

渤海超深层中生界火山岩储层发育特征及油气成藏主控因素 ——以渤中 A 构造为例

郭涛¹ 张江涛¹ 郝轶伟¹ 王晨杰¹ 王蔚¹ 滑彦岐¹

(1.中海石油(中国)有限公司天津分公司 天津 300452)

摘要:渤海湾盆地海域中生界火山岩广泛发育,但如何寻找规模型火山岩油气藏,一直以来是渤海深层潜山油气勘探的热点和难点。为了明确规模成藏的主控因素,本文以渤海海域新近获得重大勘探突破的渤中 A 构造中生界火山岩为研究靶区,利用钻测井资料、壁心及薄片观察、岩石地球化学等分析测试资料,结合三维地震,分析了中生界火山岩岩性岩相、火山机构类型、储集空间特征及油气成藏主控因素。研究表明,渤中 A 构造自下而上发育基性、中性和酸性三个火山岩旋回,其中晚期旋回由多个大中型酸性熔岩火山机构叠置构成,主要发育溢流相气孔流纹岩和块状流纹岩以及火山通道相的流纹质隐爆角砾岩等三大类岩性,具备发育优质火山岩储层的岩性岩相基础;火山岩原生孔隙占比较低,强构造活动和多类流体溶蚀等后期次生改造作用控制发育大量构造裂缝及溶蚀孔缝,储层垂向分为表层风化溶蚀带和内幕裂缝溶蚀带双层储层结构,整体为高孔渗的规模性优质缝溶体;高孔渗酸性火山岩缝溶体、古隆起背斜圈闭、紧邻渤中富烃洼陷、上覆厚层超压泥岩与晚期弱构造活动等有利要素是渤中 A 构造规模性油气成藏的关键条件。在以上研究的基础上,综合建立了研究区超深层规模型中生界火山岩油气成藏模式,可为渤海海域及其他相似地区火山岩油气勘探提供指导。

关键词:渤海海域;渤中 A 构造;火山岩;规模型储层;成藏主控因素

中图分类号: P618.13

收稿日期: 2025-05-19

Development characteristics and main controlling factors of oil and gas reservoirs in
ultra deep Mesozoic volcanic reservoirs in Bohai Sea

——Taking the Bozhong A structure as an example

Guo Tao¹ Zhang Jiangtao¹ Hao Yiwei¹ Wang Chenjie¹ Wang Wei¹ Hua Yanqi¹

项目资助:“十五五”国家科技重大专项子课题“海上复杂潜山油气成藏机理与勘探关键技术(编号:2025ZD1402803)”、国家自然科学基金重点支持项目“渤海海域中生界潜山火山岩相发育机制及成储机理(编号:U24B2017)”、中国海洋石油科研平台建设项目“海上深层油气勘探重点实验室(编号:KJPT-2022-002)”部分研究成果。

第一作者简介:郭涛,男,渤海石油研究院勘探地质高级工程师,从事海洋油气勘探管理和综合研究工作。
Email: guotao2@cnooc.com.cn

Abstract: Mesozoic volcanic rocks are widely developed in the Bohai Bay Basin. However, the exploration of large-scale volcanic hydrocarbon reservoirs has remained a persistent challenge in deep buried-hill plays in the Bohai area. . To investigate the primary controls on substantial hydrocarbon accumulation, this study focuses on the Bohai A Mesozoic volcanic rocks, which have recently achieved significant exploration breakthroughs in the Bohai Sea area, as the research target area. drilling and logging data, sidewall core and thin-section observations, petrochemical analyses combined with 3D seismic,we characterize the lithology-facies associations, volcanic edifice types, reservoir space characteristics, and key factors governing hydrocarbon accumulation.. Research has shown that the BZ-A structure develops three volcanic rock cycles from bzse to top: basic, intermediate, and acidic. The late stage acidic volcanic rock cycle is composed of multiple large and medium-sized acidic lava volcanic structures stacked together, and is a thick and stable distribution of rhyolite. It mainly develops three types of rock types:effusive facies including vesicular and massive rhyolites, and volcanic conduit facies represented by rhyolitic cryptoexplosive breccia, which have the lithological and lithological basis for developing high-quality volcanic rock reservoirs; Although primary porosity is limited, extensive secondary modification—driven by intense tectonic activity and multi-phase fluid dissolution—has developed abundant structural fractures and dissolution pores/fissures.. The reservoir is vertically divided into a surface weathering dissolution zone and an inner crack dissolution zone with a double-layer reservoir structure, and the overall structure is a large-scale high-quality fracture solution with high porosity and permeability; The favorable factors for oil and gas accumulation inBZ-A include high porosity and permeability acidic volcanic rock fracture solution bodies, ancient uplifted anticline traps, proximity to the Bozhong hydrocarbon rich depression, overlying thick layer overpressure mudstone, and late stage weak tectonic activity. Based on these findings, a comprehensive hydrocarbon accumulation model for ultra-deep, large-scale Mesozoic volcanic reservoirs is established, which offers valuable insights for volcanic hydrocarbon exploration in the Bohai Bay Basin and analogous settings worldwide.

Keywords: Bohai Sea area; Bozhong A structure; lava; Large scale reservoirs; Main controlling factors of reservoir formation

0 引言

随着油气勘探的不断深入，火山岩相关油气藏越来越受到大家的重视^[1-2]。自 20 世纪 50 年代我国在西部准葛尔盆地发现首个火山岩油气藏克拉美丽开始^[3]，在随后 60 余年相继在北部松辽盆地的徐深和长深^[4-5]、东部渤海湾盆地的欧利坨子和商 741 井区^[6]发现了一系列大中型火山岩油气藏，火山岩油气藏逐渐成为中国大陆上油气勘探增储上产的重要领域。当前深层/超深层基底潜山领域已占据渤海油田储量增长的主导地位，渤海海域基底潜山地层主要包括太古界变质岩地层、古生界海相—海陆交互相沉积岩地层和中生界火山-沉积地层。近年来渤海油田在太古界和古生界相继发现了多个大中型潜山油气藏，如 BZ19-6 千亿方级太古界潜山凝析气田、渤中 26-6 两亿方太古界潜山油田和渤中 22-1 古生界潜山气藏等^[7-8]。但作为渤海出露展布范围最广泛的中生界火山岩潜山却一直未获得实质性勘探突破。中生界火山岩喷发就位的复杂性、岩性岩相的多样性、储层的非均质性^[9-12]，致使油气成藏极其复杂且隐蔽性强。截止到 2022 年，渤海在中生界火山岩共部署钻探探井 70 余口，仅发现了秦皇岛 30-1、旅大 25-1 等中小型油气田，探明石油地质储量仅为 2295 万吨。伴随渤海超深层潜山勘探的不断推进，太古界和古生界可供勘探空间减少，突破中生界火山岩已成为实现渤海勘探储量接替的必由之路。

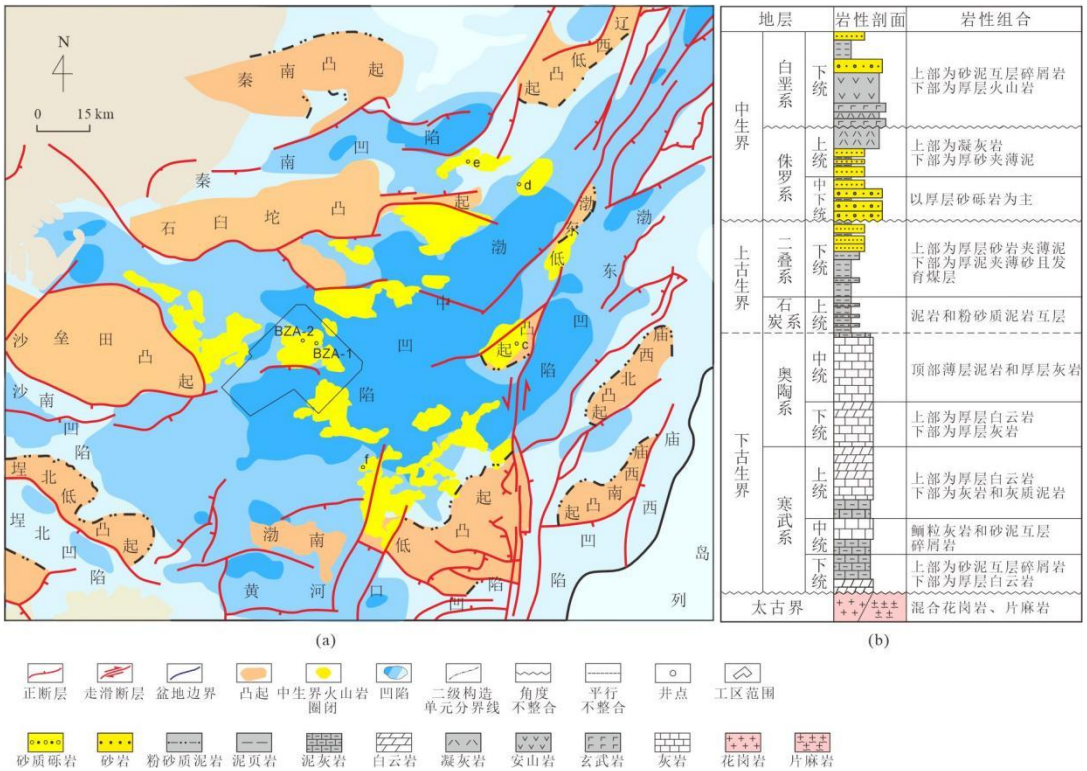
近年来，渤海油田围绕渤海最大富生烃凹陷渤中凹陷内火山岩规模大的构造带，新解释发现了多个大型中生界火山岩构造圈闭群，依据近源隆起、酸性熔岩和厚泥封盖的勘探部署原则，2023-2024 年优选渤中凹陷内渤中 A 构造作为渤海中生界火山岩勘探突破口，相继钻探了 BZA-1 井和 BZA-2 井两口领域性风险探井获重大突破，在 5000m 超深层成功探获 125m 和 393m 气层，两口井测试均获高产，其中 BZA-2 井火山岩储层净毛比达到 92.3%，日产天然气 $54.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，日产凝析油 855.12 m^3 ，创造了渤海海域潜山最高净毛比和中国海上深层油气探井最高测试产能两项纪录，展现了渤海深层、超深层中生界火山岩潜山巨大的勘探潜力。

