

刘翔宇,单玄龙,衣健,等. 渤海湾盆地渤中凹陷义县组火山喷发旋回及其分布规律. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 1829-1845. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240230.

Liu Xiangyu, Shan Xuanlong, Yi Jian, et al. Volcanic Eruption Cycle and Distribution of Yixian Formation in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1829-1845. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240230.

渤海湾盆地渤中凹陷义县组火山喷发旋回及其分布规律

刘翔宇, 单玄龙, 衣健, 苏思远, 李嘉慧, 庞赫, 邹玉洁

吉林大学地球科学学院, 长春 130061

摘要:渤海湾盆地渤中凹陷义县组火山岩分布范围广, 地层结构复杂, 横向变化快, 其火山喷发旋回的划分对研究火山岩空间展布特征和指导油气开发具有重要的意义。基于渤海湾盆地渤中凹陷义县组 38 口钻遇火山岩层系的岩心、壁心薄片、锆石 U-Pb 测年等地质资料以及测井和地震资料, 综合利用火山地层学方法及地震火山地层学理论, 对火山喷发旋回、火山岩分布及其与断裂的关系以及火山喷发旋回的油气地质意义开展研究。结果表明: 1) 渤海湾盆地渤中凹陷义县组火山岩可划分为 3 个旋回, 旋回一为基性旋回, 主要发育玄武岩、玄武质凝灰岩, 平均钻遇厚度为 189 m, 火山岩喷发时间为 128~122 Ma; 旋回二为中性旋回, 主要发育安山岩、粗安岩, 平均钻遇厚度为 232 m, 火山岩喷发时间为 122~115 Ma; 旋回三为酸性旋回, 主要发育流纹岩、隐爆角砾岩, 平均钻遇厚度为 241 m, 火山岩喷发时间为 115~114 Ma。2) 旋回一火山岩在渤中凹陷内分布最广, 仅渤南低凸起、石白坨凸起和渤东低凸起北段缺失该地层, 其分布主要受燕山期走滑断裂控制, 以裂隙式喷发为主; 旋回二火山岩在渤中凹陷内大面积分布, 仅渤南低凸起、石白坨凸起主体以及渤东凹陷内缺失该地层, 其分布主要受燕山期走滑断裂以及 NWW 向印支期先存断裂控制, 以中心式喷发为主; 旋回三酸性火山岩在渤中凹陷内分布面积显著缩小, 在渤中凹陷北段大面积缺失该地层, 其分布主要受燕山期走滑断裂以及部分 NWW 向印支期先存断裂控制, 以中心式喷发为主。3) 本区旋回二与旋回三火山岩具有较好的储层物性特征, 且油气显示效果良好, 可作为渤海域渤中凹陷义县组火山岩油气藏勘探的有利层位。

关键词:渤海湾盆地; 渤中凹陷; 白垩系; 义县组火山岩; 旋回划分; 地层分布; 锆石 U-Pb 测年; 火山岩油气藏

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20240230

中图分类号: P618.13; P588.14

文献标志码: A

Volcanic Eruption Cycle and Distribution of Yixian Formation in Bozhong Sag, Bohai Bay Basin

Liu Xiangyu, Shan Xuanlong, Yi Jian, Su Siyuan, Li Jiahui, Pang He, Zou Yujie

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

收稿日期: 2024-08-27

作者简介: 刘翔宇(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事矿产普查与勘探方面的研究, E-mail: 1776553007@qq.com

通信作者: 衣健(1984—), 男, 副教授, 研究生导师, 主要从事油气资源勘探方面的研究, E-mail: yijian@jlu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972313, 41790453)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (41972313, 41790453)

Abstract: The volcanic rocks of Yixian Formation in Bozhong sag of Bohai Bay basin are widely distributed, but the stratigraphic structure is complex and the lateral variation is fast. The division of volcanic eruption cycles is of great significance for studying the spatial distribution characteristics of volcanic rocks and guiding oil and gas development. Based on the geological data such as core, wall-core thin section, zircon U - Pb dating and logging and seismic data of volcanic rock strata in 38 wells, the volcanic eruption cycle, volcanic rock distribution and its relationship with faults, as well as the oil and gas geological significance of volcanic eruption cycle of Yixian Formation in Bozhong sag of Bohai Bay basin were studied by using volcanic stratigraphy method and seismic volcanic stratigraphy theory. The results show that: 1) The volcanic rocks of Yixian Formation in Bozhong sag of Bohai Bay basin can be divided into three cycles. The first cycle is a basic cycle, which mainly develops basalt and basaltic tuff. The average drilling thickness is 189 m, and the eruption time of volcanic rocks is 128 - 122 Ma. The second cycle is an intermediate cycle, which mainly develops andesite and trachyandesite. The average drilling thickness is 232 m, and the eruption time of volcanic rock is 122 - 115 Ma. The third cycle is an acidic cycle, mainly developed rhyolite and crypto-explosive breccia rocks. The average drilling thickness is 241 m, and the volcanic eruption time is 115 - 114 Ma. 2) Volcanic rocks of Cycle 1 are the most widely distributed in the Bozhong sag, and only the Bonan low uplift, Shijiutuo uplift, and the northern part of the Bodong low uplift lack the strata. Their distribution is mainly controlled by the Yanshanian strike-slip faults and is dominated by fissure eruption. Volcanic rocks of Cycle 2 are widely distributed in Bozhong sag, only Bonan low uplift, Shijiutuo uplift and Bodong sag are lack of this stratum. Its distribution is mainly controlled by strike-slip faults in Yanshanian and pre-existing faults in Indosinian in NWW direction, which is dominated by central eruption. The distribution area of the Cycle 3 acid volcanic rocks in the Bozhong sag is significantly reduced, and the formation is missing in a large area in the northern part of the Bozhong sag. Its distribution is mainly controlled by the strike-slip faults in the Yanshanian and some pre-existing faults in the NWW Indosinian. 3) The volcanic rocks of Cycle 2 and Cycle 3 in this area have good reservoir physical properties, and the oil and gas display effect is good, which can be used as a favorable horizon for the exploration of volcanic oil and gas reservoirs in Yixian Formation of Bozhong sag in Bohai basin.

Key words: Bohai Bay basin; Bozhong sag; Cretaceous; volcanic rocks of the Yixian Formation; cycle division; stratigraphic distribution; zircon U - Pb dating; volcanic oil and gas reservoirs

0 引言

火山岩作为一种重要的非常规油气储层^[1],近年来逐渐引起国内外诸多地质工作者的广泛关注。渤海油田相继发现的渤中 8 - 3S、秦皇岛 30、旅大 25、428W 等多个中生界火山岩油气藏,展现了渤海海域中生界火山岩的巨大潜力^[2-4]。火山岩油气勘探的首要任务是寻找火山岩储层^[5-6],而火山岩储层刻画与对比需要在火山地层格架约束下进行,因此在进行火山岩油气藏勘探时,首先需要建立火山地层格架^[7]。针对火山地层格架,许多学者^[7-12]提出了火山旋回划分方案。如:冀国盛等^[7]在研究金湖凹陷以熔岩流为主的火山岩时,提出了“旋回-亚旋回-岩流组-岩流单元”作为火山地层划分方案;黄玉

龙等^[8]在研究松辽盆地营城组火山岩时,提出了“旋回-期次-岩相”的三级划分方案;罗权生等^[9]在研究新疆三塘湖盆地牛东地区卡拉岗组火山岩时,提出了“旋回-亚旋回-期次-韵律-层”五级地层划分方案。在渤海湾盆地中生界火山岩地层的精细刻画中,王五力等^[10]通过对义县组标准地层剖面的建立和研究,将义县组火山岩划分为基性、中基性、中性、中酸性 4 个亚旋回;邢德和等^[11]通过辽宁北票义县组的野外露头调研,认为火山活动具有基性-中性-酸性的演化特征;吴庆勋等^[12]利用“旋回-期次-岩相”三级分类方案,将渤海湾盆地中生界火山岩划分为 3 个旋回和 3 个亚旋回。以上研究利用了不同方案对火山旋回进行划分,但仍存在如下问题亟待解决:首先,对盆缘露头^[10-11,13]的研究不能准确地反映

