

准噶尔盆地金龙油田二叠系佳木河组火山岩岩相组合及产能差异

鲍李银^{1,2}, 庞雄奇^{1,2}, 崔新璇^{1,2}, 陈宏飞^{1,2}, 高军³, 邹亮³, 赵振丞^{1,2},
王琛茜⁴, 王雷^{1,2}, 李闻东³, 刘利⁵

[1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249;
3. 中国石油新疆油田分公司重油开发公司, 新疆克拉玛依 834000; 4. 中国石油长庆油田分公司第二采气厂, 陕西榆林 719000;
5. 盎亿泰地质微生物技术(北京)有限公司, 北京 102200]

摘要:为解决准噶尔盆地金龙油田二叠系佳木河组火山岩岩相类型及优势储层展布特征不清、油气资源开发难度较大问题。基于岩心观察、测井分析及实验化验数据,系统分析了研究区火山岩的岩相类型、储层物性与储集空间特征,建立了岩相组合模型,提出了对产能的控制因素。研究结果表明:①准噶尔盆地金龙油田火山岩具有爆发相、溢流相和火山沉积相三大类。爆发相以熔结火山碎屑岩和安山质火山角砾岩为主,平均孔隙度大于10%,为主要储层;溢流相以熔岩为主,平均孔隙度小于6%,火山沉积相物性差。②研究区火山岩储层以气孔、杏仁体内孔及溶蚀孔为主,原生粒间孔较少,爆发相与溢流相顶部溶蚀孔洞发育最为显著。裂缝主要为构造缝和溶蚀缝,发育程度与断裂距离紧密相关,中-酸性溢流相以斜交缝、网状缝为主,基性溢流相以高角度直劈缝为主。③研究区有中-酸性热碎屑流亚相与中-酸性溢流相互层、基性热碎屑流亚相与基性溢流亚相频繁互层、中性空落亚相与中性溢流亚相互层、中性空落亚相与中-酸性热碎屑流亚相互层等4种岩相组合。产能最高的为中性空落亚相与中-酸性热碎屑流亚相互层组合,其次为中-酸性热碎屑流亚相与中-酸性溢流相互层组合、中性空落亚相与中性溢流亚相互层组合,基性热碎屑流亚相与基性溢流亚相频繁互层组合日产量最低。④储层有效厚度与含油饱和度对产能的影响最大,其次为孔隙度和地层压力。

关键词:产能差异;岩相组合;火山岩储层;佳木河组;金龙油田;准噶尔盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Lithofacies assemblages and differential productivity of volcanic rocks in the Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin

BAO Liyin^{1,2}, PANG Xiongqi^{1,2*}, CUI Xinxuan^{1,2}, CHEN Hongfei^{1,2}, GAO Jun³, ZOU Liang³,
ZHAO Zhencheng^{1,2}, WANG Chenxi⁴, WANG Lei^{1,2}, LI Wendong³, LIU Li⁵

[1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Heavy Oil Development Company, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China; 4. Second Gas Production Plant, Changqing Oilfield Company, Petrochina, Yunlin, Shanxi 719000; 5. AE & E Geomicrobial Technologies Inc., Beijing 102200, China]

Abstract: Volcanic rocks in the Permian Jiamuhe Formation of the Jinlong oilfield in the Junggar Basin exhibit unclear lithofacies types and dominant reservoir distribution, which hinder the exploitation of the oil and gas resources therein. To address these challenges, we systematically analyze the volcanic facies types, reservoir physical properties, and storage space characteristics in the study area using data from core observations, log analysis, and laboratory tests. Accordingly, we establish lithofacies assemblage models, while clarifying their controlling effects on productivity. The results indicate that the volcanic rocks in the Jinlong oilfield in the Junggar Basin can be categorized into three facies: explosive, overflow, and volcanic sedimentary facies. The explosive facies, among others, consists primarily of welded volcanoclastic rocks and andesitic volcanic breccias, and exhibits an average porosity exceeding 10%, forming dominant

收稿日期:2024-07-31;修回日期:2024-12-18。

第一作者简介:鲍李银(1998—),男,博士研究生,油气藏形成机制与分布规律。E-mail: 995959069@qq.com。

通信作者简介:庞雄奇(1961—),男,教授、博士研究生导师,油气藏形成机制与分布规律、油气资源评价与油气田勘探。E-mail: pangxq@cup.edu.cn。

reservoirs. While the overflow facies is dominated by lavas, featuring an average porosity of below 6%, and the volcanic sedimentary facies exhibits poor physical properties. In the volcanic reservoirs in the study area, vesicles, intra-amygdale pores, and dissolution pores predominate, with a minor presence of primary intergranular pores. Additionally, dissolution vugs are most developed at the top of the explosive and overflow facies. Fractures in the volcanic reservoirs are dominated by structural and dissolution fractures, with developmental degrees closely related to their distance from faults. The intermediate-acidic overflow facies mainly exhibits oblique and reticulate fractures, while the mafic overflow facies is dominated by high-angle, straight-split fractures. The study area exhibits four lithofacies assemblages: interbedded intermediate-acidic pyroclastic flow subfacies and intermediate-acidic overflow subfacies, frequently interbedded mafic pyroclastic flow subfacies and mafic overflow subfacies, interbedded neutral air-fall subfacies and neutral overflow subfacies, and interbedded neutral air-fall subfacies and intermediate-acidic pyroclastic flow subfacies. The interbedded neutral air-fall subfacies and intermediate-acidic pyroclastic flow subfacies exhibits the highest productivity, followed by interbedded intermediate-acidic pyroclastic flow subfacies and intermediate-acidic overflow subfacies and interbedded neutral air-fall subfacies and neutral overflow subfacies, and with the frequently interbedded mafic pyroclastic flow subfacies and mafic overflow subfacies coming at last in daily production. The productivity of the volcanic reservoirs is governed most significantly by the effective reservoir thickness and oil saturation, followed by porosity and formation pressure.

Key words: differential productivity, lithofacies assemblage, volcanic reservoir, Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin

引用格式: 鲍李银, 庞雄奇, 崔新璇, 等. 准噶尔盆地金龙油田二叠系佳木河组火山岩岩相组合及产能差异[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 136–150. DOI: 10. 11743/ogg20250110.

BAO Liyin, PANG Xiongqi, CUI Xinxuan, et al. Lithofacies assemblages and differential productivity of volcanic rocks in the Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 136–150. DOI: 10. 11743/ogg20250110.

2012年以来,随着石油天然气勘探领域的不断拓展,非常规油气资源逐步成为油气勘探的重要组成部分,其产量占比已达到26.35%^[1-3]。火山岩油气作为一类重要的非常规油气资源,自1957年以来中国在准噶尔、渤海湾、松辽和二连等盆地相继发现大量火山岩油气藏^[4-6]。目前,中国火山岩油气藏类型主要被划分为东部的原生型和西部的风化壳型,其探明石油地质储量已达 5.8×10^8 t以上,天然气地质储量超过 $4\,800 \times 10^8$ m³^[7-11],显示出巨大的开发潜力。国际上,火山岩油气藏研究以美国、俄罗斯和巴西等国为代表,早期主要聚焦于火山岩储层的形成机制、储集空间类型及其分布规律^[12-13]。近年来,随着地球物理技术的进步,国外研究更多聚焦于火山岩油气藏的精细勘探和定量表征。国内研究起步较晚,但已取得显著进展,包括火山岩储层岩相组合分类、储层非均质性及物性评价等领域^[14]。然而,无论是国内还是国外,对于火山岩储层的研究仍存在以下问题:①火山活动和构造活动的复杂性导致储层展布规律认知不足;②岩相组合与储层产能之间的定量关系不明确;③储层预测技术尚需进一步优化。研究区新疆准噶尔盆地金龙油田,位于中拐凸起北翼和玛湖凹陷南斜坡的交界区域,自2010年至今,共探明储量 $10\,476.17 \times 10^4$ t,是中国西部典型的火

山岩油气藏之一。本次研究的目的层二叠系佳木河组三段(P_3^j),自2014年以来探明含油面积已达31.7 km²、探明储量 $2\,873.4 \times 10^4$ t。然而,研究区复杂的火山活动和构造作用导致岩相组合认识不清、油-气-水关系复杂,且平面上相变迅速,储量动用率仅为20.8%,严重制约了资源开发^[15]。尽管已有研究表明火山岩爆发相整体物性较好,应为优质储层^[16],但实际生产显示,爆发相储层由于纵向岩相组合的差异,产能存在显著变化,单井日产量0.6~64.1 t。这表明,仅基于岩相类型对储层进行划分无法准确预测产能,需进一步深入探讨岩相组合与储层物性和产能之间的关系。为解决上述问题,本研究从岩相组合及其展布特征出发,系统分析火山岩储层的产能控制因素。深入研究岩相组合与产能关系,为优化井位布署和提高开发效率提供理论依据。