渤中 A 构造的勘探突破为渤海海域中生界火山岩油气藏勘探开发发挥了重要示范作用，部分学者针对渤海海域火山岩开展了大量研究，主要集中在火山岩岩性与岩相描述、火山旋回划分、火山机构描述以及储层形成控制因素等方面^[13-15]，总结发现流纹岩长英质矿物含量高，易于发育裂缝形成好的储集空间^[16-17]，总结发现流纹岩是形成优质储层的重要角色。同

时渤海海域中生界火山岩具有岩性岩相复杂,具有受强风化、强伸展走滑、多期流体等多因素叠合改造的特性^[11-18]。通过对比近年来以中生界火山岩为主要目的层的探井,结果显示渤中 A 构造钻遇的火山岩岩性单一,为巨厚的流纹岩,是目前渤海少有的现象;同时该构造的火山岩壁心实测物性不及其他构造带,但钻探结果显示油气层厚度最大且储地比最高,目前对于渤中 A 构造的成藏独特性并没有给出合理解释,同时对于储层控制因素以及成藏机理缺乏深入认识,因此需要系统研究。本文以渤中 A 构造为例,综合钻井取芯、岩石薄片、地化数据、测井、三维地震等资料,对该构造中生界火山岩岩性岩相、火山机构、储层特征及油气成藏配置进行系统剖析,以期对渤海海域未来中生界火山岩的油气勘探提供一定的借鉴与指导,并推动渤海海域中生界火山岩油气藏勘探持续突破。

1 区域地质概况

渤海湾盆地位于我国大陆东部,属于华北克拉通上发育的一个典型中生代陆相断陷盆地,由海域和陆地两部分构成^[19-23]。盆地历经多期次、多应力性质的构造运动,导致断裂广泛发育。著名的北东向郯庐断裂带和北西向张蓬断裂带横穿并切割改造整个盆地,控制了海域内渤中凹陷、辽中凹陷等多个构造单元的发育演化。晚中生代燕山期强构造活动,西太平洋板块主动向华北板块俯冲挤压,诱发大规模软流圈地幔上涌致使岩石圈减薄垮塌,发生强拆沉作用,深部岩浆沿深大断裂喷涌而出,形成强烈的火山活动,导致火山岩广泛分布^[24-25]。渤中凹陷是渤海湾盆地新生代沉降沉积中心,是整个盆地内最大的富生烃凹陷。同时,渤中凹陷也是整个渤海海域岩石圈最薄的区带,是火山运动最为活跃的构造单元(图 1a)。近年来,围绕渤中凹陷各个构造带以中生界火山岩主要目的层钻探多口探井,揭示复杂多样火山岩岩性及含油气性,其中渤中 A 构造为大面积岩性均一的厚层流纹岩,且油气层厚度最大(表 1)。渤中 A 构造处于渤中凹陷西部洼中隆起带,整体构造形态表现为相对完整的背斜隆起,四面环洼(图 2),整体埋深在 5000m 以下,基于钻井和地震资料,潜山基底岩性自下而上依次发育太古界、古生界和中生界。基底潜山内幕高角度走滑断裂极为发育,主要识别出走向为 SN 向、NW 向和 NE 向的三组深大断裂。三组断裂燕山期强活动,到喜山期活动微弱,内幕清晰可见火山通道沿主干断裂向上刺穿喷发,控制了火山岩大规模喷发就位,具备充足的火山岩成储物质基础。



(a) 渤海湾盆地海域油区构造纲要和中生界火山岩圈闭分布图; (b) 渤中凹陷基底潜山地层综合柱状图

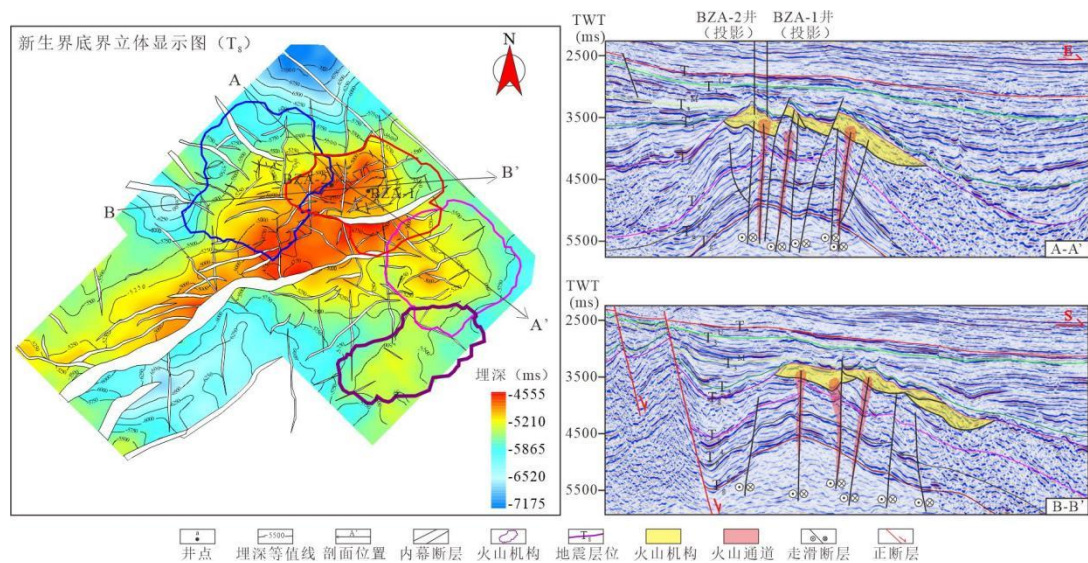
图 1 渤海湾盆地海域中生界构造纲要和潜山地层综合柱状图

Fig.1 Structural outline and comprehensive columnar diagram of buried hill strata in the Bohai Bay Basin

表 1 环渤中凹陷火山岩钻探概况

Table.1 Overview of Volcanic Rock Drilling in Bozhong Sag

构造带	井	岩性组合	物性	含油性
渤中凹陷西部	BZA-2 井	流纹岩 425m	平均孔隙度 9.2% 平均渗透率 0.3mD	气层 393m
渤中凹陷东斜坡	c 井	流纹岩 226m 粗安岩 151m 凝灰岩 91m 角砾岩: 52m	平均孔隙度 9.5% 平均渗透率 0.4mD	气层 66m 油层: 10m 水层: 51m
渤中凹陷北部	d 井	流纹岩 118m	平均孔隙度 10.9% 平均渗透率 10.2mD	油层 86m
渤中凹陷北部	e 井	粗安岩 161m 角砾岩 82m 凝灰岩 173m 玄武岩 110m	平均孔隙度 18.7% 平均渗透率 70.9mD	油层 52m
渤中凹陷南斜坡	f 井	流纹岩 403m 凝灰岩 6m	平均孔隙度 4.8% 平均渗透率 0.1mD	气层 39.8m 水层: 135.1m



(a) 渤中 A 构造火山岩顶面构造图

(b) 渤中 A 构造近十字垂直地震剖面

图 2 渤中 A 构造平面和剖面结构特征

Fig.2 Structural characteristics of the cross seismic profile of the Bozhong A

2 渤中 A 火山岩储层特征

2.1 储层岩石学特征

BZA-1 和 2 井钻探中生界火山岩厚度分别为 355m 和 426m, 两口井分别取壁心 33 颗和 26 颗, 可以覆盖反映全井段岩性信息 (图 3a 和图 3b)。从壁心上看, 两口已钻井均发育气孔流纹岩 (图 4a)、块状流纹岩 (图 4b)、流纹质隐爆角砾岩 (图 4c)、断层角砾岩 (图 4d)、流纹质凝灰岩 (图 4e) 和流纹质火山角砾岩 (图 4f) 等六种岩性, 以前四类岩性钻遇厚度最大。气孔流纹岩整体为灰白色, 壁心上可见原生气孔发育且规模较小 (图 a), 镜下见斑状结构 (图 4g) 及球粒结构 (图 4h), 球粒主要由从中心向四周呈放射状排列的长英质矿物组成, 同时镜下可见流动构造 (图 4i); 块状流纹岩整体为灰白色, 具有斑状结构, 斑晶主要为长石和少量石英 (图 4g、j), 占岩石总体积的 15-20%, 镜下见霏细结构 (图 4k) 和玻璃质结构 (图 4l) 等典型酸性火山岩显微结构, 成像测井显示为均质块状特征, 整体呈亮色; 流纹质隐爆角砾岩发育较多, 多期次火山运动过程中, 晚期岩浆喷发在火山通道附近原地炸裂早期围岩形成火山角砾, 而后火山岩岩浆裹挟火山角砾快速冷凝成岩, 以部分角砾可拼接成块为典型特征 (图 4c), 隐爆角砾岩石成分均为流纹岩, 角砾间岩浆亦为流纹质, 但因其冷凝速度过快, 结晶程度较流纹质角砾差, 玻璃质含量高; 断层角砾岩受后期断裂构造活动控制, 流纹岩发生破碎形成角砾, 受断层错位碾磨控制, 部分角砾存有磨圆, 整体角砾呈一定的定向展布 (图 4d), 其与隐爆角砾岩的主要区别为断层角砾岩角砾间填充物为方解石、石英、黄铁矿、沥青等后期沉淀胶结矿物和泥质, 而隐爆角砾岩基质为后期活

动运动带来的火山岩汁。另外该井还发育较薄的流纹质火山角砾岩（图 4f）和极薄的流纹质凝灰岩（图 4e）夹层。基于全井段多类岩性主量元素 TAS 图来看，两口井 SiO_2 百分含量为 69.08%~75.96%，平均为 71.97%， $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 百分含量为 4.79%~8.97%，平均为 7.03%，均落入流纹岩区域（图 5）。