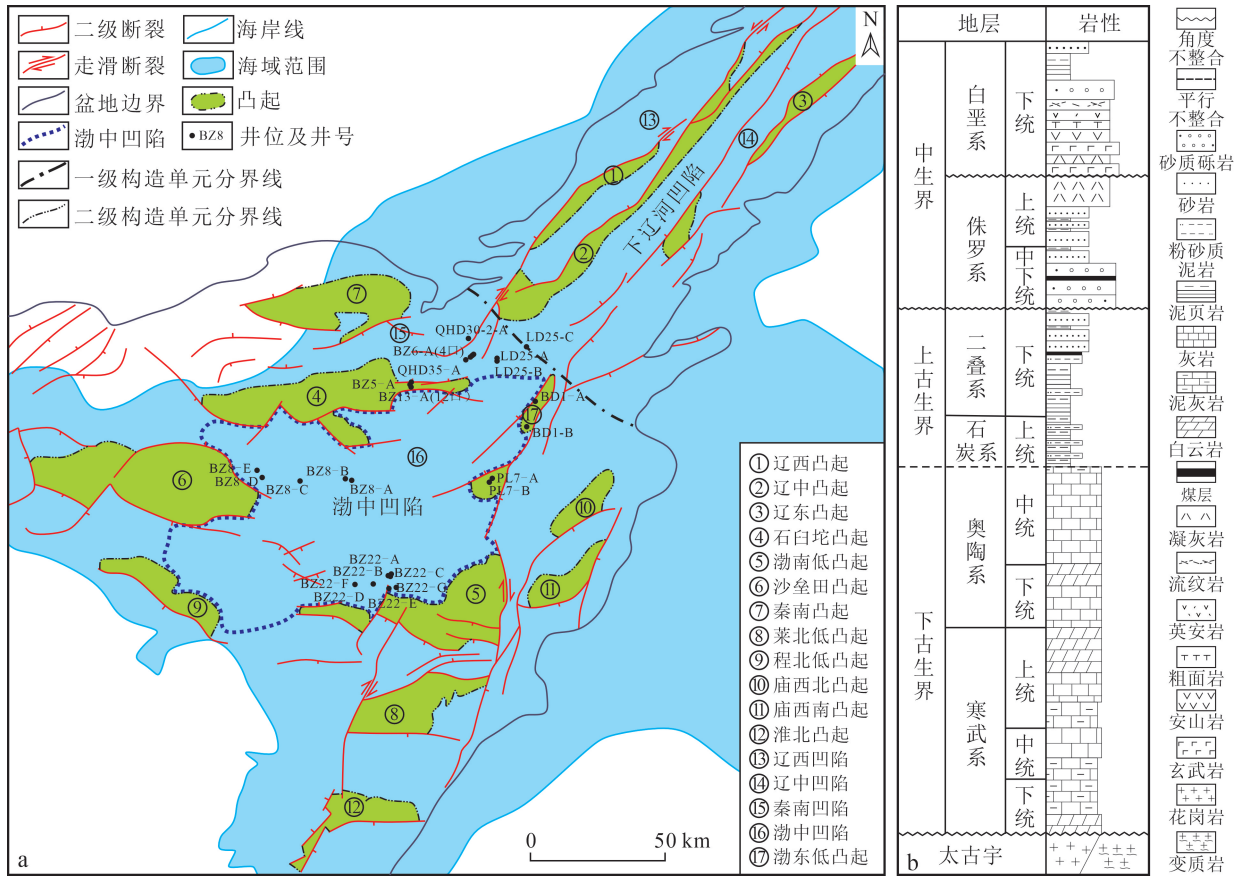
盆地内火山旋回变化特征;其次,对盆内的划分方案主要针对整个渤海湾盆地中生界^[12],未对渤中凹陷义县组组内旋回进行系统划分;最后,由于未对旋回进行地震解释,不同旋回火山岩的空间分布不明。

笔者基于渤中凹陷内 38 口钻遇火山岩层系的岩心、壁心薄片、锆石 U-Pb 年龄等地质资料以及测井和三维地震资料,依据火山地层学方法及地震火山地层学理论,通过火山地层喷发间断不整合界面识别^[14-15],研究渤中凹陷义县组火山喷发旋回,以期明确火山岩分布与断裂的关系,阐述火山喷发旋回的油气地质意义。

1 区域地质概况

渤海湾盆地位于华北克拉通东部,面积超过 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$,包括海域和陆地两部分,其中海域面积为 $4.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,是典型的中-新生代裂谷盆

地^[16-18]。渤中凹陷位于渤海湾盆地东部海域,东临渤东低凸起,西与沙垒田凸起相接,北依石白坨凸起,南至渤南低凸起,面积约为 $8\ 600 \text{ km}^2$ ^[19],是渤海湾盆地的沉积中心,沉积厚度大,生烃物质基础雄厚,是最大的富烃凹陷^[20-21](图 1a)。其基底由太古宇、下古生界和上古生界等多套地层构成(图 1b)。其中:太古宇主要为变质岩系,发育混合花岗岩、混合片麻等多种岩性;古生界主要为多套稳定的海陆交互相和海相沉积地层,岩性以白云岩、灰岩、砂泥岩及煤层为主^[22-23]。中生代时期受扬子板块碰撞挤压以及伊泽奈崎板块俯冲作用影响,区内相继发生多次岩浆活动,其形成的火山岩广泛分布在渤海海域^[24]。其中义县组火山岩最为发育,是本次研究主要的目的层位,岩性主要为玄武岩、安山岩、粗面岩、英安岩、流纹岩等火山熔岩以及凝灰岩等^[19]。



据文献[18]修改。

图 1 渤海湾盆地海域油区构造纲要图(a)和潜山地层综合柱状图(b)

Fig.1 Structural outline of offshore oil area in Bohai Bay basin (a) and comprehensive stratigraphic column chart of buried hill strata (b)

2 旋回划分依据

2.1 岩性岩相组合

岩性岩相组合的变化反映了岩浆长时间分异演化作用,这中间必然存在长时间喷发间断,可作为旋回划分依据^[25]。通过连井对比发现:义县组不同旋回具有不同的岩性岩相组合,旋回一主要发育玄武岩、玄武质凝灰岩,岩相多为溢流相、爆发相和火山沉积相;旋回二多为安山岩、粗安岩,发育少量粗面岩,岩相多以溢流相、爆发相和火山通道相为主;旋回三流纹岩、隐爆角砾岩较为发育,岩相多为溢流相、火山通道相和侵入相(图 2)。

2.2 喷发间断不整合界面

喷发间断不整合界面指不同火山岩体之间由风化壳或再搬运堆积物等构成的长期喷发间断面,界面两侧火山岩岩性多不相同,产状一般不协

调^[14-15]。在渤中凹陷内,旋回一与旋回二之间存在喷发间断不整合界面,并且两套地层的反射特征不同;旋回一地震反射特征主要表现为强振幅、较连续反射;旋回二地震反射特征为弱振幅、中等一差连续性。旋回二与旋回三之间同样存在喷发间断不整合界面,不整合界面处存在明显的“下削上超”的结构组合;此外,旋回三的地震反射特征为丘行杂乱反射,强振幅,差连续性,与旋回二的地震反射特征存在显著差异(图 3)。

2.3 火山岩年代学特征

2.3.1 锆石 U-Pb 定年

锆石 U-Pb 测年样品采自于渤中凹陷及附近火山岩钻井,样品以岩屑样品为主。测年样品锆石的分选、挑选、制靶及照相均在廊坊市晨硕岩矿检测技术服务有限公司完成;锆石 U-Pb 同位素定年和微量元素质量分数测试在武汉上谱分析科技有限责