1 地质概况

1.1 构造特征

金龙油田位于准噶尔盆地西北缘中拐凸起,其南部、东部紧临生烃凹陷沙湾凹陷和盆1井西凹陷,东部为达巴松凸起和玛湖凹陷(图1)。其发育主要经历了

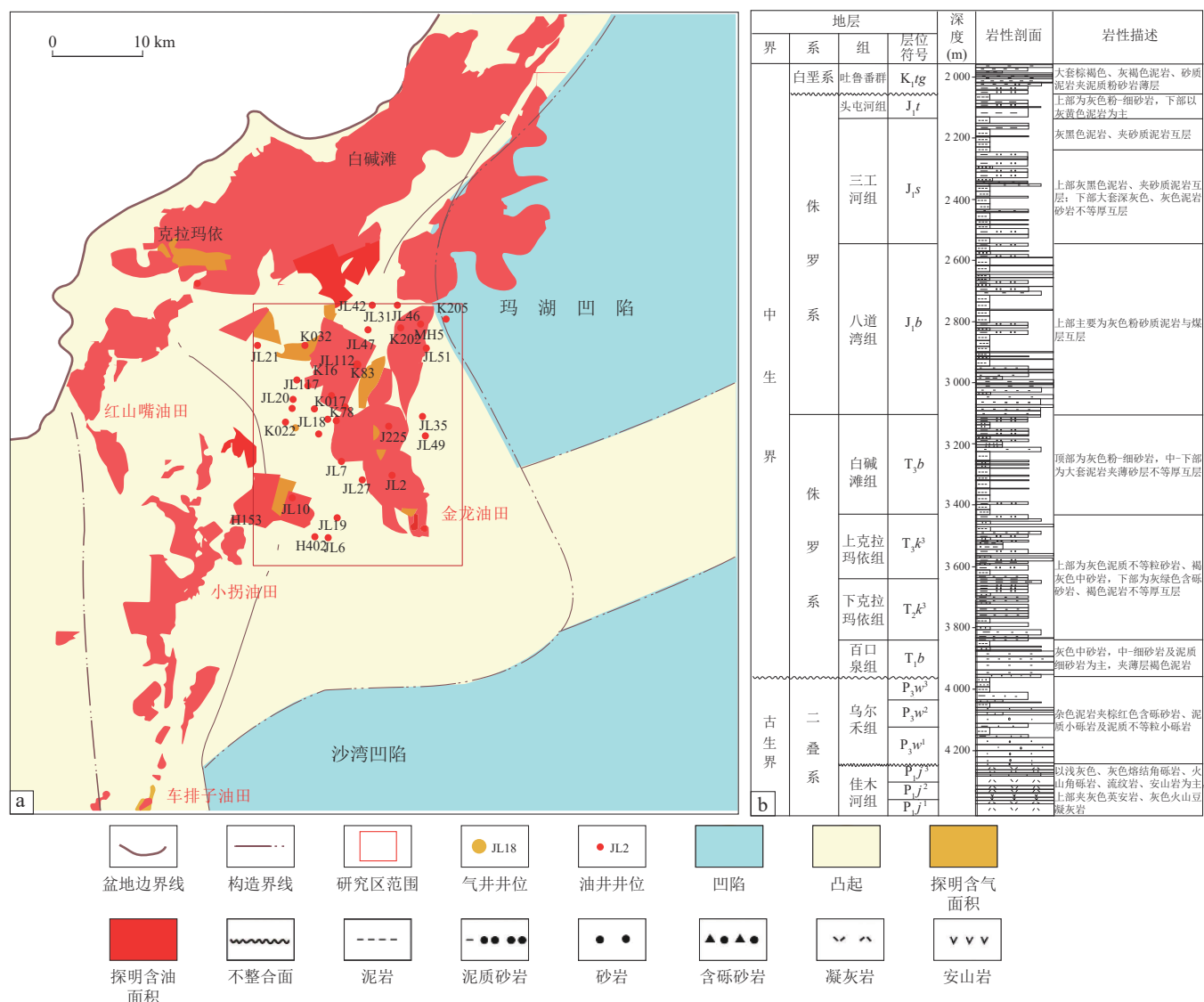


图1 准噶尔盆地中拐凸起金龙油田研究区地理位置(a)及地层柱状图(b)

Fig. 1 Geographic location map (a) and stratigraphic column (b) of the study area in the Jinlong oilfield in the Zhongguai uplift, Junggar Basin

4大阶段:石炭纪基底隆起阶段、早-中二叠世中拐凸起形成阶段、晚二叠世—三叠纪古凸起继承发育阶段和侏罗纪—新生代古隆起改造阶段。在晚石炭世末—三叠纪,研究区处于挤压构造应力环境,发育大规模压扭性断裂;进入侏罗纪后,该地区发生构造转换,在浅部发育一系列张性断裂,与深部断层在纵向上构成“二重叠加”断裂发育模式,成为深部油气向上运移的良好通道。同时多期次构造运动叠加也导致该地区发育多个不整合界面。研究区内的主要不整合面发育在石炭系与二叠系之间、二叠系上乌尔禾组与下伏地层之间,是油气运移的重要通道^[17-19]。

1.2 沉积特征

金龙油田以石炭系变质岩为基底,目的层位佳木

河组((P₁j)覆于石炭系变质岩之上,自上而下分为P₁j³,P₁j²和P₁j¹三段^[20]。P₁j³全区剥蚀严重,与上覆乌尔禾组呈不整合接触,整体厚度介于0~298 m,由东向西厚度逐渐减薄,至中拐凸起处完全尖灭,平均厚度150 m。研究区内以中-酸性爆发相为主,夹杂部分溢流相沉积。P₁j²以溢流相为主,夹杂砂砾岩、厚层火山凝灰岩沉积,厚度平均约800 m。P₁j¹厚度约1 000 m,与下伏石炭系不整合接触,以火山碎屑沉积为主。

2 火山岩储层特征

2.1 岩相特征

火山岩岩相是火山作用产物在空间上的分布以及

这些产物所呈现的外貌与结构特征^[21-22]。火山岩岩相控制了火山岩原生储集空间类型及分布特征,如溢流相顶部、底部岩石气孔发育,爆发相的火山碎屑岩中发育丰富的粒间孔和冷凝收缩缝等,造成其物性差别明显^[23]。

本次研究结合常规测井曲线、岩心、铸体薄片和成像测井等资料对金龙油田火山岩岩相类型及其特征进行了识别(图2)。研究区主要发育溢流相、火山沉积相以及爆发相。溢流相以火山熔岩为主;火山沉积相以沉凝灰岩为主;爆发相可分为空落亚相和热碎屑流亚相,其中,空落亚相以火山角砾岩为主,热碎屑流亚

相以熔结角砾岩为主。

溢流相形成于火山喷发的各个时期,多见于剧烈喷发后的间歇期,是熔浆沿着火山通道溢出火山口沿地表流动过程中,逐渐凝固而成^[24-25]。在研究区,溢流相可以分为酸性溢流亚相、中-酸性溢流亚相、中性溢流亚相和基性溢流亚相4类。溢流亚相从酸性到基性,自然伽马(GR)值逐渐减小,密度(DEN)逐渐增大,电阻率差异较大。流纹岩在岩心上和成像测井上显示明显的流纹构造,薄片可见溶蚀孔隙,霏细结构;安山岩发育气孔构造或杏仁状构造,薄片可见溶蚀孔隙,显微交

