

卞海越,唐华风,吴斌,等.辽西兴城尖山白垩系义县组熔岩储层分布模式.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):2114-2127.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240225.

Bian Haiyue, Tang Huafeng, Wu Bin, et al. Distribution Model of Lava Reservoir in Cretaceous Yixian Formation of Jianshan, Xingcheng, Western Liaoning. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024, 54(6): 2114 - 2127. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20240225.

辽西兴城尖山白垩系义县组熔岩储层分布模式

卞海越¹,唐华风¹,吴斌²,石诺²,张津铭¹

1.吉林大学地球科学学院,长春 130061

2.中海油研究总院有限责任公司,北京 100028

摘要:渤海湾盆地中生界义县组熔岩储层好,但不同相结构的熔岩储层差异大,亟需建立适用于勘探早期的岩相与储层的关系。本文以辽西兴城尖山白垩系义县组熔岩为例开展研究,利用地质调查、岩矿鉴定、主量元素分析、图像分析等方法,开展岩性岩相、储层类型和储层控制因素等综合研究。研究结果表明:根据火山岩几何外形和岩石结构,识别出侵入相水上熔岩穹丘亚相和喷溢相水上熔岩流亚相。侵入相水上熔岩穹丘亚相的储层以裂缝为主,未见气孔发育,储层品质中等,呈顶好下差、储地比低、储层层数少、分布范围小的分布模式;喷溢相水上熔岩流亚相简单熔岩流微相的储集空间以气孔杏仁为主,储层品质好,呈上好下差、储地比高、储层层数多、分布范围大的分布模式。研究区火山机构的火山口—近火山口相带熔岩穹丘和近源相带简单熔岩流受到构造作用和风化作用的改造后,熔岩穹丘物性变化大,而简单熔岩流变化不明显。综上,在火山岩勘探遇到残余熔岩类火山机构时,应将近源相带中储层物性较好的简单熔岩流作为首选目标,火山口—近火山口相带中储层物性中等的熔岩穹丘作为次要目标。

关键词:熔岩;火山岩储层模式;火山机构;义县组;白垩系;渤海湾盆地;辽宁

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20240225

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

Distribution Model of Lava Reservoir in Cretaceous Yixian Formation of Jianshan, Xingcheng, Western Liaoning

Bian Haiyue¹, Tang Huafeng¹, Wu Bin², Shi Nuo², Zhang Jinming¹

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

2. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China

Abstract: There are favorable lava reservoirs in the Mesozoic Yixian Formation in the Bohai Bay

收稿日期: 2024-09-12

作者简介: 卞海越(1999—),男,硕士研究生,主要从事火山储层方面的研究, E-mail: bhy22@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 唐华风(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事火山地层和火山岩储层综合方面的研究, E-mail: tanghfhc@jlu.edu.cn

基金项目: 吉林省重点研发项目(20230203107SF);国家自然科学基金重大项目(41790453)

Supported by the Key Research and Development Program of Jilin Province (20230203107SF) and the National Natural Science Foundation of China (41790453)

basin, but lava reservoirs vary greatly in different phase structures, and there is an urgent need to establish the relationship between lithofacies and reservoirs applicable for early exploration. This study takes the lava of the Cretaceous Yixian Formation in Jianshan, Xingcheng, western Liaoning as an example. Comprehensive research on lithology, lithofacies, reservoir types, and reservoir controlling factors has been conducted using geological surveys, rock and mineral identification, major element analysis, and image analysis. The research results indicate that, based on the geometric shapes and petrofabric characteristics of volcanic rocks, the subfacies of subaqueous lava dome within the extrusive facies and the subfacies of subaqueous lava flow within the effusive facies have been identified. In the aquatic lava dome subfacies of the intrusive facies, the reservoirs are dominated by fissures, with no vesicular development, and the reservoirs are of average quality, showing a distribution pattern of good in top layers and poor in lower layers, low reserve-to-strata ratio, few reservoir layers, and limited distribution range. In the aquatic lava flow subfacies of the extrusive facies, the reservoir space of the simple lava flow microfacies is dominated by vesicular amygdale, and the reservoir is of good quality, showing a distribution pattern of good in upper layers and poor in lower layers, high reserve-to-strata ratio, a large number of reservoir layers, and large distribution range. The lava domes in the caldera-near caldera facies belt and the simple lava flows in the near-source facies belt of the volcanic edifice in the study area have been modified by tectonics and weathering. The lava domes experience great changes in physical properties, while the simple lava flows do not change significantly. In conclusion, when encountering residual lava-like volcanic edifices in volcanic exploration, simple lava flows with good reservoir properties in the near-source facies belt should be the first target, and lava domes with average reservoir properties in the caldera-near-caldera facies belt should be the secondary target.

Key words: lava; volcanic rock reservoir model; volcanic edifices; Yixian Formation; Cretaceous; Bohai Bay basin; Liaoning

0 引言

近年来,渤海湾盆地中生代火山岩油气藏勘探开发取得了一系列成果,发现多个火山岩高产油气藏,如BZ8-3S、LK7-1和LD25-1等^[1-5],展示出了渤海海域中生代火山岩巨大的勘探潜力^[6-9]。渤海海域中生代火山岩具有独特的成储过程,如义县组火山岩在形成后经受了长达50 Ma的改造时间后最终埋藏,其过程区别于持续埋藏的松辽盆地白垩纪火山岩和多次埋藏-抬升的中国西部盆地石炭纪一二叠纪火山岩。亟需开展渤海地区中生代火山岩的储层特征和分布规律研究。研究表明渤海地区中生代火山岩的熔岩储层好于火山碎屑岩。但熔岩储层也存在较大的差别,如在同一构造中远离火山通道的区域储层好于近火山口相带的区域,与之前认识到的储层分布规律存在一定的差异^[10],使得储层研究遇到了新的问题。受限于钻井实物资料数量少,难以全面系统地认识储层特征和分布模式。辽宁西部大面积出露的义县组火山岩为开展储层的

相关研究提供了物质保障,如辽宁兴城尖山地区出露的义县组熔岩揭示条件好。

熔岩的储层分布规律研究结果应用于火山岩早期勘探中,重要的环节是建立起储层地质属性与地震属性的对应关系^[11-12]。这涉及到两方面的问题:一是对于地层单元划分方案的系统性和科学性;二是储层地质属性与地震属性对应的唯一性。解决这两方面问题可以开展如下研究:前者往往依据火山岩相的研究,需要在系统性的火山岩相分类方案的约束下开展研究;后者是利用受采集处理方法影响小的几何形态参数来开展地震相分析。

火山岩相分类方案有多种,均建立起了岩性与储层的对应关系,指导了火山岩油气勘探^[13]。但钻前预测的熔岩、岩相和储层特征也存在符合率低的困境。按火山喷发方式、岩石组构和就位环境等要素的火山岩相分类方案,可以将熔岩的岩相与储层关系细划,并可建立起几何外形和内部结构与储层的关系^[14]。

本文以辽西兴城尖山熔岩为例,采用5相15亚

相 44 微相的分类方案开展岩相几何外形-内部结构与储层关系和储层发育控制因素等研究,分析火山口—近火山口相带的储层比近源相带差的原因,为残余熔岩类火山勘探提供依据。

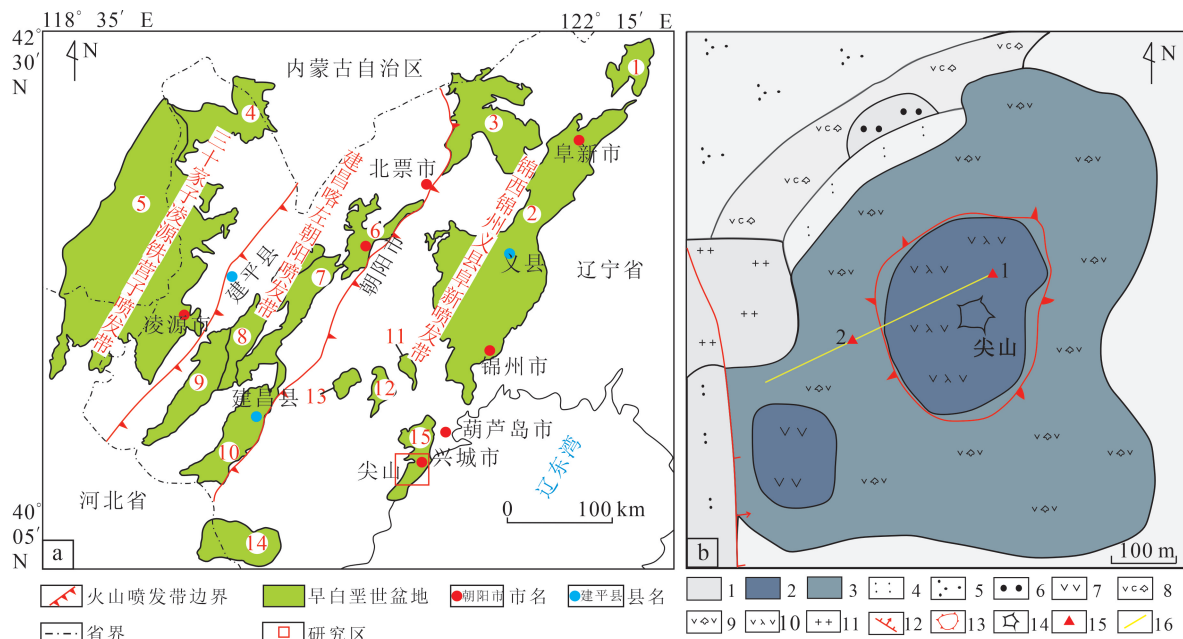
1 地质概况

辽西兴城尖山地区大地构造位于华北地台北缘,燕山台褶带(构造带)东段,北邻兴蒙造山带,东邻渤海。研究区处于兴城盆地内,从地层特征和构造特征的相似性来看,兴城盆地与其西北部的小德营子盆地、新台门盆地、暖池塘盆地均为阜新一义县盆地的南延部分^[15](图 1a)。