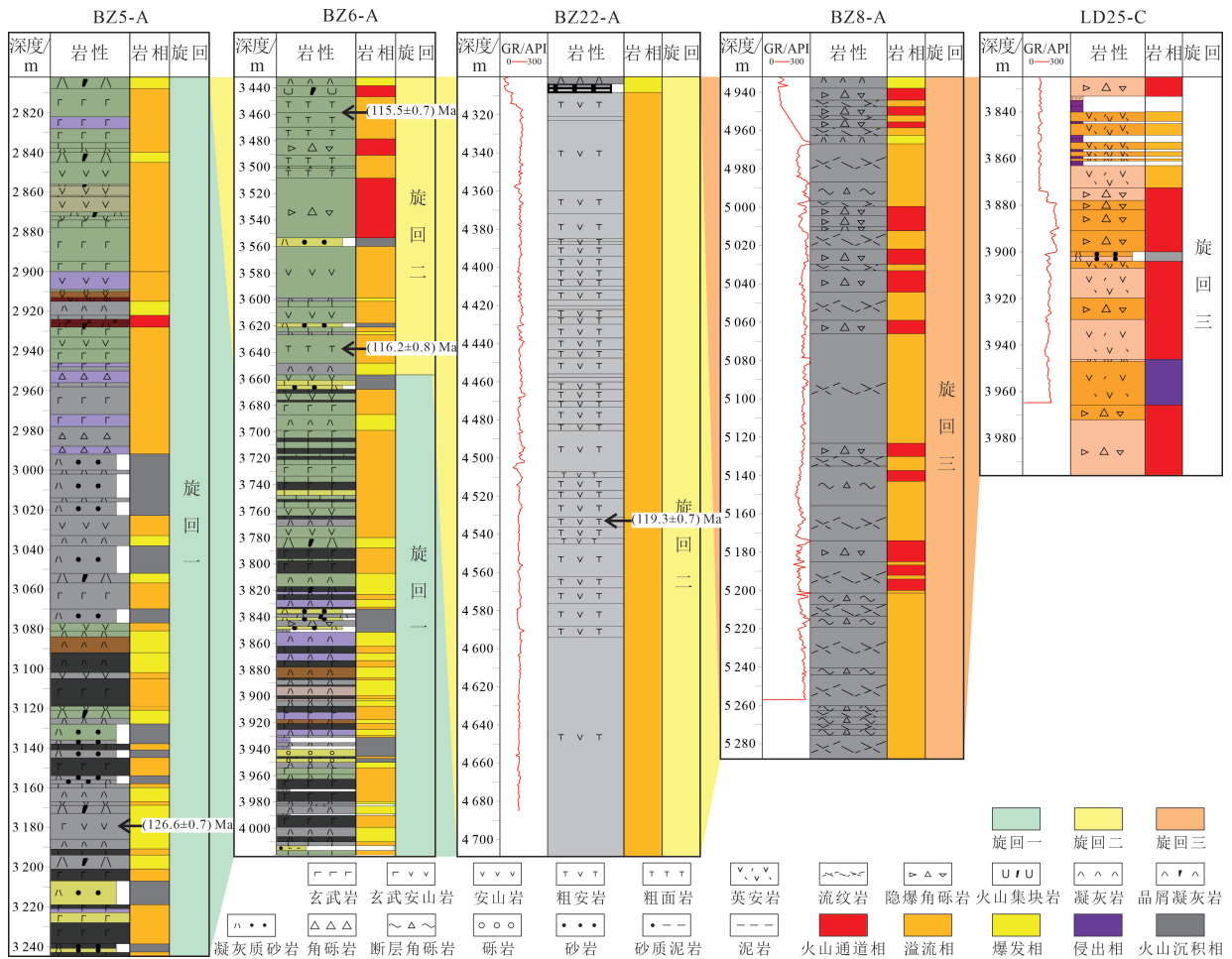


图 2 渤中凹陷义县组连井对比图

Fig.2 Comparison of borehole connection in Yixian Formation of Bozhong sag

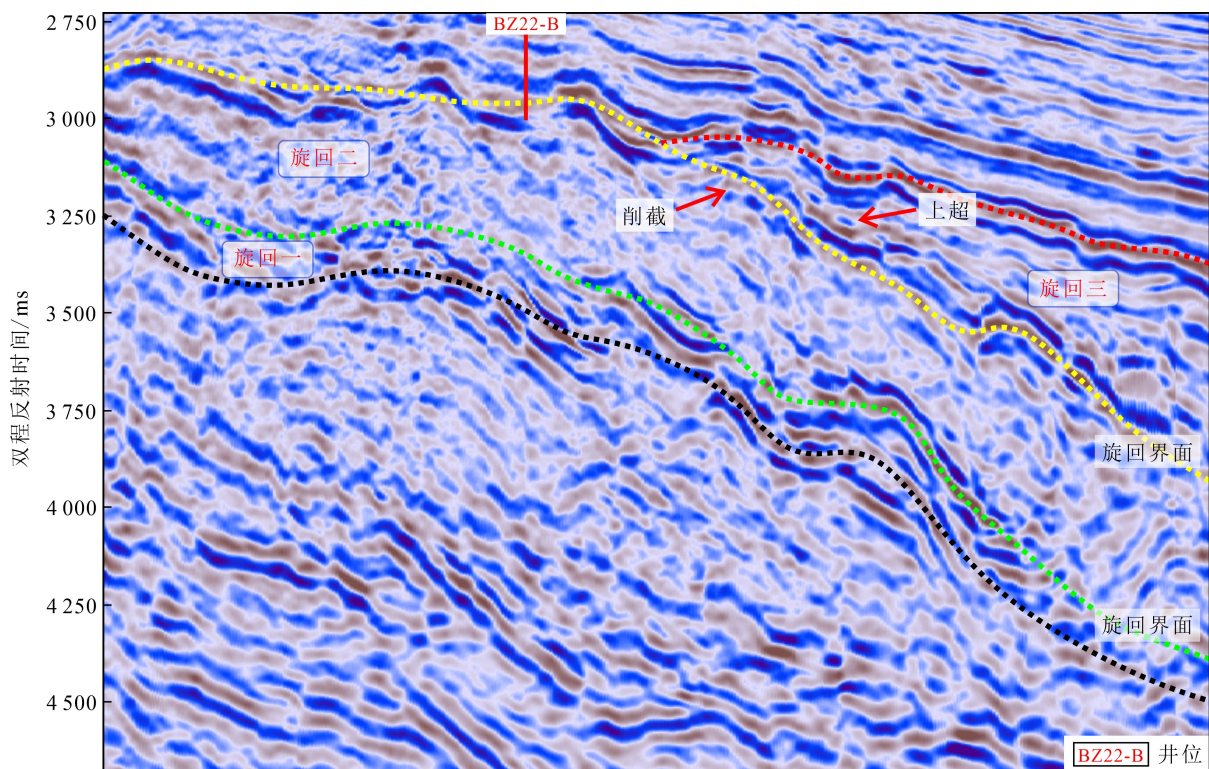


图3 旋回不整合面划分依据

Fig.3 Basis for the division of cyclic unconformity

任公司利用 LA-ICP-MS 分析完成。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7900。本次分析的激光斑斑和频率分别为 $24\ \mu\text{m}$ 和 $6\ \text{Hz}$ 。U-Pb 同位素定年和微量元素质量分数处理中, 分别采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标进行同位素和微量元素分馏校正。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素质量分数及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal^[26-27] 完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 软件^[28] 完成。

2.3.2 定年结果

样品 1223 号采集于 BZ5-A 钻井(3 175~3 185 m), 岩性为玄武安山岩。该样品中的锆石颗粒大多为短柱状及棱角状, 锆石长轴直径为 $80\sim 110\ \mu\text{m}$, CL 图像显示锆石具有清晰的震荡环带结构, 所有锆石 Th/U 值为 $0.38\sim 1.94$, 表明其为岩浆成因^[29-33]。该组 30 个测试点中, 10 个测试点较为分散, 剩余 20 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $(129.9\pm$

$2.4)\sim(119.0\pm 1.6)\text{Ma}$ 之间, 谐和度大于 93%, 基本分布在谐和线上或附近, 其加权平均年龄为 $(126.6\pm 0.7)\text{Ma}$ (MSWD=3.5, $n=20$), 代表了玄武质安山岩的喷出年龄(图 4a, 表 1)。

样品 1219、1220 号分别采集于 BZ6-A 钻井 3 450~3 470 m 与 3 630~3 645 m 深度段, 岩性为粗安岩。该样品中的锆石颗粒大多为短柱状及长柱状, 锆石长轴直径为 $70\sim 120\ \mu\text{m}$, CL 图像显示锆石具有清晰的震荡环带结构, 所有锆石 Th/U 值为 $0.21\sim 1.43$, 表明其为岩浆成因。样品 1219 号共 30 个测试点中, 16 个测试点较为分散, 剩余 14 个测试点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄基本都分布在谐和线附近, 谐和度大于 93%, 其加权平均年龄为 $(115.5\pm 0.7)\text{Ma}$ (MSWD=1.8, $n=14$) (图 4b, 表 1); 样品 1220 号共 20 个测试点中, 7 个测试点较为分散, 剩余 13 个测试点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄基本都分布在谐和线附近, 谐和度大于 93%, 其加权平均年龄为 $(116.2\pm 0.8)\text{Ma}$ (MSWD=1.6, $n=13$), 代表了粗安岩的喷出年龄(图 4c, 表 1)。

样品 1224 号采集于 BZ22-A 钻井(4 530~4 545 m), 岩性为安山岩。该样品中的锆石颗粒大

多为短柱状, 锆石长轴直径为 $80\sim 100\ \mu\text{m}$, CL 图像显示锆石具有清晰的震荡环带结构, 所有锆石 Th/U 值为 $0.90\sim 2.17$, 表明其为岩浆成因。该组 20 个测试点中, 5 个测试点较为分散, 剩余 15 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 $(122.9\pm 3.8)\sim(112.3\pm 3.2)$ Ma 之间, 谐和度大于 93%, 基本分布在谐和线上或附近, 其加权平均年龄为 (119.3 ± 1.3) Ma (MSWD=1.6, $n=15$), 代表了英安岩的喷出年龄(图 4d, 表 1)。

在不整合界面以及岩性岩相分析的基础上, 选取各个旋回的锆石样品进行年代学研究, 结合前人研究结果来看, 基性火山岩喷发时间主要集中在 $128\sim 122$ Ma, 中性火山岩喷发时间主要集中在 $122\sim 115$ Ma, 中酸性—酸性火山岩喷发时间为

$115\sim 114$ Ma, 呈现了火山岩旋回内部岩浆由基性向酸性演化的过程(表 2)。

3 渤中凹陷义县组火山岩旋回划分及特征

综合以上岩性岩相组合、喷发间断不整合界面及年代学特征, 将渤中凹陷中生代义县组火山岩划分为 3 个旋回(图 5)。

旋回一为基性旋回, 平均钻遇厚度 189 m, 喷发时间为 $128\sim 122$ Ma, 岩性以玄武岩、玄武质凝灰岩为主, 岩相多为基性溢流相、爆发相以及火山沉积相。QHD35-A 井钻遇该旋回玄武岩, 具斑状结构, 气孔-杏仁构造, 主要由辉石和基性斜长石组成; QHD30-2-A 井钻遇该旋回火山角砾岩, 具火山

