

doi: 10.12029/gc20200501

张勇,姚永坚,李学杰,尚鲁宁,杨楚鹏,王中波,王明健,高红芳,彭学超,黄龙,孔祥淮,汪俊,密蓓蓓,钟和贤,陈泓君,吴浩,罗伟东,梅西,胡刚,张江勇,徐子英,田陟贤,王哲,李霞,王忠蕾. 2020. 中生代以来东亚洋陆汇聚带多圈层动力下的中国海及邻区构造演化及资源环境效应[J]. 中国地质, 47(5): 1271-1309.

Zhang Yong, Yao Yongjian, Li Xuejie, Shang Luning, Yang Chupeng, Wang Zhongbo, Wang Mingjian, Gao Hongfang, Peng Xuechao, HuangLong, Kong Xianghuai, Wang Jun, Mi Beibei, Zhong Hexian, Chen Hongjun, Wu Hao, Luo Weidong, Mei Xi, Hu Gang, Zhang Jiangyong, Xu Ziyong, Tian Zhixian, Wang Zhe, Li Xia, Wang Zhonglei. 2020. Tectonic evolution and resource-environmental effect of China Seas and adjacent areas under the multisphere geodynamic system of the East Asia ocean-continent convergent belt since Mesozoic[J]. Geology in China, 47(5):1271-1309(in Chinese with English abstract).

中生代以来东亚洋陆汇聚带多圈层动力下的中国海及邻区构造演化及资源环境效应

张勇¹,姚永坚²,李学杰²,尚鲁宁¹,杨楚鹏²,王中波¹,王明健¹,高红芳²,彭学超²,黄龙¹,孔祥淮¹,汪俊²,密蓓蓓¹,钟和贤²,陈泓君²,吴浩¹,罗伟东²,梅西¹,胡刚¹,张江勇²,徐子英²,田陟贤¹,王哲²,李霞¹,王忠蕾¹

(1. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075)

摘要:中国东部中—新生代构造活动主要受太平洋板块和菲律宾板块与欧亚板块相互作用的控制。近年来,地球系统多圈层构造观的提出为深入理解东亚洋陆汇聚系统各圈层之间的相互作用提供了新的思维。本文以地球系统多圈层构造观为指导,依托1:100万海洋区域地质调查实际资料与成果,在东亚大陆边缘多圈层动力系统的框架内,对中国海域及邻区的地质构造进行了总结,初步形成了以“一个边缘、两次消减、三期伸展、分层控制”为核心的“东亚洋陆汇聚边缘多圈层相互作用”理论模式,并进一步提出新的构造单元划分方案。本文首次将大洋板块与大陆边缘稳定地块之间的区域,划分为“东亚大陆边缘汇聚带”这一独立的一级构造单元,按照构造演化的差异,以台湾岛界大致可以分为北部的日本—琉球段和南部的菲律宾段。“东亚大陆边缘汇聚带”以全新视角诠释了中—新生代以来在西太平洋俯冲汇聚系统下,东亚大陆发生的多期次地质构造事件的深部板块动力学过程,特别是在菲律宾海板块俯冲背景下,形成了中国海域东部带状变化、南部环状变化的地貌特征。海域地貌格局进一步控制了东部海域“大江大河—大三角洲—陆源碎屑—条带状”和南部海域“短源河流—高角度陆坡—混合物源—环状分布”的沉积分异模式。

关键词:海洋区域地质;中—新生代;东亚洋陆汇聚带;大地构造;资源环境效应;海洋地质调查工程

中图分类号:P736.1 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2020)05-1271-39

Tectonic evolution and resource-environmental effect of China Seas and adjacent areas under the multisphere geodynamic system of the East Asia ocean-continent convergent belt since Mesozoic

收稿日期:2020-04-03;改回日期:2020-07-25

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160137, DD20160138, DD20190205, DD20190208, 1212011220116, GZH201400203, DD20190366, DD20190378, 2017A0303012002)资助。

作者简介:张勇,男,1970年生,研究员,主要从事海洋地质学方面的研究;E-mail: qimgzy@163.com。

通讯作者:姚永坚,女,1964年生,博士,教授级高级工程师,主要从事海洋油气地质和区域地质的综合研究;E-mail: yjyaomail@163.com。

ZHANG Yong¹, YAO Yongjian², LI Xuejie², SHANG Luning¹, YANG Chupeng²,
WANG Zhongbo¹, WANG Mingjian¹, GAO Hongfang², PENG Xuechao², HUANG Long¹,
KONG Xianghuai¹, WANG Jun², MI Beibei¹, ZHONG Hexian², CHEN Hongjun², WU Hao¹,
LUO Weidong², MEI Xi¹, HU Gang¹, ZHANG Jiangyong², XU Ziyong², TIAN Zhixian¹,
WANG Zhe², LI Xia¹, WANG Zhonglei¹

(1. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China)

Abstract: The Mesozoic–Cenozoic tectonic activity in eastern China was mainly controlled by the interaction of the Pacific plate and the Philippine plate with the Eurasian plate. In recent years, the concept of multisphere tectonics of earth system has provided a new perspective for understanding the interaction between various layers of the East Asian convergence system. Based on the 1:1 million marine regional geological survey, this paper comprehensively summarizes the geological structure of China's sea areas and their adjacent areas, initially forming the "multisphere interactions in East Asia ocean–continent convergence zone" with the core of "one margin, two–stage subduction, three–stage extension, and hierarchical control". In addition, a new first–order tectonic unit division scheme was first proposed in the region between the oceanic plate and the continental margin, referred to as "East Asia continental margin convergence zone". According to the differences of tectonic evolution, this tectonic unit could be roughly divided into the northern Japan–Ryukyu section and the southern Philippine section based on Taiwan Island. "East Asia continental margin convergence zone" has provided a powerful explanation for the geodynamic process of multiple geotectonic events in East Asia under the West Pacific subduction and Philippine Sea plate subduction system since the Meso–Cenozoic. It formed geomorphic features in China's sea areas which show zonal variation in East China's sea areas and cyclic variation in South China's sea areas. The geomorphic framework further caused the sedimentary differentiation model of "Great River–Great Delta–Terrigenous–Banded" and "Short source river–High angle slope–Multisource–Annular" in East and South China's sea areas, respectively.

Key words: Marine regional geology; Meso–Cenozoic; East Asia Ocean–continent convergence belt; geotectonics; resource and environmental effect; marine geological survey engineering

About the first author: ZHANG Yong, male, born in 1970, senior researcher, mainly engages in marine regional geological survey and research; E–mail: zhangyong@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: YAO Yongjian, female, born in 1964, senior engineer, mainly engages in offshore oil and gas geology and tectonic geology research; E–mail: yjyaomail@163.com.

Fund support: Supported by Geological Survey Project (No. DD20160137, DD20160138, DD20190205, DD20190208, 1212011220116, GZH201400203, DD20190366, DD20190378), Guangdong Natural Science Foundation Research Team Project (No. 2017A030312002).

1 引 言

大地构造学是研究大陆、大洋或某一区域岩石圈的结构、组成、演化和运动历史的一门学科,其研究需要综合地质、地球物理和地球化学等分支学科的研究成果,以了解海洋、大陆、造山带和盆地的起因和发展过程,认识岩石圈的演化规律(潘桂棠等, 2009; 万天丰, 2019)。大地构造学是20世纪30年代由前苏联学者最先提出,最初是建立在槽台假说的基础之上,20世纪70年代以来,才开始运用板块

构造学说来重新探讨大地构造学问题。目前,板块构造说虽然仍盛行,然而,其板块动力、板块起源及板块上陆三大问题尚未解决。随着科学技术的飞速发展、人类对大陆和海洋地质调查的深入、乃至对地球深部和宇宙空间的进一步探索,大地构造研究面临的诸多问题已经难以用板块构造进行合理的解释,大地构造研究必须跨越板块构造。20世纪80年代,由大气科学界首次提出将地球各圈层作为一个整体进行探索研究,1986年NASA首次提出了地球系统科学(Earth System Science)这一概念,

1997年NASA出版了“Earth System Science: A Closer View”,标志着“地球系统科学”的起步(Johnson et al., 1997)。

