

渤海湾盆地南堡 5 号构造火山岩蚀变对储层物性影响及物性下限

张丽华¹, 潘保芝¹, 单刚义¹, 林发武², 刘得芳²

1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 2. 冀东油田公司 勘探开发研究院, 河北 唐山 063000

摘 要: 薄片和扫描电镜资料已经证实, 南堡 5 号构造火山岩储层存在着不同程度的蚀变。从火山岩的蚀变机理入手, 研究分析了蚀变对火山岩储层物性的影响, 应用经验统计法、孔隙度-渗透率交会法、压汞参数法、应力敏感法和最小含油喉道半径法确定了研究区物性下限: 孔隙度为 2.5%, 渗透率为 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。物性下限的确定有利于划分储层与非储层, 统计储层的有效厚度, 对储量的计算具有重要意义。本研究对其他地区蚀变火山岩物性下限的确定具有参照和借鉴意义。

关键词: 南堡 5 号构造; 火山岩; 蚀变; 物性下限; 孔隙度; 渗透率; 渤海湾盆地

开放科学标志码(OSID):



DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.04.007

VOLCANIC ALTERATION OF NANPU-5 STRUCTURE IN BOHAI BAY BASIN: Effects on the Physical Property of Reservoir and Lower Limits of Physical Property

ZHANG Li-hua¹, PAN Bao-zhi¹, SHAN Gang-yi¹, LIN Fa-wu², LIU De-fang²

1. School of Earth Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;

2. Exploration and Development Institute of Jidong Oilfield Co., Ltd., Tangshan 063000, Hebei Province, China

Abstract: Study of thin sections and scanning electron microscope (SEM) data confirms that the volcanic reservoir in Nanpu-5 structure has been altered with different degrees. Based on the alteration mechanism of volcanic rocks, the effects of volcanic alteration on physical property of reservoir are analyzed. The methods of empirical statistics, porosity-permeability intersection, mercury injection parameters, stress sensitivity and minimum oil throat radius are applied to determine the lower limits of physical property, which are defined by porosity of 2.5% and permeability of $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. The determination of lower limits is conducive to the division of reservoir and non-reservoir, statistics of effective thickness and calculation of reserves. The study provides reference for the determination of physical property lower limits of altered volcanic rocks in other areas.

Key words: Nanpu-5 structure; volcanic rock; alteration; lower limit of physical property; porosity; permeability; Bohai Bay Basin

0 引言

南堡凹陷位于渤海湾盆地的黄骅拗陷北部, 南堡

1 号构造取得了重大发现, 2004 年 9 月, 老堡南 1 井勘探取得重大突破, 在奥陶系获日产 700 m³ 高产工业油

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2020-04-12. 编辑: 李兰英.

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司冀东油田分公司项目“南堡 5 号构造火山岩天然气有效厚度评价研究”.

作者简介: 张丽华(1974—), 女, 博士, 正高级工程师, 现从事测井数据处理与解释以及岩石物理方面研究, 通讯地址 吉林省长春市西民主大街 938 号, E-mail//zhanglh@jlu.edu.cn

通信作者: 单刚义(1970—), 男, 博士, 高级工程师, 现从事数据处理与解释工作, 通信地址 吉林省长春市西民主大街 938 号, E-mail//shangangyi@jlu.edu.cn

流,试采 22 个月稳定日产量 200 t 以上。本文讨论的南堡 5 号构造位于南堡 1 号构造的北西部位。南堡 5 号构造沙河街组在沉积时期有比较强烈的火山活动,火山岩由于分布范围广,而且厚度大,成为一个主要的勘探对象^[1-2]。然而火山岩储层物性下限一直无法很好地确定下来,影响了该区的开发布置和储量的评估。

