

盆地埋藏火山机构原始形貌恢复与内部岩性组合预测

——以渤海湾盆地渤东低凸起龙口7-A构造为例

张耀文¹, 崔岩¹, 杨思通¹, 张强², 孙思业², 孟凡超²

[1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580]

摘要:盆地火山机构常因风化剥蚀而难以保存原始形貌,导致岩性预测出现偏差。火山机构的形态特征对其内部岩性组合具有指示作用,在火山岩油气勘探中恢复被埋藏火山机构的原始形貌具有重要意义。以渤海湾盆地渤东低凸起龙口7-A构造的多个残余火山机构为研究对象,采用构造趋势法和平衡剖面技术定量计算了剥蚀量,反演被埋藏火山机构的原始形态。基于现代火山机构的体积、直径、坡度和高度等参数建立了火山机构判别模型,用该模型判定了盆地内恢复后的火山机构类型。结合已钻井的岩性数据对模型进行验证与修正,最终对少井或无井区火山机构内部岩性组合进行了预测。研究结果表明:①龙口7-A构造中生代原始火山机构以层状火山和熔岩穹丘为主。1号机构为中-酸性爆发相和溢流相交交互形成的层状火山,岩性组合为粗安岩-流纹岩-安山岩互层,判别结果与LK7-A-X井钻探结果吻合。②6号火山机构预测为高黏度酸性岩浆侵入形成的熔岩穹丘,推测其岩性以酸性爆发相和溢流相组合为主。③“构造趋势-平衡剖面”火山机构恢复技术和“机构类型-岩性组合”预测模型及基底直径、火山高度、纵/横比、坡度和体积等5项火山地貌特征参数可以较准确地预测盆地埋藏型火山机构内部岩性组合。

关键词:构造趋势法;火山机构恢复;岩性组合预测;中生代火山岩;龙口7-A构造;渤东低凸起;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Original morphology reconstruction and lithologic assemblage prediction for buried volcanic edifices in a basin: A case study of the LK 7-A structure in the Bodong swell, Bohai Bay Basin

ZHANG Yaowen¹, CUI Yan¹, YANG Sitong¹, ZHANG Qiang², SUN Siye², MENG Fanchao²

[1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China]

Abstract: The original morphologies of volcanic edifices in a basin are often poorly preserved due to weathering and denudation, leading to inaccurate predictions of their lithology. The morphological characteristics of volcanic edifices are indicative of their lithologic assemblages, so it's of great significance for reconstructing the original morphologies of buried volcanic edifices in hydrocarbon exploration of volcanic rocks. In this study, we investigate multiple buried remnant volcanic edifices in the LK 7-A structure of the Bodong swell within the Bohai Bay Basin. The denudation thicknesses of these volcanic edifices are quantified using the structural trend analysis and the balanced cross-section technique. Subsequently, their original morphologies are reconstructed through inversion. Models for discriminating volcanic edifice types are established based on the parameters of modern volcanic edifices, such as volume, diameter, slope, and height. Using these models, the types of volcanic edifices reconstructed in the basin are determined. After validation and correction using lithological data acquired through drilling, the models are employed to predict the lithologic assemblages of volcanic edifices in areas with limited or no well control. The results indicate that the original Mesozoic volcanic edifices in the LK 7-A structure are

收稿日期:2025-09-01;修回日期:2026-02-26。

第一作者简介:张耀文(1997—),男,硕士研究生,火山岩。E-mail: zhangyaowen0805@163.com。

通信作者简介:孟凡超(1982—),男,博士、教授,岩石学与地球化学。E-mail: mengfc@upc.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42272225);中海石油(中国)有限公司天津分公司项目(CCL2024TJTONTST1316);山东省自然科学基金项目(ZR2021MD083)。

dominated by composite volcanoes and lava domes. Among these, the No. 1 volcanic edifice represents a composite volcano consisting of interbedded rocks of intermediate-acidic explosive and effusive facies, with a lithologic assemblage composed of trachyandesite-rhyolite-andesite interbeds. These discrimination results show good agreement with drilling data from well LK7-A-X. The No. 6 volcanic edifice is predicted to be a lava dome formed by the extrusion of high-viscosity acidic magmas, with its lithology inferred to be dominated by acidic explosive and effusive facies. Overall, the lithologic assemblages of buried volcanic edifices in a basin can be accurately predicted using (1) the combination of the structural trend method and balanced cross-section technique for volcanic edifice reconstruction, (2) the prediction model based on the correlation between volcanic edifice types and lithologic assemblages, and (3) five characteristic parameters (i. e., basement diameter, height, aspect ratio, slope, and volume) of volcanic landforms.

Key words: structural trend method, volcanic edifice reconstruction, lithologic assemblage prediction, Mesozoic volcanic rock, LK 7-A structure, Bodong swell, Bohai Bay Basin

引用格式:张耀文,崔岩,杨思通,等.盆地埋藏火山机构原始形貌恢复与内部岩性组合预测——以渤海湾盆地渤东低凸起龙口7-A构造为例[J].石油与天然气地质,2026,47(3):841–855. DOI:10.11743/ogg20260309.

ZHANG Yaowen, CUI Yan, YANG Sitong, et al. Original morphology reconstruction and lithologic assemblage prediction for buried volcanic edifices in a basin: A case study of the LK 7-A structure in the Bodong swell, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(3): 841–855. DOI:10.11743/ogg20260309.

火山岩是盆地深层一种特殊的储层类型,在深部地层中常表现出优于传统沉积岩储层的储集性能^[1-2]。其独特的岩石结构,如火山喷发形成的气孔和杏仁构造,以及后期构造作用产生的裂缝系统,为油气储存提供了丰富的储集空间和渗透通道,在全球多个含油气盆地中展现出巨大的勘探潜力^[3-4]。经过多年勘探,中国已在松辽、四川和准噶尔等多个盆地的火山岩中发现了高产油气藏^[5-10],这些发现不仅丰富了中国油气资源储备,更使中国成为全球火山岩油气藏勘探实践的重要参与者和贡献者^[11-13]。

火山岩储层发育受岩浆性质、岩相分布、构造改造和火山机构等多重因素综合影响^[14-16]。其中,火山机构作为岩浆喷发-堆积的基本建造单元,通过控制岩性、岩相空间组合和裂缝分布,对储层展布和成圈成藏起到核心作用^[17-18]。长期以来,学者们围绕火山机构分类开展了大量研究。基于区域地质背景和构造环境差异,依据岩石类型、岩石化学成分、地层结构和地貌特征,将火山机构分为单成因火山、复成因火山、盾状火山、破火山和残留古火山等多种类型^[19-21]。其中,中-酸性火山机构因爆发相原生孔隙发育、溢流相易受后期溶蚀改造,常形成优质储层,已在多个盆地中获得勘探验证^[22-24]。

渤海海域中生代火山岩是盆地深层油气勘探的重要领域,已在秦皇岛30-A构造区火山岩油气藏、旅大25-1构造区中生代油气藏和BZ8-3S构造区中生代火山岩油气藏取得勘探发现^[25-27]。这些油气藏的储层均

以中-酸性火山机构为主,反映出优势岩性组合对有利储层发育的关键控制作用。然而,受限于海上钻井密度远低于陆地盆地,研究人员主要依赖地震资料来识别和刻画现今火山机构,进而进行岩性预测。针对渤海海域中生代火山活动区,已有研究综合岩心、测井和地震资料,结合火山机构的外部形态和内部结构特征,将渤中凹陷中生代火山机构划分为熔岩穹丘、复合层火山、火山碎屑岩席和盾状火山4种类型^[28],为该火山机构成因机理研究提供了分类依据。

受渤海海域复杂构造背景影响,中生代火山机构普遍经历了60~80 Ma的长期风化剥蚀和构造改造^[19],导致现存火山机构的地震反射形态与原始喷发形态差异显著,直接依据现今形态预测岩性往往偏差较大。近年来,渤中凹陷渤东低凸起、渤中8-3南等构造的几口探井未获勘探突破,主要原因在于实钻储层岩性与钻前预测不符。例如,龙口7-A构造某火山机构在地震资料解释中被判为酸性岩,实钻却揭示为中性岩。这主要是由于火山岩岩性和岩相变化快、储层非均质性强^[29-32],表明仅依靠当前地震剖面形态进行岩性组合预测存在较大不确定性。因此,系统恢复火山机构的原始喷发形态,建立可靠的“机构类型-岩性组合”对应关系,是提高火山岩岩性预测准确度的关键。

本文以渤东低凸起龙口7-A构造火山机构为研究对象,通过构造趋势法和平衡剖面技术,定量恢复火山机构的原始形态。在恢复过程中,将充分结合区域地

质背景和已有勘探资料,确保恢复结果的准确性和可靠性。同时,借鉴不同类型现代火山形态,剖析火山机构类型与岩性组合之间的内在联系,探究不同类型火山机构所对应的岩性特征和分布规律,以实现岩性的准确预测,为火山岩储层预测与规模性火山岩油气藏的发现提供理论支撑。

1 区域地质背景

渤海湾盆地位于中国东部,涵盖华北平原、下辽河平原和渤海海域,总面积约为 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地北接燕山褶皱带,西邻太行山脉,南、东两侧分别以鲁西隆起和胶辽隆起为界^[33-35],是华北克拉通东部的中-新生代断陷盆地^[36-37]。其构造演化经历了前裂陷期(地质年代 $> 65.0 \text{ Ma}$)、裂陷期($65.0 \sim 24.6 \text{ Ma}$)和后裂陷期($< 24.6 \text{ Ma}$)3个阶段^[38-39]。中生代晚侏罗世—早白垩世,受燕山构造活动影响,华北克拉通遭受破坏和改造,岩石圈减薄诱发大规模岩浆活动,形成了广泛分布的火山岩^[40-41]。火山岩喷发后经历 $60 \sim 80 \text{ Ma}$ 的风化剥蚀^[42],早白垩世晚期—晚白垩世地层被强烈剥蚀,致使现存火山岩以下白垩统义县组为主^[43-44]。