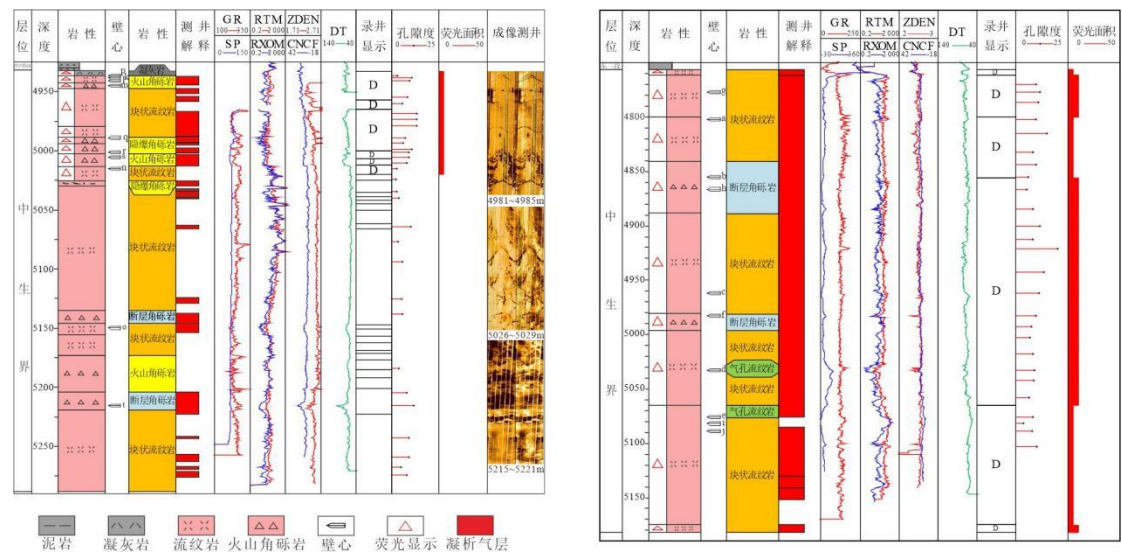


图3 渤中 A 构造 BZA-1 井和 BZA-2 井综合柱状图

Fig. 3 Bozhong Structure A Composite Columnar Section Map of Well a and Well b

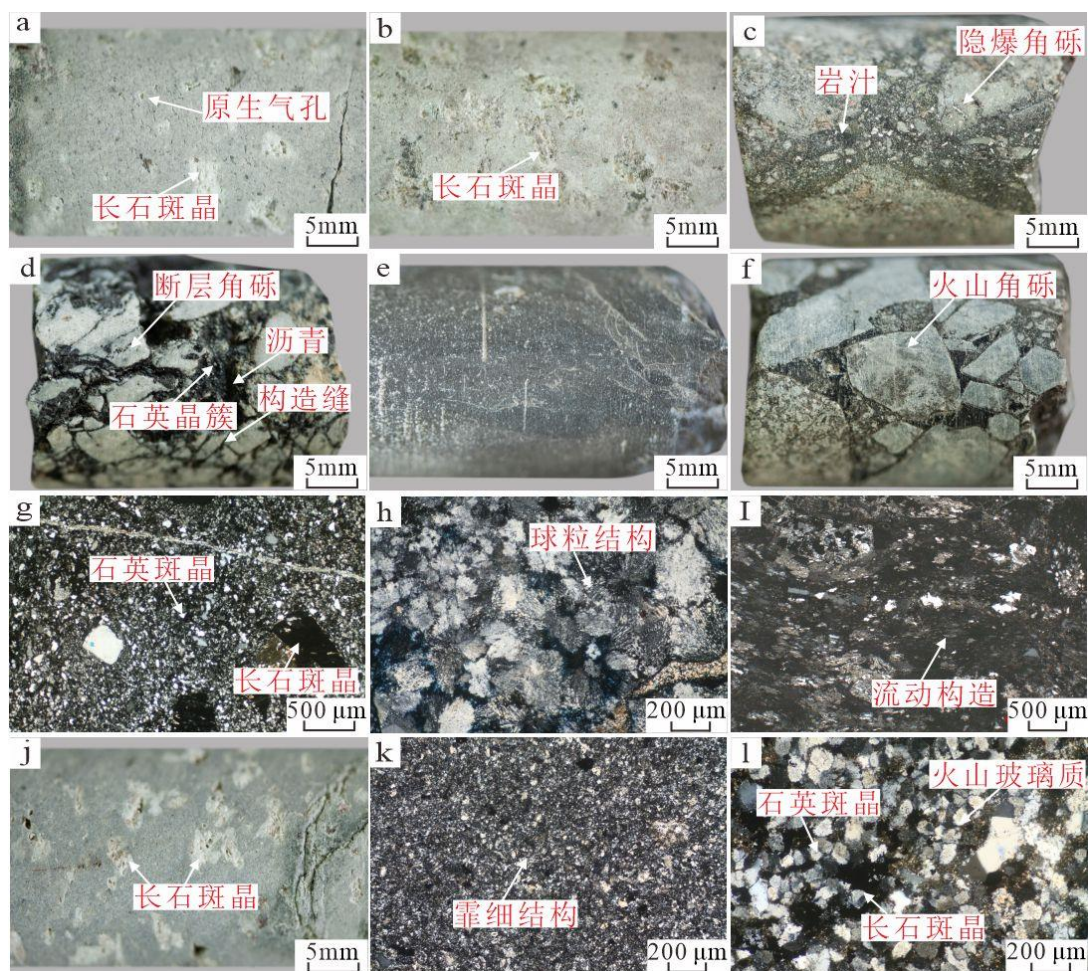


图4 渤中 A 构造火山岩岩性特征

Fig. 4 Lithological characteristics of volcanic rocks in Bozhong A structure

a.BZA-2 井, 5076.10 m, 气孔流纹岩, 壁心白光照片; b.BZA-2 井, 5088.50 m, 块状流纹岩, 壁心白光照片; c. BZA-1 井, 4982.90 m, 隐爆角砾岩, 壁心白光照片; d. BZA-1 井, 5215.7m, 断层角砾岩, 壁心白光照片; e.BZA-1 井, 4936.50 m, 流纹质凝灰岩, 壁心白光照片; f. BZA-1 井, 5005.7m, 火山角砾岩, 壁心白光照片;g.BZA-2 井, 4855.2m, 流纹岩, 薄片照片, 正交, 斑状结构; h.BZA-1 井, 4941.0m, 流纹岩, 薄片照片, 正交, 球粒结构; i. BZA-1 井, 4982.90 m, 流纹岩, 薄片照片, 正交, 流动结构; j.BZA-1 井, 5088.50 m, 流纹岩, 壁心白光照片; k. BZA-1 井, 4855.2m, 块状流纹岩, 薄片照片, 正交, 霏细结构; l. BZA-2 井, 4936.50 m, 流纹岩, 薄片照片, 正交, 斑状结构。

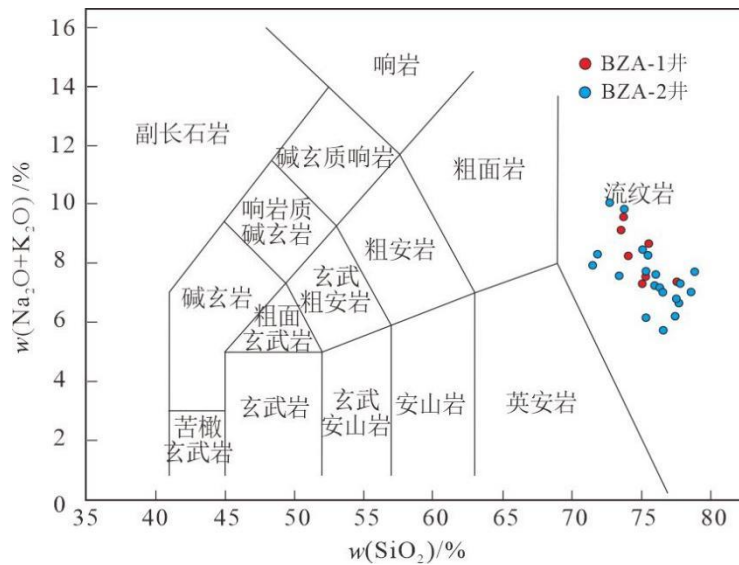
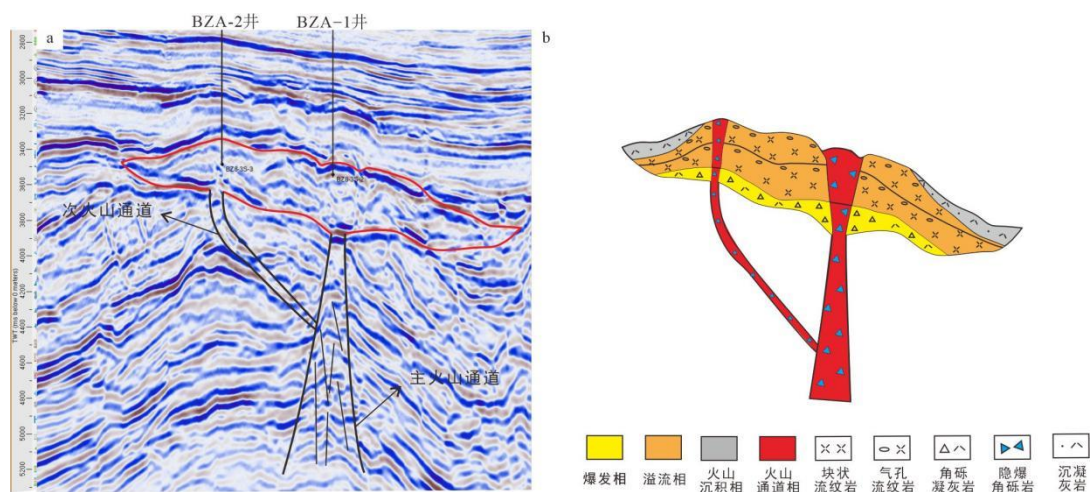


图 5 渤中 A 构造火山岩常量元素 TAS 图

Figure 5. TAS diagram of constant elements in volcanic rocks of Bozhong A

2.2 岩相特征

本文基于三维地震、钻测井等各类地质资料，依据王璞珺^[19]等建立的 5 相 15 亚相分类方案对研究区火山岩岩相进行划分。渤中 A 火山机构整体表现为多通道中心式普林尼型喷发就位特征，离主火山口越近，火山岩厚度越大，呈丘状，主火山通道因爆发强烈形成了塌陷的火山岩口（图 6a）。渤中 A 火山机构主要发育溢流相、火山通道相和爆发相三大类，其中溢流相是主体（图 6b）。火山通道相主要包括火山颈亚相和隐爆角砾岩亚相，处于整个火山机构中心位置，地震剖面表现为近直立、向上发散的刺穿状反射特征，因强烈向上喷发作用牵引围岩发生形变，通道内部同相轴中弱振幅，杂乱不连续，岩性以角砾熔岩为主。BZA-1 井处于主火山通道相，BZA-2 井处于次火山通道相，BZA-1 井隐爆角砾岩发育程度明显高于 BZA-2 井，发育多层隐爆角砾岩。溢流相主要包括下部亚相和上部亚相，围绕火山通道展布，构成火山机构主体，地震剖面上同相轴呈连续层状反射特征，岩性以厚层块状流纹岩为主。爆发相主要包括热基浪亚相和空落亚相，BZA-1 井顶部揭示 3m 流纹质凝灰岩，内部揭示 5m 堆砌状火山角砾熔岩（图 4f）。



