徐春强,王晨杰,王蔚.渤中凹陷北部中生界火山岩储层发育特征及油气成藏条件.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1801-1814.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240252.

Xu Chunqiang, Wang Chenjie, Wang Wei. Development Characteristics and Oil and Gas Accumulation Conditions of Mesozoic Volcanic Reservoirs in the Northern Bozhong Depression. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1801-1814.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240252.

渤中凹陷北部中生界火山岩储层发育特征及油气成藏条件

徐春强,王晨杰,王 蔚

中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459

摘要:渤海湾盆地渤中凹陷中生界火山岩广泛分布,目前已在多个构造发现了火山岩油气藏,表明渤中凹陷具有巨大的勘探潜力。渤中凹陷北部火山岩岩性岩相复杂,受多期构造运动及流体改造影响,储层非均质性强,但成藏机理的相关研究目前仍较为薄弱。为了明确中生界火山岩成藏的主控因素,本次研究通过岩心及镜下薄片观察描述,依据物性以及主量元素资料分析了研究区火山岩的岩性特征,并结合地震资料对火山岩岩相进行分类,系统总结了研究区火山岩有效储层的形成机制及成藏特征。研究表明:研究区主要发育7种岩性、6种岩相,储集空间类型主要为孔隙+缝网型。中酸性火山岩是形成优质储层发育的基本条件,溢流相中酸性熔岩是形成优质火山岩储层的有利岩性岩相;构造成缝以及后期大气淡水和有机酸的溶蚀作用保障了优质储层的有效性,极大地提高了火山岩储层的孔隙度和渗透性。研究区的主力烃源岩与火山岩潜山直接对接,或通过断层及不整合面输导后有效地运移,在主成藏期发育多个背斜圈闭可聚集成藏;同时沙河街组和东营组三段厚层超压泥岩作为有效盖层,在全区平面上稳定分布。

关键词:渤中凹陷;中生界;火山岩;储层;储集空间;火山岩油气藏

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240252 **中图分类号**:P618.13 **文献标志码**:A

Development Characteristics and Oil and Gas Accumulation Conditions of Mesozoic Volcanic Reservoirs in the Northern Bozhong Depression

Xu Chunqiang, Wang Chenjie, Wang Wei

CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300459, *China*

Abstract: Mesozoic volcanic rocks are widely distributed in the Bozhong depression of Bohai Bay basin. At present, volcanic oil and gas reservoirs have been found in several formations, which have

收稿日期:2024-07-25

作者简介:徐春强(1984—),男,高级工程师,主要从事石油地质综合方面的研究,E-mail:xuchq2@cnooc.com.cn

基金项目:中海石油(中国)有限公司"七年行动计划"重大科技专项(CNOOC-KJ135ZDXM36TJ08TJ)

Supported by the Major Scientific and Technological Special Project of China National Offshore Oil Corporation (CNOOC) During Seven-Year Action Plan (CNOOC-KJ135ZDXM36TJ08TJ)

great exploration potential. However, the complexity of the volcanic lithology and lithofacies in the northern part of the Bozhong depression and the non-homogeneity of the reservoirs due to multiple tectonic movements and fluid modification make the study of the mechanism of reservoir formation relatively weak at present. In order to clarify the main controlling factors of Mesozoic volcanic reservoir formation, this study analyses the petrological characteristics of volcanic rocks by core observation, thin section description, physical properties and major element data, classifies the volcanic facies based on the seismic data, and systematically summarizes the formation mechanism of the effective volcanic reservoirs and hydrocarbon accumulation features. The study shows that: There are 7 types of volcanic rocks and 6 kinds of lithofacies, the dominating reservoir space is pore + fracture network type. The intermediate-acid volcanic rock is the basic condition for the formation of high-quality reservoir, and the effusive intermediate-acid lava is the favorable lithology and lithofacies for the formation of high-quality volcanic reservoirs. The tectonic fracture and the dissolution of meteoric fresh water and organic acids in the later period ensure the effectiveness of high-quality reservoirs and greatly improve the porosity and permeability of volcanic reservoirs. The main hydrocarbon source rocks in the study area are directly connected to the volcanic buried hills, or can be effectively transported through faults and unconformities, and can be aggregated into reservoirs by developing multiple anticline trap in the main period of reservoir formation, while the Third Member of the Shahejie Formation and Dongying Formation, with thick layers of super-pressured mudstones, act as an effective cover and are steadily laterally distributed on the whole area.

Key words: Bozhong sag; Mesozoic; volcanic rocks; reservoirs; reservoir space; volcanic oil and gas reservoirs

0 引言

近年来,随着勘探理念的转变及勘探程度的不断加深,火山岩油气藏逐渐引起人们的关注,成为全球油气勘探的重要领域[1-2]。国外的火山岩油气勘探最早可以追溯到20世纪20年代,我国则从20世纪50年代陆续在准噶尔盆地、松辽盆地、四川盆地、渤海湾盆地等发现了多个火山岩油气藏[3-7]。渤中凹陷位于渤海海域中部,是渤海油田最重要的富烃凹陷之一[1-3],一直是渤海油田勘探的重点区域。围绕渤中凹陷,我国先后在凸起区发现了一系列亿吨级大油田,其主要分布在新生界。近年来蓬莱9-1、渤中19-6、渤中26-6等多个潜山油气藏不断取得突破,使渤海油田潜山油气勘探进入一个新的阶段。中生界火山岩作为各类盆地充填序列的重要组成部分,在渤海海域广泛分布,且厚度较大,资源量丰富,随着勘探的深入,中生界火山岩也已经成为渤海油田的重要勘探领域[1,6,8]。

渤中凹陷北部中生界火山岩油气勘探始于20世纪70年代,勘探起步早,获得一定发现,但总体上由于储层变化快,导致成藏特征认识不清。目前已有部分学者针对火山岩储层特征进行了大量研究,主要集中在火山地层序列划分、储层特征表征以及控制因素等方面[9-11]。通过前人研究总结发现,不同地区火山岩储层的主控因素不同,例如:松辽盆地的优质储层主要受控于岩性岩相影响,其中近火山口的酸性气孔流纹岩是有利岩性岩相[12-15];准噶尔盆地火山岩优质储层主要受控于风化作用影响[16],在不整合面下300 m内的中酸性溢流相以及爆发相均发育好的储层[17]。渤海海域中生界火山岩具有岩性岩相复杂,并有受强风化、强伸展走滑、多期流体等多因素叠合改造的特性[12-13],现有的岩相-风化单因素主控火山岩成储模式难以有效指导渤海火山岩勘探。而针对渤海中生界火山岩,部分学者虽然已经开展了岩性岩相描述[18]、储层发育特征和控制因素相关研究[19-21],但对这种"复杂岩性岩相、强风化、强伸展走滑、强流体改造、强烃类充注"多元作用差异耦合控制下的大中型火山岩油气藏形成机理尚缺乏深入认识,这也给渤海中生界火山岩勘探带来了巨大挑战。

目前针对渤中凹陷北部火山岩的相关研究较少，由于北部火山岩岩性岩相变化复杂，同时经历了多期构造运动的改造，并受风化淋滤作用等多种流体溶蚀的影响，使得火山岩储层的控制因素多样，造成目前该区油气成藏机理及主控因素等问题仍未得到解决。本文基于岩心及薄片的岩性鉴定，结合测井及地震相识别图版的建立，并通过化验测试的分析，探究研究区中生界火山岩不同岩性岩相发育特征、优质储层形成条件，综合分析火山岩油气藏特征，以期为相似盆地的火山岩油气勘探提供借鉴。

1　区域地质概况

渤海湾盆地位于我国东部，总面积为 20×10^4 km^2，是一个发育于华北克拉通东部地块之上由走滑-拉分作用形成的中、新生代叠合盆地[22-25]。渤中凹陷北部位于渤海中部海域，南至石臼坨凸起东倾末端，北至辽西凸起南部斜坡带，东西向被秦南凹陷和渤南低凸起所夹持(图 1a、b)。中生代以来，渤中凹陷经历了一系列强烈的构造运动，形成了复杂的断裂系统，主要以正断层为主，在局部发育走滑断层[18]，这些断裂不仅控制了盆地的构造演化，而且也控制了基底油气藏的形成和分布。

截至目前，研究区共有 10 余口井揭示中生界火山岩地层，自下而上依次为义县组、九佛堂组、沙海组和阜新组(图 1c，图 2)。义县组火山岩最为发育，是本次研究主要的目的层位，该地层在不同区域厚度差异大。大量已钻井揭示，渤中凹陷北部义县组火山岩主要发育多种岩性(图 1c)，并且研究区岩性在横向及纵向变化快，预测难度大。前人[22]通过锆石 U-Pb 测年统计，研究区年龄范围为 152～108 Ma。

