单玄龙,徐长贵,衣健,等.中国近海典型含油气盆地中生代岩浆活动与岩浆岩潜山油气藏.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(6):1773-1787.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240295.
Shan Xuanlong,Xu Changgui,Yi Jian,et al. Mesozoic Magmatic Activities and Hydrocarbon Accumulations in Magmatic Buried Hills in Typical Offshore Oil and Gas Basins of China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2024,54(6):1773-1787.doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240295.

中国近海典型含油气盆地中生代岩浆活动与岩浆岩潜山油气藏

单玄龙[1,2],徐长贵[3],衣 健[1,2],牛成民[4],郝国丽[1,2],郭剑南[2],闫 博[2]

1.吉林大学地球科学学院,长春 130061
2.自然资源部矿产资源评价重点实验室(吉林大学),长春 130061
3.中国海洋石油集团有限公司,北京 100010
4.中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459

摘要:近几年中国近海诸多含油气盆地(如渤海湾、东海、珠江口、琼东南等盆地)钻遇中生代岩浆岩,并且分布广泛。这些盆地中生代岩浆岩的岩石学、地球化学和油气藏特征研究不仅对盆地基底的形成演化具有理论意义,也对岩浆岩潜山油气勘探具有实践价值。综合岩石学、地球化学和油气地质资料,系统对比了渤海湾、东海和珠江口等典型盆地中生代岩浆岩特征和油气藏类型。得出以下结论:我国近海含油气盆地的中生代岩浆岩岩性复杂,包括火山岩和侵入岩两类20余种岩性,其中渤海湾盆地火山岩发育基性到酸性多种类型,而其他盆地除基性火山岩外均较为发育,侵入岩主要为闪长岩和花岗岩等,以及少量的辉绿岩、闪长玢岩等次火山岩;岩浆活动主要发育在晚侏罗世、早白垩世和晚白垩世三个阶段,受控于古太平洋板块的俯冲及后续的弧后裂谷作用;近海盆地发生了差异构造演化,从侏罗纪的挤压背景转换到白垩纪的区域伸展环境,东海和渤海湾盆地经历弧后裂谷作用,珠江口盆地属于陆缘岩浆弧环境;近海含油气盆地形成了花岗岩风化壳型、岩浆杂岩型和中酸性熔岩型三类油气藏,侵入相的花岗岩、溢流相的中酸性熔岩或多种岩相岩性的叠加杂岩,经历了强烈的风化作用以及构造和流体的改造作用是潜山岩浆岩成储的关键。

关键词:近海含油气盆地;中生代;岩浆岩;岩浆岩油气藏;潜山;渤海湾盆地;东海盆地;珠江口盆地
doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20240295 **中图分类号**:P618.13 **文献标志码**:A

Mesozoic Magmatic Activities and Hydrocarbon Accumulations in Magmatic Buried Hills in Typical Offshore Oil and Gas Basins of China

Shan Xuanlong[1,2],Xu Changgui[3],Yi Jian[1,2],Niu Chengmin[4],Hao Guoli[1,2],Guo Jiannan[2],Yan Bo[2]

收稿日期:2024-09-01
作者简介:单玄龙(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事非常规和深层油气地质方面的研究,E-mail:shanxl@jlu.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金项目(41972313);中国海洋石油有限公司"十四五"重大科技项目(KJGG2022-0302)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (41972313) and the Major Science and Technology Project of CNOOC During the 14th Five-Year Plan Period (KJGG2022-0302)

1. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun* 130061, *China*
2. *State Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation (Jilin University), Ministry of Natural Resources, Changchun* 130061, *China*
3. *China National Offshore Oil Corporation, Beijing* 100010, *China*
4. *CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin* 300459, *China*

Abstract: In recent years, Mesozoic magmatic rock has been found in many offshore petroleum-bearing basins in China, and it is widely distributed, such as the Bohai Bay basin, the East China Sea basin, the Pearl River Mouth basin, and the Qiongdongnan basin. Petrological, geochemical and reservoir research of Mesozoic magmatic rock in these basins are not only of theoretical significance for the formation and evolution of the basement of basins, but also of practical value for oil and gas exploration in magmatic buried hills. This paper systematically compares the characteristics of Mesozoic magmatic rock and the types of oil and gas reservoirs in the typical basins of the Bohai Bay basin, the Pearl River Mouth basin, and the East China Sea basin using petrological, geochemical, and petroleum geological data. Research has shown that the Mesozoic magmatic rock in China's offshore petroleum-bearing basins consists of two major categories of volcanic and intrusive rocks with more than 20 types of lithologies. There are different volcanic rocks from basic to acid in the Bohai Bay basin, and a lack of basic volcanic rocks in other basins. They developed mainly in three stages: Late Jurassic, Early Cretaceous, and Late Cretaceous. Controlled by the subduction of the Paleo-Pacific plate and subsequent back-arc rifting, the offshore basins underwent differential tectonic evolutions under a transition environment from a compression in the Jurassic to an extension in the Cretaceous. The East China Sea basin and the Bohai Bay basin underwent back-arc rifting, and the Pearl River Mouth basin was an offshore magmatic arc. There are three types of reservoirs, namely, granitic weathered crusts, igneous complex, and intermediate-acidic volcanic rocks. Favorable lithological facies, intense tectonic and weathering modification, and strong dissolution are the keys to the reservoir formation of magmatic rocks for buried hills.

Key words: offshore petroleum-bearing basins; Mesozoic; magmatic rock; magmatic reservoir; buried hills; Bohai Bay basin; East China Sea basin; Pearl River Mouth basin

0 引言

随着油气勘探的发展,盆地深层成为重要的勘探领域之一。岩浆岩是盆地深层重要的岩石类型,相比沉积岩,其在深部具有更强的抗压实性和脆性,故其成为重要的勘探目标。我国海域主要含油气盆地包括渤海湾、东海、珠江口和琼东南等盆地。随着勘探的深入,海域盆地基底中生代岩浆岩主要有哪些岩石类型,岩浆活动主要经历了哪几个阶段,反映了何种成盆动力学机制,形成何种类型油气藏,这些问题亟待解决。很多学者通过陆地岩浆岩研究,提出了我国东南沿海、华南陆块和东北亚中生代岩浆活动的动力学机制;主要观点包括:东南沿海岩浆活动是古太平洋板片从俯冲到后撤—撕裂过程改变了区域地壳的热-化学结构的结果[1];东北亚花岗岩类等岩浆岩时空演化显示了古亚洲洋、蒙古—鄂霍茨克洋和古太平洋域的俯冲—闭合过程及其影响的时空范围[2];东北亚陆缘广泛分布的早白垩世岩浆岩指示古太平洋板块向东北亚开启大范围低角度俯冲作用,晚白垩世—古近纪火成岩指示欧亚大陆向东漂移和古太平洋俯冲板块逐渐回撤的构造过程[3];晚中生代时期,即中侏罗世—晚白垩世期间,受太平洋板块向东亚陆缘俯冲以及弧后扩张作用的影响,中国东南部广泛发育了伸展断陷盆地和火山岩-侵入岩岩系[4]。从以上观点可以看出,目前学术界对于中生代海域岩浆活动机制尚未形成统一的认识。

近年来我国近海油气勘探取得了一系列成果:2012年在渤海湾盆地渤中凹陷发现了蓬莱9-1中生代花岗岩潜山油田,落实探明石油地质储量为1.84×10^8 m^3[5];2020年在珠江口盆地惠州26-6构造的古潜山—古近系获得厚层、中高产油气[6];2023年在渤海油田渤中凹陷BZ8-3S大型中生代火山岩圈闭钻探BZ8-3S-A井取得突破,单井日产天然气17×10^4 m^3,日产凝析油83 m^3[7]。前人[8-9]也对这些油气藏开展了储层、成藏等方面的研究,但多是针对某一油气藏开展的工作,缺乏从区域

角度进行系统的综合分析。

本文在前人研究基础上，先系统对比了渤海湾盆地、东海盆地和珠江口盆地中生代岩浆岩的岩石地球化学特征、岩浆活动规律、盆地差异演化和地球动力学机制，然后总结了我国近海盆地岩浆岩潜山油气藏的成藏模式，以期为类似勘探区域提供借鉴意义。

1　中国近海典型盆地中生代岩浆岩的岩石学和地球化学特征

钻井揭示我国近海含油气盆地基底中生代岩浆岩包括火山岩和侵入岩两类，其中火山岩包括火山熔岩、火山碎屑熔岩、火山碎屑岩和火山沉积岩，侵入岩包括花岗岩、闪长岩、闪长玢岩和辉绿岩。在不同的含油气盆地中岩石类型存在明显差异，其中岩浆岩岩石类型多达 20 余种(图 1)。地球化学特征表明中生代基性岩浆岩的特征类似于洋岛玄武岩(OIB)，岩浆源区可能受俯冲板片流体的交代作用，并且岩浆经历了分离结晶作用。