随着勘探和开发的不断深入,火山岩储层逐渐成为研究的目标。人们对火山岩储层下限的研究也逐渐增多,有很多确定物性下限的方法,但蚀变对物性影响,尤其是对下限的影响目前尚不清楚。国内外很多学者对物性下限及其确定方法进行了研究^[3]。万玲等^[4]将分布函数曲线法应用在鄂尔多斯盆地中部气田;郭睿^[5]应用钻井液侵入法、含油产状法等进行储层有效性分析;魏小微等^[6]采用核磁共振、渗流能力模拟等方法确定川中沙一段油藏的物性下限;邵长新等^[7]在东营凹陷深部碎屑岩储层用试油资料确定储层下限;焦翠华等^[8]综合利用含油产状法和核磁共振法确定了永进油田西山窑组储集层的有效物性下限;黎菁等^[9]采用经验统计法和孔隙结构参数分布等方法对苏里格气田东区致密砂岩气层物性下限进行了研究;张凤奇等^[10]综合运用多方法分析了鄂尔多斯盆地中生界主力含油层系有效厚度物性下限;王岩泉等^[11]综合运用经验系数法等确定了辽河盆地火山岩有效储层物性下限。孙茹雪等^[12]对松辽盆地中基性火山岩有效储层物性下限进行了研究。从查阅的文献可以看出:这些方法大多数是针对碎屑岩储层,而针对火山岩储层的很少,且没有考虑蚀变对孔隙度和渗透率的影响。火山岩蚀变使储层孔隙结构发生很大变化。本文从火山岩的蚀变机理入手,分析蚀变对物性的影响,然后根据实际分析资料,首次采用经验统计法、孔隙度-渗透率交会图法、压力敏感法、最小含油喉道半径法和压汞参数法确定南堡 5 号蚀变火山岩储层的物性下限,并与其他地区的同类型储层的物性下限进行了对比。

1 火山岩蚀变及其对储层物性的影响

火山岩形成时受到含矿热液的影响,成岩后又受到风化淋滤作用,容易蚀变产生次生矿物。研究区火山岩主要分为火山熔岩、火山碎屑岩和火山碎屑沉积

岩三大类,主要是火山熔岩,中间夹有不等厚度的火山碎屑岩。东部主要是基性火山岩,有玄武岩、玄武质凝灰岩、玄武质角砾岩。西部主要是酸性火山岩,包括流纹岩、流纹质凝灰岩、流纹质角砾岩和少量基性玄武岩。大量的薄片和扫描电镜分析资料已经证实研究区玄武岩往往存在着不同程度的蚀变,包括绿泥石化(泥化)、碳酸盐化和绢云母化。从 X 井 3909.0 m 杏仁状玄武岩薄片(图 1)可以看出:气孔呈泡沫状,先期充填少量硅质,后期充填大量绿泥石构成杏仁,少量方解石交代。Y 井 4145.64 m 泥化杏仁状玄武岩的薄片(图 2)显示玻基斑状结构,斑晶为基性斜长石,玻璃基质强烈绢云母化和绿泥石化,密集气孔被绿泥石、方解石充填为杏仁。

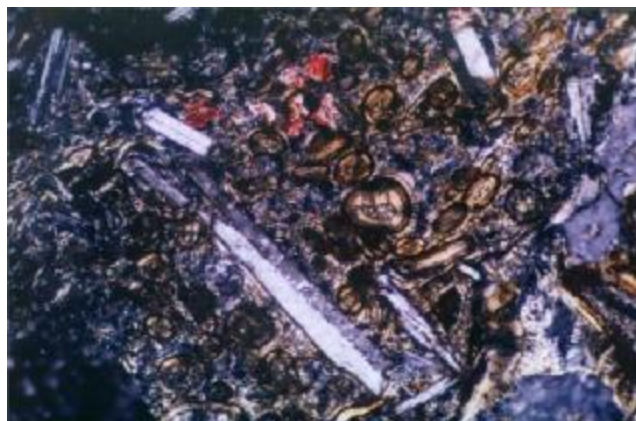


图 1 蚀变的杏仁状玄武岩

Fig. 1 Altered amygdaloidal basalt
正交偏光(under crossed-polarized microscope), 200x