1945年2月,黄汲清先生的《中国主要地质构造单元》正式出版,标志着中国大地构造学研究的起源(Huang, 1945)。20世纪60年代,在中国东部1:100万地质图资料的基础上,兴起了研究中国大地构造学的高潮。至今,中国陆域已经陆续实施了中大比例尺的地质调查工作,大地构造学研究方兴未艾,形成了众多的大地构造观点或流派,指导着中国大地构造的研究进程(许志琴等, 2006, 2016; 任纪舜等, 1999, 2017; 李三忠等, 2012, 2019; 李廷栋等, 2019; 万天丰, 2019)。在地球系统科学思想的基础上,任纪舜院士于2017年提出了一个新的大地构造理论——地球系统多圈层构造观。地球系统多圈层构造观把大地构造学从以往研究地球表层的地壳构造(地槽-地台说)、岩石圈构造(板块构造)推进到研究地球整体多圈层的构造,强调深层与表层构造的密切联系,特别是深部壳-幔-核之间的相互作用;甚至把地球放在宇宙空间,考虑地外因素对地球演化的作用和影响(任纪舜等, 2017, 2019)。

大洋和大陆板块是地球外壳岩石圈的两个基本组成与结构构造单元,两者相伴而生,互为转化,研究认识大洋和大陆板块二者之间的差异与联系,是揭示认知整体地球的最基本内容。研究认识洋-陆板块及其关系,除分别对大洋和大陆的本身进行最直接的研究外,对洋陆两者的交接转换过渡带的研究是揭示二者成因联系的关键。地球上部的洋陆过渡带的研究,对揭示认知洋陆关系和地球外壳洋陆两大基本组成单元具有重要的科学意义。中国东部主要受西太平洋板块和菲律宾海板块与欧亚板块相互作用的控制,是全球最复杂最具典型代表性和富有独特特色的研究区域。随着中国“一带一路”战略倡议的提出,西太平洋及其洋陆过渡带无疑是该战略的核心区域,是构建沿线国家利益、命运和责任共同体、促使人类社会可持续和平稳发展的关键地区。相关地学关键科学问题的研究将是“一带一路”战略发展的重要支撑,是中国走向远洋深海、走向世界、走向海洋强国的必经通道(张国伟等, 2019)。

中国大地构造学的研究长期以来一直集中于

陆域,涌现了一大批大地构造学家以及众多学术流派,呈现百家争鸣、百花齐放的盛状。而对于中国面积浩瀚、地质情况复杂的管辖海域,一直缺乏全面、系统的海域地质资料,直接制约了海域大地构造研究。自1999年开始,经过近20年的努力,中国全面完成了管辖海域1:100万海洋区域地质调查工作(张勇等, 2019),并深度参加了国际大洋发现计划(IODP)(李春峰等, 2009; Sun et al., 2018; Jian et al., 2018; 汪品先, 2019),首次获得了中国海域大量的地质、地球物理资料,并积累了一批优秀的原创性成果。这些调查研究成果的取得,为中国海域及邻区的大地构造研究提供了新的证据,开辟了新的思路(雷宝华等, 2018; 汪品先等, 2018; Wang et al., 2020; Lin et al., 2020; Jian et al., 2020)。遵循“深部制约浅部、区域控制局部、动力驱动变形、演化决定格局”的一般规律,对中国海域1:100万区域地质调查的原始资料、阶段成果和创新认识进行了总结和提升,初步形成了以“一个边缘、两次消减、三期伸展、分层控制”为核心的“东亚洋陆汇聚边缘多圈层相互作用”理论模式,并在这一理论模式的框架之下,开展了构造单元划分、演化过程的重建工作,明确中生代以来中国东部在板块汇聚过程中构造体制的重大转折及其引发的资源与环境效应。

2 东亚洋陆汇聚边缘多圈层动力系统

在全球板块构造图上,中国位于欧亚板块的东南部,南为印度板块,东为太平洋板块和菲律宾海板块。中国西部中生代构造活动主要受特提斯关闭与印-欧板块相互作用的制约(许志琴等, 2006, 2016; Pan et al., 2012; Wu et al., 2019),而中国东部则主要受太平洋板块和菲律宾海板块与欧亚板块相互作用的控制(李家彪等, 2017; Shang et al., 2019; 李三忠等, 2019; 杨长清等, 2019; 杨传胜等, 2020)。查明中国与全球主要构造系统的关系、中国在全球构造框架中的位置;明确各地史发展阶段,中国受控的地球动力系统,才能更全面、更深刻地理解中国大地构造的基本特征和演化过程(任纪舜等, 2016)。

中-新生代以来,特提斯俯冲消减和随后的印-欧板块碰撞在中国西部形成了全球最高、最厚、最新和体积最大的青藏高原,并深刻影响了全球资

源的再分配和生态环境的变化(许志琴等,2006)。而太平洋板块和菲律宾海板块与欧亚板块相互作用控制了中国东部漫长的海岸线与宽缓的大陆架,形成了中国东部复杂又独特的大地构造特征(王颖等,2011;李家彪等,2017;尚鲁宁等,2018a,b;李三忠等,2019;张国伟等,2019)。中国东部海域是东亚大陆边缘海构造体系的重要组成部分,自印支运动以来,中国东部形成了统一的大陆边缘,此后的200 Ma一直受控于大洋板块向东亚大陆板块之下的俯冲汇聚,先后经历了古太平洋板块和菲律宾海板块的俯冲消减过程(郭令智等,1998;徐先兵等,2009;李三忠等,2019)。在中国东部洋-陆板块汇聚的大背景下,由深层到浅层,发生了深部动力-热力机制调整、软流圈扰动、岩石圈破坏、陆缘性质转换、板块边界跃迁等一系列重大区域性构造地质过程,直接或间接诱发了多期次的伸展盆地和岩浆活

动,控制了中国东部沿海地区以及西太平洋边缘海域的油气、金属等矿产资源的形成和分布。

中国东部大陆边缘超长时空尺度洋-陆汇聚过程与特提斯洋关闭、青藏高原隆升过程遥相呼应,共同控制了整个东亚和东南亚中-新生代的深部动力、构造演化、盆地发育、源汇过程和资源分布,是形成现今东亚和东南亚构造、地貌、地理、气候、生态格局的根本动因(图1)。地球多圈层构造研究已成为国内外地学研究的热点之一,将整个近地表圈层系统作为一个有机的整体进行综合研究,这一理念得到研究人员的普遍认可。本文将从地球系统多圈层构造基本概念出发,综述中生代以来东亚大陆边缘汇聚系统的大地构造格局演变及其资源环境效应。