1.1　渤海湾盆地

渤海湾盆地的岩浆活动主要集中在中生代(特别是早白垩世)和新生代。截至目前，在渤海湾盆地钻遇的火山岩钻井共有 167 口，揭示了包括火山熔岩、火山碎屑熔岩、火山碎屑岩、火山沉积岩在内的火山岩类以及包括花岗岩、辉绿岩、闪长玢岩在内的侵入岩类等两大类(即火山岩和侵入岩)16 种岩石类型(图 1)。其中：火山熔岩包括流纹岩、粗面岩、英安岩、粗安岩、安山岩、玄武安山岩、玄武岩；火山碎屑熔岩包括隐爆角砾岩、熔结凝灰岩；火山碎屑岩包括火山角砾岩、凝灰岩；火山沉积岩包括沉凝灰岩、凝灰质砂岩。从渤海湾盆地已有典型井钻遇情况来看，中生代火山岩以基—中—酸性的玄武岩和英安质、粗面质、流纹质的熔岩/火山碎屑岩为特征(图 2)。从元素地球化学(图 3)上看，早期活动的中性岩浆在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图解(图 3b)中呈右倾型特征，具有轻稀土元素(LREE)富集、重稀土元素(HREE)亏损的特征。同时，在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 3d)中，中性岩石显示出大离子亲石元素(LILEs)富集、高场强元素(HFSEs)亏损的特征，具有明显的 Nb、Ta 负异常。渤海湾盆地晚期喷发的基性岩浆，Eu 元素缺少明显的负异常($Eu/Eu^{*}=0.8\sim0.9$)(图 3c)，而中性岩石表现出了较为明显的 Eu 元素的负异常($Eu/Eu^{*}=0.56\sim0.60$)(图 3d)，反映中性岩浆经历了较为强烈的以斜长石为主的分离结晶作用。

与早期活动的中性岩浆类似，在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图解(图 3a)中，渤海湾盆地晚期活动的基性岩浆也呈现右倾型特征，曲线较为平坦，缺少明显的 Eu 异常，表明斜长石的分离结晶作用不显著。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 3c)中，Pb 具有负异常，Nb、Ta、Sr 等元素具有正异常。渤海湾盆地中生代玄武岩的特征类似于洋岛玄武岩。

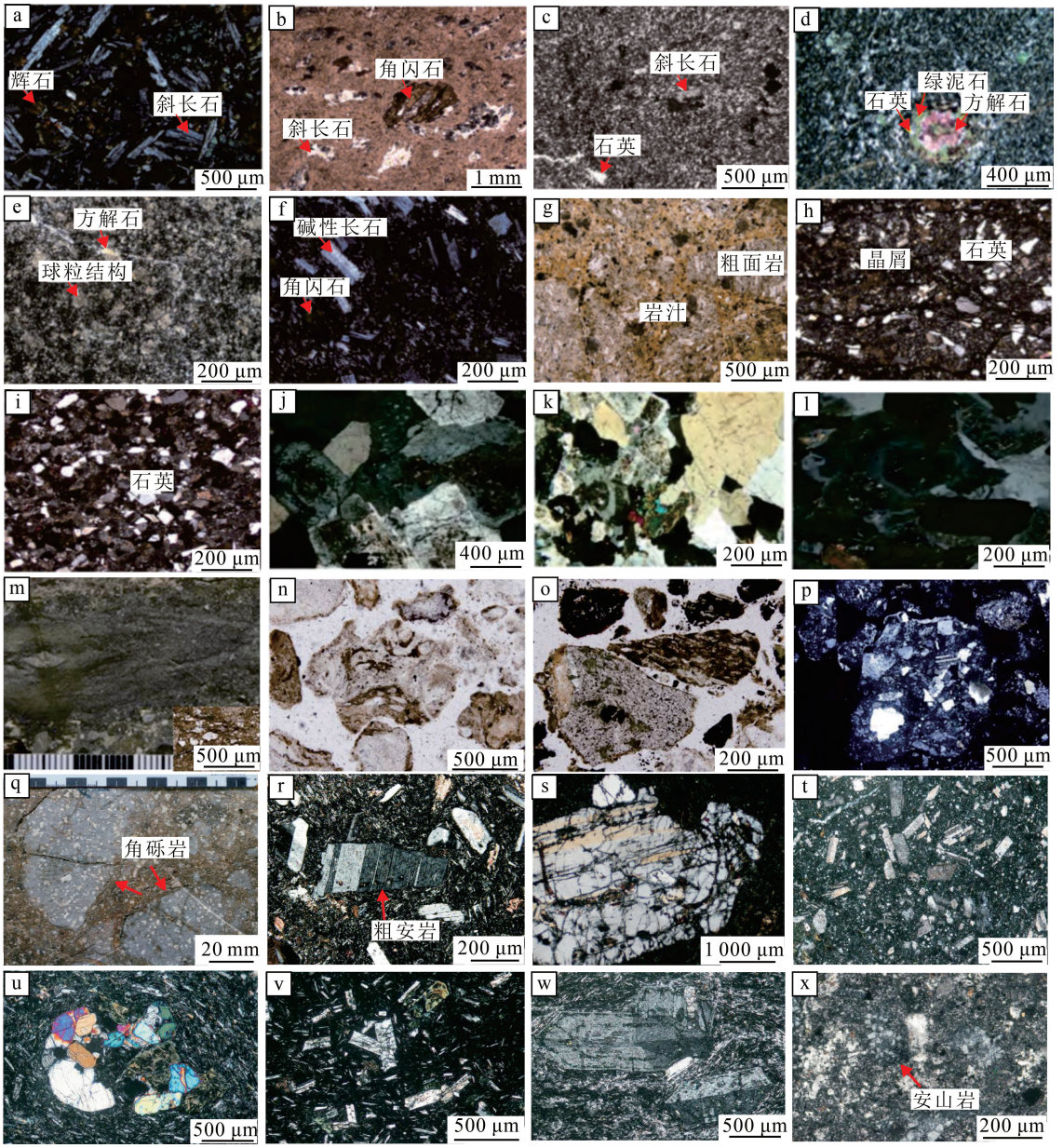
1.2　东海盆地

与渤海湾盆地一样，东海陆架盆地在中生代—新生代同样发生了频繁的岩浆活动，在东海盆地已有钻井中，包括孤山 1 井、平湖 3 井和平湖 2 井在内的多口钻井均钻遇了中—新生代的岩浆岩。前人[10]研究表明，中生代的岩浆活动自晚三叠世开始，至晚白垩世末结束，而新生代的岩浆活动自中新世开始，至更新世结束(20～2 Ma)。据已有的资料[10-12]显示，东海盆地内的岩浆岩包括火山岩和侵入岩。其中：火山熔岩包括玄武岩、玄武安山岩、安山岩、流纹岩、英安岩；火山碎屑岩包括流纹质凝灰岩、安山质岩屑晶屑凝灰岩、英安质凝灰岩等(图 1)。侵入岩包括花岗岩和花岗闪长岩。目前对于东海盆地内的火山岩仍缺少相关的地球化学资料。

1.3　珠江口盆地

在古太平洋板块俯冲消减的动力学背景下，珠江口盆地多个凹陷中生代以来经历了多期强烈的岩浆活动[13-14]，产生了多种类型的岩浆岩。目前，珠江口盆地仅惠州凹陷就有 11 口探井钻遇岩浆岩，揭示的火山岩包括安山岩、粗安岩、英安岩、隐爆角砾岩、火山角砾岩、凝灰岩和沉凝灰岩等 7 种岩性(图 1)。

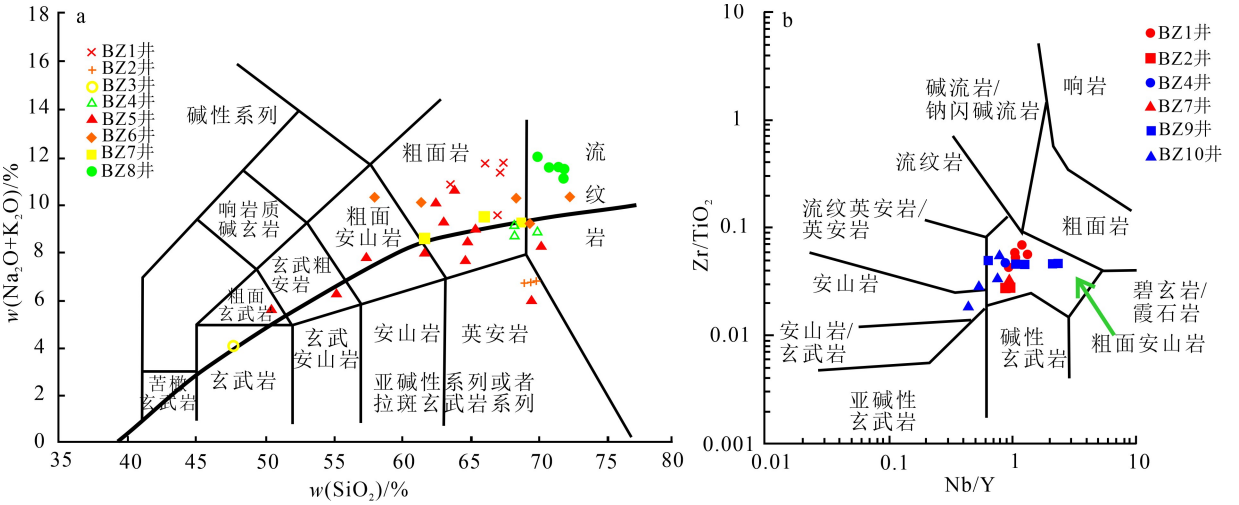
地球化学成分分析表明，中生代时期(晚侏罗世)形成的岩浆岩主要为安山质、粗面质、英安质等中酸性火山熔岩及火山碎屑岩($w(SiO_2)=58\%\sim69\%$，图 4a)，此外还包含少量玄武岩和花岗岩。从稀土元素来看，晚侏罗世形成的火山岩在稀土元素球粒陨石标准化的配分图解中呈现右倾特征，轻重稀土元素分馏明显，类似洋岛玄武岩。较弱的 Eu 负异常表明存在轻微的斜长石的分离结晶作用。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 4b)中，这些中基性火山岩表现出 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素富集，Nb、Ta、Ti 和 P 等高场强元素相对亏损的特征，具有明显的负异常，暗示岩浆源区可能受俯冲板片流体的交代作用[15]。此外，这些中酸性岩石相对富集 Ba、K 等大离子亲石元素(LILEs)，相对亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(HFSEs)，这些特征与该盆地中生代喷发的基性火山岩类似。