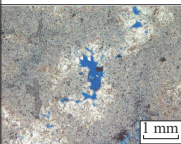
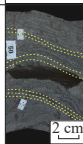
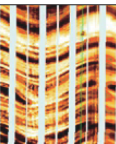
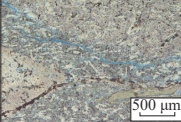
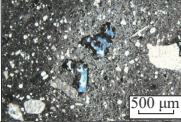
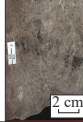
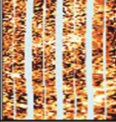
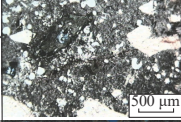
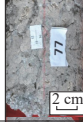
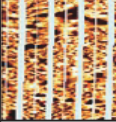
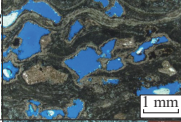
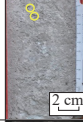
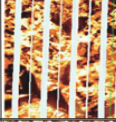
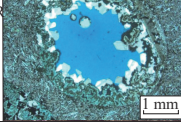
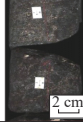
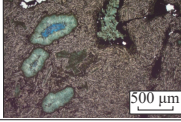
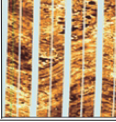
相	亚相	岩石类型	岩性	典型测井曲线	测井相特征	铸体薄片显微照片	镜下特征	岩心照片	岩心描述	成像测井图像	成像测井特征描述
溢流相	酸性溢流亚相	火山熔岩类	深灰色流纹岩	GR RT DEN	箱形-微齿型、高GR值(GR≥80 API)、中电阻率、中密度、低声波时差,密度为2.45 g/cm ³		J213井, 埋深4 252.41 m, 霏细结构, 流纹构造, 溶蚀孔		J213井, 埋深4 223.12 m, 岩心呈灰色, 具层状结构, 见明显的条状流纹构造, 石英呈粒状不规则分布		J213井, 埋深4 283 ~ 4 286 m, 整体为明暗交替、深浅交错的条状, 具有似层状特征, 有带状暗色分布, 发育流纹构造
	中-酸性溢流亚相		褐灰色英安岩	GR RT DEN	微齿形-平直型、中GR值(GR=60~75 API)、中-高电阻率、中-高密度、中-低声波时差, 密度在2.55~2.70 g/cm ³		J213井, 埋深4 219.39 m, 玻基交织结构, 溶蚀孔		J213井, 埋深4 217.44 m, 呈褐灰色, 见气孔构造, 流纹构造, 微裂隙		J218井, 埋深4 004 ~ 4 006 m, 显示为亮色条状, 整体为稍暗背景, 有带状暗色, 分布局部发育, 流纹构造
	中性溢流亚相		褐灰色安山岩	GR RT DEN	箱形-箱形、中低GR值(GR范围在60 API左右)、中-高电阻率、中-高密度、中-低声波时差, 密度在2.50~2.55 g/cm ³		J204井, 埋深4 191.06 m, 显微交织结构, 溶蚀孔		J204井, 埋深4 193.35 m, 呈褐灰色, 见气孔构造, 呈椭圆形和不规则状, 块状构造		J218井, 埋深4 248 ~ 4 250 m, 显示为稍暗背景, 可见明显直劈缝, 部分见流纹特征, 发育块状构造
	基性溢流亚相		灰白色玄武岩	GR RT DEN	微齿形-箱形、低GR值(GR范围在30 API左右)、高电阻率、高密度、低声波时差, 密度在2.65~2.75 g/cm ³		J213井, 埋深4 248.02 m, 斑状结构, 溶蚀孔		J213井, 埋深4 248.20 m, 呈浅灰色, 块状构造		J214井, 埋深4 240 ~ 4 260 m, 显示为稍暗背景, 有带状暗色, 裂缝分布, 发育熔岩结构
火山沉积相	再搬运火山沉积	沉火山碎屑岩	灰褐色沉凝灰岩	GR RT DEN	大幅度齿状、不稳定低GR(GR=30~45 API)、低电阻率(电阻小于100 Ω)、低密度、低声波时差, 密度在2.25~2.35 g/cm ³		J204井, 埋深4 287.05 m, 凝灰质结构, 半充填缝		J204井, 埋深4 239.80 m, 呈灰褐色, 见气孔构造, 外形多孔隙粗糙		J214井, 埋深3 945 ~ 3 956 m, 表现为稍暗背景, 白色的细小斑点, 线状为暗线指示, 存在低阻裂缝
爆发相	空落亚相	火山碎屑岩类	灰绿色安山质火山角砾岩	GR RT DEN	齿形-大幅度齿状、不稳定中-低GR(GR=45~60 API)、中-低电阻率、中密度、中-低声波时差, 密度在2.35~2.50 g/cm ³		J214井, 埋深4 089.40 m, 火山角砾结构, 发育气孔		J213井, 埋深4 253.15 m, 呈浅灰色, 块状构造, 火山碎屑及火山灰尘构成、少量晶屑		J214井, 埋深4 070 ~ 4 087 m, 显示为稍暗背景, 角砾间可见砾间孔, 显示为暗色斑状, 整体由高阻、低阻基质组成
	热碎屑流亚相	熔结火山碎屑岩类	浅灰色安山质熔结角砾岩	GR RT DEN	齿形-钟形、不稳定中低GR(GR=40~65 API)、中-低电阻率、中-低密度、中-低声波时差, 密度在2.25~2.45 g/cm ³		J204井, 埋深4 208.42 m, 角砾结构, 安山质熔结角砾岩		J213井, 埋深4 243.00 m, 呈浅灰色, 块状构造, 见气孔构造		J213井, 埋深4 326 ~ 4 337 m, 显示为稍暗背景, 发育气孔和杏仁状构造
			黑色玄武质熔结角砾岩	GR RT DEN	微齿形-齿形、钟形、低GR(GR=15~65 API)、中-低电阻率、中-低密度、中-低声波时差, 密度在2.25~2.45 g/cm ³		J201井, 埋深4 166.22 m, 角砾结构, 硅质充填气孔		J201井, 埋深4 128.55 m, 呈黑色, 块状构造, 玄武质熔结角砾岩		JL2010井, 埋深4 159 ~ 4 170 m, 显示为稍暗背景, 岩性较为均一, 暗色或亮色粒状, 特征亮斑角砾和暗斑孔洞杂乱分布
			深褐色流纹岩熔结角砾岩	GR RT DEN	高GR(GR范围在75 API)、中-低密度、中-低声波时差, 密度在2.25~2.55 g/cm ³		J209井, 埋深4 229.80 m, 霏细结构, 流纹构造, 熔结角砾岩		J204井, 埋深4 287.80 m, 呈黑色, 流纹构造		JL2010井, 埋深4 103 ~ 4 113 m, 显示为稍暗背景, 有带状暗色分布, 总体为亮黄色, 常见塑性或流线性构造

图2 金龙油田二叠系佳木河组岩相类型识别图版

Fig. 2 Discrimination diagram to identify lithofacies types of the Permian Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield

织结构,安山岩比玄武岩和英安岩的颜色要暗;英安岩为流纹岩和安山岩之间的过渡岩性,发育二者均有的气孔构造和流纹构造,成像测井上可以看到亮色斑点或条纹,为高阻物质充填孔隙或裂缝;玄武岩发育杏仁和块状构造,薄片可见溶蚀孔隙,斑状结构,成像测井上整体为稍暗背景,有条带状暗色裂缝分布,发育熔岩结构。

火山沉积相是火山活动与沉积作用共同作用下,原生火山物质在火山作用准同期内经搬运、改造后再沉积形成的,以沉凝灰岩为主。沉凝灰岩GR值较低,DEN较低,电阻率通常小于 $10\ \Omega\cdot\text{m}$ 。岩心见气孔构造,铸体薄片见明显的凝灰质结构,在成像测井上表现为高阻亮白色的细小斑点,线状为暗线指示存在低阻裂缝。

爆发相是火山爆发中火山碎屑物空落堆积、崩落堆积或碎屑流堆积形成的。研究区爆发相以中、酸性熔结角砾岩为主,基性熔结角砾岩以及安山质火山角砾岩局部发育。爆发相岩类的GR值与对应的溢流相有关联,但整体密度略小于溢流相。安山质火山角砾岩是水下火山喷发柱上部与水混合后,极细粒的火山尘和被火山喷发搅动的泥质沉积物悬浮在水中,喷发间歇期缓慢沉降形成的,主要发育块状构造。薄片可见角砾结构,发育气孔,成像测井上为稍暗背景,表现为高阻的亮色团块,角砾间可见砾间孔且显示为暗色斑状,整体呈现为基本无色级变化的均块状,由高阻、低阻基质组成,岩石矿物在构造和成分上基本一致,中间夹杂粒径 $30\sim 50\ \text{mm}$ 的砾石;熔结角砾岩是含挥发分的灼热碎屑混合物在后续喷出物推动和自身重力作用下沿地表流动形成的,在结构构造方面与对应溢流相沉积类似,但内部含有大量粒径 $3\sim 20\ \text{mm}$ 的砾石,气孔及杏仁状构造更为发育。与熔岩类相比,熔结角砾岩裂缝发育程度较低,储集空间类型以溶蚀孔洞为主。

2.2 储层物性特征

在岩相类型划分的基础上,对火山岩样品的孔隙度和渗透率进行测量,其中溢流相的流纹岩、英安岩、安山岩和玄武岩的物性相对较差,孔隙度均值在 $2.49\%\sim 6.64\%$,渗透率均值在 $(0.02\sim 0.22)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,为非有效储层。爆发相中的流纹质熔结角砾岩、安山质熔结角砾岩、玄武质熔结角砾岩以及安山质火山角砾岩的物性相对较好,孔隙度平均值在 $9.11\%\sim 12.87\%$,渗透率平均值在 $(0.27\sim 3.12)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,为优质储层(表1)。

含油饱和度数据显示(图3),爆发相中安山质火山角砾岩、安山质熔结角砾岩的孔隙度及含油饱和度相对较高,其次为流纹质熔结角砾岩、玄武质熔结角砾

表1 金龙油田火山岩储层孔、渗特征

Table 1 Porosity and permeability characteristics of volcanic rocks in the Jinlong oilfield

火山储集岩类型	孔隙度/%			渗透率/ $(10^{-3}\ \mu\text{m}^2)$		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
流纹岩	10.14	0.81	4.42	0.11	0.01	0.06
英安岩	5.84	0.15	2.49	0.27	0.01	0.16
安山岩	10.01	0.66	6.64	0.27	0.01	0.08
玄武岩	13.08	1.19	6.59	0.67	0.01	0.22
流纹质熔结角砾岩	14.47	5.21	8.89	1.63	0.73	1.21
安山质熔结角砾岩	14.35	5.40	11.07	6.20	0.09	0.27
玄武质熔结角砾岩	19.85	8.21	12.87	17.42	0.13	3.12
安山质火山角砾岩	19.05	4.50	9.11	8.64	0.01	0.88

岩。溢流相样品孔隙度主体小于 10% ,含油饱和度均小于 30% 。

2.3 储集空间特征

根据金龙2井区块二叠系佳木河组铸体薄片鉴定结果,本区火山岩储集空间主要分为孔隙和裂缝两大类,孔隙类型包含原生粒间孔(图4a,b)、杏仁体内孔(图4c)和溶蚀孔(图4d—f)。杏仁体内孔为次生矿物充填气孔后留下的剩余气孔或充填物晶间空间,充填物多为沸石(浊沸石和片沸石)和绿泥石矿物,其次为少量的硅质、方解石和沥青充填物,此类孔隙是研究区熔岩类的主要孔隙类型之一,占统计样品总孔隙的 42% 。溶蚀孔隙在火山岩中均有所发育,多被沸石、绿泥石等矿物充填,溶蚀孔隙往往与各类裂隙伴生,即沿裂隙带发育,而远离裂隙逐渐减弱甚至消失。

裂缝主要为构造缝(图5a—c,f)和溶蚀缝(图5a,d,e,g)。构造缝由构造运动形成,在研究区较发育,主要以高角度缝、网状缝及斜交缝为主,岩心倾角多以大于 60°

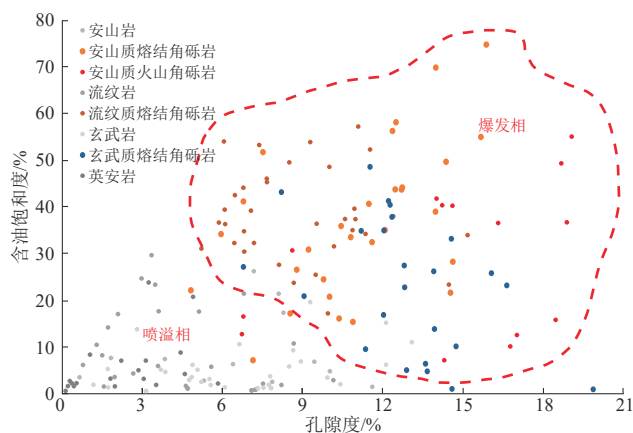


图3 金龙油田火山岩储层孔隙度-含油饱和度关系

Fig. 3 Relationship between porosity and oil saturation of volcanic rocks in the Jinlong oilfield, Junggar Basin

