

辽河盆地火成岩储层评价标准与有效储层物性下限

王岩泉¹, 边伟华¹, 刘宝鸿², 顾国忠², 孙 昂¹, 王璞珺¹

(1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061; 2. 中国石油辽河油田勘探开发研究院 辽宁盘锦 124010)

摘要: 依据辽河盆地东部凹陷40口代表性探井的物性测试、含油产状及试油结果等资料,综合运用经验系数法、最小含油喉道半径法、含油产状法和试油法确定研究区有效储层物性下限,并对适用于研究区火成岩的储层分类标准进行研究。结果表明:当孔隙度小于3%或者渗透率小于 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 时,通常不会形成工业或低产油气层,据此将这两个物性数值定为火成岩有效储层的孔隙度和渗透率下限;根据孔隙度、渗透率、含油产状和试油结果等参数将火成岩储层标准划分为4类,分别为高孔高渗(I类)、较高孔较高渗(II类)、中孔中渗(III类)和 low 孔低渗(IV类);所确定的储层物性下限和分类指标能够客观反映火成岩储集层的特征,有利于研究区的油气勘探和资源评价。

关键词: 辽河盆地东部凹陷; 新生界; 火成岩储层; 评价标准; 物性下限

中图分类号: TE 122.2 **文献标志码:** A

引用格式: 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.

WANG Yanquan, BIAN Weihua, LIU Baohong, et al. Evaluation criterion and cut-off value of igneous rock reservoirs in Liaohe Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(2): 13-22.

Evaluation criterion and cut-off value of igneous rock reservoirs in Liaohe Basin

WANG Yanquan¹, BIAN Weihua¹, LIU Baohong², GU Guozhong², SUN Ang¹, WANG Pujun¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124010, China)

Abstract: Based on previous results of the reservoir porosity-permeability, oil-bearing occurrence and oil testing of 40 representative wells in eastern depression Liaohe Basin, the cut-off value of the reservoir physical properties and reasonable evaluation criteria of study area were evaluated using a series of approaches, including empirical coefficient method, irreducible water saturation method, oil occurrence method and formation testing method. The results show that when the porosity is less than 3%, or the permeability is less than $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, the reservoir usually is dry and does not contain any oil or gas. Therefore 3% porosity and $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ permeability are chosen as the cut-off values for effective reservoirs of the igneous rocks. Based on porosity, permeability, oil-bearing occurrence and oil testing results, the igneous rock reservoirs can be characterized into four classes: (I) high porosity and high permeability, (II) high-medium porosity and permeability, (III) medium porosity and permeability and (IV) low porosity and permeability. The evaluation criteria and the cut-off values objectively describe the characteristics of igneous rock reservoir and can be applied preferably in decision-making for oil and gas exploration.

Keywords: eastern depression of Liaohe Basin; Cenozoic; igneous rock reservoirs; evaluation criterion; cut-off value

收稿日期: 2015-10-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2012CB822002); 国家自然科学基金青年基金项目(41202085, 41002038)

作者简介: 王岩泉(1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为岩石学和火成岩储层。E-mail: wang_yan_quan@126.com。

通讯作者: 边伟华(1976-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为盆地火山岩和油气地质。E-mail: WeihuaBian@jlu.edu.cn。

以往国内外对火成岩油气藏勘探以兼探为主,多为偶尔发现^[1]。近几年,随着油气勘探开发不断向深层发展,火成岩类已经逐渐成为我国油气勘探的重要目的层^[2-5]。火成岩储层物性不受或少受埋深影响的特点使得在盆地深层油气勘探中比常规沉积岩储层要更为优越^[6]。前人对沉积岩储层的评价识别和物性下限进行了大量研究^[7-11]。由于地质条件复杂、岩性岩相变化快、储层物性低、非均质性强、含油气性差别大^[10-12],以前对火成岩储层评价和物性下限研究相对较少^[13-14]。同时由于火成岩储层的特殊性^[15-17],常规沉积岩储层物性分类方法难以满足火成岩储层评价的需要,这也成为近年来火成岩油气藏高效勘探与开发的瓶颈之一。笔者依据获得的储层物性、孔喉半径、含油产状和试油结果资料,对辽河油田火成岩油藏的有效储层物性下限和物性分类评价标准进行研究。

1 火成岩储层评价标准现状与问题

火成岩储层目前没有统一的分类评价标准(表1) 鉴于火成岩油气藏的特殊性,需要建立针对火成岩储层的分类评价方法。目前辽河油田火成岩勘探开发主要参考中国石油天然气行业标准^[18]和赵澄林等^[19]提出的企业试行标准。由于当时的火成岩探井较少、测试数据不够充足,因此火成岩储层分类与评价标准主要参照碎屑沉积岩标准确定。随着火成岩勘探开发的深入,现有标准未能充分反映火成岩储层自身特点的问题逐渐显现。例如,将现有火成岩储层物性测试数据按现行的储层分类标准投图发现,大多数测试数据(84.1%)落在Ⅲ类和Ⅳ类区,属于较差—差储层,但其中不乏工业油气层(图1,据赵澄林标准^[19])。这表现出现行储层分类评价标准与油气勘探实际情况的明显不适应性。