a—l为渤海湾盆地中生代岩浆岩特征:a. 玄武岩,斑晶主要为条状斜长石,蚀变较强,还有少量辉石斑晶,正交偏光;b. 安山岩,斑状结构,斑晶为斜长石和角闪石,单偏光;c. 英安岩,斑晶为斜长石和石英,基质为霏细结构,正交偏光;d. 安山岩,杏仁体发育,呈圆形,内部被石英、绿泥石和方解石充填,正交偏光;e. 流纹岩,球粒结构,见方解石脉充填;f. 粗面岩,基质为交织结构,基质成分为碱性长石微晶,呈半定向排列,正交偏光;g. 粗安质隐爆角砾岩,隐爆角砾结构,角砾呈棱角分明的块状,单偏光;h、i. 凝灰岩,凝灰结构,主要由晶屑和火山灰组成,晶屑体积分数约为40%,晶屑成分主要为石英和长石,正交偏光;j. 二长花岗岩,花岗结构,可见碱性长石、斜长石及石英,正交偏光;k、l. 花岗闪长岩,花岗结构,主要为斜长石、石英及碱性长石,暗色矿物可见黑云母,正交偏光。m—p为东海盆地西湖凹陷石门潭组火山岩特征:m. 流纹质凝灰岩,见有棱角状晶屑与流纹岩岩屑,单偏光;n. 流纹质凝灰熔岩,火山碎屑熔岩结构,碎屑成分主要为石英,见有少量玻屑,单偏光;o. 安山质凝灰岩,碎屑结构,岩屑多为安山质,可见少量流纹岩岩屑,单偏光;p. 沉凝灰岩,主要为火山岩岩屑和晶屑,颗粒有一定的磨圆,正交偏光。q—x为珠江口盆地中生代火山岩特征:q. 粗安质火山角砾岩,具有火山角砾结构,碎屑成分为粗安质,单偏光;r. 粗安岩,斑状结构,斑晶以碱性长石、斜长石为主,少量角闪石和辉石等,正交偏光;s. 安山岩,斑状结构为主,斑晶大多为具有聚片双晶的斜长石,基质为交织结构,微晶斜长石呈半定向排列,正交偏光;t. 安山质凝灰岩,岩屑成分主要为安山质,部分凝灰岩含有角砾级别岩屑(>2 mm),晶屑主要为碱性长石、斜长石和辉石,正交偏光;u—x. 安山岩,斑晶大多为具有聚片双晶的斜长石、具有环带的中性斜长石、碱性长石,也见有少量角闪石、辉石等,基质为交织结构,微晶斜长石呈半定向排列,正交偏光。

图1 中国近海主要含油气盆地中生代岩浆岩特征

Fig.1 Characteristics of Mesozoic magmatic rocks in offshore petroleum-bearing basins of China



a. TAS 图解；b. Zr/TiO_2 – Nb/Y 图解。

图 2　渤海湾盆地中生代火山岩分类图解

Fig.2　TAS (a) and Zr/TiO_2 – Nb/Y (b) of Mesozoic volcanic rocks in Bohai Bay basin

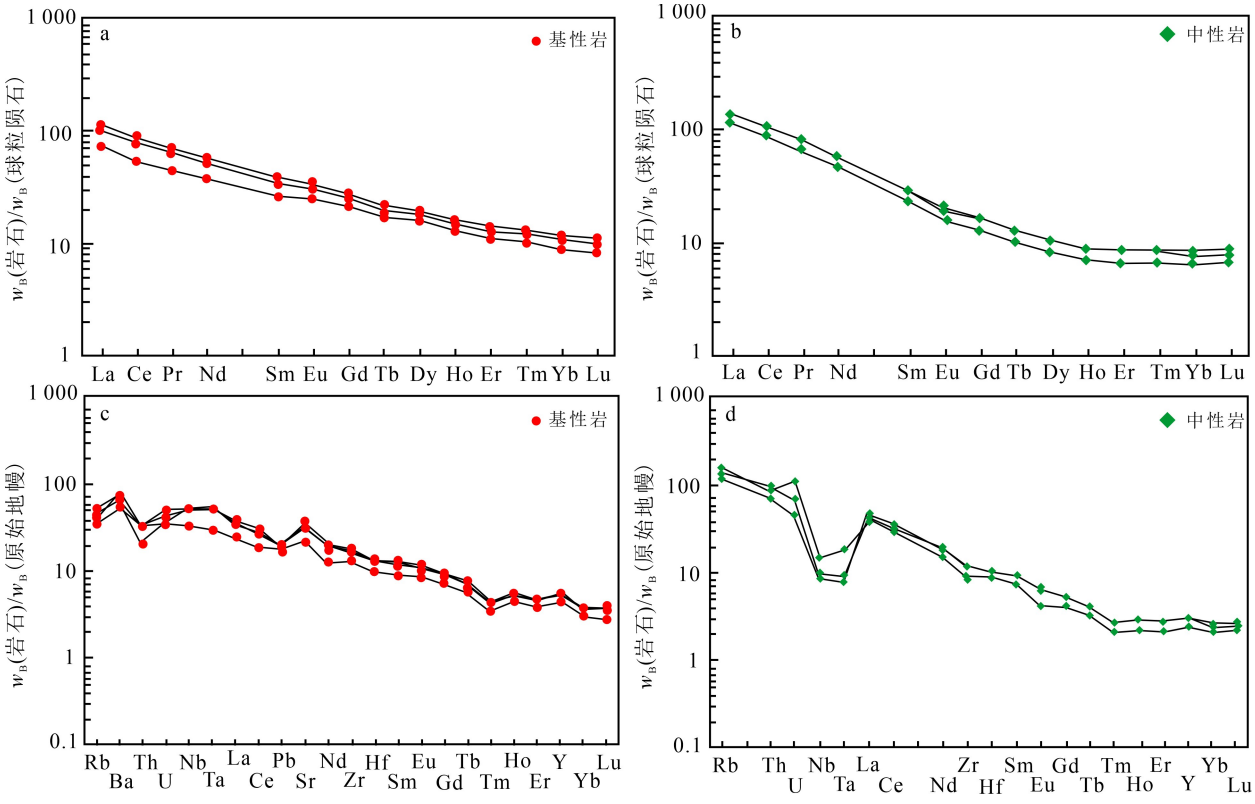


图 3　渤海湾盆地中生代火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a、b)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(c、d)

Fig.3　Normalized distribution patterns of rare earth element chondrites (a, b) and normalized spider diagrams of trace element primitive mantle (c, d) in Mesozoic volcanic rocks of Bohai Bay basin

2　岩浆活动特征

我国近海含油气盆地中生代岩浆活动的时期为侏罗纪—白垩纪，统计数据表明地质时间为 205～65 Ma，主活动期为 160～95 Ma，与中国东部东南沿海陆地岩浆活动时间基本可以对比(表 1)。早期中基性岩浆岩分布广泛，而中酸性岩浆岩呈片状分布。

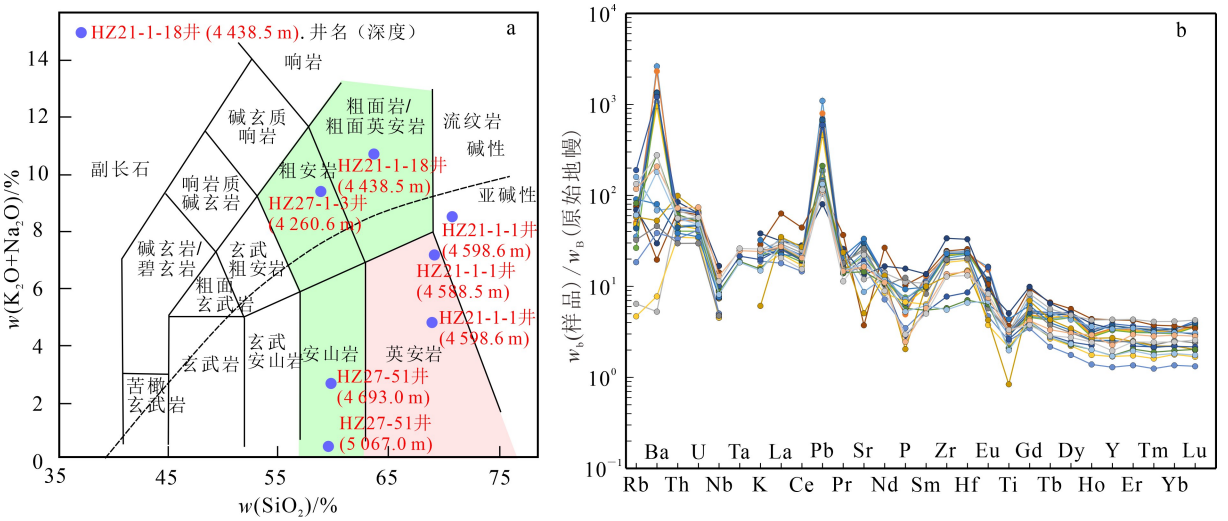


图4 珠江口盆地火山岩TAS图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.4 TAS (a) and normalized spider diagrams of trace element primitive mantle (b) of volcanic rocks in Pearl River Mouth basin