3 中国海域构造单元划分

在板块构造的理论框架中,全球构造格架和洲

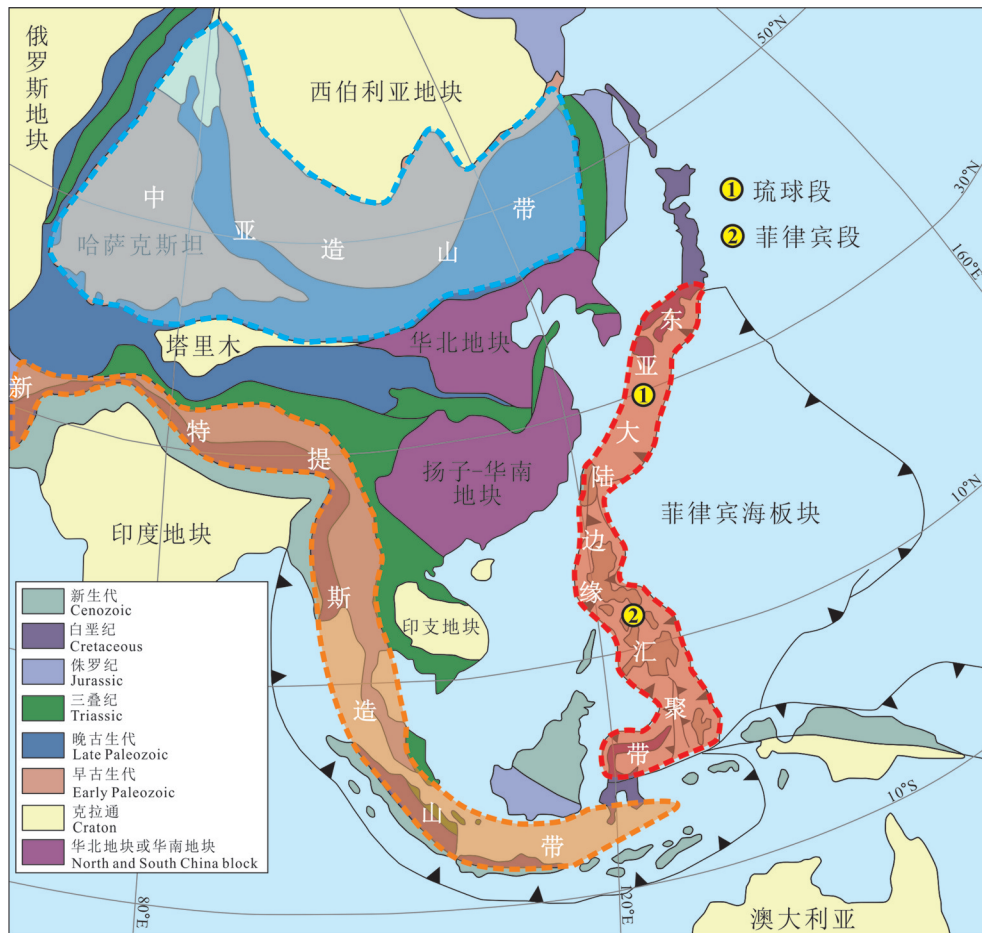


图1 东亚大陆边缘汇聚带大地构造位置简图(据李三忠等,2018修改)

Fig.1 The geotectonic location of East Asia continental margin convergence zone (modified from Li Sanzhong et al.,2018)

际板块边界是清晰的,但在中国海域大比例尺的区域地质调查和编图中,由于其位于西太平洋边缘独特的大地构造位置,大地构造单元划分是当前板块构造精细结构研究的关键问题。它既是大地构造研究的理论问题,也是区域地质研究和资源能源预测评价亟待解决的实际问题。因此,如何应用板块构造观点划分中国大地构造单元,还有许多值得探讨之处,关键在于理顺大地构造研究的思路,理解中国大地构造形成演化的基本特征以及确立构造单元划分准则。以板块构造理论和地球系统多圈层构造观为指导,依托1:100万海洋区域地质调查实际资料与成果,在东亚大陆边缘多圈层动力系统的框架内,对中国海域及邻区的地质构造进行全面的总结,提出新的构造单元划分方案。

3.1 构造单元划分原则

在充分收集中国海域及邻区地质、地球物理和地球化学资料与成果的基础上,以科学、系统、准确地反映中国海域基础地质调查程度和研究成果为前提,开展构造单元重新划分的工作。新方案的形成遵循“深部制约浅部、区域控制局部、地质-地球物理-地球化学多学科相结合”的原则,把握中国海域构造格架与东亚大陆边缘构造的关系,突出反映晚中生代以来各板块、地块的相互作用关系以及与南海形成演化的关系。重点分析中国海域的构造地质特征,揭示海域“沟-弧-盆”的构造格局和“陆缘海底扩张”过程的演化模式,探讨其动力学机制,发展完善全球大地构造学理论。

岛弧和增生楔是联系板块构造和造山作用的重要环节,其结构、构造、物质组成记录了板块汇聚的构造动力学历史和区域构造-地貌演变过程,其中增积的火成岩块更是研究已消亡洋壳及海山的仅存样品,能够提供汇聚边界地幔源区、构造演化以及物质运移的关键信息。在中国海域及邻区的构造地质学研究中,岛弧和俯冲增生系统备受关注。由于结构构造、物质组成上的复杂多变,对其构造属性的厘定存在较大争议。本次将大洋板块与大陆边缘稳定地块之间的区域,划分为独立的一级构造单元,即东亚大陆边缘汇聚带。这一汇聚带自中生代以来发育于大陆岩石圈板块与大洋岩石圈板块相互作用和转换汇聚的构造体制中,是两个活动俯冲系统之间的构造变形区;在时间和空间上

按一定的历史演化、彼此密切相关的空间关系配置,形成具有特定的物质组成、结构和构造体系,构成西太平洋一级构造边界。按照构造演化的差异,以台湾岛界大致可以分为北部的日本-琉球段和南部的菲律宾段。

3.2 构造单元划分依据——来自1:100万海洋区域地质调查的新证据

中国海域及邻区构造单元的划分,在坚持陆海统筹的同时,兼顾海域的独立性和特殊性,其依据主要包括两个方面:(1)基于陆域构造单元划分方案,通过追踪主要构造单元边界在海域的延伸状况,确定陆域构造单元在海域的分布;(2)基于重磁、热流、多道地震、OBS深地震探测以及海底和岛屿岩石取样等多种地质、地球物理资料的综合分析,确定独立于陆域构造体系之外的海域构造单元和主要边界的分布及其构造属性。

3.2.1 中国海域及邻区深部壳幔结构信息

以多道地震剖面、OBS深地震探测剖面和重震震联合反演地学大断面制约时,根据重力资料,反演计算了中国海及邻区深部壳幔边界埋深,明确了中国海域及邻区地壳厚度变化特征和不同海域的地壳性质(图2)。计算结果表明,中国海及邻区的地壳性质存在较大差异,总体上处于西侧大陆型地壳和东侧大洋型地壳的过渡区域。俯冲带构成了大洋地壳和过渡区之间截然的界限。在俯冲带西侧,中国东部海域和南部海域地壳厚度和地壳性质变化趋势不同。东部海域由陆向海地壳逐渐减薄,反映板块俯冲作用导致的地壳破坏程度的加剧。中国东部陆区为典型的陆壳,渤海海域和黄海海域地壳受中-新生代盆地裂隙过程和郯庐断裂带多期活动的影响,地壳发生轻微破坏,但厚度普遍在30 km左右。东海自西向东地壳减薄破坏程度逐渐加剧,冲绳海槽地壳最薄处仅约12 km,局部可能已经形成初生洋壳。琉球岛弧地壳厚度约25 km,是随着冲绳海槽的张开而裂离的大陆边缘地壳。台湾具有碰撞造山作用导致的增厚地壳,地壳厚度大于35 km。南部海域地壳由陆向海具有波浪状减薄的趋势,南海北部大陆边缘为减薄型陆壳,南海海盆、苏禄海盆和苏拉威西海盆为成熟的边缘海盆地,发育洋壳基底,而三者之间的巴拉望群岛和苏禄群岛则为岛弧型地壳。