表1 火成岩储层物性分级和储层分类评价标准回顾

Table 1 Classification and evaluation criteria of igneous rock reservoirs

分类标准	石油天然气行业标准 ^[18]	赵澄林等 ^[19]	王璞珺等 ^[20]
孔隙度分级界限	高孔 $\varphi > 15\%$; 较高孔 $\varphi = 15\% \sim 10\%$; 中孔 $\varphi = 10\% \sim 5\%$; 低孔 $\varphi = 5\% \sim 3\%$; 特低孔 $\varphi < 3\%$	高孔 $\varphi > 15\%$; 较高孔 $\varphi = 15\% \sim 10\%$; 中孔 $\varphi = 10 \sim 5$; 低孔 $\varphi < 5\%$	I类 $\varphi > 8\%$; II类 $\varphi = 8\% \sim 6\%$; III类 $\varphi = 6\% \sim 3\%$; IV类 $\varphi = 3\% \sim 2\%$; V类 $\varphi < 2\%$
渗透率分级界限	高渗 $k > 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 较高渗 $k = (10 \sim 5) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 中渗 $k = (5 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 低渗 $k = (1 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 特低渗 $k < 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	高渗 $k > 5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 中渗 $k = (5 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 低渗 $k = (1 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 特低渗 $k < 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	I类 $k > 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; II类 $k = (0.5 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; III类 $k = (0.1 \sim 0.05) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; IV类 $k = (0.05 \sim 0.03) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; V类 $k < 0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
储层分类评价标准	I类: 较高孔—较高渗及以上; II类: 中孔—中渗; III类: 低孔—低渗及以下	I类: 高孔—高渗; II类: 较高孔—中渗; III类: 中孔—低渗; IV类: 低孔—特低渗	I类: 好储层; II类: 较好储层; III类: 中等储层; IV类: 差储层; V类: 非储层

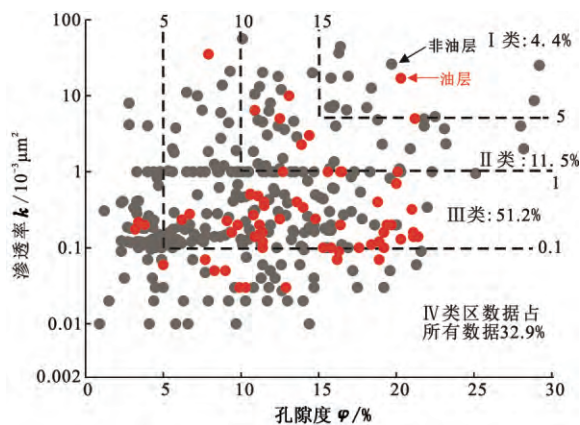


图1 以往辽河盆地东部凹陷火成岩物性分类评价标准

Fig.1 Previous classification and evaluation criteria of igneous rock property in eastern depression of Liaohe Basin

由此可见,有必要建立新的、更适合于当前火成岩储层研究和勘探现状的分类与评价标准,并需要

明确有效储层的物性下限。笔者依据辽河盆地东部凹陷1996年以来火成岩探井和油气勘探结果,在前人资料分析整理和储层物性测试的基础上,提出火成岩储层分类评价标准。该标准近年来在辽河盆地火成岩勘探中应用效果良好,对其他地区火成岩勘探和研究也应具有参照和借鉴作用。

2 储层岩性及物性测试

本次试验根据辽河盆地东部凹陷361块火成岩样品孔渗分析结果所得,其中93块样品的分析测试项目由大庆油田勘探开发研究院中心化验室完成,另268块样品的分析测试结果收集自辽河油田勘探开发院,分析测试项目由辽河油田勘探开发研究院试验技术研究所完成。试验样品为辽河盆地东部凹陷地区的火成岩,埋深为1170~3960m,地层自中生界到东营组均有分布。共发育12种岩性(图2),其中以粗面岩(图3(a))、玄武岩(图3(b))为主,

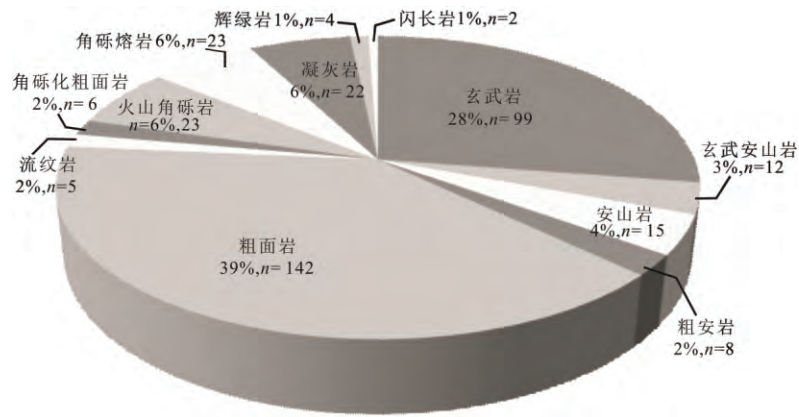


图 2 试验样品岩石类型及其分布比例(n 为样本数)

Fig.2 Rock types and volumn percent of volcanic rocks in Liaohe Basin(n =sample number)