表1 中国近海含油气盆地中生代岩浆活动时间对比

Table 1 Comparison of Mesozoic magmatic rocks age in offshore petroleum-bearing basins of China

近海盆地	岩石类型	岩浆活动时间
渤海湾盆地	侵入岩	花岗岩、花岗闪长岩 170～160 Ma
	喷出岩	酸性喷发旋回(流纹岩)118～114 Ma
		中酸性喷发旋回(安山岩、粗面岩、英安岩)122～118 Ma
		基性喷发旋回(玄武岩)128～122 Ma
东海盆地	侵入岩	花岗岩、花岗闪长岩 123～66 Ma
	喷出岩	酸性喷发旋回(流纹质凝灰岩)100～66 Ma
		中酸性喷发旋回(安山质和英安质凝灰岩)123～107 Ma
珠江口盆地	侵入岩	侵入岩(花岗岩、花岗闪长岩)200～95 Ma
	喷出岩	

2.1 渤海湾盆地

渤海湾盆地渤中凹陷中生代火山岩主要形成于早白垩世。前人[16-17]已有的研究将渤中凹陷中生代火山岩划分为3个喷发旋回(图5)。旋回Ⅰ为基性喷发旋回,在渤中凹陷发育广泛,在西部秦皇岛35－1构造带和北部秦皇岛30－1构造带中以旋回Ⅰ为主,以厚层基性玄武岩发育为主要特征,夹部分爆发相凝灰岩和火山通道相熔结角砾岩[17];U－Pb年代学结果显示,该旋回形成于128～122 Ma之间[16]。旋回Ⅱ为中酸性喷发旋回,该旋回火山岩主要分布在锦州20－2构造区、莱北低凸起南部以及石臼坨凸起,旋回Ⅱ底部为安山岩夹安山质凝灰岩薄层,顶部发育厚层的英安岩或英安质隐爆角砾岩,整体表现为溢流相与爆发相互层;U－Pb年代学结果显示,该旋回形成于122～118 Ma之间[17]。旋回Ⅲ为酸性喷发旋回,见于旅大25－1构造带、莱北低凸起南部以及石臼坨凸起等地,岩性以浅灰色流纹岩、流纹质隐爆角砾岩为主;U－Pb年代学结果显示,该旋回形成于118～114 Ma[17]。

2.2 东海盆地

中生代以来东海盆地经历了多期构造运动(如燕山期、喜马拉雅期),随之形成了较为强烈的岩浆活动。前人[18]研究表明,东海盆地的岩浆活动主要分为两个旋回:中生代的燕山期(205～135 Ma)和新生代的喜马拉雅期(23.50～0.78 Ma)。其中,燕山期的岩浆活动最为强烈,该旋回岩浆活动在东海盆地形成大规模的中酸性火山岩(图6)和侵入岩。东海盆地中生代火成岩主要形成于早白垩世,其次

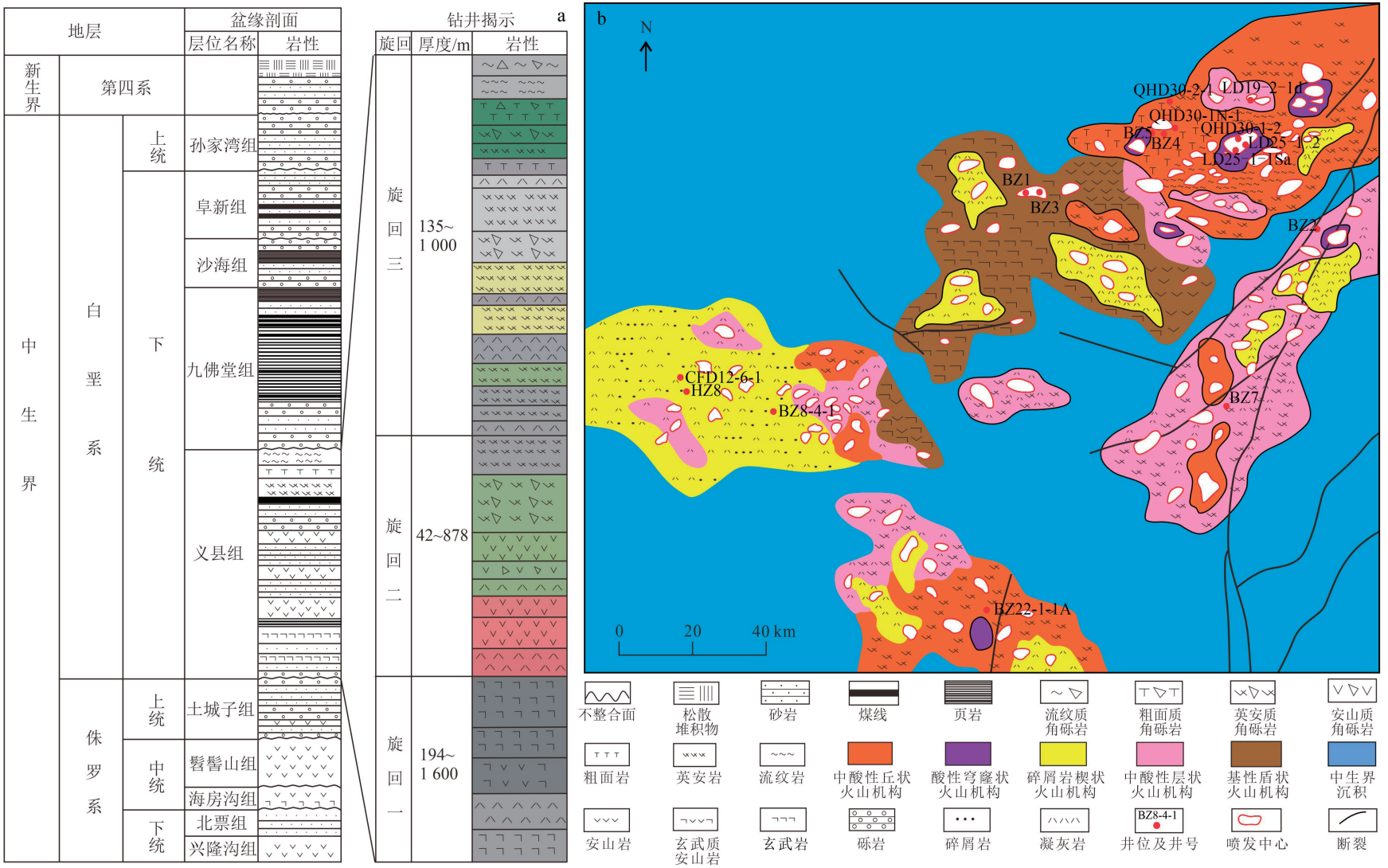


图 5　渤海湾盆地渤中凹陷中生代火山岩旋回划分(a)及火山岩分布规律(b)[17]

Fig.5　Division of Mesozoic volcanic rock cycle (a) and volcanic rock distribution (b) in Bozhong sag of Bohai Bay basin[17]

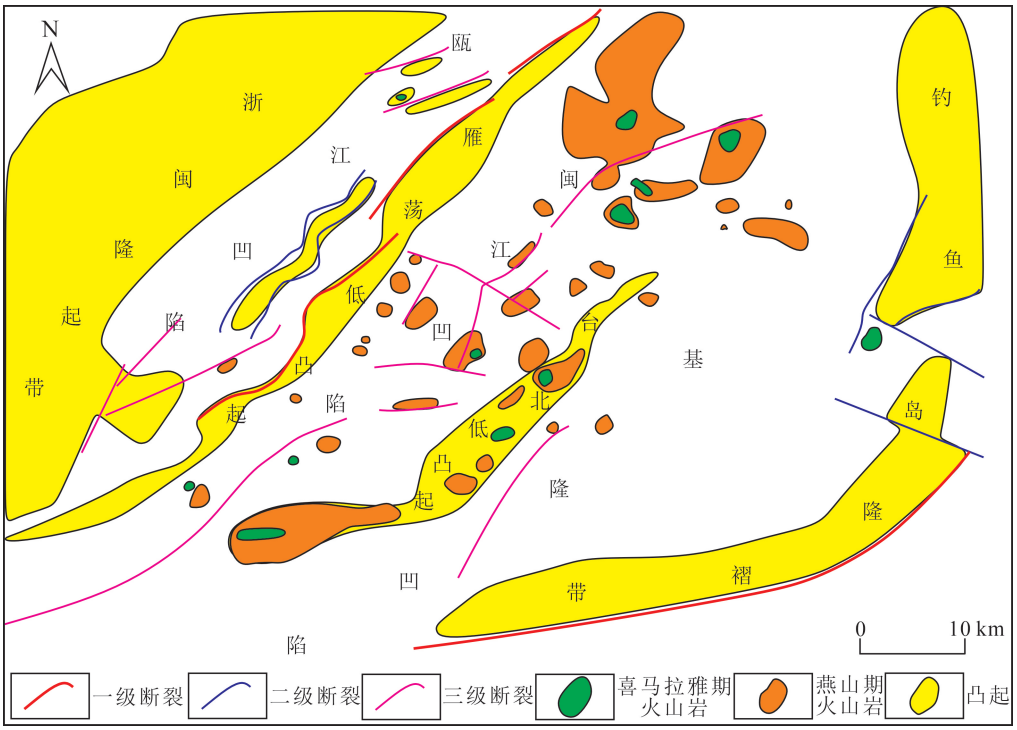


图6 东海盆地中—新生代岩浆岩分布图[19]