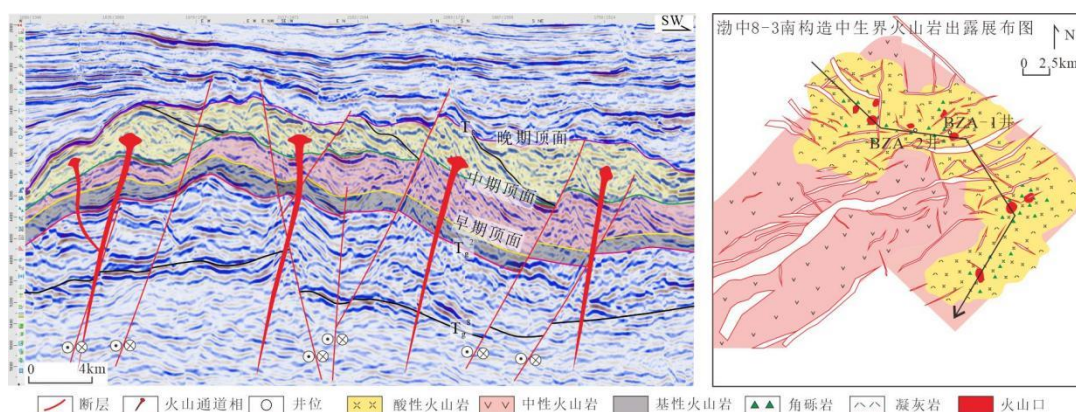
(a) 渤中 A 火山机构地震相特征; (b) 渤中 A 火山机构岩性岩相模式图

图 6 渤中 A 构造火山机构地震地质特征

Fig. 6 Seismic geological characteristics of the Bozhong A volcanic structure

2.3 火山机构类型

火山机构是火山岩建造的基本构成单元，其形态主要决定于深部岩浆性质和喷发机制，岩浆性质主要与其自身 SiO_2 含量、挥发分气体含量有关，喷发机制主要与喷发模式、基底断裂组合相关^[26-27]。基于钻井和地震资料分析，渤中 A 火山岩垂向发育基性、中性和酸性三个火山岩旋回，各旋回火山岩构造特征差异明显且之间存在明显喷发分隔界面（图 7）。基性火山岩旋回和中性火山岩旋回全区均有分布且厚度稳定，其中基性火山岩旋回火山机构呈层状，全区均有分布且厚度稳定，地震相为连续强反射特征，岩性以玄武岩为主，主要为地幔橄榄岩与再循环洋壳熔体反应形成兼具地壳和地幔成分的超镁铁质交代岩，最终交代岩发生部分熔融喷发形成洋岛型玄武岩^[28]。旋回二的中性岩主要形成于基性岩浆底侵导致下地壳部分熔融^[13]，中性火山岩旋回火山机构呈低丘状，地震相为杂乱弱反射特征，岩性以安山岩为主。研究区发育大规模的旋回三酸性火山岩，主要是由拆沉后的新生地壳部分熔融所形成^[29]，酸性火山岩旋回火山机构呈中等纵横比丘状，呈现多个丘状反射横向叠置构成，地震相内部多呈弱杂乱反射，岩性以酸性流纹岩为主。目前，渤中 A 在晚期酸性火山旋回中精细刻画解释出四个典型大中型酸性溢流相火山机构，自西北向东南依次叠置，揭示火山机构喷发期次由老到新，剖面上火山通道刺穿特征清晰，发育主通道和分支通道，为多期多通道型中心式喷发模式，主火山通道控制火山机构的发育展布，四个火山机构平面呈椭圆至似圆状，机构直径在 8-10 km。近火山口丘状特征更为明显，地震相呈强振幅-杂乱反射，为有利于发育储层的近源相带；远火山口则表现为似层状，厚度急剧减薄，地震相呈中等振幅-连续反射，为不利于发育储层的远源相带。



(a) 渤中 A 大型构造火山机构分布剖面图 (b) 渤中 A 大型构造火山机构分布平面图

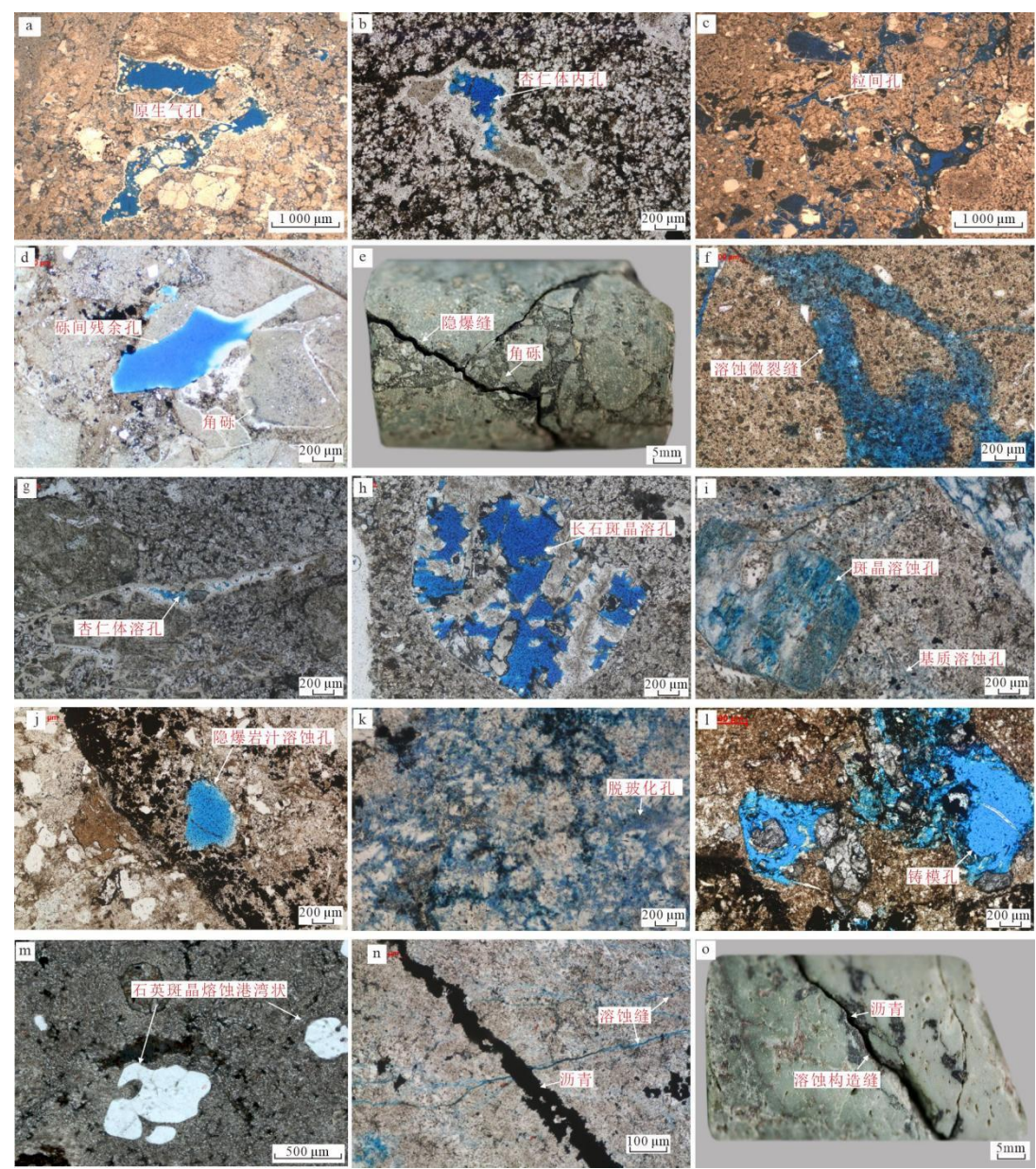
图 7 渤中 A 大型火山构造火山机构展布构成

Fig. 7 Volcanic edifices of Bozhong A represent a significant large-scale volcanic structure

2.4 火山岩储集空间及物性特征

通过 BZA-1 井和 BZA-2 井的壁心观察、成像测井和薄片鉴定，渤中 A 构造火山岩储层储集空间类型包括原生孔隙、次生孔隙和裂缝三大类。原生孔隙整体占比较低，主要为原生气孔（图 8a）、杏仁体内残留气孔（图 8b）和粒间孔（图 8c），气孔多呈压扁伸长形，孔壁不规则，多分布于溢流相气孔流纹岩中，发育少量砾间孔（图 8d）和隐爆缝（图 8e），主要分布在隐爆角砾岩中。原生孔隙间常呈孤立无序状，相互连通性差，后期成岩过程中经历构造运动和流体溶蚀改造，可形成溶蚀微裂缝（图 8f）、杏仁体溶孔（图 8g）等具备渗透能力的有效孔隙。次生孔隙类型较多，包括晶内溶孔（图 8h）、基质溶孔（图 8i）、隐爆角砾岩岩汁溶蚀孔（图 8j）和脱玻化孔（图 8k），整体以多类型溶蚀孔为主。上文提及渤中 A 构造流纹岩具斑状结构，斑晶尤为发育，晶内溶蚀孔主要为碱性长石和石英斑晶溶蚀，多个铸体薄片显微镜下见长石斑晶溶蚀形成的铸模孔（图 8l），石英斑晶见溶蚀港湾状和溶蚀反应边，斑晶溶孔提供的储集空间较多（图 8m）；基质内溶蚀孔主要为基质中的微晶长石被溶蚀，多为细小的筛孔状，具有一定的相互连通性（图 8i）；隐爆角砾岩中隐爆角砾间充填的岩汁由于冷凝快，玻璃质含量高，在后期流体作用下易溶蚀，溶蚀强烈的部位可形成直径较大的溶孔或开度较大的溶蚀缝（图 8j）；脱玻化孔主要表现为玻璃质脱玻化形成微晶之间的孔隙，多分布在球粒结构的内部和边部（图 8k），BZA-1 和 BZA-2 井该孔隙类型较为发育，隐爆角砾岩岩汁中脱玻化孔也较为发育。裂缝则主要为次生构造缝及溶蚀构造缝，受晚期强构造应力控制改造，发育大量构造裂缝和微裂缝，交错成网，大的断裂带内会发育断层角砾岩，立体网状断裂体系形成了流体的优势运移通道，极大拓展了流体溶蚀的空间维度，在断裂带附近形成了大量的溶蚀孔隙（图 8n）和溶蚀扩大裂缝（图 8o），而且使