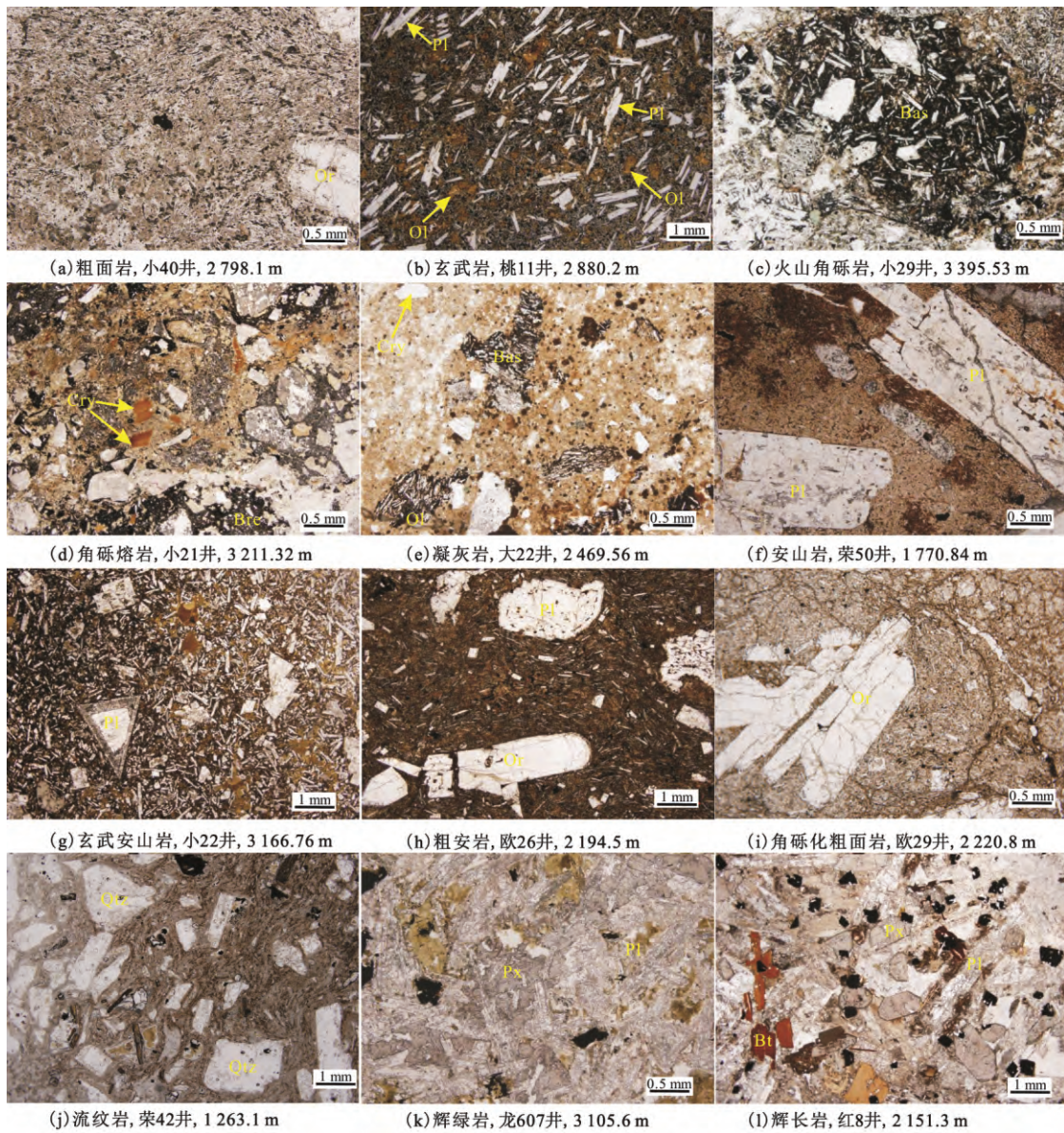


图 3 试验样品典型岩性显微单偏光照片

Fig.3 Microscopic photos of typical lithology of experimental samples

合计占全部试验样品的70%以上,其次为火山角砾岩(图3(c))、角砾熔岩(图3(d))、凝灰岩(图3(e))和安山岩(图3(f)),少量玄武安山岩(图3(g))、粗安岩(图3(h))、角砾化粗面岩(图3(i))、流纹岩(图3(j))、辉绿岩(图3(k))和辉长岩(图3(l))。样品物性测试方法参照国家标准SY/T 5336-2006《岩心分析方法》^[21]。

3 有效储层物性下限与储层评价标准

储层评价实际上就是要解决两方面的问题,一是确定储层下限,划分储集层与非储集层;二是对储层进行分类评价。

3.1 火成岩有效储层物性下限

有效储层物性下限是指储集层能够成为有效储层应该具有的最低物性参数值,通常用孔隙度、渗透率的某个确定值来度量。其一般与储层特征、原油性质、地层温度、地层压力等因素有关,同时与采油工艺和开发技术水平也密切相关。物性下限值的确定方法很多^[22-23]。一般某一种方法确定的有效储层物性下限只能从一个方面反映储层的特征,并不能代表储层真正的下限,因此确定有效储层物性下限时应使用多种方法互相验证,使确定的储层下限能尽可能多地反映储层的特征^[24]。针对研究区资料情况,综合运用物性、含油产状、试油、压汞等资料,分别采用经验系数法、最小含油喉道半径法、含油产状法和试油法等4种方法,通过与勘探情况对比,综合确定有效储层物性下限。

3.1.1 经验系数法

该方法是美国岩心公司常用的方法。对于中、低渗透性油田,以岩心实测孔隙度、渗透率资料为基础,将全油田的平均孔隙度、渗透率值乘以5%作为油田的物性下限。据掌握的全油田孔隙度、渗透率分别求算术平均值和几何平均值乘以5%,求得研究区的储层物性下限孔隙度为7%,渗透率为 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.1.2 最小含油喉道半径法

储层中的孔隙分为两种:一种为有效孔隙,由大于束缚水膜厚度的喉道连通,其中储存的流体在一定压差条件下是可以流动的;另一种为无效孔隙,由小于束缚水膜厚度的喉道连通,孔隙度被束缚水饱和,流体几乎无法流动。

通常认为,当储层孔喉小于 $0.1 \mu\text{m}$ 时油气难以进入其中形成有效储层^[25],据此将 $0.1 \mu\text{m}$ 作为储层的孔喉下限。根据压汞数据,统计渗透率与喉