Fig.6 Distribution of Mesozoic-Cenozoic volcanic rocks in Donghai basin[19]

是晚白垩世,少量形成于早、中侏罗世。火成岩的分布明显受控于断裂,特别是受北北东向(或北东向)断裂的控制,通常受控于断至基岩的大级别断裂,多沿断裂分布,平面上呈北北东向展布(图6),并呈现出岩浆活动从北西到南东逐渐变新的趋势。

东海盆地中生代火山岩的岩石学、地球化学和同位素年代学综合分析目前还较少;但从已有的资料[18-19]来看,中生代时期东海盆地主要发育中酸性喷发旋回,缺少基性喷发旋回,岩性以安山岩、流纹岩、安山质/流纹质凝灰岩为主。以西湖坳陷为例,前人[20]研究表明,该凹陷的中酸性喷发旋回包含三个喷发期次:第一期次以流纹质凝灰岩为主,该期次的分布较为局限,仅在西湖凹陷的部分钻井中发现;第二期次以安山质凝灰岩为主,该期次分布范围较广,在凹陷内的多口井均有发育;第三期次以流纹质凝灰岩、英安质凝灰岩为主,该期次的分布范围相对有限。在不同凹陷内中酸性喷发旋回的活动时间略有差异,K-Ar年代学结果显示:在东海盆地西部边缘的丽水凹陷以及椒江凹陷,中酸性喷发旋回的活动时间介于100~66 Ma之间,属于晚白垩世;而在东海盆地中部的西湖凹陷,中酸性喷发旋回的喷发时间相对较早,介于123~107 Ma之间,属于早白垩世。

从区域上看,已有研究[20]表明:中生代东海盆地西部岩浆活动以发生于早白垩世为主,多为中酸性的侵入岩;而盆地东部岩浆活动则主要发生于晚白垩世,岩性也转变为中性酸性的喷发岩。东海盆地岩浆活动总体上显示向东迁移、变新的趋势。

2.3 珠江口盆地

中生代时期珠江口盆地受控于太平洋板块向欧亚大陆下斜向俯冲的影响,盆地所在区域发生强烈岩浆活动,大规模中酸性岩浆伴随深大断裂侵入与喷发,在该区形成大规模的中生代侵入岩和火山岩[13]。U-Pb、$^{40}Ar/^{39}Ar$等年代学结果显示,该区中生代中酸性侵入岩的活动时间介于晚侏罗世—晚白垩世之间(图7),盆地中岩浆活动时间有从南东向北西具有逐渐变新的趋势,而岩浆侵入规模有逐渐加强的趋势[22]。例如:$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学显示盆地东部潮汕凹陷北坡花岗岩及花岗闪长岩的侵入时间为102 Ma[23];U-Pb等年代学结果显示盆地东北部东沙隆起花岗岩侵入时间为93~86 Ma,而位于东沙隆起北部的西江凹陷的花岗岩侵入时间为76~73 Ma;珠江口盆地西南部珠三坳陷、番禺低隆起内岩浆岩侵入时间较早,约为118 Ma;而珠三坳

陷南部神狐隆起内岩浆岩的活动时间更早，约为 153 Ma。有些学者将珠江口盆地中生代岩浆侵入活动划分为 5 期[21]，包括 200～165、165～140、140～120、120～105、105～95 Ma，其中 165～105 Ma 期岩浆侵入活动最为强烈。在平面上，早期（200～165 Ma）岩浆活动零星分布，晚期（165～105 Ma）岩浆活动面积较大；且以惠州凹陷西部低凸起为界，珠一坳陷东侧岩浆岩年龄偏新，通常小于 120 Ma，西侧岩浆岩年龄偏老，普遍大于 120 Ma。除中生代侵入岩外，珠江口盆地多个坳陷内均钻遇到了中生代火山岩，如潮汕凹陷北部的 LF35－1－1 井，自浅至深分别钻遇了流纹岩、安山岩和玄武岩，而珠三坳陷的 YJ26－1－1 井钻遇了流纹岩，神狐隆起的 BD6－1－1 井钻遇了火山集块岩。但是，目前对于珠江口盆地中生代火山岩的年代学研究较为欠缺，对于各个坳陷内存在的中生代火山岩喷发的旋回、期次的划分以及空间的展布规律并不清楚。

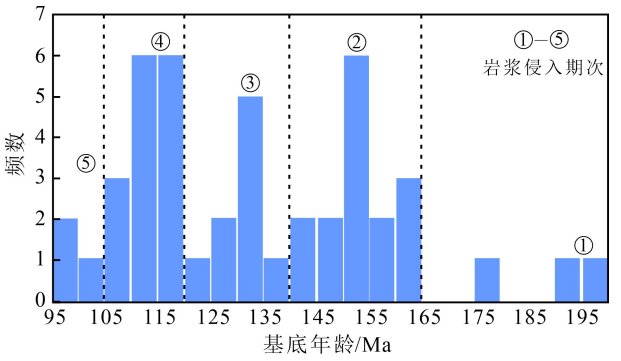


图 7　珠江口盆地中生代侵入岩岩浆年龄及活动期次[21]

Fig.7　Age and active stage of Mesozoic intrusive rocks in Pearl River Mouth basin[21]

3　近海盆地差异演化及动力学机制

中国东部近海盆地，包括渤海湾、东海和南海等盆地，从中生代开始经历了多次板块俯冲和弧后扩张等构造活动，并伴随走滑伸展，最终形成现今的盆地样式。中国东部近海盆地处于板块边界条件复杂的环太平洋构造域，盆地形成和演化影响因素多样。太平洋板块、欧亚板块和印度－澳大利亚板块之间的汇聚和深部地球动力，构成了各个海域盆地演化的主控因素；同时，太平洋板块的俯冲后撤、印支地块挤出逃逸、古南海向婆罗洲的俯冲拖曳、菲律宾板块顺时针旋转及其向欧亚板块和太平洋板块之间的楔入等也是导致不同海域盆地差异演化的控制因素。

中生代期间，古太平洋板块俯冲及后续的弧后裂谷作用控制了中国东部的构造演化。侏罗纪时期，近海盆地处于以挤压为主的构造环境。区域动力学背景是中国北部燕山造山带强烈收缩和挤压，南部华南板块与华北板块陆陆碰撞，发生陆内俯冲变形，并在特提斯构造域近南北的挤压下向东南逃逸。与此同时，古太平洋板块的俯冲也促进了区域性的挤压构造产生和逆冲作用，尤其是在东海盆地，北东向的逆冲断层广泛发育。该构造环境由板块的平板俯冲所控制，使得东海盆地形成了大量的挤压构造带，表明此时的构造变形主要受到陆缘挤压的影响[21,23]。白垩纪时期，我国东部海域盆地从强烈挤压转向区域性伸展[24]，原因是古太平洋板块的俯冲作用发生了明显的变化，即随着俯冲带的后撤，区域内的构造环境逐渐由挤压转变为伸展作用。此时东海盆地的弧后裂陷作用逐渐显现，北西向的伸展断层开始发育，导致岩石圈减薄和区域性的弧后扩张[25]。与此同时，渤海湾盆地也开始经历弧后裂谷作用。珠江口盆地受有限的俯冲作用控制，初始岩浆弧局限展布，但是在华南地区发生大规模岩浆活动。晚侏罗世—早白垩世时期，受古太平洋板片正向俯冲作用控制，才形成大规模的陆缘岩浆弧。

晚中生代—新生代初期是中国东部海域构造演化的关键转折点。在白垩纪末期—古近纪初期，太平洋板块向欧亚板块的俯冲角度发生了显著变化（由北北西变为北西向），太平洋板块的高角度潜没和回卷产生的地幔楔内对流以垂向上涌为特征，使欧亚大陆东部地壳逐渐拉伸、垮塌。同时，印度板块与欧亚板块发生边缘接触碰撞，导致东亚地区的区域构造应力从之前的挤压转变为伸展拉张，伴随局部陆陆碰撞，引起区域性挤压隆升—剥蚀。这种变化促使了渤海湾、东海和南海盆地的构造环境从大陆边缘的弧后裂谷伸展逐渐过渡到被动陆缘的伸展[21]，这同时也是华北克拉通东部破坏和东海陆架盆地初始张裂的主要动力学机制。渤海湾盆地表现出复杂的走滑-伸展复合型构造，而东海盆地则继续表现为弧后裂谷的扩张过程。盆内的岩浆活动、裂陷中心、沉积中心也自西向东迁移[24]。在此期间，太平洋板块和菲律宾板块的相互作用控制了南海盆地的构造格局，也使得中国近海盆地发生第一幕裂陷，即第一裂陷幕发生于欧亚板块边缘、中国近海盆

地最靠近陆地一侧。按照裂谷作用程度,中国近海盆地可分为强裂陷区和弱裂陷区。强裂陷区主要发育在东海盆地台北坳陷,特点为规模较大的断陷群;弱裂陷区主要发育在南海北部,如珠江口盆地文昌凹陷,仅形成零星孤立的小型断陷。