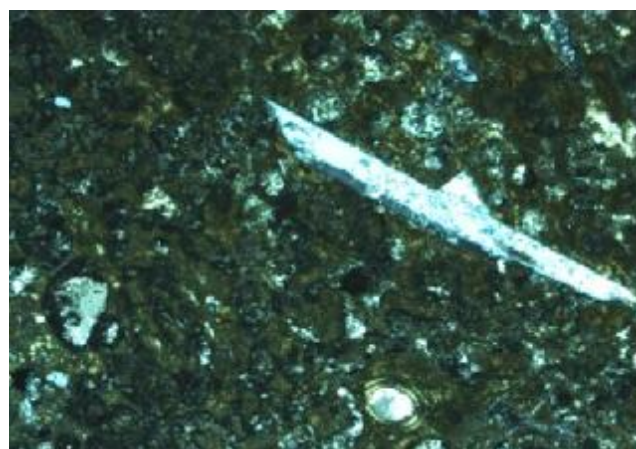


图 2 泥化杏仁状玄武岩

Fig. 2 Argillic amygdaloidal basalt
单偏光(under plane-polarized microscope), 100x

火山物质在蚀变过程中,随着不同的成岩变化过程,对储集层的影响明显不同.刚开始的蚀变过程会促进孔隙溶蚀,使得物性变好.蚀变严重以后,充填的绿泥石会慢慢使物性变差,而且充填碳酸钙后物性在不同时期会有明显差别.一方面,原生孔隙被碳酸盐胶结物占据,破坏了储层的孔隙度;另一方面孔隙中充填了碳酸盐胶结物,增强了储层的抗压实能力,有利于后期溶解及溶蚀作用以及形成构造缝^[13].如果有有机酸从烃源岩排出后进到岩层,方解石的后期溶蚀作用会使储集层的物性大幅增加.碳酸盐交代凝灰质以后,如果再经受溶解会产生次生孔隙^[14].魏翔宇等^[15]的研究表明:从总体上来讲,中基性火山岩的蚀变对成储是有利的.根据4口井32块火山岩全岩矿物分析结果(图3),黏土含量最小3.4%,最大57.2%,平均21.7%.可以看出,研究区内火山岩都发生了不同程度的蚀变.

从研究区的岩心分析资料找到既有物性分析又有薄片鉴定的资料,做孔隙度-渗透率交会图(图4).从图4中可以看出,蚀变严重的玄武岩(图4中称作蚀变玄武岩)和轻微蚀变的玄武岩(图4中称作玄武岩)的孔隙度和渗透率是有差别的.由于蚀变,岩样的孔隙度有所增加,但渗透率有所下降.

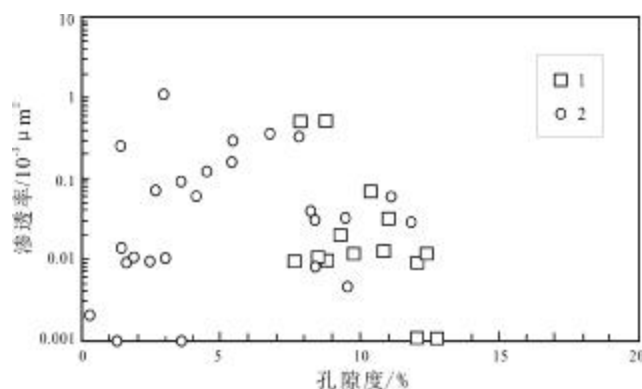


图4 蚀变玄武岩和玄武岩孔隙度-渗透率关系图

Fig. 4 Permeability vs. porosity of altered basalts and basalts

1—蚀变玄武岩(altered basalt); 2—玄武岩(basalt)

2 物性下限的确定

物性下限值具有统计学特征,所以带有一定的不确定性.通常要采用多种方法来确定物性下限,最后取平均值作为研究区的物性下限标准值.根据研究区物性分析和薄片资料,考虑到火山岩低孔低渗的特点,采用以下方法综合确定研究区物性下限.由于研究区火山岩储层或多或少都存在不同程度的蚀变,因此本文为蚀变火山岩的物性下限.

