

文章编号: 1004—5589 (2022) 03—0559—09

辽河拗陷古近系玄武岩气孔带测井响应特征与储层意义

韩旭¹, 黄玉龙¹, 刘兴周², 郭强²

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;
2. 中国石油辽河油田分公司 勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010

摘要: 基于16口钻井岩芯和常规测井资料, 通过岩芯描述、薄片鉴定、扫描电镜、孔隙度(Φ_e)测定及气孔含量(Φ_v)统计, 将辽河拗陷古近系玄武岩流动单元划分为致密层($\Phi_v < 1\%$, $\Phi_e < 5\%$)、少孔层($1\% < \Phi_v < 5\%$, $5\% < \Phi_e < 10\%$)、中孔层($5\% < \Phi_v < 10\%$, $10\% < \Phi_e < 15\%$)和多孔层($\Phi_v > 10\%$, $\Phi_e > 15\%$)。提出将少孔层声波时差下限($59.7 \mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$)、中孔层声波时差下限($61.5 \mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$)和上限($84.3 \mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$)分别作为划分致密层、少孔层、中孔层和多孔层的测井界线。总结了板状熔岩流、气孔-致密互层型和多孔-少孔互层型复合熔岩流3类玄武岩储层流动单元的测井响应特征与气孔分带模式。指出玄武岩储层有效孔隙包括气孔充填残余孔、杏仁体溶孔和黏土矿物杏仁体内微孔, 多孔-少孔互层型复合熔岩流整体上气孔发育, 储集性能最好。

关键词: 古近系玄武岩; 气孔分带性; 测井响应; 火山岩储层; 辽河拗陷

中图分类号: P618.13; P588 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2022.03.010

Logging response of vesicle zonation and reservoir significance of Paleogene basalts in Liaohe depression

HAN Xu¹, HUANG Yulong¹, LIU Xingzhou², GUO Qiang²

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;
2. Research Institute of Liaohe Oilfield, CNPC, Panjin 124010, Liaoning, China

Abstract: Based on coring and conventional logging data of 16 wells, lava flow units of Paleogene basalts in Liaohe depression are divided into four layers including massive layer ($\Phi_v < 1\%$, $\Phi_e < 5\%$), minor vesicular layer ($1\% < \Phi_v < 5\%$, $5\% < \Phi_e < 10\%$), medium vesicular layer ($5\% < \Phi_v < 10\%$, $10\% < \Phi_e < 15\%$) and highly vesicular layer ($\Phi_v > 10\%$, $\Phi_e > 15\%$) through core description, thin section identification, scanning electron microscope, porosity (Φ_e) measurement and vesicle proportion (Φ_v) statistics. It is proposed that the lower limit of AC in minor vesicular layer ($59.7 \mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$), lower limit of AC in medium vesicular layer ($61.5 \mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$) and the upper limit of AC in medium vesicular layer ($84.3 \mu\text{s} \cdot \text{ft}^{-1}$) as the logging division of massive, minor vesicular, medium vesicular and highly vesicular layer, respectively. Three types of reservoir distribution patterns and their logging responses are summarized including tabular lava flow unit, vesicular-massive and minor-highly vesicular interbedding compound lava flow unit. The effective porosities of basaltic reservoir are composed of residual infilling vesicles, amygdaloid dissolved porosities and micropores inside amygdaloid of clay minerals. On the whole,

收稿日期: 2021-10-21; 修订日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41702128)与中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2017E-1601)联合资助。

第一作者: 韩旭(1997—),女,硕士研究生,主要从事油气地质方面的研究。E-mail: 1456549835@qq.com

通信作者: 黄玉龙(1982—),男,博士,副教授,主要从事油气储层地质学与火山地质学研究。E-mail: long@jlu.edu.cn

high-quality reservoirs are primarily developed in the minor-highly vesicular interbedding lava flow unit due to larger vesicle proportion.

Keywords: Paleogene basalt; vesicle zonation; logging response; volcanic reservoir; Liaohe depression

0 引言

全球已发现的火成岩油气藏中约 30% 与玄武岩相关^[1]。玄武岩中普遍发育的原生气孔使其具备良好的储集能力, 不仅构成地下油气、地热和地下水资源的储集层^[2-3], 还可提供碳封存的天然储库^[4-5], 因此在地下流体资源开发利用和碳中和战略实施等方面具有重要意义。近年来, 以印度 Deccan 高原玄武岩、美国 Columbia River 玄武岩、北大西洋火成岩省 (NAIP) 以及中国川西地区峨眉山玄武岩等为代表的溢流玄武岩中, 陆续有大量露头 and 钻孔资料证实, 原生气孔的发育是玄武岩具备良好储渗条件的重要前提^[6]。玄武岩流动单元内部的气孔分带性决定了其有效储层的空间分布与发育规模^[7]。常规测井资料被广泛用于火成岩储层测井解释与评价, 包括岩性与岩相判别^[8-9]、蚀变程度评价与蚀变指数定量表征^[10-12]、储层流体性质判别^[13]等方面。溢流玄武岩具有单层厚度小、多层叠置发育的特点, 地层划分和储层内部结构刻画难度较大^[14]。Helm-Clark et al.^[15]系统总结了玄武岩的常规测井响应特征, 黄玉龙等^[7]通过岩芯-测井相结合建立了溢流玄武岩流动单元测井响应模式, Nelson et al.^[16]总结了 4 种代表性玄武岩岩相的测井响应特征与空间分布模式。随着玄武岩油气藏勘探和开发的不断深入, 有必要进一步明确以气孔带为主的优质储层的发育特征与分布规模。