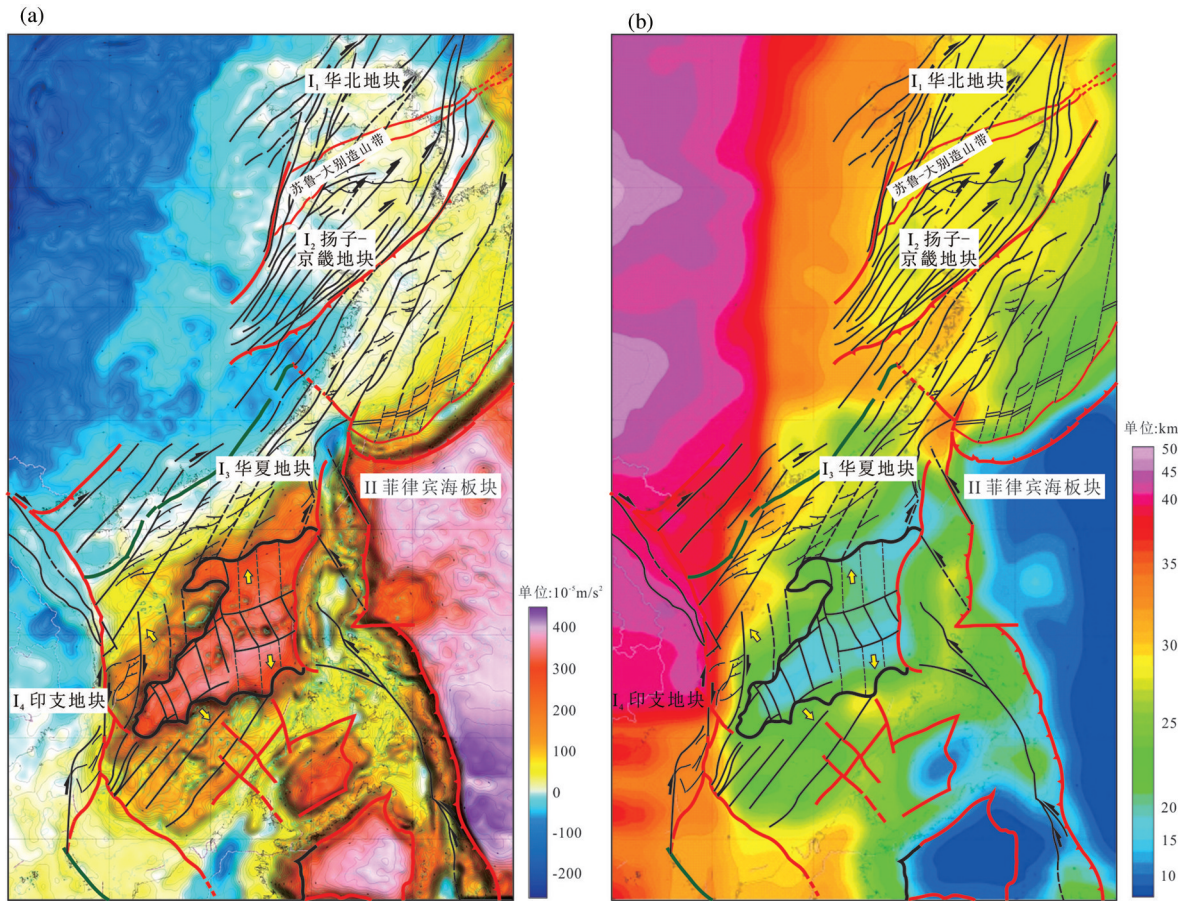


图2 中国海域及邻区布格重力异常图(a)和莫霍面深度图(b)

Fig.2 Bouguer gravity anomaly map (a) and Moho depth map (b) of China's seas and adjacent areas

3.2.2 中国海域重要构造边界追踪

(1) 江山—绍兴断裂带在海域的延伸

江山—绍兴断裂带(简称江绍断裂带)在陆域东起杭州湾外大陆架,向西南延伸并与萍乡—广丰深断裂连接(胡开明,2001),被认为是扬子地块和华夏地块俯冲碰撞的界线(王鸿祯,1986)。在930~1154 Ma,扬子地块东南缘由被动大陆边缘转化为活动大陆边缘,形成江南古岛弧。866~768 Ma期间一系列的高压变质、构造变形事件表明江绍断裂带是扬子地块与华夏地块新元古代碰撞对接带(邢凤鸣等,1992;周新华等,1993;宋传中等,2019)。江绍断裂带在杭州湾入海后,表现为一条串珠状分布的正高磁异常带;在重力异常图上,分隔了南、北两个具有不同分布特征的重力异常区;在地震剖面上,构成东海陆架盆地的西北界线。该断裂带向东呈NEE向延伸至对马岛附近(图2)。

(2) 钓鱼岛隆起带及两侧断裂发育特征

钓鱼岛隆起带中—北段表现为宽阔平坦的基底隆起,在鱼山—久米断裂带以南的东海陆架边缘南段之下并不存在大规模基底隆起,表明钓鱼岛南段与中—北段构造特征存在显著差异。地震剖面显示,东海陆架边缘南部及陆坡之下的声波基底埋深小于东海陆架盆地和冲绳海槽,表现为基底隆起(图3)。与钓鱼岛隆起带中—北部的基底隆起相比,本区的声波基底埋藏更深,基底顶面起伏较大,包含大量的岩浆岩侵入体。这一基底隆起从根本上分隔了东海陆架盆地和冲绳海槽,是真正的钓鱼岛隆起带南段。如果将东海陆架坡折视为冲绳海槽在地形上的西边界,将钓鱼岛隆起带声波基底的东缘视为冲绳海槽在构造上的西边界,通过南、北地震剖面的对比可见,中—北段的地形边界位于构造边界以东,而南段的地形边界位于构造边界以西。在海槽中—北段,这种差异主要受控于海槽张裂过程与沉积物供给速率的相互关系,而在南段则

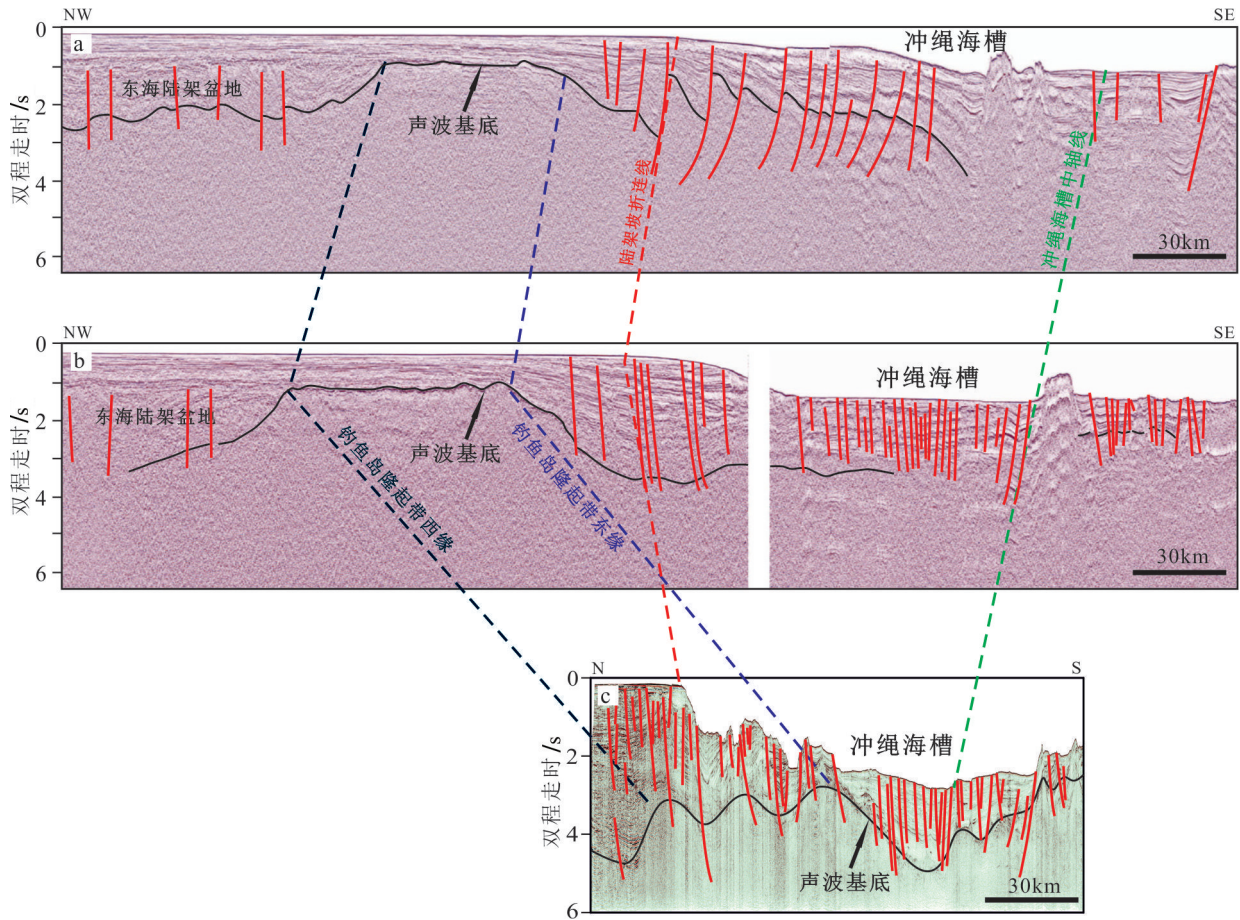


图3 钓鱼岛隆起带及两侧界限的南北对比(据尚鲁宁等,2018a)

