

文章编号: 1004—5589 (2025) 04—0623—12

包金锐, 黄玉龙, 刘硕, 等. 松辽盆地南部龙凤山气田火石岭组火山碎屑岩优质储层特征与控制因素 [J]. 世界地质, 2025, 44 (4): 623–634. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.04.008.

BAO J R, HUANG Y L, LIU S, et al. Characteristics and controlling factors of high-quality volcanoclastic reservoirs of Huoshiling Formation in Longfengshan Gas Field, southern Songliao Basin [J]. World Geology, 2025, 44 (4): 623–634. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.04.008.

松辽盆地南部龙凤山气田火石岭组火山碎屑岩 优质储层特征与控制因素

包金锐¹, 黄玉龙^{1*}, 刘硕¹, 任宪军², 韩娇艳², 张红霞², 牛鹏辉²

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;
2. 中国石化 东北油气分公司, 长春 130062

摘要: 松辽盆地南部龙凤山气田火石岭组探明天然气储量超百亿 m³, 显示出深层火山碎屑岩具备良好的储集性能和勘探潜力; 厘清火山碎屑岩优质储层特征与控制因素有助于深层气藏有利区带拓展和开发井位部署。在岩心、铸体薄片和扫描电镜分析的基础上, 结合常规孔渗和高压压汞等测试结果, 笔者系统总结了火山碎屑岩岩性、岩相和储层发育特征, 明确了优质储层的控制因素与分布规律。研究表明: 龙凤山气田火石岭组发育4类13种火山碎屑岩, 形成于陆上和水上两种就位环境, 以爆发相火山碎屑岩类为主。发育粒间孔、粒内孔、晶内孔和微裂缝4类储集空间, 粒间孔-粒内孔型孔隙组合对储层贡献最大, 火山角砾岩有效孔隙最为发育, 粒间孔占37%、粒内孔占53%。火山碎屑岩储层孔隙度介于1.6%~13.8%之间、渗透率介于 $0.002 \times 10^{-3} \sim 0.751 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间, 属于中孔-低渗储层; 发育微米-纳米级喉道, 最大喉道半径介于0.020~2.830 μm 。成岩早期的绿泥石胶结作用和钠长石环边有利于抑制压实和保存粒间孔隙, 浅埋藏期玻屑和火山灰基质脱玻化作用以及深埋藏期有机酸溶解作用进一步促进次生孔隙形成, 构成控制火山碎屑岩优质储层发育的关键因素。火山通道相火山颈亚相、爆发相水下火山碎屑流亚相和水上火山碎屑沉降亚相中的优质储层(孔隙度>6%)占比相对较高, 可作为深层气藏勘探的有利目标。

关键词: 火山岩储层; 火山碎屑岩; 火石岭组; 龙凤山气田; 松辽盆地

中图分类号: P618.13 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.04.008

Characteristics and controlling factors of high-quality volcanoclastic reservoirs of Huoshiling Formation in Longfengshan Gas Field, southern Songliao Basin

BAO Jinrui¹, HUANG Yulong^{1*}, LIU Shuo¹, REN Xianjun², HAN Jiaoyan², ZHANG Hongxia², NIU Penghui²

收稿日期/Received: 2025-03-06; 修订日期/Revised: 2025-04-26; 出版日期/Published: 2025-11-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41702128)

第一作者: 包金锐 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事火山岩油气储层方面的研究。E-mail: 502272288@qq.com

* 通信作者: 黄玉龙 (1982—), 男, 副教授, 主要从事油气储层地质学方面的研究。E-mail: long@jlu.edu.cn

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;
2. Northeast Oil & Gas Branch of SINOPEC, Changchun 130062, China

Abstract: The Huoshiling Formation in the Longfengshan Gas Field, southern Songliao Basin, has achieved cumulative proved gas reserves exceeding 10 billion cubic meters, demonstrating favorable reservoir properties and exploration potential in deep volcanoclastic rock sequences. Clarifying the characteristics and controlling factors of high-quality volcanoclastic reservoirs aids in expanding favorable zones for deep-buried gas reservoir exploration and facilitating the deployment of development wells. Based on the drill core description, blue-dyed epoxy-resin impregnated thin section observation, scanning electron microscopy analysis, the porosity-permeability measurements and high-pressure mercury injection tests, a systematic study was conducted to characterize the lithology, lithofacies, and reservoir development patterns of volcanoclastic rocks, in order to clarify the controlling factors and spatial distribution of high-quality reservoirs. The results reveal that the Huoshiling Formation in the Longfengshan Gas Field is composed of thirteen lithological types in four categories of volcanoclastic rocks, formed in both subaerial and subaqueous environments, and dominated by volcanoclastic deposits of explosive facies. Four distinct pore types were identified, the intergranular pores, intragranular pores, intracrystalline pores, and microfractures. The intergranular and intragranular porosity constitute the predominant reservoir space, especially for the volcanic breccia which exhibits the highest porosity, 37% and 53% of intergranular and intragranular pores, respectively. The porosity of volcanoclastic reservoirs ranges from 1.6% to 13.8%, and the permeability ranges from $0.002 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ to $0.751 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. They are classified as medium-porosity/low-permeability reservoirs, developing micron-scale and nano-scale pore throats, the maximum throat ranges from 0.020 μm to 2.830 μm . Eogenetic chlorite cementation and albitization coating of the particles effectively inhibited compactional porosity loss, thereby preserving intergranular pores. Devitrification of volcanic glass/ash matrix in shallow burial stage, and the organic acid dissolution in deep burial diagenesis significantly enhances secondary porosity development, composing a key factor that controls the development of high-quality volcanoclastic reservoirs. Three subfacies exhibit the highest proportions of high-quality reservoirs (porosity >6%), including diatreme subfacies of volcanic conduit facies, subaqueous volcanoclastic flow deposits and fallout subfacies of explosive facies, which can be regarded as priority targets for deep gas exploration.

Keywords: volcanic reservoirs; volcanoclastic rocks; Huoshiling Formation; Longfengshan Gas Field; Songliao Basin

0 引言

火山岩油气藏是全球油气勘探的重要领域,全球超过100个国家和地区发现了火成岩油气藏显示^[1],火山岩储层具有产层厚、产率高、储量大等特点^[2]。全球范围内以往报道的火成岩相关油气勘探发现,火山熔岩类占比60%以上,侵入岩类约占20%,火山碎屑岩类仅占10%。近年来,随着深层油气勘探的不断深入,在中国松辽、三塘湖、准噶尔等多个盆地均发现大量的火山碎屑岩油气藏,并展现出良好的勘探潜力^[3-7]。火山碎屑岩是火山作用形成的不同成分和粒级的火山碎屑物,经火山灰、熔浆和细粒沉积物等胶结形成,介于火山熔岩与沉积岩之间的过渡类型岩石^[8]。其碎屑成分、形成过程、火山活动、成因、胶结方式、成岩过程等多种

因素导致火山碎屑岩在储集空间和储层物性等方面存在显著的非均质性^[9-15]。White等^[16]系统阐述了火山碎屑岩的碎屑组分、结构构造和岩石类型;孙善平等^[17]结合国际地质科学联合会推荐的火山碎屑岩方案提出了较为完善的岩性分类体系。火山作用、成岩环境和构造作用这3方面因素共同决定了火山碎屑岩成岩改造过程和储层物性^[18-21]。