本研究利用渤海湾盆地辽河拗陷丰富的钻井岩芯资料和常规测井资料, 在岩芯-测井标定的基础上, 开展配套的显微镜下薄片鉴定、气孔含量面孔率分析和孔渗测试, 分析了玄武岩不同类型流动单元的气孔分带性及其测井响应特征, 探讨了玄武岩气孔分带性与有效储层的关系, 建立了储层发育模式, 并总结了气孔带发育规模。

1 区域地质概况

辽河拗陷位于渤海湾盆地东北角, 是在前中生代基底之上发育的中-新生代陆内裂谷盆地, 内部由东部凹陷、西部凹陷、大民屯凹陷、东部凸起、

西部凸起和中央凸起 6 个次级构造单元构成 (图 1)。辽河拗陷新生界古近系地层中玄武岩广泛发育, 自下而上在房身泡组、沙河街组、东营组和馆陶组地层中均发育不同规模的玄武岩^[17], 主要发育致密玄武岩、气孔玄武岩和角砾化玄武岩等岩石类型, 平面上在东部凹陷、西部凹陷和大民屯凹陷均有分布^[18]。近年来, 陆续于房身泡组和沙河街组三段玄武岩中有多口井获得工业油气流, 显示出良好的油气成藏条件和勘探潜力。

2 研究材料与方法

本文主要基于 16 口钻井的岩芯资料和常规测井资料, 对研究区玄武岩气孔带的测井响应特征及分布特征进行研究。完成玄武岩井段岩芯观察描述累计 203 m, 普通薄片鉴定 47 件, 铸体薄片分析 23 件, 实测孔渗数据 34 组。利用 JMicroVision 图像分析软件对岩芯和薄片照片进行面孔率统计, 每个样品点选取 3 张不同视域照片进行统计后取平均值代表该样品的气孔含量, 如图 2 中 a、b、c 分别为 T11 井 1 985.61 m 处三张不同视域的岩芯照片, a 为视域 1, 气孔含量为 8.8%; b 为视域 2, 气孔含量为 8.0%, c 为视域 3, 气孔含量为 7.8%。取平均值 8.2% 作为 T11 井 1 985.61 m 处岩芯的气孔含量。共计完成气孔含量统计 47 组。研究区内气孔玄武岩中气孔多被充填, 为了反映真实气孔带的测井响应特征, 上述统计的气孔含量包括未充填、全部充填和部分充填的气孔。

本次研究涉及的常规测井资料包括自然电位 (SP)、井径 (CAL)、自然伽马 (GR)、深侧向电阻率 (RLLD)、浅侧向电阻率 (RLLS)、密度 (DEN)、补偿中子 (CNL) 和声波时差 (AC) 8 条曲线。在利用测井曲线进行解释前, 首先利用沙河街组三段发育的厚层泥岩作为标准层, 对测井曲线进行环境校正, 并通过岩芯-测井标定, 将岩芯资料进行深度归位。