2　岩性岩相特征

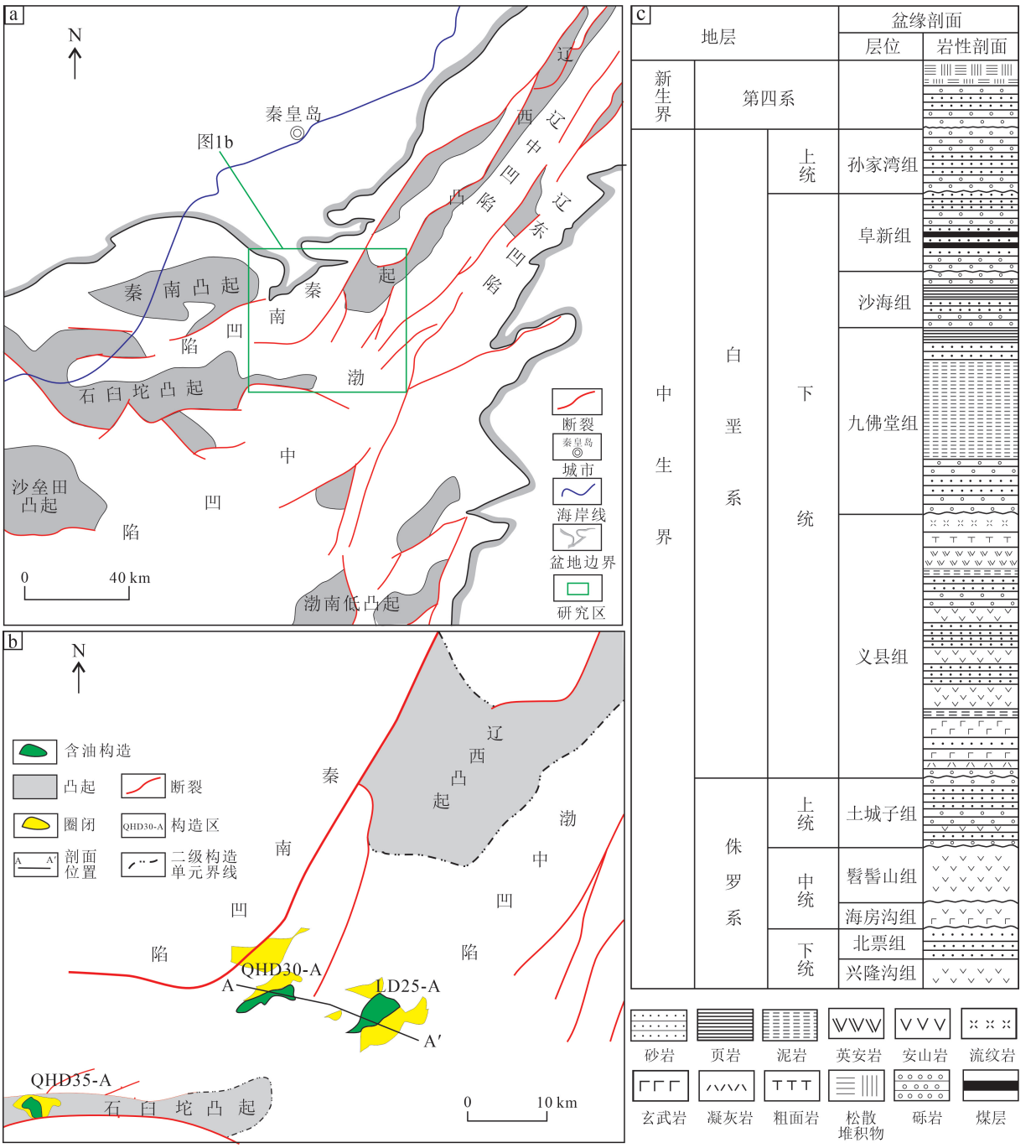
2.1　岩性特征

通过岩石薄片观察鉴定可知，研究区岩性较为复杂。基于壁心实测的 26 个样品主量元素在 TAS 图(图 3)投点得出，研究区主要发育有玄武岩、粗面岩、粗安岩、流纹岩等(表 1)。按照王璞珺等[26]划分标准分类，可将研究区火山岩划分为火山熔岩以及火山碎屑岩两大类。其中：火山熔岩包括玄武岩、粗面岩、粗安岩、安山岩及流纹岩；火山碎屑岩以隐爆角砾岩及凝灰岩发育为主。

研究区玄武岩颜色较深，呈深灰色，具有间粒、间隐结构，常见气孔杏仁构造及块状构造。斑晶(40%～50%)多为基性斜长石及辉石，基质由细板状斜长石搭成格架，格架间见粒状辉石(<10%)，暗色矿物蚀变严重，大多数气孔被充填(图 4a)。粗面岩整体呈浅灰色，多具有斑状结构、粗面结构，块状构造。斑晶见碱性长石(>35%)，基质中碱性长石微晶具有略定向排列的特征(图 4b)；其化学成分偏高硅、高碱系列。粗安岩为碱性系列中酸性火山熔岩，岩石多是一种几乎不含石英的斑状岩石，通常呈灰色，具有粗面结构及交织结构，块状构造。斑晶矿物主要为斜长石(25%～35%)，并含有碱性长石(>25%)；基质成分多为斜长石、碱性长石微晶，近平行排列(图 4c)。安山岩呈灰色，可观察到交织结构、斑状结构，发育气孔杏仁构造。斑晶主要为中性斜长石(30%～45%)及角闪石(5%～10%)；基质表现出长石微晶呈定向、半定向分布，发育不规则原生气孔，被后期方解石等充填，形成杏仁体(图 4d)。通过主量元素投点可观察到流纹岩在研究区占比较高。流纹岩是一种酸性火山熔岩，整体呈现浅灰色，镜下可观察到霏细结构、斑状结构及球粒结构，具有流纹构造。斑晶主要为石英(30%～40%)及酸性斜长石(20%～30%)，基质为长石及石英微晶组成的长英质集合体(图 4e)。隐爆角砾岩为火山碎屑岩，整体呈现褐灰色，发育隐爆角砾结构，可观察到角砾呈棱角状，并且角砾间具有可拼接性(图 4f、g、h)，角砾成分与原岩相同，可具体细分为粗面质隐爆角砾岩及流纹质隐爆角砾岩。研究区发育的凝灰岩多为晶屑凝灰岩，晶屑成分多为石英和长石，岩性较为致密(图 4i)。

通过统计研究区已钻井岩性的物性实测数据，可以明确看出不同岩性间的孔隙度与渗透率具有明显差异。研究区整体孔隙度分布在 0.6%～30.8%之间，平均孔隙度为 11.6%；渗透率主要分布在 $(0.001\ 3\sim5.86)\times10^{-3}\ \mu m^2$ 之间，平均渗透率为 $0.58\times10^{-3}\ \mu m^2$(图 5)。根据前人[23-24]对渤中凹陷储层划分的分类标准，可将储层划分为Ⅰ—Ⅲ种类型：Ⅰ类储层孔隙度分布在 12.5%～30.3%之间，渗透率为 $(0.098\sim5.860)\times10^{-3}\ \mu m^2$，为高孔-中低渗型储层；Ⅱ类储层孔隙度分布在 3.6%～12.5%之间，渗透率为 $(0.011\sim0.143)\times10^{-3}\ \mu m^2$，为中孔-低渗型储层；Ⅲ类储层孔隙度分布在 0.6%～3.6%之