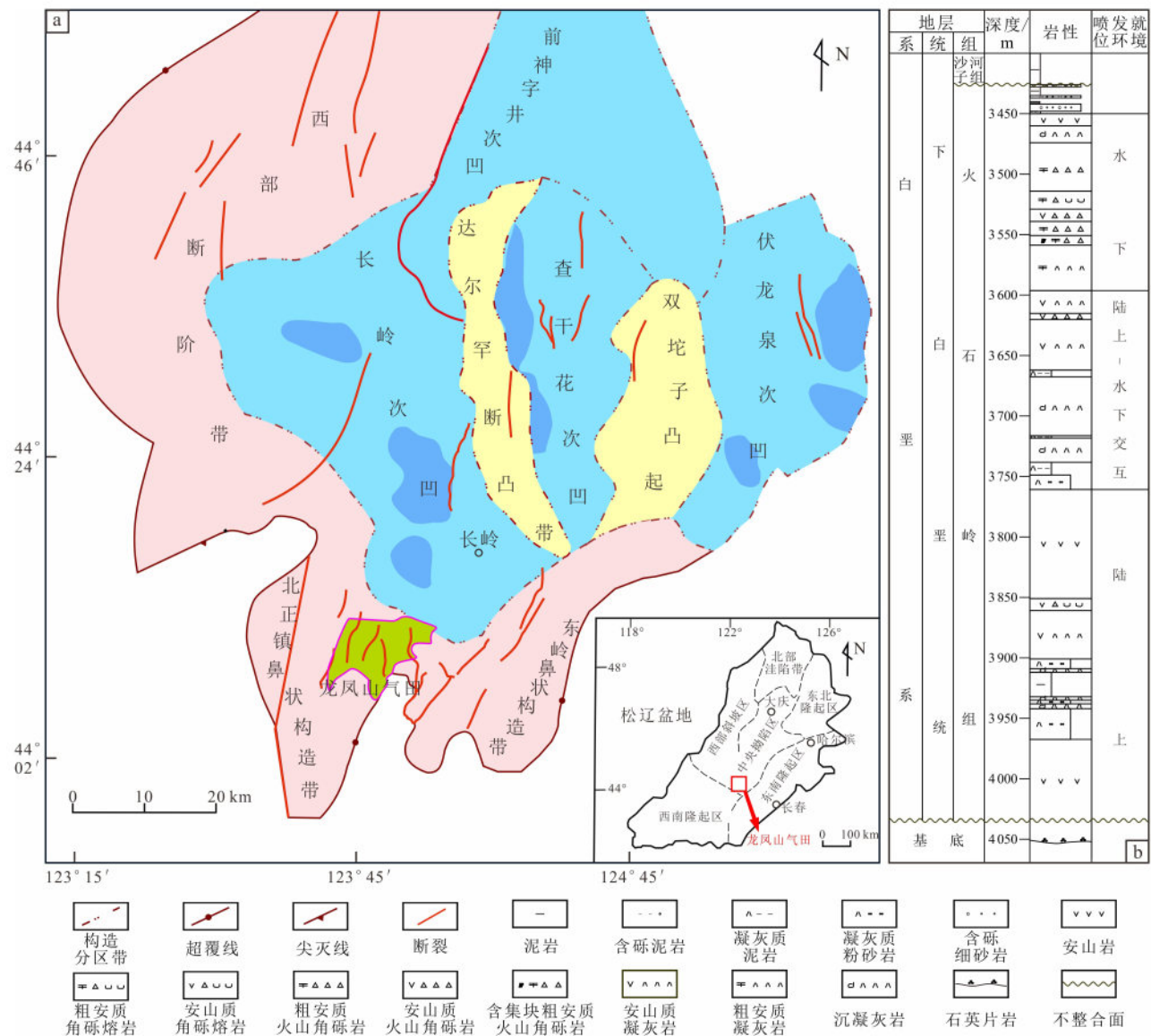
松辽盆地断陷期火山活动强烈,形成了营城组和火石岭组两套火山-沉积地层,在徐家围子断陷和长岭断陷深层火山岩中先后取得了天然气藏勘探突破和规模储量增长^[22]。研究区龙凤山气田是位于松辽盆地南部长岭断陷南端最小的一个构造单元,面积约300 km²,自2018年B213井获高产天然气勘探突破以来,目前已探明天然气储量超百亿 m³,展示出良好的勘探开发潜力。钻井揭示龙凤山气田火

石岭组地层中火山岩占比 90%, 其中火山碎屑岩占比 71.9%, 油气显示和工业油气产出主要来自于火山碎屑岩之中。龙凤山气田火石岭组主要发育一套中性火山岩^[23], 埋深位于 3 000 ~ 4 500 m, 岩性岩相类型复杂, 储层物性普遍较差^[24]。受成岩作用和构造作用影响, 储层非均质性强, 导致优质储层的主控因素与分布规律认识不清, 限制了开发井位部署和有利区带拓展。本文以火石岭组火山碎屑岩为研究对象, 在 15 口取心钻井岩心观察与铸体薄片鉴定的基础上, 综合运用孔渗、高压压汞

和核磁共振等测试结果, 系统总结了火山碎屑岩岩性和岩相类型与发育特征, 分析了火山碎屑岩的孔隙类型与孔隙构成, 通过对比不同岩性岩相的储集物性与孔隙结构特征, 明确了优质储层的控制因素与分布规律。

1 地质概况

长岭断陷是松辽盆地南部规模最大的复式断陷^[25], 整体呈“三凸三凹”的构造格局^[26]。龙凤山气田位于长岭断陷南端 (图1), 是在中—晚侏



据文献 [27] 修改。

图 1 龙凤山气田构造位置 (a) 和火石岭组地层柱状图 (b)

Fig. 1 Structure location of Longfengshan Gas Field (a) and stratigraphic column of Huoshiling Formation (b)

罗世 NNE 向基底断裂左行走滑派生的次生破裂的基础上, 经断裂期强烈的地壳伸展拆离作用形成的^[28]。龙凤山次凹是在火石岭组火山岩基础上发育起来的继承性凹陷, 面积约为 300 km², 是在西部拆离断层控制下发育的北西断、南东超的大型鼻状构造, 由西部构造带、北部洼陷带和东南斜坡带 3 个构造带组成。西部受 NE 向北正镇边界断层控制, 东部受古隆起的影响, 形成西断、东超的箕状断陷构造。龙凤山气田深层下白垩统地层自下而上分别为火石岭组、沙河子组、营城组和登娄库组, 构造上先后经历了断陷期和断拗转换期, 各地层之间均为不整合接触^[26]。火石岭组为基底之上岩浆喷发形成的一套中性火山岩地层, 上覆沙河子组泥岩地层, 构成区内主力烃源岩和盖层。

表 1 龙凤山气田火石岭组火山碎屑岩分类

Table 1 Classification of volcanoclastic rocks of Huoshiling Formation in Longfengshan Gas Field