研究区龙口7-A构造位于渤海东部海域,地处渤海湾盆地渤中凹陷东部的渤东低凸起(图1a),夹持于

渤中和渤东两大生烃凹陷之间,具备优越的油气成藏条件^[45-47]。渤东低凸起整体呈NNE向长条形展布,地势由南向北逐渐抬升,中部发育相对平缓的过渡区域,将整个凸起分割为南、北两个高点,潜山总面积约 600 km^2 ^[48]。地层自下而上依次为太古宇花岗岩,元古宇和上古生界碳酸盐岩,中生界义县组基性玄武岩、中性粗面岩、酸性流纹岩和凝灰岩,以及中生界九佛堂组灰质碎屑岩^[49]。其中,义县组火山岩是研究区的主要勘探目的层位(图1c)。

受燕山期和喜马拉雅期多期构造运动影响,渤海海域中生代火山机构遭受强烈改造^[50]。龙口7-A构造所在区域火山机构类型多样,岩性组合复杂。徐长贵等通过对该构造钻井及周边区域的综合分析指出,龙口7-A构造的火山岩源于深部的埃达克岩,深大断裂为中-酸性火山岩的上升提供了通道^[51]。这表明构造活动不仅控制了岩浆的来源,也对火山机构形成起到了关键作用。复杂的断裂体系导致岩浆在上升过程中受到不同程度干扰,进而引起火山机构形态和岩性的多样化。

此外,王昕等于渤东低凸起龙口7-1构造的测录井资料,结合岩性-岩相信息和地震相特征,判断该区火山岩为纵/横比较低的中-酸性层状火山机构,呈现多期发育、相互叠置的分布特点^[48]。据此推测,龙口

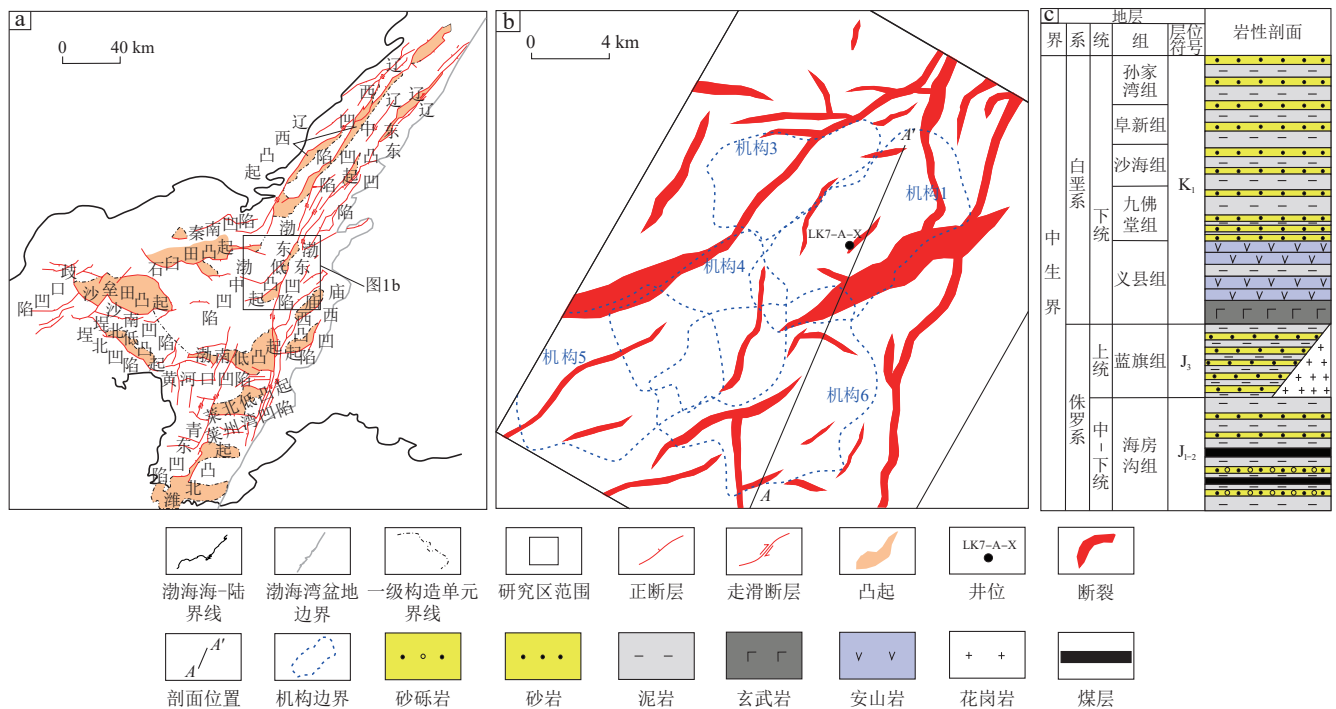


图1 渤海湾盆地渤东低凸起龙口7-A构造地质概况

Fig. 1 Geological overview of the LK 7-A structure in the Bodong swell, Bohai Bay Basin

a. 渤海海域构造纲要(据文献[48]修改); b. 龙口7-A潜山构造火山机构平面分布; c. 地层综合柱状图(据文献[42]修改)

7-A构造可能具有类似的火山机构发育特征。多期火山活动的叠加,使得不同时期、不同类型的火山机构相互交织,进一步增加了研究区火山机构的复杂性。

2 现代火山机构类型与判别模型建立

2.1 现代火山机构类型

现代火山机构分类体系是研究古火山结构的重要基础。不同类型现代火山机构的岩性组合研究^[52],可为识别受地质改造的古火山机构的岩性组合提供参照模板^[53]。根据形态和喷发模式,将火山机构划分为盾状、层状、火山渣锥和熔岩穹丘4种类型,各类型特征和规模参数详见图2。统计表明,不同类型火山机构在直径、高度和纵/横比等规模参数上呈现显著差异。本文系统解析全球220处现代火山的规模参数、岩浆性质和构造环境等关键要素(包括盾状火山53例、层状火山89例、熔岩穹丘22例和火山渣锥56例)。上述现代火山参数数据综合来源于全球活火山数据库史密森学会全球火山计划(global volcanism program, GVP)和其他已发表的火山地貌研究成果^[52,54-55]。

1) 盾状火山

由低黏度基性岩浆(以玄武岩为主)经多期裂隙式喷发形成。形态为宽阔平缓的斜坡,类似盾牌,具有面积大、坡度极缓(通常 $<10^{\circ}$)、纵/横比低的特征。岩性以溢流相枕状熔岩和绳状熔岩为主,由于岩浆流动性

强,可大面积覆盖形成巨厚层序,层序中夹少量火山碎屑岩^[56]。该类型以夏威夷基拉韦厄火山为典型代表。

2) 层状火山

由中-酸性岩浆(安山岩-流纹岩)经中心式喷发形成。具有熔岩与火山碎屑岩互层结构。因爆发-溢流作用交替,常形成对称陡峭锥形,坡度范围在 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 。岩性组合为爆发相凝灰岩、空落角砾岩和溢流相安山岩^[57]。该类型以日本富士山为典型代表。

3) 火山渣锥

由短期、单成因喷发形成,主要由玄武质火山渣和火山弹快速堆积而成。形态为小型陡峭圆锥体,顶部存碗状火山口,坡度约为 30° 。其碎屑/熔岩体积比值通常大于3。由于喷发持续时间短且爆发强烈,堆积物分选差、棱角分明。该类型以墨西哥帕里库廷火山为典型代表^[58]。

4) 熔岩穹丘

由高黏度酸性岩浆(如流纹岩和英安岩)缓慢侵入形成。形态多呈圆顶状或不规则块体,表面粗糙,裂缝发育,坡度陡峻,通常在 $35^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。岩性致密,流纹构造发育,并常伴生隐爆角砾岩。该类型以美国圣海伦斯火山为典型代表^[59]。

2.2 现代火山机构类型判别模型的建立

通过提取火山机构的规模和形态等关键特征指标,基于多维参数可视化的蛛网图分析法,构建火山机构定量判识模型,实现火山机构类型从定性描述到定量判识的转变。

火山类型	形态特点	机构参数				实例	火山规模特征示意图
		基底宽度/km	高度/m	坡度/($^{\circ}$)	体积/ m^3		
盾状火山	宽阔平缓的斜坡,形似盾牌,面积较大	1.0 ~ 73.0	100 ~ 5 000	5 ~ 15	$10^{10} \sim 10^{15}$	夏威夷冒纳罗亚火山(Mauna Loa)、基拉韦厄火山(Kilauea)	高度约10 km 坡度约 4° 基底宽度约100 km a
层状火山	也称为复式火山。对称陡峭锥形山体,层次分明,陡坡	3.0 ~ 25.0	500 ~ 5 000	15 ~ 35	$10^9 \sim 10^{13}$	日本富士山(Fuji)、意大利维苏威火山(Vesuvius)	高度为1 ~ 4 km 坡度约 25° 基底宽度为1 ~ 4 km b
火山渣锥	小型陡峭圆锥形山体,顶部有碗状火山口	0.1 ~ 2.0	40 ~ 500	25 ~ 35	$10^7 \sim 10^9$	墨西哥帕里库廷火山(Parietun)、美国日落火山(Sunset Crater)	高度为0.5 ~ 1.0 km 坡度约 33° 基底宽度约0.5 km c
熔岩穹丘	圆顶状或不规则状山体,表面粗糙,可能有裂缝,体积不大	0.1 ~ 11.0	50 ~ 2 600	30 ~ 45	$10^6 \sim 10^8$	美国圣海伦斯火山的熔岩穹丘、印度尼西亚默拉皮火山(Mount Merapi)的熔岩穹丘	高度为0.5 ~ 1.0 km 坡度约 40° 基底宽度为0.5 ~ 1.0 km d