综上所述,我国近海含油气盆地自燕山期以来受控于古太平洋板块的俯冲及后续的弧后裂谷作用,近海盆地发生了差异构造演化,从侏罗纪的挤压背景转换到白垩纪的区域伸展环境,东海和渤海湾盆地经历弧后裂谷作用,珠江口盆地属于陆缘岩浆弧环境,燕山晚期至喜马拉雅早期逐渐转换为伸展环境。

4 近海盆地岩浆岩潜山油气藏

我国近海盆地基底岩浆岩油气勘探还属于探索阶段,岩浆岩储层成因与分布规律、成储基本条件与机理还不清楚。目前钻井已经取得发现的岩浆岩油气藏主要为花岗岩风化壳型、岩浆杂岩型和中酸性熔岩型潜山油气藏三种类型,其具有不同的成藏特征。

4.1 花岗岩风化壳型潜山油气藏

渤海湾盆地蓬莱9-1花岗岩潜山油气藏较为典型(图8),也是目前国内发现的单体规模最大的中生代花岗岩油气藏[26-27]。形成大型油气藏的基本条件包括优质烃源岩、大规模储层、多类型圈闭以及各要素的有效性及配合[28]。形成的基本条件包括:1)储层,花岗岩潜山储集空间以溶蚀孔和裂缝为主,具有非均质性强等特点;2)烃源岩,渤东南洼沙三段、沙一段和东营组发育半深湖—深湖亚相较好烃源岩;3)储盖组合,高部位发育厚层花岗岩风化壳和内幕潜山,上部馆陶组发育高排替压力厚层泥岩,良好的空间配置形成了"下生上储顶盖型"生储盖组合;4)成藏模式,中生代花岗岩风化壳的发育及构造改造是大规模潜山油气藏发育的关键[26],燕山期构造抬升导致花岗岩遭受风化淋滤控制厚层风化壳规模,风化越强烈储集条件越好[27],新近纪晚期构造活化、断裂及其产生的裂缝不仅改造了内幕储层,也形成了不整合面-断层联合输导系统,渤东南洼烃源岩从12 Ma至今向花岗岩储层持续供烃,形成蓬莱9-1油气田。总之,花岗岩本身不发育孔隙,除优良配置的生储盖组合、大规模岩体及风化壳外,正向区域构造改造也是发育大油气田的关键。

4.2 岩浆杂岩型潜山油气藏

珠江口盆地处于中、低勘探程度阶段,岩浆岩油气藏勘探程度比盆地内其他油气藏类型更低。近年在惠州26-6古潜山获得规模商业发现[6],其为典型的中基性岩浆杂岩型油气藏(图9)。其形成条件包括:1)岩性岩相,惠州26-6构造潜山储层岩性岩相非常复杂,包括中生代溢流相的中基性玄武安山岩、安山岩,侵入相的中酸性闪长岩、花岗岩,变质岩(原岩为火山岩或侵入岩);2)储层,储层岩石致密,但构造改造裂缝发育并多期叠加,经历构造改造成缝是形成油气储层的必要条件,包括燕山期裂缝(早白垩世早期、早白垩世晚期、晚白垩世)和喜马拉雅期裂缝[29],以及有机酸溶蚀产生的较大溶蚀孔隙;3)烃源岩,惠州凹陷是盆地大规模和高丰度烃源岩最发育的地区,惠州26洼烃源岩为古近系文昌组半深湖—深湖亚相暗色泥岩,其在高成熟阶段大量生气,形成高—特高含凝析油的大、中型凝析气

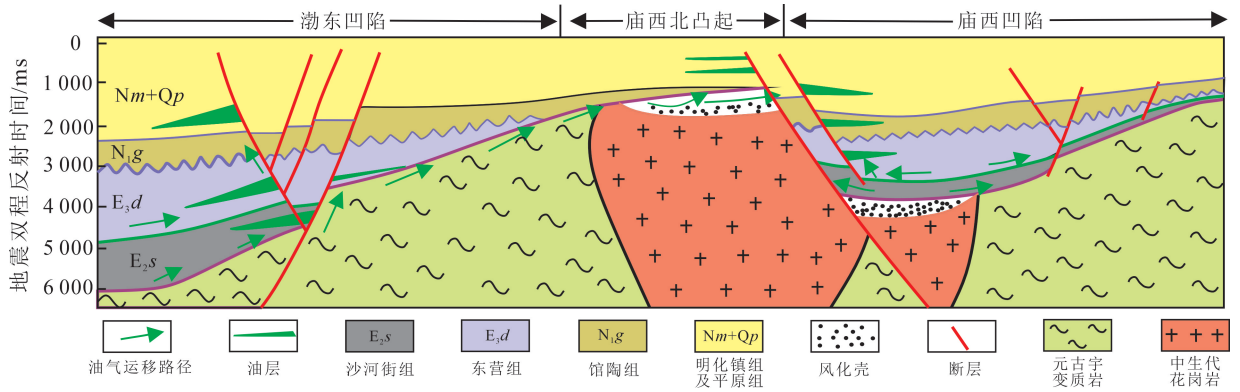


图8 蓬莱9-1花岗岩风化壳潜山油气成藏模式图[9]

Fig.8 Model of hydrocarbon accumulation of granite buried hill in Penglai 9-1 structure[9]

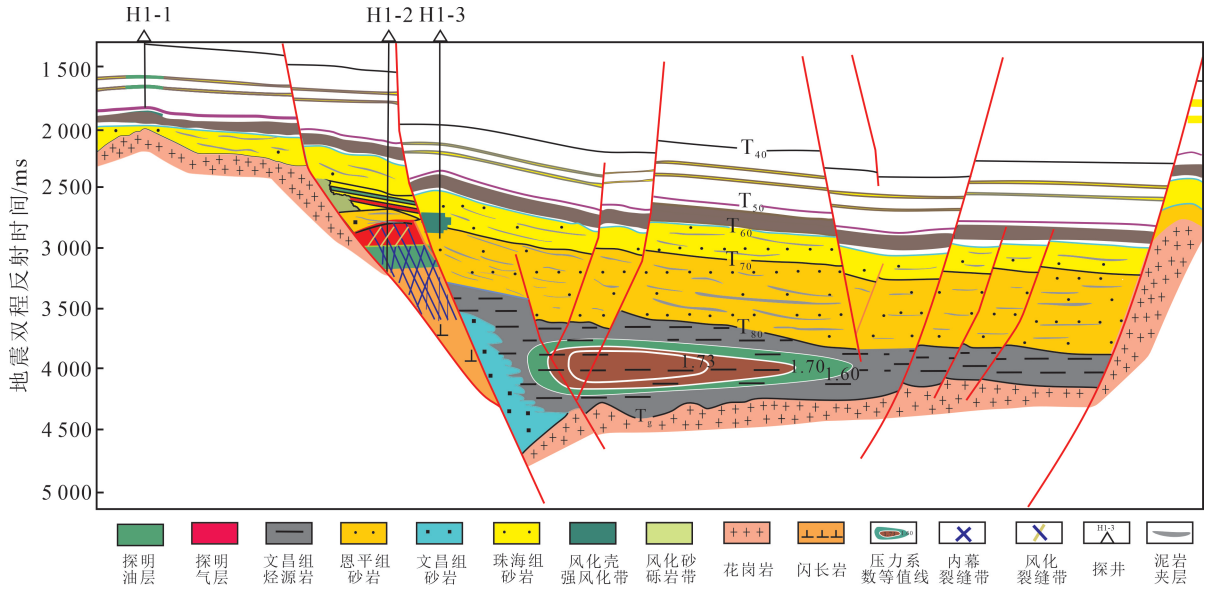


图 9　岩浆杂岩潜山油气成藏模式图[6]

Fig.9　Model of hydrocarbon accumulation Magmatic complexes[6]

藏[30-32]；4）储盖组合，潜山储层之上的古近系文昌组、恩平组泥岩直接盖层和海相珠江组泥岩区域盖层保证了良好的封闭条件；5）成藏模式，燕山期岩浆活动形成岩浆杂岩，燕山末期在古平洋板块对华南板块北西向正向俯冲背景下[33]，北西西向、北东向与近东西向断层发育，广泛发育网状裂缝的形成时间是潜山裂缝的主要形成时间。喜马拉雅期烃源岩生烃并伴随构造活化，与油源断裂活化时间匹配，溶蚀缝形成与断裂活动及烃源岩排烃过程中产生的有机酸有关。复式输导体系配合多期多幕充注，导致了上油下气、差异聚集[29]。综上所述，惠州 26－6 岩浆杂岩潜山油气藏的形成，除了充足的烃源岩之外，改造储层的断裂活动和裂缝、充注期活动的通源断裂和裂缝是成藏的关键要素。