岩石大类	$\Phi_{\text{火山碎屑}}/\%$	成岩方式	结构特征	基本类型
火山碎屑熔岩类	10 ~ 90	熔浆胶结	熔结结构或碎屑熔岩结构	安山质/粗安质角砾熔岩
		冷凝固结	玻屑和浆屑具塑性变形, 呈拉长扁平化	安山质/粗安质凝灰熔岩
火山碎屑岩类	> 90	火山灰胶结	火山碎屑结构	安山质/粗安质集块岩
		压实固结	基质中见晶屑、岩屑, 磨圆、分选差	安山质/粗安质火山角砾岩 安山质/粗安质凝灰岩
沉火山碎屑岩类	50 ~ 90	泥质胶结	沉火山碎屑结构 发育粒序层理、平行层理	沉凝灰岩
火山碎屑沉积岩类	10 ~ 50	压实固结	碎屑结构	凝灰质砂岩
			含陆源碎屑, 见水平层理、平行层理和波状层理	凝灰质泥岩

2.2 岩石学特征

2.2.1 火山碎屑熔岩类

火山碎屑熔岩是火山碎屑物经熔浆胶结形成, 火山碎屑物质在 10% ~ 90% 之间, 具有熔结结构或碎屑熔岩结构, 区内主要发育角砾熔岩和凝灰熔岩。

火山碎屑熔岩主要发育熔结结构和碎屑熔岩结构, 由角砾、岩屑和玻屑等组成, 以熔浆胶结为主, 角砾和岩屑呈棱角状, 分选较差, 角砾间局部被硅质或方解石充填 (图 2a ~ c)。

2.2.2 火山碎屑岩类

狭义上的火山碎屑岩是指火山碎屑物质大于 90%, 由火山灰胶结、经压实固结形成的一类岩石, 在龙凤山气田火石岭组地层中厚度比例最大,

2 火山碎屑岩分类与岩石学特征

2.1 火山碎屑岩分类

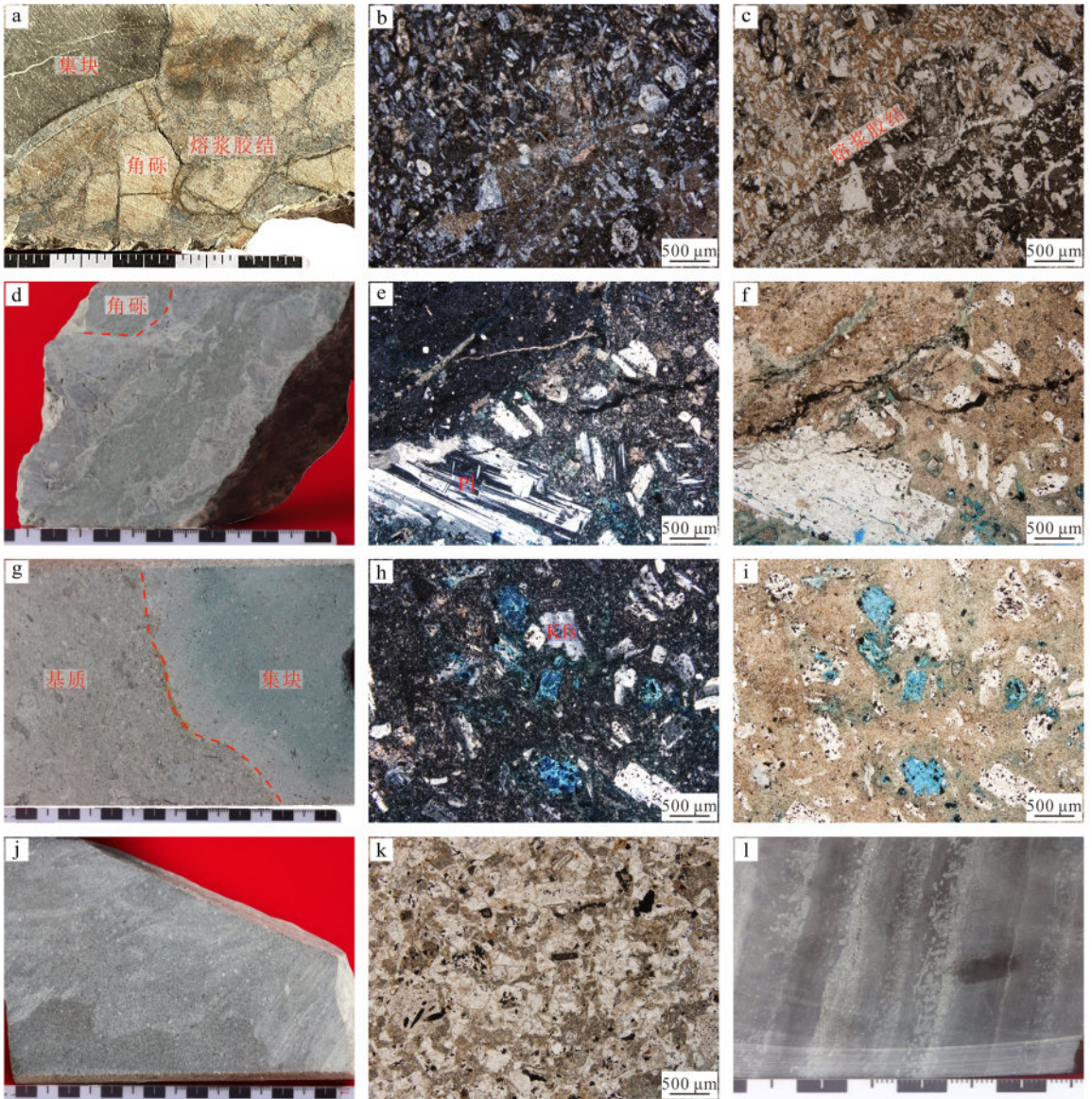
岩石矿物学与地球化学分析显示, 龙凤山气田火石岭组发育安山质和粗安质两种成分火山岩, 安山质火山岩 $w(K_2O + Na_2O)$ 为 5.33% ~ 5.47%, 斑晶和晶屑以斜长石为主, 粗安质火山岩 $w(K_2O + Na_2O)$ 为 8.24% ~ 11.16%, 斑晶和晶屑以碱性长石为主。基于国际地科联火山岩分类和孙善平等^[17] 提出的火山碎屑岩分类, 依据火山碎屑含量、胶结类型和成岩方式将火石岭组火山碎屑岩划分为火山碎屑熔岩、火山碎屑岩、沉火山碎屑岩和火山碎屑沉积岩 4 大类, 根据火山碎屑粒级和岩石化学成分将火山碎屑岩进一步划分为 13 种基本类型 (表 1)。

根据粒级划分为集块岩、火山角砾岩和凝灰岩, 依据化学成分和斑晶/晶屑类型归属安山质和粗安质两类。

火山碎屑主要由集块、角砾以及岩屑、晶屑和少量玻屑组成, 晶屑包含有碱性长石、斜长石、黑云母和角闪石。火山碎屑多呈棱角状, 碎屑之间为细粒火山灰胶结 (图 2d ~ i)。

2.2.3 沉火山碎屑岩类

沉火山碎屑岩中火山碎屑物质在 50% ~ 90% 之间, 主要由次棱角-棱角状晶屑和岩屑组成, 泥质或粉砂质胶结, 块状构造, 普遍较致密, 裂缝和孔隙均不发育。具体岩性以沉凝灰岩为主, 呈薄夹层状 (厚度 2.75 ~ 48.64 m) 分布在其他岩层之间 (图 2j ~ k)。