研究区中典型组段包括下白垩统义县组,该地层大多不整合于太古宙片麻状花岗岩之上^[17],主要为一套中—基性的火山机构(图 1b),火山碎屑沉积物以玄武质、安山质、粗安质火山-碎屑熔岩为主,有少量脉状、不规则状的正长斑岩、闪长玢岩、辉绿岩等小岩体伴随产出^[19]。兴城尖山地区发生多次构造演化^[20]并伴随多期次的火山喷发^[21-24]。辽宁兴

城地区义县组的 3 个火山岩样品锆石 U-Pb 年龄分别为(131.5 ± 1.4)、(126.0 ± 1.2)和(129.2 ± 1.0) Ma^[15]。

义县组发育种类齐全的火山岩,典型剖面为义县马神庙—宋八户^[25]。主要岩性为中基性、偏基性、中酸性以及偏酸性岩,包括流纹岩、流纹质晶屑凝灰岩、流纹质熔结凝灰岩、黑曜岩、粗面岩、粗面英安岩、玄武质粗面安山岩、玄武安山岩、玄武岩和粗面英安质凝灰岩等^[26]。义县组按照火山喷发期次大致可分为四个旋回:义县组旋回一(起始阶段),以中基性-偏基性岩为特征,代表岩性组合为玄武岩、玄武安山岩、碧质玄武岩^[27];义县组旋回二(喷发主期),以中基性熔岩为主,上部发育少量酸性火山碎屑岩,下部发育中基性火山岩,代表岩性组合为杏仁玄武安山岩和玄武粗安岩;义县组旋回三(喷发晚期),以中基性-偏基性岩为特征,中下部代表岩性为玄武岩及玄武玢岩,上部为粗安岩及火山碎屑岩;义县组旋回四(喷发末期),以中性、酸岩和偏碱性为特征,代表岩性为安山岩、流纹岩、英安岩^[28]。



a. 辽西地区白垩纪盆地分布图,据文献[15-16]修编;b. 尖山地区火山岩性岩相分布图,据文献[18]修编。图 a 中:1. 鸳鸯池盆地;2. 阜新一义县盆地;3. 紫都台盆地;4. 平庄盆地;5. 凌源盆地;6. 朝阳盆地;7. 梅勒营子—老爷庙盆地;8. 喀左盆地;9. 四官营子—三家子盆地;10. 建昌盆地;11. 暖池塘盆地;12. 新台门盆地;13. 小德营子盆地;14. 大甸子盆地;15. 兴城盆地。图 b 中:1. 第四系;2. 熔岩穹丘亚相;3. 简单熔岩流微相;4. 安山质岩屑晶屑凝灰岩;5. 凝灰质砂岩;6. 砾岩;7. 安山岩;8. 沉安山质集块岩;9. 安山质火山集块岩;10. 安山玢岩;11. 花岗岩;12. 正断层;13. 熔岩穹丘;14. 火山口;15. 露头剖面(1号熔岩穹丘剖面,2号简单熔岩流剖面);16. 岩相模式图平面分布位置。

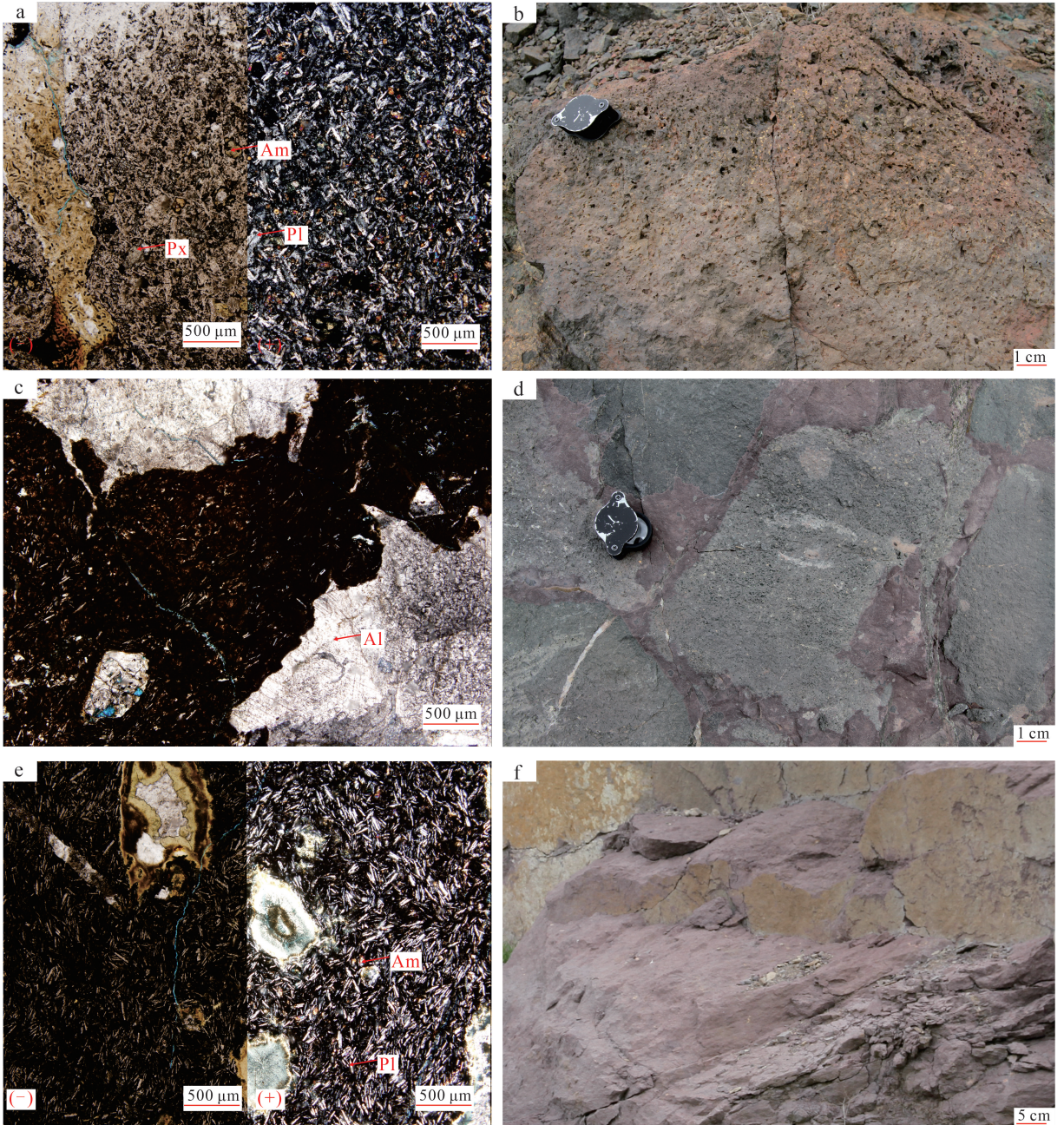
图 1 研究区地质概况图
Fig.1 Geological overview map of the study area

2 岩性岩相特征

2.1 岩性特征

辽西尖山地区熔岩可分为中基性熔岩和中酸性熔岩两类。中基性熔岩包括玄武质粗面安山岩、玄武安山岩、气孔杏仁玄武岩和粗面玄武岩;中酸性熔岩包括粗面英安岩和粗面岩(图 2)。气孔杏仁玄武

岩:岩石表面呈黄褐色,风化蚀变严重,发育大量气孔杏仁构造,直径为 0.03~10.00 mm,且上部气孔杏仁相比下部较为密集,直径较大;镜下可见微小气孔杏仁和冷凝收缩缝,基质为黑褐色火山玻璃,矿物主要为斜长石、角闪石、辉石(图 2a、b)。角砾集块熔岩:岩石呈灰色和红褐色,具有块状结构,表面发育被角砾所填充的气孔杏仁;镜下可见熔岩基质为隐晶质,



a. 气孔杏仁玄武岩镜下照片;b. 尖山地区露头块状气孔杏仁玄武岩;c. 角砾集块熔岩镜下照片;d. 尖山地区露头剖面角砾集块熔岩:e. 玄武安山岩镜下照片:f. 尖山地区露头玄武安山岩。Pl. 斜长石;Am. 角闪石;Px. 辉石;Al. 碱性长石。

图 2 辽宁尖山白垩系义县组熔岩岩性特征

Fig.2 Lithological characteristics of lava in Yixian Formation of Cretaceous in Jianshan area, Liaoning

可见斜长石微晶,同时其中混杂有爆炸产生的火山碎屑,其中晶屑为碱性长石,黑云母多已暗化(图 2c、d)。玄武安山岩:黄褐色和红褐色,呈棱角状和次棱角状,岩石表面裂缝带较为发育,上部岩石致密,下部较为松散;镜下可见交织结构和大杏仁,基质为隐晶质,斑晶多为基性斜长石和少量角闪石,具有杏仁构造(图 2e、f)。