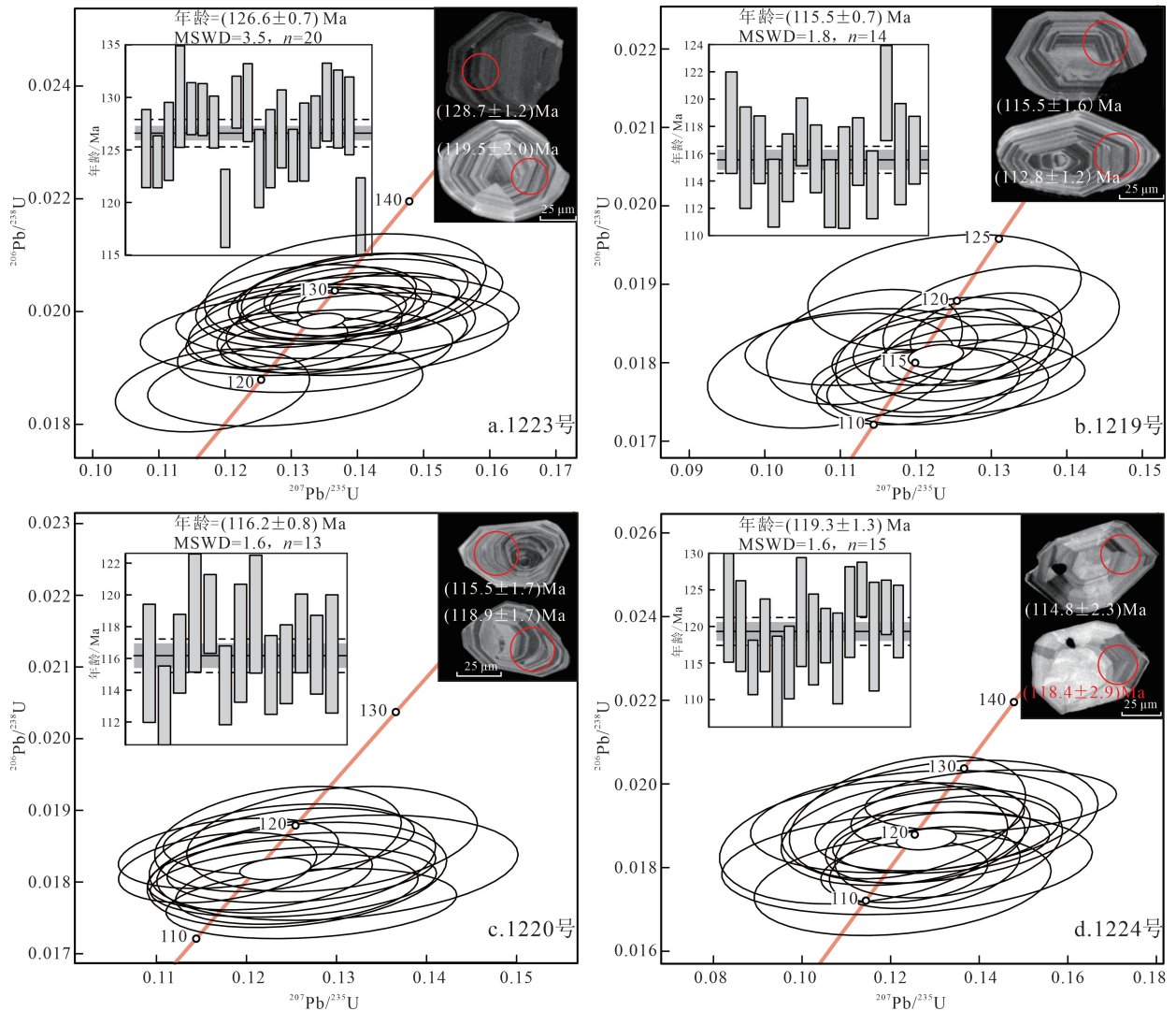


图 4 渤中凹陷义县组火山岩锆石谐和图和加权平均年龄

Fig.4 Zircon concordant map and weighted mean age of volcanic rocks from Yixian Formation in Bozhong sag

表 1 渤中凹陷义县组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of volcanic rocks in Yixian Formation, Bozhong sag

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U		同位素比值										年龄/Ma	
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	1σ	
1223-01	158	243	0.65	0.131 9	0.010 1	0.019 6	0.000 3	189.0	175.9	125.8	9.1	125.0	1.9			
1223-02	438	640	0.68	0.133 0	0.005 6	0.019 4	0.000 2	194.5	103.7	126.8	5.0	123.8	1.3			
1223-03	130	317	0.41	0.139 0	0.007 7	0.019 7	0.000 3	333.4	133.3	132.2	6.8	125.9	1.7			
1223-04	130	189	0.69	0.143 1	0.009 8	0.019 5	0.000 4	364.9	148.1	135.8	8.7	124.5	2.4			
1223-05	107	189	0.57	0.111 0	0.007 9	0.019 3	0.000 3			106.9	7.2	123.4	2.1			
1223-06	171	203	0.84	0.138 2	0.008 7	0.020 4	0.000 4	176.0	148.1	131.4	7.8	129.9	2.4			
1223-07	243	550	0.44	0.139 0	0.005 0	0.020 2	0.000 2	211.2	82.4	132.2	4.5	128.7	1.2			
1223-08	592	686	0.86	0.143 2	0.005 0	0.020 2	0.000 2	333.4	80.5	135.9	4.5	129.2	1.4			
1223-09	466	620	0.75	0.136 1	0.005 7	0.020 0	0.000 2	153.8	100.9	129.6	5.1	127.7	1.3			
1223-10	188	242	0.78	0.145 7	0.008 8	0.020 0	0.000 3	322.3	143.5	138.1	7.8	127.5	1.9			
1223-11	253	195	1.30	0.129 1	0.008 5	0.018 7	0.000 3	211.2	163.9	123.3	7.7	119.5	2.0			
1223-12	969	941	1.03	0.137 4	0.004 7	0.020 3	0.000 2	142.7	88.0	130.7	4.2	129.8	1.4			
1223-13	219	238	0.92	0.150 6	0.008 2	0.019 9	0.000 3	438.9	130.5	142.4	7.2	127.2	1.9			
1223-14	480	470	1.02	0.145 9	0.007 1	0.019 6	0.000 3	383.4	76.8	138.3	6.3	125.0	1.9			
1223-15	235	243	0.97	0.141 9	0.008 2	0.020 3	0.000 3	242.7	141.6	134.7	7.3	129.9	2.2			
1223-16	889	457	1.94	0.141 9	0.006 8	0.019 6	0.000 2	305.6	107.4	134.7	6.0	125.0	1.5			
1223-17	110	215	0.51	0.133 6	0.008 5	0.019 3	0.000 3	213.0	153.7	127.3	7.7	123.3	2.0			
1223-18	93	238	0.39	0.140 8	0.009 0	0.019 6	0.000 3	353.8	151.8	133.7	8.1	124.8	1.9			
1223-19	102	155	0.66	0.152 4	0.010 1	0.019 8	0.000 4	505.6	164.8	144.0	8.9	126.4	2.8			
1223-20	114	165	0.69	0.138 5	0.010 6	0.019 9	0.000 3	205.6	179.6	131.7	9.4	127.2	2.1			
1223-21	537	699	0.77	0.126 3	0.005 0	0.019 5	0.000 2	55.7	83.3	120.8	4.5	124.4	1.3			
1223-22	130	247	0.53	0.130 6	0.006 6	0.019 7	0.000 3	142.7	174.1	124.6	5.9	126.1	1.9			
1223-23	91	179	0.51	0.132 6	0.009 6	0.019 0	0.000 4	227.8	174.1	126.4	8.6	121.5	2.2			
1223-24	194	380	0.51	0.132 2	0.006 2	0.020 0	0.000 2	100.1	98.1	126.1	5.6	127.6	1.5			
1223-25	241	253	0.95	0.139 6	0.007 0	0.020 3	0.000 3	183.4	111.1	132.7	6.2	129.7	1.9			
1223-26	146	206	0.71	0.331 8	0.013 0	0.044 9	0.000 5	353.8	88.9	290.9	9.9	282.9	3.3			

续表1

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$I\sigma$	$I\sigma$			
1223-27	159	202	0.79	0.139 6	0.007 8	0.020 2	0.000 3	253.8	140.7	132.6	6.9	128.8	2.1
1223-28	175	330	0.53	0.147 8	0.007 0	0.019 6	0.000 3	405.6	105.5	140.0	6.2	125.4	1.8
1223-29	128	341	0.38	0.132 2	0.006 8	0.020 1	0.000 3	87.1	124.1	126.1	6.1	128.0	1.6
1223-30	131	324	0.41	0.118 1	0.006 0	0.018 6	0.000 3	50.1	138.9	113.4	5.4	119.0	1.6
1219-01	112	188	0.60	0.109 4	0.007 4	0.012 9	0.000 3	733.3	153.7	105.4	6.8	82.6	1.7
1219-02	772	541	1.43	0.124 1	0.005 4	0.018 2	0.000 2	183.4	107.4	118.8	4.9	116.2	1.3
1219-03	108	96	1.13	0.196 3	0.012 7	0.026 1	0.000 4	455.6	169.4	182.0	10.8	165.9	2.7
1219-04	116	555	0.21	1.960 9	0.046 2	0.172 6	0.002 4	1 255.6	38.4	1 102.2	15.9	1 026.4	13.0
1 219-05	259	354	0.73	0.131 3	0.006 4	0.018 5	0.000 3	261.2	112.9	125.3	5.7	118.4	1.6
1219-06	330	419	0.79	0.133 0	0.006 1	0.019 7	0.000 2	153.8	105.5	126.8	5.4	125.5	1.5
1219-07	498	496	1.00	0.123 2	0.004 7	0.018 2	0.000 2	168.6	91.7	118.0	4.2	116.0	1.2
1219-08	316	411	0.77	0.123 8	0.005 9	0.018 1	0.000 3	198.2	114.8	118.5	5.3	115.5	1.6
1219-09	375	476	0.79	0.122 9	0.006 0	0.017 7	0.000 2	235.3	112.0	117.7	5.4	112.8	1.2
1219-10	672	584	1.15	0.127 3	0.005 5	0.018 0	0.000 2	272.3	100.0	121.7	5.0	114.8	1.3
1219-11	857	607	1.41	0.121 0	0.005 4	0.018 5	0.000 2	76.0	113.0	116.0	4.8	118.0	1.2
1219-12	298	217	1.37	0.135 7	0.008 1	0.019 1	0.000 3	300.1	113.9	129.2	7.2	122.1	1.7
1219-13	363	695	0.52	0.128 8	0.005 0	0.017 8	0.000 2	322.3	125.0	123.0	4.5	113.9	1.4
1219-14	850	798	1.06	0.129 3	0.004 1	0.018 4	0.000 2	235.3	71.3	123.5	3.7	117.4	1.2
1219-15	664	547	1.21	0.130 3	0.005 2	0.017 8	0.000 2	342.7	88.0	124.4	4.6	113.5	1.2
1219-16	70	101	0.70	0.125 3	0.009 8	0.020 0	0.000 5	200.1	146.3	119.9	8.8	127.5	3.1
1219-17	945	724	1.31	0.123 5	0.005 0	0.018 6	0.000 2	94.5	92.6	118.3	4.5	118.8	1.3
1219-18	232	348	0.67	0.115 0	0.007 3	0.017 3	0.000 2	109.4	144.4	110.6	6.6	110.4	1.5
1219-19	310	381	0.81	0.122 6	0.005 6	0.018 1	0.000 2	150.1	103.7	117.5	5.0	115.5	1.5
1219-20	667	569	1.17	0.134 1	0.005 6	0.018 8	0.000 3	272.3	98.1	127.8	5.1	120.3	1.7
1219-21	404	463	0.87	0.120 3	0.005 5	0.017 7	0.000 2	166.8	104.6	115.4	5.0	113.3	1.5
1219-22	301	389	0.77	0.108 8	0.006 7	0.017 9	0.000 3	239.0	88.9	104.9	6.1	114.3	1.9
1219-23	552	884	0.62	0.127 7	0.004 9	0.018 2	0.000 2	239.0	88.9	122.0	4.4	116.2	1.5