Pl. 斜长石; Kfs. 钾长石。

a. 安山质角砾熔岩, B204 井岩心, 3 302.10 m; b. B204 井薄片 (+), 3 302.10 m, 安山岩熔浆胶结, 方解石普遍交代; c. B204 井薄片 (-), 3 302.10 m; d. 粗安质火山角砾岩, B217-2HF 井岩心, 3 518.55 m; e. B217-2HF 井薄片 (+), 3 518.55 m; f. B217-2HF 井薄片 (-), 3 518.55 m, 斑晶为长石和少量角闪石, 裂缝中充填方解石; g. 粗安质集块岩, B217-2HF 井岩心, 3 520.87 m, 火山灰胶结; h. B217-2HF 井薄片 (+), 3 520.87 m; i. B217-2HF 井薄片 (-), 3 520.87 m; j. 凝灰岩, B5 井岩心, 5 168.40 m; k. B5 井薄片 (-), 5 168.40 m; l. 凝灰质泥岩夹凝灰质砂岩夹层, B5 井岩心, 5 166.00 m。

图 2 龙凤山气田火石岭组火山碎屑岩主要类型与发育特征

Fig. 2 Main types and development characteristics of volcanoclastic rocks of Huoshiling Formation in Longfengshan Gas Field

2.2.4 火山碎屑沉积岩类

火山碎屑沉积岩属于正常火山碎屑岩向沉积岩过渡的一种类型, 火山碎屑物质在 10% ~ 50% 之间, 以外碎屑 (陆源) 为主, 见少量长石晶屑和火山岩岩屑, 次棱角-次圆状, 泥质或粉砂质胶结, 见平行层理、水平层理。主要发育在喷发间歇期,

具体岩性包括凝灰质砂岩和凝灰质泥岩 (图 21)。

3 储集空间类型与有效孔隙构成

3.1 储集空间类型与发育特征

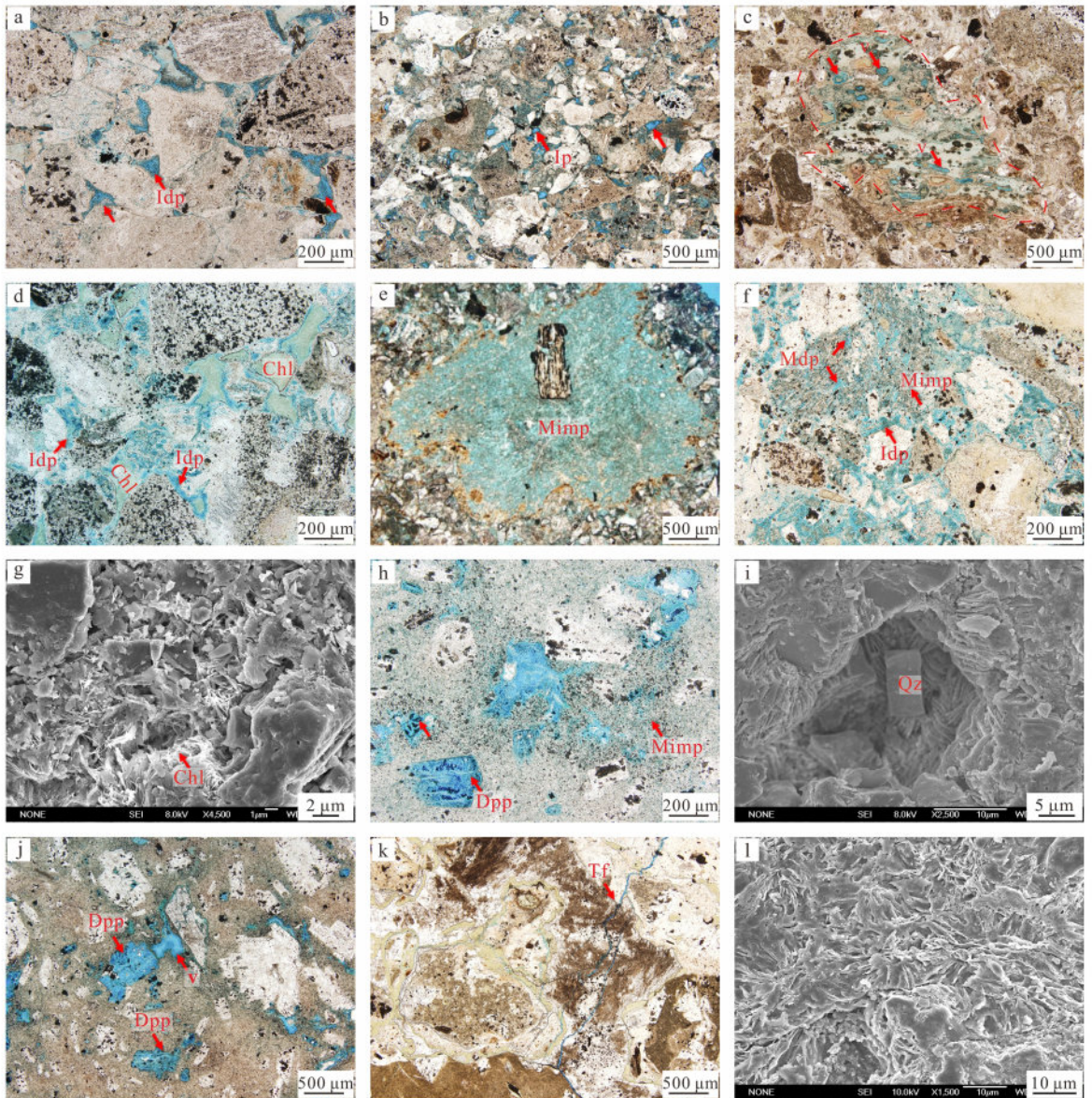
通过铸体薄片和扫描电镜分析, 根据孔隙分布产状, 将龙凤山气田火石岭组火山碎屑岩储集空间

划分为粒间孔、粒内孔、晶内孔和微裂缝4种类型(图3)。

粒间孔 包括粒间残余孔(图3a)和粒间溶蚀孔(图3b、c),主要发育在火山角砾岩和凝灰岩中。水下环境就位形成的火山碎屑岩在成岩初期

颗粒边缘形成绿泥石和钠长石环边,使得在埋藏成岩阶段粒间孔得到较好的保存。

粒内孔 主要包括集块/角砾内气孔(图3d)、粒内脱玻化晶间微孔(图3e)和粒内溶蚀孔(图3f)。气孔主要发育在集块岩或者火山角砾岩中的



Idp. 粒间溶蚀孔; Ip. 粒间孔; v. 气孔; Chl. 绿泥石; Mimp. 基质晶间微孔; Mdp. 基质溶蚀孔; Dpp. 晶内溶蚀孔; Qz. 石英; Tf. 构造缝。

a. 粒间溶蚀孔, 颗粒边缘钠长石环边, B217-8HF 导眼井, 4 001.49 m, 粗安质含角砾晶屑岩屑凝灰岩; b. 粒间孔, 颗粒支撑, 胶结物较少, B217-8HF 导眼井, 4 006.72 m, 粗安质含角砾晶屑岩屑凝灰岩; c. 气孔, 塑性玻屑、浆屑变形, 流动拉长扁平化, B216 井, 粗安质角砾凝灰岩, 3 678.49 m; d. 绿泥石胶结, 发育胶结物晶间微孔, B217 井, 3 215.40 m, 粗安质角砾晶屑岩屑凝灰岩; e. 基质晶间微孔, B203 井, 粗安质含角砾凝灰岩; f. 基质晶间微孔, 粒间溶蚀孔, 方解石交代强烈, B217 井, 3 208.34 m, 粗安质火山角砾岩; g. 脱玻化晶间微孔, B217 井, 3 215.40 m, 可见孔隙衬里绿泥石; h. 晶内溶蚀孔, 暗色矿物发生溶解, B217-8HF 导眼井, 3 520.87 m, 粗安质集块岩; i. 斜长石溶孔, B213-20 井, 2 751.55 m; j. 集块内气孔, B217-2HF 导眼井, 3 520.87 m, 粗安质集块岩; k. 构造缝, B218 井, 3 801.35 m, 粗安质角砾熔岩; l. 构造缝, B203 井, 3 866.90 m。