采集尖山地区义县组 7 件较为新鲜的火山岩样品。本次测试在自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室完成,使用日本理学 ZSX Primus II 型全自动 X 射线荧光光谱仪进行硅酸盐和碳酸盐全分析,并使用 3 件他人测试的样品数据^[15]。硅酸盐和碳酸盐全分析方法,主要针对 SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、MnO、MgO、CaO 和 P₂O₅ 等 10 种氧化物的测试,经过与多轮的地质分析测试协会能力测试比对,其 $w(\text{SiO}_2)$ 偏差为 0.19%, $w(\text{TiO}_2)$ 偏差为 0.003%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 偏差为 0.06%, $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 偏差为 0.01%, $w(\text{MnO})$ 偏差为 0.002 4%, $w(\text{MgO})$ 偏差为 0.001%, $w(\text{CaO})$ 偏差为 0.03%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 偏差为 0.01, $w(\text{K}_2\text{O})$ 偏差为 0.009%, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 偏差为 0.002%, 烧失量偏差为 0.38%^[29]。

分析结果表明, $w(\text{SiO}_2)$ 为 49.57%~64.63%, 属于中基性-中性偏酸岩石(表 1)。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 15.40%~18.69%, $w(\text{TiO}_2)$ 为 0.69%~1.57%, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 为 5.41%~8.81%, $w(\text{FeO})$ 为 0.04%~2.13%, $w(\text{CaO})$ 为 0.27%~4.69%, $w(\text{MgO})$ 为 0.47%~4.40%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 1.84%~3.53%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 3.70%~7.66%, $w(\text{MnO})$ 为 0.05%~0.44%, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为 0.05%~0.47%, 烧失量为

1.49%~5.62%。TAS 图解(图 3)显示辽西尖山义县组火山岩是以碱性系列为主的中基性-中性偏酸熔岩。

2.2 岩相特征

参照 5 相 15 亚相和 44 微相的岩相分类方案^[14],尖山地区熔岩划分为侵出相水上熔岩穹丘亚相和喷溢相水上熔岩流亚相简单熔岩流微相两种岩相模式(图 4)。其中:侵出相水上熔岩穹丘亚相的岩性为致密块状的中酸性熔岩,岩石类型包括粗面安山岩、粗面岩、玄武质粗面安山岩,视厚度可达 100 m,外形为穹丘状、纵横比大、地形坡度陡,发育丰富的不规则柱状节理,少见断层。喷溢相水上熔岩流亚相简单熔岩流微相的岩性为中基性熔岩,岩石类型包括气孔玄武岩、粗面岩、粗面玄武岩,宏观和微观冷凝收缩缝发育,外形为盾形、纵横比小、地形坡度缓,单个熔岩流厚度约 10 m^[32]。在本区喷溢相与侵出相呈穿切接触关系,前者早于后者形成(图 4)。

3 储层特征

3.1 储集空间类型

按照 11 类 28 型储集空间分类方案^[32],在本区识别出 6 类 10 型孔缝,有气孔(气孔和杏仁体内孔)、原生缝(冷凝收缩缝)、溶蚀孔(晶内微孔、铸模孔、筛状孔和基质溶蚀微孔)、构造缝、溶蚀缝和风化缝等(图 5)。下面进行详细介绍。

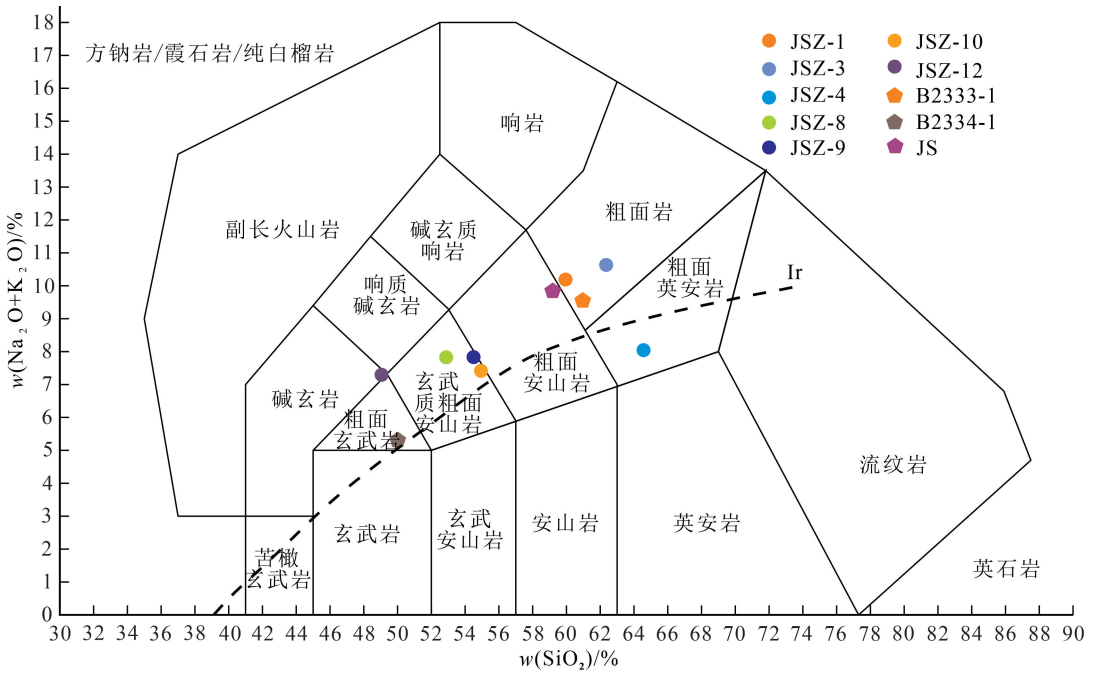
气孔形态以圆球形和椭球形为主,岩石直径在 0.01~0.20 cm 之间,呈离散分布(图 5a)。连通率与气孔的孔隙度、裂缝发育程度呈正相关。杏仁体内孔是指具有气孔构造的岩石,形态以圆球形和椭球形

表 1 辽宁尖山白垩系义县组熔岩主量元素数据

Table 1 Major element data of lava in Yixian Formation of Cretaceous in Jianshan area, Liaoning

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总和	% Na ₂ O+ K ₂ O
JSZ-1	59.91	0.69	16.54	5.41	0.36	0.06	1.30	1.89	7.61	2.51	0.25	3.23	99.76	10.12
JSZ-3	62.50	0.69	17.41	6.33	0.04	0.05	0.47	0.27	7.66	2.81	0.05	1.49	99.77	10.47
JSZ-4	64.63	0.79	15.59	5.60	0.23	0.08	1.00	0.66	5.25	2.67	0.09	3.20	99.79	7.92
JSZ-8	52.94	1.38	16.08	6.91	2.13	0.13	4.33	3.91	5.96	1.84	0.44	3.49	99.54	7.80
JSZ-9	54.79	1.43	15.67	6.49	1.90	0.08	4.40	3.75	5.68	2.13	0.26	2.99	99.57	7.81
JSZ-10	54.99	1.50	15.40	7.35	1.60	0.09	4.21	3.33	5.34	2.04	0.31	3.42	99.58	7.38
JSZ-12	49.57	1.57	18.69	8.81	0.68	0.44	1.89	4.69	3.70	3.53	0.47	5.62	99.66	7.23
B2333-1	60.94	0.71	16.81	5.85	0.42	0.07	2.21	2.69	6.20	3.44	0.52	1.66	101.52	9.64
B2334-1	50.06	1.97	15.76	4.89	6.12	0.16	7.20	7.64	3.65	1.68	0.61	2.12	101.86	5.33
JS	59.00	0.72	16.46	5.12	0.97	0.10	3.27	3.88	6.85	3.03	0.43	2.06	101.89	9.88

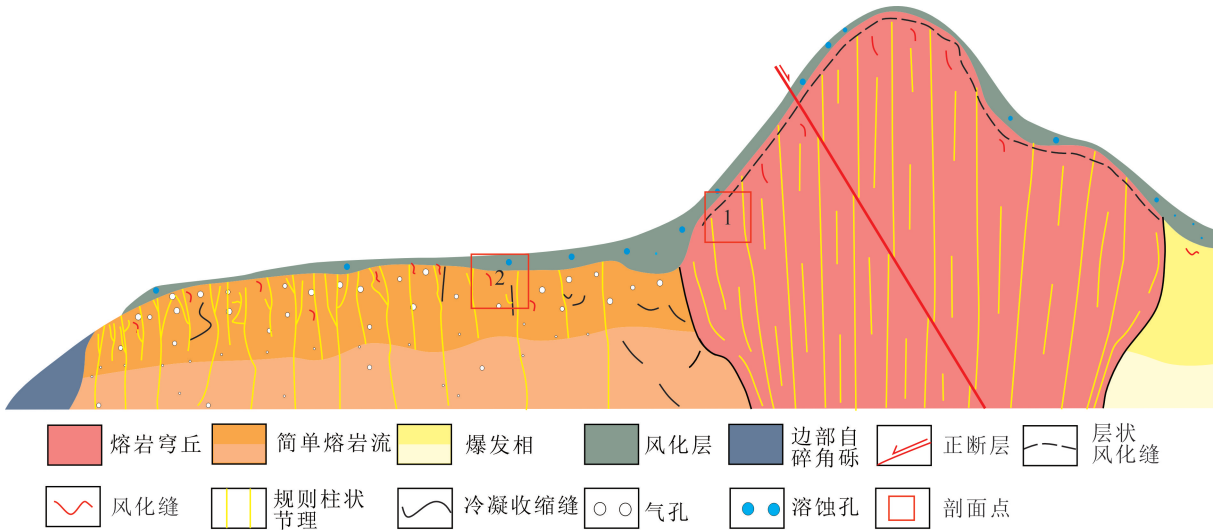
注: B2333-1、B2334-1 和 JS 数据据文献^[15]。



底图据文献[30-31]。Ir,钙碱性与碱性的分界线。

图 3 辽宁尖山白垩系义县组熔岩主量元素 TAS 图解

Fig.3 TAS diagram of major elements in lava from Yixian Formation of Cretaceous in Jianshan area, Liaoning