道半径关系(图4), $0.1 \mu\text{m}$ 喉道半径对应的渗透率为 $0.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,据此将 $0.33 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 定为有效储层的渗透率下限。

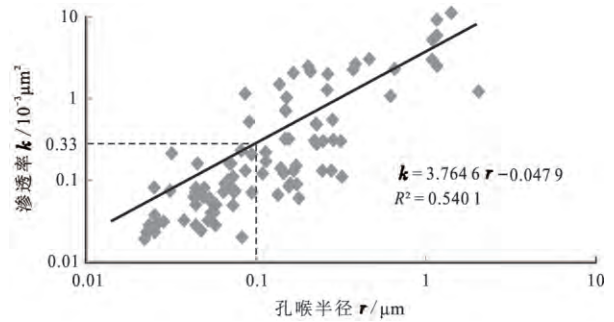


图4 孔喉半径与渗透率关系

Fig.4 Relation of permeability with pore throat radius

3.1.3 含油产状法

岩心作为认识地下油气层最直接的静态资料,对储层的评价有着最直观的研究意义。用取心并试油结果与岩心含油级别、物性建立关系,确定含油产状的出油下限(图5)。火山岩与沉积岩相比属低孔、低渗储层,因此含油级别为油斑及以上都可以出油。根据含油产状与物性相关性,确定含油产状的出油下限,求出相应的物性下限为孔隙度为5%,渗透率为 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

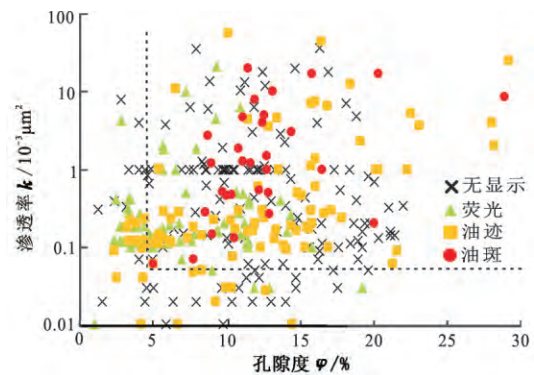


图5 含油产状孔隙度-渗透率关系

Fig.5 Relationship between porosity and permeability of oil-bearing occurrence

3.1.4 试油法

试油资料是油气勘探过程中判断储层含油气性和产液能力的一种重要指标,能够客观反映储集层特征及其与储层流体的相互作用关系。根据试油成果对储层进行有效储层和非有效储层划分,将非有效储层(综合地质解释为干层)和有效储层(综合地质解释为油层、含油水层、油水同层、水层)对应的孔隙度、渗透率绘制在同一坐标系内,两者分界处所对应的孔隙度、渗透率值即为有效储层物性下限值。经过对比研究实际资料发现,两者分界不明显,因为

生产中往往会选显示好的井段进行试油, 试油结果为干层数据较少并且物性跨度极大, 因此认为可以选取有效储层的最低物性作为研究区火山岩有效储层的物性下限。根据此标准求取的物性下限为孔隙度为 3%, 渗透率为 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 6)。

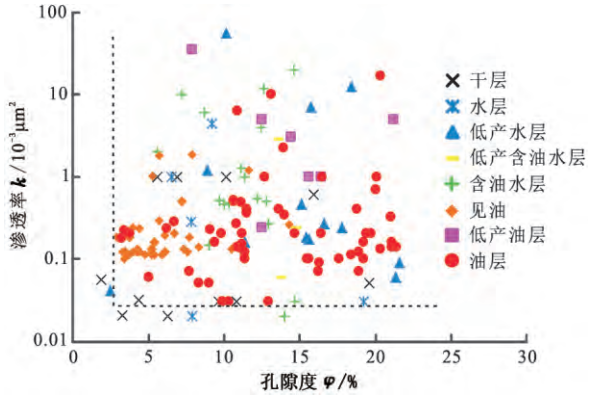


图 6 试油结果孔隙度-渗透率关系

Fig.6 Relationship between porosity and permeability of well production test result

根据上述 4 种确定有效储层物性下限的方法, 确定的孔隙度下限区间为 3%~7%, 渗透率下限区间为 $(0.03 \sim 0.33) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。为最大限度挖掘产能下限, 取其最低值作为辽河盆地有效储层物性下限, 即孔隙度为 3%, 渗透率为 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 作为

研究区有效储层物性下限。

3.2 火成岩储层评价标准

无论是沉积岩还是火成岩, 储层评价中主要涉及到评价指标选取和权系数确定两方面。评价参数选取通常根据研究区不同的勘探程度及所具有的资料^[26]。权系数的确定通常用灰色系统理论、主成分分析和层次分析等方法^[27]。对低渗透油气藏而言, 储层评价参数通常要包括喉道半径等表征孔喉结构的参数^[28]。火山岩储层总体上归属于低渗透储层, 储层评价参数通常包括孔隙度、渗透率、孔喉半径、岩石密度等定量指标和岩性、岩相、储集空间和产状等定性指标^[29]。

辽河油田自 1996 年开始大规模火山岩油气勘探至今一直在探索火山岩储层评价的有效途径^[30]。勘探和研究中发现, 与沉积岩相比火成岩储层物性具有更强的非均质性, 当采用多参数储层评价时, 往往会得到互相矛盾的结果; 而采用沉积岩常用的多参数加权综合评价法, 由于各时期测试指标不相配套、难以比较, 不便于勘探应用。为此采用含油产状-物性和试油结果-物性两类交会图版(图 7), 建立火成岩储层评价标准。流程主要包括评价指标选取、储层划分级别和分级界线值确定。

