岩性、岩相、裂缝密度及风化淋滤作用的权重系数分别为 0.222、0.247、0.261、0.271。

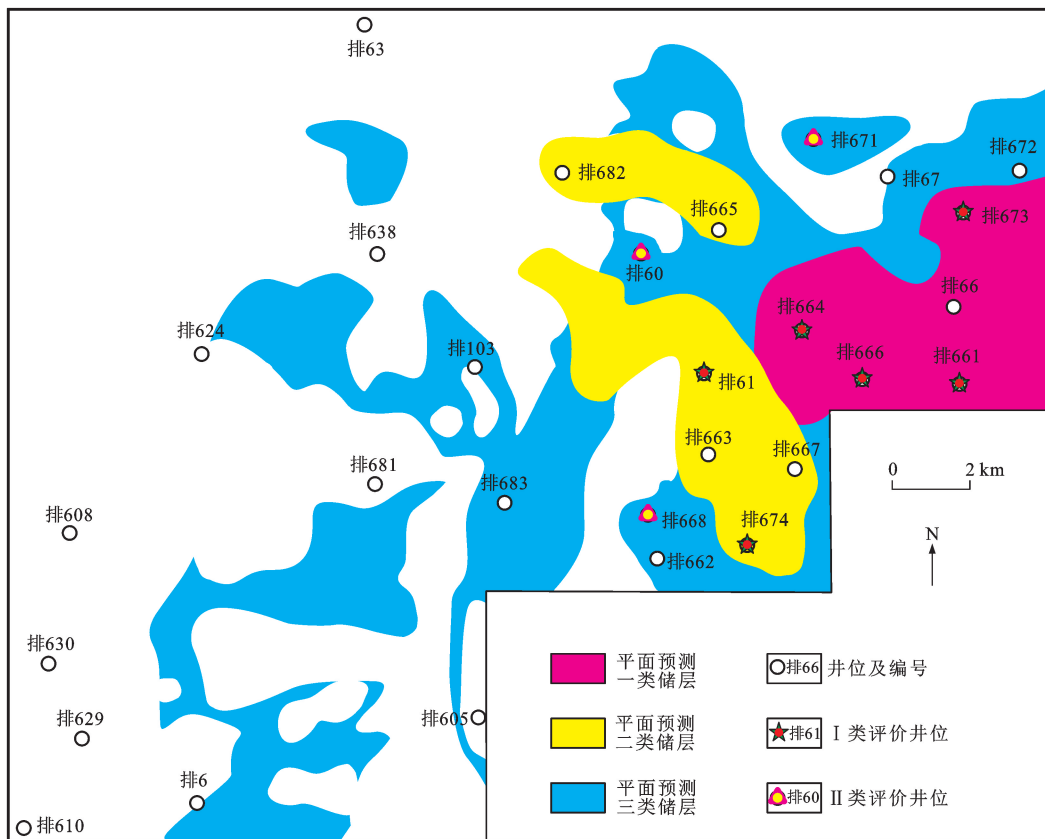


图 7 石炭系有利储层平面分布预测

Fig. 7 Plane Distribution Prediction of Carboniferous Favorable Reservoirs

层综合评价结果与平面分布预测结果吻合,评价方法可信。

### 4 结 语

(1)岩性和岩相类型、裂缝发育程度、风化淋滤作用是准噶尔盆地车排子凸起东翼石炭系火山岩储层的三大主控因素。利用灰色关联分析对储层主控因素进行定量评价,结果表明,风化淋滤作用对研究区火山岩储层影响最大,其次为裂缝密度,最后是岩相和岩性类型。

(2)根据储层综合评价指标结果,将  $I_{REI} \geq 0.6$  定为 I 类储层,  $0.3 \leq I_{REI} < 0.6$  定为 II 类储层。单井储层定量评价分类结果与实际油气累积产量以及有利储层平面分布预测吻合较好,评价结果可靠。

#### 参 考 文 献 :

#### References :

[ 1 ] 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 Cai-neng, HOU Lian-hua, TAO Shi-zhen, et al. Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Structure

of Large-scale Volcanic Weathering Crust of the Carboniferous in Northern Xinjiang, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 41(11): 1613-1626.