1. 熔岩穹丘剖面; 2. 简单熔岩流剖面。

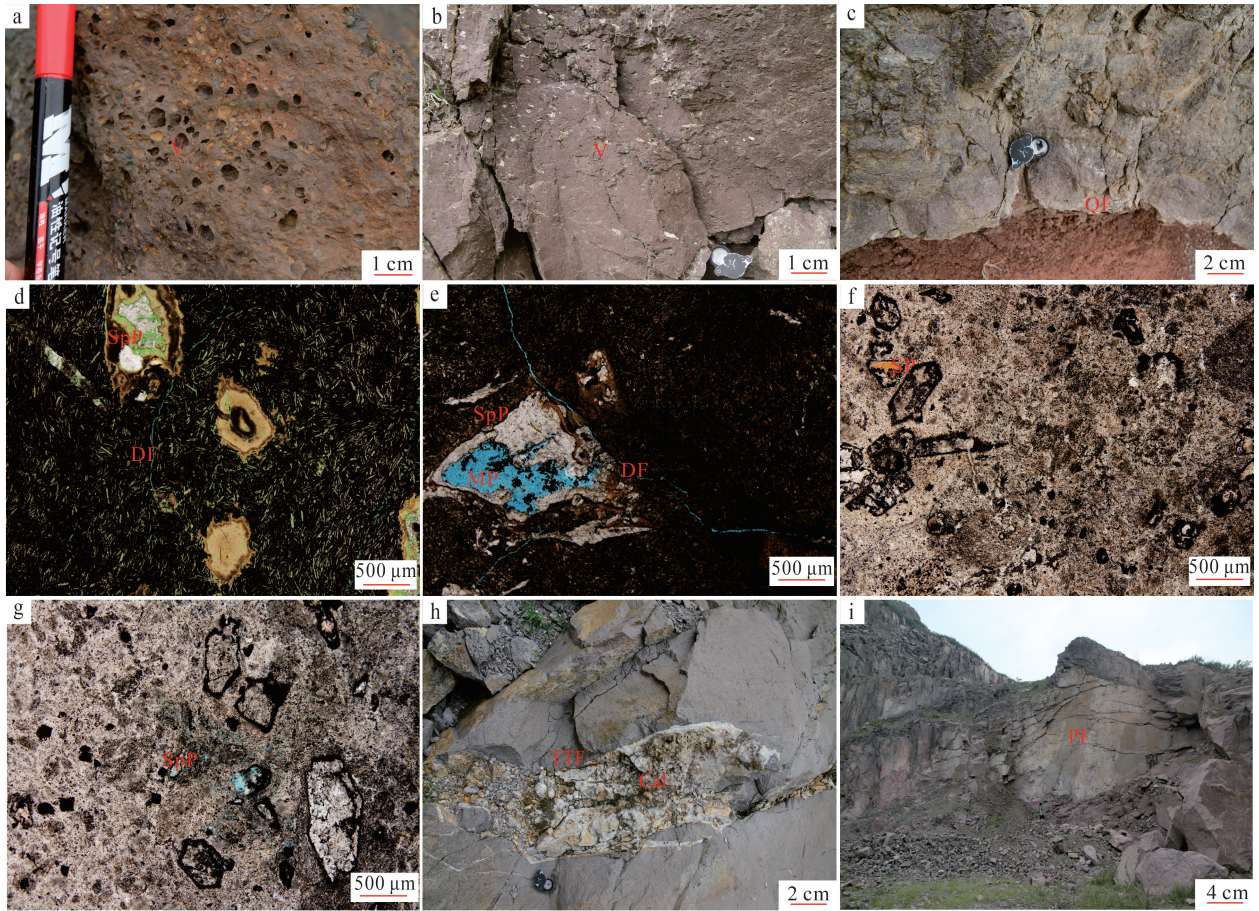
图 4 辽宁尖山白垩系义县组熔岩岩相模式图

Fig.4 Lithofacies model diagram of lava in Yixian Formation of Cretaceous in Jianshan area, Liaoning

为主,直径在 0.01 ~1.00 cm 之间,呈离散分布(图 5 b)。冷凝收缩缝发育于尖山地区底部槽模、熔岩流顶部和熔岩穹丘,形态成层和高角度发育(图 5c)。

晶内微孔是指存在于晶体内的溶蚀微孔,呈细小的海绵状孔,具有较差的连通性,溶解作用弱,储层物性较差(图 5d)。铸模孔是指岩石中的矿物晶体被完全溶解产生的孔隙,连通性较好,溶解作用中

等(图 5e)。筛状孔是指岩石中的矿物晶体部分区域被溶解产生的孔隙,比铸模孔的储层物性差,连通性较好,溶解作用中等(图 5f)。基质溶蚀微孔是指岩石中的基质被溶蚀产生的细小微孔,较差的连通性(图 5g)。构造缝是指由于构造作用形成的裂缝,尖山地区的构造缝被充填(图 5h)。溶蚀缝是指岩石中的已有构造缝在大气水和地层流体作用下发生



a. 玄武岩, 气孔; b. 安山岩, 杏仁体内孔; c. 冷凝收缩缝; d. 玄武质安山岩, 晶内微孔、基质溶蚀微孔; e. 安山质火山角砾熔岩, 基质溶蚀微孔、铸膜孔、溶蚀缝; f. 玄武岩, 筛状孔、基质溶蚀微孔; g. 玄武岩, 基质溶蚀微孔; h. 构造缝(方解石充填); i. 野外剖面, 层状风化缝。V. 气孔; QF. 冷凝收缩缝; DF. 溶蚀缝; SpP. 溶蚀微孔; MP. 铸膜孔; SP. 筛状孔; TTF. 构造缝; Cal. 方解石; PF. 层状风化缝。

图 5 辽宁尖山白垩系义县组熔岩储集空间特征图

Fig.5 Reservoir space characteristics diagram of lava in Yixian Formation of Cretaceous in Jianshan area, Liaoning

溶蚀作用,使原有孔缝扩大,连通性好,储层物性好(图 5e)。风化缝是指出露地表的岩石受到风化作用的影响形成的裂缝,在本区可见层状风化缝(图 5i)。

利用 32 张铸体薄片和野外照片进行面孔率识别。结果表明,该区熔岩为孔隙-裂缝型储层,储集空间类型以次生孔隙为主,次生孔隙最少为 46.5%,最高可达 81.2%,筛状孔占比最高。

3.2 储层物性特征

野外新鲜岩样在吉林大学岩石物理实验室测试完成。本次利用 AP608 仪器进行了氦(He)注入的孔隙度和渗透率测试,相关流程执行石油天然气行业《岩心分析方法》标准(SY/T 5336—2006),得到 10 个火山岩样品的孔渗度和渗透率测试结果。岩样直径为 2.5 cm,长为 4.0 cm,其孔隙度范围在

3.201%~11.478%之间,几何均值为 7.080%;渗透率范围在 0.002~0.352 mD^①之间,几何均值为 0.018 mD。可知储层多为低孔低渗和中孔低渗,储层差异较大。

4 储层分布模式

4.1 侵入相熔岩穹丘亚相储层分布模式

本次研究采集的储层样品主要分布在内核微相和断层破碎带,内核微相还采集到了风化和未风化样品。整体上熔岩穹丘为低孔低渗型储层,与伊通火山群熔岩穹丘亚相类似^[33],分布模式为顶部好下部差、储地比低,断裂可显著改善储层物性(图 6)。储层分布模式主要受风化作用和构造作用的控制^[34],裂缝对其储层物性有影响^[35]。该储层分布

①毫达西(mD)为非法定计量单位,1 mD=0.987×10⁻³ μm²,下同。

模式与伊通火山群玄武质熔岩穹丘亚相的分布模式具有一致性^[33]。

4.1.1 风化作用控制垂向分带

熔岩穹丘亚相在研究区地质概况图 1b 中 1 号剖面点处,其具有垂向分带性,可划分出风化残余带、风化溶蚀带-裂缝带、母岩层 3 个带(图 7)。

顶部风化残余带,主要为砂砾层,厚 10 cm 左右,实测风化指数达到 65%。利用便携 Tiny Perm-3 微型空气渗透率仪器测得渗透率范围为 102.1~138.7 mD,几何均值为 120.4 mD;岩石强度范围为 20.0~30.0 MPa,几何均值为 23.0 MPa。

中部风化溶蚀带和裂缝带,厚度为 1~2 m,发育丰富的层节理,风化指数为 61%,孔隙度为 5%~10%。利用便携仪器测得渗透率为 0.9~3.1 mD,几何均值为 2.0 mD,岩石强度范围为 41.0~