得孤立的孔隙连通起来，极大增强了流体的储集和渗流能力，保障了两口井测试获得高产油气流。



a.原生气孔，BZA-1井，4941m气孔流纹岩铸体薄片照片，单偏光；b.残余气孔，BZA-2，4962m气孔流纹岩铸体薄片照片，单偏光；c.粒间孔，BZA-1井，4938.5m块状流纹岩铸体薄片照片，单偏光；d.角砾间残余孔，BZA-1井，5005.7m块状流纹岩铸体薄片照片，单偏光；e.隐爆缝，BZA-1井，5010.20m隐爆角砾岩壁心白光照片；f.溶蚀缝，BZA-1井，4936.5m块状流纹岩铸体薄片照片，单偏光；g.杏仁体溶孔，BZA-2井，4884.40m隐爆角砾岩铸体薄片照片，单偏光；h.长石溶孔，BZA-2井，4866.3m，隐爆角砾岩铸体薄片照片，单偏光；i.基质间的隐晶质溶蚀微孔，BZA-1井，4955.00m块状流纹岩铸体薄片照片，单偏光；j.隐爆岩汁溶蚀孔，BZA-1井，5001.1m隐爆角砾岩铸体薄片照片，单偏光；k.脱玻化孔，BZA-1井，4955m块状流纹岩铸体薄片照片，单偏光；l.铸模孔，BZA-2井，4815.20m断层角砾岩铸体薄片照片，单偏光；

m.石英斑晶溶蚀港湾状，BZA-2，5081.9m 块状流纹岩铸体薄片照片，单偏光；；n.溶蚀缝，BZA-1 井，4960.0m 块状流纹岩铸体薄片照片，单偏光；o.溶蚀构造缝，BZA-2 井，5103.0 块状流纹岩壁心白光照片。

图 8 渤中 A 构造火山岩储层储集空间类型及特征

Fig.8 Reservoir space types and characteristics of volcanic reservoir in Bozhong A structure

基于上述火山岩储集空间类型分析，并结合常规测井、成像测井、CIA 风化指数、孔隙度、黏土矿物含量等各类指示地质参数，将 BZA-1 井火山岩储层垂向划分为表层风化溶蚀带和内幕溶蚀裂缝带（图 9），两个储层带分界处各类地质参数曲线存在明显变化带。表层风化溶蚀带厚度 81m，表现为电阻低（平均值为 15.2 欧姆）、中子高、密度低（平均值为 2.45g/cm³）、声波高，风化指数高于 45，黏土矿物含量高，长石含量低，呈现明显的风化淋滤溶蚀主控特征，原生孔隙和次生裂缝受溶蚀改造强烈，声成像测井表现为聚集成团的暗色麻点状图案，储集空间以次生溶蚀孔隙为主，平均孔隙度为 9.5%，孔隙度最高可达 13.4%；内幕溶蚀裂缝带厚度为 275m，电阻率整体变高（平均值为 132.5 欧姆），中子变低、密度变大（平均值为 2.577g/cm³）、声波变小，风化指数整体小于 45，长石含量变高且稳定，电成像测井构造裂缝和破碎角砾特征相对清晰，储集空间主要为溶蚀构造缝，缝内广泛发育沥青（图 8o），储层平均孔隙度在 8.5%，孔隙度最高可达 12%。

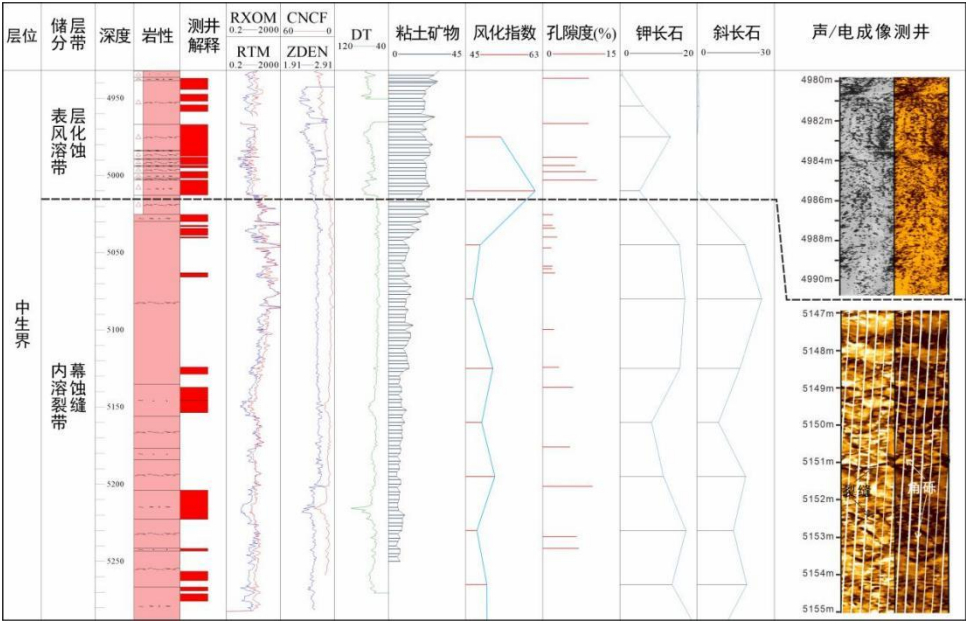


图 9 渤中 A 构造火山岩储层垂向分带模式图

Fig.9 Reservoir space types and characteristics of volcanic reservoir in Bozhong A structure

3 油气成藏主控因素

上述分析揭示渤中 A 构造发育岩性均一稳定的大面积厚层酸性流纹岩，受后期多因素强改造作用控制，储集空间以次生孔隙为主，物性好（均值为 9%）、净毛比高（35.5%~92.3%），整体具备了火山岩规模性油气成藏关键的优质储层基础。

在深入分析渤中 A 构造的储层主控因素、运移、烃源岩和保存等油气成藏关键要素的时空耦合条件，建立了大规模酸性火山岩缝溶体、深洼区供烃、古背斜控聚、源储侧向对接或不整合面输导、超压泥岩封盖的超深层天然气规模性成藏模式。

3.1 大规模酸性流纹岩提供了充足的优势岩性储层物质基础

岩性岩相从根本上决定了火山岩储层空间的发育程度和规模。前人研究及勘探实践表明，酸性火山岩、火山通道相和溢流相是发育优质储层的优势岩性岩相，具有较好的孔隙度和渗透率^[29-32]。NW 向和 SN 向深大共轭走滑断裂强活动，沟通深部岩浆喷发形成连片厚层酸性火山岩，四个大型火山岩机构叠合面积超 310 km²，均表现中心厚向周边发散减薄呈透镜状的厚度展布特征，其中火山机构中心位置最大厚度均超过 1000m，火山通道沿两组断裂呈串珠状展布，特别是两组断裂交叉点处通道规模最大且控制火山机构整体厚度展布，呈现典型中心式喷发特征（图 10）。因此，渤中 A 整体具备了发育大规模优质储层的优势岩性岩相物质基础。

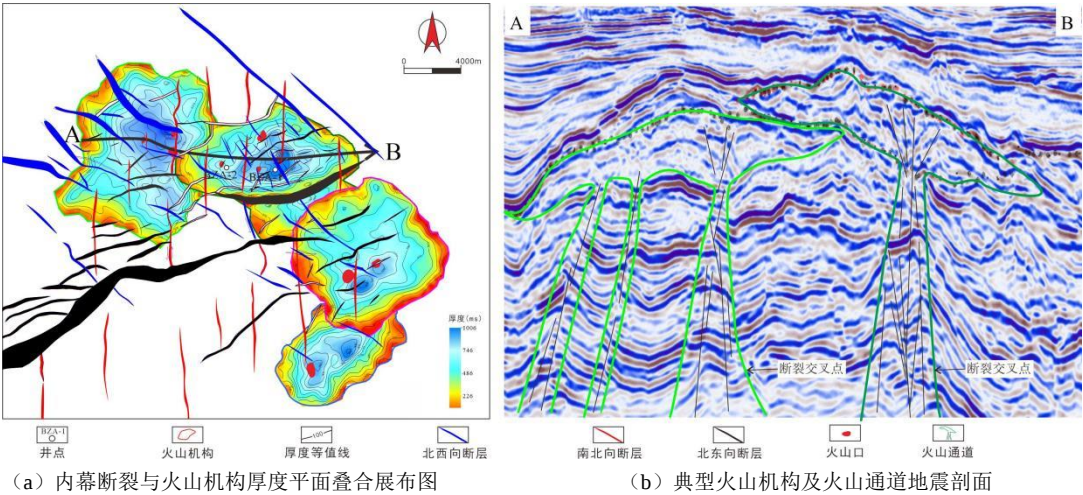


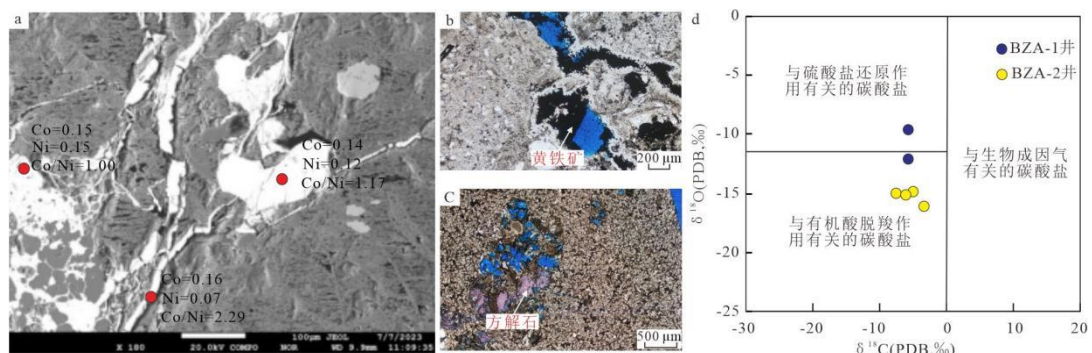
图 10 渤中 A 构造中生界内幕断裂控制火山机构发育展布特征

Fig.10 Reservoir space types and characteristics of volcanic reservoir in Bozhong A structure