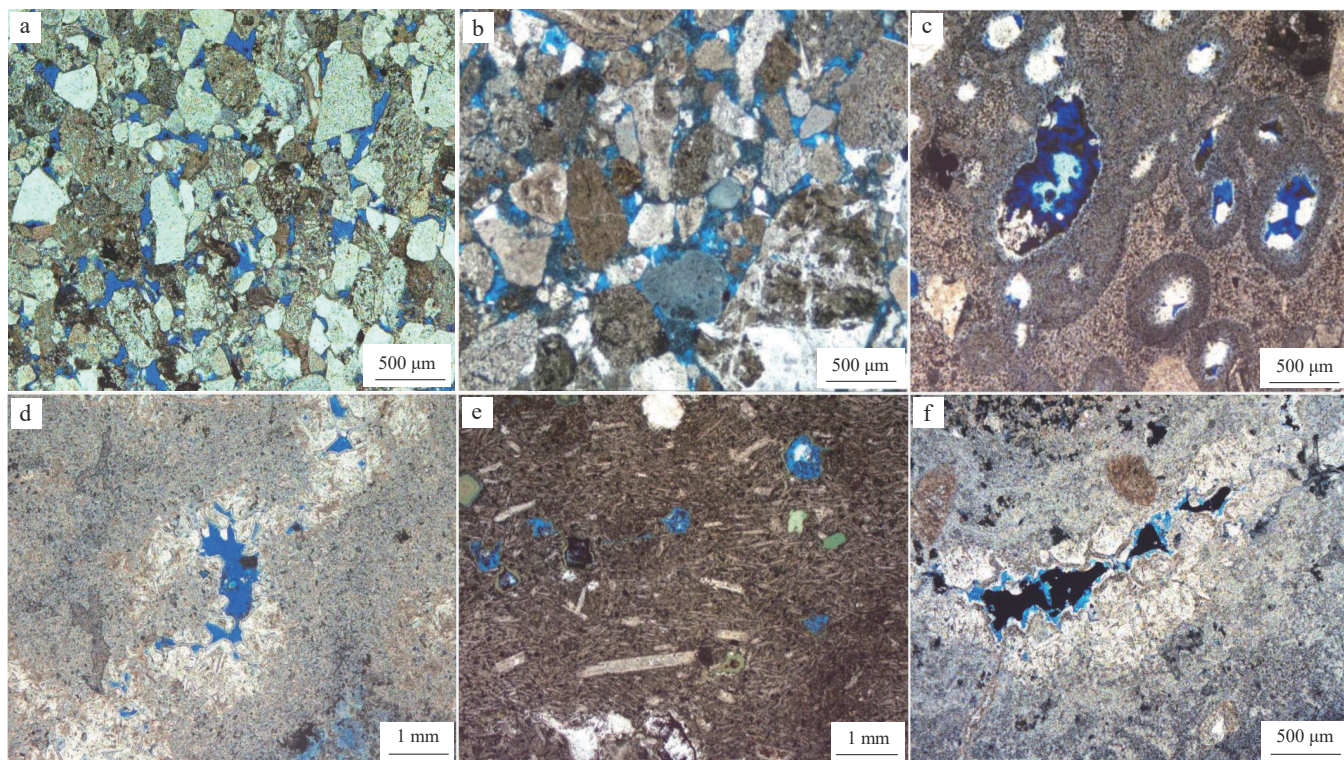


图4 金龙油田佳木河组火山岩储层孔隙空间发育特征铸体薄片显微照片

Fig. 4 Developmental characteristics of pore spaces in volcanic reservoirs in the Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin

- a. J213井,埋深4 252.41 m,溶蚀孔;b. J214井,埋深4 089.40 m,气孔;c. J204井,埋深4 287.05 m,半充填缝;d. J213井,埋深4 219.39 m,溶蚀孔;
e. J202井,埋深4 065.85 m,粒间孔;f. J208井,埋深4 077.85 m,粒间孔

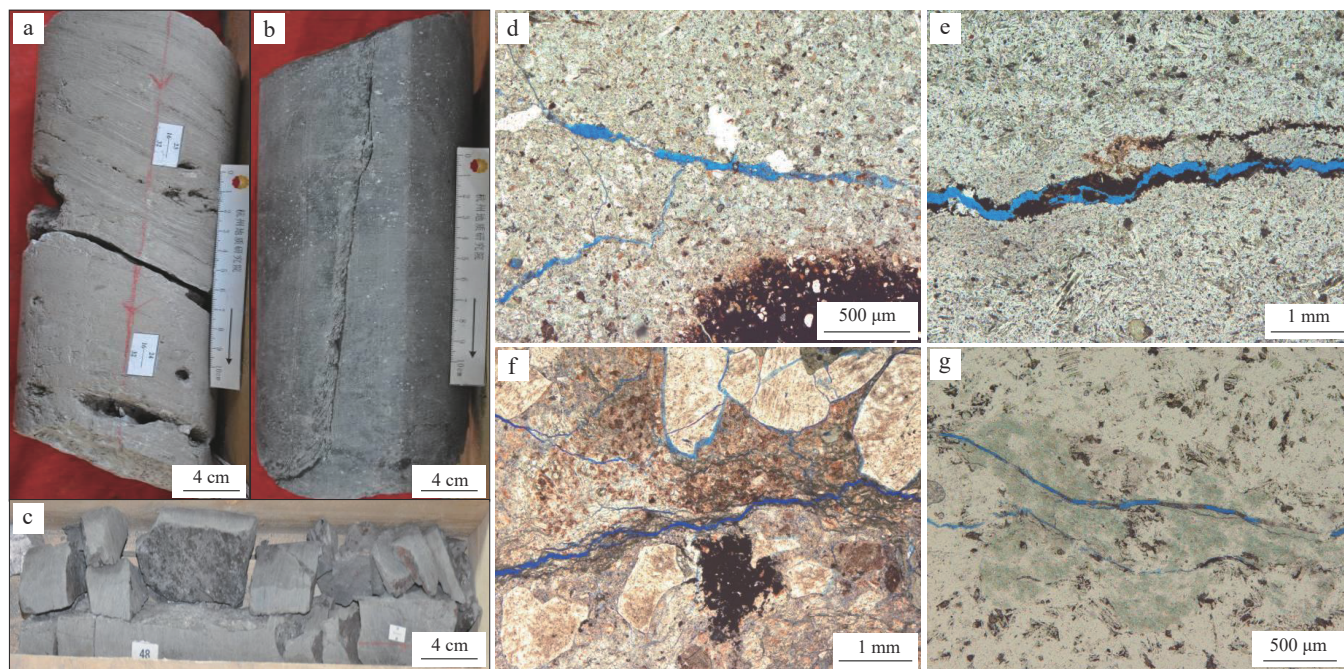


图5 金龙油田佳木河组火山岩储层裂缝发育特征岩心、显微照片

Fig. 5 Developmental characteristics of fractures in volcanic reservoirs in the Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin

- a. J213井,埋深4 272.72 ~ 4 279.90 m,斜交缝、溶蚀缝,岩心;b. J214井,埋深4 110.35 ~ 4 110.47 m,半充填直劈缝,岩心;c. 金213井,埋深4 218.15 ~ 4 218.85 m,网状缝,岩心;d. JL2001井,埋深4 130.26 m,微裂缝,铸体薄片;e. J213井,埋深4 220.83 m,溶蚀缝,铸体薄片;f. JL2004井,埋深4 179.66 m,构造缝,铸体薄片;g. J213井,埋深4 227.30 m,溶蚀缝,铸体薄片

的高角度直劈缝为主,裂缝长几厘米至几十厘米不等。结合常规测井曲线特征及成像测井识别,发现斜交缝、网状缝多发育在中-酸性溢流相中(图6a,b),高角度直劈缝多发育在基性溢流相中(图6c)。溶蚀缝多与溶蚀孔洞以及构造缝交错连接,缝面呈现不规则长条状,是岩浆在冷凝、结晶过程中收缩产生的。通过成像测井识别结合常规测井识别结果,发现溶蚀孔缝主要发育在安山质火山角砾岩(图6d)以及中-酸性熔结角砾岩中。

2.4 储层孔隙结构特征

压汞资料分析结果显示,金龙油田金龙2井区块

二叠系佳木河组火山岩储集层以微细-细喉道为主,最大孔喉半径 $0.10 \sim 14.22 \mu\text{m}$,平均值为 $1.41 \mu\text{m}$,毛管半径 $0.05 \sim 3.10 \mu\text{m}$,平均值为 $0.36 \mu\text{m}$,排驱压力 $0.10 \sim 11.45 \text{ MPa}$,平均值为 1.56 MPa ,中值压力 $1.66 \sim 20.15 \text{ MPa}$,平均值为 6.74 MPa 。总体上,佳木河组储层具有排驱压力较高、中值半径较小、压汞曲线无明显平台及孔隙结构较差的特征。

本区二叠系火山岩储层毛管压力可分为3类(图7)。

I类:双峰正偏态细孔喉型(图7a)。孔喉分布呈双峰且孔喉以细喉为主,最大孔喉半径 $3.10 \sim 14.22 \mu\text{m}$,排驱压力小于 0.5 MPa 。此类型主要分布于火山爆发