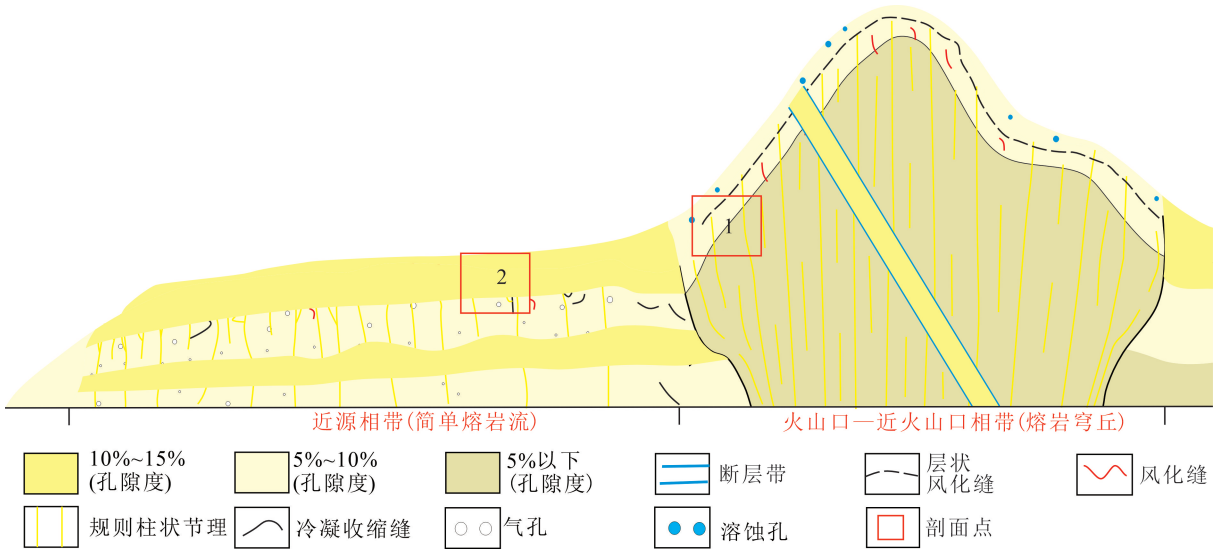
52.5 MPa,几何均值为 45.0 MPa。

母岩层,未见明显的风化裂缝和溶蚀现象,风化指数为 53%,孔隙度在 5%以下。利用便携仪器测得渗透率范围为 0.030 8~0.184 3 mD,几何均值为 0.108 0 mD,岩石强度范围为 53.5~61.5 MPa,几何均值为 57.0 MPa(图 8)。

整体上看,风化壳带自上而下,岩石渗透率呈变小的趋势(图 8a),岩石强度呈逐渐变大的趋势(图 8b)。风化作用控制了熔岩穹丘亚相的垂向分带性。

4.1.2 构造作用控制熔岩穹丘岩相内幕高孔渗带

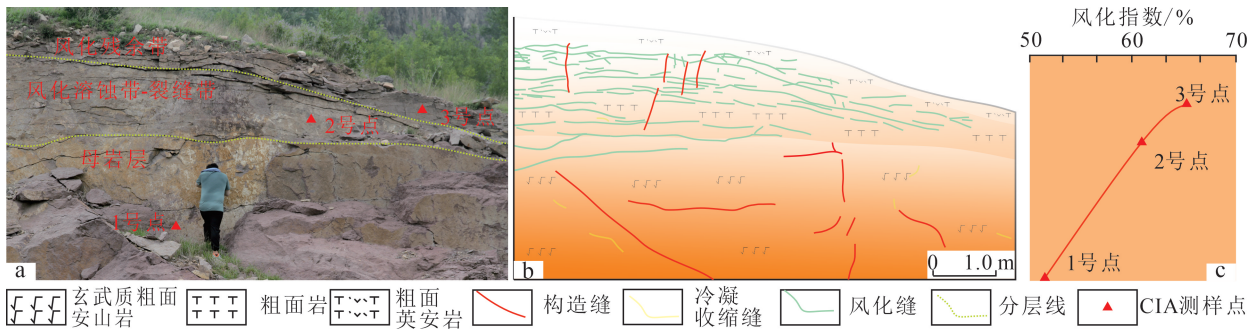
熔岩穹丘亚相受到构造影响,形成断层破碎带,孔隙度为 10%~15%,显著高于内核微相未风化部分的孔隙度。断层破碎带发育有 NE 向和 NW 向两组近直立裂缝,前者产状为 332°∠81°和 347°∠89°,后者产状为 243°∠83°和 247°∠89°。



1. 熔岩穹丘剖面;2. 简单熔岩流剖面。

图 6 辽宁尖山白垩系义县组熔岩储层分布模式图

Fig.6 Reservoir distribution pattern diagram of lava in Yixian Formation of Cretaceous in Jianshan area, Liaoning



a. 野外剖面;b. 剖面储层模式图;c. 剖面风化指数分布图。

图 7 辽宁尖山白垩系义县组熔岩穹丘野外露头剖面

Fig.7 Field outcrop profile of lava dome in Yixian Formation of Cretaceous Jianshan area, Liaoning

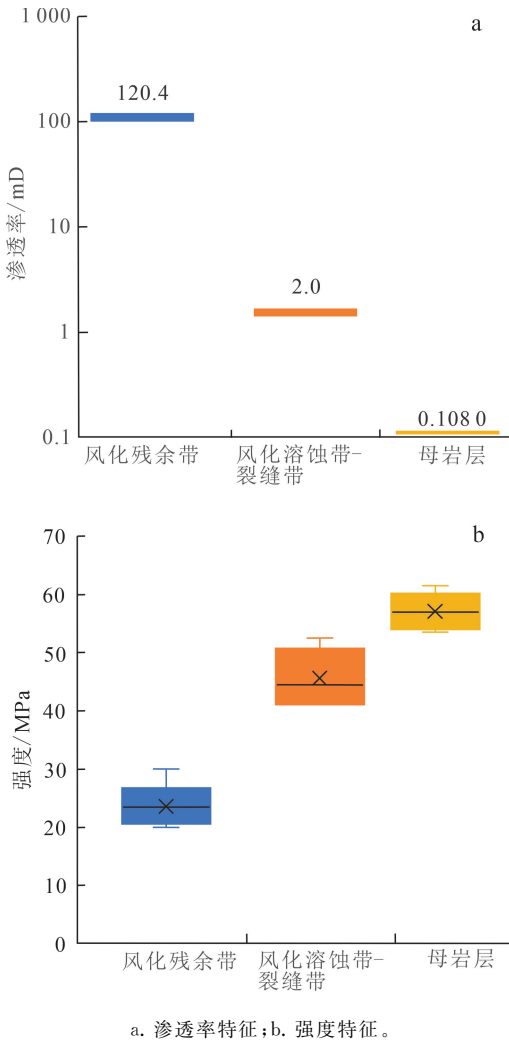


图 8 辽宁尖山白垩系义县组熔岩穹丘垂直分带特征

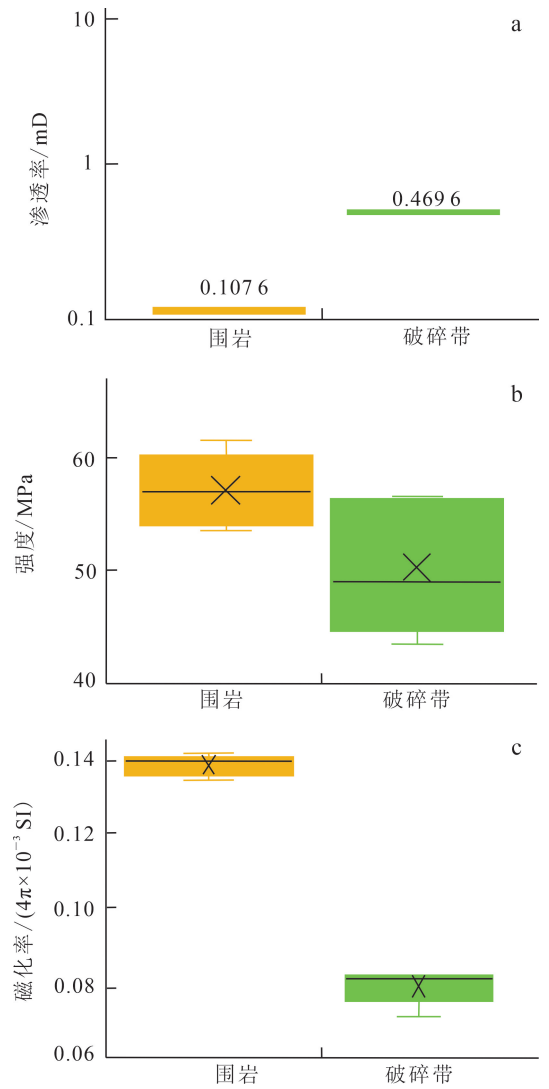
Fig.8 Vertical zonation characteristics of lava dome in Yixian Formation of Cretaceous Jianshan area, Liaoning