续表 1

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ		
1219-24	301	366	0.82	0.045 1	0.002 2	0.118 1	0.005 7	0.019 0	0.000 3	113.3	5.1	121.4	1.7
1219-25	258	375	0.69	0.049 1	0.002 4	0.121 2	0.005 8	0.018 1	0.000 3	116.1	5.3	115.4	1.6
1219-26	192	327	0.59	0.050 5	0.003 1	0.124 3	0.007 4	0.017 8	0.000 2	137.9	6.7	114.1	1.4
1219-27	163	277	0.59	0.045 5	0.002 8	0.120 5	0.006 7	0.019 4	0.000 3	115.5	6.1	123.8	2.0
1219-28	238	364	0.66	0.047 2	0.002 8	0.123 8	0.007 4	0.018 9	0.000 3	118.6	6.7	120.6	1.7
1219-29	351	464	0.76	0.0455	0.002 3	0.113 2	0.005 3	0.018 2	0.000 3	108.9	4.9	116.2	1.6
1219-30	258	386	0.67	0.045 1	0.002 6	0.112 8	0.006 3	0.018 2	0.000 2	108.5	5.8	116.2	1.4
1220-01	415	444	0.93	0.050 6	0.002 9	0.125 6	0.006 8	0.018 1	0.000 3	120.1	6.2	115.5	1.7
1220-02	942	640	1.47	0.049 5	0.001 8	0.118 4	0.004 1	0.017 3	0.000 2	113.6	3.8	110.8	1.0
1220-03	462	505	0.91	0.052 7	0.003 0	0.127 2	0.006 6	0.017 7	0.000 2	121.6	6.0	113.2	1.4
1220-04	739	737	1.00	0.046 5	0.001 8	0.116 8	0.004 5	0.018 2	0.000 2	112.2	4.1	116.5	1.5
1220-05	335	392	0.85	0.052 2	0.003 6	0.125 2	0.008 4	0.017 4	0.000 2	119.8	7.6	111.2	1.5
1220-06	268	188	1.42	0.052 1	0.003 6	0.133 1	0.008 7	0.018 8	0.000 3	126.9	7.8	119.8	2.0
1220-07	1 374	1 014	1.35	0.048 1	0.001 8	0.111 2	0.004 0	0.016 8	0.000 2	107.1	3.6	107.1	1.1
1220-08	401	396	1.01	0.050 7	0.002 6	0.129 5	0.006 6	0.018 6	0.000 3	123.7	5.9	118.7	1.7
1220-09	440	478	0.92	0.048 9	0.002 3	0.129 1	0.005 8	0.019 2	0.000 3	123.3	5.2	122.7	1.6
1220-10	326	392	0.83	0.048 3	0.002 2	0.124 7	0.005 7	0.018 6	0.000 2	119.4	5.2	118.7	1.3
1220-11	178	323	0.55	0.055 9	0.003 3	0.135 7	0.008 0	0.017 6	0.000 3	129.2	7.2	112.6	1.7
1220-12	355	471	0.75	0.050 9	0.002 2	0.125 6	0.005 5	0.017 9	0.000 2	120.2	4.9	114.5	1.5
1220-13	198	357	0.56	0.049 9	0.002 6	0.125 1	0.006 5	0.018 3	0.000 3	119.7	5.8	116.7	1.6
1220-14	353	472	0.75	0.048 3	0.002 2	0.123 5	0.005 6	0.018 6	0.000 3	118.3	5.1	118.9	1.7
1220-15	190	382	0.50	0.050 8	0.002 8	0.125 2	0.006 5	0.018 0	0.000 2	119.7	5.8	114.8	1.5
1220-16	430	541	0.79	0.048 5	0.002 1	0.121 5	0.005 1	0.018 1	0.000 2	116.4	4.6	115.9	1.4
1220-17	384	523	0.74	0.046 7	0.002 0	0.118 0	0.005 0	0.018 4	0.000 2	113.2	4.5	117.4	1.5
1220-18	613	675	0.91	0.050 5	0.002 1	0.120 4	0.004 8	0.017 3	0.000 2	115.4	4.4	110.7	1.1
1220-19	173	329	0.52	0.050 3	0.002 6	0.126 1	0.006 1	0.018 2	0.000 2	120.6	5.5	116.3	1.5

续表 1

测点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		
1220-20	109	218	0.50	0.052 4	0.003 7	0.130 1	0.008 2	0.018 2	0.000 3	301.9	161.1	124.2	7.4	116.2	1.8
1224-01	59	49	1.21	0.051 9	0.006 8	0.123 8	0.010 9	0.019 2	0.000 6	283.4	283.3	118.5	9.8	122.9	3.8
1224-02	61	61	1.00	0.048 2	0.005 1	0.123 4	0.011 5	0.018 8	0.000 5	109.4	233.3	118.1	10.4	120.2	3.2
1224-03	537	259	2.07	0.050 3	0.003 3	0.123 1	0.007 7	0.017 9	0.000 3	209.3	158.3	117.8	6.9	114.2	1.7
1224-04	57	49	1.15	0.052 7	0.005 1	0.127 8	0.009 2	0.018 6	0.000 4	316.7	220.3	122.1	8.3	118.5	2.7
1224-05	53	46	1.14	0.053 8	0.007 7	0.122 7	0.013 7	0.017 6	0.000 5	364.9	325.9	117.5	12.4	112.3	3.2
1224-06	245	113	2.17	0.052 8	0.004 0	0.127 7	0.008 8	0.018 0	0.000 4	320.4	170.3	122.0	8.0	114.8	2.3
1224-07	106	102	1.04	0.053 3	0.005 3	0.133 3	0.011 9	0.018 6	0.000 4	342.7	225.9	127.0	10.6	118.7	2.7
1224-08	72	53	1.36	0.054 3	0.008 3	0.131 1	0.014 6	0.019 1	0.000 6	388.9	305.5	125.1	13.1	121.7	3.8
1224-09	192	95	2.02	0.057 5	0.006 4	0.133 1	0.010 5	0.018 5	0.000 5	522.3	241.6	126.9	9.4	118.4	2.9
1224-10	44	42	1.07	0.064 7	0.008 7	0.163 4	0.017 6	0.018 8	0.000 5	764.8	287.8	153.7	15.3	120.1	3.3
1224-11	298	151	1.98	0.052 1	0.004 5	0.131 4	0.010 0	0.018 6	0.000 3	287.1	198.1	125.4	9.0	118.6	2.2
1224-12	52	52	0.99	0.056 7	0.009 5	0.123 7	0.017 1	0.018 1	0.000 5	479.7	375.9	118.4	15.4	115.4	3.4
1224-13	53	50	1.07	0.049 2	0.006 2	0.125 8	0.015 3	0.019 1	0.000 5	166.8	261.1	120.3	13.8	121.9	3.4
1224-14	109	111	0.98	0.043 1	0.003 9	0.109 2	0.008 9	0.019 0	0.000 4			105.3	8.1	121.5	2.4
1224-15	487	280	1.74	0.043 8	0.003 0	0.105 5	0.006 3	0.017 7	0.000 3			101.8	5.8	113.0	1.6
1224-16	239	135	1.77	0.051 9	0.004 5	0.142 6	0.011 6	0.019 6	0.000 3	283.4	200.0	135.3	10.3	125.0	2.2
1224-17	56	58	0.97	0.049 4	0.007 5	0.113 9	0.013 3	0.018 6	0.000 6	168.6	318.5	109.5	12.1	118.9	3.5
1224-18	502	346	1.45	0.049 0	0.002 9	0.130 6	0.008 0	0.019 2	0.000 3	146.4		124.6	7.1	122.3	1.8
1224-19	80	73	1.10	0.053 5	0.005 4	0.130 6	0.011 3	0.018 9	0.000 4	346.4	283.3	124.6	10.2	120.9	2.8
1224-20	288	319	0.90	0.052 5	0.002 5	0.128 2	0.005 9	0.017 7	0.000 3	309.3	107.4	122.5	5.3	112.9	1.7