[ 2 ] 刘嘉麒,孟凡超,崔岩,等. 试论火山岩油气藏成藏机理[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 1-13.  
 LIU Jia-qi, MENG Fan-chao, CUI Yan, et al. Discussion on the Formation Mechanism of Volcanic Oil and Gas Reservoirs[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 1-13.

[ 3 ] 邹才能,赵文智,贾承造,等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 257-271.  
 ZOU Cai-neng, ZHAO Wen-zhi, JIA Cheng-zao, et al. Formation and Distribution of Volcanic Hydrocarbon Reservoirs in Sedimentary Basins of China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257-271.

[ 4 ] FENG Z Q. 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(4/5): 416-432.

[ 5 ] 鲜本忠,牛花朋,朱筱敏,等. 准噶尔盆地西北缘下二叠统火山岩岩性、岩相及其与储层的关系[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 46-55.

- XIAN Ben-zhong, NIU Hua-peng, ZHU Xiao-min, et al. Early Permian Volcanic Lithology, Lithofacies and Their Relations to Reservoir in Northwestern Margin of the Junggar Basin[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 46-55.
- [6] 李 军, 薛培华, 张爱卿, 等. 准噶尔盆地西北缘中段石炭系火山岩油藏储层特征及其控制因素[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 329-335.
- LI Jun, XUE Pei-hua, ZHANG Ai-qing, et al. Characteristics and Controlling Factors of Carboniferous Volcanic Reservoir in the Middle Section of the Northwestern Margin of Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 329-335.
- [7] 牛海青, 陈世悦, 张 鹏, 等. 准噶尔盆地乌夏地区二叠系储集层特征及影响因素分析[J]. 古地理学报, 2009, 11(4): 425-434.
- NIU Hai-qing, CHEN Shi-yue, ZHANG Peng, et al. Analysis of the Permian Reservoir Characteristics and Controlling Factors in Wuxia Area, Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(4): 425-434.
- [8] 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): 144-151.
- WANG Xiao-jun, ZHAO Fei, ZHANG Qin, et al. Pore Types and Characteristics of Volcanic Reservoirs of the Jiamuhe Formation in Jinlong Oilfield, Junggar Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2017, 38(1): 144-151.
- [9] 李学良, 林会喜, 石好果, 等. 车排子地区石炭系火山岩储层发育特征及控制因素[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2017, 32(6): 1-9.
- LI Xue-liang, LIN Hui-xi, SHI Hao-guo, et al. Development Characteristics and Control Factors of Carboniferous Volcanic Reservoir in Chepaizi Area[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2017, 32(6): 1-9.
- [10] 石 磊, 李书兵, 黄 亮, 等. 火山岩储层研究现状与存在的问题[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2009, 31(5): 68-72.