通过对气孔含量与测井数据对应关系的分析, 气孔含量与电阻率 (RLLD)、声波 (AC)、中子 (CNL) 和密度 (DEN) 均有良好的对应关系 (图 3)。

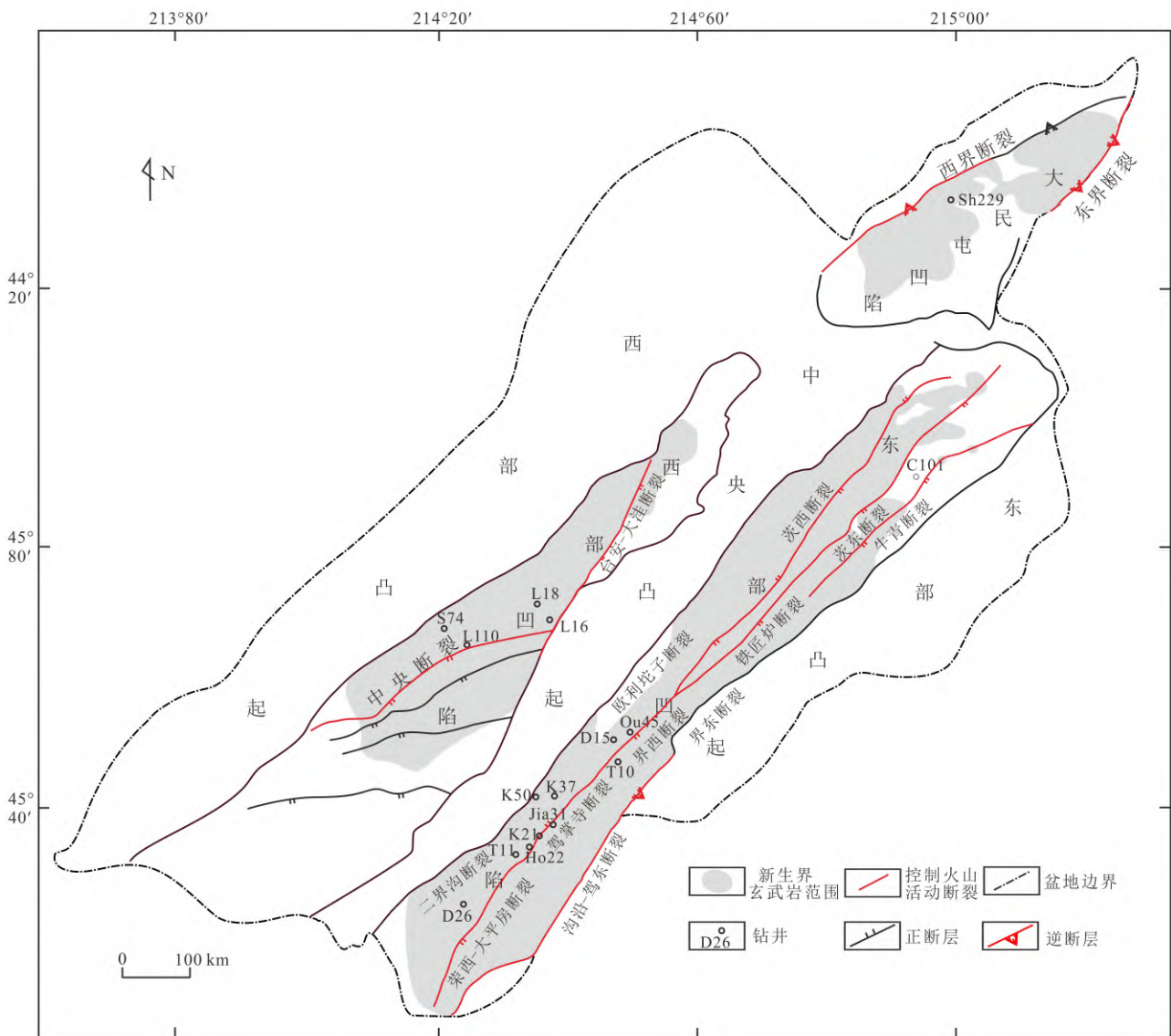


图 1 辽河拗陷古近系玄武岩分布

Fig. 1 Distribution of Paleogene basalts of Liaohede depression

电阻率、密度与气孔含量呈反比变化；中子和声波与气孔含量呈线性正相关关系。依据曲线的变化趋势可以看出电阻率与气孔含量的相关性最高，中子相关性最低。因此，最终选定深侧向电阻率、声波时差、补偿中子和密度 4 条曲线分析玄武岩气孔分带性及其测井响应特征。

3 玄武岩气孔分带性及其测井响应特征

3.1 玄武岩气孔分带性

玄武岩中的气孔是在基性岩浆上涌溢出地表直至凝固成岩的过程中，由于压力和温度骤降导

致挥发分逸出形成气泡，气泡上浮并不断聚合为更大的气泡，最终被冷却的熔岩表壳捕获而形成^[19]。熔岩表壳凝固自外向内推进，导致在玄武岩流动单元内部呈现出气孔数量和大小变化的分带性及气孔形态上的差异性。气孔分布的纵向分带性主要呈现为“气孔→致密→气孔”（图 4）和“多孔→少孔”的变化特征（图 5）。

辽河拗陷新生界玄武岩主要发育在板状熔岩流、复合熔岩流和玻质碎屑岩 3 种类型中，气孔主要发育在板状熔岩流和复合熔岩流之中^[20]。板状熔岩流动单元为岩浆自火山通道溢出后沿地表快速

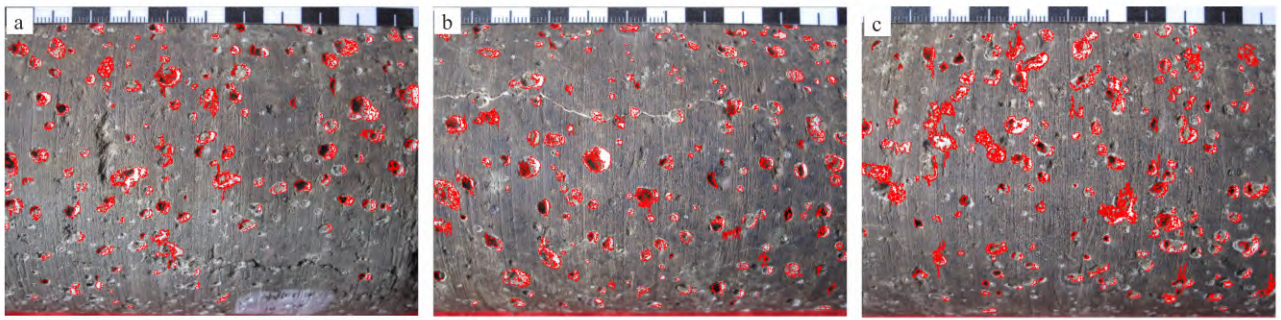


图2 T11井1985.6 m处岩芯气孔识别与气孔含量统计结果

Fig. 2 Identification and statistics of vesicle content of core samples at 1985.6 m of Well T11