2.1 经验统计法

该方法分别是做出岩心样品的孔隙度和渗透率的

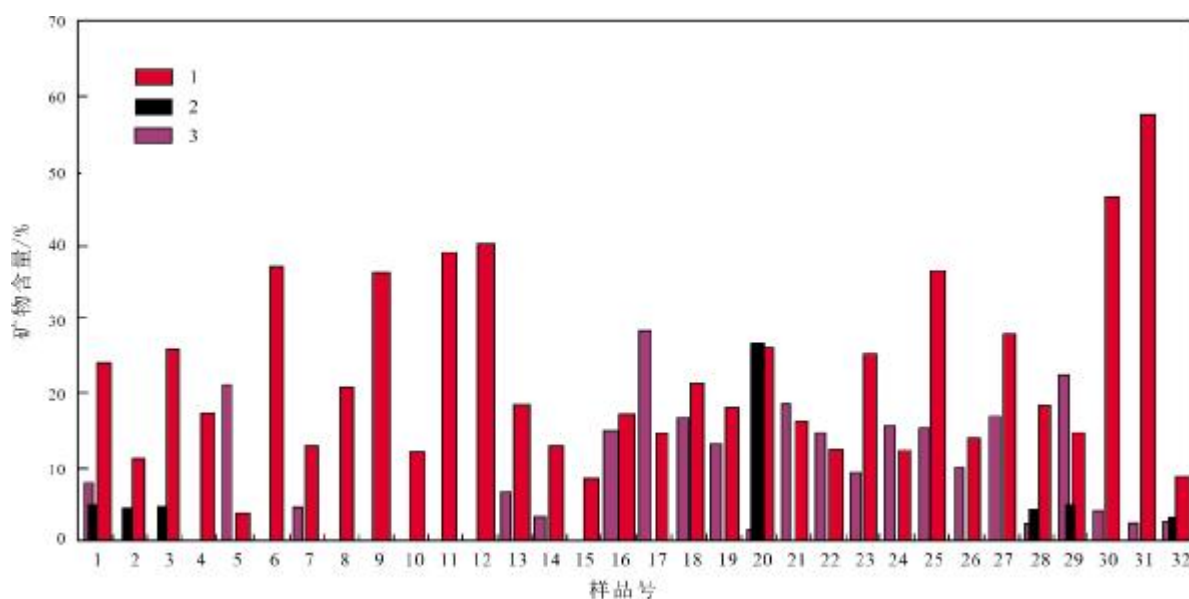


图3 火山岩蚀变矿物含量图

Fig. 3 Contents of altered minerals in volcanic rocks

1—黏土矿物(clay mineral); 2—铁白云石(ankerite); 3—方解石(calcite)