- SHI Lei, LI Shu-bing, HUANG Liang, et al. Current Research Situation and the Problems of Volcanic Rock Reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2009, 31(5): 68-72.
- [11] 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.
- [12] 陈欢庆, 胡永乐, 冉启全, 等. 火山岩体追踪识别及其在气藏有效开发中的应用: 以松辽盆地徐东地区营城组一段火山岩储层为例[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(4): 494-504.
- CHEN Huan-qing, HU Yong-le, RAN Qi-quan, et al. Tracing and Identifying of Volcanic Bodies and Their Application on the Effective Exploitation of Gas Reservoir: Taking Volcanic Reservoir of the Member 1 of Yingcheng Formation in Xudong Area of Songliao Basin as an Example[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(4): 494-504.
- [13] 孟凡超, 操应长, 崔 岩, 等. 准噶尔盆地西缘车排子凸起石炭系火山岩储层成因[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2016, 40(5): 22-31.
- MENG Fan-chao, CAO Ying-chang, CUI Yan, et al. Genesis of Carboniferous Volcanic Reservoirs in Chepaizi Salient in Western Margin of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2016, 40(5): 22-31.
- [14] TANG H, JI H C. Incorporation of Spatial Characteristics into Volcanic Facies and Favorable Reservoir Prediction[J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2006, 9(5): 565-573.
- [15] 秦小双, 师永民, 吴文娟, 等. 准噶尔盆地石炭系火山岩储层主控因素分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2012, 48(1): 54-60.
- QIN Xiao-shuang, SHI Yong-min, WU Wen-juan, et al. Analysis of Predominant Factors of Volcanic Reservoirs in Carboniferous of Junggar Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(1): 54-60.
- [16] 石好果, 孟凡超, 林会喜. 准噶尔盆地车排子凸起石炭系火山活动期次及期次约束下的岩相分布规律[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2017, 32(2): 1-9.
- SHI Hao-guo, MENG Fan-chao, LIN Hui-xi. Carboniferous Volcanic Activity Periods and Lithofacies Distribution in Chepaizi Unlift, Junggar Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science, 2017, 32(2): 1-9.
- [17] 何贤英, 刘 勇, 许学龙, 等. 西泉地区石炭系火山岩储层主控因素及有利储层预测[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(3): 42-51.
- HE Xian-ying, LIU Yong, XU Xue-long, et al. Controlling Factors of Carboniferous Volcanic Reservoirs and Favorable Reservoir Prediction in Xiquan Area, Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2017, 29(3): 42-51.
- [18] 王岩泉, 胡大千, 蔡国刚, 等. 辽河盆地东部凹陷火山岩储层特征与主控因素[J]. 石油学报, 2013, 34(5):