4.3　中酸性火山熔岩型潜山油气藏

渤海湾盆地 BZ8－3S 构造中高产井的钻探成功，实现了渤中凹陷中生界火山岩油气藏的重要突破[8]，其属于典型的中酸性火山熔岩型潜山油气藏。渤海湾盆地渤中凹陷火山岩属于下白垩统义县组，发育基性、中性、酸性三个喷发旋回，纵向上厚度大，平面上范围广，多机构叠置。形成的基本条件：1）岩性岩相，BZ8－3S 构造发育大套溢流相流纹岩、火山通道相流纹质隐爆角砾岩、爆发相火山角砾熔岩等，其中喷溢相上部亚相的气孔流纹岩储层物性最好；2）储层，发育少量的气孔和杏仁体内孔等原生孔隙，主要发育构造缝和溶蚀孔缝；3）烃源岩，凹陷发育多层、大面积、高有机质丰度烃源岩，包括古近系沙河街组三段（沙三段）、沙河街组一段（沙一段）和东营组三段（东三段）暗色泥岩[34]，大规模的烃源岩为火山岩油气勘探提供了良好的物质基础[35-36]；4）储盖组合，火山岩熔岩潜山储层之上覆盖了古近系东营组厚层泥岩，封闭条件优越；5）成藏模式，燕山期义县组第三旋回酸性岩浆喷发，形成流纹岩火山机构，燕山晚期断裂活动频繁，随之形成的大量裂缝改善了除气孔流纹岩外的致密火山岩，在风化壳以下形成内幕储层，同时也使气孔流纹岩的物性变得更好。与蓬莱 9－1 花岗岩风化壳潜山油气藏、惠州 26－6 岩浆杂岩潜山油气藏类似，埋藏过程中发生裂缝改造是发育优质储层的关键，部分裂缝可叠加有机酸的溶蚀，使储层物性变得更好。BZ8－3S 构造四面环洼且临近生烃中心，沙河街组烃源岩成熟度高，深部烃源岩存在强超压，通过潜山不整合面运移至高部位火山岩潜山（图 10），火山机构上覆发育东营组厚层泥岩，长期活动断裂欠发育，利于垂向保存。

综合分析上述三个典型的油气藏可以得出，岩浆岩潜山油气成藏除了充足的油源、充注和构造背景外，储层是成藏的关键。潜山岩浆岩形成规模性储层需要具备 3 个条件：一是侵入相花岗岩、溢流相中酸性熔岩或多种岩相岩性的叠加杂岩；二是经历了强烈风化作用，风化壳发育；三是后期构造和流体改造产生裂缝和溶蚀孔隙。

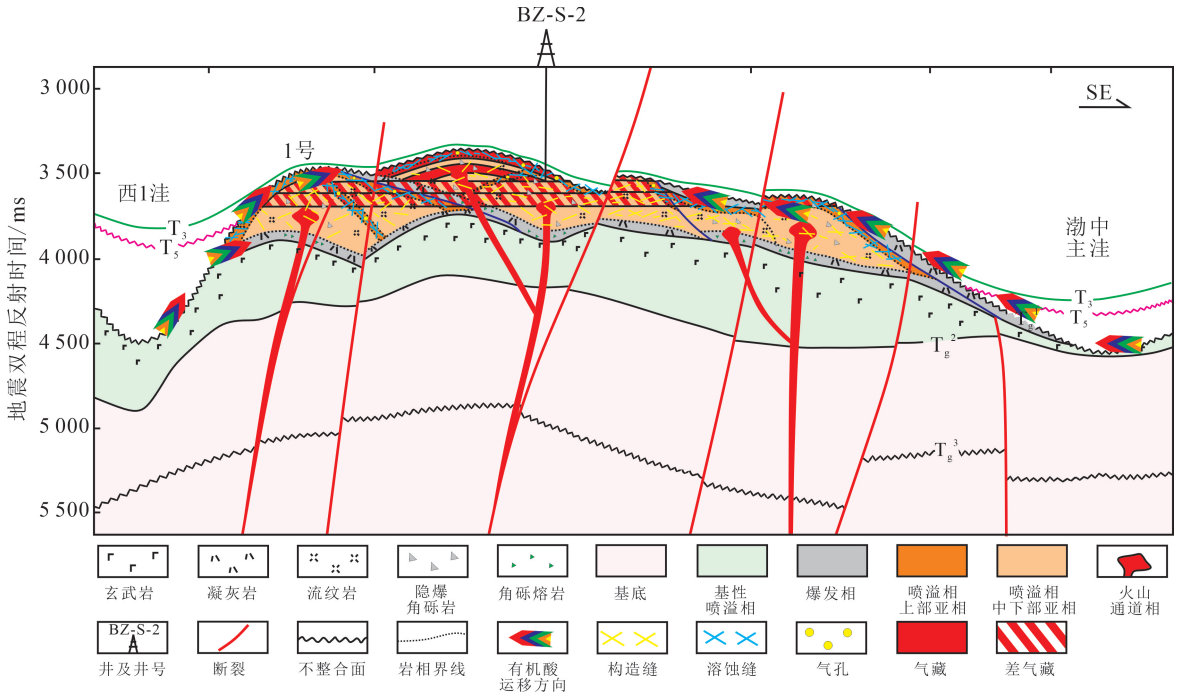


图 10 中酸火山熔岩潜山油气藏成藏模式

Fig.10 Model of hydrocarbon accumulation of intermediate-acidic lava

5 结论

1)中国近海含油气盆地基底中生代岩浆岩包括火山岩和侵入岩两类,在不同的含油气盆地中岩石类型存在明显差异,岩浆岩岩石类型多达20余种。

2)中国近海含油气盆地中生代岩浆活动从侏罗纪—白垩纪,地质时间从205～65 Ma,主活动期为160～95 Ma,早期中基性岩浆岩分布广泛,而中酸性岩浆岩呈片状分布。

3)受控于古太平洋板块的俯冲及后续的弧后裂谷作用,近海盆地发生了差异构造演化,从侏罗纪的挤压背景转换到白垩纪的区域伸展环境,东海和渤海湾盆地经历弧后裂谷作用,珠江口盆地属于陆缘岩浆弧环境。

4)近海主要含油气盆地发育花岗岩风化壳潜山油气藏、岩浆杂岩潜山油气藏和中酸性熔岩油气藏;储层是潜山成储的关键之一,侵入相的花岗岩、溢流相的中酸性熔岩或多种岩相岩性的叠加杂岩,经历了强烈的风化作用以及构造和流体的改造是潜山岩浆岩成储的主控因素。

参考文献(References):

[1] 郭锋,赵亮,张晓兵,等.华南陆块东部晚中生代岩浆作用的深部动力学过程[J]. 大地构造与成矿学 2022, 46(3): 416－434.
Guo Feng, Zhao Liang, Zhang Xiaobing, et al. Deep Dynamic Processes of Late Mesozoic Magmatism in the Eastern South China Block[J]. Geotectonica et Mineralium, 2022,46(3): 416－434.

[2] 张成晨,许长海,何敏,等.东海到南海晚中生代岩浆弧及陆汇聚体制综述[J]. 地球科学进展, 2019, 34(9): 950－961.
Zhang Chengchen, Xu Changhai, He Min, et al. Overview of Late Mesozoic Volcanic Arcs and Continental Accretion in the East China Sea to South China Sea[J]. Advances in Earth Sciences, 2019, 34(9): 950－961.

[3] 唐杰,许文良,王枫,等.古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历史:东北亚陆缘中生代-古近纪岩浆记录[J].中国科学:地球科学,2018,48(5):549－583.
Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, et al. Subduction History of the Ancient Pacific Plate Beneath the Eurasian Continent: Mesozoic-Cenozoic Magmatic Records in Northeast Asia[J]. Science China: Earth Sciences, 2018, 48(5): 549－583.

[4] 董长春,舒立旻,舒良树.中国东南部晚中生代盆岭格局及其构造-岩浆作用[J].高校地质学报, 2023,29(2):223－239.

Dong Changchun, Shu Limin, Shu Liangshu. Late Mesozoic Basin-Mountain Pattern and Its Tectonic-Magmatic Evolution in Southeastern China[J]. Journal of Geological University, 2023, 29(2): 223 - 239.

[5] 王昕，周心怀，徐国胜，等.渤海海域蓬莱 9 - 1 花岗岩潜山大型油气田储层发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质，2015，36(2)：262 - 270.
Wang Xin, Zhou Xinhuai, Xu Guosheng, et al. Development Characteristics and Main Controlling Factors of the Large Oil and Gas Reservoir in the Penglai 9 - 1 Granite Buried Hill, Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 262 - 270.

[6] 田立新，刘杰，张向涛，等.珠江口盆地惠州 26 - 6 大中型泛潜山油气田勘探发现及成藏模式[J].中国海上油气，2020，32(4)：1 - 11.
Tian Lixin, Liu Jie, Zhang Xiangtao, et al. Exploration Discovery and Accumulation Model of the Huizhou 26 - 6 Large and Medium-Sized Buried Hill Oil and Gas Field in the Pearl River Mouth Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(4): 1 - 11.

[7] 周家雄，徐春强，黄志，等.渤海湾盆地渤中凹陷 BZ8 - 3S 大型构造规模型火山岩储层形成条件[J/OL]. 地球科学，2024.[2024 - 08 - 28].https://link. cnki.net/urlid/42.1874.P.20240412.1549.002.
Zhou Jiaxiong, Xu Chunqiang, Huang Zhi, et al. Formation Conditions of Large-Scale Volcanic Rock Reservoirs in the BZ8 - 3S Structure of the Bohai Bay Basin[J/OL]. Earth Sciences, 2024.[2024 - 08 - 28]. https://link. cnki. net/urlid/42. 1874. P. 20240412. 1549.002.

[8] 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，2024，52(3)：467 - 477.
Xu Changgui, Zhang Gongcheng, Huang Shengbing, et al. Formation Conditions of Medium and Large Volcanic Oil and Gas Reservoirs in the Cretaceous of the Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 52(3): 467 - 477.