图3 龙凤山气田火石岭组火山碎屑岩储集空间类型与发育特征

Fig. 3 Types of reservoir space and development characteristics of volcaniclastic rocks of Huoshiling Formation in Longfengshan Gas Field

熔岩角砾中,相对较为孤立,呈椭圆状,经过压实后,部分气孔具明显的变形拉长特征,火山碎屑岩中角砾或岩屑内气孔充填程度较低。晶间微孔主要发育于凝灰岩内部的玻屑和火山灰基质之中,由火山玻璃发生脱玻化重结晶作用形成。粒内溶蚀孔主要由火山角砾和集块内部的基质部分发生溶蚀形成,与脱玻化晶间微孔局部连通形成较多孔隙(图3g)。

晶内孔 主要为晶屑溶蚀而成(图3h),解理缝促进晶屑溶蚀孔的形成,斜长石沿解理逐渐溶蚀扩大而产生晶内溶蚀孔隙(图3i),具规则的几何形状,呈现原始颗粒形态,孤立存在,部分未完全溶解而残留少量暗色矿物(图3j)。

微裂缝 以构造缝为主(图3k、l)。部分与规模较小的裂缝形成缝网,主要发育于火山碎屑熔岩中,使原来孤立的孔隙得以连通,但后期充填程度较高,主要为方解石充填。

3.2 有效孔隙构成

火石岭组火山碎屑岩储层储集空间发育类型多样,基于研究区31块样品的面孔率数据统计发现火山角砾岩的孔隙最为发育,面孔率为0.78%~9.61%,平均为4.14%;其次是凝灰岩,面孔率为0.42%~6.32%,平均为3.91%;而安山质角砾熔岩面孔率为0.44%~1.58%;沉凝灰岩面孔率为0.04%~0.90%;火山碎屑沉积岩类储层致密,几乎不见孔缝。火山碎屑岩的孔隙程度明显优于火山碎屑熔岩与沉火山碎屑岩(图4),其中粒间孔和粒内孔对储层贡献最大,总孔隙中构成比例分别为37%、53%,其次为晶内孔(9%)和微裂缝(1%),以粒间孔-粒内溶蚀孔的储集空间类型组合最为发育,粒间孔起到一定连通作用,将其他孔隙连接起来,为储层有效孔隙。

4 储层物性与孔隙结构特征

4.1 储层物性

针对区内15口取心钻井中200块火山碎屑岩岩心样品进行储层常规物性测试,显示储层具有较强的非均质性,孔隙度为1.6%~13.8%、平均值为8.4%,渗透率为 $(0.002 \times 10^{-3}) \sim (0.751 \times 10^{-3}) \mu\text{m}^2$,平均值为 $0.056 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,总体上属于中-高孔、低渗型储层。从孔渗关系交会图(图5)可以看出,该地区火山碎屑岩的孔隙度和

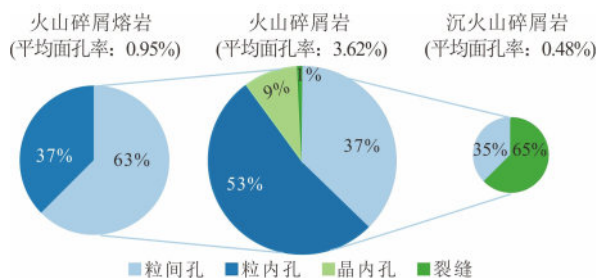


图4 龙凤山气田火石岭组火山碎屑岩储层孔隙构成比例
Fig.4 Porosity proportions of volcaniclastic reservoirs of Huoshiling Formation in Longfengshan Gas Field

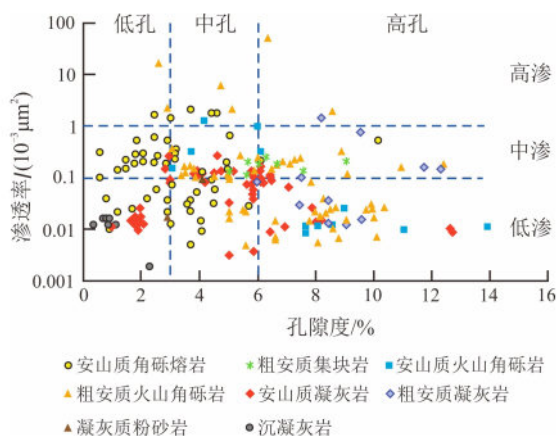


图5 不同类型火山碎屑岩储层孔渗交会图

Fig.5 Cross plot of porosity and permeability of different types of volcaniclastic reservoirs

渗透率整体上呈正相关。火山角砾岩和凝灰岩储集物性最好,孔隙度为5.1%~13.8%,平均值为9.2%;火山角砾熔岩孔隙度为1.6%~6.1%,平均值为4.2%,明显低于火山碎屑岩类;沉凝灰岩储层致密,孔隙度和渗透率均为低值。

4.2 孔隙结构特征

渗透率测试数据反映火石岭组火山碎屑岩储层总体上为低渗致密型。结合高压压汞测试获取的喉道半径、排驱压力、最大进汞饱和度和退汞效率等参数进一步分析储层渗流特征。储层最大喉道半径为0.020~2.830 μm ,平均值为0.530 μm ;喉道半径中值多小于0.100 μm ,平均为0.020 μm ,平均喉道半径为0.005~0.109 μm ,喉道类型以细-微喉道为主。排驱压力为0.3~41.3 MPa,平均值为9.0 MPa;最大进汞饱和度为61.4%~96.6%,

平均为 88.9%；退汞效率为 16.4% ~ 40.3%，平均为 29.2%。依据毛管压力曲线形态的相似性特征（图 6）可将火山碎屑岩储层分为 3 类：Ⅰ类储层，孔喉连通性相对较好，排驱压力小，退汞容易，主要为火山角砾岩储层和集块岩储层；Ⅱ类储层，主要为凝灰岩储层；Ⅲ类储层，排驱压力大，以纳米级喉道为主，孔喉连通性差，分选也差，主要为角砾熔岩和沉凝灰岩储层。