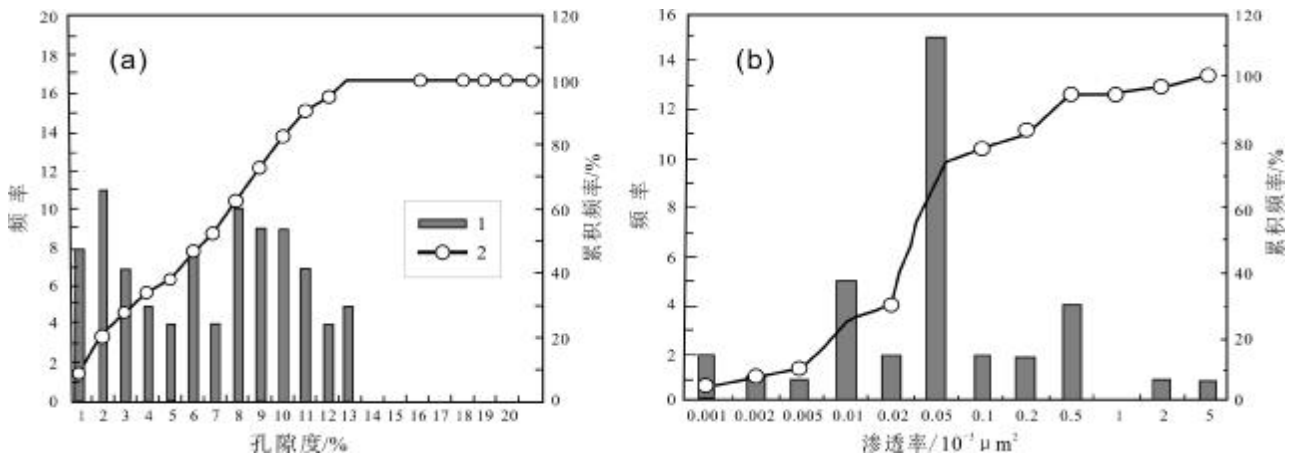


图 5 确定下限的孔隙度和渗透率直方图

Fig. 5 Histograms for the lower limits of porosity and permeability

1—频率(frequency); 2—累积频率分布(cumulative frequency distribution)

直方图和累积频率分布图, 根据累积频率确定下限. 考虑到火山岩储层低孔、低渗的特点, 一般限定累计频率丢失不超过总累计 15%, 确定出渗透率和孔隙度的下限值^[16-18]. 根据直方图特征, 取累积频率约为 15% 处所对应的孔隙度渗透率作为本地区火山岩下限值 (图 5). 确定的孔隙度下限为 1.5% (图 5a), 渗透率下限为 $0.004 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 5b).

2.2 孔隙度-渗透率交会法

该方法是将岩心分析的孔隙度和渗透率数据做交会图, 依据渗透率随孔隙度开始剧烈变化段的拐点值来确定孔隙度和渗透率的下限. 当孔隙度小于下限值时, 渗透率随孔隙度的增大变化很小, 说明孔隙主要无渗透能力. 当孔隙度大于下限值时, 渗透率随孔隙度增大明显增大^[19-20]. 图 6 是 48 个样本点的孔隙度和渗透率交会图. 据此确定的孔隙度下限为 1.5%, 渗透率

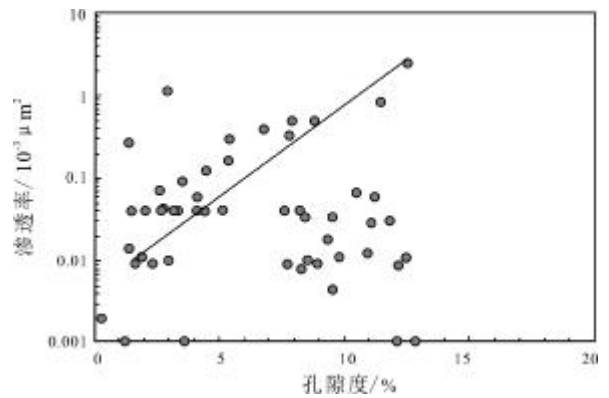


图 6 孔隙度-渗透率交会图

Fig. 6 Diagram of permeability vs. porosity

下限为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$.