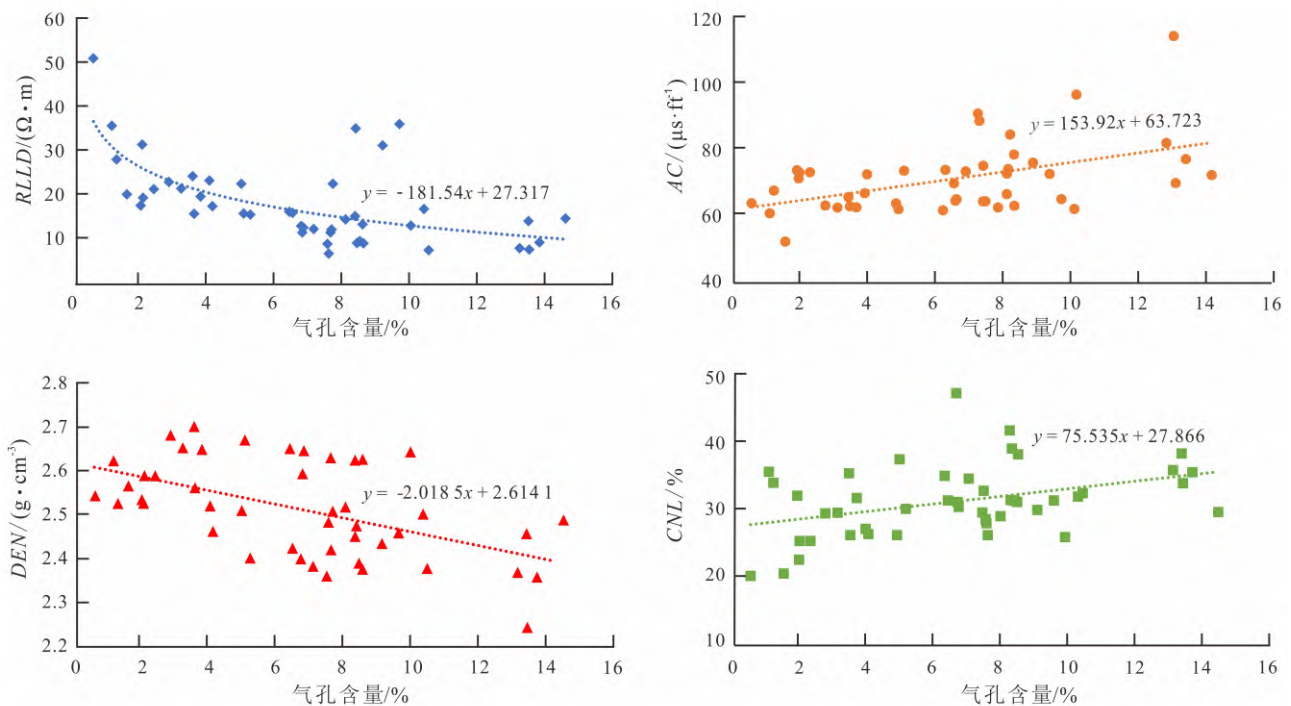


图3 玄武岩气孔含量与测井交会图

Fig. 3 Cross plots of vesicle proportion and logging parameters of basalts

流动形成的厚层平板状、扁平状熔岩流，单层厚度相对较大，纵向上呈现明显的“气孔—致密—气孔”分带特征，上部气孔层厚度较大（约占40%），下部气孔层厚度较小（约占10%），自顶底向内气孔含量逐渐减少，顶部气孔分带性明显，依次出现多孔→中孔→少孔。复合熔岩流动单元为岩浆沿熔岩管道流动溢出，多次叠加形成薄层交织状熔岩流，单次喷发量相对较少，主要存在两种产出方式，一种呈致密玄武岩和气孔玄武岩薄层互层产出，另一种为气孔含量不同的玄武岩互层产出。

3.2 玄武岩气孔带测井响应特征及分布模式

依据气孔含量 (Φ_v) 大小及其与实测孔隙度对应关系，将研究区玄武岩划分为致密 ($\Phi_v < 1\%$)、少孔 ($1\% < \Phi_v < 5\%$)、中孔 ($5\% < \Phi_v < 10\%$) 和多孔 ($\Phi_v > 10\%$) 4类 (图6)。基于16口钻井取芯段玄武岩气孔带划分结果，统计分析了玄武岩不同气孔发育程度的测井响应特征 (表1)。