3.2 构造活动和流体溶蚀强次生改造作用形成规模性高孔渗缝溶体

构造运动和流体溶蚀等次生改造作用能有效扩大孔隙度规模和提高渗流能力，断裂和裂缝既可沟通原生孔隙又可作为储集空间，同时为各类流体溶蚀提供了有利途径，对火山岩储层的质量起着至关重要的作用。（1）构造诱导次生改造作用。燕山末期 SN 向和 NW 向共轭断裂发生强走滑活动，潜山内幕高陡走滑断裂特征清晰、垂向切穿规模大且数量极为发育，单一走向走滑断裂分段叠接形成的宽广叠覆区构造应力集中，发育大量 EW 向派生次级断裂（图 9），BZA-1 和 BZA-2 井壁心均揭示构造缝且发育断层角砾岩，BZA-1 井全井段成像测井揭示次生构造裂缝极为发育，形成了火山岩体缝网体系。（2）双向三类酸性流体溶

蚀次生改造作用。①地幔富 CO₂ 酸性热液：BZA-1 和 BZA-2 井多颗壁心和薄片见大量硅质脉、石英晶簇和黄铁矿富集沉淀胶结，其中通过电子探针对黄铁矿成分进行分析（图 11a、b），其 Co/Ni 比值绝大部分大于 1 指示此为热液成因^[33]，表明研究区深部地下热液活跃。BZA-1 井测试过程中 CO₂ 含量为 6.91%，基于戴金星等^[34]建立的有机成因与无机成因的 CO₂ 鉴别图版，证实 CO₂ 为无机成因，深部富含 CO₂ 热液通过断裂缝网体系向上运移贯通整个火山岩体。研究表明 CO₂ 与长石矿物在 200℃ 下反应产生大量菱铁矿并形成溶蚀孔隙^[35]，BZA-1 井揭示中生界地层温度为 195℃ 且菱铁矿含量较高，且伴生大量溶蚀孔隙，证实了富 CO₂ 酸性热液的溶蚀作用；②大气淡水：渤中 A 火山岩上覆地层为沙河街组 and 东三段，风化暴露淋滤近 82 Ma。大气淡水渗流溶蚀，表层风化溶蚀带黏土矿物含量明显增加，长石含量明显降低；③烃类有机酸：研究区紧邻渤海最大富生烃洼陷，BZA-1 井壁心碳酸盐岩实测碳氧同位素明显偏负（图 11c、d），揭示研究区存在烃类有机酸热液。垂向贯通断裂以及横向联通的构造裂缝沟通顶部大气淡水、地幔富 CO₂ 热液和烃类有机酸体双向三类流体，表层和内幕均可溶蚀成孔，极大的拓展储层的孔隙度和连通性。BZA-1 井和 BZA-2 井在钻进火山岩 355m 和 426m 深处，仍可见较强的流体沿构造缝溶蚀特征（图 8o），BZA-1 井和 BZA-2 井井底壁心实测孔隙度最高分别可达 11.3% 和 9.9%，其中 BZA-2 井测试日产油当量 1398 方且井底发生严重井漏，证实整个渤中 A 火山岩体为高孔渗的规模性优质缝溶体（图 12）。



(a) BZA-1 井 4988.9m 电子探针，图中测量点均为黄铁矿；(b) BZA-1 井 5149.8m 镜下薄片，正交，充填黄铁矿；(c) BZA-2 井 4900.1m 镜下薄片，单片，充填方解石；(d) 火山岩中碳酸盐胶结物碳、氧同位素特征

图 11 渤中 A 构造多类型酸性流体证据

Fig.11 Evidence of multiple types of acidic fluids in the Bozhong A structure

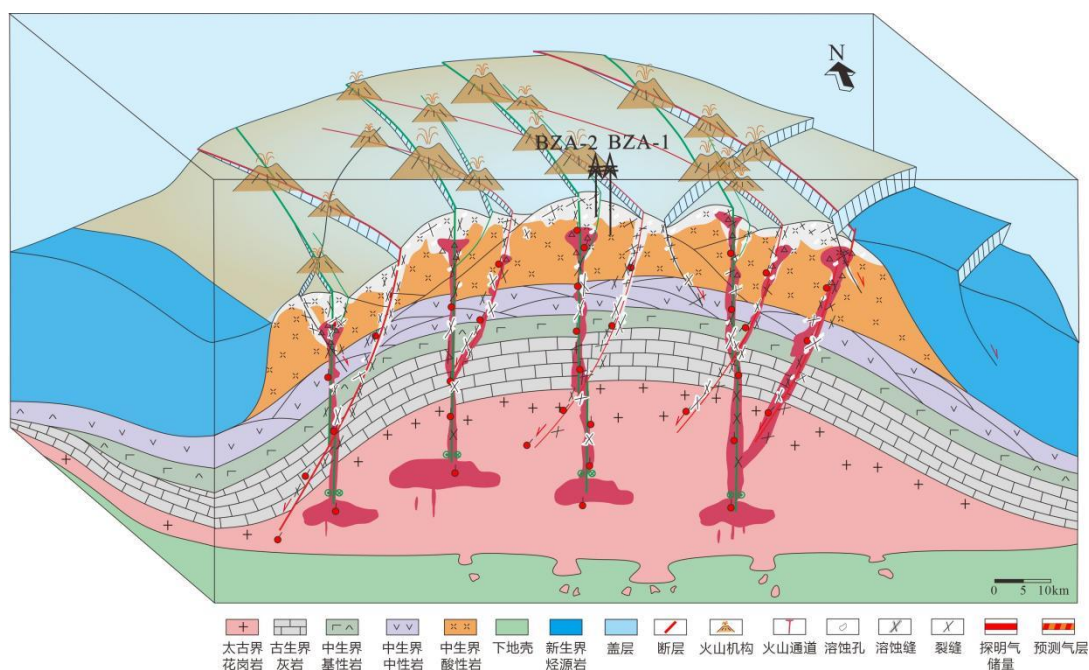


图 12 渤中 A 构造中生界火山岩高孔渗规模性缝溶体发育模式图

Fig.12 Reservoir space types and characteristics of volcanic reservoir in Bozhong A structure

3.3 四面环洼的古背斜控制油气汇聚的有利方向

渤中 A 整体经历火山喷发建造、断陷 I 幕、断陷 II 幕反转、断拗转换定型 4 期构造运动 (图 13)。

①火山喷发建造 (燕山中晚期): 研究区发生大规模火山运动, 岩浆沿深大断裂喷发形成厚度大、面积广义县组火山岩群。围区已钻井揭示白垩系下统 (九佛堂组、沙海组、阜新组), 但对 BZA-1 井、BZA-2 井及区域地层地震相特征分析表明, 渤中 A 持续处于构造高位置, 持续暴露地表遭受风化淋滤剥蚀, 整体缺失白垩系下统;

②断陷 I 幕 (孔店组—沙三段): 受控于板块间作用引发的强伸展断陷, 渤中 A 围区发生不均衡沉降, 表现为渤中 A 周边断陷成洼, 自身相对被动隆升为形态完整的背斜构造, 沙三段整体向高部位超覆沉积, 但局部高部位依然出露接受风化淋滤剥蚀;

③断陷 II 幕 (东营期): 在经历沙一二段短暂的构造稳定期后, 进入东营期渤中凹陷西北带整体发生强烈的断陷沉降, 渤中 A 保持背斜形态接受上覆巨厚东营组沉积, 洼中隆已现雏形;

④断拗转换定型: 新近纪以来整体由断陷期进入到拗陷期, 发生强烈热沉降拗陷运动, 区域性接受厚层新近系和第四系披覆沉积, 渤中 A 洼中隆起的油气汇聚有利背景定型。渤中 A 构造存在两种油气高效运移汇聚模式:

①源储侧向对接运移模式。构造西北带低部位火山岩与渤中西次洼沙河街组优质超压烃源岩直接侧向对接, 油气可沿对接面直接向中生界火山岩高部位储层运移和聚集;

②不整合面间接汇聚运移模式。构造东南带火山岩未与渤中主洼优质烃源岩直接对接, 中生界顶部为区域大不整合面, 受风化淋滤及构造活动改造, 具备良好的联通运移能力, 渤中主洼生成的大量油气沿不整合面高效输导层汇聚运移至构造高部位成藏 (图 15)。