图2 按形态与喷发模式分类的火山机构特征及规模

Fig. 2 Characteristics and scales of the various types of volcanic edifices classified by morphology and eruption style

a. 盾状火山规模特征,对应冒纳罗亚等盾状火山实例; b. 层状火山规模特征,对应富士山等层状火山实例; c. 火山渣锥规模特征,对应帕里库廷等火山渣锥实例; d. 熔岩穹丘规模特征,对应圣海伦斯等熔岩穹丘实例

2.2.1 参数选择与标准化

基于上述现代火山类型的特征,从几何形态和规模大小等关键要素中,筛选出基底直径、火山高度、纵/横比、坡度和体积等5项火山地貌特征参数(表1)。

以全球220处现代火山数据为基准,构建火山类型定量判别体系。为消除不同参数间的量纲差异,采用离差(Min-Max)标准化方法进行处理,其数学表达式见公式(1)。

$$X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

式中: X' 为标准化后的特征参数值,无量纲; X 为原始特征参数值,单位对应不同特征参数的单位[基底直径(km)、高度(m)、坡度($^{\circ}$)和体积(m^3)]; $X_{\min}$ 为样本特征参数的最小值,单位对应不同特征参数的单位; $X_{\max}$ 为样本特征参数的最大值,单位对应不同特征参数的单位。

经离差标准化处理后,所有数据被统一映射至[0,1]区间(表1)。该方法有效实现了火山类型的多维度量化对比,为渤海海域中生代火山机构类型判别提供了可视化判据。

2.2.2 模型的建立

以圆心为原点建立放射状坐标轴体系,沿顺时针方向依次布设基底直径、高度、纵/横比、坡度和体积共5条等角度分布的参数轴。各参数轴的刻度对应经Min-Max标准化后的参数值,范围为0~1,并标注相应参数名称(图3)。将标准化转换后的数值作为各类火山在对应参数数轴上的边界点。

基于全球220处现代火山的统计数据,按盾状火山、层状火山、熔岩穹丘和火山渣锥4种类型,分别提

取各参数的极值(最小值和最大值),并将各类火山在[0,1]区间的标准化值作为其在对应参数轴上的边界点。

随后,连接同一类型火山的各边界点,形成闭合多边形区域,以此作为区分不同火山类型的参数阈值范围。例如,盾状火山的多边形区域呈现出“宽基底、低坡度”特征,而熔岩穹丘则表现为“高坡度、小直径”特征。

为验证模型的有效性,选取夏威夷基拉韦厄盾状火山、富士山层状火山等典型已知类型火山,将其参数标准化处理后投绘于蛛网图中。验证结果显示,投点结果与火山已知类型完全契合,表明所构建的蛛网图模型可直接用于判别未知火山机构的类型。

3 渤东低凸起龙口7-A构造埋藏火山机构原始形貌恢复与判别

在燕山期伸展作用和喜马拉雅期走滑运动等多期构造活动影响下,渤海海域中生代火山机构经历了长期风化剥蚀与构造改造,其原始形貌已发生显著改变。目前基于地震资料刻画的火山机构形貌已不能代表原始喷发期的真实形态。因此,火山机构原始形态的恢复需以剥蚀量计算为前提,综合运用平衡剖面法和三维地震反演等技术,通过现今机构刻画、构造恢复和火山机构反演,重建火山喷发期的原始形态。

3.1 龙口7-A构造剥蚀量计算

为恢复渤海海域中生代火山机构的原始形态,首先需开展剥蚀量计算。针对龙口7-A构造中生代火山岩的剥蚀特征,本研究建立了系统的分析流程:首先识

表1 不同类型现代火山机构地貌特征参数及其标准化处理结果

Table 1 Characteristic parameters of volcanic landforms and their normalized values for various types of modern volcanic edifices

地貌特征参数		火山机构类型			
		盾状火山	层状火山	火山渣锥	熔岩穹丘
基底直径	原始值/km	1.00 ~ 40.00	4.00 ~ 25.00	0.30 ~ 2.50	0.20 ~ 10.00
	标准化值	0.02 ~ 1.00	0.10 ~ 0.62	0 ~ 0.06	0 ~ 0.24
高度	原始值/m	200.00 ~ 4 000.00	1 000.00 ~ 5 000.00	100.00 ~ 700.00	80.00 ~ 2 600.00
	标准化值	0.02 ~ 0.80	0.19 ~ 1.00	0 ~ 0.13	0.00 ~ 0.51
纵/横比	原始值	0.05 ~ 2.00	0.10 ~ 0.50	0.10 ~ 1.00	0.10 ~ 2.00
	标准化值	0 ~ 0.08	0.03 ~ 0.23	0.03 ~ 0.49	0.03 ~ 1.00
坡度	原始值/ $^{\circ}$	5.00 ~ 15.00	15.00 ~ 30.00	25.00 ~ 35.00	30.00 ~ 45.00
	标准化值	0 ~ 0.25	0.25 ~ 0.63	0.50 ~ 0.75	0.63 ~ 1.00
体积	原始值/ m^3	$10^{10} \sim 10^{15}$	$10^9 \sim 10^{13}$	$10^7 \sim 10^9$	$10^6 \sim 5 \times 10^{10}$
	标准化值	0.44 ~ 1.00	0.33 ~ 0.78	0.11 ~ 0.33	0 ~ 0.50

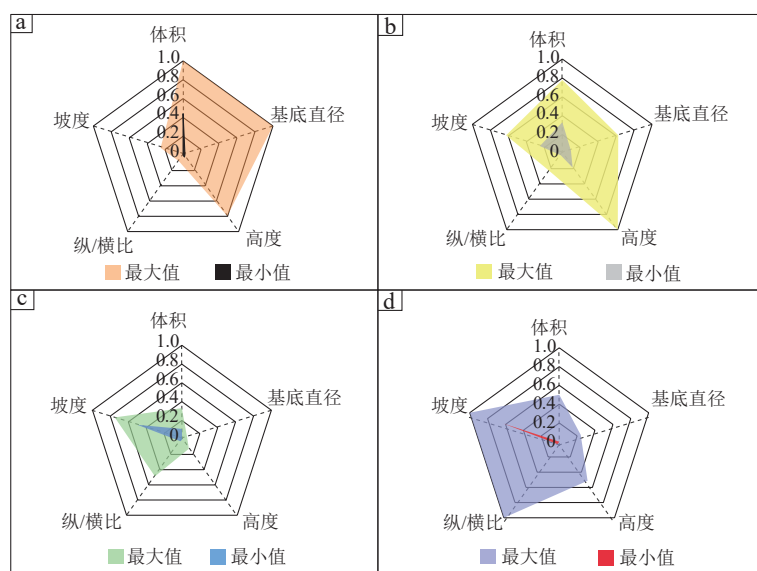


图3 不同类型现代火山机构地貌特征参数蛛网示意图

Fig. 3 Spider diagrams showing the classification of volcanic edifices

a. 盾状火山; b. 层状火山; c. 火山渣锥; d. 熔岩穹丘

别剥蚀地质现象,随后通过多方法约束原始地层的厚度,最终定量计算剥蚀量。

首先,通过地震剖面识别中生界顶面的削截和顶超等不整合接触关系,划分出残留地层和剥蚀边界,并结合已钻井的测井曲线,标定地震反射轴与实际地层的对应关系,明确火山岩残留厚度($H_{\text{残留}}$)的纵向分布特征。

其次,采用构造趋势法反演原始地层厚度。该方法以研究区内未受明显剥蚀的火山岩分布区实测地层厚度为基础,通过克里金(Kriging)空间插值算法构建地层厚度趋势面,进而反演剥蚀区原始地层厚度,其数学表达式见公式(2)。

$$H_{\text{trend}}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i H_i \quad (2)$$

式中: $H_{\text{trend}}(x_0)$ 为剥蚀区待计算点 x_0 处的原始地层厚度,m; H_i 为第 i 个已知未剥蚀点的实测地层厚度,m; λ_i 为对应已知点的权重系数,无量纲,其取值由克里金插值中半变异函数的拟合结果确定。

在具体操作中,选取研究区内未受明显剥蚀的火山岩分布区,统计该区火山岩地层的厚度数据,并通过克里金插值法外推剥蚀区的原始地层厚度($H_{\text{理论}}$)。最终,剥蚀厚度(E)由公式(3)计算得出。

$$E = H_{\text{理论}} - H_{\text{残留}} \quad (3)$$

式中: E 为剥蚀量,m; $H_{\text{理论}}$ 为理论原始地层厚度,m; $H_{\text{残留}}$ 为残留地层厚度,m。

结果显示,龙口7-A构造中生代火山岩顶部的剥蚀量达1 334 m,表明研究区火山机构原始喷发规模比

现存规模大30%~50%。该结果为后续原始形态的反演提供了关键参数约束。

3.2 火山机构原始地貌恢复过程

本研究借鉴构造地貌恢复思路,运用Move软件,基于对渤海海域某构造提取的二维地震数据体,采用2D Move平衡剖面法,对该构造火山机构原始地貌恢复流程进行示意(图4)。具体工作流程包括:火山机构精细刻画、时-深转换、断距消除、剥蚀量恢复和层拉平^[60-61]。