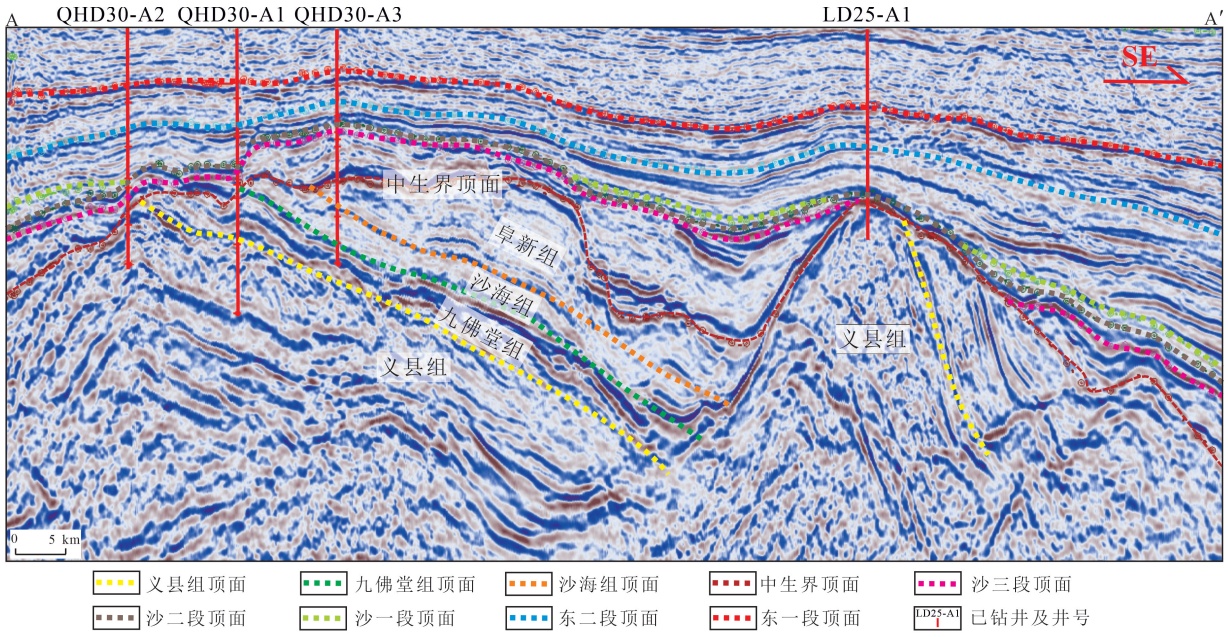
间,渗透率为(0.010～0.014)×10^{-3} μm^2,为低孔-低渗型储层。物性实验统计结果表明,不同岩性储层物性差异较大(图5)。其中:粗面质隐爆角砾岩和粗面岩物性投点主要落在Ⅰ类储层区域内,物性条件最好,整体表现为高孔-中低渗型储层;流纹岩和安山岩主要发育为Ⅱ类储层,整体表现为中孔-低渗型储层;凝灰岩的物性投点主要落在Ⅲ类储层区域内,物性条件最差。因此,以粗面质隐爆角砾岩为主的中酸性隐爆角砾岩和以粗面岩为主的中酸性熔岩是形成优质储层的有利岩性。



a. 渤中凹陷构造位置图;b. 渤中凹陷构造单元划分图;c. 渤中凹陷中生界地层综合柱状图。

图1 研究区区域构造位置图及地层柱状图

Fig.1 Structural location map and stratigraphic histogram in the study area



A—A′位置见图 1b。

图 2　渤中凹陷北部中生界结构剖面

Fig.2　Structural section of Mesozoic in northern Bozhong depression

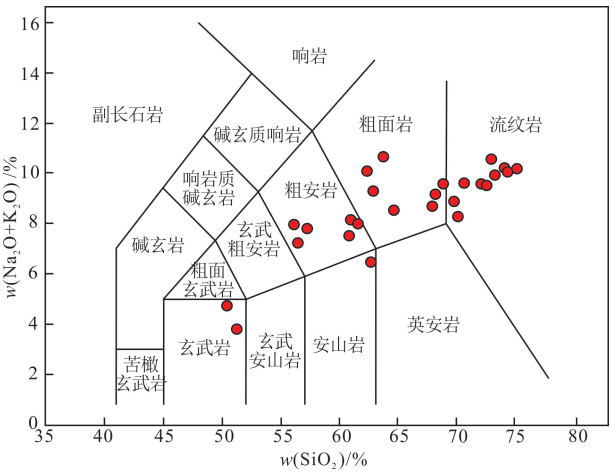


图 3　渤中凹陷北部中生界火山岩常量元素 TAS 图

Fig.3　TAS map of macronutrients of Mesozoic volcanic rocks in northern Bozhong depression

2.2　岩相特征

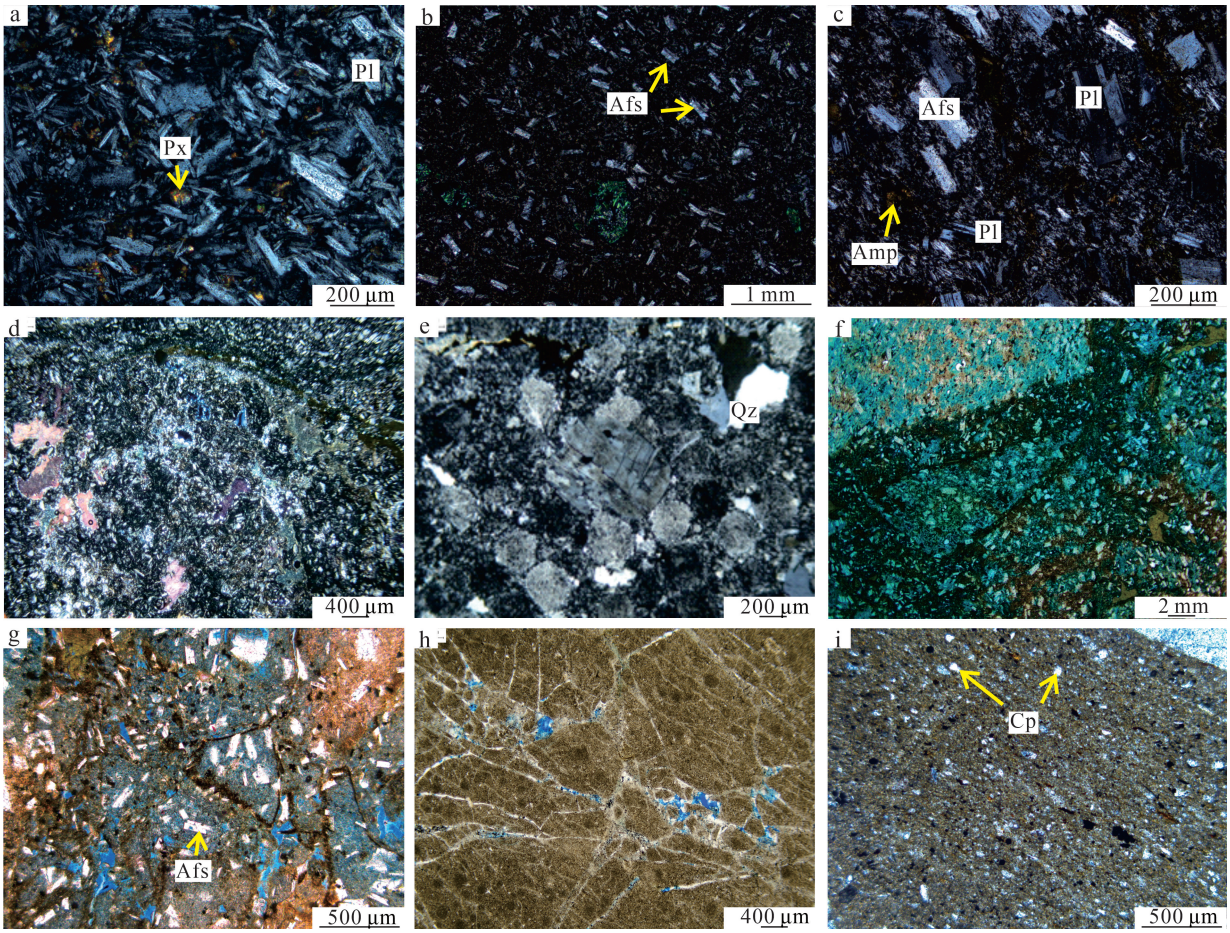
火山岩相是指火山岩形成的地质条件及其在该条件下所形成的所有地质特征总和[25-27]。火山岩相的识别对建立火山岩地质模式以及研究储层都有着重要的作用[28-29]。本次火山岩岩性研究采用井-震结合方式，在单井岩心揭示的岩性结合测井识别的基础上，根据地震形态结构及反射特征，将渤中凹陷中生界火山岩划分为火山通道相、侵出相、爆发相、中酸性溢流相、中基性溢流相、火山沉积相 6 种岩相(图 6)。

火山通道相指岩浆沿着断裂或刺穿上部地层从岩浆房运移到地表的过程中岩浆冷凝形成的[26]。本次研究识别出火山通道相主要为隐爆角砾岩亚相，发育隐爆角砾岩，地震剖面上可见典型的刺穿通道，通道内部呈杂乱反射。侵出相是岩浆受内力挤压流出地表时在近地表遇水淬火快速冷却固结在火山口附近形成穹窿状的火山岩体。本次研究识别出的侵出相主要为外带亚相，地震剖面上见高丘状结构，中弱振幅，内部呈杂乱弱反射特征。爆发相主要形成于火山作用的早期和后期，火山角砾岩在爆发相喷发期次中多见于下部，而凝灰岩在喷发期次中多见于上部。研究区 QHD30－A1 井揭示为爆发相下部，岩性主要为粗面质火山角砾岩，地震上见低丘状特征，内部中弱连续中强反射。溢流相主要由岩浆沿火山通道上涌后沿地表快速流动后冷凝固结形成，钻井已证实溢流相在中酸性、中基性火山岩中均有发育。其中：中酸性溢流相多为低丘或楔状反射结构，内部呈平行-亚平行较连续中强反射，研究区分布较广；中基性溢流相多为席状或板状反射结构，内部呈平行-亚平行弱连续—连续中弱反射。火山沉积相是一种过渡相[26]，主要形成于火山喷发间歇