Fig.3 Topographic and structural characteristics of the northern—middle (a, b) and southern (c) parts of the Diaoyudao Uplift and Okinawa Trough (after Shang Luning et al., 2018a)

体现了台湾碰撞造山和冲绳海槽向西前展两种不同地球动力过程的转换和过渡。

(3)南海西缘断裂带

南海西缘断裂带南北延伸长达1500 km以上,是东亚大陆边缘的巨大走滑构造带,由莺歌海盆地东缘1号断裂、中建断裂、万安东断裂及两侧伴生构造作为统一的断裂系统(简称WMFZ)(图4),是两侧印支—巽他地块与华夏地块、南沙地块、曾母地块的分界,具有长期和差异性的活动特点。南海西缘走滑断裂带形成于新生代早期,其活动历史与陆地哀牢山—红河断裂具有相似性。平面上,该断裂带走滑活动具有分段性,可分为北、中、南3段:北段——红河—莺歌海段,中段——中建段,南段——万安段,北段断裂带整体呈NW—NNW走向;中段中建断裂是南海西缘断裂带的主体部分,主要表现为扭张性活动、倾滑运动,呈近NS向展布;南段万

安断裂带呈NNW向展布,并向东南撒开。南海西缘断裂带可分为3个主要构造活动时期:渐新世—早中新世左旋走滑期、中—晚中新世走滑转换期和晚中新世以来右旋走滑期,总体由北往南从左旋逐渐向右旋活动转换,分别受到印支地块挤出—逃逸和古南海向南俯冲拖曳、南海海底扩张不同动力联合作用的结果,形成了陆架区以走滑作用为主的莺歌海盆地、万安盆地和陆架—陆坡区以走滑—伸展双重作用为主的中建南盆地。

(4)南海东缘俯冲带

该俯冲带分为3段,北段为马尼拉俯冲带,中段为内格罗斯俯冲带,南段为哥达巴托俯冲带。马尼拉俯冲带表现为一系列近S—N向反“S”形延伸的岛弧和沟槽区,具有南北分段和东西分带的特征,自西向东依次为俯冲前缘、马尼拉海沟、增生楔和海槽共4个构造带(图5);以巴布延断裂、菲律宾断裂

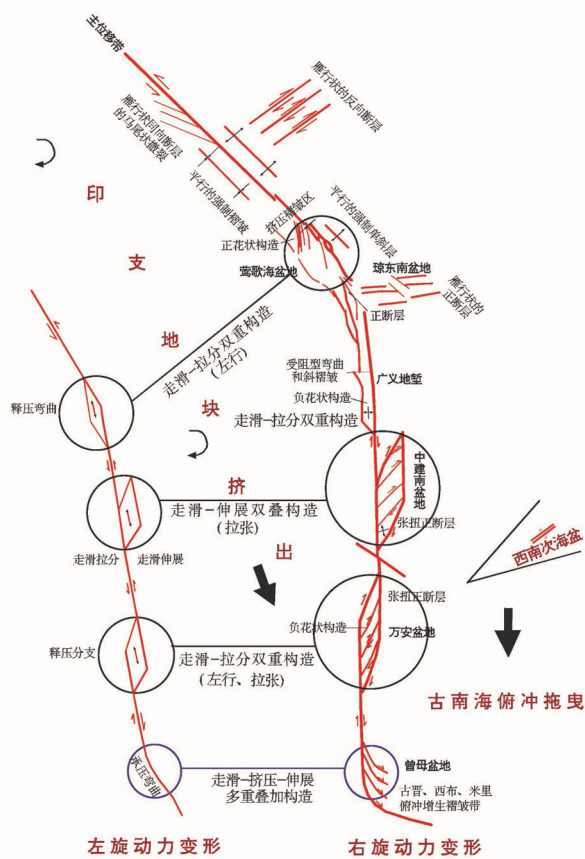


图4 南海西缘断裂带几何学、运动学和动力学特征
 Fig.4 The geometric, kinematic and dynamic characteristics of the fault zone in the western margin of the South China Sea

和锡布断裂为界,由南向北分为北、中、南和民都洛4段,总体具有由南向北逐渐变新的特点;马尼拉俯冲带各段反映了不同的构造特征和演化模式。北段由南向北从俯冲至台湾弧陆碰撞的特征,其输入板块地壳属性为张裂大陆;中段为俯冲特征,具有一定的走滑性质以及洋中脊与两侧海山向下俯冲;南段为“对向俯冲”,西侧马尼拉俯冲带,俯冲角度急剧增大,以近乎垂直的角度自西向东俯冲至地幔过渡带深度,东侧为在菲律宾海本哈姆海台,俯冲的地壳非正常洋壳,在深部呈现高速异常特征;民都洛段,由北向南俯冲作用强度逐渐减弱,走滑作用逐渐增强,至民都洛地区则表现为挤压碰撞的性质。内格罗斯俯冲带是苏禄海盆地俯冲于内格罗斯岛弧下形成,俯冲过程开始于中新世。内格罗斯俯冲带与马尼拉俯冲带不连续,中间被巴拉望海岭隔断,巴拉望海岭大约于中新世停止活动。哥达巴

托俯冲带位于棉兰老岛西南侧,海洋地震反射证明该带有新的俯冲产生,新的俯冲过程使哥达巴托俯冲带和内格罗斯俯冲带被不活动的苏禄海岭分开,苏禄海岭正向西棉兰老移动。

(5)中南—礼乐断裂带

该断裂带是西北次海盆与东部次海盆北部、西南次海盆与东部次海盆之间的分界,长约1700 km。在海盆中由北至南具有明显的分段性,而且宽度和走向都存在差异(图6)。北段断裂带宽15 km,由经纬度18°N,115.5°E向17.5°N,116°E呈NNW向分布。南段断裂带宽60~80 km,由中沙海台东侧向礼乐地块西侧呈NNW向展布。主控断裂沿中南海岭呈NNW向分布。在南北两段的过渡区总体呈NNE向展布。断裂主要发育于晚渐新世到中中新世时期,晚中新世为继承性活动,到上新世就基本停止活动。推测该断裂带早期为转换断裂,晚期有走滑特征。断裂带对其海盆东西两侧的沉积厚度和洋壳厚度具有明显的控制作用,至少是一条地壳级断裂。断裂带的发育与南海多期次扩张密切相联。

(6)美济礁断裂带

通过1:100万海洋区域地质调查,首次发现并确认了美济礁断裂带的存在。美济礁断裂带整体呈NW向走向,倾向NE,延伸长度280 km,分隔礼乐盆地和九章—安渡北盆地,其控制了古近系的沉积。该断裂带由一系列的地堑,半地堑,地垒,半地垒等复杂构造组成。一系列的断层在平面上表现为直线型或曲线型位移带,在深部由相对狭窄、近于直立的主位移带组成;断层向上并向侧旁分叉张开,重新组合成辫状散开的断裂带,整体表现明显的走滑性质(图7)。该断裂带在重磁异常平面特征上均有表现。

3.3 构造单元划分方案

根据上述划分原则和主要依据,提出了以两大板块为主体的三级构造单元划分方案,包括3个一级构造单元、39个二级构造单元和70个三级构造单元(图8,表1)。一级构造单元为欧亚板块、菲律宾海板块及二者之间的东亚大陆边缘汇聚带;二级构造单元包括地块、边缘海盆、增生系、火山岛弧、海脊、俯冲带、造山带、碰撞带、拼合带等;三级构造单元为二级构造单元之下的盆地、边缘海次海盆和隆起区等。