- 896-904.
- WANG Yan-quan, HU Da-qian, CAI Guo-gang, et al. Characteristics and Controlling Factors of Cenozoic Volcanic Reservoirs in Liaohe Basin, NE China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 896-904.
- [19] 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): 81-87.
- FAN Cun-hui, QIN Qi-rong, ZHI Dong-ming, 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): 81-87.
- [20] 伊万顺, 贾春明. 准噶尔盆地车排子凸起石炭系火山岩储层特征及主控因素[J]. 新疆地质, 2009, 27(1): 49-52.
- YI Wan-shun, JIA Chun-ming. Reservoir Characteristic Description and the Main Control Factors Analysis of Carboniferous Volcanic Reservoir in Chepaizi Prominence, Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 2009, 27(1): 49-52.
- [21] 汪勇, 向奎, 马立群, 等. 车排子凸起石炭系火山岩储层测井综合评价[J]. 特种油气藏, 2018, 25(2): 7-12.
- WANG Yong, XIANG Kui, MA Li-qun, et al. Comprehensive Logging Evaluation of the Carboniferous Volcanic Reservoir in Chepaizi Uplift[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2018, 25(2): 7-12.
- [22] 潘建国, 郝芳, 谭开俊, 等. 准噶尔盆地红车地区火山岩储层特征及主控因素[J]. 石油地质与工程, 2007, 21(5): 1-3.
- PAN Jian-guo, HAO Fang, TAN Kai-jun, et al. Features and Major Control Factors of Volcanic Reservoir in the Hongche Region, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21(5): 1-3.
- [23] 张生银, 柳双权, 张顺存, 等. 准噶尔盆地陆东地区火山岩风化体储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1140-1150.
- ZHANG Sheng-yin, LIU Shuang-quan, ZHANG Shun-cun, et al. The Characteristics and Controlling Factors of Volcanic Weathering Reservoir in Ludong Region, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1140-1150.
- [24] 孔垂显, 邱子刚, 秦军, 等. 准噶尔盆地西北缘石炭系火山岩储层特征研究[J]. 特种油气藏, 2017, 24(6): 28-32.
- KONG Chui-xian, QIU Zi-gang, QIN Jun, et al. Study on the Characteristics of Carboniferous Volcanic Reservoir Along the Northwestern Margin of Junggar Basin[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2017, 24(6): 28-32.
- [25] 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, 274.
- HOU Lian-hua, LUO Xia, WANG Jing-hong, 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, 274.
- [26] 周翔, 舒萍, 于士泉, 等. 松辽盆地徐深9区块营一段火山岩气藏储层特征及综合评价[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(1): 62-72.
- ZHOU Xiang, SHU Ping, YU Shi-quan, et al. Reservoir Characteristics and Integrated Evaluation of Volcanic Rock in Member 1, Yingcheng Formation, Xushen9 Block, Songliao Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(1): 62-72.
- [27] 侯启军. 松辽盆地南部火山岩储层主控因素[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 749-756.
- HOU Qi-jun. Main Controlling Factors of Volcanic Reservoirs in the Southern Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 749-756.
- [28] 林潼, 焦贵浩, 孙平, 等. 三塘湖盆地石炭系火山岩储层特征及其影响因素分析[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(4): 513-517.
- LIN Tong, JIAO Gui-hao, SUN Ping, et al. Characteristic and Influencing Factors of Carboniferous Volcanic Reservoirs in Santanghu Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(4): 513-517.
- [29] 顾绍富, 朱伶俐, 于锋, 等. 三塘湖盆地条山凸起二叠系条湖组火山岩储层特征及主控因素[J]. 新疆地质, 2016, 34(3): 394-398.
- GU Shao-fu, ZHU Ling-li, YU Feng, et al. Reservoir Characteristic Description and the Main Control Factors Analysis of Permian Volcanic Reservoir in Tiaoshan Uplift, Santanghu Basin[J]. Xinjiang Geology, 2016, 34(3): 394-398.
- [30] 刘吉余, 彭志春, 郭晓博. 灰色关联分析法在储层评价中的应用: 以大庆萨尔图油田北二区为例[J]. 石油地质与采收率, 2005, 12(2): 13-15.
- LIU Ji-yu, PENG Zhi-chun, GUO Xiao-bo. Application of Grey Relation Analysis to Reservoir Evaluation: Taking Bei2 Area, Saertu Oilfield, Daqing as an Example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(2): 13-15.
- [31] 孙玉平. 低渗透储层综合评价方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- SUN Yu-ping. Research on Comprehensive Evaluation