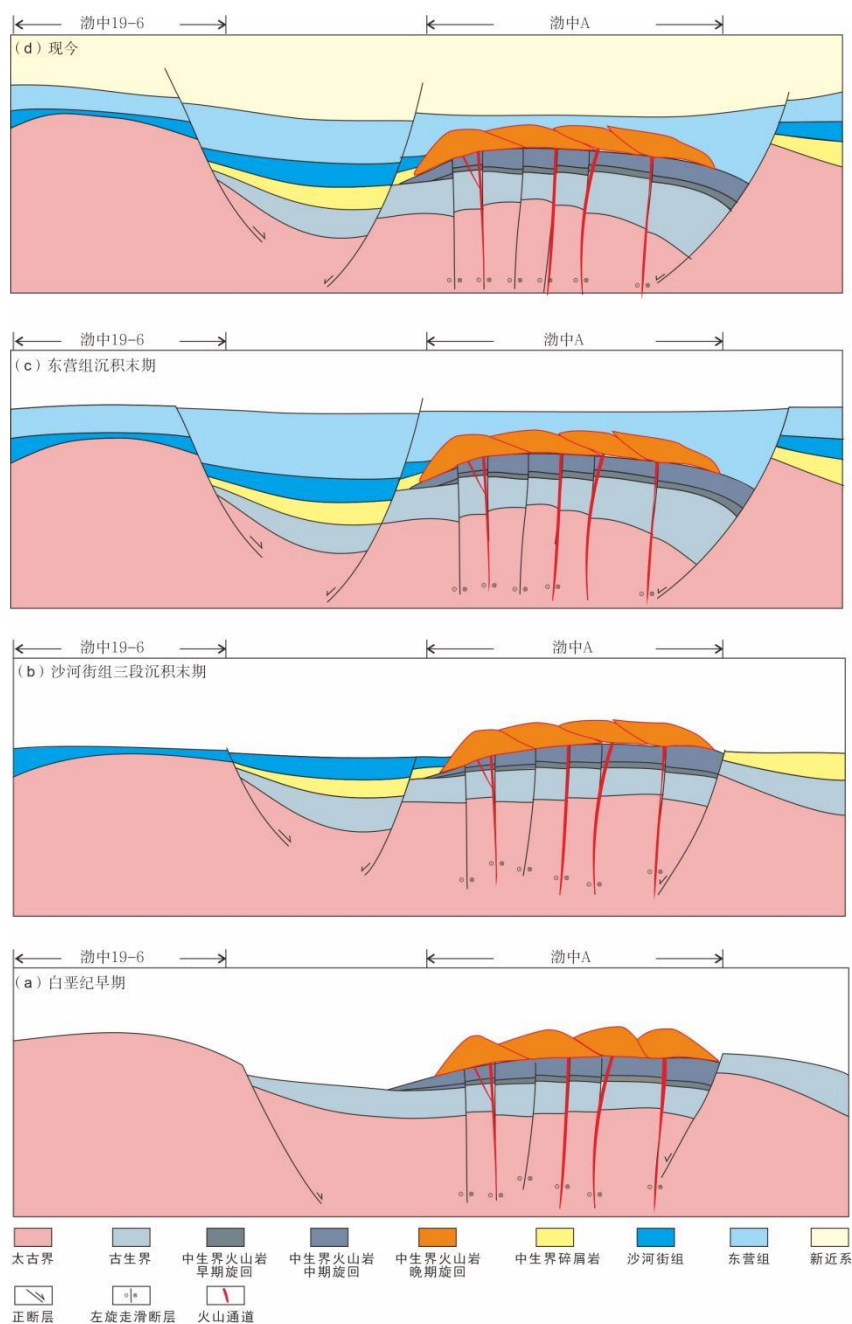


图 13 渤中 A 中生界火山岩建造构造演化过程（剖面位置见图 1）

Fig. 13 Tectonic evolution process of volcanic rocks in Bozhong A

3.4 超压富烃洼陷提供了充足油气成藏物质和充注动力

渤中 A 四面环洼，勘探实践表明各个洼陷均沉积厚层烃源岩且已达到生排烃门限，具备充足的油气源条件。渤中 A 两口井揭示油气源主要来自紧邻的沙三段和东三段。东三段区域上均接受沉积，其中主洼厚度 400-700m，洼陷中心地层压力系数超过 1.7。洼陷内烃源岩镜质体反射率均超过 0.7%，中心区域大面积超过 1.3%，处于成熟到高成熟演化阶段。东三段烃源岩 TOC 均值为 1.41%，S1+S2 均值为 5.9g/mg。沙三段在渤中 A 南部存在大规模缺失，渤中主洼和西洼沉积厚度均为 500-600m，洼陷内烃源岩镜质体反射率均超过 0.8%，中

心区域大面积超过 2.4%，整体处于高成熟演化阶段，TOC 均值为 2.5%，S1+S2 平均为 8.79g/mg，洼陷中心地层压力系数超过 2.0（图 14）。烃源岩的封闭体系黄金管热模拟实验和实际演化剖面结果表明渤中 A 构造围区东三段和沙三段烃源岩其既可在中、低成熟阶段大量生油，亦可在高、过成熟阶段大量生气，其中烃源岩进入大量生气阶段的埋深门限在 4100m 以上开始进入大量生气阶段，围区洼陷现今埋深均已超过 4100m，据计算渤中 A 构造天然气汇聚资源量约为 2300 亿方。渤 A 构造紧邻东三段和沙三段沉积厚度中心和高成熟演化中心，超压富烃洼陷为渤中 A 大规模成藏提供了充足油气成藏物质和充注动力。

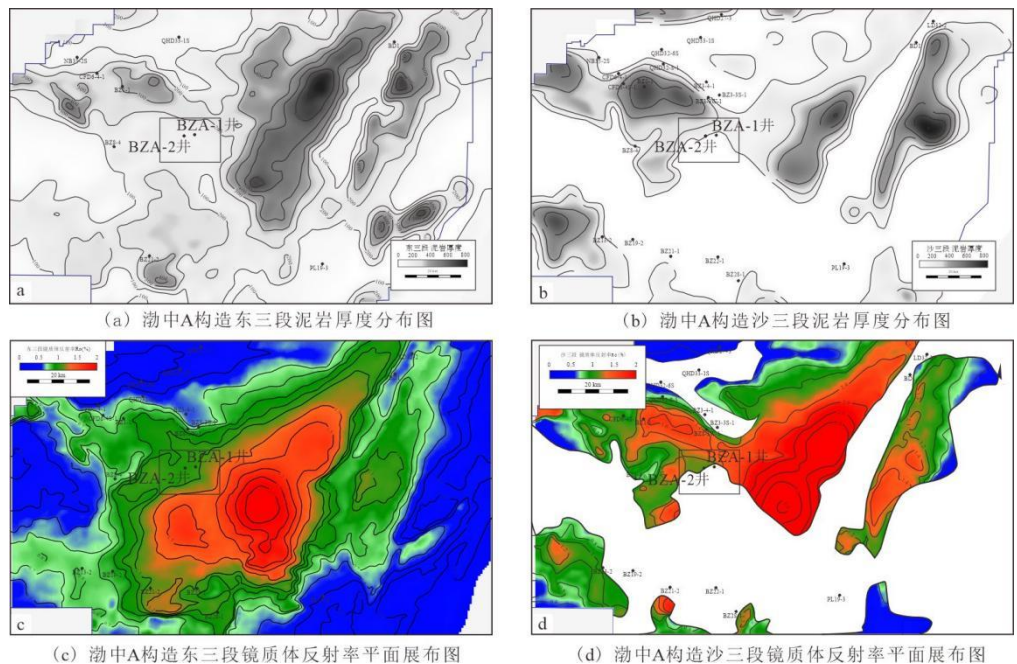
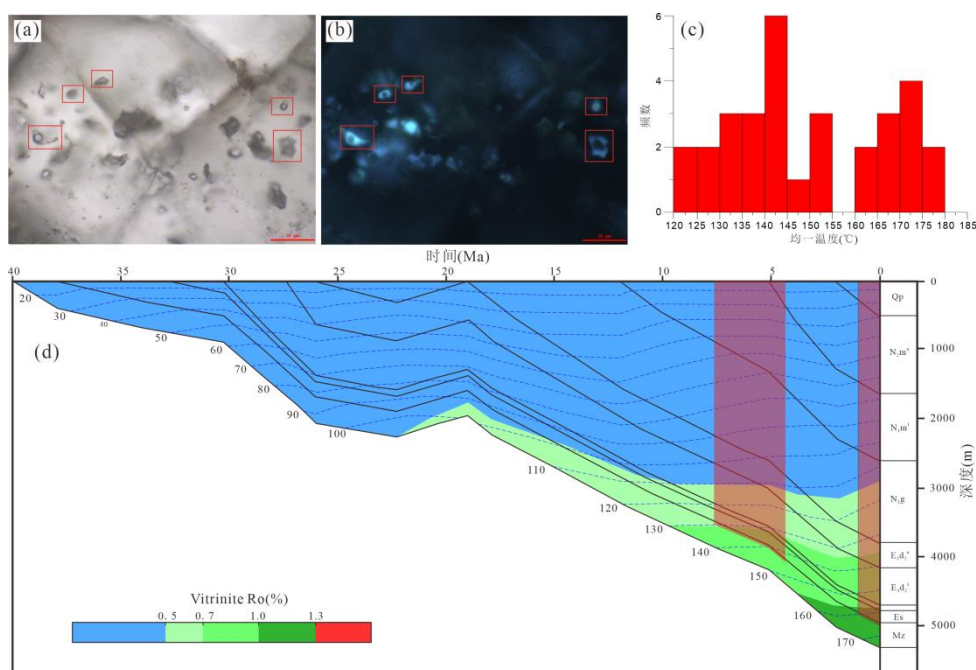


图 14 渤中 A 构造及围区洼陷烃源岩厚度图及其镜质体反射率

Fig. 14 Identification of Organic Matter Abundance in Bozhong A Structure and Surrounding Depression

渤中 A 构造火山岩中捕获有丰富的烃类包裹体，说明渤中 A 构造火山岩储层经历了充足的油气充注活动（图 15）。渤中 A 构造火山岩储层中的烃类包裹体表现为不规则形状，主要呈群体状或串珠状捕获于石英颗粒愈合裂缝或者石英脉体之中（图 15a），包裹体通常具有较高的气液比（10~28%），这可能和高成熟演化阶段天然气的充注有关。烃类包裹体通常发蓝白色荧光（图 15b），说明包裹体中烃类有机质成熟度较高。烃类伴生的盐水包裹体均一温度分布表现为两期，第一期均一温度分布在 130~155℃，第二期均一温度分布在 160℃ 以上，体现渤中 A 构造火山岩储层主要经历了两期油气充注（图 15c）。结合渤中 A 构造 a 井单井埋藏史和热史模拟结果，渤中 A 构造火山岩储层经历了两期晚期原油充注，分别对应于 8~4.5Ma 的晚期成藏，以及 1Ma~至今的超晚期成藏（图 15d）。



(a)/(b): BZA-1 井, 4993.7m, 中生界, 烃类包裹体, 透射光下呈灰褐色, 紫外光下呈蓝白色, 呈团块状捕获于石英脉体中, 其中(a)为单偏光, (b)为荧光; (c):BZA 构造储层烃类包裹体伴生的盐水包裹体均一温度直方图; (d) BZA-1 井埋藏史、热史及油气充注时间。

图 15 渤中 A 构造储层烃类包裹体特征、伴生盐水包裹体均一温度直方图和油气充注时间

Fig. 15 Characteristics and homogenization temperature of fluid inclusions and the charging time of the Bozhong A buried hill oilfield reservoir