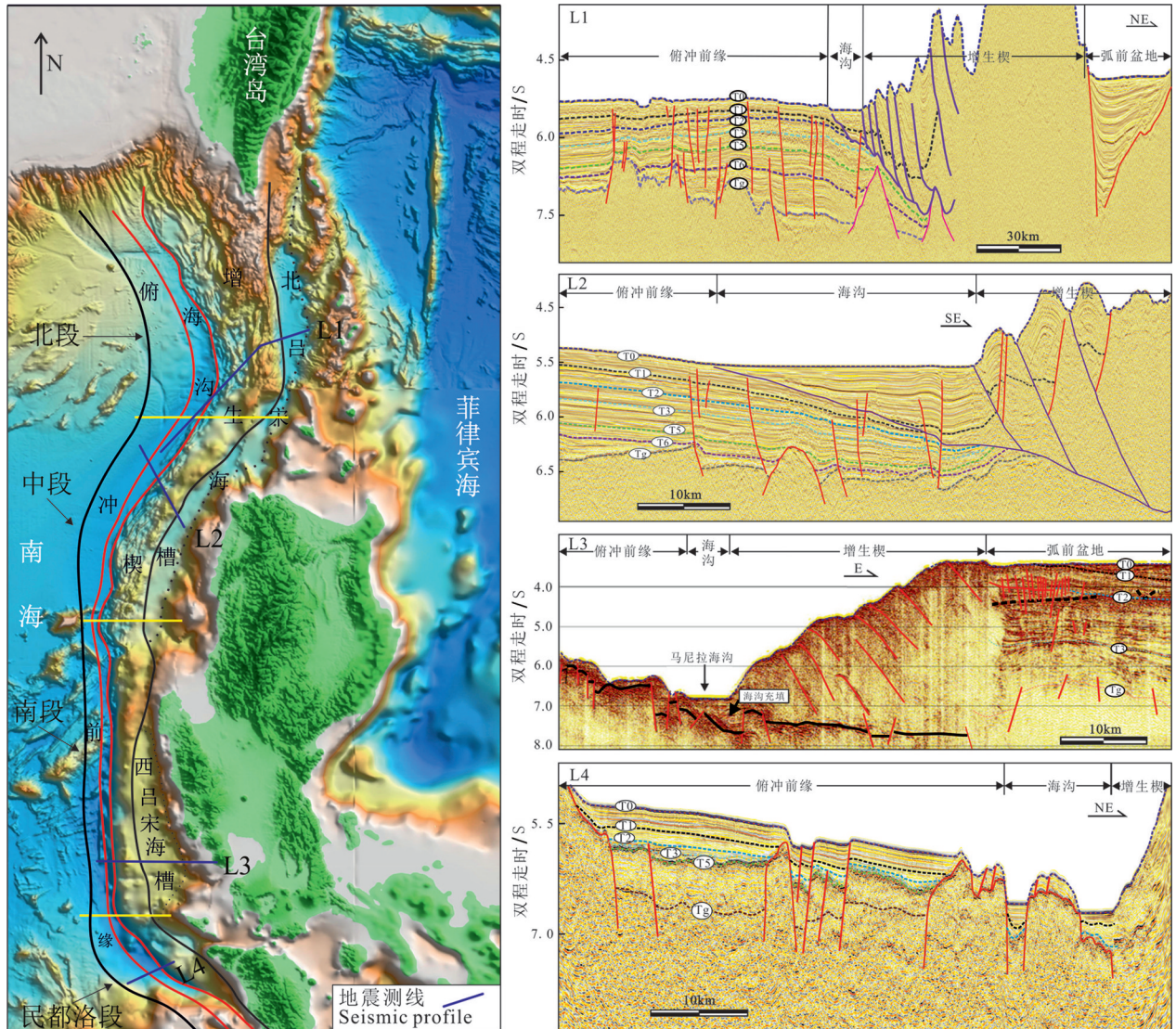


图5 南海东缘俯冲带结构特征

Fig.5 The structural characteristics of the subduction zone in the east margin of South China Sea

3.4 主要构造单元特征

3.4.1 欧亚板块

欧亚板块在中国海域及邻区主要包括中朝地块、扬子地块、华夏地块、南海海盆、南沙地块、曾母地块、残留古南海洋盆等二级构造单元。

(1) 中朝地块

中朝地块由太古宙古老陆核经古元古代末的吕梁运动(1.8 Ga)拼合后形成,之后进入盖层发育阶段。该地块主要发育近E-W向和NE-NNE向断裂组合,分别属于古亚洲构造体系和滨太平洋构造体系,构成地块的基本构造格架(李锦铁,1998,2001)。郯庐断裂带纵贯中朝地块,是一条切穿地

壳到达上地幔的深大断裂,经历了多期剪切平移、挤压和拉张活动,控制了中国东部中生代以来的沉积岩相古地理、岩浆活动、变质作用(徐嘉炜等,1992;朱光等,2002)。海域的中朝地块主要包含燕辽隆起区、渤海湾盆地、胶辽朝隆起区、和北黄海盆地4个三级构造单元。燕辽隆起发育太古一元古宙的古老结晶基底。渤海湾盆地是在中朝地块基底之上发育的新生代裂谷型断陷盆地,盆地内地层层序完整,包括太古宇—古元古界、新元古界、下古生界寒武—奥陶系、上古生界石炭—二叠系、中生界侏罗—白垩系及古近系、新近系和第四系。胶辽朝隆起区自郯庐断裂以东的辽东、胶东延伸至朝鲜北

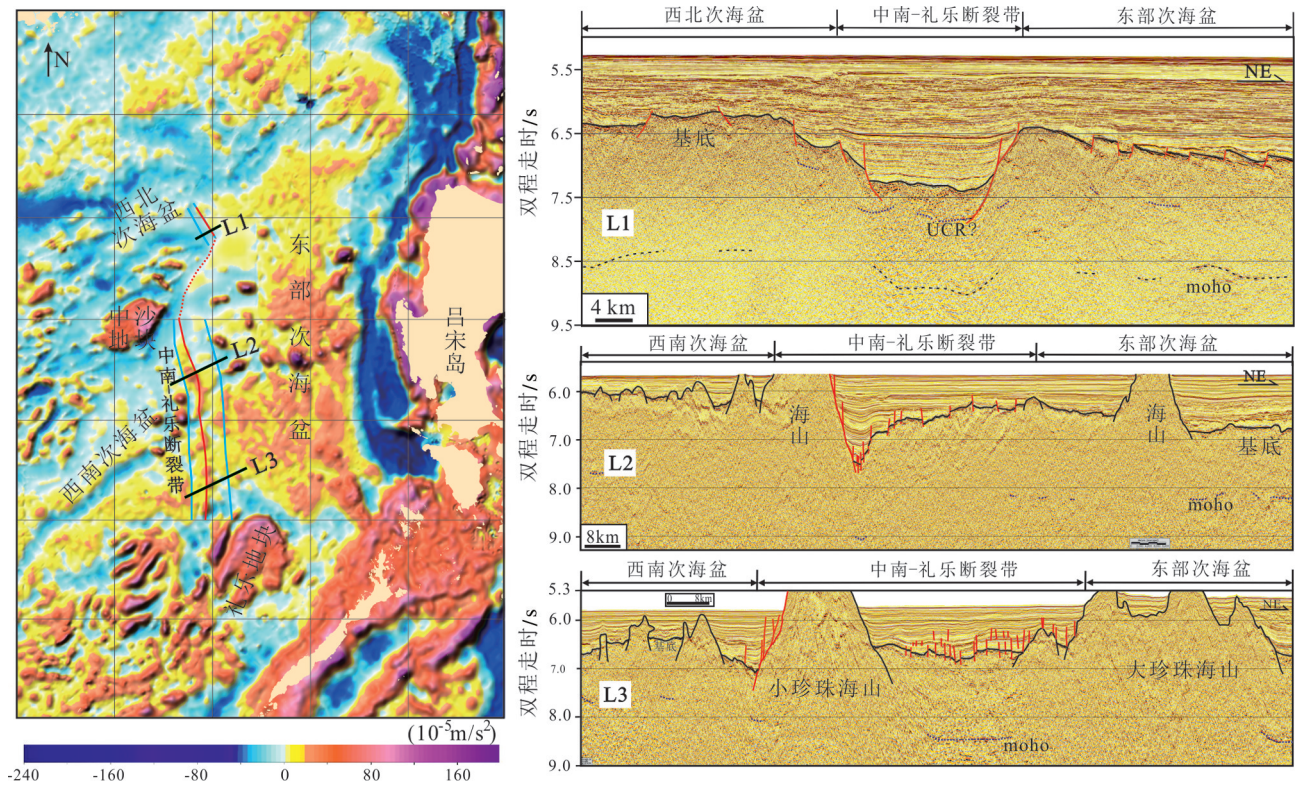


图6 中南—礼乐断裂带结构特征

Fig.6 The structural characteristics of Zhongnan-Liyue fault zone

部,基底主要由新太古代—古元古代的岩石组成。北黄海盆地为叠置在中朝地块上的中—新生代盆地,盆地基底为太古宙—古元古代的变质岩系,沉积盖层主要由上侏罗—下白垩统、始新统、渐新统、新近系构成,总体构造走向呈NE向。