结果显示，玄武岩气孔发育程度与电阻率、声波时差、补偿中子和密度具有良好的对应关系。致密段玄武岩气孔含量 $< 1\%$ ，实测孔隙度 $< 5\%$ ，储

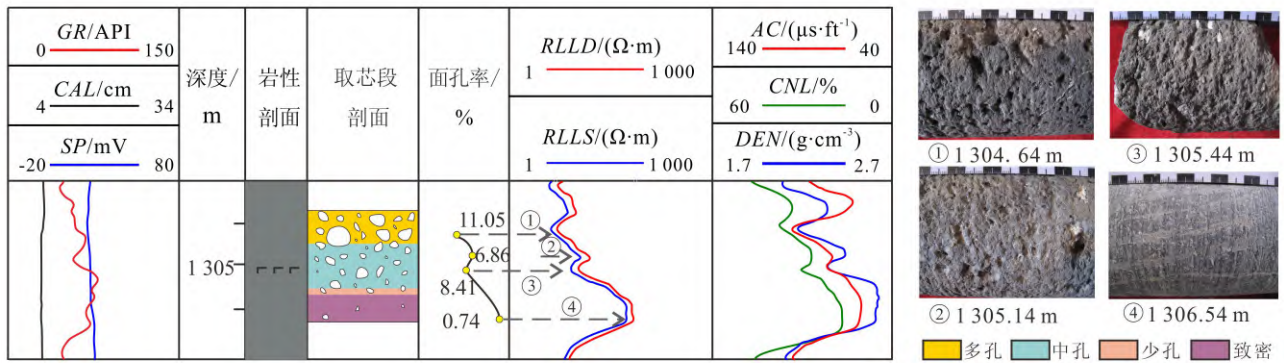


图 4 D26 井板状熔岩流气孔带测井响应特征

Fig. 4 Logging response of vesicle zonation in tabular flow basalts of Well D26

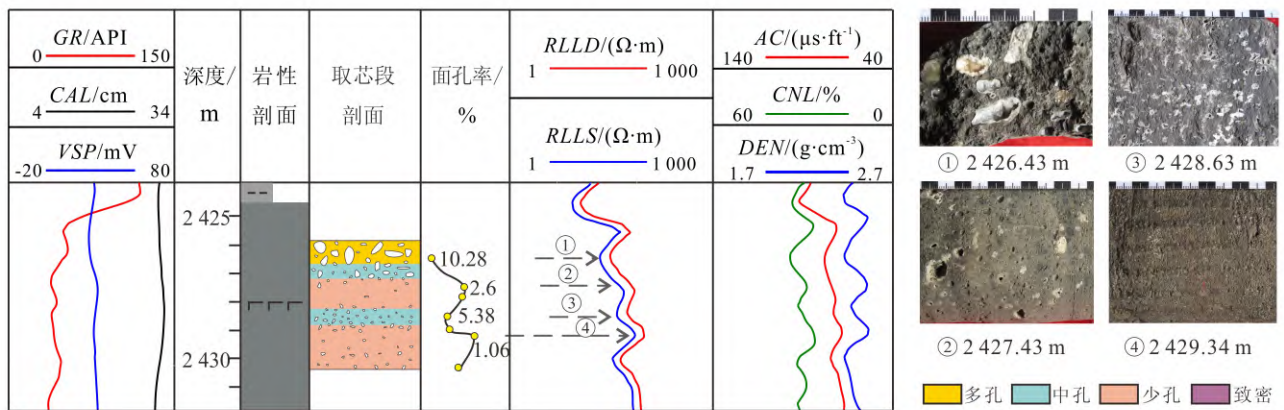


图 5 T11 井复合熔岩流气孔带测井响应特征

Fig. 5 Logging response of vesicle zonation in compound flow basalts of Well T11

表 1 玄武岩气孔不同分带的测井参数分布特征

Table 1 Logging parameters of different zonation of basalts

气孔分带	气孔含量/%	孔隙度/%	RLLD/ (Ω·m)		AC/ (μs·ft ⁻¹)		CNL/%		DEN/ (g·cm ⁻³)	
			范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
多孔	>10	>15	3.8~14.9	10.6	70.7~92.4	76.8	30.0~47.2	34.8	2.24~2.49	2.39
中孔	5~10	10~15	6.9~22.8	13.4	61.5~84.3	73.1	26.3~39.5	33.1	2.36~2.65	2.48
少孔	1~5	5~10	20.4~39.8	24.7	59.7~67.7	64.3	25.6~32.4	30.2	2.50~2.70	2.58
致密	<1	<5	36.1~51.5	38.9	53.7~60.8	57.3	20.4~26.0	23.6	2.72~2.81	2.77

集物性相对较差，测井响应以高电阻率、高密度、低声波时差和低中子为主要特征，测井曲线一般呈现为平滑曲线。随着气孔含量的增加，电阻率和密度递减，声波时差和中子孔隙度递增，测井曲线呈现平滑或微齿状。“气孔-致密”互层组成的板状熔岩流动单元测井曲线整体呈现为箱形。多孔段玄

武岩气孔含量普遍 > 10%，实测孔隙度普遍 > 15%，属于高孔隙度优质储层，其电阻率和密度值最低，声波时差和中子孔隙度值最高。“多孔-中孔-少孔”互层组成的复合熔岩流动单元测井曲线多呈指状或低幅齿状叠合。

对比致密带与少孔带的测井参数分布可以看出，

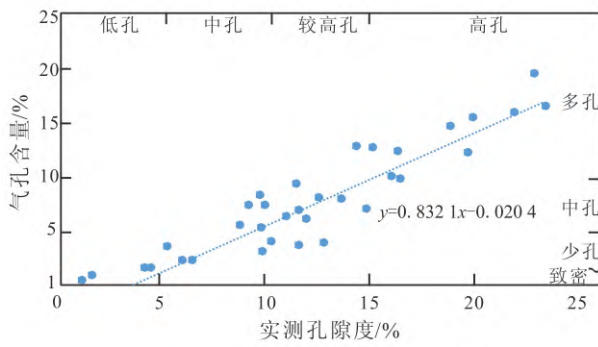


图6 玄武岩气孔含量与实测孔隙度对应关系
Fig.6 Cross plots of vesicle proportion and reservoir porosity of basalts

两者的电阻率存在较大的重叠范围，而“三孔隙度测井”（AC、CNL和DEN）具有相对明显的界限，因此将少孔层声波时差下限值（ $59.7 \mu s \cdot ft^{-1}$ ）、补偿中子下限值（25.6%）和密度上限值（ $2.70 g \cdot cm^{-3}$ ），作为划分本区古近系玄武岩致密带和气孔带的测井参数界线。由于多孔与中孔、中孔与少孔之间的三孔隙度测井数值重叠范围相对较广，为了保证气孔带划分的可操作性，以中孔带的测井数值范围为界线，即，将中孔层声波时差下限值（ $61.5 \mu s \cdot ft^{-1}$ ）、补偿中子下限值（26.3%）和密度上限值（ $2.65 g \cdot cm^{-3}$ ）作为中孔与少孔的划分界线，以中孔层声波时差上限值（ $84.3 \mu s \cdot ft^{-1}$ ）、

补偿中子上限值（39.5%）和密度下限值（ $2.36 g \cdot cm^{-3}$ ）作为中孔与多孔的划分界线。此外，由于玄武岩中普遍存在的黏土矿化作用会导致补偿中子值偏大，气孔充填、高角度收缩节理缝和构造缝的存在对密度曲线响应特征分析影响较大，因此当三条曲线划分结果不一致时，可以将受干扰相对较少的声波时差作为划分玄武岩气孔分带的关键测井曲线。