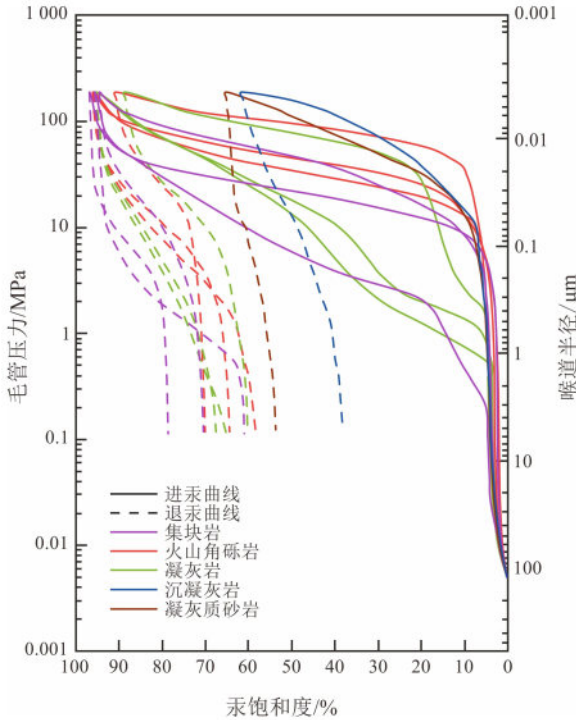


图 6 火山碎屑岩储层毛管压力曲线分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of capillary pressure curves of volcanoclastic reservoirs

5 火山碎屑岩优质储层控制因素

5.1 岩性与储层的关系

根据铸体薄片分析、孔渗及压汞测试结果显示火山碎屑岩类储层最好，其次为火山碎屑熔岩类储层，而沉火山碎屑岩类和火山碎屑沉积岩类储层相对较差。按粗安质和安山质两种成分类型对样品进行分类统计，粗安质火山碎屑岩的孔隙度为 3.1% ~ 12.3%，平均值为 7.3%；安山质火山碎屑岩的孔隙度为 0.3% ~ 13.8%，多数为 2.0% ~ 6.0%，平均值为 4.6%。按照火山碎屑粒径进行分类统计，火山角砾岩的孔渗发育程度最好，孔隙

度平均值可达 7.2%，其次是凝灰岩，孔隙度平均值可达 7.0%。火山碎屑岩的孔隙主要由碎屑颗粒的粒间孔和粒内孔构成。火山角砾岩由于碎屑颗粒粒径较大，更易保留原生孔隙，而且火山角砾岩的粒间孔体积较大，孔隙间连通性更好。凝灰岩粒间火山灰结晶程度较差，易于形成脱玻化晶间微孔，这些脱玻化孔增加了流体与火山碎屑岩的接触面积，为后期溶蚀作用提供了有利条件，由于本身颗粒较小，导致粒间孔隙尺寸较小，在压实成岩过程中，凝灰岩更易失去粒间孔。

5.2 岩相与储层的关系

根据火山碎屑岩的成因和就位环境，龙凤山火山石岭组火山碎屑岩主要发育 4 相 8 亚相（图 7）。将 200 块样品孔渗测试数据按亚相类型进行分类统计，显示火山通道相火山颈亚相、爆发相水下火山碎屑流亚相和 underwater 火山碎屑沉降亚相中优质储层占比相对较高，其次为爆发相陆上火山碎屑岩亚相，而溢流相碎块熔岩流亚相储层相对较差（图 7）。储层物性与岩相对应关系反映出就位环境和相对火山通道距离对研究区火山碎屑岩储层具有明显的控制作用。整体上，水下就位环境储层物性优于陆上就位环境，原因在于火山碎屑物进入水体后经历了一定的分选作用，粒间孔隙相对发育，同时火山碎屑物边缘形成的淬火边在埋藏成岩过程中进一步发生脱玻化形成黏土包壳，有利于粒间孔隙的保存。随着相对于火山通道或喷发中心距离的增加，火山碎屑粒度逐渐减小，位于火山通道附近的集块岩和近源相带的火山角砾岩除发育粒间孔隙之外，还发育有粒内孔隙（图 3），原始储集性能相对较好，并且在成岩作用过程中集块和角砾在溶解作用下形成粒内溶孔。

5.3 成岩作用对储层的影响

通过岩心观察、偏光显微镜下薄片鉴定与扫描电镜分析，显示龙凤山气田火山石岭组火山碎屑岩经历了挥发分逸出、脱玻化、压实、胶结、交代以及溶解作用等一系列成岩改造过程，根据对储层的影响将成岩作用划分为建设性作用和破坏性作用两类。

5.3.1 建设性作用

早期胶结对压实作用减孔起到一定抑制作用，从而有利于粒间孔隙保存，同时也为后续溶解作用

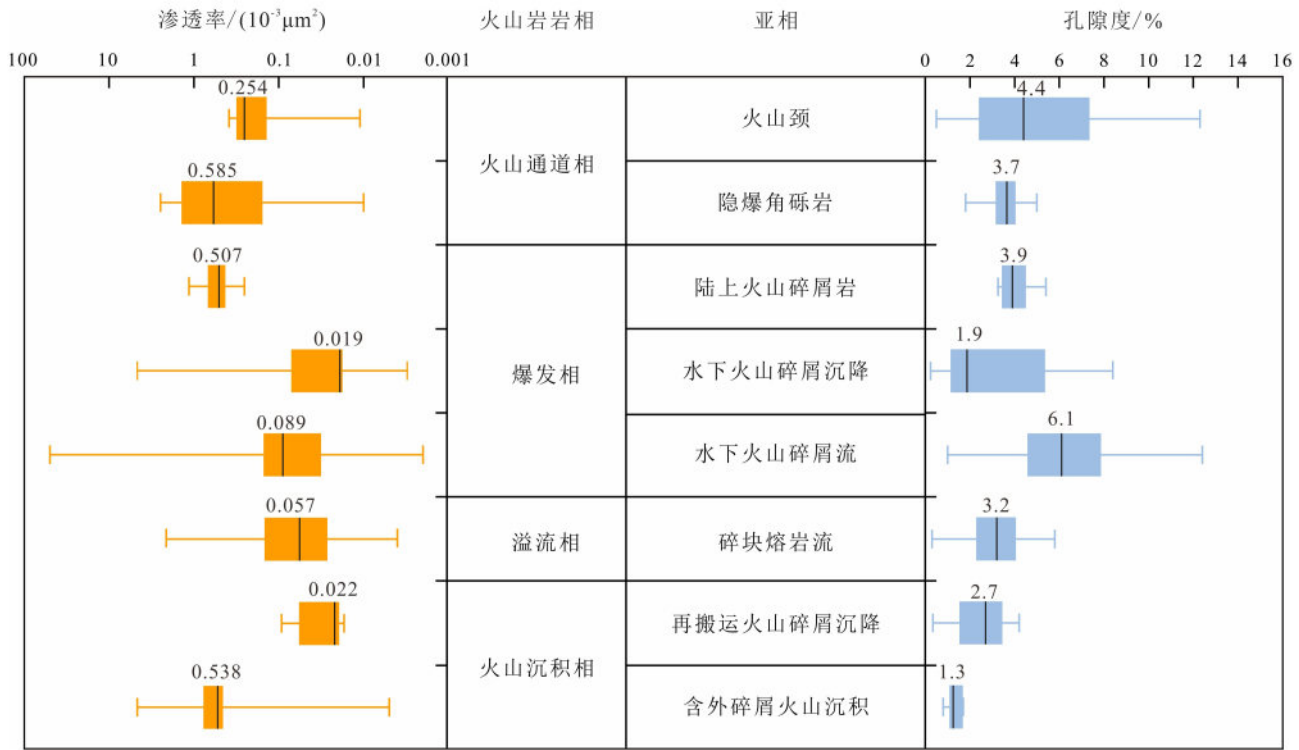


图 7 龙凤山气田火石岭组储层物性与火山碎屑岩岩相关系

Fig. 7 Relationship between lithofacies and reservoir properties of volcanoclastic rocks of Huoshiling Formation in Longfengshan Gas Field