表1 渤中凹陷火山岩岩性特征

Table 1 Petrological characteristics of volcanic rocks in Bozhong depression

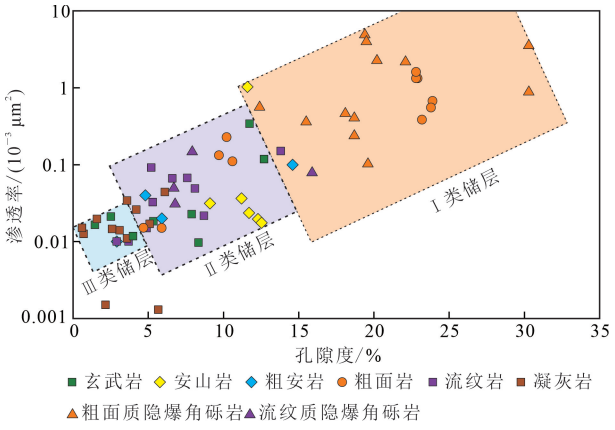
岩石类型			结构构造	矿物成分
火山熔岩	基性	玄武岩	斑状结构、间粒结构、间隐结构，发育气孔杏仁构造	含有较多的暗色矿物，如橄榄石、辉石，斜长石为基性斜长石，含有中性斜长石、角闪石、黑云母
	中酸性	粗面岩	斑状结构、粗面结构，块状构造	高硅、高碱系列，含大量碱性长石
		粗安岩	介于安山岩与粗面岩之间，斑状结构、交织结构、粗面结构，块状构造	中性斜长石、碱性长石、黑云母
	中性	安山岩	交织结构、斑状结构，发育气孔杏仁构造	中性斜长石、角闪石、黑云母
	酸性	流纹岩	霏细结构、球粒结构，流纹构造	石英、碱性长石、酸性斜长石，缺少暗色矿物
火山碎屑岩		隐爆角砾岩	具有隐爆角砾结构，角砾具有可拼接性，角砾成分与后期岩汁成分相同或相近，块状构造	与原岩成分相同，石英、碱性长石、中性斜长石、酸性斜长石
		凝灰岩	具有火山碎屑结构，碎屑以晶屑为主	晶屑成分取决于原岩



a. 玄武岩，QHD30－A1井，埋深3 707 m，普通薄片(＋)；b. 粗面岩，QHD30－A1井，埋深3 420 m，普通薄片(＋)；c. 粗安岩，QHD30－A3井，埋深3 375 m，普通薄片(＋)；d. 安山岩，LD25－A2井，埋深3 362 m，铸体薄片(＋)；e. 流纹岩，LD25－A1井，埋深3 442 m，普通薄片(＋)；f. 粗安质隐爆角砾岩，QHD30－A3井，埋深3 392 m，铸体薄片(－)；g. 粗安质火山角砾岩，QHD30－A3井，埋深3 391 m，铸体薄片(－)；h. 流纹质隐爆角砾岩，LD25－A1井，埋深3 426 m，铸体薄片(－)；i. 英安质晶屑凝灰岩，QHD30－A3井，埋深3 200 m，铸体薄片(－)。Pl. 斜长石；Px. 辉石；Afs. 碱性长石；Amp. 角闪石；Qz. 石英；Cp. 晶屑。

图4 渤中凹陷北部火山岩岩性特征

Fig.4 Lithology characteristics of volcanic rocks in the northern Bozhong depression



图中虚线框为储层类型分界[20-21]。

图 5　研究区不同岩性渗透率与孔隙度关系分布图

Fig. 5　Distribution of porosity versus permeability for different lithologies in the study area

期，通常在火山岩隆起之间的凹陷部位形成。火山沉积相的形成预示着沉积组分的增加，其岩性主要为含火山碎屑的沉积岩，地震上多为平行-亚平行反射结构，具有连续强反射特征。

通过统计不同火山岩相的储集物性可知，火山通道相隐爆角砾岩亚相、侵出相外带亚相、爆发相热碎屑流亚相和中酸性喷溢相上部亚相具有良好的储层物性条件(图 7)，均属于有利岩相。

3　储层特征

3.1　储集空间类型

火山岩储层是一种由多种孔隙类型组成的储层，研究区储层空间类型发育复杂。通过对研究区中生界火山岩岩心观察、铸体薄片镜下鉴定、扫描电镜分析等手段，结合火山岩成因及特征，将火山岩储集空间类型分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝 3 种类型。

3.1.1　原生孔隙

原生气孔是原生孔隙的主要类型，形成于火山岩固化成岩阶段。原生气孔是富含挥发分的岩浆喷发地表后，挥发分散逸后留下的孔洞，大部分为不连通的独立孔洞。气孔呈弧形边缘，大小及形态不一，形状不规则，集中发育在熔岩中上部，具有分带性。研究区原生气孔发育，由于是在岩浆流动时形成，因此气孔具有一定的定向性，原生气孔形成后被方解石等碳酸盐矿物部分充填，造成储层性能变差(图 8a、b)。

火山岩在形成原生气孔后，被后期热液中矿物充填形成杏仁体，由于充填不完全导致残留的孔隙空间为杏仁体内残余孔，同样属于原生孔隙，并且由于杏仁体和岩浆化学成分的差异造成冷凝速度有所不同，进而形成杏仁体收缩孔。研究区多数杏仁体充填矿物为方解石及铁白云石，两者均为杏仁体内孔。通常情况下，杏仁体内孔呈不规则形态，孤立存在(图 8c)。

3.1.2　次生孔隙

次生孔隙主要在火山岩成岩之后受到风化作用、有机酸溶蚀以及岩浆热液等流体改造所形成。次生孔隙是研究区主要的有效储集空间类型，主要包括斑晶溶孔、基质溶孔和脱玻化孔。

斑晶溶孔　火山岩中发育大量长石斑晶，在受到后期溶蚀改造后，解理发育的斑晶首先被溶蚀，形成不规则的局部斑晶溶蚀孔。先后随着溶蚀程度增大，斑晶内形成蜂窝状孔隙；最后将整个斑晶全部溶蚀形成铸膜孔，并保留原有的晶体假象，具有一定的连通性(图 8d)。

基质溶孔　是在火山岩晶体间的基质被流体溶蚀后所形成。由于基质中多数为长石及石英微晶，长石不稳定，容易被溶蚀形成基质溶蚀孔，呈现不规则状，且分布不均匀。同时基质颗粒间充填物同样易被溶蚀，形成筛状孔隙，具有一定的连通性(图 8e)。

脱玻化孔　是由于火山玻璃脱玻化作用转化为雏晶后体积发生缩小形成的微小孔隙。此类储集空间在研究区发育广泛，多发育于流纹岩、英安岩等中酸性岩中，孔隙边缘不易识别，连通性好，多为有效储集空间类型(图 8f)。

3.1.3　裂缝

裂缝在火山岩的储集空间中具有重要作用，不仅可以作为流体运移通道增大溶蚀作用进而增大孔隙度，还可以将孔隙连通增强储层的渗透率。研究区包括了隐爆缝、构造裂缝与溶蚀裂缝 3 种类型。隐爆缝是火山喷发而形成的裂缝，具有可拼接性(图 8g)，主要发育在火山通道相内的隐爆角砾岩中。构造裂缝是受构造作用形成的裂缝，研究区发育多期构造运动，形成大量构造裂缝，具有相互切割的特征，主要表现为后期形成裂缝切穿早期裂缝，同时早期裂缝可限制后期裂缝的形成(图 8h、i)。溶蚀缝主要为在现存裂缝的基础上对裂缝进行后期溶蚀改造，多将原有裂缝充填再溶蚀，或将原有裂缝溶蚀再扩大而形成；溶蚀缝多呈网状分布，裂缝较为平直，同时溶蚀缝具有边缘凸凹不规则形(图 8h、i)。