首先,在地震剖面中,通过观察火山机构的地层接触关系和地震相特征,识别火山顶面的削截不整合和底面的整合接触。结合典型火山地震相反射特征,在垂直火山机构走向的关键剖面中,圈定现今火山机构的垂向边界,明确其空间展布范围。

时-深转换则基于钻孔数据的二次多项式拟合公式,计算深度-时间曲线,其数学表达式见公式(4)。

$$D = 0.0014t^2 + 0.8310t + 0.0948 \quad (4)$$

式中: D 为地层深度,m; t 为双程反射时间,ms。

利用该曲线,将地震时间域数据转换为深度域数据。随后,通过断距消除,恢复因多期断裂活动造成的地层位移与倾斜。在此基础上,结合前期计算获得的剥蚀量,对残留火山机构进行修正,在垂向上恢复火山机构所在地层原始高度。依据现今火山机构地震轴反射特征,绘制地震反射趋势线,外推并圈定原始火山机构的边界。

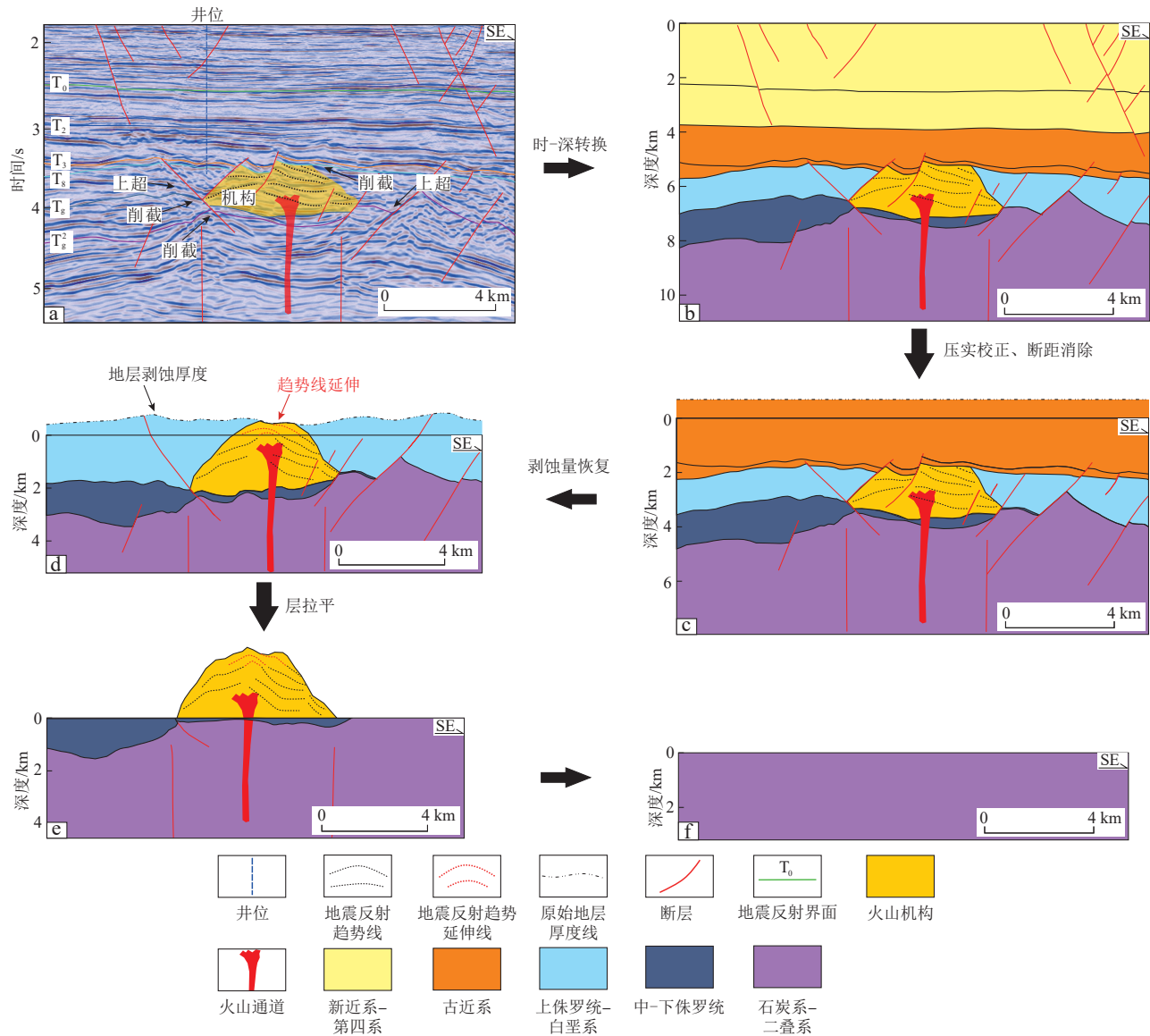


图4 平衡剖面法恢复流程示意图

Fig. 4 Workflow showing the reconstruction of the original morphologies of volcanic edifices using the balanced cross-section technique
a. 渤海海域某构造地震剖面识别火山机构及地层接触关系; b. 时-深转换后的构造地层及火山机构初始结构剖面; c. 经压实校正、断距消除后的构造地层及火山机构剖面; d. 火山机构顶部地层剥蚀厚度(E)及地震反射趋势线延伸剖面; e. 火山机构层拉平后原始形态剖面; f. 火山机构原始基底拉平剖面

针对地层褶皱变形,运用层拉平技术恢复地层的挤压变形量。通过计算垂直于褶皱走向上的弯曲变形量,并进行相应的拉平操作,还原不同时期地层的压缩量。

3.3 龙口7-A构造典型火山机构恢复与类型判别

3.3.1 现今火山机构地震刻画

根据A—A'测线剖面,龙口7-A构造残留的1号和6号火山机构在地震剖面上呈现出明显不同的反射特征(图5)。1号火山机构地震反射特征呈席状外形,

顶、底界面为强振幅连续反射,内部中心区域表现为中-强振幅杂乱反射,并可见具杂乱反射的刺穿通道,中-远源部位则呈现平行、中振幅连续反射特征;6号火山机构反射特征呈丘状外形,顶、底界面为中-强振幅较连续反射,内部为中振幅杂乱反射,亦发育杂乱反射的刺穿通道,与上、下地层通常呈角度不整合接触,反映出强烈的地貌改造痕迹。

3.3.2 火山机构原始形貌恢复

龙口7-A构造白垩统平均剥蚀厚度约1 300 m。通过构造平衡恢复法,揭示了火山机构“形成—抬升—

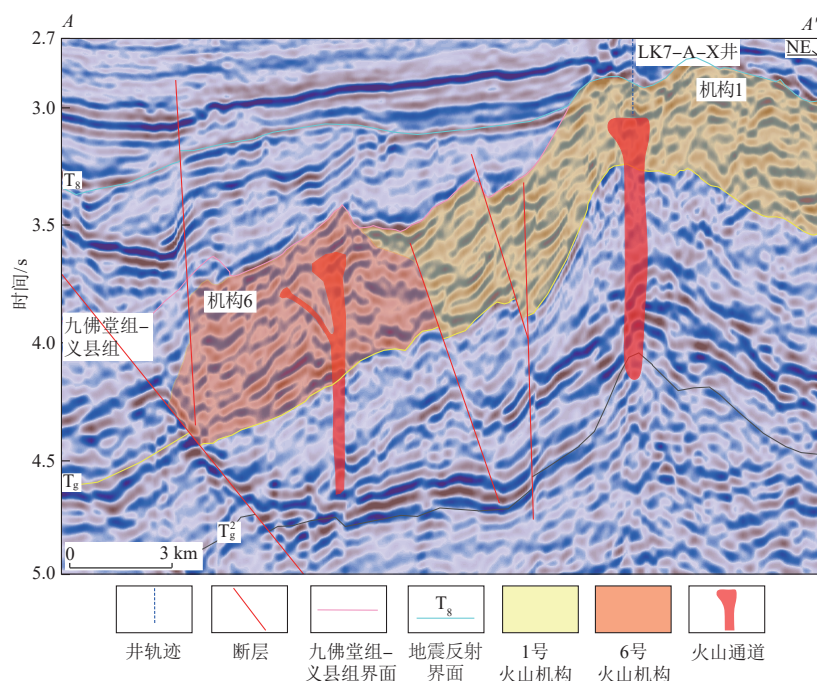


图5 渤海湾盆地渤东低凸起龙口7-A构造火山机构地震相特征

Fig. 5 Seismic facies characteristics of volcanic edifice in Longkou 7-A structure in Bodong Low Uplift, Bohai Bay Basin

剥蚀”的动态演化过程(图6)。对恢复后的火山机构规模进行测量,结果显示:1号火山机构基底直径约为15.0 km,高度约为2.5 km,纵/横比为0.23,坡度约为20°,体积约为 $1\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$;6号火山机构基底直径约为6.5 km,高度约为2.5 km,纵/横比为0.31,坡度约为40°,体积约为 $220 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3.4 基于判别模型的火山机构类型判定

对龙口7-A构造恢复后的1号和6号火山机构,通过将其规模参数与蛛网图中现代火山机构类型的极值域进行匹配分析,实现类型判定。

恢复后1号火山机构基底直径约为15.0 km,高度约为2.5 km,纵/横比为0.23,坡度约为20°,体积约为 $1\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。以上各项参数均落入层状火山机构的阈值区间(图7a—d),据此判定其为层状火山。

恢复后的6号火山机构基底直径约为6.5 km,高度约为2.0 km,纵/横比为0.31,坡度约为40°,体积约为 $220 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。以上各项参数均落入熔岩穹丘的阈值区间(图7e—h),据此判定其为熔岩穹丘。