3.5 厚层超压泥岩与晚期弱构造活动耦合形成较好的保存条件决定了油气富集规模

渤中 A 构造两口已钻井揭示, 中生界火山岩储层上覆为沙河街组和东营组两套区域稳定分布的超压暗色泥岩盖层, 盖层厚度超过 500m, 盖层内地层压力系数普遍 >1.5 。渤中 A 构造晚期构造活动强度弱, 泥岩盖层中的断裂数量少、规模小且均在泥岩盖层中消亡, 未对泥岩盖层的保存条件形成破坏, 超压与较弱的构造活动二者结合, 形成渤中 A 构造良好的垂向封存条件。

综上所述, 渤中 A 构造中生界火山岩四周被东三段和沙三段烃源岩环绕, 烃源岩质量高且均进入生排烃门限, 可提供强大的油气充注能力; 中生界储层可与烃源岩直接对接, 或者通过不整合面形成运移通道, 形成了有利的油气运移汇聚条件; 渤中 A 构造中生界上覆超压泥岩盖层, 对下伏油气藏具有良好的封盖能力。钻探结果显示, 渤中 A 构造中生界气藏气柱高度超 600m 且未见水, 实测压力系数为 1.51, 上述成藏条件共同保障了渤中 A 构造中生界火山岩整体大规模油气成藏 (图 16)。

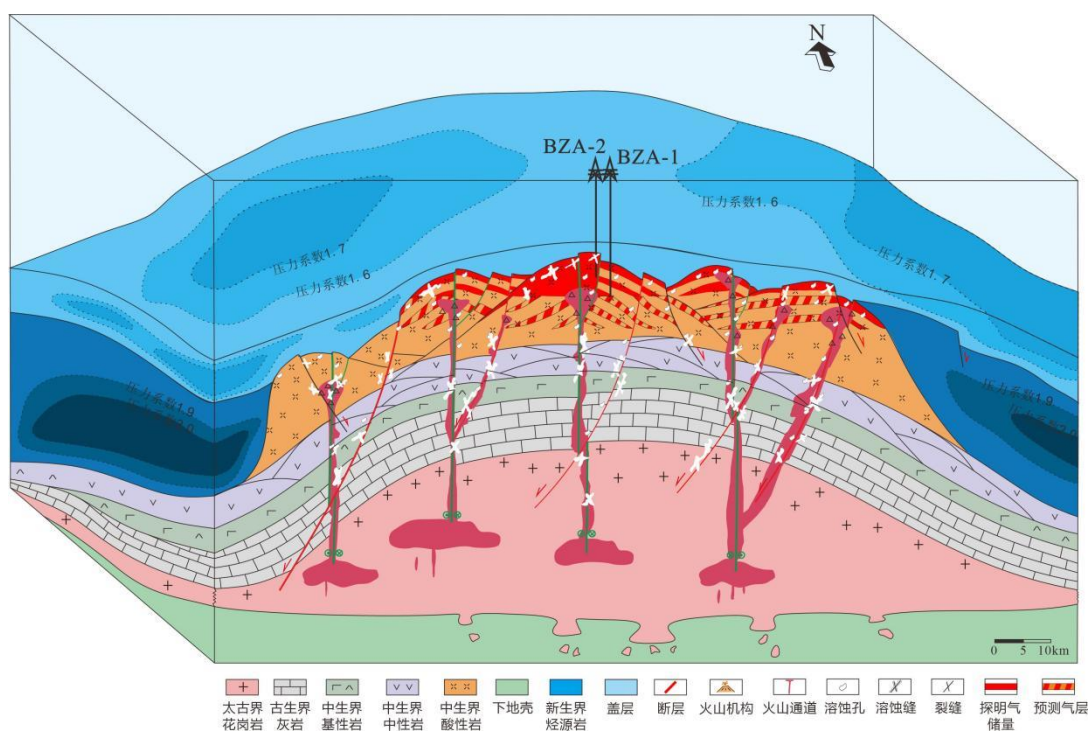


图 16 渤中 A 中生界火山岩规模性油气成藏模式图

Fig. 16 Scale based Reservoir Formation Model of Mesozoic Volcanic Rocks in Bozhong A

4 结论

(1) 渤中 A 构造分为早、中、晚三期火山岩旋回，钻井揭示的为晚期酸性火山岩旋回，由多个大中型酸性熔岩火山机构叠置构成，岩性为厚层稳定分布的流纹岩，发育喷溢相、火山通道相和爆发相三大类岩相；

(2) 火山岩储集空间以次生构造裂缝和溶蚀孔隙为主，穿过火山机构群的晚燕山期走滑断裂分段叠接形成宽广的叠覆区，构造应力集中，导致火山岩中大量构造缝发育，多类酸性流体沿断裂带扩缝增孔形成连片分布的高孔渗缝溶体；

(3) 近烃源岩大型火山-构造复合背斜型圈闭、高孔渗酸性火山岩缝溶体、泥岩超压封盖、晚期构造稳定是控制该区规模性油气成藏的主要因素。

参考文献

- [1] 何辉,李顺明,孔垂显.火山岩油藏储层评价与高效开发[M].石油工业出版社,2020.
- [2] 刘嘉麒,孟凡超,崔岩,等, 2010. 试论火山岩油气藏成藏机理[J].岩石学报, 26(1): 1-13
- [3] 冯子辉, 印长海, 齐景顺,等,2010.大型火山岩气田成藏控制因素研究: 以松辽盆地庆深气田为例[J]. 岩石学报,26(1): 21-32.
- [4] 匡立春,吕焕通,王绪龙,等,2010.准噶尔盆地天然气勘探实践与克拉美丽气田的发现[J].天然气工业, 30(2):1-6.
- [5] 徐正顺,王渝明,庞彦明,等,2008.大庆徐深气田火山岩气藏的开发[J].天然气工业,28(12):74-77.
- [6] 孙圆辉,沈平平,阮宝涛,等,2008.松辽盆地长岭断陷长深 1 号气田火山岩岩性及储渗特征研究[J].天然气地球科学,19(5):630-633.
- [7] 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.
- [8] 周家雄,杨海风,官大勇,等, 2023. 渤海湾盆地渤中 26-6 变质岩潜山大油田发现与认识创新[J]. 中国海上油气, 35(04): 1-11.
- [9] 牛成民,于海波,单玄龙,等,2024. 渤海海域锦州 25-A 构造区中生界火山岩有利储层成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 54(6):1788-1800.
- [10] 徐长贵, 杨海风, 王清斌, 等,2025.火山岩油气藏勘探进展[J].地球科学, 50 (2): 363-376.
- [11] 周家雄, 徐春强, 黄志, 等,2025. 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]. 地球科学, 50 (2): 388-404.
- [12] 单玄龙,王蔚,张新涛,等,2023.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,44(3): 675-688.
- [13] Fu M, Shan X L, Zhang X T, et al.,2022. 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, 236: 105330.
- [14] Yue Q , Shan X , Zhang X ,et al.Quantitative Characterization, Classification and Influencing Factors of the

Full Range of Pores in Weathering Crust Volcanic Reservoirs: Case Study in Bohai Bay Basin, China[J].Natural Resources Research,2020,30(1).

[15] 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):8.

[16] 杨凯凯. "准噶尔盆地东部石炭系巴塔玛依内山组火山岩储层成岩作用研究." 吉林大学(2019).

[17] Chen Y , Zheng H , Ventura G ,et al.Volcanic lithofacies control the space in unconventional, rhyolitic hydrocarbon reservoirs: The Hailar Basin, NE China[J].Marine and Petroleum Geology, 2024, 165(000)

[18] 户景松, 唐华风, 余雪英, 等, 2024. 断陷盆地火山地层构成要素特征及地质意义: 以吉林省九台全取心井下白垩统营城组为例 .地球科学, 49 (1) : 155-173.

[19] 王璞珺,迟元林,刘万洙,等, 2003.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), (04): 449-456.

[20] 唐华风,王璞珺,李瑞磊,等,2012.松辽盆地断陷层火山机构类型及其气藏特征[J].吉林大学学报(地球科学版),42(3):583-589.

[21] 杨海风,吕丁友,孙永河,等,2021.渤海湾盆地黄河口凹陷东洼断裂体系发育特征及其变形过程的构造物理模拟[J].地球科学,46(7):2391-2402

[22] 漆家福, 于福生, 陆克政, 等, 2003.渤海湾地区的中生代盆地构造概论[J].地学前缘, 10(S1): 199-206.

[23] 邓运华, 2015.渤海大中型潜山油气田形成机理与勘探实践[J].石油学报, 36(3):253-261.

[24] 周心怀,余一欣,汤良杰,等,2010.渤海海域新生代盆地结构与构造单元划分[J].中国海上油气, 22(5):285-289.

[25] 吴智平,侯旭波,李伟, 2007.华北东部地区中生代盆地格局及演化过程探讨[J].大地构造与成矿学, 31(4):15

[26] 叶涛,韦阿娟, 彭靖淞,等,2018. 渤海海域白垩系义县组火山岩岩相特征及成储差异[J]. 中国矿业大学学报,47(5):1081-1091.

[27] 李慧勇,肖述光,李飞,等,2023.渤海西部沙西北斜坡带下古生界潜山储层特征及成藏主控因素.地球科学, 48 (1) : 329-341.

[28] 傅锚,2022.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.

[29] 徐长贵,张功成,黄胜兵,等,2024. 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,51(3):467-477.

[30] 黄玉龙,王璞珺,冯志强,等, 2007.松辽盆地改造残留的古火山机构与现代火山机构的类比分析[J].吉林大

学学报：地球科学版,37(1):65-72.

[31] 李瑞磊,杨立英,朱建峰,等, 2023.松辽盆地南部断陷层火山岩储层特征及油气成藏主控因素[J].地学前缘, 30(4):100-111.

[32] 白国帅, 蒋有录, 侯帅, 等,2022.龙凤山地区火石岭组火山岩优质储层主控因素及成因机制[J].地球科学, 47 (5) : 1748-1761

[33] Bajwah Z U , Seccombe P K , Offler R .Trace element distribution, Co:Ni ratios and genesis of the big cadia iron-copper deposit, new south wales, australia[J].Mineralium Deposita, 1987, 22(4):292-300.

[34] 戴金星,傅诚德,关德范,等,1997. 天然气地质研究新进展.北京：石油工业出版社， 203-206.

[35] 朱焕来, 曲希玉, 刘立,等,2011. CO₂ 流体-长石相互作用实验研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版(03), 697-706.