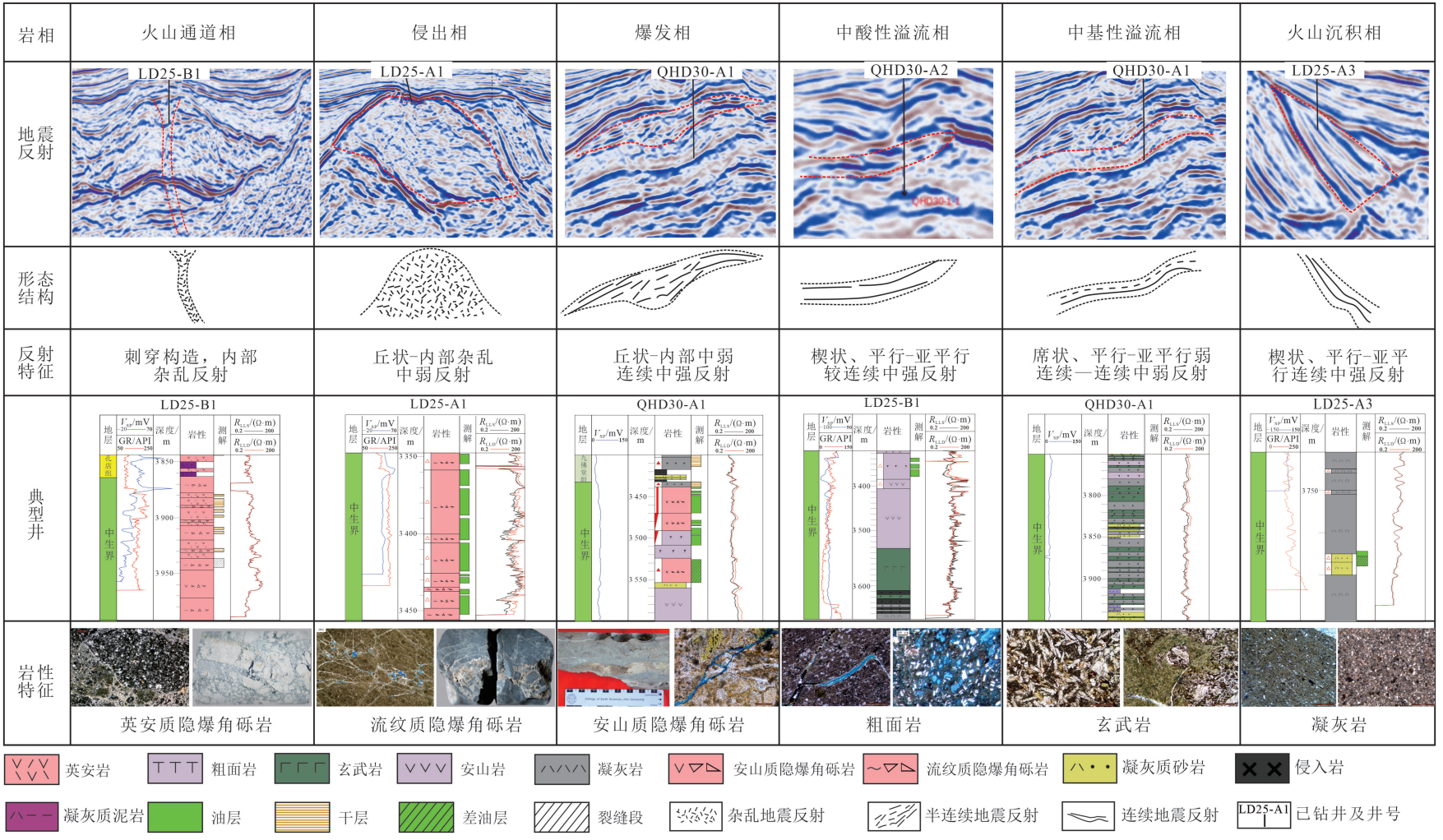


图 6　渤中凹陷北部火山岩岩相特征

Fig.6　Lithofacies characteristics of volcanic rocks in northern Bozhong depression

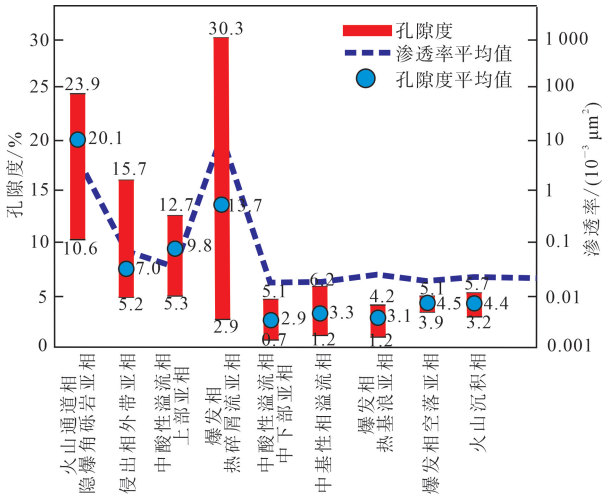


图 7　不同火山岩相孔隙度与渗透率关系分布图

Fig.7　Distribution of porosity and permeability for different volcanic facies

3.2　有效储层控制因素

3.2.1　原生孔隙控制因素

通过对研究区已钻井的岩心、薄片、扫描电镜观察以及面孔率统计得出，原生气孔在不同火山岩岩性中均有差异（图 9）。分析总结发现，在溢流相中原生孔隙以原生气孔、杏仁体内孔为主，并且在安山岩和粗面岩中原生气孔占比较多（图 8a、b）。原生气孔由岩浆喷溢后挥发分在成岩过程中膨胀溢出后冷凝固结形成，因此岩浆的温压条件以及挥发分的多少决定了原生气孔的占比[27]。由于压力作用，挥发分不断向上运移，原生气孔多形成于喷发期次和熔岩流动单元的上部；同时受埋深后多期溶蚀充填等作用影响，火山岩形成杏仁体内孔（图 8c）。在爆发相中，火山碎屑岩中有大量的火山碎屑，火山碎屑与火山碎屑之间的有效支撑作用有利于形成粒间孔，因此原生孔隙以粒间孔为主。但受埋深影响，经过压实作用会导致先存粒间孔被破坏。前人[26]研究表明松辽盆地火山碎屑岩在埋深超过 3 000 m 的条件下难以形成有效储层。在一定程度上，原生孔隙的形成与分布主要受控于火山岩岩性岩相类型，同时研究区经历了多期的构造运动及后期的流体改造，导致研究区原生孔隙基本不易被观察到，部分原生孔隙被改造形成了次生孔隙。

3.2.2　次生孔缝控制因素

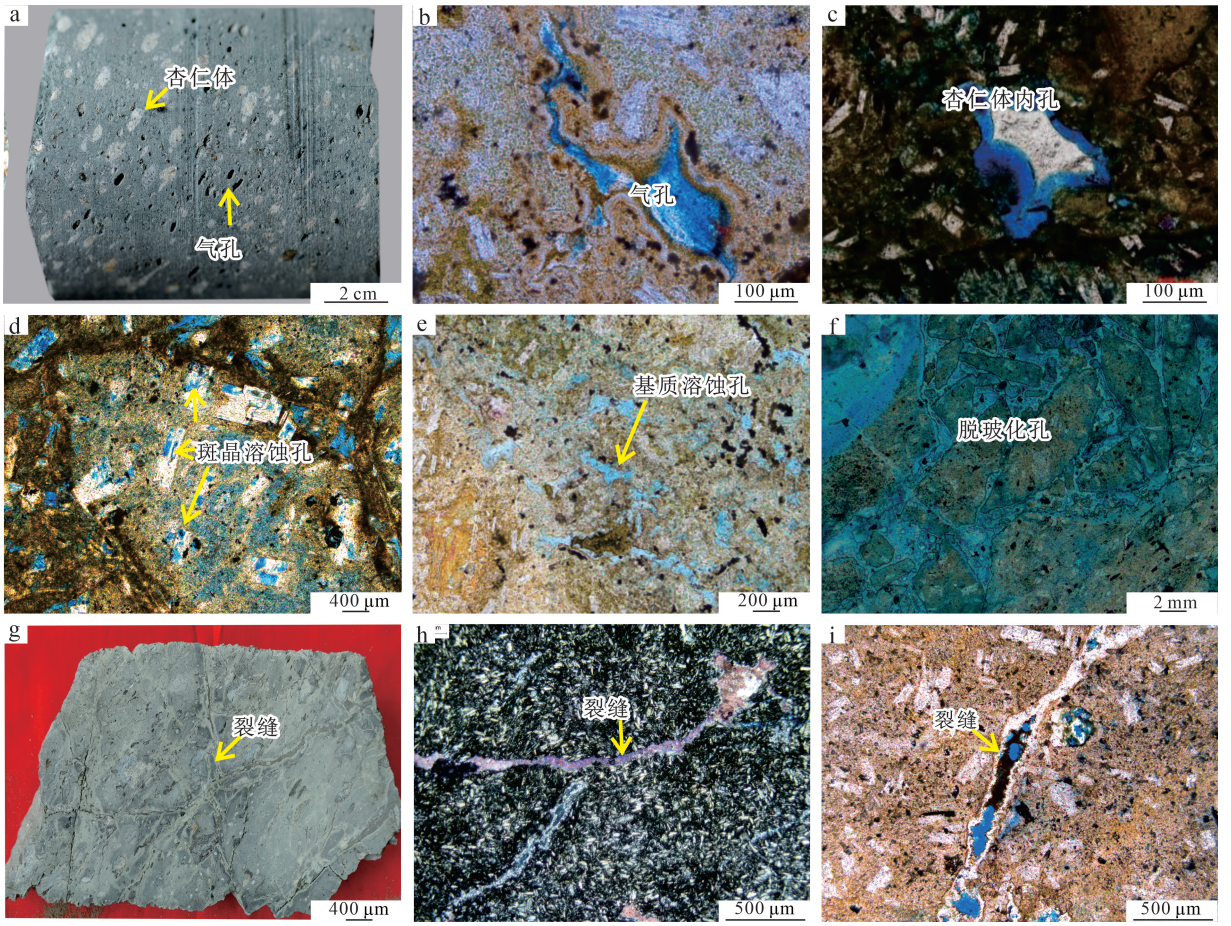
火山岩体形成后，受构造作用及溶蚀作用改造形成大量的构造裂缝和溶蚀孔隙。渤海湾盆地经历了多期构造运动，形成了较为复杂的断裂系统[18]。印支期及燕山早期构造活动形成的先存断裂为火山喷发提供了有利条件。燕山中期构造伸展控制了火山岩的大规模喷发，燕山晚期由于强烈的挤压活动造成火山岩发生破碎作用，形成大量 NE 向裂缝[21]，是中生界火山岩主要的造缝期。同时喜马拉雅期的 NE 向右行走滑作用对早期形成的裂缝起到了活化再改造作用[30]。在岩心、薄片下可见渤中凹陷火山岩中发育大量有效裂缝（图 8g、h、i），这些构造裂缝的形成不仅成为有效的储层空间，同时还能成为流体的运移通道，增强溶蚀能力，并将孤立的孔隙连起来，提高储层的孔隙度及渗透率。