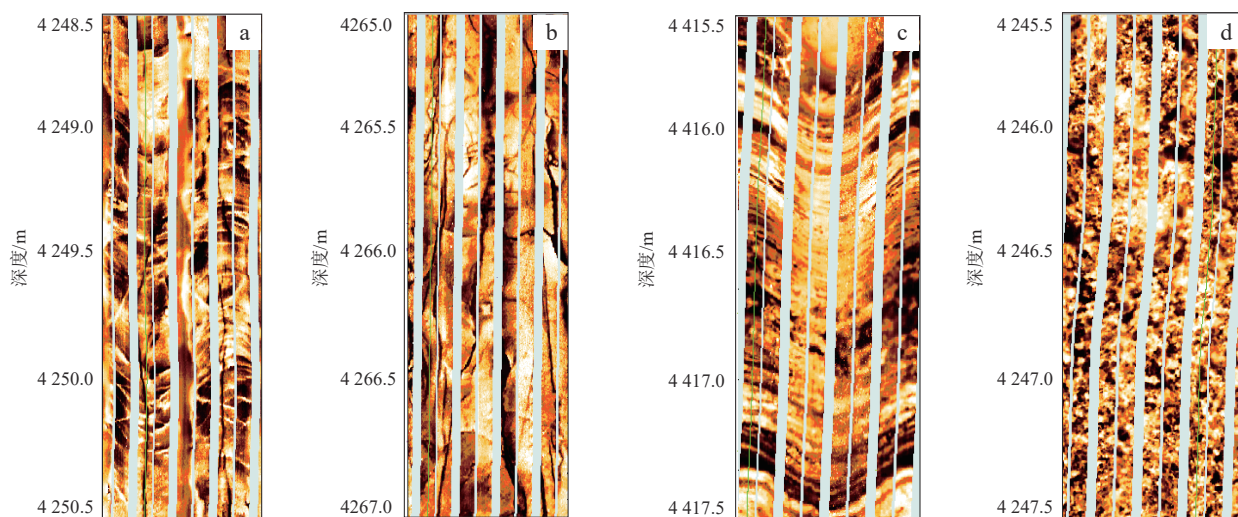


图6 金龙油田佳木河组火山岩储层裂缝成像测井图像

Fig. 6 Fracture occurrence based on FMI imaging logging in volcanic reservoirs of the Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin
a. J214井,埋深4 248 ~ 4 251 m,斜交缝、网状缝;b. J213井,埋深4 415 ~ 4 417 m,斜交缝;c. J214井,埋深4 260 ~ 4 267 m,直劈缝;d. J219井,埋深4 245 ~ 4 248 m,溶蚀孔洞

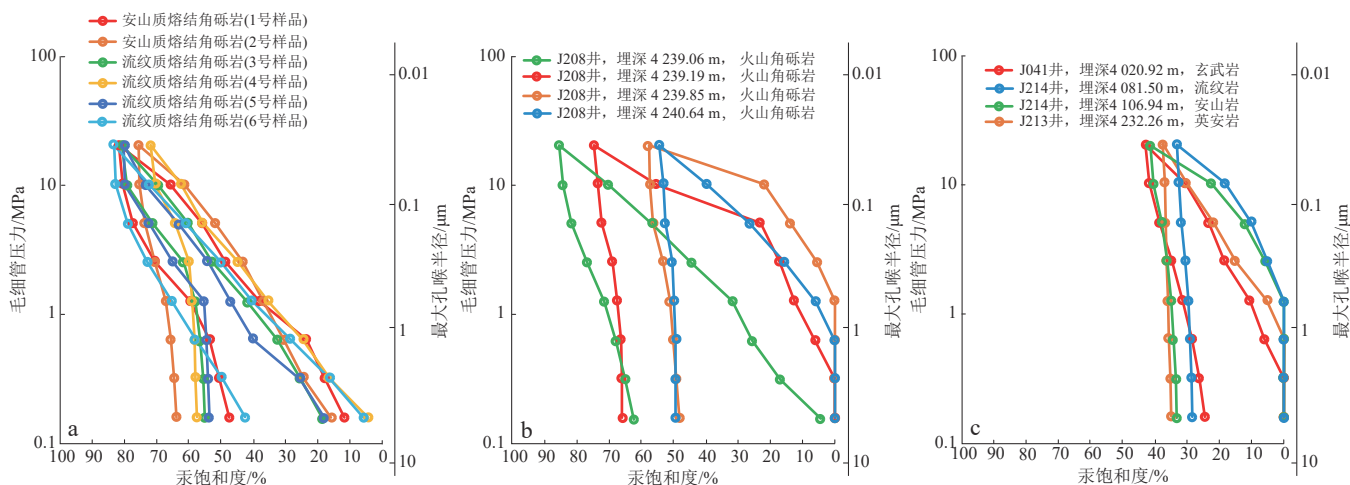


图7 金龙油田佳木河组火山岩储层样品高压压汞特征

Fig. 7 High-pressure mercury intrusion porosimetry (MIP) characteristics of volcanic rocks in the Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin
a. 熔结角砾岩; b. 火山角砾岩; c. 火山熔岩

相中的熔结角砾岩以及孔隙结构相对较好的安山质火山角砾岩中,储层表现为中-低孔、中-低渗的特征,渗透率一般大于 $5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

Ⅱ类:单峰正偏态或微负偏态细-微孔喉型(图7b)。孔喉分布呈单峰且偏微孔喉,孔喉半径一般在 $0.10 \sim 1.00 \mu\text{m}$,排驱压力小于 3.0 MPa 。此类储层主要分布于孔隙结构较差的熔结角砾岩和火山角砾岩中,渗透率 $(0.1 \sim 5.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

Ⅲ类:单峰负偏态微-极细微孔喉型(图7c)。孔喉半径一般小于 $0.50 \mu\text{m}$,此类储层主要为喷溢相安山岩、玄武岩及火山沉积相,渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3 火山岩储层岩相组合及其对产能的控制作用

3.1 岩相组合及产能差异

火山机构可划分为火山口带、近源带和远源带,其中火山口带与近源带发育的储层孔渗相对较高,是最有利的火山岩储层勘探开发区^[26-27]。研究区内佳木河组三段(P_{1j}^3)有效储层主要分布在火山口带及近源带中,以爆发相为主。火山口带附近主要发育基性熔岩、熔结角砾岩以及中性火山角砾岩,近源带主要发育中-酸性熔岩和熔结角砾岩,远源带多发育火山沉积灰岩(图8)。根据研究区火山岩纵向发育特征,结合产能分析,总结了以下4种岩相组合类型与产能的关系(表2)。

研究区有效岩相组合类型主体可分为4类。①A类为中-酸性热碎屑流亚相与中-酸性溢流相互层组合,主要发育在靠近火山口带的近源带中,根据爆发相类型可分为A1和A2两类。其中A1类爆发相以中性热碎屑流亚相为主,中性安山质熔结角砾岩通常与安山岩频繁交互出现,平均日产油气量 18.48 t ;A2类爆发相以酸性热碎屑流亚相为主,酸性流纹质熔结角砾岩通常大段出现(图8a),平均日产油气当量 16.54 t 。②B类为基性热碎屑流亚相与基性溢流亚相频繁互层组合,主要发育在火山口附近,该类岩相组合的产能是所有岩相组合中最低的,平均日产油气当量仅有 6.47 t 。③C类为中性空落亚相与中性溢流亚相互层组合,多在火山口带附近发育,平均日产油气当量为 16.47 t 。④D类为中性空落亚相与中-酸性热碎屑流亚相互层组合,顶、底均为中-酸性溢流亚相,主要发育在火山口带与近源带过渡的区带,日产油气当量在 $36.15 \sim 64.10 \text{ t}$,平均日产油气当量可达 50.13 t ,是

4大类岩相组合中产能最高的。

3.2 储层纵向展布规律及其影响因素

以单井岩相解释为基础,建立研究区 P_{1j}^3 过J218井—J215井—J214井—J208井—JL2008井—J209井—J213井—J204井南北向火山岩相连井剖面图(图9)。研究区佳木河组上段(P_{1j}^3)有两期火山活动。第一期火山活动岩性以中-酸性爆发相为主,溢流相局部发育;第二期以溢流相为主,爆发相局部发育。研究区佳木河组是一个由东向西的单斜构造,与顶部乌尔禾组呈不整合接触,由南向北由于多期断层的控制作用,导致研究区岩相组合分布差异极大。

依据火山活动期次,将研究区佳木河组 P_{1j}^3 分为 $P_{1j}^{3(1)}$ 和 $P_{1j}^{3(2)}$ 两个亚段。 $P_{1j}^{3(1)}$ 亚段由东向西地层剥蚀程度逐渐增强。由北向南地层厚度相对均一,岩性由中性逐渐向中-酸性转变,从安山质熔结角砾岩逐渐过渡到流纹质熔结角砾岩,层间夹有大量安山质火山角砾岩。岩相组合在北边以A类组合中的中性热碎屑流亚相与中-酸性溢流亚相互层岩相组合为主;中部安山质火山角砾岩逐渐发育,岩相组合逐渐过渡为C类中性空落亚相与中性溢流亚相互层的组合;南部逐渐过渡为A类组合中的中-酸性热碎屑流亚相与中-酸性溢流亚相互层的岩相组合。这表明研究区 $P_{1j}^{3(1)}$ 整体位于靠近火山口带的近源带。

$P_{1j}^{3(2)}$ 亚段未钻穿,由北向南岩相组合变化较快,北部J218井—J214井以及J209井以基性玄武岩-玄武质熔结角砾岩频繁互层为主,岩相组合以B类基性热碎屑流亚相与溢流亚相频繁互层的组合为主。中部J208井—JL2008井以酸性流纹岩为主,夹杂少量安山质火山角砾岩,为非有效储层。南部J213井和J204井以安山质熔结角砾岩、流纹质熔结角砾岩为主,岩相组合以A类为主。这表明研究区 $P_{1j}^{3(2)}$ 主体位于火山口带,部分发育在近源带中。