4 火山机构内部岩性组合预测

4.1 火山机构类型与岩性组合关系

火山机构类型与岩性之间存在密切的成因联系,这种关联性受岩浆物理化学性质(如黏度和挥发分含量)和喷发动力学过程共同控制。结合全球现代火山案例统计^[54-55,62-63],本文系统总结了各类火山机构的规模特征和岩性组合特征,可归纳为以下4类典型的“机构-岩性”组合(表2)。

表2 火山机构类型与岩性组合关系

Table 2 Correlation between the types and lithologic assemblages of volcanic edifices

火山机构类型	次级分类	规模特征	岩性组合	实例
盾状火山	大型盾状火山	夏威夷型(KTH),常见的巨型盾状	玄武岩为主	冒纳罗亚火山
	小型盾状火山	加拉帕戈斯型(KTG),规模较夏威夷型小	玄武岩为主	拉昆布雷火山
层状火山	安山岩层状火山	典型锥形	安山岩为主,含英安岩	富士山、马荣火山
	偏碱性层状火山	陡坡复合火山	粗安岩为主,含少量玄武岩	维苏威火山、斯特龙博利火山
火山渣锥	火山渣锥	小规模单成因锥体	玄武质火山碎屑岩为主	日落火山、帕里库廷火山
	渣-溅锥	小型黏结堆积锥体	玄武质-安山质溅射堆积物为主	卡普林火山
熔岩穹丘	单成因熔岩穹丘	块状陡坡火山,小型、单期喷发形成	安山岩-英安岩为主	诺瓦鲁普塔穹丘
	复合成因熔岩穹丘	多次喷发叠加,体积显著大于单成因穹丘	流纹岩为主,夹安山岩	圣海伦斯熔岩穹丘

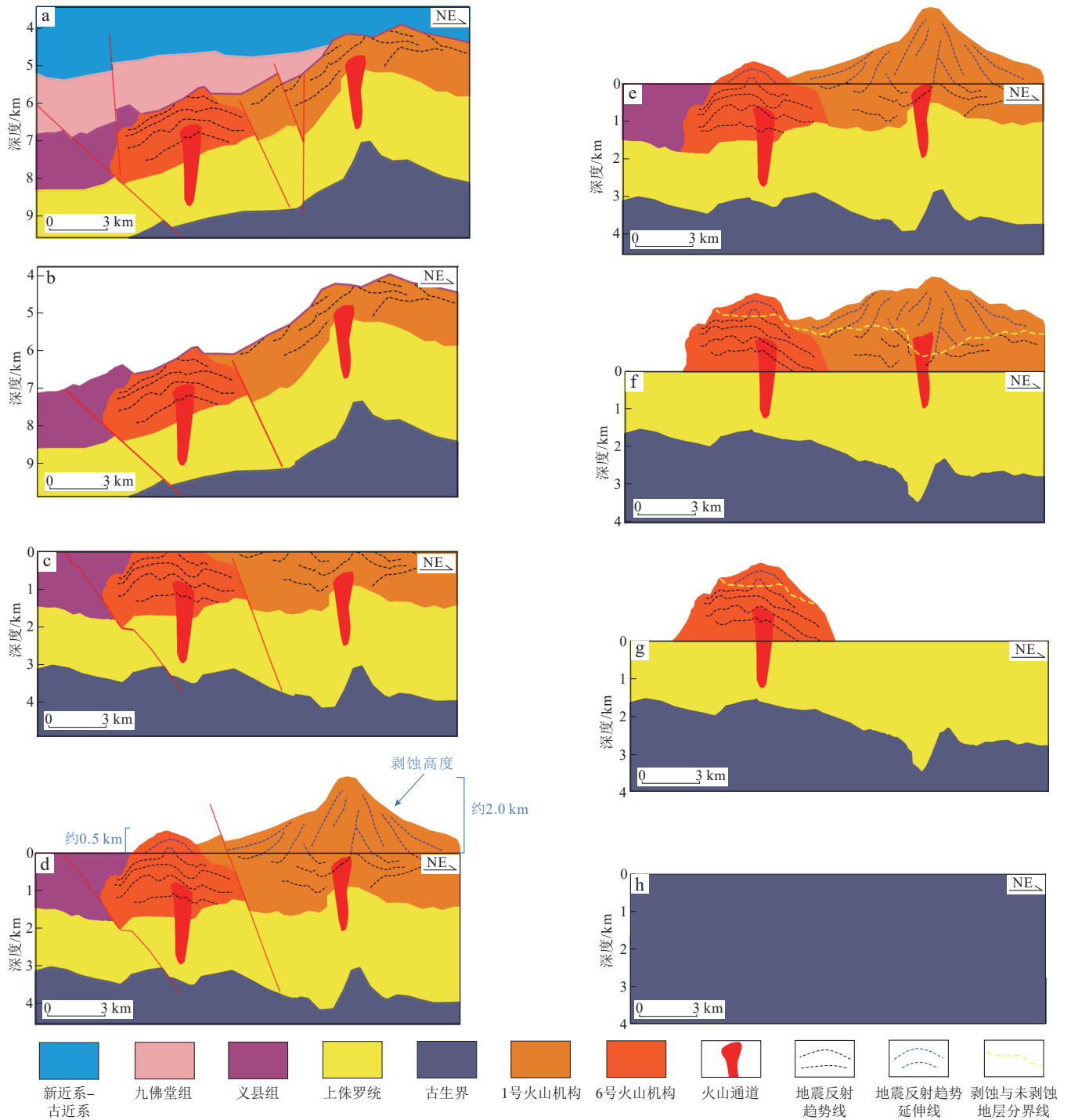


图6 渤海湾盆地渤东低凸起龙口7-A构造1号和6号火山机构恢复

Fig. 6 Restoration of No. 1 and No. 6 volcanic edifices in Longkou 7-A structure in Bodong Low Uplift, Bohai Bay Basin

a. 原始地层-火山机构剖面;b. 消除部分断层后的地层-火山机构剖面;c. 火山机构顶部层位拉平后形态剖面;d. 根据构造趋势法在剖面补充火山机构剥蚀量后的地层-火山机构剖面;e. 消除影响火山机构断层后的地层-火山机构剖面;f. 1号和6号火山机构层拉平后原始形态剖面;g. 1号机构喷发前6号火山机构形态恢复剖面;h. 火山机构原始基底拉平剖面

1) 盾状火山

依据规模差异,可分为大型盾状火山(夏威夷型)和小型盾状火山(加拉帕戈斯型)。岩性组合均以玄武岩为主,因岩浆具有低黏度、低挥发分的特征,常发育席状熔岩流,呈现大面积溢流特性,横向延伸广,层理

平缓^[64]。

2) 层状火山

安山岩层状火山呈典型锥形,岩性以安山岩为主(含量约50%~60%),含有少量英安岩(含量约10%~20%);偏碱性层状火山呈陡坡复合形态,岩性以粗安

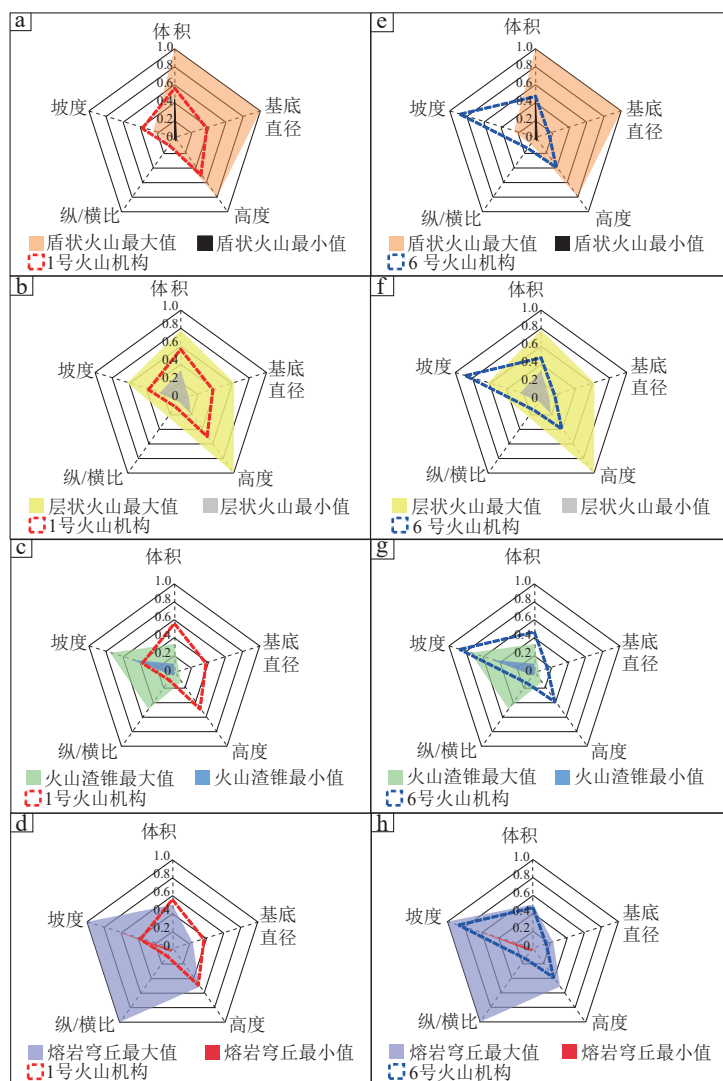


图7 渤海湾盆地渤东低凸起龙口7-A构造1号和6号火山机构地貌特征参数蛛网图

Fig. 7 Spider diagrams of geomorphic characteristic parameters of No. 1 and No. 6 volcanic edifices in Longkou 7-A structure in Bodong Low Uplift, Bohai Bay Basin

a. 1号机构与盾状火山阈值对比;b. 1号机构与层状火山阈值对比;c. 1号机构与火山渣锥阈值对比;d. 1号机构与熔岩穹丘阈值对比;e. 6号机构与盾状火山阈值对比;f. 6号机构与层状火山阈值对比;g. 6号机构与火山渣锥阈值对比;h. 6号机构与熔岩穹丘阈值对比