- Method for Low Permeability Reservoir[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [32] MA D L, HE D F, LI D, et al. Kinematics of Syn-tectonic Unconformities and Implications for the Tectonic Evolution of the Hala'alat Mountains at the Northwestern Margin of the Junggar Basin, Central Asian Orogenic Belt[J]. *Geoscience Frontiers*, 2015, 6(2): 247-264.
- [33] 胡秋媛, 董大伟, 赵利, 等. 准噶尔盆地车排子凸起构造演化特征及其成因[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(4): 556-564.  
HU Qiu-yuan, DONG Da-wei, ZHAO Li, et al. Tectonic Evolutionary Characteristics and Their Causes of Chepaizi Uplift in Junggar Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2016, 37(4): 556-564.
- [34] 王振奇, 郑勇, 支东明, 等. 车排子地区石炭系油气成藏模式[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(2): 21-25.  
WANG Zhen-qi, ZHENG Yong, ZHI Dong-ming, et al. Hydrocarbon Accumulation Patterns of Carboniferous Formation in Chepaizi Area[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(2): 21-25.
- [35] 张朝军, 石昕, 吴晓智, 等. 准噶尔盆地石炭系油气富集条件及有利勘探领域预测[J]. *中国石油勘探*, 2005, 10(1): 11-15.  
ZHANG Chao-jun, SHI Xin, WU Xiao-zhi, et al. Carboniferous Oil and Gas Abundance Conditions and Predicted Favorable Exploration Fields in Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2005, 10(1): 11-15.
- [36] 张明洁. 准噶尔盆地石炭系圈闭特征[J]. *新疆石油学院学报*, 2000, 12(1): 1-5.  
ZHANG Ming-jie. The Characteristics of the Carboniferous Traps in Junggar Basin[J]. *Journal of Xinjiang Petroleum Institute*, 2000, 12(1): 1-5.
- [37] 朱勇, 余一欣, 王双, 等. 火成岩储层物性参数模型及油层判识: 以准噶尔盆地车排子凸起石炭系为例[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 119-128.  
ZHU Yong, YU Yi-xin, WANG Shuang, et al. Investigation of Igneous Rock Reservoir Petrophysical Parameter Model and Oil Reservoir Identification Standard: A Case Study on the Carboniferous Samples of the Chepaizi Uplift in the Junggar Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2018, 39(1): 119-128.
- [38] 杨东根. 春风油田石炭系“缝-壳”型火山岩储层主控因素[J]. *复杂油气藏*, 2018, 11(1): 6-11.  
YANG Dong-gen. Main Controlling Factors of Carboniferous “Fracture-weathering Crust” Volcanic Reservoirs in Chunfeng Oilfield[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2018, 11(1): 6-11.
- [39] 刘国平, 曾联波, 雷茂盛, 等. 徐家围子断陷火山岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. *中国地质*, 2016, 43(1): 329-337.  
LIU Guo-ping, ZENG Lian-bo, LEI Mao-sheng, et al. Fracture Development Characteristics and Main Controlling Factors of the Volcanic Reservoir in Xujiaweizi Fault Depression[J]. *Geology in China*, 2016, 43(1): 329-337.
- [40] 晁会霞, 姚卫华, 杨兴科, 等. 储层综合评价方法在白豹油田中的应用[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2010, 25(6): 1-7.  
CHAO Hui-xia, YAO Wei-hua, YANG Xing-ke, et al. Application of a Comprehensive Evaluation Method of Reservoir in Baibao Oilfield[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2010, 25(6): 1-7.
- [41] 孙洪志, 刘吉余. 储层综合定量评价方法研究[J]. *大庆石油地质与开发*, 2004, 23(6): 8-10.  
SUN Hong-zhi, LIU Ji-yu. Research on Comprehensive and Quantitative Reservoir Evaluation[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2004, 23(6): 8-10.
- [42] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 济阳坳陷特低渗透油藏地质多因素综合定量分类评价[J]. *现代地质*, 2015, 29(1): 119-130.  
CAO Ying-chang, YANG Tian, WANG Yan-zhong, et al. Comprehensively Quantitative Reservoir Classification and Evaluation Based on Geological Multivariate Analysis of Extra-low Permeability Reservoirs in Jiyang Depression[J]. *Geoscience*, 2015, 29(1): 119-130.
- [43] 单玄龙, 陈玉平, 唐黎明, 等. 火山岩储层综合评价方法与应用: 以松南气田营城组旋回三为例[J]. *山东科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 30(3): 1-6.  
SHAN Xuan-long, CHEN Yu-ping, TANG Li-ming, et al. Comprehensive Evaluation Method for Volcanic Rock Reservoirs and Its Application: Taking Songnan Gas Field for Example[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science*, 2011, 30(3): 1-6.
- [44] 方辉煌, 宫云鹏, 张娅婷. 基于灰色模糊理论的页岩气储层评价: 以重庆南川地区龙马溪组页岩为例[J]. *岩性油气藏*, 2016, 28(5): 76-81.  
FANG Hui-huang, GONG Yun-peng, ZHANG Ya-ting. Evaluation of Shale Gas Reservoirs Based on Gray Fuzzy Theory: A Case Study from Longmaxi Formation in Nanchuan Area, Chongqing[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2016, 28(5): 76-81.