增孔提供了前提。龙凤山气田火石岭组火山碎屑岩储层中绿泥石胶结普遍存在, 同时在碎屑颗粒边缘发育绿泥石和钠长石环边, 抑制了埋藏压实作用和晚期钙质与硅质胶结作用对储层的不利影响, 从而保留了较多原生粒间孔隙 (图 4b), 并为后期有机酸溶蚀增孔提供了前提条件。绿泥石产出状态以颗粒包壳和孔隙充填为主, 呈片状和针状, 以粒间孔为主, B216 井 3 678.6 m 处绿泥石含量较高, 其孔隙度可达 8.3%, 而在 B216 井 3 681.0 m 处绿泥石含量很少, 孔隙度仅为 6.6%; 在 B217 井绿泥石较为发育, 其孔隙度在 9.0% 左右, 并且绿泥石能抑制碳酸盐胶结, 与碳酸盐胶结物含量成反比, 而碳酸盐胶结物含量与孔隙度成反比, 说明自生绿泥石对研究区的储层物性有一定建设作用^[29-31]。

在沉积期和浅埋藏期, 中性的浆屑、岩屑和火山灰发生脱玻化作用。龙凤山地区的脱玻化作用主要体现在 3 个方面, 分别为火山碎屑岩碎屑颗粒间火山灰胶结物脱玻化作用 (图 4i)、气孔或隐爆裂

缝中玻璃质充填物的脱玻化作用和熔岩碎屑中玻璃质的脱玻化作用 (图 4h), 在铸体薄片下观察可见脱玻化作用产生大量晶间微孔。

溶解作用是深埋藏期储层次生孔隙形成的关键因素。有机酸对长石晶屑、中性岩屑和前期形成的绿泥石、方解石等胶结物溶蚀, 主要体现: 熔岩集块和角砾内部斑晶和火山碎屑岩内部晶屑的溶解, 形成晶内溶蚀孔隙, 如斜长石和暗色矿物的溶解 (图 4j); 角砾和岩屑内部基质的溶解, 形成基质溶蚀孔 (图 4e); 火山碎屑岩碎屑颗粒之间胶结物的溶解, 形成粒间溶蚀孔隙。

5.3.2 破坏性作用

火山碎屑在压实成岩过程中, 其储集物性会发生明显改变。陆上就位的火山碎屑岩和火山碎屑熔岩碎屑颗粒分选差, 粗细碎屑颗粒混杂, 受压实作用导致岩石致密, 粒间孔隙体积减少 (图 4a), 孔隙度和渗透率降低, 储集性能变差。

充填作用表现为火山角砾和集块内部气孔被次

生矿物充填(图4c), 充填物为钙质、硅质类矿物, 这些矿物在充填后又经历了部分溶蚀, 并被沸石进一步充填, 多期次的矿物充填降低了岩石的储集性能。

6 结论

(1) 松辽盆地南部龙凤山气田火石岭组发育中性安山质和粗安质火山碎屑岩类, 具体划分为4类13种岩石类型, 形成于陆上和两种就位环境。

(2) 火石岭组火山碎屑岩发育粒间孔、粒内孔、晶内孔和微裂缝4类储集空间, 喉道类型以细-微喉道为主, 粒间孔-粒内孔组合对储层贡献最大, 整体属于中孔-低渗型储层。火山角砾岩和凝灰岩储层物性相对较好; 火山通道相火山颈亚相、爆发相水下火山碎屑流亚相和水下火山碎屑沉降亚相中优质储层占比相对较高。

(3) 火石岭组火山碎屑岩储层经历了压实、胶结、脱玻化、充填和溶解5种成岩作用改造, 成岩早期绿泥石胶结和钠长石包膜有利于抑制压实并使得粒间孔得以保存, 埋藏成岩阶段中脱玻化作用和有机酸溶解作用进一步形成晶间微孔和溶蚀孔, 构成优质储层发育的关键。

参考文献:

[1] 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 J Q, MENG F C, CUI Y, et al. Discussion on the formation mechanism of volcanic oil and gas reservoirs [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26 (1): 1-13.

[2] 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 C N, ZHAO W Z, JIA C Z, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35 (3): 257-271.

[3] 苗长盛, 徐文, 刘玉虎, 等. 松辽盆地南部火山岩储层特征 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50 (2): 635-643.
MIAO C S, XU W, LIU Y H, et al. Characteristics of volcanic reservoirs in southern Songliao Basin [J]. Journal

of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50 (2): 635-643.

- [4] 夏文谦, 朱祥, 金民东, 等. 川北地区上二叠统吴家坪组火山碎屑岩油气藏储层特征及主控因素 [J]. 石油实验地质, 2023, 45 (2): 307-316.
XIA W Q, ZHU X, JIN M D, et al. Characteristics and controlling factors of volcanic clastic rock reservoirs in Wujiaping Formation of Upper Permian in northern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45 (2): 307-316.
- [5] 周健, 林承焰, 刘惠民, 等. 准噶尔盆地哈山地区石炭系-二叠系火山岩储层发育机制研究 [J]. 地学前缘, 2024, 31 (2): 327-342.
ZHOU J, LIN C Y, LIU H M, et al. Mechanism of reservoir development in the Carboniferous - Permian volcanic rock reservoirs in Hala'alate Mountain area, Junggar Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31 (2): 327-342.
- [6] 黄玉龙, 王璞珺, 邵锐. 火山碎屑岩的储层物性: 以松辽盆地营城组为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40 (2): 227-236.
HUANG Y L, WANG P J, SHAO R. Porosity and permeability of pyroclastic rocks of the Yingcheng Formation in Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40 (2): 227-236.
- [7] SUN H T, ZHONG D K, ZHAN W J. Reservoir characteristics in the Cretaceous volcanic rocks of Songliao Basin, China: a case of dynamics and evolution of the volcano-porosity and diagenesis [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2019, 37 (2): 607-625.
- [8] FISHER R V, SCHMINCKE H U. Pyroclastic rocks [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1984: 89-123, 340-345.
- [9] 王岩泉, 王金铎, 王千军, 等. 火山碎屑岩成岩作用及对储层储集性能的影响: 以准噶尔盆地车排子地区石炭系为例 [J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48 (2): 405-414.
WANG Y Q, WANG J D, WANG Q J, et al. Diagenesis of volcanoclastic rocks and its control over reservoir performance: a case study of the Carboniferous system in Chepaizi area, Junggar Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48 (2): 405-414.
- [10] 唐华风, 边伟华, 王璞珺, 等. 盆地火山岩相分类