岩为主(含量约60%~70%),混有少量玄武岩(含量<10%)。二者均呈现熔岩与火山碎屑岩互层特征,偶伴随破火山口构造^[52]。

3) 火山渣锥

火山渣锥为小规模单成因锥体,玄武质火山碎屑岩含量超过95%,碎屑棱角分明;渣-溅锥为小型黏结堆积锥体,岩性为玄武质-安山质溅射堆积物混合(玄武质含量约60%~75%,安山质含量约25%~40%),碎屑间可见熔结构造^[65]。

4) 熔岩穹丘

单成因熔岩穹丘为块状陡坡火山,具有小型、单期喷发特征。岩性以安山岩-英安岩为主,岩性致密、流纹构造发育,是单期高黏度岩浆静态挤出的结果;复合

成因熔岩穹丘由多期喷发叠加而成,体积显著大于单成因类型,岩性以流纹岩为主(含量约65%~80%),含安山岩夹层^[66-67]。

4.2 龙口7-A构造典型火山机构岩性组合验证与预测

基于构造趋势法与三维地震反演结果,龙口7-A构造已恢复的火山机构类型主要为层状火山(1号机构)和熔岩穹丘(6号机构)。通过将已钻井岩性数据和预测模型进行对比验证,可建立“机构类型-岩性组合”的定量关联,并为未钻探区域提供岩性组合预测依据。

4.2.1 龙口7-A构造1号层状火山机构岩性组合

恢复后的1号火山机构呈现典型层状火山特征:

基底直径约为15.0 km,高度约为2.5 km,纵/横比为0.23,坡度约为20°,体积约为 $1\,500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其外貌特征与现代层状火山维苏威火山和马荣火山高度相似。其中,维苏威火山的岩性组合由粗面岩和粗安岩构成(图8a),马荣火山则以安山岩为主导,均具备爆发-溢流交替喷发机制。

结合龙口7-A构造的LK7-A-x井资料研究发现(图8b),1号机构岩性表现为“下部流纹岩(爆发相)+上部粗安岩(溢流相)”的组合(图8c),符合中-酸性岩浆(SiO_2 含量52%~63%)爆发-溢流交替喷发模式^[28]。储层空间上,岩性组合集中于火山通道相的隐爆角砾岩原生孔隙带^[68]。该类机构受渤海海域中生代NE向断裂带控制,岩浆沿裂隙式通道喷发形成“熔岩-碎屑岩互层”结构,岩性组合受喷发期次和构造剥蚀双重改

造,最终定格为现今特征。

4.2.2 龙口7-A构造6号穹丘火山机构岩性组合预测

未打井的6号火山机构经恢复后,其形态参数为基底直径约6.5 km、高度约2.0 km、纵/横比0.31及坡度约40°,地震相表现为“陡丘状强反射+内部杂乱结构”特征。基于已构建的火山机构类型判别模型,判定6号火山机构为熔岩穹丘。

结合区域岩浆演化规律,推测其岩性可能以安山岩-英安岩为主,成因上受高黏度酸性岩浆侵出作用控制。考虑到该机构体积较大,推测其可能属于复合成因熔岩穹丘,形态特征与圣海伦斯火山熔岩穹丘较为吻合^[44]。预测其岩性以酸性爆发相和溢流相为主,

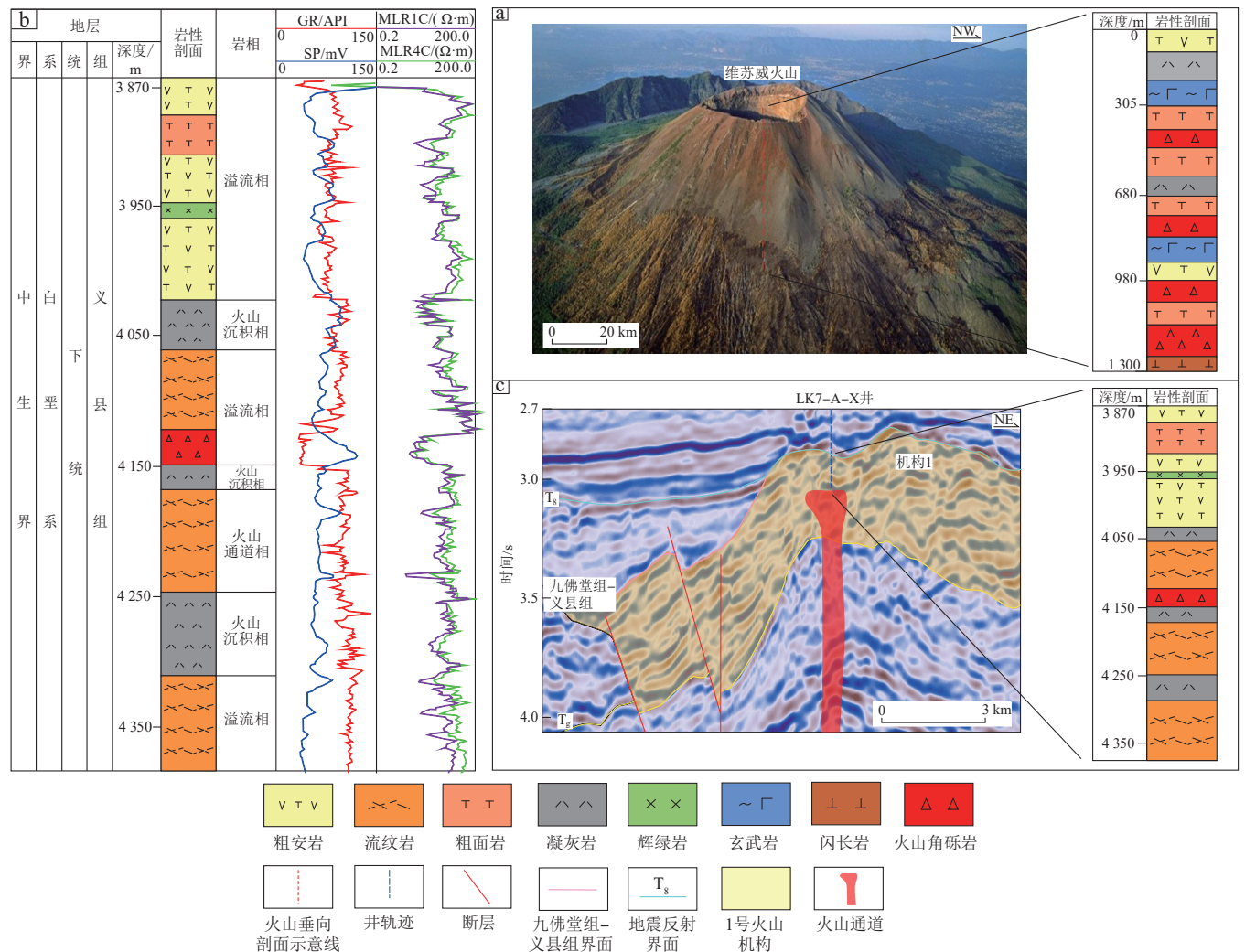


图8 渤海湾盆地渤东低凸起龙口7-A构造1号火山机构岩性组合与现代火山类比

Fig. 8 Lithologic assemblages of No. 1 volcanic edifice in Longkou 7-A structure in Bodong Low Uplift of Bohai Bay Basin and its analogy with modern volcanoes

a. 维苏威火山及其岩性组合;b. LK7-A-X井地层综合柱状图;c. 1号火山机构已揭露岩性组合

可能叠加中-酸性安山岩夹层。该类机构有利储层主要发育于顶部风化壳(孔隙度为15%~20%)和冷凝收缩裂隙带,但其储集性能通常需后期构造裂缝的进一步改造才能提升^[27, 69]。

5 结论

1) 建立“机构类型-岩性组合”预测模型,明确龙口7-A构造中生代火山机构以层状火山和熔岩穹丘为主要类型。其中,层状火山对应粗安岩与流纹岩互层或安山岩为主的组合(已钻井验证),熔岩穹丘以块状流纹岩为主(6号火山机构预测结果)。