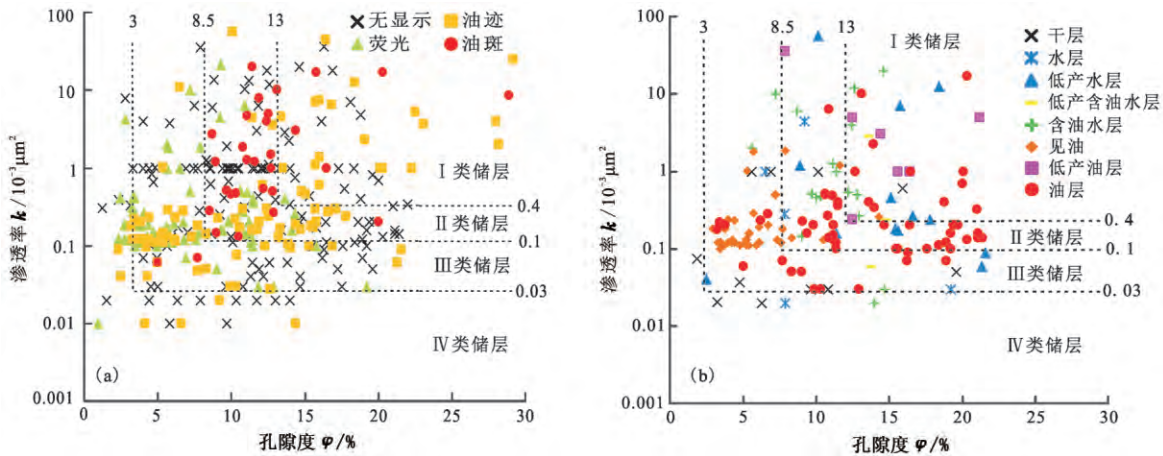


图 7 含油产状段、试油层段孔隙度-渗透率交会图

Fig.7 Crossplots of property and permeability in oil-bearing occurrence (a) and tested intervals (b)

辽河盆地火成岩油气勘探已经进行了 20 a, 目前已经积累了大量分析测试资料, 数据齐全且各个勘探时期对比性较好的仍是孔隙度、渗透率、含油产状和试油结果。为了便于勘探应用和老资料对比, 同时考虑到其他盆地火山岩油气勘探会有类似情况^[31], 选取这 4 个指标进行储层评价, 将辽河盆地火成岩储层分为 4 类(表 2), 即高孔高渗储层(I类)、较高孔较高渗储层(II类)、中孔中渗储层(III类)和低孔低渗储层(IV类)。

类) 和低孔低渗储层(IV类)。

标准中界限的划分主要考虑了以下因素: 现行的石油天然气行业标准(表 1)对于火山岩储层的分类仍然偏粗, 不能满足像辽河盆地这种典型火山岩油气田勘探评价的需要。另外其他一些油田已有标准针对辽河油田又太过详细, 不利于实际生产中的应用。考虑到辽河油田的应用习惯, 笔者认为保留原 4 级分类模式最为适合。各类储层划分标准界限

主要考虑了储层的含油性特点。I类和II类储层界限为孔隙度为13%,渗透率为 $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,II类和III类储层界限为孔隙度为8.5%,渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其中I类储层中含油产状显示较好(含油产状显示油迹或油斑)和试油结果显示较好(试油结果为油层或低产油层)在4个分级中所占比例最大。同时I类和II类储层包含了绝大部分含油产状为油迹和油斑以及试油结果为油层和低产油层的数据。III类和IV类储层的划分界限(孔隙度3%,渗透率 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)主要依据辽河盆地油层的物性下限值,小于此值的储层(IV类储层)一般不含油(图8)。另外,考虑到各个级别中样本分布应相对均匀,前人评价标准中数据过多的集中于IV类储层

(图1),此次分类标准中各个级别样本占总样本数比例分别为I类储层为14%、II类储层为39%、III类储层为27%、IV类储层为20%。相较前人评价标准样品分布更加均匀。

表2 本文中辽河盆地东部凹陷火成岩储层分类标准
Table 2 Igneous rock reservoir classification standard in eastern depression of Liaohe Basin

分类	孔隙度 $\varphi/\%$	评价	渗透率 $k/10^{-3} \mu\text{m}^2$	评价
I	>13	高孔	>0.4	高渗
II	8.5~13	较高孔	0.1~0.4	较高渗
III	3~8.5	中孔	0.03~0.1	中渗
IV	<3	低孔	<0.03	低渗