3.3 储层平面展布规律及产能差异

火山岩储层的分布受到岩相与断裂的共同控制^[28-31],本次 P_{1j}^3 岩相平面展布图在单井优势相的控制基础上结合断层进行划分(图10)。研究区火山岩整体呈南北向条带状分布,平面上相变极快。在单井相划分的基础上绘制了 P_{1j}^3 的岩相平面分布图,K303井、K102井、JL2105井、JL2106井、JL2107井和J219井中发育大量的玄武质熔结角砾岩,属于火山口带,岩相组合以B类为主,平均日产油气当量仅有 6.47 t 。位于

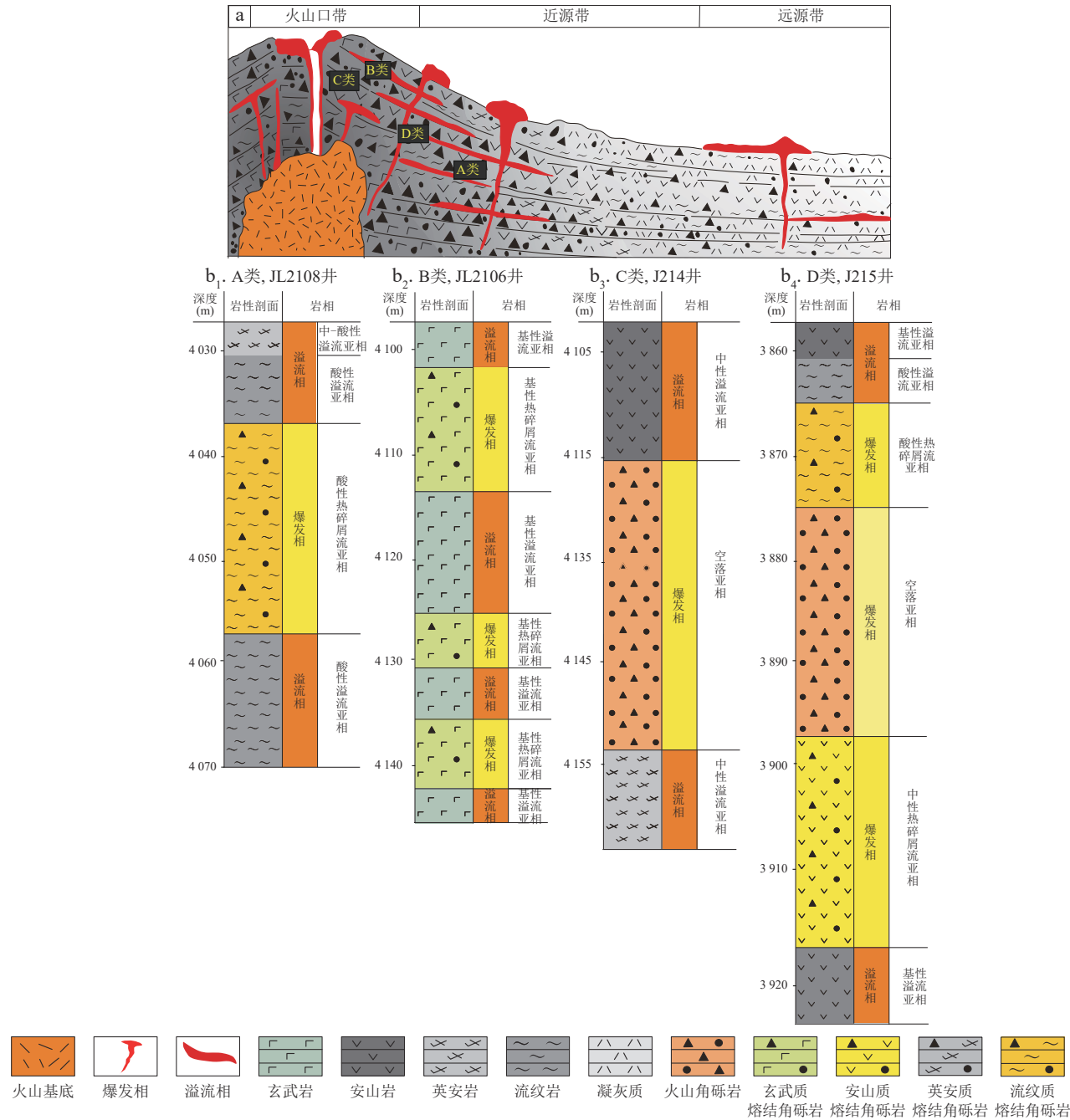


图8 金龙油田佳木河组火山岩储层岩相展布特征及有利岩相组合

Fig. 8 Lithofacies distributions and favorable lithofacies assemblages of volcanic rocks in the Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin

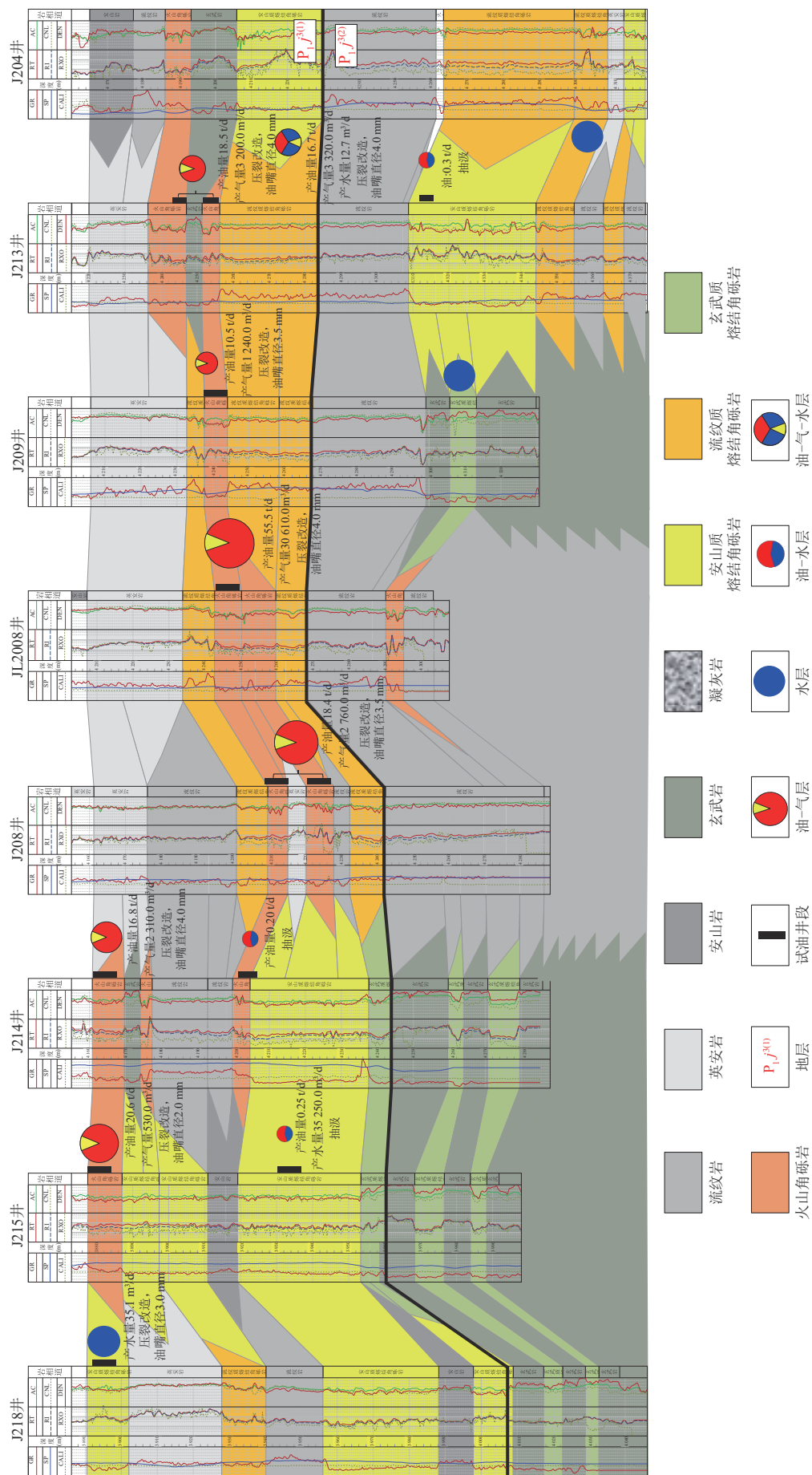
a. 火山爆发模式示意图; b₁—b₄. 金龙油田火山岩储层岩相纵向组合模式

A类. 中-酸性热碎屑流亚相-中-酸性溢流亚相组合; B类. 基性热碎屑流亚相-基性溢流亚相组合; C类. 中性空落亚相-中性溢流亚相组合; D类. 中性空落亚相-中-酸性热碎屑流亚相组合

表2 金龙油田佳木河组火山岩储层不同岩相组合产能统计

Table 2 Productivity statistics of various lithofacies assemblages of volcanic rocks in the Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin

岩相组合	最低日产油气当量/t	最高日产油气当量/t	平均日产油气当量/t	井数/口
中性空落亚相-中-酸性热碎屑流亚相(D类)	36.15	64.10	50.13	2
中性热碎屑流亚相-中-酸性溢流相(A1类)	10.06	34.06	18.48	12
酸性热碎屑流亚相-中-酸性溢流相(A2类)	11.35	22.05	16.54	10
中性空落亚相-中性溢流亚相(C类)	14.47	18.47	16.47	2
基性热碎屑流亚相-基性溢流亚相(B类)	0.86	14.19	6.47	3

图 9 金龙油田佳木河组过 J218 井—J204 井 P_{1j}^{30} 火山岩相连井剖面Fig. 9 Section crossing wells from J218 to J204 showing the correlation of volcanic lithofacies in the P_{1j}^{30} member of the Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin

布也受到断裂及火山活动期次的影响,佳木河组上段(P_{J^3})以J208井南断裂为界,北边以安山质熔结角砾岩为主,发育少量流纹质熔结角砾岩,南边以流纹质熔结角砾岩为主,发育少量安山质熔结角砾岩,主体以A类岩相组合为主,平均日产油气当量在17.00 t左右。在爆发相外围以溢流相发育为主,以J209井南断裂和J207井南断裂为界,断裂以北主要发育安山岩,西南方向发育英安岩与少量玄武岩,东南方向以流纹岩为主,均为非储层。

结合岩相组合在火山喷发模式图中的位置和油气产能数据分析发现,火山口带中-基性热碎屑流亚相与溢流亚相频繁互层的B类岩相组合产能最低,日产油气当量为0.86~14.90 t。这表明虽然该类岩相组合虽然主体产能较低,但若能找到油气富集条件较好的B类组合,也会有较为可观的产能。靠近火山口带以中性空落亚相为主要储层的C类岩相组合,日产油气当量为14.47~18.47 t,这表明该岩相组合类型产能较为稳定,是较为优质的储层,但在研究区内部发育较少。近源带中,靠近火山口带以中-酸性热碎屑流亚相为主要储层的A类岩相组合,日产油气当量在10.06~34.06 t,是研究区发育最广泛的一类岩相组合,也是研究区产能的主要贡献者。在火山口带与近源带交接处,中性空落亚相与中-酸性热碎屑流亚相大段互层的D类模式的产能是最高的,日产油气当量可达36.15~64.1 t,虽然在研究区中发育较少,但每一口井日产油气当量均高于35.00 t,是未来研究中最为重要的储层类型。

3.4 各类岩相组合产能的影响因素

不同岩相类型及其组合对储层物性产能的影响较

大^[32-33],为明确各类火山岩储层岩相组合产能的影响因素,本次研究在4类岩相组合中各选取两段,对其爆发相储层有效厚度、有效储层测井解释平均孔隙度、有效储层测井平均含油饱和度、地层压力等参数与平均日产油气当量的关系进行统计分析,其中含油饱和度计算采用阿尔奇公式进行计算。

统计数据显示(表3),平均日产能最高的D类岩相组合的平均孔隙度和含油饱和度是四类岩相组合中最高的,且随着有效厚度、地层压力的增加,平均日产能增长幅度较大。平均日产能最低的B类岩相组合平均孔隙度中等,但含油饱和度最低。A类与C类产能相近、平均孔隙度及含油饱和度相近。

综合数据分析显示(图11),爆发相储层有效厚度与平均日产能的相关性最高(相关系数 $R^2=0.802$),其次为测井解释平均含油饱和度($R^2=0.661$)、有效储层测井平均孔隙度($R^2=0.472$)、地层压力($R^2=0.248$)。这表明,除有效厚度外,平均含油饱和度对产能的影响是最大的。在有效厚度以及含油饱和度相近的条件下对岩相组合进行排名,结果为 $D>A>C>B$ 。

4 结论

1) 准噶尔盆地金龙油田火山岩岩相包括爆发相、溢流相和火山沉积相3大类。其中,爆发相以熔结火山碎屑岩和安山质火山角砾岩为主,平均孔隙度大于10%,为主要储层;溢流相以熔岩为主,平均孔隙度小于6%,非储层;火山沉积相物性差,几乎无油气显示。

2) 研究区火山岩储层储集空间类型以气孔、杏仁体内孔及溶蚀孔为主,原生粒间孔较少,爆发相与溢流相顶部溶蚀孔洞发育最为显著。裂缝主要为构造缝和

表3 金龙油田佳木河组储层岩相组合及产能

Table 3 Lithofacies assemblage physical properties and respective productivity on a daily basis of the Jiamuhe Formation in the Jinlong oilfield, Junggar Basin

井号	试油段深度/m	岩相组合	爆发相有效储层厚度/m	有效储层测井解释平均孔隙度/%	有效储层测井解释平均含油饱和度/%	地层压力/MPa	平均日产当量/(t/d)
JL2008	4 242~4 268	D	23.4	14.76	67.9	52.96	64.10
JL2011	4 151~4 174	D	14.7	13.88	65.7	50.56	36.20
金 214	4 128~4 144	A	10.4	12.80	52.3	51.00	16.80
金 208	4 206~4 242	A	15.3	12.85	56.3	50.79	18.38
JL2107	4 121~4 151	B	17.1	12.42	34.8	49.95	2.41
JL2106	4 095~4 146	B	33.9	14.19	47.2	49.95	14.19
金 209	4 234~4 247	C	9.0	13.53	55.1	52.11	14.10
金 213	4 232~4 248	C	13.2	12.58	55.6	52.39	18.50

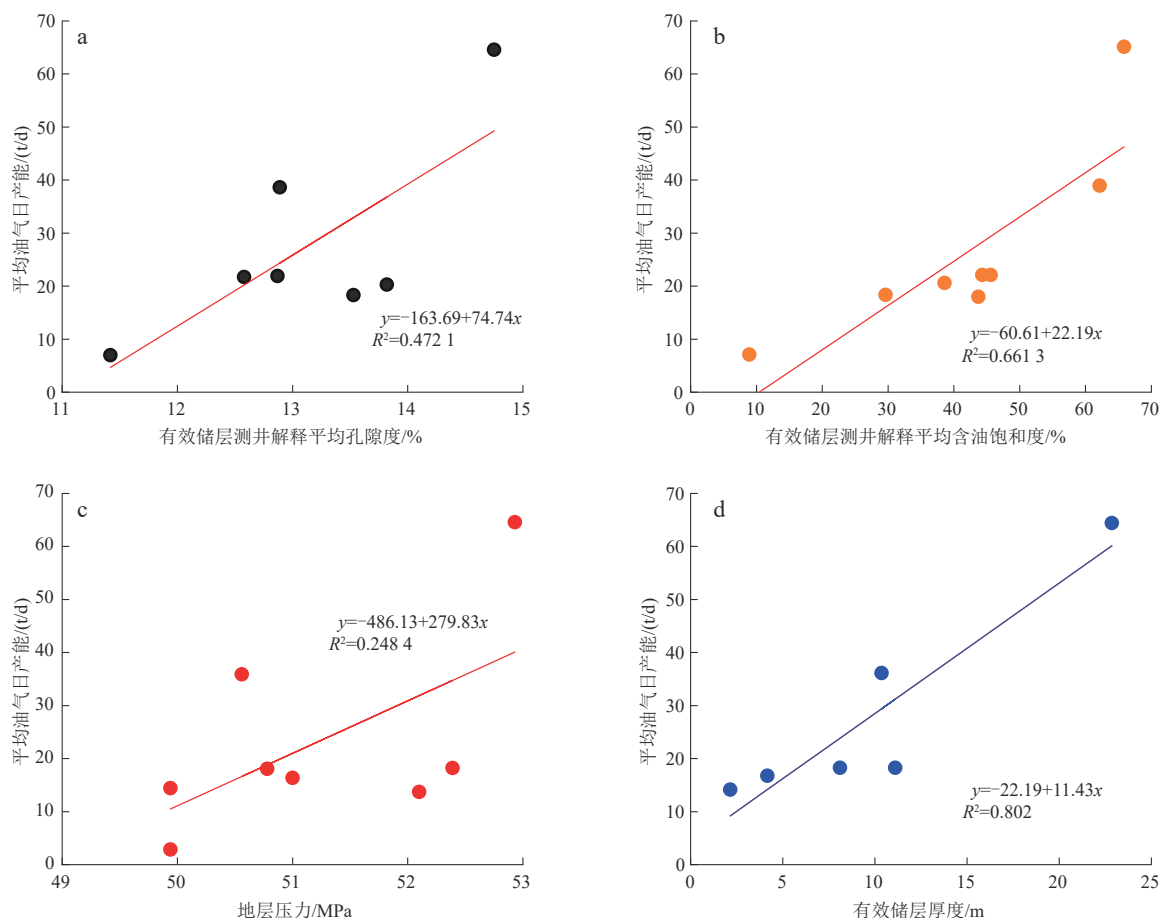


图11 金龙油田佳木河组储层岩相组合特征参数与产能关系

Fig. 11 Characteristic parameters vs. daily productivity of these lithofacies assemblages of the Jiamuhe Formation, Jinlong oilfield, Junggar Basin

a. 有效储层测井解释平均孔隙度与平均产能关系; b. 有效储层测井解释平均含油饱和度与平均产能关系; c. 地层压力与平均产能关系; d. 有效储层厚度与平均产能关系

溶蚀缝,发育程度与到断裂距离紧密相关,中-酸性溢流相以斜交缝、网状缝为主,基性溢流相以高角度直劈缝为主。

3) 研究区存在4种岩相组合。产能最高的为中性空落亚相与中-酸性热碎屑流亚相互层组合(日产油气当量64.10 t),主要分布于火山口带与近源带交界处;其次为中性空落亚相与中-酸性溢流亚相组合(16.47 t)、中-酸性热碎屑流亚相与溢流亚相组合(17.60 t),分别发育在火山口带以及靠近火山口带的近源带中;基性热碎屑流亚相与溢流亚相组合日产量较低(6.47 t),主要发育在火山口带附近。

4) 金龙油田佳木河组火山岩储层中,爆发相有效储层厚度和平均含油饱和度是平均油气产能的重要影响因素(相关系数分别为 $R^2=0.802$ 和 $R^2=0.661$),其次是孔隙度及地层压力(相关系数分别为 $R^2=0.472$ 和 $R^2=0.248$)。