2) 提出“构造趋势法+平衡剖面”联合恢复技术以定量反演渤东低凸起龙口7-A构造埋藏火山机构的原始形态,并基于全球现代火山规模参数,构建包含基底直径、高度、纵横比、坡度和体积等5项指标的火山机构类型定量判别体系,结合蛛网图模型实现对该构造中生代火山机构类型的判定,为火山岩有利储层勘探指明方向。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 马代鑫,任宪军,赵密福,等. 火山岩气藏勘探开发理论与技术——以松南断陷白垩系火山岩为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(2): 167-175.
MA Daixin, REN Xianjun, ZHAO Mifu, et al. Theories, technologies and practices of exploration and development of volcanic gas reservoirs: A case study of Cretaceous volcanic rocks in Songnan fault depression [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(2): 167-175.
- [3] 吴磊,徐怀民,季汉成,等. 松辽盆地杏山地区深部火山岩有利储层的控制因素及分布预测[J]. 现代地质, 2005, 19(4): 585-595.
WU Lei, XU Huaimin, JI Hancheng, et al. Controlling factors and distribution prediction of deep-buried favorable volcanic reservoir in the Xingshan area of Songliao Basin [J]. Geoscience, 2005, 19(4): 585-595.
- [4] 牛月萌,韩俊,余一欣,等. 塔里木盆地顺北西部地区火成岩侵入体发育特征及其与断裂耦合关系[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 231-242.
NIU Yuemeng, HAN Jun, YU Yixin, et al. Igneous rock intrusions in the western Shunbei area, Tarim Basin: Characteristics and coupling relationships with faults [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 231-242.
- [5] 李瑞磊,杨立英,朱建峰,等. 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, 2023, 30(4): 100-111.
LI Ruilei, YANG Liying, ZHU Jianfeng, et al. Volcanic reservoir characteristics and hydrocarbon accumulation control factors of rift depressions in southern Songliao Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 100-111.
- [6] 文龙,李亚,易海永,等. 四川盆地二叠系火山岩岩相与储层特征[J]. 天然气工业, 2019, 39(2): 17-27.
WEN Long, LI Ya, YI Haiyong, et al. Lithofacies and reservoir characteristics of Permian volcanic rocks in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(2): 17-27.
- [7] 赵艾琳,赖强,樊睿琦,等. 基性火山岩核磁共振响应机理及孔隙结构评价方法——以四川盆地西南部二叠系峨眉山玄武岩组为例[J]. 岩性油气藏, 2025, 37(3): 153-164.
ZHAO Ailin, LAI Qiang, FAN Ruiqi, et al. Study on NMR response mechanism and pore structure evaluation method of basic volcanic rock: A case study of Permian Emeishan Basalt Formation in southwestern Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2025, 37(3): 153-164.
- [8] 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 Caineng, ZHAO Wenzhi, JIA Chengzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257-271.
- [9] FENG Zhiqiang. Volcanic rocks as prolific gas reservoir: A case study from the Qingshen Gas Field in the Songliao Basin, NE China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(4/5): 416-432.
- [10] 佟欢,朱世发,崔航,等. 渤海湾盆地桩海地区古近系沙河街组一段-二段混积岩优质储层特征与控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1106-1120.
TONG Huan, ZHU Shifa, CUI Hang, et al. Characteristics and controlling factors of high-quality reservoirs of mixed siliciclastic-carbonate sediments in the 1st to 2nd members of the Paleogene Shahejie Formation, Zhuanghai area, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1106-1120.
- [11] 冯志强. 松辽盆地庆深大型气田的勘探前景[J]. 天然气工业, 2006, 26(6): 1-5, 153.
FENG Zhiqiang. Exploration potential of Qingshen Gas Field in the Songliao Basin [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(6): 1-5, 153.
- [12] STAGPOOLE V, FUNNELL R. Arc magmatism and hydrocarbon generation in the northern Taranaki Basin, New Zealand [J]. Petroleum Geoscience, 2001, 7(3): 255-267.
- [13] POLYANSKY O P, REVERDATTO V V, KHOMENKO A V, et al. Modeling of fluid flow and heat transfer induced by basaltic near-surface magmatism in the Lena-Tunguska petroleum basin (Eastern Siberia, Russia) [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2003, 78/79: 687-692.
- [14] 衣健,王璞珺,唐华风,等. 火山地层界面的地质属性、地质内涵和储层意义——以中国东北地区中生代-新生代火山岩为例[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 324-336.

- YI Jian, WANG Pujun, TANG Huafeng, et al. Geological property, geological connotation and reservoir significance of volcano stratigraphic boundary: A case study of the Mesozoic & Cenozoic volcanic rocks in northeastern China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(3): 324-336.
- [15] WANG Pujun, CHEN Chongyang, ZHANG Ying, et al. Characteristics of volcanic reservoirs and distribution rules of effective reservoirs in the Changling fault depression, Songliao Basin[J]. *Natural Gas Industry B*, 2015, 2(5): 440-448.
- [16] 许方哲, 朱建峰, 刘玉虎, 等. 长岭断陷查干花次凹火山岭组火山岩喷发模式新认识[J]. *新疆石油地质*, 2024, 45(5): 533-540.
- XU Fangzhe, ZHU Jianfeng, LIU Yuhu, et al. New insights into eruption model of Huoshiling formation volcanic rocks in Chaganhua subsag of Changling fault depression[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2024, 45(5): 533-540.
- [17] 赵海玲, 黄微, 王成, 等. 火山岩中脱玻化孔及其对储层的贡献[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(1): 47-52, 58.
- ZHAO Hailing, HUANG Wei, WANG Cheng, et al. Micropores from devitrification in volcanic rocks and their contribution to reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(1): 47-52, 58.
- [18] 赵玉婷, 单玄龙, 王璞珺, 等. 松辽盆地白垩系营城组火山岩脱玻化作用及其储层意义——以盆缘剖面为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(6): 1152-1158.
- ZHAO Yuting, SHAN Xuanlong, WANG Pujun, et al. Devitrification of the volcanic rocks of the Cretaceous Yingcheng Formation in the Songliao Basin and its reservoir significance: An example from a basin boundary section[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(6): 1152-1158.
- [19] 叶涛, 韦阿娟, 祝春荣, 等. 渤海海域基底“改造型火山机构”特征及油气成藏意义[J]. *石油学报*, 2016, 37(11): 1370-1380, 1434.
- YE Tao, WEI Ajuan, ZHU Chunrong, et al. Characteristics and hydrocarbon accumulation significance of reformed volcanic edifice in the basement of Bohai Sea[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(11): 1370-1380, 1434.
- [20] 唐华凤, 王璞珺, 姜传金, 等. 松辽盆地白垩系营城组隐伏火山机构物理模型和地震识别[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 530-536.
- TANG Huafeng, WANG Pujun, JIANG Chuanjin, et al. Physical model and seismic recognition of concealed volcanic edifices of Yingcheng Formation in Songliao Basin, Cretaceous, NE China[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(2): 530-536.
- [21] 王璞珺, 郑常青, 舒萍, 等. 松辽盆地深层火山岩岩性分类方案[J]. *大庆石油地质与开发*, 2007, 26(4): 17-22.
- WANG Pujun, ZHENG Changqing, SHU Ping, et al. Classification of deep volcanic rocks in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(4): 17-22.
- [22] 张新涛, 张藜, 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.
- [23] 朱博含, 单玄龙, 衣健, 等. 基于机器学习的火山岩识别方法及应用[J]. *特种油气藏*, 2024, 31(5): 41-49.
- ZHU Bohan, SHAN Xuanlong, YI Jian, et al. Volcanic rock identification method based on machine learning and its application[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024, 31(5): 41-49.
- [24] 连丽霞, 刘汉青, 王剑, 等. 风化壳型火山岩储层特征及其主控因素——以准噶尔盆地1井西凹陷周缘石炭系为例[J]. *断块油气田*, 2025, 32(4): 605-613.
- LIAN Lixia, LIU Hanqing, WANG Jian, et al. Characteristics and main controlling factors of weathering crust volcanic reservoir: A case study of Carboniferous around west depression of Well Pen 1 in Junggar Basin as an example[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2025, 32(4): 605-613.
- [25] 郭颖, 王粤川, 韦阿娟, 等. 潜山内幕火山岩储层特征及控制因素——以渤海海域秦皇岛30A地区白垩系为例[J]. *沉积学报*, 2017, 35(2): 343-357.
- GUO Ying, WANG Yuechuan, WEI Ajuan, et al. Characteristics and controlling factors of buried-hill inner volcanic reservoir: An example from the Cretaceous in Qinhuangdao 30A area, offshore Bohai sea, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(2): 343-357.
- [26] 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.
- [27] 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]. *地球科学*, 2025, 50(2): 388-404.
- 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]. *Earth Science*, 2025, 50(2): 388-404.
- [28] 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.
- [29] MA Lichi, SONG Mingshui, WANG Yongshi, et al. Exploration progress of the Paleogene in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Energy Geoscience*, 2023, 4(1): 42-50.
- [30] 徐长贵, 王昕, 杨海风, 等. 渤海海域渤中凹陷中生界超深层火山岩潜山天然气勘探发现及意义[J]. *石油学报*, 2025, 46(5): 843-856, 908.
- XU Changgui, WANG Xin, YANG Haifeng, et al. Natural gas exploration of Mesozoic ultra-deep volcanic buried hills in Bozhong