此外，因为渤海湾盆地缺失上白垩统，且经历了 30～20 Ma 的沉积间断[31]，加之长时间的暴露地表，使得火山岩潜山经历了较强的风化淋滤作用，大气淡水沿着裂缝进入储层，将岩石中的斑晶、基质以及孔隙充填物被溶蚀，因此产生新的孔、缝（图 8）。特别是早期形成的原生气孔和裂缝，在地层流体作用下易被绿泥石、石英、方解石等次生矿物所充填，这些充填物受晚期溶蚀改造重新开启，形成大量溶蚀孔、缝，从而大大提高了火山岩储层的物性。裂缝周围的基质溶蚀十分发育（图 8i），说明裂缝作为流体的运移通道，高效地促进了溶蚀作用的发生。同时，侧向对接的沙河街组已成熟的烃源岩产生有机酸能侧向充注到裂缝中，早期裂缝内充填的不稳定矿物（如方解石、铁白云石等）会在有机酸的作用下发生再次溶蚀，进而增强裂缝的有效性。在相同应力及溶蚀条件下，隐爆角砾岩发育更多的隐爆缝，中酸性熔岩长英质占比高更容易形成裂缝，大量发育的裂缝均为流体溶蚀提供了有利通道，进而更容易形成优质的有效储层。因此，在发育原生孔隙的基础上，在构造及溶蚀等次生改造的因素影响下，隐爆角砾岩以及中酸性熔岩可形成孔隙＋缝网型的有效储集空间。

4　有利成藏条件

4.1　油气成藏模式

火山岩体与优质烃源岩、上覆盖层及断层等成藏要素可形成多种类型的匹配关系，进而形成不同类型的油气成藏模式[32]。研究区已揭示火山岩油气藏主要有“断-源接触，不整合面超压运移”和“源-储接触，超压充注”2 种运移成藏模式（图 10）。其中：研究区西部为沙河街组烃源岩与断层对接，油气沿不整合面（风化壳）运移形成的构造岩性油气



a. 安山岩,LD25－A2井,埋深3 398 m,气孔杏仁构造,原生气孔大部分被方解石充填为杏仁体,壁心;b. 粗面岩,QHD30－A1井,埋深3 465 m,原生气孔发育,铸体薄片(－);c. 粗安岩,QHD30－A1井,埋深3 415 m,气孔杏仁构造,铸体薄片(＋);d. 粗面质隐爆角砾岩,QHD30－A1井,埋深3 376 m,斑晶溶蚀孔发育,铸体薄片(－);e. 粗面岩,QHD30－A1井,埋深3 464 m,基质溶蚀孔发育,铸体薄片(－);f. 粗安质隐爆角砾岩,QHD30－A2井,埋深3 378 m,玻璃质岩汁溶蚀孔及脱玻化孔发育,铸体薄片(－);g. 安山质火山角砾岩,LD25－A2井,埋深3 356 m,多期裂缝相互切割,岩心;h. 安山岩,QHD30－A2井,埋深2 975 m,裂缝发育,石英、绿泥石充填裂缝,铸体薄片(＋);i. 粗安岩,LD25－B1井,埋深3 486 m,裂缝充填后再活化,铸体薄片(－)。

图8 渤中凹陷北部火山岩储集空间特征

Fig.8 Characteristics of volcanic reservoirs space type in northern Bozhong depression

藏;东部为沙河街组烃源岩与高部位侵出相接触形成的构造油气藏。根据优质烃源岩与油气藏的匹配方式、火山岩优质储层的分布特点、油气的运移方式和油气的保存条件等,建立了洼陷区供烃、源储对接超压充注＋断源接触超压输导、古构造背景及厚泥封盖形成的油气成藏模式。

从烃源岩条件及储盖组合特征来看,沙河街组及东营组三段发育厚层超压泥岩,其可作为优质烃源岩及直接盖层;超压发育为油气的充注提供了充注的动力,并且为油气的保存提供了有利条件。研究区东侧义县组火山岩储层与沙河街组优质烃源岩直接接触,构成一套自生自储的成藏组合;西侧义县组、沙河街组烃源岩与断层对接,油气沿义县组不整合面向火山岩体超压充注。从火山岩油气的分布来看,渤中凹陷主要受有效储层控制,纵向上分布在潜山顶面构造高部位,平面上临近生烃凹陷。

4.2 油气成藏条件

火山岩油气成藏受构造、烃源、储层及保存条件等各成藏要素及其时空配置的共同影响,并非受单一因素控制。

4.2.1 良好的古构造背景控制了油气的富集方向

在现今构造之前所形成的或继承性发展的古构造是古油气运移的主要方向。对研究区LD25－A1井包裹体测温结果(图11)表明:成藏时期地温在

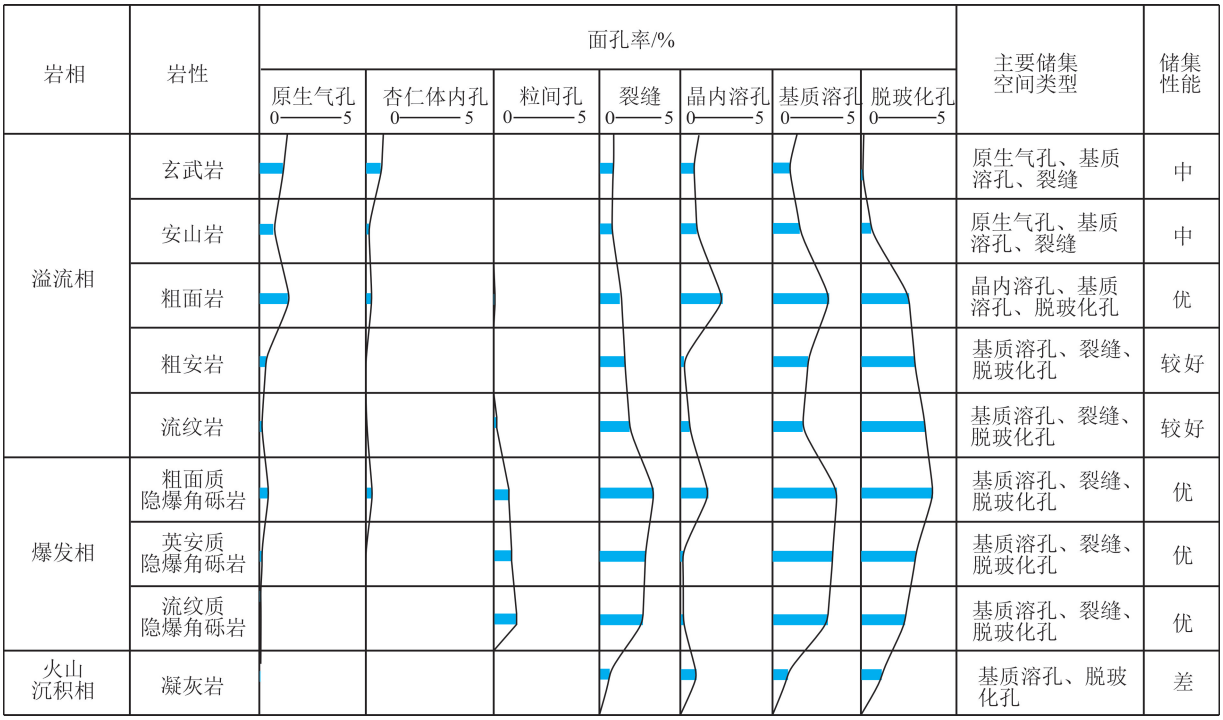


图 9　研究区不同储集空间类型分布特征

Fig.9　Distribution characteristics of different reservoir space types in the study area