2.3 压汞参数法

排驱压力是指非润湿相流体开始进入岩样的最大

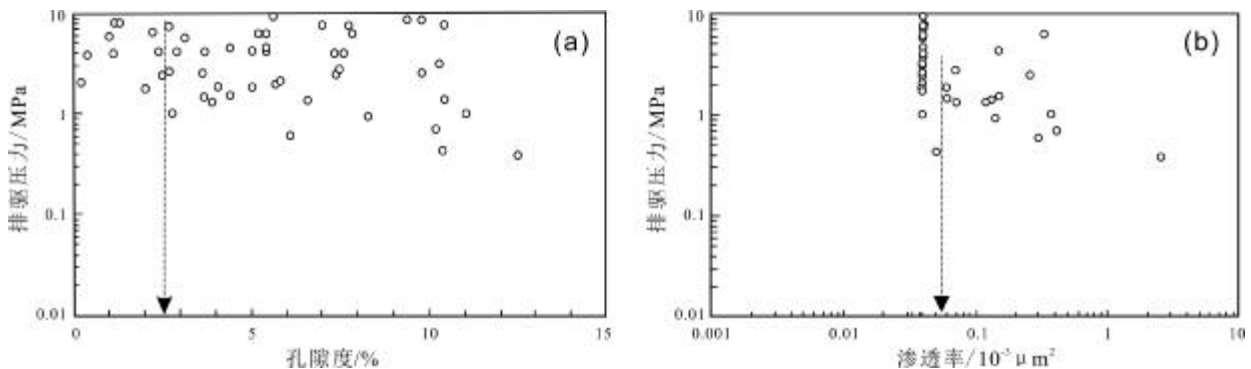


图 7 孔隙度和渗透率与排驱压力交会图

Fig. 7 Diagrams of displacement pressure vs. porosity and permeability

孔喉的压力^[21], 分别做排驱压力与孔隙度和渗透率的交会图, 通过曲线拐点确定物性下限. 用该方法确定的孔隙度下限为 2.5% (图 7a), 渗透率下限为 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 7b).

2.4 应力敏感法

该方法要求同时测量岩样地面条件和覆压条件下的孔隙度和渗透率值, 然后将地面条件下和储层条件的孔隙度和渗透率分别做交会图, 分析孔隙度和渗透率对压力的敏感性, 从而确定下限值^[22]. 孔隙度和渗透率越小的储层, 对地层压力的敏感性越强. 由此种方法确定的研究区孔隙度下限为 3% (图 8a), 渗透率下限为 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 8b).

2.5 最小含油喉道半径法

国内外的研究结果显示: 水湿性碎屑岩表面的水膜厚度大约是 $0.1 \mu\text{m}$. 油气成藏过程中油气需要克服很大的毛管压力才能将水驱替出去. 当储层的孔喉小于 $0.1 \mu\text{m}$ 时, 油气很难进入孔喉, 因此将 $0.1 \mu\text{m}$ 做为

储层的孔喉下限^[23]. 据此确定的孔隙度下限为 4.0% (图 9a), 渗透率下限为 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 9b).

2.6 物性下限综合确定

将以上各方法确定的下限值取平均, 最终确定研究区 (表 1) 孔隙度下限为 2.5%, 渗透率下限为 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. 与其他地区的中基性火山岩的孔隙度和渗

表 1 研究区孔隙度和渗透率下限表
Table 1 Lower limits of porosity and permeability in the study area

方法	孔隙度下限/%	渗透率下限/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
经验统计法	1.5	0.004
孔隙度-渗透率交会图法	1.5	0.01
压力敏感法	3	0.03
压汞参数法	2.5	0.06
最小含油喉道半径法	4.0	0.08
综合下限	2.5	0.04