表 2 渤中凹陷义县组火山岩定年结果

Table 2 Volcanic rock dating results of Yixian Formation in Bozhong sag

旋回	样品编号	取样深度/m	样品类型	岩性	测试方法	年龄/Ma	数据来源
旋回一	BH10		岩心	基性火山岩	LA-ICP-MS	128.1±3.0	[12]
	1223	3 175~3 185	岩屑	玄武安山岩	LA-ICP-MS	126.6±0.7	本文
	BH9		岩心	基性火山岩	LA-ICP-MS	125.1±2.0	[12]
	BH7		岩心	基性火山岩	LA-ICP-MS	122.8±5.0	[12]
	BH5		岩心	基性火山岩	LA-ICP-MS	122.1±2.8	[12]
旋回二	BH3		岩心	中性火山岩	LA-ICP-MS	122.0±2.9	[12]
	1224	4 530~4 545	岩屑	粗安岩	LA-ICP-MS	119.3±1.3	本文
	BH4		岩心	中性火山岩	LA-ICP-MS	118.8±2.1	[12]
	BH12		岩心	中性火山岩	LA-ICP-MS	118.0±2.0	[12]
	BH1		岩心	中性火山岩	LA-ICP-MS	117.8±1.2	[12]
	1220	3 630~3 645	岩屑	粗面岩	LA-ICP-MS	116.2±0.8	本文
	BH2		岩心	中性火山岩	LA-ICP-MS	115.7±2.1	[12]
	1219	3 450~3 470	岩屑	粗面岩	LA-ICP-MS	115.5±0.7	本文
旋回三	P01-1-U	3 311	岩心	英安质晶屑凝灰岩	LA-ICP-MS	115.7±1.9	[34]
	B02-1-U	4 404	岩心	英安岩	LA-ICP-MS	115.2±1.3	[34]
	BH8		岩心	中酸性火山岩	LA-ICP-MS	115.1±2.1	[12]
	B01-3-U	2 948	岩心	英安岩	LA-ICP-MS	114.6±2.5	[34]
	BH11		岩心	中酸性火山岩	LA-ICP-MS	114.4±2.5	[12]

角砾结构,呈棱角状(图 5)。

旋回二为中性旋回,平均钻遇厚度 232 m,喷发时间为 122~115 Ma,岩性以安山岩、粗安岩为主,含粗面岩、隐爆角砾岩和凝灰岩,岩相多为中酸性溢流相、爆发相和火山通道相。QHD30-2-A 井钻遇该旋回安山岩,具斑状结构,斑晶以辉石、中性斜长石为主;BZ22-B 井钻遇该旋回凝灰岩,具凝灰结构,晶屑成分为石英、长石(图 5)。

旋回三为酸性旋回,平均钻遇厚度 241 m,喷发时间为 115~114 Ma,岩性以流纹岩、隐爆角砾岩为主,含英安岩、火山角砾岩,岩相多为酸性溢流相、火山通道相和侵出相。LD25-A 井钻遇该旋回流纹岩,具球粒结构,矿物成分主要为碱性长石和石英;BZ8-A 井钻遇该旋回流纹质隐爆角砾岩,具隐爆角砾结构,隐爆角砾间缝中充填有岩汁或热液矿物(图 5)。

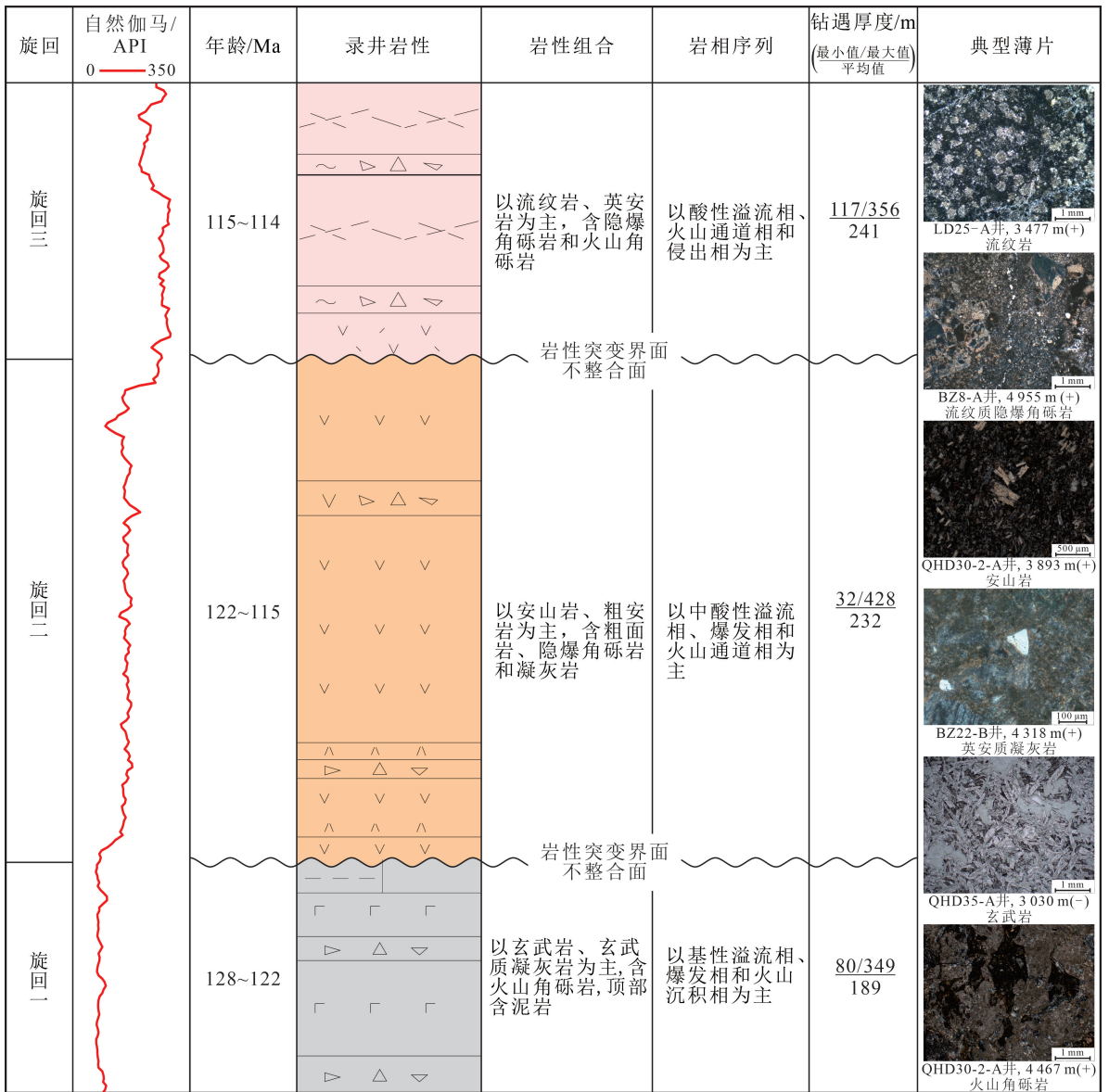
4 义县组不同旋回火山岩分布特征及其与断裂的关系

综合利用钻井和地震资料,对渤中凹陷及其周

边义县组火山岩进行了 2 km×2 km 精细刻画,初步查明了渤中凹陷不同旋回火山岩空间分布及厚度特征。渤中凹陷义县组火山岩分布面积广泛,整体厚度较大,厚度中心主要集中在 NE 向燕山中期走滑断裂两侧(图 6a)。

旋回一基性火山岩在渤中凹陷内分布最广,仅渤南低凸起、石臼坨凸起和渤东低凸起北段缺失旋回一地层,火山岩厚度中心不明显(图 6b)。旋回二中性火山岩在渤中凹陷呈大面积分布,仅渤南低凸起、石臼坨凸起主体以及渤东凹陷内缺失旋回二地层,火山岩厚度中心主要分布在渤中凹陷中部和西部以及渤东低凸起中部和南部(图 6c)。旋回三酸性火山岩主在渤中凹陷内分布面积较小,在渤中凹陷北段大面积缺失该地层,火山岩厚度中心主要分布在渤中凹陷中南部和北部以及渤东低凸起主体(图 6d)。

基于火山岩分布与断裂关系研究,建立了渤中凹陷义县组火山岩发育模式。旋回一基性火山岩为义县组喷发初期,其分布主要受燕山期走滑断裂



岩性花纹图例同图 2。

图 5 渤中凹陷义县组火山岩地层综合柱状图

Fig.5 Comprehensive column diagram of volcanic rock strata of Yixian Formation in Bozhong sag