依据玄武岩不同气孔分带的测井响应特征，对K21、D26和Ho23井的玄武岩层段进行了气孔带划分，建立了板状熔岩流动单元及两种复合熔岩流动单元的气孔带分布模式（图7）。其中，板状熔岩流动单元测井曲线整体呈箱型或钟形，顶、低气孔层以中—高中子、中—高密度、中—高声波时差为典型特征，其顶部多为渐变接触，底部多为突变接触（图7a）。中部致密层以高阻、高密度和低中子、低声波时差为典型特征。复合熔岩流动单元的测井响应特征整体以中—高振幅齿化的电阻率、中子、密度、声波为典型特征，具体而言，致密—气孔玄武岩互层的测井曲线整体呈现箱形，致密层表现为平滑曲线，气孔层表现为齿形或指状，致密层与气孔层之间多呈突变接触（图7b），多孔—少孔互层玄武岩的测井曲线以齿形的电阻率、中子、声波及密度为特征（图7c）。

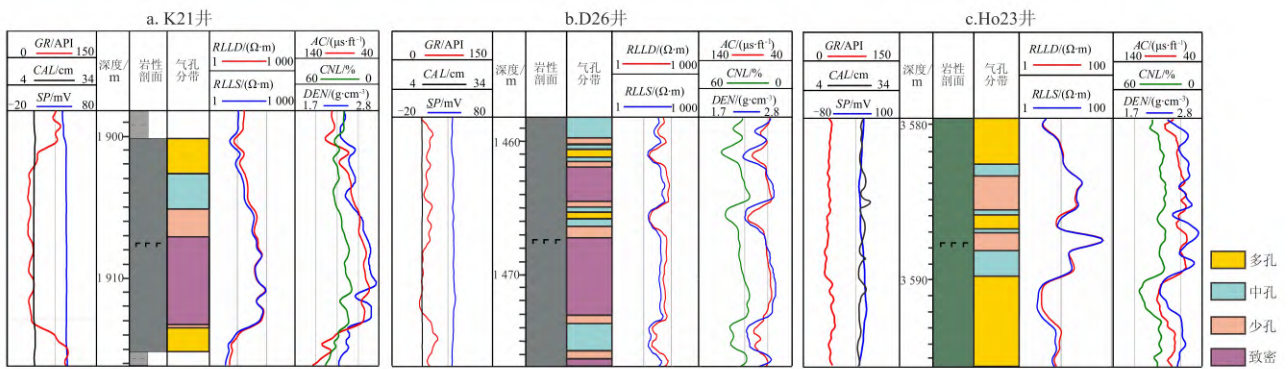


图7 辽河拗陷古近系玄武岩储层气孔带分布模式
Fig.7 Distribution model of vesicle zonation in Paleogene basalts in Liaohede depression

4 玄武岩气孔带的储层意义

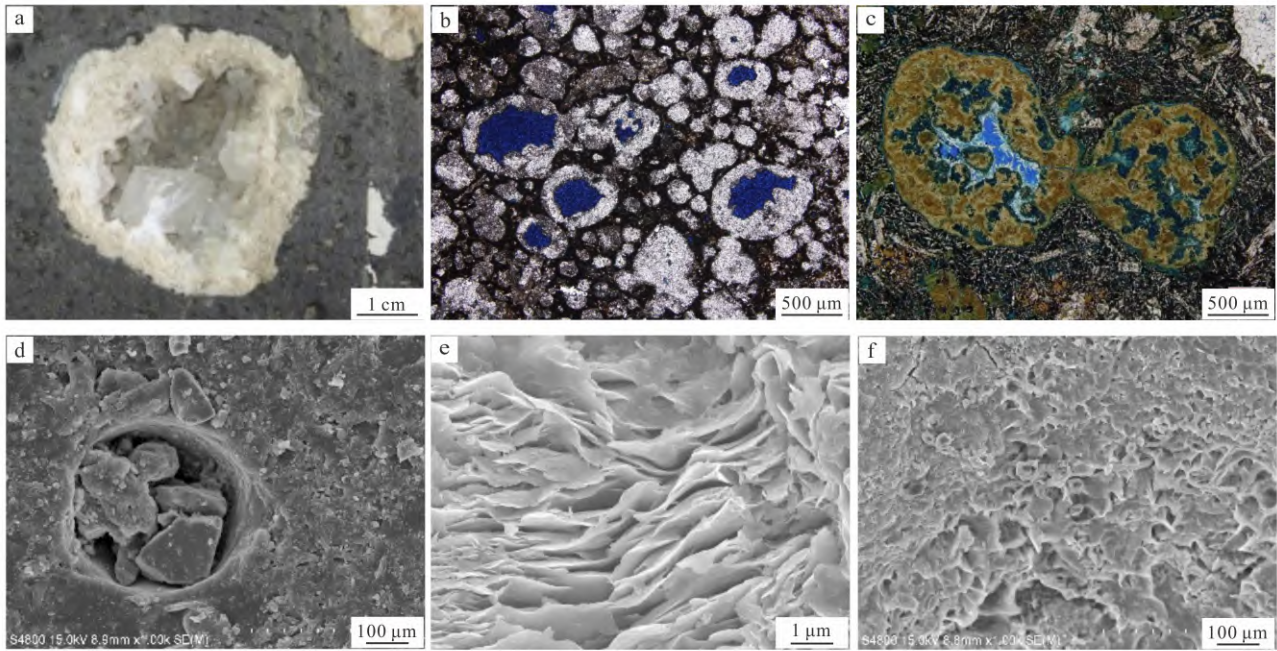
4.1 玄武岩与气孔相关的有效孔隙发育特征

玄武岩储层孔隙度与气孔含量呈正相关关系，气孔含量越高，相应的储层孔隙度越大。铸体薄片

鉴定、扫描电镜分析与面孔率统计显示，玄武岩主要发育原生气孔、斑晶溶蚀孔、基质微孔、收缩缝和构造缝等储集空间，其中原生气孔对有效孔隙的贡献最大（平均达到83%）。在橄榄石、辉石和基性斜长石蚀变以及岩浆期后热液充填的共同作用