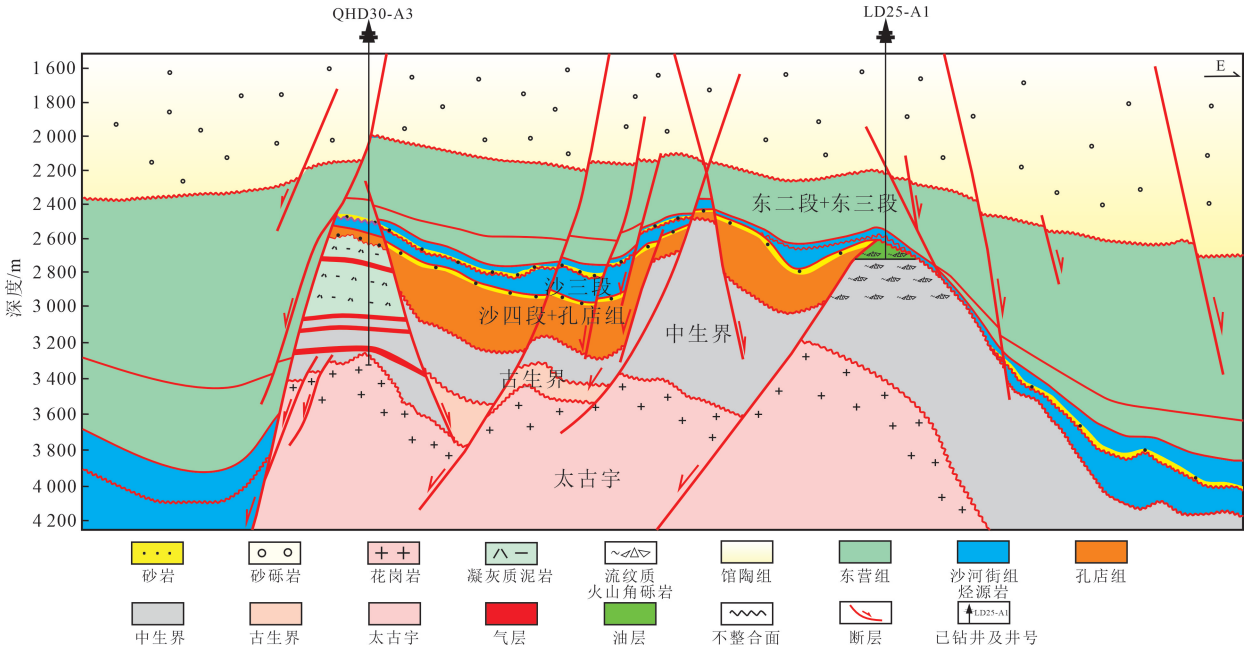


图 10　渤中凹陷北部油气成藏模式

Fig.10　Oil and gas formation pattern in the northern Bozhong depression

100～120 ℃之间，根据该地区地温梯度折算，成藏时期约在 4 Ma 以来开始大规模成藏，为晚期成藏，构造背景与现今的构造特征基本一致。因此，现今的构造面貌决定了油气主要的汇聚方向。渤中凹陷北部义县组火山岩在主成藏期发育多个背斜圈闭，生烃中心生成的油气在浮力作用下向高部位火山岩储集体运聚，可形成多个高丰度中生界油气藏。

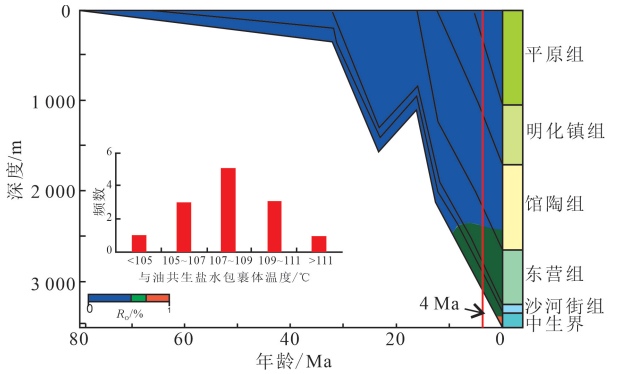


图11 渤中凹陷北部LD25-A1井埋藏史图

Fig.11 Burial history of LD25-A1 Well in the northern Bozhong depression

4.2.2 充足的油源是油气成藏的必要条件

根据渤海油田火山岩油气成藏特征,结合陆上油田实际勘探结果可知,火山岩油气藏大多紧邻生烃洼陷,与烃源岩直接接触或相邻,源-储配置十分有利于火山岩油气成藏。研究区火山岩油气藏主要分布在生烃洼陷内部或临近生烃洼陷的斜坡带,与烃源岩直接接触或通过断层侧向对接,或通过断层及不整合面输导聚集成藏。

4.2.3 优质储层发育情况决定了油气的富集程度

火山岩油气藏储层物性与测试产能具有正相关,在其他成藏因素相似的条件下,有效储层的发育程度直接决定了油气的富集程度。孔隙+缝网的配置关系直接影响了火山岩储层物性的好坏,是形成有效储层的关键。优势岩性岩相、强风化改造区、构造强挤压带最利于有效孔隙与网状裂缝的形成,是有效储层发育的有利位置。

4.2.4 稳定的厚层超压泥岩有利于油气的保存

断裂体系与上覆厚层泥岩盖层控制了油气主要富集层系。研究区义县组火山岩油气储层上覆发育两套盖层:一套是作为区域盖层的沙河街组和东营组三段厚层超压泥岩,其在平面上广泛分布,既是烃源岩,也是直接盖层;另一套是作为直接盖层的中生界阜新组、沙海组和九佛堂组厚层泥岩与致密砂岩互层,其分布较为稳定。研究区主要发育两种组合形式:一种是研究区东侧旅大25构造区晚期断裂不活动或活动较弱,沙河街组厚层超压泥岩直接封盖,控制了义县组富集层位;另一种是研究区西侧秦皇岛30构造区持续活动断裂,上覆厚层中生界阜新组、沙海组和九佛堂组厚层泥岩与致密砂岩互层盖层组合,形成了义县组火山岩油气富集。

5 结论

1)研究区主要发育7种火山岩性和6种火山岩相,储集空间类型主要为孔隙+缝网型。

2)中酸性火山岩是优质储层发育的基本条件,火山通道相隐爆角砾岩亚相、侵出相外带亚相和中酸性溢流相上部亚相的近源相带是优质储层分布的有利岩相,构造运动和溶蚀作用强改造可极大地提高火山岩储层的孔隙度和渗透性。

3)油源充足、强汇聚背景、优质储层发育和良好盖层条件,共同决定了油气可以成藏和富集程度好。

参考文献(References):

[1] 薛永安.精细勘探背景下渤海油田勘探新思路与新进展[J].中国海上油气,2017,29(2):1-8.
Xue Yongan. New Ideas and Progress in Bohai Oil Field Exploration Under the Background of Fine Exploration[J].China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(2): 1-8.

[2] 周心怀,王清斌,冯冲,等.渤海海域大型太古界潜山储层形成条件及地质意义[J].地球科学,2022,47(5):1534-1548.
Zhou Xinhuai, Wang Qingbin, Feng Chong, et al. Formation Conditions and Geological Significance of Large Archean Buried Hill Reservoirs in Bohai[J]. Earth Science, 2022, 47(5):1534-1548.

[3] 夏庆龙.渤海油田近10年地质认识创新与油气勘探发现[J].中国海上油气,2016,28(3):1-9.
Xia Qinglong. Innovation of Geological Theories and Exploration Discoveries in Bohai Oil Fields in the Last Decade[J]. China Offshore Oil and Gas, 2016, 28(3): 1-9.

[4] 唐华风,孔坦,刘祥,等.松辽盆地下白垩统沉火山碎屑岩优质储层特征和形成机理[J].石油学报,2016,37(5):631-643.
Tang Huafeng, Kong Tan, Liu Xiang, et al. Characteristics and Formation Mechanisms of High Quality Reservoir of Volcaniclastic Sedimentary Rocks of Early Cretaceous in Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016,37(5):631-643.