将破碎带与围岩进行岩石物理特征对比可知：破碎带的渗透率范围为 0.224 3~0.714 9 mD，几何均值为 0.469 6 mD(图 9a)；强度范围为 43.5~56.5 MPa，几何均值为 50.0 MPa(图 9b)；磁化率范围为 $(0.071 \sim 0.082) \times 4\pi \times 10^{-3}$ SI，几何均值为 $0.079 \times 4\pi \times 10^{-3}$ SI(图 9c)。围岩的渗透率范围为 0.030 8~0.184 3 mD，几何均值为 0.107 6 mD；强度范围为 53.5~61.5 MPa，几何均值为 57.0 MPa；磁化率范围为 $(0.134 \sim 0.141) \times 4\pi \times 10^{-3}$ SI，几何均值为 $0.138 \times 4\pi \times 10^{-3}$ SI。

综上，构造作用产生的破碎带使岩体的渗透率增大、强度变小和磁化率变小。

4.2 喷溢相水上熔岩流亚相储层分布模式

本区水上熔岩流亚相主要发育简单熔岩流微



a. 渗透率特征;b. 强度特征;c. 磁化率特征。

图 9 辽宁尖山白垩系义县组熔岩穹丘下部特征

Fig.9 Characteristics of the lower part of lava dome in Yixian Formation of Cretaceous in Jianshan area, Liaoning

相，在地质概况图 1b 中 2 号剖面点处，在剖面上可见两个熔岩流亚相叠置。每个熔岩流亚相的储层呈上好下差、储地比高、分布范围大和储层品质好的分布模式。简单熔岩流微相可划分为上部气孔带和下部致密带，上部的孔隙度范围为 10%~15%，下部的孔隙度范围为 5%~10%。

熔岩流 I 下部为黄褐色安山岩，熔岩流 II 上部为气孔玄武岩，下部为致密玄武岩(图 10)。利用分带渗透率、磁化率和强度测试数据，对水上熔岩流简单熔岩流储层物性特征进行分析。熔岩流 I 下部黄褐色安山岩的渗透率几何均值为 0.838 9 mD；强度

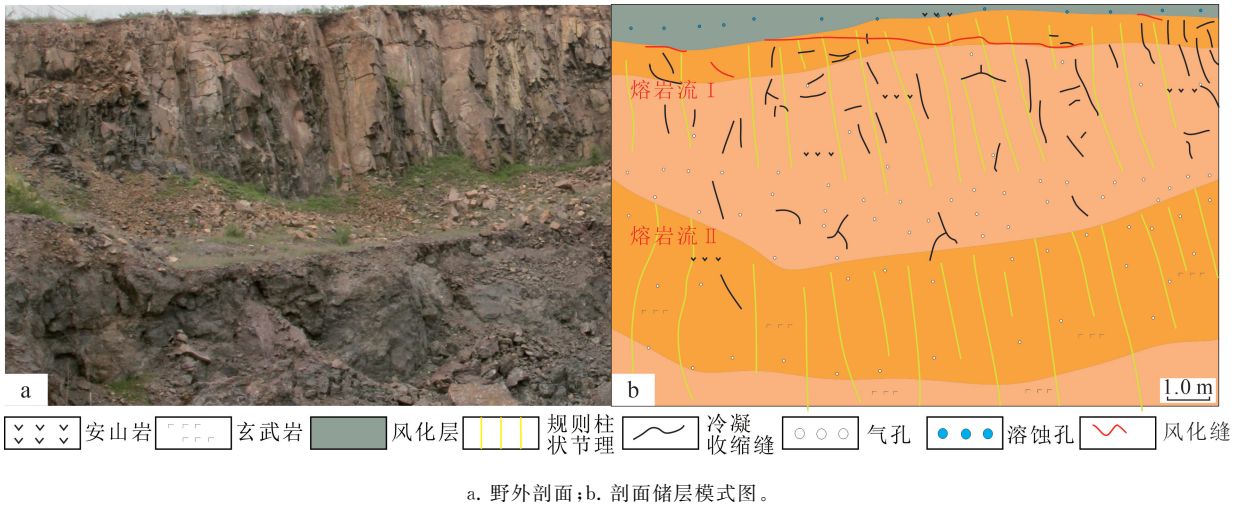


图 10 辽西尖山白垩系义县组简单熔岩流野外露头剖面

Fig.10 Field outcrop profile of simple lava flow in Yixian Formation of Cretaceous in Jianshan area, Liaoning

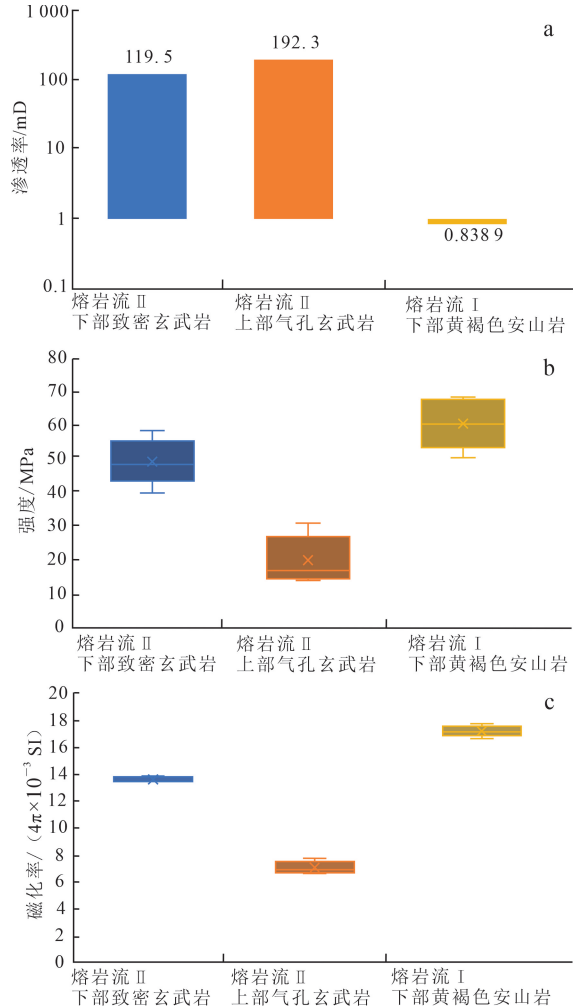
范围为 50.5 ~ 68.5 MPa, 强度几何均值为 60.0 MPa;磁化率范围为 $(16.6 \sim 17.7) \times 4\pi \times 10^{-3}$ SI,几何均值为 $17.1 \times 4\pi \times 10^{-3}$ SI。熔岩流 II 上层气孔玄武岩的渗透率几何均值为 192.3 mD;强度范围为 14.0 ~ 31.0 MPa, 强度几何均值为 19.0 MPa;磁化率范围为 $(6.6 \sim 7.7) \times 4\pi \times 10^{-3}$ SI,几何均值为 $7.0 \times 4\pi \times 10^{-3}$ SI。熔岩流 II 下层致密玄武岩的渗透率几何均值为 119.5 mD;强度范围为 40.0 ~ 58.5 MPa, 强度几何均值为 49.0 MPa;磁化率范围为 $(13.4 \sim 13.7) \times 4\pi \times 10^{-3}$ SI,几何均值为 $13.5 \times 4\pi \times 10^{-3}$ SI。整体上看,熔岩流 I 下部黄褐色安山岩渗透率比熔岩流 II 小,且在熔岩流 II 中上下层岩石渗透率呈变小的趋势(图 11a),表明不同的熔岩流中储层物性不尽相同,原生孔隙会使储层的物性发生改变,气孔的发育会让储层物性变好。露头剖面熔岩流 I 下部的强度比熔岩流 II 强度大,岩石强度呈变小的趋势(图 11b)。气孔的发育会破坏岩石结构,使得岩石的强度变小。安山岩的磁化率比玄武岩磁化率大,气孔让岩石的磁化率减小(图 11c)。

4.3 熔岩火山机构储层分布模式

本文研究的熔岩属于火山机构的火山口—近火山口相带和近源相带。前者标志性岩相是水上熔岩穹丘亚相,后者标志性岩相是喷溢相水上熔岩流亚相简单熔岩流微相^[12]。

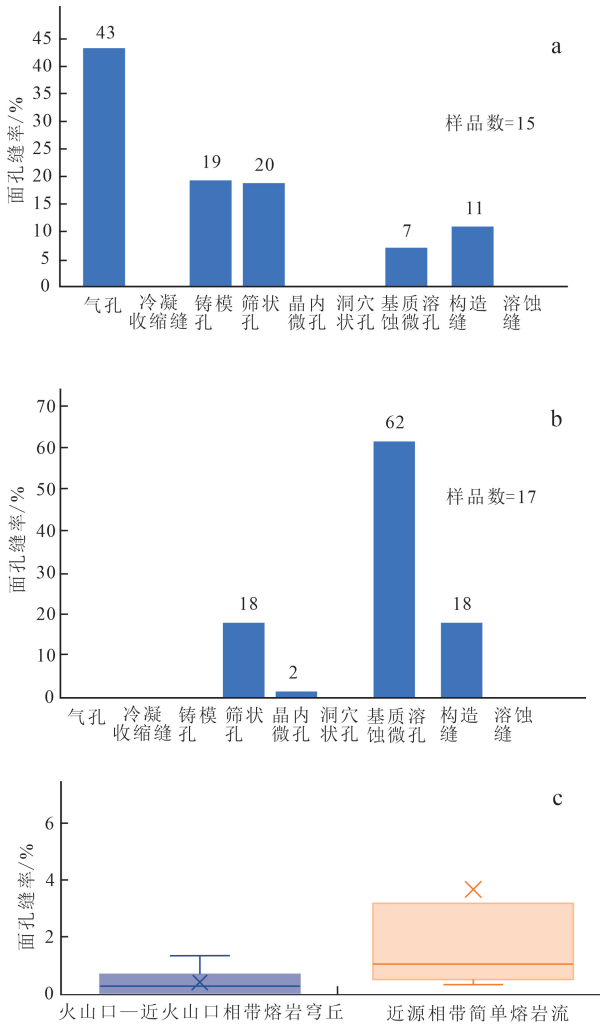
4.3.1 储集空间分布

根据 32 张铸体薄片照片的孔隙类型分析可知,近源相带简单熔岩流微相以气孔、铸模孔和筛状孔为主,面孔率为 1.6%;其中气孔占面孔的 43%,筛状孔占比为 20%,铸模孔为 19%(图 12a)。火山口—近火



a. 渗透率特征;b. 强度特征;c. 磁化率特征。

图 11 辽西尖山白垩系义县组简单熔岩流特征
Fig. 11 Characteristics of simple lava flow in Yixian Formation of Cretaceous in Jianshan area, Liaoning



a. 近源相带简单熔岩流面孔缝占比特征; b. 火山口—近火山口相带熔岩穹丘的面孔缝占比特征; c. 面孔缝率特征。

图 12 辽宁尖山白垩系义县组火山机构相带面孔率特征
Fig.12 Characteristics of facial porosity in volcanic structural facies belts of Yixian Formation of Cretaceous Jianshan area, Liaoning