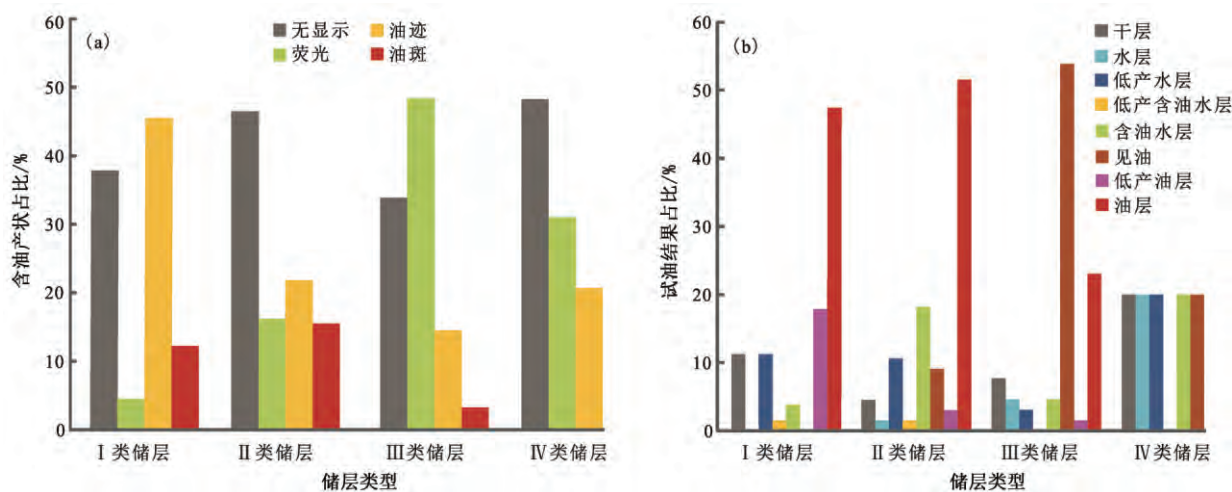


图8 各类储层不同含油产状、试油结果所占比例

Fig.8 Corresponding proportion of different classes of oil-bearing occurrence and well test results for igneous rock reservoirs from level one to four

4 讨论

4.1 岩性和岩相对储层物性的影响

火成岩的岩性和岩相与储层物性有着极为密切的联系。不同的岩性储层物性往往有着较大的差异,而岩相往往通过岩石的岩性和结构、构造等加以识别。利用实测孔隙度、渗透率数据统计不同岩性、岩相的物性,研究区火成岩储层物性较差,岩心分析孔隙度最大为29.2%,最小为0.9%;渗透率最大为 $56 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最小为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,整体属中低孔、低渗储层。物性受岩性、岩相影响明显,从岩性看(图9),角砾化粗面岩、流纹岩、凝灰岩、火山角砾岩等储层物性最好;玄武岩、安山岩、粗安岩、粗面岩次之;玄武安山岩、辉绿岩、辉长岩、角砾熔岩物性较差。从岩相看(图10),火山通道相次火山岩亚相、

爆发相的热基浪亚相、火山碎屑流亚相、喷溢相复合熔岩流亚相和侵出相中带亚相物性最好;火山通道相的火山颈亚相、爆发相的热基浪亚相、侵出相的内带和外带亚相次之;火山通道相隐爆角砾岩亚相、喷溢相的玻质碎屑岩亚相、火山沉积相含外碎屑火山沉积亚相、侵入相的边缘和中心亚相5个亚相的物性较差。由此可以看出,岩性、岩相是影响火成岩储集性能的直接因素,不同的岩性、岩相条件从根本上决定了储层物性的不同,但因其难以量化,且在油田实际生产中根据岩性、岩相分别确定储层物性下限和制定评价标准,应用起来过于繁琐,无法操作。因此,本文以下的讨论中将研究区发育的不同岩性、岩相火成岩看作一个整体,制定统一的物性下限和评价标准,以便于在油田实际生产中的应用。

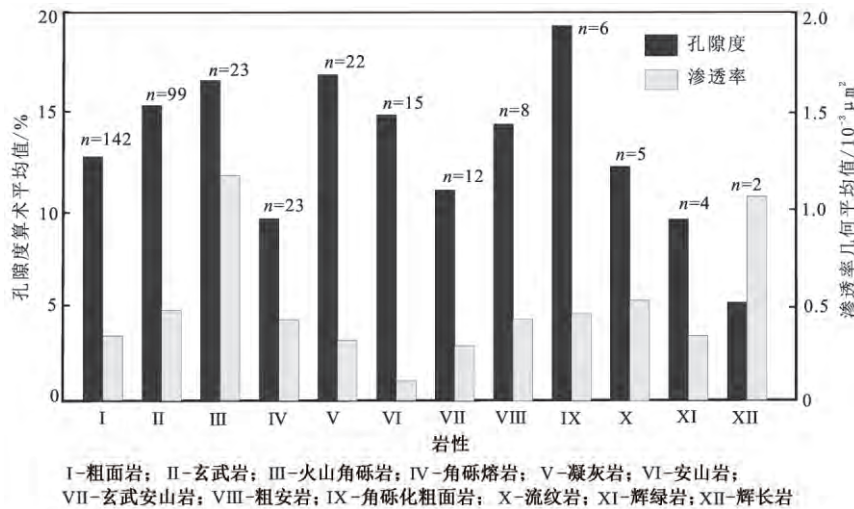


图 9 辽河盆地东部凹陷火成岩孔隙度、渗透率与岩性对应关系 (n=样品数)
Fig.9 Porosity and permeability versus lithology of igneous rocks in eastern depression, Liaohe Basin (n=sample number)