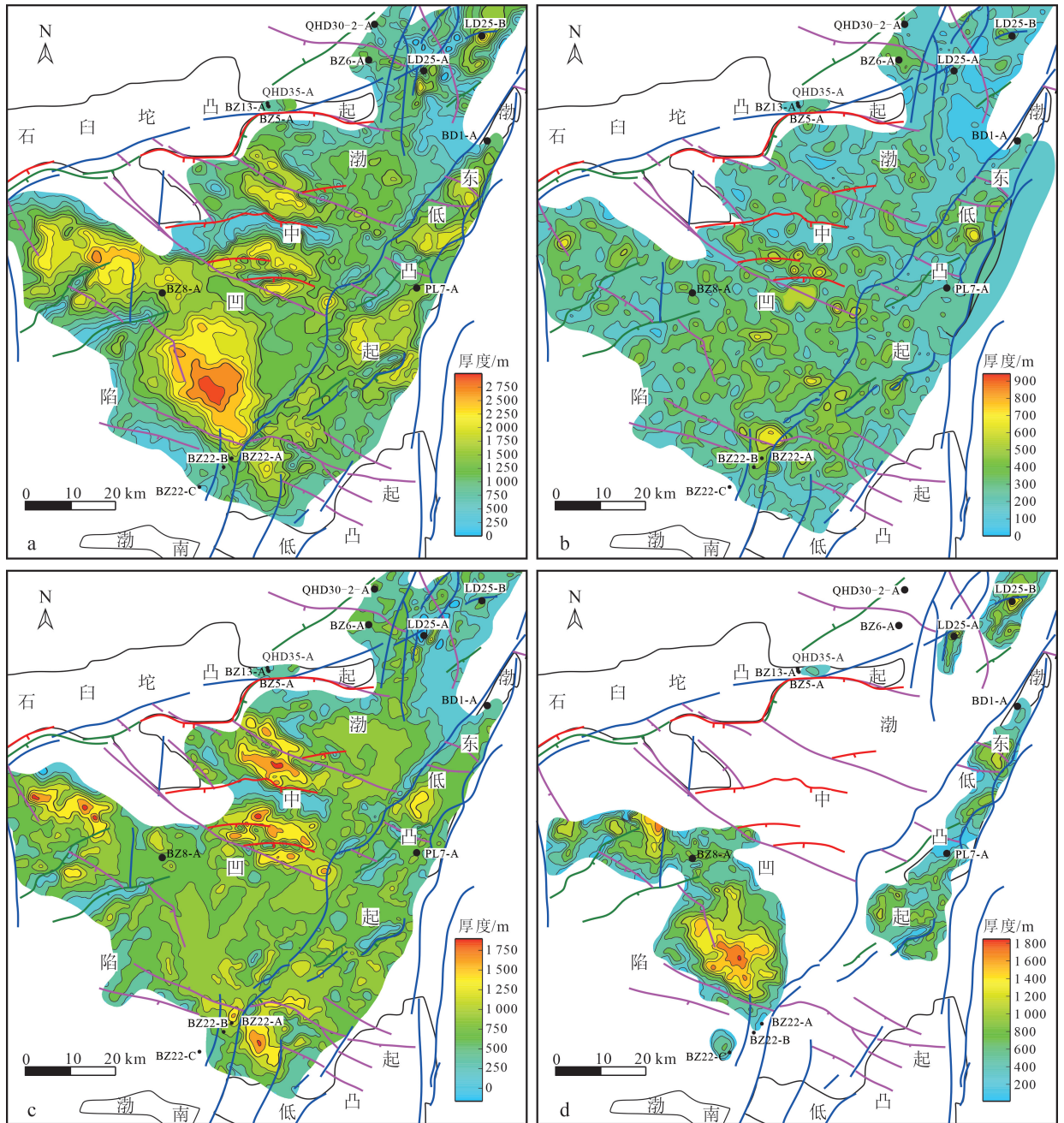
控制,火山岩多以裂隙式喷发,整体厚度较小(图 6、图 7a);旋回二为义县组火山作用最为强烈的时期,其分布主要受燕山期走滑断裂以及 NWW 向印支期先存断裂控制,火山岩多以中心式喷发为主且存在多个厚度中心,整体厚度大(图 6、图 7b);旋回三为义县组喷发晚期,火山活动强度减弱,其分布主要受燕山期走滑断裂以及部分 NWW 向印支期先存断裂控制,火山岩多以中心式喷发为主,整体厚度较大(图 6、图 7c)。

5 火山喷发旋回对储层的控制作用

为进一步研究火山喷发旋回对储层的控制作用,对研究区内所有钻遇火山岩钻井的储层物性特征进行了统计。结果表明,旋回二与旋回三的平均孔隙度要明显好于旋回一的平均孔隙度(图 8a)。综合来看:旋回二和旋回三具有较好的储集性能,而火山岩发育规模可能是造成不同旋回储层物性差异的原因之一,旋回二和旋回三火山岩均发育规模较

大,火山岩厚度大,为优质储层的形成提供了良好的储集场所;而旋回一分布范围较大,但其整体厚度小,不利于油气的聚集。从油气产状结果统计表可以看出,旋回三具有油气显示的概率最高,为 24%,旋回二具有油气显示的概率次之,为 19%,旋回一

具有油气显示的概率最小,为 6%;表明旋回二与旋回三火山岩具有较好的油气显示(图 8b)。综合前文所述,推测旋回二与旋回三火山岩为今后海域火山岩油气勘探的有利层位。



a. 义县组整体厚度图; b. 旋回一厚度分布图; c. 旋回二厚度分布图; d. 旋回三厚度分布图。据文献[35]修改。

图 6 不同旋回厚度与断裂叠合图

Fig.6 Superposition diagram of different cycle thicknesses and fractures

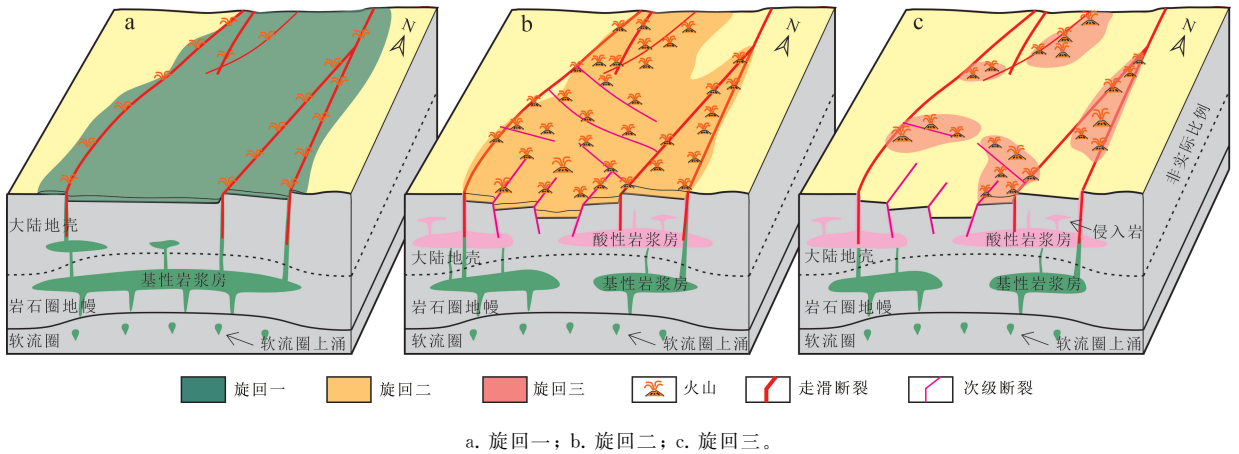


图 7 渤中凹陷火山岩发育模式图

Fig.7 Development pattern of volcanic rocks in Bozhong sag

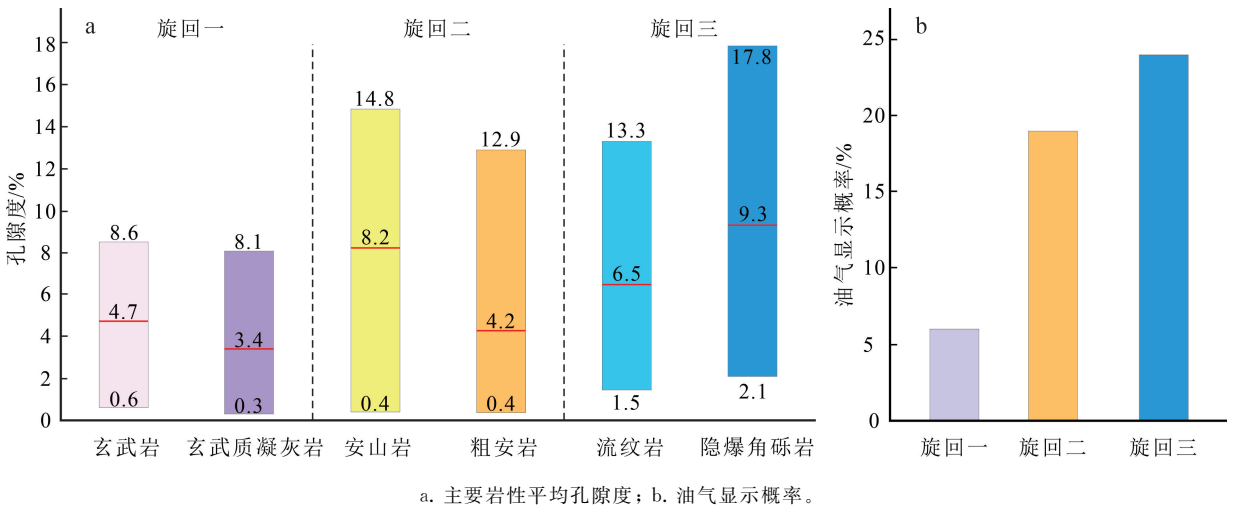


图 8 不同旋回油气产能差异

Fig.8 Oil and gas productivity differences in different cycles

6 结论

1)旋回一以基性火山岩为主,主要发育玄武岩、玄武质凝灰岩;旋回二以中酸性火山岩为主,主要发育安山岩、粗安岩;旋回三以酸性火山岩为主,多发育流纹岩、隐爆角砾岩。

2)旋回一火山岩在渤中凹陷内分布最广,仅渤南低凸起、石臼坨凸起和渤东低凸起北段缺失该地层,其分布主要受燕山期走滑断裂控制,以裂隙式喷发为主;旋回二火山岩在渤中凹陷内大面积分布,仅渤南低凸起、石臼坨凸起主体以及渤东凹陷内缺失该地层,其分布主要受燕山期走滑断裂以及 NW 向印支期先存断裂控制,以中心式喷发为主;旋回三酸性火山岩在渤中凹陷内分布面积显著缩小,在渤