山口相带熔岩穹丘亚相以基质溶蚀微孔、构造缝和筛状孔为主,面孔率为 0.21%;其中基质溶蚀微孔占 62%,筛状孔占比为 18%,构造缝占比为 18%(图 12b)。对比面孔率可知,近源相带简单熔岩流的面孔率和大孔径孔隙占比高于火山口—近火山口相带熔岩穹丘的面孔率和大孔径孔隙占比(图 12c)。

4.3.2 储层物性特征

在尖山地区取得 10 件义县组火山岩岩石样品,带回进行钻柱,呈直径为 2.5 cm 和长度为 4 cm 的小直径岩柱,于吉林大学岩石物理实验室进行测试(图 13)。野外渗透率数据为利用 Tiny Perm-3 微

型空气渗透率仪器在野外剖面测试实测所得(图 14)。

火山口—近火山口相带熔岩穹丘亚相孔隙度范围为 3.2%~11.2%,均值为 5.9%(图 13);渗透率范围为 0.03~0.71 mD,均值为 0.17 mD(图 14)。近源相带简单熔岩流亚相孔隙度范围为 5.6%~11.5%,均值为 9.42%(图 13);渗透率范围为 120~196 mD,均值为 154 mD(图 14)。综上可知,在尖山地区火山口—近火山口相带熔岩穹丘的储层物性比近源相带简单熔岩流差。

所以,在针对残余熔岩火山机构的勘探时,应将近源相带中储层物性较好的简单熔岩流做为首选目标,火山口—近火山口相带中储层物性中等的熔岩穹丘作为次要目标。

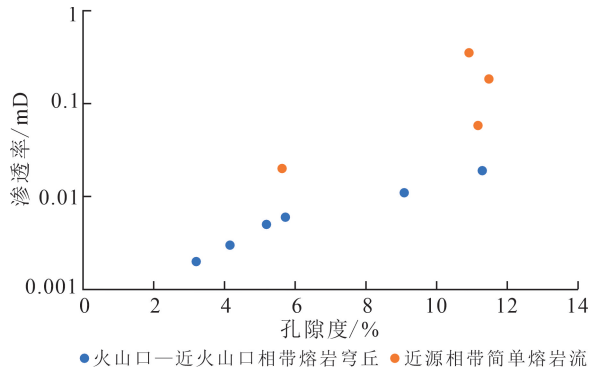


图 13 辽宁尖山白垩系义县组熔岩火山机构孔渗特征
Fig.13 Pore permeability characteristics of lava volcanic structures in Yixian Formation of Cretaceous in Jianshan area, Liaoning

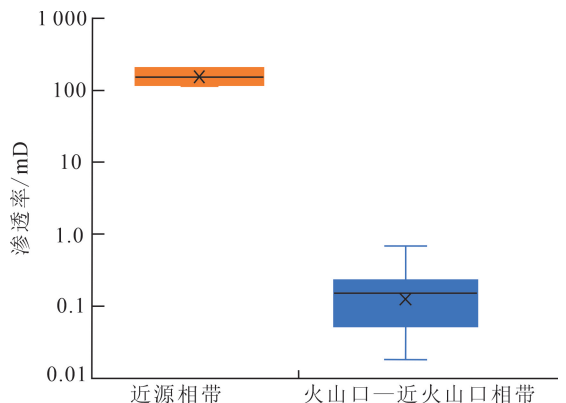


图 14 辽宁尖山白垩系义县组火山机构渗透率特征
Fig.14 Permeability characteristics of volcanic structures in Yixian Formation of Cretaceous in Jianshan area, Liaoning

5 结论

1) 辽西尖山地区的火山岩岩相按照 5 相 15 亚相和 44 微相方法进行划分,可分为水上熔岩穹丘亚相和水上熔岩流简单熔岩流微相两种相模式。其中水上熔岩穹丘亚相的岩性呈中酸性,岩石类型包括粗面英安岩、粗面岩、玄武质粗面安山岩,不规则和规则柱状节理和断层发育,储层品质中等。水上熔岩流简单熔岩流微相的岩性呈中基性,岩石类型包括气孔玄武岩、粗面岩和粗面玄武岩,形成盾形、地形坡度角缓,可见规则状节理和冷凝收缩缝,储集空间以气孔杏仁为主,储层品质好。

2) 本地区识别出共 4 类 10 型孔隙,具体为原生孔(气孔、杏仁体内孔)、原生缝(冷凝收缩缝),次生孔(溶蚀孔,包括铸模孔、筛状孔、基质溶蚀微孔和晶内微孔)和次生缝(构造缝、溶蚀缝和风化缝)。熔岩穹丘亚相储层以次生溶蚀孔(筛状孔、铸模孔和基质溶蚀微孔)为主,水上熔岩流简单熔岩流微相储层以气孔和冷凝收缩缝为主。对比面孔率和渗透率可知,水上熔岩流简单熔岩流微相的储层物性优于熔岩穹丘亚相。

3) 研究区火山机构的火山口—近火山口相带熔岩穹丘和近源相带简单熔岩流的储层物性在受到构造作用和风化作用的影响后,明显发现熔岩穹丘的储层物性变化大,而简单熔岩流的储层物性变化相对不明显。故在进行火山岩储层勘探,遇残余熔岩类火山机构时,应避免火山口—近火山口相带中的储层物性中等的熔岩穹丘,选择近源相带中的储层物性较好的简单熔岩流。

参考文献(References):

[1] 徐长贵,于海波,王军,等.渤海海域渤中 19-6 大型凝析气田形成条件与成藏特征[J].石油勘探与开发,2019,46(1):25-38.
Xu Changgui, Yu Haibo, Wang Jun, et al. Formation Conditions and Accumulation Characteristics of Bozhong 19-6 Large Condensate Gas Field in Offshore Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(1): 25-38.

[2] 徐长贵,周家雄,杨海风,等.渤海湾盆地大型变质岩潜山油田勘探发现及地质意义[J].石油学报,2023,44(10):1587-1598,1611.
Xu Changgui, Zhou Jiaxiong, Yang Haifeng, et al. Discovery of Large-Scale Metamorphic Buried-Hill

Oilfield in Bohai Bay Basin and Its Geological Significance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(10): 1587-1598,1611.

[3] 徐长贵.渤海湾盆地天然气勘探新进展、未来方向与挑战[J].天然气工业,2024,44(1):72-85.
Xu Changgui. Progress, Future Direction, and Challenges of Natural Gas Exploration in the Bohai Bay Basin [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 72-85.

[4] 徐长贵,张功成,黄胜兵,等.渤海湾盆地海域白垩系大中型火山岩油气藏形成条件[J].石油勘探与开发,2024,51(3):467-477.
Xu Changgui, Zhang Gongcheng, Huang Shengbing, et al. Formation of Large-and Medium-Sized Cretaceous Volcanic Reservoirs in the Offshore Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(3): 467-477.

[5] 周家雄,徐春强,黄志,等.渤海湾盆地渤中凹陷 BZ8-3S 大型构造规模型火山岩储层形成条件[J/OL].地球科学,2024.[2024-04-15]. doi:https://Link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20240412.1549.002.
Zhou Jiaxiong, Xu Chunqiang, Huang Zhi, et al. Enhanced Formation Conditions of the Large-Scale Volcanic Reservoir in the BZ8-3S Large Volcanic Structure in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin [J/OL]. Earth Science, 2024.[2024-04-15]. doi:https://Link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20240412.1549.002.

[6] 单玄龙,王蔚,张新涛,等.渤海海域渤中凹陷中生界火山机构地质模式及建造过程[J].石油与天然气地质,2023,44(3):675-688.
Shan Xuanlong, Wang Wei, Zhang Xintao, et al. Geological Model and Construction Process of the Mesozoic Volcanic Edifices in Bozhong Sag, Bohai Sea [J]. Oil and Gas Geology, 2023, 44(3): 675-688.