- 和模式 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2023, 53 (6): 1651-1671.
- TANG H F, BIAN W H, WANG P J, et al. Classification and model of volcanic facies in the basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53 (6): 1651-1671.
- [11] 李泯星, 屈海洲, 曾琪, 等. 四川盆地西北部上二叠统吴家坪组火山碎屑岩孔隙演化特征及有利储集区分布 [J]. 天然气地球科学, 2020, 31 (11): 1574-1584.
- LI M X, QU H Z, ZENG Q, et al. Pore evolution characteristics and distribution of favorable reservoir area of the Upper Permian Wujiaping Formation in the northwestern Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31 (11): 1574-1584.
- [12] 唐华风, 王璞珺, 边伟华, 等. 火山岩储层地质研究回顾 [J]. 石油学报, 2020, 41 (12): 1744-1773.
- TANG H F, WANG P J, BIAN W H, et al. Review of volcanic reservoir geology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41 (12): 1744-1773.
- [13] 冷庆磊, 黄玉龙, 冉波, 等. 火山碎屑岩储层溶蚀孔隙发育特征与控制因素: 以松辽盆地南部陆家堡凹陷下白垩统为例 [J]. 世界地质, 2020, 39 (2): 368-378.
- LENG Q L, HUANG Y L, RAN B, et al. Characteristics and controlling factors of dissolution pores in pyroclastic rock reservoirs: a case study of Lower Cretaceous of Lujiapu Sag, southern Songliao Basin [J]. Global Geology, 2020, 39 (2): 368-378.
- [14] 蒙启安, 李军辉, 李跃, 等. 海拉尔—塔木察格盆地中部富油凹陷高含凝灰质碎屑岩储层成因及油气勘探意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2020, 50 (2): 569-578.
- MENG Q A, LI J H, LI Y, et al. Genetic mechanism of high content tuffaceous clastic rock reservoir in Hailar-Tamucage Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50 (2): 569-578.
- [15] 谢继容, 李亚, 杨跃明, 等. 川西地区二叠系火山碎屑岩规模储层发育主控因素与天然气勘探潜力 [J]. 天然气工业, 2021, 41 (3): 48-57.
- XIE J R, LI Y, YANG Y M, et al. Main controlling factors and natural gas exploration potential of Permian scale volcanoclastic reservoirs in the western Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41 (3): 48-57.
- [16] WHITE J D L, HOUGHTON B F. Primary volcanoclastic rocks [J]. Geology, 2006, 34 (8): 677-680.
- [17] 孙善平, 刘永顺, 钟蓉, 等. 火山碎屑岩分类评述及火山沉积学研究展望 [J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20 (3): 313-317, 328.
- SUN S P, LIU Y S, ZHONG R, et al. Classification of pyroclastic rocks and trend of volcanic sedimentology: a review [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20 (3): 313-317, 328.
- [18] ROBERT R R. Porosity reduction and major controls on diagenesis of Cretaceous-Paleocene volcanoclastic and arkosic sandstone, Middle Park Basin, Colorado [J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, 64: 797-806.
- [19] 张丽媛, 纪友亮, 刘立, 等. 海拉尔—塔木察格盆地南贝尔凹陷下白垩统火山碎屑岩储集层成岩演化及控制因素 [J]. 古地理学报, 2013, 15 (2): 261-274.
- ZHANG L Y, JI Y L, LIU L, et al. Diagenetic evolution and controlling factors of pyroclastic reservoirs of the Lower Cretaceous in Nanbeier Sag, Hailar - Tamtsag Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15 (2): 261-274.
- [20] OLAVSDOTTIR J, ANDERSEN M S, BOLDREEL L O. Reservoir quality of intrabasalt volcanoclastic units onshore Faroe Islands, North Atlantic igneous province, Northeast Atlantic [J]. AAPG Bulletin, 2015, 99 (3): 467-497.
- [21] 熊绍云, 史志伟, 王尉, 等. 川西南地区二叠纪火山岩储层类型及其主控因素分析 [J]. 天然气地球科学, 2022, 33 (6): 899-916.
- XIONG S Y, SHI Z W, WANG W, et al. Permian volcanic reservoir types and main controlling factors in Southwest Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33 (6): 899-916.
- [22] 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.
- [23] 任宪军. 松辽盆地长岭断陷盆缘陡坡带中性火山岩相模式及其对储层的控制作用 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2022, 52 (3): 816-828.
- REN X J. Facies model of intermediate volcanic rocks in steep slope and its control on reservoirs: a case study in

- Changling Fault Depression, Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52 (3): 816-828.
- [24] 郑健, 王璞珺, 朱建峰, 等. 火山碎屑岩储层特征及其主控因素分析: 以松辽盆地南部长岭断陷龙凤山地区为例 [J]. 世界地质, 2021, 40 (2): 399-407.
- ZHENG J, WANG P J, ZHU J F, et al. Characteristics and main controlling factors of pyroclastic reservoir: a case study in Longfengshan area, Changling Fault Depression, southern Songliao Basin [J]. Global Geology, 2021, 40 (2): 399-407.
- [25] 王琦, 张万福, 孙永河, 等. 长岭断陷断层活动特征及控藏作用 [J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57 (5): 1182-1191.
- WANG Q, ZHANG W F, SUN Y H, et al. Characteristics of fault activity and its effect on natural gas accumulation in Changling Fault Depression [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57 (5): 1182-1191.
- [26] 李浩, 陆建林, 王保华, 等. 长岭断陷南部地区断陷层油气成藏机制及勘探潜力 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2016, 40 (3): 44-54.
- LI H, LU J L, WANG B H, et al. Reservoir-forming mechanism and its exploration potential of Songliao Basin in the southern area of Changling Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40 (3): 44-54.
- [27] 冷庆磊, 朱建峰, 刘玉虎. 松辽盆地南部查干花次凹下白垩统火山岩储层特征与发育规律 [J]. 世界地质, 2023, 42 (3): 527-535.
- LENG Q L, ZHU J F, LIU Y H. Characteristics and development regularity of Lower Cretaceous volcanic rock reservoirs in Chaganhua Subseg, southern Songliao Basin [J]. World Geology, 2023, 42 (3): 527-535.
- [28] 宋昊, 蒋有录, 侯帅, 等. 长岭断陷龙凤山地区下白垩统地层压力特征及其对油气成藏的影响 [J]. 特种油气藏, 2022, 29 (2): 42-50.
- SONG H, JIANG Y L, HOU S, et al. Pressure characteristics and its influence on hydrocarbon accumulation of Lower Cretaceous Formation in Longfengshan area, Changling Faulted Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29 (2): 42-50.
- [29] BERGER A, GIER S, KROIS P. Porosity-preserving chlorite cements in shallow-marine volcanoclastic sandstones: evidence from Cretaceous sandstones of the Sawan Gas Field, Pakistan [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93 (5): 595-615.
- [30] 田建锋, 喻建, 张庆洲. 孔隙衬里绿泥石的成因及对储层性能的影响 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2014, 44 (3): 741-748.
- TIAN J F, YU J, ZHANG Q Z. The pore-lining chlorite formation mechanism and its contribution to reservoir quality [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44 (3): 741-748.
- [31] JIA F J, ZENG Z P, GUO R C, et al. Origin of grain-coating chlorite and implications for reservoir quality in the Triassic deep-buried volcanoclastic sandstones, central Junggar Basin, northwestern China [J]. ACS Omega, 2024, 9 (20): 22371-22385.