下, 玄武岩气孔充填作用普遍, 充填物类型和充填期次复杂多样, 充填物包括钙质、硅质、沸石类和黏土矿物等多种类型, 最终形成的有效孔隙主要包

括气孔充填残余孔、杏仁体溶孔和黏土矿物杏仁体内微孔 (图 8)。



a. 气孔中钙质半充填, 内部形成晶形完好的方解石, 保留部分充填残余孔, L18 井, 2 575.05 m; b. 气孔中充填沸石, 部分大气孔中未完全充填形成充填残余孔, T11 井, 2 428.23 m; c. 蒙皂石和沸石两期充填, 蒙皂石晶间微孔中浸染蓝色树脂后呈蓝绿色, 核部沸石杏仁体部分溶蚀形成杏仁体溶孔, Jia31 井, 3 731.00 m; d. 充填残余孔显微特征, X10 井, 1 994.70 m; e. 绿泥石晶间微孔, T11 井, 2 266.23 m, S66 井, 3 311.65 m; f. 蒙皂石晶间微孔。

图 8 辽河拗陷古近系玄武岩气孔充填类型与有效孔隙

Fig. 8 Pore filling types and effective porosities of Paleogene basalts in Liaohe depression

4.2 气孔带发育规模

依据气孔带测井响应特征和代表性井段的流动单元分布模式, 对 9 口典型井玄武岩地层进行了流动单元划分, 并据此统计了不同类型流动单元中气

孔层的发育厚度和所占比例 (表 2)。辽河拗陷古近系玄武岩发育的两类三种流动单元中, 板状熔岩流流动单元厚度最大, 平均厚度为 16.7 m, 内部致密带平均厚度 9.4 m (占 52.4%), 顶部气孔层

表 2 辽河拗陷古近系玄武岩流动单元分带厚度及比例

Table 2 Zoning thickness and proportion of Paleogene basaltic flow units in Liaohe depression

流动单元类型	流动单元发育模式	流动单元厚度/m	流动单元分带	厚度/m	比例/%	典型井
板状熔岩流	气孔-致密-气孔	16.7	致密带	9.4	52.4	K21、K54、L18
			顶部气孔带	4.3	28.2	
			底部气孔带	2.8	19.4	
复合熔岩流	多孔-少孔	4.4	多孔	2.3	52	D26、Ho37、Re107
			少孔	2.1	48	
	气孔-致密	5.1	气孔	2.6	52	
			致密	2.5	48	

注: 表中数值均为平均值。

厚度大于底部气孔带,气孔层合计平均厚度 7.3 m (占 47.6%)。多孔-少孔互层型复合熔岩流流动单元平均厚度 4.4 m,多孔层与少孔层厚度相当。气孔-致密互层型复合熔岩流流动单元平均厚度 5.1 m,气孔层厚度略大于致密层。从气孔层发育厚度比例来看,多孔-少孔型复合熔岩流整体上气孔发育,储层物性最好,气孔-致密互层型复合熔岩流储层略好于板状熔岩流。

5 结论

(1) 玄武岩熔岩流动单元内部气孔具有明显的分带性,有效孔隙主要包括气孔充填残余孔、杏仁体溶孔和黏土矿物杏仁体内微孔,储层有效孔隙度与气孔含量呈线性正相关关系。

(2) 依据气孔含量将玄武岩划分为致密层(气孔含量 < 1%,孔隙度 < 5%)、少孔层(1% < 气孔含量 < 5%, 5% < 孔隙度 < 10%)、中孔层(5% < 气孔含量 < 10%, 10% < 孔隙度 < 15%)和多孔层(气孔含量 > 10%, 孔隙度 > 15%)。

(3) 辽河拗陷古近系玄武岩发育 3 类熔岩流动单元: ①板状熔岩流中气孔主要发育在顶部和底部,测井曲线整体呈钟形或箱形,单层厚度平均 16.7 m,气孔带占比 47.6%; ②气孔-致密互层型复合熔岩流测井曲线呈箱形,致密层曲线平滑、气孔层齿形或指状、两者呈突变接触,单层厚度平均 5.1 m,气孔层占比 52%; ③多孔-少孔互层型复合熔岩流以高振幅齿化曲线为特征,单层厚度平均 4.4 m,整体上气孔发育,储集性能最好。

参考文献:

- [1] SCHUTTER S R. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2003, 214 (1): 35-68.
- [2] KEVIN L, DAVID M, DIMITRI V, et al. Hydrogeology of the Columbia River Basalt Group in the Columbia Plateau: road log and field trip stop descriptions [J]. Volcanoes to Vineyards: Geologic Field Trips through the Dynamic Landscape of the Pacific Northwest, 2009, 15 (30): 673-696.
- [3] HUSEYIN G, ARIF H. Utilization of basalt stone as a sensible heat storage material [J]. Energy Sources, 2006, 27 (14): 1357-1366.
- [4] SIGURDUR R G, ERIC H O. Carbon storage in basalt [J]. Science, 2014, 344 (6182): 373-374.
- [5] MATTER J M, STUTE M, SNBJRNSDOTTIR S, et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions [J]. Science, 2016, 352 (6291): 1312-1314.
- [6] HUANG Y L, WANG P J, CHEN S M. Distribution and characteristics of volcanic reservoirs in China [J]. Global Geology, 2009, 12 (2): 64-79.
- [7] 黄玉龙, 孙德有, 王璞珺, 等. 松辽盆地营城组玄武岩流动单元测井响应特征 [J]. 地球物理学报, 2011, 54 (2): 524-533.
HUANG Y L, SUN D Y, WANG P J, et al. Characteristics of well-logging response to lava flow units of the Lower Cretaceous basalts in Songliao Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54 (2): 524-533.
- [8] 牟丹, 张丽春, 徐长玲. 3 种经典机器学习算法在火山岩测井岩性识别中的对比 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51 (3): 951-956.
MOU D, ZHANG L C, XU C L. Comparison of three classical machine learning algorithms for lithology identification of volcanic rocks using well logging data [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51 (3): 951-956.
- [9] 洪一鸣, 王璞珺, 李瑞磊, 等. 基于常规测井数据的火山岩岩性神经网络识别: 以松辽盆地南部长岭断陷为例 [J]. 世界地质, 2021, 40 (2): 408-418.
HONG Y M, WANG P J, LI R L, et al. Neural network recognition of volcanic lithology based on conventional logging data: a case study of Changling fault depression, southern Songliao Basin [J]. Global Geology, 2021, 40 (2): 408-418.
- [10] 田晓冬, 刘得芳, 殷秋丽, 等. 南堡地区火山岩蚀变特征及储层测井评价 [J]. 世界地质, 2020, 39 (2): 379-387.
TIAN X D, LIU D F, YIN Q L, et al. Alteration characteristics of volcanic rocks and reservoir logging evaluation in Nanpu area [J]. Global Geology, 2020, 39 (2): 379-387.
- [11] 王欣茹, 闫顶点, 潘保芝, 等. 南堡地区蚀变火山岩储层测井响应特征与蚀变程度评价 [J]. 测井技术, 2021, 45 (1): 68-73.
WANG X R, YAN D D, PAN B Z, et al. Logging re-

- sponse characteristics and evaluation method of altered volcanic reservoir in Nanpu area [J]. *Well Logging Technology*, 2021, 45 (1): 68–73.
- [12] 顾定娜,孙万明,杨波,等. 三塘湖盆地石炭系水下火山岩蚀变特征及测井定量表征方法 [J]. *测井技术*, 2021, 45 (2): 168–172.
GU D N, SUN W M, YANG B, et al. Alternation characterization and well log evaluation of the subaqueous deposited volcanic rocks in Santanghu Basin [J]. *Well Logging Technology*, 2021, 45 (2): 168–172.
- [13] 张丽华,潘保芝,单刚义,等. 火山岩储层流体性质识别 [J]. *石油地球物理勘探*, 2008, 43 (6): 728–730, 611–612, 742.
ZHANG L H, PAN B Z, SHAN G Y, et al. Method for identifying fluid property in volcanite reservoir [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2008, 43 (6): 728–730, 611–612, 742.
- [14] 衣健,唐华风,王璞珺,等. 基性熔岩火山地层单元类型、特征及其储层意义 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47 (1): 149–158.
YI J, TANG H F, WANG P J, et al. Types, characteristics and reservoir significance of basic lava flow units [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47 (1): 149–158.
- [15] HELM–CLARK C M, RODGERS D W, SMITH R P. Borehole geophysical techniques to define stratigraphy, alteration and aquifers in basalt [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2003, 55 (1/2): 3–38.
- [16] NELSON C E, JERRAN D A, HOBBS R W. Flood basalt facies from borehole data: implications for prospectivity and volcanology in volcanic rifted margins [J]. *Petroleum Geoscience*, 2009, 15 (4): 313–324.
- [17] 冯玉辉,于小健,黄玉龙,等. 辽河盆地新生界火山喷发旋回和期次及其油气地质意义 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39 (5): 50–57.
FENG Y H, YU X J, HUANG Y L, et al. Eruption cycles and stages of Cenozoic volcanic rocks and their significance to hydrocarbon accumulations in Liaohe Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (National Science Edition)*, 2015, 39 (5): 50–57.
- [18] 王思琪,黄玉龙,冯玉辉,等. 渤海湾盆地辽河坳陷房身泡组玄武岩储层特征及油气勘探潜力 [J]. *中国矿业*, 2020, 29 (5): 173–177.
WANG S Q, HUANG Y L, FENG Y H, et al. Reservoir characteristics and hydrocarbon exploration potential of the basalts in Paleogene Fangshenpao Formation of Liaohe depression, Bohai Bay Basin [J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29 (5): 173–177.
- [19] AUBELE J C, CRUMPLER L S, ELSTON W E. Vesicle zonation and vertical structure of basalt flows [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1988, 35 (4): 349–374.
- [20] 黄玉龙,单俊峰,边伟华,等. 辽河坳陷中基性火成岩相分类及储集意义 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41 (6): 671–680.
HUANG Y L, SHAN J F, BIAN W H, et al. Facies classification and reservoir significance of the Cenozoic intermediate and mafic igneous rocks in Liaohe depression, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41 (6): 671–680.