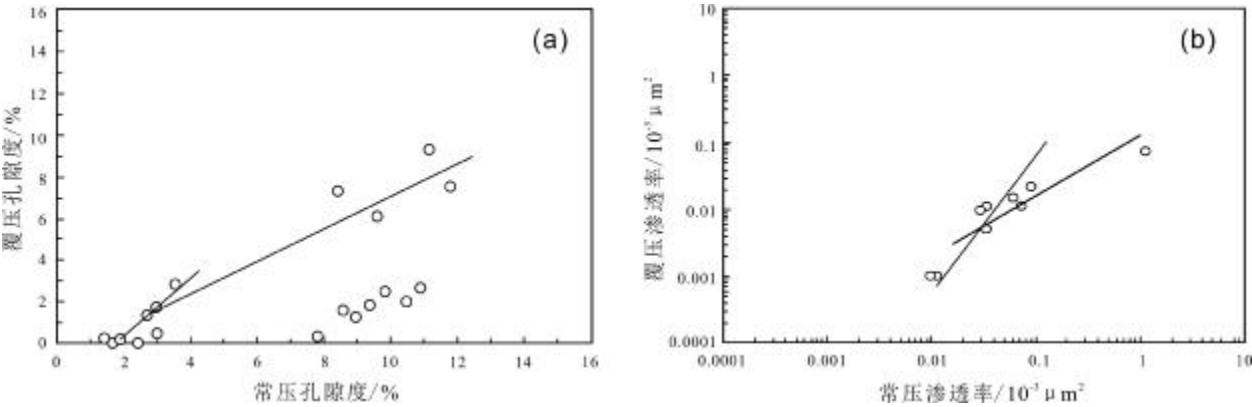


图 8 覆压与常压条件下孔隙度和渗透率交会图
Fig. 8 Diagrams for overburden pressure vs. atmospheric pressure conditions of porosity and permeability

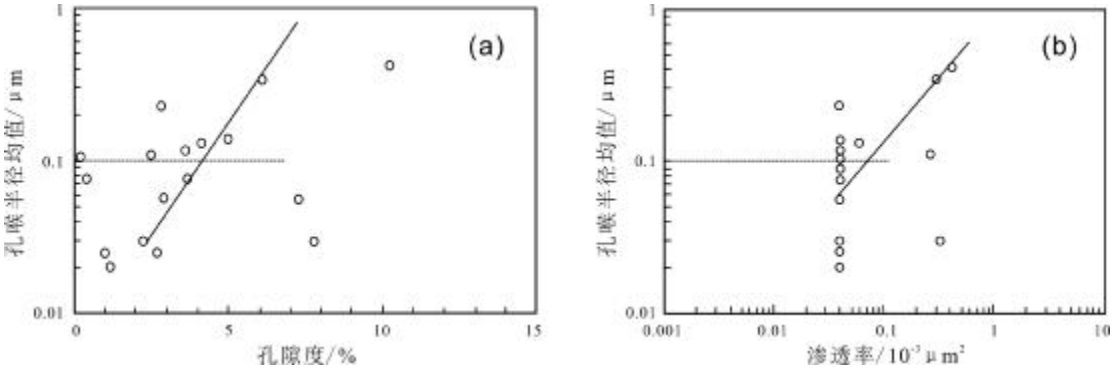


图 9 孔隙度和渗透率与孔喉半径均值交会图
Fig. 9 Diagrams of mean pore throat radius vs. porosity and permeability

透率下限^[11-12, 24-26](表 2)进行对比,可以看出,研究区由于蚀变使得物性下限略小于其他地区的物性下限。

表 2 对比地区中基性火山岩孔隙度和渗透率下限表

Table 2 Lower limits of porosity and permeability for the intermediate-basic volcanic rocks in correlative areas

盆地	断陷	岩性	孔隙度下限/ %	渗透率下限/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
松辽盆地	王府断陷	中基性岩	3.5	0.009
	长岭断陷	中基性岩	3.6	0.009
	徐家围子营城组	粗面岩	4.2	0.011
辽河盆地	东部凹陷	中基性岩	3	0.03
克拉麦里气田	石炭系	中-基性岩	6.3	0.07
三塘湖盆地	牛东区块石炭系	安山岩	6.3	0.46
		玄武岩	5.9	0.37

3 结论

(1)研究区玄武岩存在不同程度的蚀变,蚀变降低了储层的物性下限。

(2)通过对实验室测量的岩样孔隙度和渗透率、毛管压力等参数进行分析,将得到的各种方法的下限值作为储层的物性下限。这样的结果容易受所取岩石样品的代表性、人为确定拐点的方法等诸多因素的影响。在确定下限时,要综合考虑这些因素。

参考文献:

- [1]赵岳. 南堡 5 号构造中深层天然气测井评价方法研究[D]. 青岛:中国石油大学,2016.
- [2]朱学娟. 南堡 5 号深层火山岩油气藏测井识别与评价技术研究[D]. 青岛:中国石油大学,2011.
- [3]刘之的,石玉江,周金昱,等. 有效储层物性下限确定方法综述及适用性分析[J]. 地球物理学进展,2018,33(3):1102-1109.
- [4]万玲,孙岩,魏国齐. 确定储集层物性参数下限的一种新方法及其应用——以鄂尔多斯盆地中部气田为例[J]. 沉积学报,1999,17(3):454-457.
- [5]郭瑞. 储集层物性下限值确定方法及其补充[J]. 石油勘探与开发,2004,31(5):140-144.
- [6]魏小薇,谢继容,唐大海,等. 低孔渗砂岩储层基质物性下限确定方法研究——以川中 LA 构造沙一段油藏为例[J]. 天然气工业,2008,25(S1):28-31.
- [7]邵长新,王艳忠,操应长. 确定有效储层物性下限的两种新方法及应用——以东营凹陷古近系深部碎屑岩储层为例[J]. 石油天然气学报,2008,30(2):414-416.
- [8]焦翠华,夏冬冬,王军,等. 特低渗砂岩储层物性下限确定方法——以永进油田西山窑组储集层为例[J]. 石油与天然气地质,2009,30(3):379-383,378.
- [9]黎菁,赵峰,刘鹏. 苏里格气田东区致密砂岩气藏储层物性下限值的确定[J]. 天然气工业,2012,32(6):31-35.
- [10]张凤奇,武富礼,蒙晓灵,等. 不同类型低渗透储层有效厚度物性下限及其差异性成因——以陕北斜坡中部 S 地区中生界为例[J]. 石油与天然气地质,2015,36(4):555-562.
- [11]王岩泉,边伟华,刘宝鸿,等. 辽河盆地火成岩储层评价标准与有效储层物性下限[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(2):13-22.
- [12]孙茹雪,潘保芝,郭宇航. 松辽盆地中基性火山岩有效储层物性下限研究[J]. 世界地质,2017,36(1):226-233.
- [13]陈国俊,吕成福,王琪,等. 珠江口盆地深水区白云凹陷储层孔隙特征及影响因素[J]. 石油学报,2010,31(4):566-572.
- [14]朱世发,朱筱敏,刘学超,等. 油气储层火山物质蚀变产物及其对储集空间的影响——以准噶尔盆地克—夏地区下二叠统为例[J]. 石油学报,2014,35(2):276-285.
- [15]魏翔宇,高有峰,魏琴,等. 蚀变对中基性火山岩储层的控制作用:以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统营城组为例[J]. 世界地质,2017,36(2):541-551.
- [16]路智勇,韩学辉,张欣,等. 储层物性下限确定方法的研究现状与展望[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(5):32-42.
- [17]黎菁,罗彬,张旭阳,等. 致密砂岩气藏储层物性下限及控制因素分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2013,35(2):54-62.
- [18]李辉,司马立强,闫建平,等. 低孔、低渗致密砂岩储层物性下限值的确定——以川中 P 地区须二段气藏为例[J]. 天然气工业,2014,34(4):52-56.
- [19]耿龙祥,曹玉珊,易志伟,等. 濮城油田砂岩储集层物性下限标准研究[J]. 石油勘探与开发,1999,26(1):81-83.
- [20]董立全. 川西南部地区须二气藏储层物性下限研究[D]. 成都:成都理工大学,2005.
- [21]张安达,王成,乔睿. 致密砂岩储层物性下限确定新方法及其系统分类[J]. 岩性油气藏,2014,26(5):5-8.
- [22]李幸运,郭建新,张清秀,等. 气藏储集层物性参数下限确定方法研究[J]. 天然气勘探与开发,2008,31(3):33-38.
- [23]张大奎,周克明. 封闭气与储层下限的实验研究[J]. 天然气工业,1990,10(1):30-35.
- [24]冯金燕. 三塘湖盆地牛东区块卡拉岗组火山岩储层综合评价[D]. 荆州:长江大学,2012.
- [25]闫利恒,王延杰,麦欣,等. 克拉美丽气田火山岩气藏配产方法优选[J]. 天然气工业,2012,32(2):51-53.
- [26]黄玉龙. 松辽盆地白垩系营城组火山岩有效储层研究[D]. 长春:吉林大学,2010.