[5] 刘万洙,王璞珺,门广田,等.松辽盆地北部深层火山岩储层特征[J].石油与天然气地质,2003,24(1):28-31.
Liu Wanzhu, Wang Pujun, Men Guangtian, et al. Characteristics of Deep Volcanic Reservoirs in the Northern Songliao Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2003, 24(1):28-31.

[6] 邓运华.渤海大中型潜山油气田形成机理与勘探实践[J].石油学报,2015,36(3):253-261.
Deng Yunhua. Formation Mechanism and Exploration Practice of Large-Medium Buried-Hill Oil Fields in Bohai Sea[J]. Acta Petrolei Sinica,2015,36(3):253-261.

[7] 赵海玲,刘振文,李剑,等.火成岩油气储层的岩石学特征及研究方向[J].石油与天然气地质,2004,25(6):609-613.
Zhao Hailing, Liu Zhenwen, Li Jian, et al. Petrologic Characteristics of Igneous Rock Reservoirs and Their Research Orientation[J]. Oil and Gas Geology, 2004, 25(6):609-612.

[8] 傅锚.渤海湾盆地环渤中凹陷地区晚中生代埋藏火山的成因与分布及其构造过程[D].长春:吉林大学,2022.
Fu Mao. Origin,Distribution and Tectonic Processes of Late Mesozoic Buried Volcanoes in the Bozhong Sag and Surrounding Areas, Bohai Bay Basin [D]. Changchun:Jilin University,2022.

[9] 高有峰,吴艳辉,刘万洙,等.松辽盆地南部英台断陷营城组火山岩晶间微孔特征及储层效应[J].石油学报,2013,34(4):667-674.
Gao Youfeng, Wu Yanhui, Liu Wanzhu, et al. Intercrystalline Micropore Characteristics and Reservoir Effect of Yingcheng Formation Volcanic Rock in Yingtai Fault Depression, Southern Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(4):667-674.

[10] 王璞珺,赵然磊,蒙启安,等.白垩纪松辽盆地:从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境[J].地学前缘, 2015, 22(3):99-117.
Wang Pujun, Zhao Ranlei, Meng Qi'an, et al. The Cretaceous Songliao Basin:Dynamic Background from Volcanic Rift to Interior Sag Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015,22(3):99-117.

[11] 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.

[12] 张姣,辛朝坤,张军勇.火山喷发机构、期次及其控藏作用:以松辽盆地北部莺山凹陷营一段为例[J].石油与天然气地质,2018,39(2):291-299.
Zhang Jiao,Xin Chaokun,Zhang Junyong. A Study on Volcanic Eruption Edifices and Stages and Their Control over Hydro - Carbon Accumulation:A Case Study of the First Member of the Yingcheng Formation in Yingshan Sag,Northern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology,2018,39(2):291-299.

[13] 吴颜雄,王璞珺,吴艳辉,等.火山岩储层储集空间的构成:以松辽盆地为例[J].天然气工业,2011,31(4):28-33,124-125.
Wu Yanxiong, Wang Pujun, Wu Yanhui, et al. Components of Volcanic Reservoir Space: A Case Study from the Songliao Basin [J]. Natural Gas Industry, 2011,31(4):28-33,124-125.

[14] 高有峰,刘万洙,纪学雁,等.松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(6):1251-1258.
Gao Youfeng, Liu Wanzhu, Ji Xueyan, et al. Diagenesis Types and Features of Volcanic Rocks and Its Impact on Porosity and Permeability in Yingcheng Formation, Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2007, 37(6):1251-1258.

[15] 侯启军.松辽盆地南部火山岩储层主控因素[J].石油学报,2011,32(5):749-756.
Hou Qijun. Main Controlling Factors of Volcanic Reservoirs in the Southern Songliao Basin[J]. Acta Petrolei Sinica,2011,32(5):749-756.

[16] 杨凯凯.准噶尔盆地东部巴塔玛依内山组火山岩储层特征及其与岩性的关系[D].长春:吉林大学,2016.
Yang Kaikai. Diagenesis of Carboniferous Batamayineishan Formation Volcanic Reservoir in Eastern Junggar Basin [D]. Changchun: Jilin University, 2016.

[17] 李伟,何生,谭开俊,等.准噶尔盆地西北缘火山岩储层特征及成岩演化特征[J].天然气地球科学,2010,21(6):909-916.
Li Wei, He Sheng, Tan Kaijun, et al. Characteristics of Reservoir and Diagenetic Evolution of Volcanic Rocks in Northwestern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geosciences,2010,21(6):909-916.

[18] 李三忠,索艳慧,戴黎明,等.渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J].地学前缘,2010,17(4):64-89.
Li Sanzhong, Suo Yanhui, Dai Liming, et al. Development of the Bohai Bay Basin and Destruction of the North China Craton [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(4):64-89.

[19] Fu Mao, Shan Xuanlong, Zhang Xintao, et al. Geodynamic Evolution of Lithospheric Removal of the North China Craton:Constraints from Late Mesozoic Volcanic Rocks in the Bohai Bay Basin, East China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 236:

105330.

[20] 张新涛,张黎,刘晓健.渤海湾盆地渤中凹陷中生界火山岩优质储层发育规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023,53(1): 1-16.
Zhang Xintao, Zhang Li, Liu Xiaojian. Development Regularity of the Mesozoic Volcanic Reservoir in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 1-16.

[21] 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 & Gas Geology, 2023, 44(3):675-688.

[22] 漆家福,于福生,陆克政,等.渤海湾地区的中生代盆地构造概论[J].地学前缘,2003,10(增刊1):199-206.
Qi Jiafu, Yu Fusheng, Lu Kezheng, et al. Conspectus on Mesozoic Basins in Bohai Bay Province [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(Sup.1): 199-206.

[23] 衣健,李慧勇,单玄龙,等.渤海湾盆地渤中凹陷太古宇变质岩潜山储集层垂向结构单元划分与识别[J].石油勘探与开发,2022,49(6):1107-1118.
Yi Jian, Li Huiyong, Shan Xuanlong, et al. Division and Identification of Vertical Reservoir Units in Archaeozoic Metamorphic Buried Hill of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1107-1118.

[24] 杨海风,徐长贵,牛成民,等.渤海湾盆地黄河口凹陷BZ34-9油田新生界"断裂-岩浆"联合控藏作用[J].石油与天然气地质,2018,39(5):1056-1064.
Yang Haifeng, Xu Changgui, Niu Chengmin, et al. Joint Control of the Cenozoic Faults and Magma on Hydrocarbon Accumulation in BZ34-9 Oilfield in Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 1056-1064.

[25] 赵文智,邹才能,冯志强,等.松辽盆地深层火山岩气藏地质特征及评价技术[J].石油勘探与开发,2008,35(2):129-142.
Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Feng Zhiqiang, et al. Geological Features and Evaluation Techniques of Deep-Seated Volcanic Gas Reservoirs, Songliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 129-142.

[26] 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.

[27] 王璞珺,陈树民,刘万洙,等.松辽盆地火山岩相与火山岩储层的关系[J].石油与天然气地质,2003,24(1):18-23,27.
Wang Pujun, Chen Shumin, Liu Wanzhu, et al. Relationship Between Volcanic Facies and Volcanic Reservoirs in Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(1): 18-23, 27.

[28] 朱世发,贾业,马立驰,等.渤海湾盆地济阳坳陷中生界复杂岩性风化壳储层特征、质量控因与甜点模型[J].石油与天然气地质,2022,43(3):514-527.
Zhu Shifa, Jia Ye, Ma Lichi, et al. Characteristics, Quality-Controlling Factors and Sweet Spot Model of the Mesozoic Weathering Crust Reservoirs with Complex Lithologies in the Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 514-527.

[29] 庞彦明,毕晓明,邵锐,等.火山岩气藏早期开发特征及其控制因素[J].石油学报,2009,30(6):882-886.
Pang Yanming, Bi Xiaoming, Shao Rui, et al. Early-Stage Development Characteristics of Volcanic Gas Reservoirs and Its Controlling Factors [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 882-886.

[30] 王蔚.渤海海域太古宇变质岩潜山构造演化及其裂缝发育特征研究[D].长春:吉林大学,2023.
Wang Wei. Study on Tectonic Evolution and Fracture Development Characteristics of Archean Metamorphic Buried Hill in Bohai Sea Area[D]. Changchun: Jilin University, 2023.

[31] 岳庆友.渤中凹陷中生界火山岩成储机理及分布规律研究[D].长春:吉林大学,2021.
Yue Qingyou. Formation Mechanism and Distribution of the Mesozoic Volcanic Reservoir in Bozhong Sag [D]. Changchun: Jilin University, 2021.

[32] 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 & Gas Geology, 2012, 33(1): 19-29, 36.