参 考 文 献

- [1] 吴裕根, 娄钰, 门相勇. 油气是保障中国能源安全的重要基础[J]. 世界石油工业, 2022, 29(6): 19-25.
WU Yugen, LOU Yu, MEN Xiangyong. Oil and gas providing foundation for energy security in China [J]. World Petroleum Industry, 2022, 29(6): 19-25.
- [2] 李国欣, 雷征东, 董伟宏, 等. 中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 1-11.
LI Guoxin, LEI Zhengdong, DONG Weihong, et al. Progress, challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 1-11.
- [3] 王洛, 李江海, 师永民, 等. 全球火山岩油气藏研究的历程与展望[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1610-1620.
WANG Luo, LI Jianghai, SHI Yongmin, et al. Review and prospect of global volcanic reservoirs [J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1610-1620.
- [4] 侯连华, 邹才能, 匡立春, 等. 准噶尔盆地西北缘克-百断裂带石炭系油气成藏控制因素新认识[J]. 石油学报, 2009, 30

- (4): 513-517.
- HOU Lianhua, ZOU Caineng, KUANG Lichun, et al. Discussion on controlling factors for Carboniferous hydrocarbon accumulation in the Ke-Bai fractured zone of the northwestern margin in Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(4): 513-517.
- [5] 侯连华, 邹才能, 刘磊, 等. 新疆北部石炭系火山岩风化壳油气地质条件[J]. *石油学报*, 2012, 33(4): 533-540.
- HOU Lianhua, ZOU Caineng, LIU Lei, et al. Geologic essential elements for hydrocarbon accumulation within Carboniferous volcanic weathered crusts in northern Xinjiang, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(4): 533-540.
- [6] SRUOGA P, RUBINSTEIN N. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén basins, Argentina[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(1): 115-129.
- [7] 罗静兰, 侯连华, 蒋宜勤, 等. 陆东地区火成岩形成时代与构造背景及火山岩储层成因[J]. *石油学报*, 2012, 33(3): 351-360.
- LUO Jinglan, HOU Lianhua, JIANG Yiqin, et al. Chronology and tectonic settings of igneous rocks and origin of volcanic reservoirs in Ludong area, eastern Junggar Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(3): 351-360.
- [8] 罗静兰, 林潼, 杨知盛, 等. 松辽盆地升平气田营城组火山岩岩相及其储集性能控制因素分析[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(6): 748-757.
- LUO Jinglan, LIN Tong, YANG Zhisheng, et al. Lithofacies and reservoir quality control factors of volcanics in the Yingcheng Formation in the Shengping gas field in the Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(6): 748-757.
- [9] 罗静兰, 曲志浩, 孙卫, 等. 风化店火山岩岩相、储集性与油气关系[J]. *石油学报*, 1996, 17(1): 32-39.
- LUO Jinglan, QU Zhihao, SUN Wei, et al. The relations between lithofacies, reservoir lithology and oil and gas of volcanic rocks in Fenghuadian area[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, 17(1): 32-39.
- [10] 罗静兰, 邵红梅, 杨艳芳, 等. 松辽盆地深层火山岩储层的埋藏-烃类充注-成岩时空演化过程[J]. *地学前缘*, 2013, 20(5): 175-187.
- LUO Jinglan, SHAO Hongmei, YANG Yanfang, et al. Temporal and spatial evolution of burial-hydrocarbon filling-diagenetic process of deep volcanic reservoir in Songliao Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(5): 175-187.
- [11] 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 Petrolei Sinica*, 2003, 24(1): 31-38.
- [12] WHITE J D L, ROSS P S. Volcanic processes and landforms in submarine settings: A review [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123(11/12): 1243-1260.
- [13] MENZIES M A, XU Y G, et al. Volcanic rocks in the Earth's interior: Composition, eruption, and formation [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(4): 243-256.
- [14] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 14-25+27+26.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHANG Guosheng, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. *Petroleum Exploration and Development* 2014, 41(1): 14-25+27+26.
- [15] 吴晓智, 齐雪峰, 唐勇, 等. 东西准噶尔火山岩成因类型与油气勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 2009, 14(1): 1-9.
- WU Xiaozhi, QI Xuefeng, TANG Yong, et al. Genetic types and hydrocarbon exploration directions of volcanic rocks in eastern and western Junggar[J]. *China Petroleum Exploration*, 2009, 14(1): 1-9.
- [16] 杨荣荣, 周路, 房涛, 等. 准噶尔盆地金龙2地区佳木河组古地貌特征和油气藏分布关系研究[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(5): 2219-2225.
- YANG Rongrong, ZHOU Lu, FANG Tao, et al. Relationship between Jiamuhe paleogeomorphic features and hydrocarbon distribution of Jinlong-2 area in Junggar Basin [J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(5): 2219-2225.
- [17] 何辉, 李顺明, 孔垂显, 等. 准噶尔盆地西北缘二叠系佳木河组火山岩有效储层特征与定量评价[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(2): 1-12.
- HE Hui, LI Shunming, KONG Chuixian, et al. Characteristics and quantitative evaluation of volcanic effective reservoir in Jiamuhe Formation of Permian, northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2016, 40(2): 1-12.
- [18] 李振华. 准噶尔盆地中拐地区佳木河组沉积特征与成岩环境研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- LI Zhenhua. The research of sedimentary characteristics and diagenetic environment in Permian Jiamuhe Formation of Zhongguai area in the Junggar Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [19] 蒋佳兵, 陈如鹤, 李小刚, 等. 火山岩内幕型储层特征与主控因素——以准噶尔盆地滴南凸起滴水泉西断裂下盘为例[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(2): 119-132.
- JIANG Jiabing, CHEN Ruhe, LI Xiaogang, et al. Characteristics and main controlling factors of inner volcanic reservoir: A case study of the footwall of West Dishuiquan Fault in Dinan Bulge, Junggar Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(2): 119-132.
- [20] 魏周城. 准噶尔盆地金龙2井区火山岩岩性及裂缝识别与预测[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- WEI Zhoucheng. Identification and prediction of lithology and fracture of volcanic rocks in Jinlong 2 Well area, Junggar Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [21] 王德滋, 周金城, 刘昌实, 等. 浙江桐庐自碎二长花岗斑岩的

- 特征和成因[J]. 岩矿测试, 1982, 1(3): 15-24, 8.
- WANG Dezi, ZHOU Jincheng, LIU Changshi, et al. The characteristics and the origin of the autoclastic monzonitic granite-porphry, Tonglu, Zhejiang [J]. Rock and Mineral Analysis, 1982, 1(3): 15-24, 8.
- [22] 贺凯. 准噶尔盆地东部石炭系火山岩油气成藏规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- HE Kai. Study on the reservoir formation rule of volcanic rock of Carboniferous in the east of Junggar Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [23] 马尚伟. 准噶尔盆地东部西泉地区石炭系火山岩岩性岩相识别及储层主控因素研究[D]. 西安: 西北大学, 2019.
- MA Shangwei. Identification of lithology and lithofacies and research on main controlling factors of the Carboniferous volcanic rocks reservoir, Xiquan area, Eastern Junggar Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [24] 潘虹, 于庆森, 李晓山, 等. 准噶尔盆地红车断裂带石炭系重新认识及油气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 215-230.
- PAN Hong, YU Qingsen, LI Xiaoshan, et al. Recognition of the Carboniferous strata in the Hongche fault zone, Junggar Basin and its hydrocarbon accumulation characteristics [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 215-230.
- [25] 冯梓岩, 殷文, 钟云滔, 等. 基于常规测井的火成岩岩性识别方法——以准噶尔盆地西北缘红车断裂带石炭系火成岩储层为例[J]. 东北石油大学学报, 2021, 45(5): 95-108, 11-12.
- FENG Ziyang, YIN Wen, ZHONG Yuntao, et al. Lithologic identification of igneous rocks based on conventional log: A case study of Carboniferous igneous reservoir in Hongche Fault Zone in northwestern Junggar Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(5): 95-108, 11-12.
- [26] 毕力格. 准噶尔盆地西北缘佳木河组岩相古地理分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- BI Lige. Lithofacies and paleogeography analysis on the northwestern margin of the Junggar Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- [27] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits: A graphic approach to facies interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier, 1962.
- [28] SCOTese C R, SCHETTINO A. Chapter 3-Late Permian-Early Jurassic paleogeography of western Tethys and the world [M]// SOTO J I, FLINCH J F, TARI G. Permo-Triassic Salt Provinces of Europe, North Africa and the Atlantic Margins. Oxford: Elsevier, 2017: 57-95.
- [29] 林向洋, 苏玉平, 郑建平, 等. 准噶尔盆地克拉美丽气田复杂火山岩储层特征及控制因素[J]. 地质科技情报, 2011, 30(6): 28-37.
- LIN Xiangyang, SU Yuping, ZHENG Jianping, et al. Characteristics and controlling factors of volcanic reservoir in Kelameili area of Junggar Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(6): 28-37.
- [30] 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 Peihua, ZHANG Aiqing, et al. Characteristics and controlling factors of Carboniferous volcanic reservoir in the middle section of the northwestern margin of Junggar Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2008, 29(3): 329-335.
- [31] 高嘉洪, 金之钧, 梁新平, 等. 火山活动对鄂尔多斯盆地三叠系长7段淡水湖盆富营养化与沉积水体介质环境的影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 887-898.
- GAO Jiahong, JIN Zhijun, LIANG Xinping, et al. The impact of volcanism on eutrophication and water column in a freshwater lacustrine basin: A case study of Triassic Chang 7 Member in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 887-898.
- [32] 王宏博, 马存飞, 曹铮, 等. 基于岩相的致密砂岩差异成岩作用及其储层物性响应[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 976-992.
- WANG Hongbo, MA Cunfei, CAO Zheng, et al. Differential diagenesis and reservoir physical property responses of tight sandstone based on lithofacies: A case study on the Lower Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang area, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 976-992.
- [33] 韩豫, 操应长, 梁超, 等. 川南地区五峰组—龙马溪组沉积环境演化及其对页岩发育的控制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(2): 11-23.
- HAN Yu, CAO Yingchang, LIANG Chao, et al. Sedimentary environment evolution of Wufeng Formation—Longmaxi Formation and its control on shale deposition in the southern Sichuan Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(2): 11-23.

(编辑 王 迪)