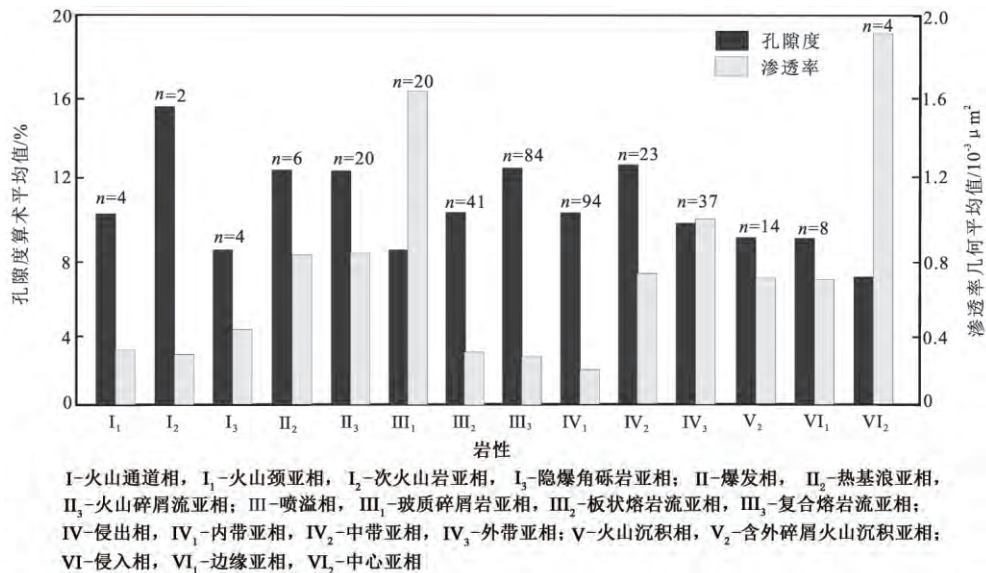


图 10 辽河盆地东部凹陷火成岩孔隙度、渗透率与岩相对应关系 (n 为样品数)
Fig.10 Porosity and permeability versus lithofacies of igneous rocks in eastern depression, Liaohe Basin (n=sample number)

4.2 孔喉结构对储层物性的影响

岩石的宏观孔渗特征是岩石微观孔隙结构及喉道大小的反映。岩石的孔隙及喉道是油气储集和流动的空间和通道,油气是否能在一定压差下从岩石中流出取决于喉道的粗细,即孔喉半径的大小。压汞分析表明,研究区火山岩储层孔喉分布可分为 2 种基本类型。(1) 单峰型:这种类型以粒间孔隙为主,其形态只受颗粒格架影响,喉道半径分选很好,类型均一,峰值出现在 $0.01 \sim 2.5 \mu m$,对渗透率作贡献的即此类孔喉。(2) 双峰或多峰型:储集空间由溶蚀孔、粒间孔或气孔和裂缝构成双重或多重介

质,故出现双峰或多峰态。主峰一般出现在 $0.16 \sim 4.0 \mu m$,次峰一般在 $0.01 \sim 0.04 \mu m$,对渗透率作贡献的也是此类孔喉。此种类型喉道偏细,分选较差。运用含油喉道半径下限可求取储层的物性下限,但在储层分类评价中,受样品代表性的局限以及数据量小难以比较等因素,不便于放到评价标准中。

5 结论

(1) 火成岩储层属中低孔—低渗储层,其形成环境、储集空间构成以及后期的改造作用与沉积岩储层相比有着明显的不同,具有埋深深、岩性复杂、

相变快、非均质性强、储集类型和成藏条件复杂的特点。火成岩油气勘探需要一套不同于沉积岩储层评价标准的独特的火成岩储层分类评价体系。

(2) 采用经验系数法、最小含油喉道半径法、含油产状法和试油法计算的物性下限基本一致,综合4种方法将研究区火成岩储层的有效储层物性下限值确定为孔隙度为3%,渗透率为 $0.03 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

(3) 选取有效孔隙度、有效渗透率、含油产状和试油结果等参数将火成岩储层标准分别划分为4类。将储层物性参数与试油结果相结合,进行综合分类评价,所确定的储层分类指标能够客观反映火成岩储集层的特征,有利于油气勘探和资源评价。

参考文献:

- [1] CHEN Z Y, YAN H, LI J S, et al. Relationship between Tertiary volcanic rocks and hydrocarbons in the Liaohe Basin, People's Republic of China [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(6): 1004-1014.
- [2] 王璞珺, 张功成, 蒙启安, 等. 地震火山地层学及其在我国火山岩盆地中的应用 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 597-610.
WANG Pujun, ZHANG Gongcheng, MENG Qi'an, et al. Applications of seismic volcanostratigraphy to the volcanic rifted basins of China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 597-610.
- [3] 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 Yanquan, HU Daqian, CAI Guogang, et al. Characteristics and controlling factors of Cenozoic volcanic reservoirs in Liaohe Basin, NE China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 896-904.
- [4] 宋占东, 查明, 赵卫卫, 等. 惠民凹陷阳信洼陷火成岩及其对油气成藏的影响 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2007, 31(2): 1-8.
SONG Zhandong, ZHA Ming, ZHAO Weiwei, et al. Characteristics of igneous rocks and their effects on hydrocarbon accumulation in Yangxin subsag of Huimin sag [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2007, 31(2): 1-8.
- [5] 曲江秀, 高长海, 查明, 等. 准噶尔盆地克拉美丽气田石炭系火山岩储层特征及成岩演化 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 1-8.
QU Jiangxiu, GAO Changhai, ZHA Ming, et al. Reservoir characteristics and diagenetic evolution of Carboniferous volcanic rock in Kelameili gas field of Junggar Basin [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2014, 38(5): 1-8.
- [6] WANG P J, CHEN S M. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, Northeast China [J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3): 499-523.
- [7] 杨正明, 张英芝, 郝明强, 等. 低渗透油田储层综合评价方法 [J]. 石油学报, 2006, 27(2): 64-67.
YANG Zhengming, ZHANG Yingzhi, HAO Mingqiang, et al. Comprehensive evaluation of reservoir in low-permeability oilfields [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2): 64-67.
- [8] 王艳忠, 操应长, 宋国奇, 等. 东营凹陷古近系深部碎屑岩有效储层物性下限的确定 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, 33(4): 16-21.
WANG Yanzhong, CAO Yingchang, SONG Guoqi, et al. Determination of physical property lower limit of deep clastic effective reservoirs of Paleogene in Dongying depression [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2009, 33(4): 16-21.
- [9] 王健, 操应长, 高永进, 等. 东营凹陷古近系红层砂体有效储层的物性下限及控制因素 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(4): 27-33.
WANG Jian, CAO Yingchang, GAO Yongjin, et al. Petrophysical parameter cutoff and controlling factors of effective reservoir of red beds sandbodies of Paleogene in Dongying depression [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011, 35(4): 27-33.
- [10] 唐华风, 李瑞磊, 吴艳辉, 等. 火山地层结构特征及其对波阻抗反演的约束 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 620-627.
TANG Huafeng, LI Ruilei, WU Yanhui, et al. Textural characteristics of volcanic strata and its constraint to impedance inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2): 620-627.
- [11] 陈振岩, 仇劲涛, 王璞珺, 等. 主成盆期火山岩与油气成藏关系探讨 [J]. 沉积学报, 2011, 29(4): 798-808.
CHEN Zhenyan, QIU Jintao, WANG Pujun, et al. Relationship between volcanic rocks and hydrocarbon accumulation during dominant period of Basin Formation in Liaohe Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(4): 798-808.
- [12] SRUOGA P, RUBINSTEIN N, HINTERWIMMER G. Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobifera, South Patagonia, Argentina