(2) 扬子地块

扬子地块的基底为前震旦纪褶皱变质结晶基底,自晚震旦世形成至早三叠世解体,发育了以碳酸盐岩为主的巨厚的海相沉积。受印支运动的影响,海相沉积层褶皱隆起,其上叠置了陆相中、新生代断—坳盆地。海域的扬子地块主要包含南黄海北部盆地、南黄海中部隆起区、南黄海南部盆地、勿南沙隆起区4个三级构造单元。南黄海北部盆地是一个晚白垩世以来发育的断—坳盆地,盆地包含元古宙和古生界双重基底,构造走向以NEE向为主,盖层主要发育白垩—古近系陆相河湖环境为主的地层。南黄海中部隆起区西部发育完整的海相中、古生界,古生界向东逐渐减薄,东部可能仅残留下古生界。受印支期和燕山期构造运动的影响,中部隆起上古生界发育大型逆冲推覆构造。南黄海南部

盆地与陆域的苏北盆地相连,是一个中生代断坳盆地,基底为海相的中、古生界,盖层以古近系断陷沉积为主。勿南沙隆起区在印支运动之前与下扬子区的其他地区一样,发育了一套以碳酸盐岩为主的海相沉积,印支运动以后,该区以隆起作用为主,局部地区发育有中生代陆相碎屑岩和火山岩系。

(3) 华夏地块

华夏地块在南海海域主要包括南海海盆以北的华南地区,其西以红河缝合线与印支—巽他地块分隔,南界为南海洋盆,东北界为台湾弧陆碰撞带,其基底性质和结构一直是地学界争议的一个热点。华南地区规模巨大的元古宙—中生代多旋回花岗岩岩浆活动表明,在华南元古宙—早古生代变质岩系之下,存在一个经中深变质作用的、时代更老(古元古代—太古宙)的结晶基底(舒良树,2006;薛怀民等,2010)。华夏地块变质岩较发育,但发育时间晚于华南陆区变质岩,变质岩主要出露在西沙群岛、北部湾盆地,呈隐伏状产出,在南海东北部陆缘洋陆过渡带揭示了前新生代基性—超基性变质岩(绿片岩)基底,其上直接覆盖有晚始新世以来的

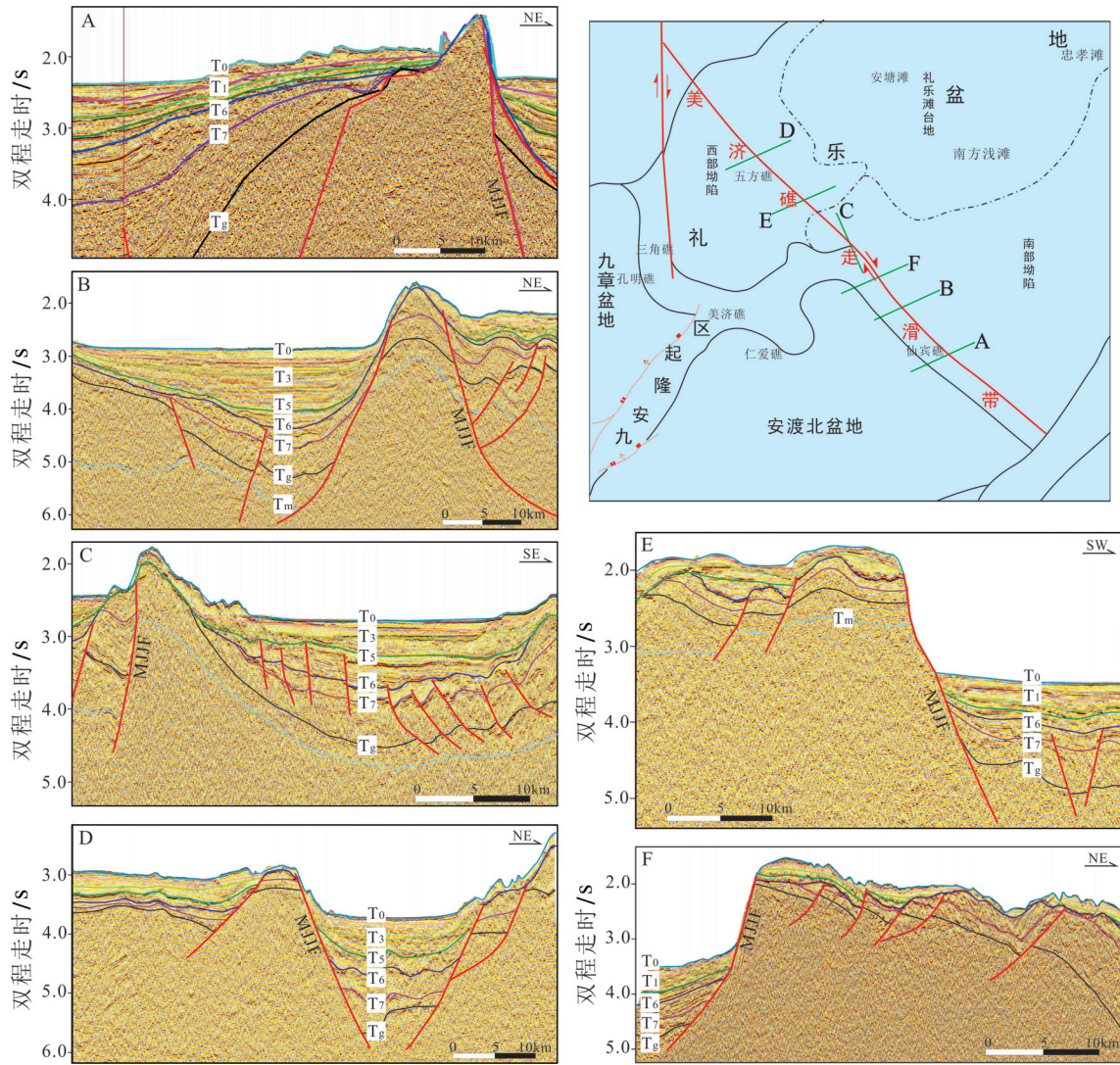


图7 美济礁断裂带(MJF)地震反射特征

Fig.7 The seismic reflection characteristics of Meiji reef fault zone

浅海相沉积(Sun et al., 2019)。岩浆活动在该地块主要以燕山期和喜马拉雅期为主,其中燕山期以中酸性侵入岩为主,广泛分布南海陆缘,尤其南海北部最强烈,构成南海新生代各盆地的基底;喜马拉雅期岩浆活动分布广泛,从古新世到第四纪均有活动,但以扩张期后(<16 Ma)岩浆活动最为强烈,遍布整合南海海区,以基性喷出岩占主导地位。整体上,在南海海域,该地块主要以一系列NE—NEE向阶梯状正断层为主,区内北缘和西缘分别发育有闽粤滨海和南海西缘等深大断裂带,东缘为马尼拉俯冲带—台湾弧陆碰撞带。

(4)南海海盆

南海海盆大致呈向西南收敛的三角形,以中南

—礼乐断裂为界,可进一步划分为东部次海盆、西北次海盆和西南次海盆。IODP349航次较精确测定了南海东部次海盆和西南次海盆扩张停止时间基本一致,发生在15~16 Ma(Li et al., 2014),结合“南海深部过程演变计划”中深拖地磁获得高精度磁条带,认为东部和西南次海盆海底扩张年龄分别为33~15 Ma和23~16 Ma。岩石地球化学分析揭示两个次海盆地幔成分差异悬殊,东部次海盆具有正常地幔特征(N-MORB),而西南次海盆则具有富集地幔特征(E-MORB)(黄小龙等,2015口头报告)。IODP367、368和368X三个航次钻井沉积物古生物年代和船上主量元素分析,结合磁异常解释,认为南海扩张最早的MORB年龄约34~30 Ma(Sun et