中凹陷北段大面积缺失该地层,其分布主要受燕山期走滑断裂以及部分 NW 向印支期先存断裂控制,以中心式喷发为主。

3)渤中凹陷义县组旋回二和旋回三火山岩优质储层发育,油气显示效果好,可作为渤海海域火山岩油气藏勘探的有利层位。

参考文献 (References):

[1] Wang P, Chen S. Cretaceous Volcanic Reservoirs and Their Exploration in the Songliao Basin, Northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3): 499 - 523.
 [2] 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 - 06 - 26].Doi:http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20240412.1549.002.html.

- 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 - 06 - 26].Doi:http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20240412.1549.002.html.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 冀国盛,戴俊生,马欣本,等.金湖凹陷闵北地区阜一、二段火山岩地层划分与对比[J].石油大学学报(自然科学版),2002,26(4):5 - 9.
- Ji Guosheng, Dai Junsheng, Ma Xinben, et al. Stratigraphic Classification and Correlation of Volcanic Rock in First and Second Segments of Funing Group in Jinhu Sag [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2002, 26(4): 5 - 9.
- [8] 黄玉龙,王璞珺,门广田,等.松辽盆地营城组火山岩旋回和期次划分:以盆缘剖面和盆内钻井为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(6):1183 - 1191.
- Huang Yulong, Wang Pujun, Men Guangtian, et al. Division of Volcanic Cycles and Stages of the Yingcheng Formation of the Songliao Basin: Take the Cross Sections at the Margin and the Boring Holes as Examples[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2007,37(6):1183 - 1191.
- [9] 罗权生,聂朝强,文川江,等.新疆三塘湖盆地牛东地区卡拉岗组火山旋回和期次的划分与对比[J].现代地质,2009,23(3):515 - 522.
- Luo Quansheng, Nie Chaoqiang, Wen Chuanjiang, et al. Division and Correlation of Volcanic Eruptible Gyration and Period of Kalagang Formation in Niudong Area, Xinjiang[J]. Geoscience, 2009, 23 (3): 515 - 522.
- [10] 王五力,张宏,张立君,等.辽宁义县—北票地区义县组地层层序:义县阶标准地层剖面建立和研究之一[J].地层学杂志,2003, 27(3): 227 - 233.
- Wang Wuli, Zhang Hong, Zhang Lijun, et al. Stratigraphic Sequence of the Yixian Formation of Yixian-Beipiao Region, Liaoning: A Study and Establishment of Stratotype of the Yixian Stage[J]. Journal of Stratigraphy, 2003, 27(3): 227 - 233.
- [11] 邢德和,孙春林,张立东,等.辽宁北票地区义县组地层划分与对比[J].吉林大学学报(地球科学版), 2004,34(3):326 - 332.
- Xing Dehe, Sun Chunlin, Zhang Lidong, et al. Stratigraphic Division and Correlation of the Yixian Formation in Beipiao Area, Liaoning Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004,34(3):326 - 332.
- [12] 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.
- [13] 潘玉啟,黄志安,吴子杰,等.辽宁阜新地区义县组火山岩特征及喷发旋回划分[J].地质与资源,2014,23 (增刊1):21 - 26.
- Pan Yuqi, Huang Zhian, Wu Zijie, et al. Characteristic of Volcanic Rocks and Division of Eruption Cycles of the Yixian Formation in Fuxin, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2014, 23(Sup.1):21 - 26.
- [14] 唐华风,孙海波,高有峰,等.火山地层界面的类型、特

- 征和储层意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(5): 1320-1329.
- Tang Huafeng, Sun Haibo, Gao Youfeng, et al. Types and Characteristics of Volcano Stratigraphic Boundary and Its Signification of Reservoirs[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(5): 1320-1329.
- [15] 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 Volcanostratigraphic Boundary: A Case Study of the Mesozoic & Cenozoic Volcanic Rocks in Northeastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 36(3): 324-336.
- [16] 何登发, 崔永谦, 张煜颖, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷古潜山的构造成因类型[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1338-1356.
- He Dengfa, Cui Yongqian, Zhang Yuying, et al. Structural Genetic Types of Paleo-Buried Hill in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1338-1356.
- [17] 王德英, 王清斌, 刘晓健, 等. 渤海湾盆地海域片麻岩潜山风化壳型储层特征及发育模式[J]. 岩石学报, 2019, 35(4): 1181-1193.
- Wang Deying, Wang Qingbin, Liu Xiaojian, et al. Characteristics and Developing Patterns of Gneiss Buried Hill Weathering Crust Reservoir in the Sea Area of the Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(4): 1181-1193.
- [18] Ye T, Chen A, Niu C, et al. Structural, Petrophysical and Lithological Characterization of Crystalline Bedrock Buried-Hill Reservoirs: A Case Study of the Southern Jinzhou Oilfield in Offshore Bohai Bay Basin, North China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 196: 1-13.
- [19] 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.
- [20] 蒋有录, 叶涛, 张善文, 等. 渤海湾盆地潜山油气富集特征与主控因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 20-29.
- Jiang Youlu, Ye Tao, Zhang Shanwen, et al. Enrichment Characteristics and Main Controlling Factors of Hydrocarbon in Buried Hill of Bohai Bay Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 20-29.
- [21] 周心怀, 张如才, 李慧勇, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷深埋古潜山天然气成藏主控因素探讨[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 42-50.
- Zhou Xinhuai, Zhang Rucui, Li Huiyong, et al. Major Controls on Natural Gas Accumulations in Deep-Buried Hills in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(1): 42-50.
- [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 Archeozoic Metamorphic Buried Hill of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1107-1118.
- [24] 张善文, 隋风贵, 林会喜, 等. 渤海湾盆地前古近系油气地质与远景评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- Zhang Shanwen, Sui Fenggui, Lin Huixi, et al. Pre-Paleogene Hydrocarbon Geology and Prospective Evaluation in Bohai Bay Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.
- [25] 唐华风, 边伟华, 王璞珺, 等. 松辽盆地白垩统营城组火山岩喷发旋回特征[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 35-39, 128-129.
- Tang Huafeng, Bian Weihua, Wang Pujun, et al. Characteristics of Volcanic Eruption Cycles of the Yingcheng Formation in the Songliao Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 35-39, 128-129.
- [26] Liu Y, Hu Z, Gao S, et al. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS Without Applying an Internal Standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1): 34-43.
- [27] Liu Y, Gao S, Hu Z, et al. Continental and Oceanic

- Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 392-399.
- [28] Ludwig K R. ISOPLLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 39(1):91-445.
- [29] Pupin J P. Zircon and Granite Petrology [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1980, 73(3): 207-220.
- [30] Koschek G. Origin and Significance of the SEM Cathodoluminescence from Zircon [J]. *Journal of Microscopy*, 1993, 171(3):223-232.
- [31] 马奎前,李超,原建伟,等.火山岩对砂岩储层物性影响的定量表征及应用[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(5): 91-97.
Ma Kuiqian, Li Chao, Yuan Jianwei, et al. Quantitative Characterization of the Influence of Volcanic Rocks on the Physical Properties of Sandstone Reservoirs and Its Application[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(5): 91-97.
- [32] 王鑫,李政,朱日房,等.渤海湾盆地黄骅坳陷石炭系一二叠系煤系烃源岩生烃特征研究[J]. *特种油气藏*, 2023, 30(4): 19-27.
Wang Xin, Li Zheng, Zhu Rifang, et al. Study on Hydrocarbon Generation Characteristics of Carboniferous-Permian Coal-Measure Source Rocks in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(4): 19-27.
- [33] 曹英权,曲希玉,王清斌,等.渤中凹陷CFD6-4油田东营组储层特征及物性控制因素[J]. *地质通报*, 2024, 43(5): 701-711.
Cao Yingquan, Qu Xiyu, Wang Qingbin, et al. Reservoir Characteristics and Controlling Factors of Physical Properties of the Dongying Formation of the CFD6-4 Oilfield in the Bozhong Sag[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(5): 701-711.
- [34] 傅锚.渤海湾盆地环渤中凹陷地区晚中生代理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: Jinlin University, 2022.
- [35] 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.