[9] 徐国盛，陈飞，周心怀，等.蓬莱 9 - 1 构造花岗岩古潜山大型油气田的成藏过程[J].成都理工大学学报(自然科学版)，2016，43(2)：153 - 162.
Xu Guosheng, Chen Fei, Zhou Xinhuai, et al. Accumulation Processes of the Large Oil and Gas Field in the Penglai 9 - 1 Structural Granite Buried Hill[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science), 2016, 43(2): 153 - 162.

[10] 杨传胜，李刚，杨长清，等.东海陆架盆地及其邻域岩浆岩时空分布特征[J].海洋地质与第四纪地质，2012，32(3)：125 - 133.
Yang Chuansheng, Li Gang, Yang Changqing, et al. Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Magmatic Rocks in the East China Sea Continental Shelf Basin and Adjacent Areas[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(3): 125 - 133.

[11] 王绪诚，陈维涛，何叶，等.珠江口盆地惠西南地区古新世火山机构对有利储层的控制作用[J].石油实验地质，2022，44(3)：466 - 475.
Wang Xucheng, Chen Weitao, He Ye, et al. Control of Paleocene Volcanic Edifice on Favorable Reservoirsa Case Study of the Southwestern Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(3): 466 - 475.

[12] 侯凯文.东海盆地丽水—椒江凹陷前新生代岩石特征及基底新认识[J].科技创新与应用，2021，11(12)：1 - 8.
Hou Kaiwen. New Understanding of the Characteristics of the Pre-Cenozoic Rocks and Basement in the Lishui-Jiaojiang Sag of the East China Sea Basin [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2021, 11(12): 1 - 8.

[13] 陈长民，施和生，许仕策，等.珠江口盆地(东部) 第三系油气藏形成条件[M].北京：科学出版社，2003.
Chen Changmin, Shi Hesheng, Xu Shice, et al. Formation Conditions of Oil and Gas Reservoirs in the Third System of the Pearl River Mouth Basin (Eastern)[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[14] 李潇雨.惠州凹陷古近系沉积相及岩相古地理演化[D].成都：成都理工大学，2007.
Li Xiaoyu. Sedimentary Facies and Paleo-Geographic Evolution of the Paleogene in the Huizhou Sag[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.

[15] 刘杰，侯明才，王菲，等.珠江口盆地晚侏罗世中基性火山岩的岩石成因与构造意义：来自年代学和地球化学的约束[J].地质学报，2023，97(2)：364 - 375.
Liu Jie, Hou Mingcai, Wang Fei, et al. Petrogenesis and Tectonic Significance of Mafic Volcanic Rocks in the Late Jurassic of the Pearl River Mouth Basin: Constraintsfrom Chronology and Geochemistry[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(2): 364 - 375.

[16] 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. Cyclic Division of Mesozoic Volcanic Eruptions in the

Bohai Sea Area and Their Relationship with Oil and Gas[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(2): 18-26.

[17] 岳庆友.渤中凹陷中生界火山岩成储机理及分布规律研究[D].长春:吉林大学, 2021.
Yue Qingyou. Study on the Mechanism and Distribution Rules of Mesozoic Volcanic Rock Reservoirs in the Bohai Bay Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2021.

[18] 刘金水,许怀智,蒋一鸣,等.东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化[J].地质学报,2020,94(3):675-691.
Liu Jinshui, Xu Huaizhi, Jiang Yiming, et al. Structural and Tectonic Evolution of the Mesozoic and Cenozoic Basins in the East China Sea[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(3): 675-691.

[19] 蒋玉波.东海陆架盆地南部中生代地层展布及油气远景探讨[D].青岛:中国海洋大学,2013.
Jiang Yubo. Discussion on the Distribution of Mesozoic Strata and Oil and Gas Prospects in the Southern East China Sea Continental Shelf Basin[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.

[20] Dai X J, Tang H F, Zhao T, et al. Facies Architecture Model of the Shimentan Formation Pyroclastic Rocks in the Block-T Units, Xihu Sag, East China Sea Basin, and Its Exploration Significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(4): 1076-1087.

[21] 高阳东,张向涛,张丽丽,等.珠江口盆地中生代陆缘岩浆弧地质特征及构造背景[J].地球科学,2022, 47(7):2317-2327.
Gao Yangdong, Zhang Xiangtao, Zhang Lili, et al. Geological Characteristics and Tectonic Background of Mesozoic Continental-Margin Volcanic Arcs in the Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Sciences, 2022, 47(7): 2317-2327.

[22] 祝嵩,姚永坚,李学杰.南海及邻区岩浆岩时空分布特征及机制[J].海洋地质与第四纪地质,2021,41(4): 87-115.
Zhu Song, Yao Yongjian, Li Xuejie. Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Mechanisms of Magmatic Rocks in the South China Sea and Adjacent Areas[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2021, 41(4): 87-115.

[23] 李宁辛.潮汕坳陷侏罗-白垩系火成岩特征及其油气地质意义[D]. 成都:西南石油大学, 2019.
Li Ningxin. Characteristics and Geological Significance of Jurassic-Cretaceous Igneous Rocks in the Chaoshan Sag [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.

[24] Cheng Y J, Wu Z P, Xu B, et al. The Mesozoic Tectonic Evolution of the East China Sea Basin: New Insights from 3D Seismic Reflection Data [J]. Tectonophysics, 2023, 848(5): 229717.

[25] Liu Z, Dai L M, Li S Z, et al. Mesozoic Magmatic Activity and Tectonic Evolution in the Southern East China Sea Continental Shelf Basin: Thermo-Mechanical Modelling[J]. Geological Journal, 2017, 53(Sup.1): 240-251.

[26] 刘朋波,吕丁友,于海波,等. 渤海蓬莱9-1花岗岩潜山地震反射特征分析与储层解释[J].石油地球物理勘探, 2022, 57(5): 1148-1155.
Liu Pengbo, Lü Dingyou, Yu Haibo, et al. Analysis of Seismic Reflection Characteristics and Reservoir Interpretation of the Penglai 9-1 Granite Buried Hill in the Bohai Sea [J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2022, 57(5): 1148-1155.

[27] 胡志伟,徐长贵,杨波,等. 渤海海域蓬莱9-1油田花岗岩潜山储层成因机制及石油地质意义[J].石油学报, 2017, 38(3): 274-285.
Hu Zhiwei, Xu Changgui, Yang Bo, et al. Formation Mechanism and Geological Significance of the Granite Buried Hill Reservoir in the Penglai 9-1 Oil Field, Bohai Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(3): 274-285.

[28] 王明臣,官大勇,刘朋波,等.渤海蓬莱9-1油藏花岗岩储层特征与成储化条件分析[J].地质科技情报, 2016, 35(6): 83-89.
Wang Mingchen, Guan Dayong, Liu Pengbo, et al. Analysis of Reservoir Characteristics and Accumulation Conditions of the Penglai 9-1 Oil Reservoir in the Bohai Sea[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(6): 83-89.

[29] 高阳东,刘军,彭光荣,等.珠江口盆地油气勘探新领域及资源潜力[J].石油学报, 2024, 45(1): 183-201.
Gao Yangdong, Liu Jun, Peng Guangrong, et al. New Fields and Resource Potential for Oil and Gas Exploration in the Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 183-201.

[30] 张向涛,史玉玲,刘杰,等.珠江口盆地惠州凹陷古近系文昌组优质湖相烃源岩生烃动力学[J].石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1249-1258.
Zhang Xiangtao, Shi Yuling, Liu Jie, et al.

Hydrocarbon Generation Dynamics of High-Quality Lacustrine Source Rocks in the Wenchang Formation of the Paleogene Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1249 - 1258.

[31] 刘杰，徐国盛，温华华，等.珠江口盆地惠州 26 - 6 构造古潜山—古近系油气成藏主控因素[J].天然气工业，2021，41(11)：54 - 63.
Liu Jie, Xu Guosheng, Wen Huahua, et al. Main Controlling Factors for Oil and Gas Accumulation in the Huizhou 26 - 6 Structure of the Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(11): 54 - 63.

[32] 彭光荣，陈淑慧，李洪博，等.珠江口盆地惠州凹陷复合岩浆岩潜山储层发育机制[J/OL].地球科学，2024.[2024 - 08 - 25]. https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20240923.1309.004.
Peng Guangrong, Chen Shuhui, Li Hongbo, et al. Development Mechanism of Compound Volcanic Rock Buried Hill Reservoirs in the Huizhou Sag of the Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Sciences, 2024. [2024 - 08 - 25]. https://link.cnki.net/urlid/42.1874.P.20240923.1309.004.

[33] 李三忠，臧艺博，王鹏程，等.华南中生代构造转换和古太平洋俯冲启动[J].地学前缘，2017，24(4)：213 - 225.
Li Sanzhong, Zang Yibo, Wang Pengcheng, et al. Tectonic Transition and Initiation of Ancient Pacific Subduction in South China During the Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 213 - 225.

[34] 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 Rules of High-Quality Volcanic Rock Reservoirs in the Mesozoic of the Bohai Bay Basin BZ Central Sag [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(1): 1 - 16.

[35] 张莹，刘志峰，陈少平，等.渤海湾盆地渤中凹陷烃源岩形成与演化的主控因素[J/OL].成都理工大学学报(自然科学版)，2024.[2024 - 08 - 26]. https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20241011.1749.002.
Zhang Ying, Liu Zhifeng, Chen Shaoping, et al. Main Controlling Factors for the Formation and Evolution of Source Rocks in the BZ Central Sag of the Bohai Bay Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2024. [2024 - 08 - 26]. https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20241011.1749.002.

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