[7] 吴庆勋,王粤川,韦阿娟,等.渤海海域中生代火山岩喷发旋回划分及与油气的关系[J].中国海上油气,2017,29(2):18-26.
Wu Qingxun, Wang Yuechuan, Wei Ajuan, et al. Division of the Mesozoic Volcanic Rock Eruption Cycle and Its Relationship with Oil and Gas in the Bohai Sea [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(2): 18-26.

[8] 金春爽,乔德武,淡伟宁.渤海湾盆地中、新生代火山岩分布及油气藏特征[J].石油与天然气地质,2012,33(1):19-29,36.
Jin Chunshuang, Qiao Dewu, Dan Weining. Meso-Cenozoic Volcanic Rock Distribution and Reservoir Characteristics in the Bohai Bay Basin [J]. Oil and Gas

- Geology, 2012, 33(1): 19 - 29, 36.
- [9] 肖军, Kamaye Tourba, 王华, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷火山岩特征及其有利成藏条件分析[J].地质科技情报, 2004, 23(1): 52 - 56.
- Xiao Jun, Kamaye Tourba, Wang Hua, et al. Characteristics of Igneous Rocks and Their Favorable Pool Forming Conditions in Nanpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2004, 23 (1): 52 - 56.
- [10] 唐华风, 庞彦明, 边伟华, 等. 松辽盆地白垩系营城组火山机构储层定量分析[J].石油学报, 2008, 29(6): 841 - 845, 852.
- Tang Huafeng, Pang Yanming, Bian Weihua, et al. Quantitative Analysis on Reservoirs in Volcanic Edifice of Early Cretaceous Yingcheng Formation in Songliao Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29 (6): 841 - 845, 852.
- [11] Tang H F, Wang L L, Wu H C, et al. Possible Geological Interpretation of the Volcanic Seismic Facies Based on Volcanostratigraphy Elements: A Case Analysis of the Yingcheng Formation in the Chang Fault Depression Songliao Basin, NE China [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 225: 211668.
- [12] 唐华风, 胡佳, 李建华, 等. 松辽盆地断陷期火山岩典型地震相的地质解译[J].石油地球物理勘探, 2018, 53(5): 1075 - 1084.
- Tang Huafeng, Hu Jia, Li Jianhua, et al. Geological Significances of Typical Seismic Facies of Volcanic Rocks of the Rifted Period in Songliao Basin, NE China [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(5): 1075 - 1084.
- [13] 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义[J].吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(4): 449 - 456.
- Wang Pujun, Chi Yuanlin, Liu Wanzhu, et al. Volcanic Facies of the Songliao Basin: Classification, Characteristics and Reservoir Significance [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2003, 33 (4): 449 - 456.
- [14] 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 Huafeng, Bian Weihua, Wang Pujun, et al. Classification and Model of Volcanic Facies in the Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1651 - 1671.
- [15] 张乾. 辽西兴城曹庄地区早白垩世火山岩地层的划分及对比[D].长春:吉林大学, 2016.
- Zhang Qian. Stratigraphic Division and Correlation of the Early Cretaceous Volcanic Rocks in Caozhuang Area of Xingcheng, Western Liaoning [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [16] 孙永山. 辽西热河生物群古生物地质遗迹的基本情况和保护现状[J].化石, 2009(3): 32 - 38.
- Sun Yongshan. The Basic Situation and Conservation Status of the Paleontological Geological Remains of the Jehu Biota in Western Liaoning Province [J]. Fossil, 2009 (3): 32 - 38.
- [17] 赵佳奇, 宋志伟, 田志远, 等. 辽西兴城娘娘顶地区花岗质片麻岩形成时代与变形样式[J].吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(3): 890 - 904.
- Zhao Jiaqi, Song Zhiwei, Tian Zhiyuan, et al. Formation Age and Deformation Characteristics of Granitic Gneiss in the Niangniangding Area, Xingcheng, Western Liaoning [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (3): 890 - 904.
- [18] 王睿, 李世超, 刘正宏, 等. 辽宁兴城尖山早白垩世火山机构及岩石地球化学特征[J].世界地质, 2016, 35(3): 676 - 686.
- Wang Rui, Li Shichao, Liu Zhenghong, et al. Early Cretaceous Volcanic Mechanism in Jianshan of Xingcheng Area, Liaoning and Its Lithochemical Characteristics [J]. Global Geology, 2016, 35 (3): 676 - 686.
- [19] 崔芳华. 辽西兴城地区中生代花岗岩岩石的成因与地壳演化[D].长春:吉林大学, 2015.
- Cui Fanghua. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Crustal Evolution in Xingcheng Area, Western Liaoning Province [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [20] Daoudene Y, Gapais D, Ledru P, et al. The Ereendavaa Range (North - Eastern Mongolia): An Additional Argument for Mesozoic Extension Throughout Eastern Asia [J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1381 - 1393.
- [21] 江淑娥, 张国仁, 鲁红峰, 等. 辽西地区中生代板内造山带挤压作用与收缩构造[J].吉林地质, 2009, 28(4): 26 - 31.
- Jiang Shu'e, Zhang Guoren, Lu Hongfeng, et al. Squeezing and Contraction Structure of Mesozoic Intraplate Orogenic Belt in Western Liaoning [J]. Geology of Jilin, 2009, 28(4): 26 - 31.

- [22] 江淑娥, 刘晓林, 张国仁, 等. 辽西中生代盆地特征及盆岭构造[J]. 地质与资源, 2009, 18(2): 81-86. Jiang Shu'e, Liu Xiaolin, Zhang Guoren, et al. Characters of the Mesozoic Basins and the Basin-Range Structures in Western Liaoning [J]. *Geology and Resources*, 2009, 18(2): 81-86.
- [23] 王根厚, 张长厚, 王果胜, 等. 辽西地区中生代构造格局及其形成演化[J]. 现代地质, 2001, 15(1): 1-7. Wang Genhou, Zhang Changhou, Wang Guosheng, et al. Tectonic Framework of Western Liaoning Province and Its Evolution During Mesozoic [J]. *Geoscience*, 2001, 15(1): 1-7.
- [24] 宋旸. 辽西北塔地区侏罗纪火山岩岩石学与地球化学特征[D]. 长春: 吉林大学, 2018. Song Yang. Petrology and Geochemical Characteristics of Jurassic Volcanic Rocks in Baita Area, Western Liaoning [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [25] 辽宁省地质矿产勘查开发局. 辽宁省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 1-247. Bureau of Geologic Exploration and Mineral Development of Liaoning Province. Lithostratigraphic of Liaoning Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 1-247.
- [26] 刘淼. 辽西建平马厂地区义县组火山岩岩石成因及构造背景[D]. 长春: 吉林大学, 2015. Liu Miao. The Petrogenesis and Tectonic Setting of Volcanic Lavas of the Yixian Formation, Machang Area, Jianping Country, Western Liaoning Province [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [27] 张立东, 郭胜哲, 张长捷, 等. 北票—义县地区义县组岩石地层特征[J]. 地质与资源, 2004, 13(2): 65-74. Zhang Lidong, Guo Shengzhe, Zhang Changjie, et al. The Lithostratigraphic Characteristics of Yixian Formation in Beipiao-Yixian Area, Liaoning Province [J]. *Geology and Resources*, 2004, 13(2): 65-74.
- [28] 许江. 辽西北票—义县地区义县组地层对比研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014. Xu Jiang. The Study of Stratigraphic Correlation of Yixian Formation in Beipiao and Yixian in Western Liaoning [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [29] 李文庆. 硼酸盐熔融制样法测定辉绿岩中10种常量元素的准确度[J]. 世界地质, 2019, 38(3): 843-851. Li Wenqing. Testing Accuracy of 10 Major Elements in Diabase by Borate Melting Sample Preparation Method [J]. *Global Geology*, 2019, 38(3): 843-851.
- [30] Middlemost E A K. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System [J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3/4): 215-224.
- [31] Florian B, Sam P, Benoît S, et al. Spatial Variation of Volcanic Rock Geochemistry in the Virunga Volcanic Province: Statistical Analysis of an Integrated Database [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2017, 134: 888-903.
- [32] 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 Huafeng, Wang Pujun, Bian Weihua, et al. Review of Volcanic Reservoir Geology [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1744-1773.
- [33] 唐华风, 戴岩林, 郭天婵, 等. 侵出式火山机构储层的分布模式: 以伊通火山群为例[J]. 石油学报, 2020, 41(7): 809-820. Tang Huafeng, Dai Yanlin, Guo Tianchan, et al. Distribution Pattern of Reservoirs in the Extrusive Volcanic Edifice: A Case Study of the Yitong Volcanoes [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(7): 809-820.
- [34] 代晓娟. 火山地层界面、单元特征及其对地震相地质解译的约束[D]. 长春: 吉林大学, 2021. Dai Xiaojuan. Boundaries and Units of Volcanostratigraphy and Their Constraints on the Description of Seismic Facies and Geological Interpretation of Volcanogenic Successions: A Case Study from Changling Depression of the Songliao Basin, NE China [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [35] 周翊, 郭玉洁, 罗宇航, 等. 渤中19-6气田变质岩储层热液型裂缝充填物及油气地质意义[J/OL]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2024. [2024-08-12]. doi: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.20240812.0857.002>. Zhou Yi, Guo Yujie, Luo Yuhang, et al. Metamorphic Buried Hill Reservoir of Bozhong 19-6 Condensate Field: The Characteristics of Hydrothermal Fracture Fillings and Their Geological Significance of Petroleum [J/OL]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2024. [2024-08-12]. doi: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.20240812.0857.002>.