- [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 132: 31-43.
- [13] 史艳丽, 侯贵廷. 辽河油田黄于热地区火山岩储层物性评价[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2005, 41(4): 577-585.
SHI Yanli, HOU Guiting. An assessment on reservoir quality of volcanic rocks in Huang-Yu-Re area, Liaoh Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2005, 41(4): 577-585.
- [14] 徐正顺, 王渝明, 庞彦明, 等. 大庆徐深气田火山岩气藏储集层识别与评价[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(5): 521-531.
XU Zhengshun, WANG Yuming, PANG Yanming, et al. Identification and evaluation of Xushen volcanic gas reservoirs in Daqing [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(5): 521-531.
- [15] 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): 416-432.
- [16] 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.
- [17] 罗静兰, 邵红梅, 张成立. 火山岩油气藏研究方法与勘探技术综述[J]. *石油学报*, 2003, 24(1): 31-38.
LUO Jinglan, SHAO Hongmei, ZHANG Chengli. Summary of research methods and exploration technologies for volcanic reservoirs [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 24(1): 31-38.
- [18] 中国石油天然气总公司. 油气储层评价方法(SY/T 6285-1997) [S]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [19] 赵澄林, 孟卫工, 金春爽, 等. 辽河盆地火山岩与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.
- [20] 王璞珺, 冯志强. 盆地火山岩[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [21] 中国石油天然气总公司. 岩心分析方法(SY/T 5336-2006) [S]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [22] 郭睿. 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.
GUO Rui. Supplement to determining method of cut-off value of net pay [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(5): 140-144.
- [23] 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.
GENG Longxiang, CAO Yushan, YI Zhiwei, et al. A study on petrophysical property cutoffs of sandstone reservoirs in Pucheng oil field [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(1): 81-83.
- [24] 张春, 蒋裕强, 郭红光, 等. 有效储层基质物性下限确定方法[J]. *油气地球物理*, 2010, 8(2): 11-16.
ZHANG Chun, JIANG Yuqiang, GUO Hongguang, et al. Methods to determine the matrix petrophysical property low limits of the effective reservoir [J]. *Petroleum Geophysics*, 2010, 8(2): 11-16.
- [25] 崔永斌. 有效储层物性下限值的确定方法[J]. *国外测井技术*, 2007, 22(3): 34.
CUI Yongbin. Determination methods of the petrophysical lower limit value for the effective reservoir [J]. *World Well Logging Technology*, 2007, 22(3): 34.
- [26] 张琴, 朱筱敏, 钟大康, 等. 储层“主因素定量”评价方法的应用: 以东营凹陷下第三系碎屑岩为例[J]. *天然气工业*, 2006, 26(10): 21-23.
ZHANG Qin, ZHU Xiaomin, ZHONG Dakang, et al. Application of major element quantification method in reservoir assessment: taking the Paleogene clastic reservoirs in Dongying sag as examples [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(10): 21-23.
- [27] 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): 8-11.
SUN Hongzhi, LIU Jiyu. Research on comprehensive and quantitative reservoir evaluation [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2004, 23(6): 8-11.
- [28] 杨正明, 姜汉桥, 朱光亚, 等. 低渗透含水气藏储层评价参数研究[J]. *石油学报*, 2008, 29(2): 252-255.
YANG Zhengming, JIANG Hanqiao, ZHU Guangya, et al. Research on reservoir reevaluation index for low-permeability water-bearing gas reservoir [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 29(2): 252-255.
- [29] 兰朝利, 王金秀, 杨明慧, 等. 低渗透火山岩气藏储层评价指标刍议[J]. *油气地质与采收率*, 2008, 15(6): 32-35.
LAN Chaoli, WANG Jinxiu, YANG Minghui, et al. A preliminary view about indexes of low permeable volcanic reservoir evaluation [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2008, 15(6): 32-35.

- [30] 郭克园,蔡国刚,罗海炳,等. 辽河盆地欧利坨子地区火山岩储层特征及成藏条件[J]. 天然气地球科学, 2002, 13(3/4): 60-66.
GUO Keyuan, CAI Guogang, LUO Haibing, et al. Volcanic rock features and oil formation conditions in Oulituozi area of Liaoh Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2002, 13(3/4): 60-66.
- [31] 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: D辑, 2011, 41(11): 1613-1626.
ZOU Caineng, HOU Lianhua, TAO Shizhen, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in northern Xinjiang, China[J]. Science China(Ser D) 2011, 41(11): 1613-1626.

(编辑 徐会永)