- sag of Bohai Sea and its significance [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(5): 843–856, 908.
- [31] 李宁, 李瑞磊, 苗贺, 等. 松辽盆地深层中-基性火山岩有利相带及储层“甜点”逐级识别[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(3): 801–815.
- LI Ning, LI Ruilei, MIAO He, et al. Stepwise identification of favorable facies belts and reservoir sweet spots of deep intermediate-basic volcanic rocks in the Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(3): 801–815.
- [32] 桂诗琦, 罗群, 曾联波, 等. 走滑断裂内部结构差异特征及其多尺度交互识别模式——以准噶尔盆地车排子凸起石炭系火山岩为例[J]. *石油实验地质*, 2025, 47(5): 1150–1162.
- GUI Shiqi, LUO Qun, ZENG Lianbo, et al. Differential characteristics of internal structures of strike-slip faults and their multiscale interactive identification mode: A case study of Carboniferous volcanic rocks in Chepaizi Uplift, Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2025, 47(5): 1150–1162.
- [33] 滕长宇, 邹华耀, 郝芳. 渤海湾盆地构造差异演化与油气差异富集[J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 44(4): 579–590.
- TENG Changyu, ZOU Huayao, HAO Fang. Control of differential tectonic evolution on petroleum occurrence in Bohai Bay Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 44(4): 579–590.
- [34] 施宁, 刘敬寿, 张冠杰, 等. 基底变质岩深部潜山储层构造裂缝发育特征及主控因素——以渤海湾盆地渤中B区块为例[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(4): 799–811.
- SHI Ning, LIU Jingshou, ZHANG Guanjie, et al. Characteristics and main controlling factors of structural fracture development in deep buried hill reservoirs of basement metamorphic rocks: A case study of B block, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(4): 799–811.
- [35] 樊佐春. 渤海湾盆地大民屯凹陷沈84-安12区块沙河街组三段储层特征及主控因素[JOL]. *大庆石油地质与开发*: 1–8 [2025-09-01]. <https://doi.org/10.19597/J. ISSN. 1000-3754. 202406021>.
- FAN Zuochun. Reservoir characteristics and main controlling factors of the third member of Shahejie Formation in Shen84-An12 block of Damintun sag in Bohai Bay Basin [JOL]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*: 1–8 [2025-09-01]. <https://doi.org/10.19597/J. ISSN. 1000-3754. 202406021>.
- [36] 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.
- [37] 娄瑞, 孙永河, 张中巧. 渤海湾盆地渤南低凸起西段低角度正断层分段生长特征及其油气地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(3): 710–721.
- LOU Rui, SUN Yonghe, ZHANG Zhongqiao. Segmented growth of low-angle normal faults in the western Bonan swell, Bohai Bay Basin and its petroleum geological significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(3): 710–721.
- [38] YE Tao, CHEN Anqing, NIU Chengming, et al. Effective fractures linked with tectonic reactivation and multiple genetic fluids in the ultradeep Paleozoic carbonate buried hills of the Bozhong Sag, North China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 140: 105642.
- [39] 许廷生. 渤海湾盆地岩浆侵入活动与油气成藏特征[J]. *特种油气藏*, 2021, 28(1): 81–85.
- XU Tingsheng. Research on the magmatic intrusion and oil and gas reservoir forming characteristics in Bohai Bay Basin [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2021, 28(1): 81–85.
- [40] 薛永安, 王奇, 牛成民, 等. 渤海海域渤中凹陷渤中19-6深层潜山凝析气藏的充注成藏过程[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 891–902.
- XUE Yongan, WANG Qi, NIU Chengmin, et al. Hydrocarbon charging and accumulations of BZ19-6 gas condensate field in deep buried hills of Bozhong Depression, Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 891–902.
- [41] 孟凡超, 秦丽媛, 王扬州, 等. 华北克拉通中生代幔源岩浆岩放射性元素生热率的时空差异与主控因素[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(1): 36–45.
- MENG Fanchao, QIN Liyuan, WANG Yangzhou, et al. Temporal-spatial differences and controlling factors in radioactive heat generation rates of Mesozoic mantle--derived magmatic rocks in the North China Craton [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2024, 48(1): 36–45.
- [42] 杨飞, 刘娟霞, 孙言啟, 等. 渤海海域中生界火山岩潜山有效储层特征及控制因素[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2025, 40(2): 33–41.
- YANG Fei, LIU Juanxia, SUN Yanqi, et al. Characteristics and control factors of effective reservoirs in Mesozoic volcanic buried hill of the Bohai Sea area [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2025, 40(2): 33–41.
- [43] TANG Jie, XU Wenliang, WANG Feng, et al. Subduction history of the Paleo-Pacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic-Paleogene magmatic records in Northeast Asia [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(5): 527–559.
- [44] 金春爽, 乔德武, 谈伟宁. 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.
- [45] 张参, 官大勇, 王明臣, 等. 渤海海域渤东低凸起中南段构造演化与油气成藏[J]. *东北石油大学学报*, 2014, 38(6): 68–75.
- ZHANG Can, GUAN Dayong, WANG Mingchen, et al. Structure evolution and oil & gas accumulation of middle-southern part of Bodong low uplift in Bohai sea waters [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2014, 38(6): 68–75.
- [46] 金浩, 马劲风, 李琳, 等. 渤东低凸起南段地层压力预测方法研究[J]. *地球物理学进展*, 2024, 39(2): 788–799.
- JIN Hao, MA Jinfeng, LI Lin, et al. Study on the prediction method of formation pressure in the southern part of the Bodong low uplift [J]. *Progress in Geophysics*, 2024, 39(2): 788–799.
- [47] ZHANG Guoqiang, TAN Zhongjian, ZHANG Guibin, et al. A

- multi-mineral model for predicting petrophysical properties of complex metamorphic reservoirs: Case study of the Bozhong Depression, Bohai Sea [J]. *Energy Geoscience*, 2024, 5 (3): 100271.
- [48] 王昕, 陈磊, 高雁飞, 等. 渤海海域龙口7-1火山岩潜山油气勘探发现及成藏新认识[J]. *中国海上油气*, 2025, 37(2): 14-26. WANG Xin, CHEN Lei, GAO Yanfei, et al. Discovery and new understanding of oil and gas exploration in volcanic buried hill of LK7-1 in Bohai sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2025, 37 (2): 14-26.
- [49] 黄胜兵, 刘丽芳, 陈少平, 等. 渤东低凸起南段中生界火山岩潜山优质储层形成控制因素及综合预测[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(2): 26-35. HUANG Shengbing, LIU Lifang, CHEN Shaoping, et al. Controlling factors and comprehensive prediction for the formation of Mesozoic high quality volcanic buried hill reservoirs in the southern part of Bodong low uplift [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(2): 26-35.
- [50] 张宏国, 王昕, 鲁凤婷, 等. 渤海中部中生界火山岩储层研究及靶区预测[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 37 (5): 47-54. ZHANG Hongguo, WANG Xin, LU Fengting, et al. Research and targets prediction of mesozoic volcanic reservoir in central Bohai Sea area [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2015, 37(5): 47-54.
- [51] 徐长贵, 杨海风, 陈磊, 等. 渤海湾盆地渤东低凸起中生界火山岩勘探突破及油气成藏条件[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52 (3): 537-550. XU Changgui, YANG Haifeng, CHEN Lei, et al. Exploration breakthrough and hydrocarbon accumulation conditions of Mesozoic volcanic rocks in Bodong low uplift, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52 (3): 537-550.
- [52] PIKE R J, CLOW G D. Revised classification of terrestrial volcanoes and catalog of topographic dimensions, with new results of edifice volume: Open-File Report 81-1038 [R]. Reston, VA: U. S. Geological Survey, 1981.
- [53] 黄玉龙, 王璞珺, 冯志强, 等. 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)*, 2007, 37(1): 65-72. HUANG Yulong, WANG Pujun, FENG Zhiqiang, et al. Analogy of volcanic edifices between modern volcanoes and ancient remnant volcanoes in Songliao Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(1): 65-72.
- [54] SIEBERT L, COTTRELL E, VENZKE E, et al. Chapter 12—Earth's volcanoes and their eruptions: An overview [M]// SIGURDSSON H. *The Encyclopedia of Volcanoes*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2015: 239-255.
- [55] GROSSE P, EUILLADES P A, EUILLADES L D, et al. A global database of composite volcano morphometry [J]. *Bulletin of Volcanology*, 2013, 76(1): 784.
- [56] DE SILVA S, LINDSAY J M. Chapter 15—primary volcanic landforms [M]//SIGURDSSON H. *The Encyclopedia of Volcanoes*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2015: 273-297.
- [57] CAS R A F, WRIGHT J V. *Volcanic successions modern and ancient* [M]. Dordrecht: Springer, 1988.
- [58] SETTLE M. The structure and emplacement of cinder cone fields [J]. *American Journal of Science*, 1979, 279(10): 1089-1107.
- [59] FINK J H, MALIN M C, ANDERSON S W. Intrusive and extrusive growth of the Mount St Helens lava dome [J]. *Nature*, 1990, 348(6300): 435-437.
- [60] 李法坤, 戴黎明, 杜晓东, 等. 构造-沉积耦合过程的数值模拟: 以南海北部阳江凹陷为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(5): 139-150. LI Fakun, DAI Liming, DU Xiaodong, et al. Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(5): 139-150.
- [61] 杨宇琛. 基于3Dmove的郯庐断裂带MXN洼段三维构造建模及其演化分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2023. YANG Yuchen. 3D structural modeling and evolution analysis of MXN sag segment of Tanlu Fault zone based on 3Dmove [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023.
- [62] BROWN S K, CROSWELLER H S, SPARKS R S J, et al. Characterisation of the quaternary eruption record: Analysis of the large magnitude explosive volcanic eruptions (LaMEVE) database [J]. *Journal of Applied Volcanology*, 2014, 3(1): 5.
- [63] SUZUKI T. Volcano types and their global population percentages [J]. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, Second Series, 1977, 22(1): 27-40.
- [64] GROSSE P, KERVYN M. Morphometry of terrestrial shield volcanoes [J]. *Geomorphology*, 2018, 304: 1-14.
- [65] WOOD C A. Morphometric evolution of cinder cones [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1980, 7(3/4): 387-413.
- [66] ZÁVADA P, KRATINOVÁ Z, KUSBACH V, et al. Internal fabric development in complex lava domes [J]. *Tectonophysics*, 2009, 466(1/2): 101-113.
- [67] CALDER E S, LAVALLEE Y, KENDRICK J E, et al. Chapter 18—lava dome eruptions [M]//SIGURDSSON H. *The Encyclopedia of Volcanoes*. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 2015: 343-362.
- [68] 王晨杰, 张新涛, 徐春强, 等. 渤中凹陷北部中生界火山岩储层发育特征及主控因素[J]. *中国海上油气*, 2021, 33(3): 48-57. WANG Chenjie, ZHANG Xintao, XU Chunqiang, et al. Development characteristics and main controlling factors of Mesozoic volcanic reservoirs in northern Bozhong sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2021, 33(3): 48-57.
- [69] LI Jijun, LUO Chenghong, YANG Tianhong, et al. Control of volcanic lithofacies on play fairways: A case study of the Huoshiling Formation in the Dehui faulted depression, southern Songliao Basin, China [J]. *Energy Geoscience*, 2025, 6 (2): 100391.