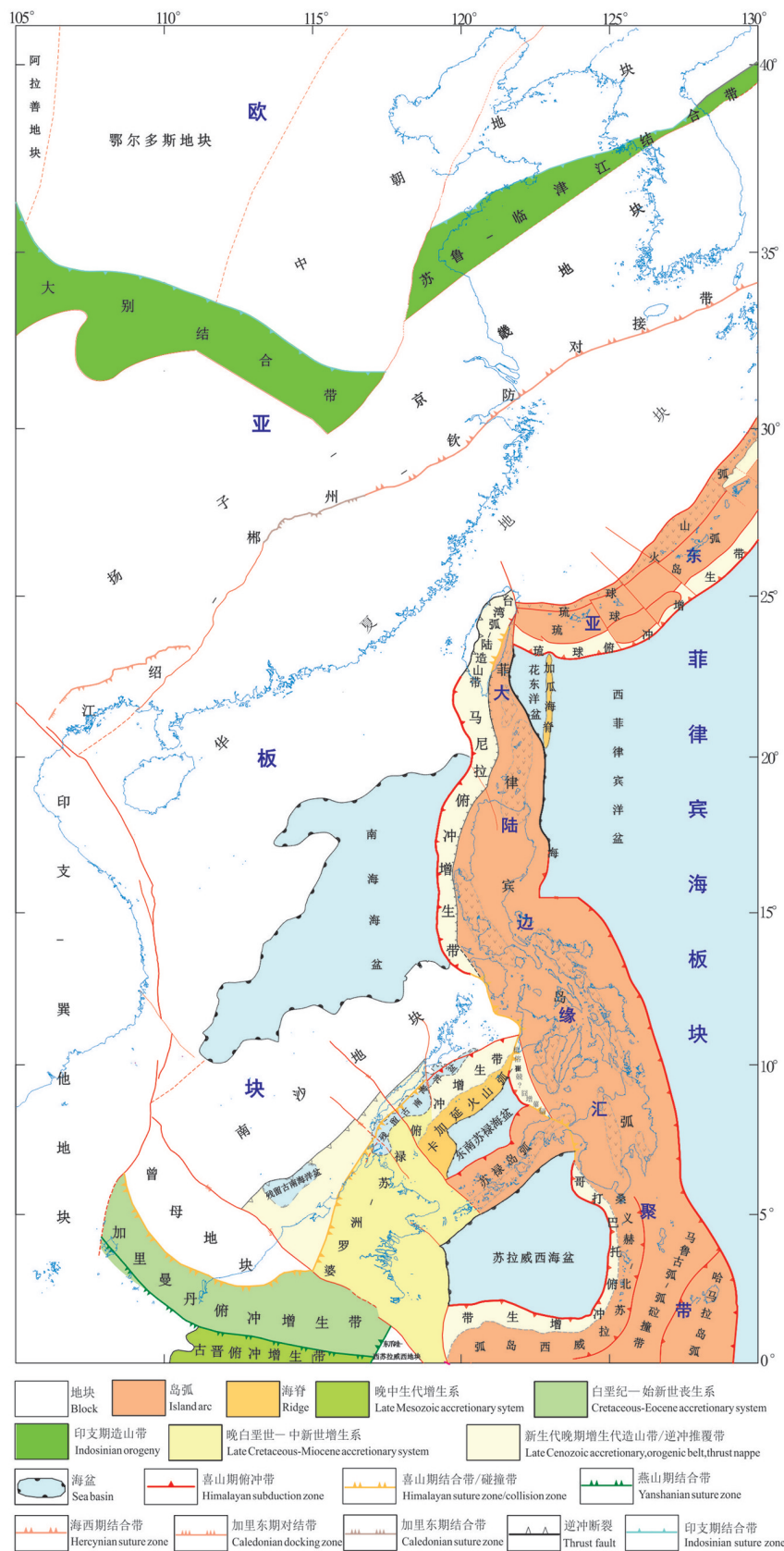


图8 中国海域及邻区构造纲要图
Fig.8 The structural outline of China seas and adjacent areas

表1 中国海域及邻区构造单元划分表
Table 1 The division of structural units in China seas and adjacent areas

一级构造	二级构造	三级构造单元	一级构造	二级构造	三级构造单元		
I 欧亚板块	I-1 中朝地块	I-1-1 渤海湾盆地	I 欧亚板块	I-10 曾母盆地			
		I-1-2 燕辽隆起区		I-11 武吉-米辛结合带			
		I-1-3 北黄海盆地		I-12 西布俯冲增生带			
		I-1-4 胶辽隆起区		I-13 卢帕尔结合带			
	I-2 苏鲁结合带			I-14 古晋俯冲增生带	I-14-1 卡普阿斯弧前盆地	I-14-2 马来威弧前盆地	
	I-3 扬子地块	I-3-1 南黄海北部盆地			I-15 残留古南海海盆	I-15-1 南沙海槽盆地	
		I-3-2 南黄海中部隆起区			I-16 南沙海槽-南巴拉望逆冲带-北巴拉望俯冲带		
		I-3-3 南黄海南部盆地			I-17 米里逆冲推覆带	I-17-1 文莱-沙巴盆地	
		I-3-4 勿南沙隆起区			I-18 沙巴-西南巴拉望结合带		
	I-4 钦防结合带			I-19 婆罗洲-苏禄俯冲增生带	I-19-1 山打根盆地	I-19-2 打拉根盆地	
	I-5 华夏地块	I-5-1 闽浙隆起区			I-20 卡加延火山弧	I-19-3 西北苏禄海盆地	
		I-5-2 东海陆架盆地			I-21 东南苏禄海盆		
		I-5-3 钓鱼岛隆起区			I-22 苏禄岛弧		
		I-5-4 冲绳海槽盆地			I-23 苏拉威西海盆		
		I-5-5 冲绳隆起区			II-1 琉球岛弧	II-1-1 西南澳弧前盆地	II-1-2 东南澳弧前盆地
		I-5-6 粤琼隆起区			II-2 琉球海沟俯冲增生带		
		I-5-7 台西盆地			II-3 琉球海沟俯冲带		
		I-5-8 台西南盆地			II-4 台湾西麓前缘断裂马尼拉-内格罗斯-哥打巴托-桑义赫海沟俯冲带-民都洛-三宝颜弧陆碰撞带		
		I-5-9 珠江口盆地			II-5 台湾造山带		
		I-5-10 尖峰-笔架隆起区			II-6 马尼拉-内格罗斯-哥打巴托海沟俯冲增生系	II-6-1 北吕宋盆地	II-6-2 西吕宋盆地
		I-5-11 笔架南盆地			II-7 台湾弧-陆碰撞带		
		I-5-12 北部湾盆地			II-8 菲律宾岛弧	II-8-1 北宋海槽弧前盆地	II-8-2 伊洛戈斯-中央裂谷盆地
		I-5-13 琼东南盆地				II-8-3 卡加延弧间盆地	II-8-4 民都洛盆地
		I-5-14 广义隆起区				II-8-5 比科尔盆地	II-8-6 伊洛伊洛盆地
		I-5-15 中建南盆地				II-8-7 米沙鄢盆地	II-8-8 萨马盆地
		I-5-16 中西沙隆起区				II-8-9 阿古桑-达沃盆地	II-8-10 哥打巴托盆地
	I-6 红河结合带				II-9 桑义赫-北苏拉威西岛弧		
	I-7 印支-巽他地块	I-7-1 莺歌海盆地			II-10 马鲁古弧-弧碰撞带		
		I-7-2 南海西缘隆起区			II-11 哈马拉黑岛弧		
		I-7-3 万安盆地			II-12 东吕宋-菲律宾海沟俯冲带		
		I-7-4 昆仑隆起区			III-1 花东海盆		
		I-7-5 湄公盆地			III-2 加瓜海脊		
		I-7-6 纳土纳隆起区			III-3 西菲律宾海盆	III-3-1 本哈姆海台	III-3-2 乌达内特海台
		I-7-7 西纳土纳盆地			III-4 帕劳海盆	III-3-3 冲大东海台	
	I-8 南海海盆	I-8-1 西北次海盆					
		I-8-2 中央次海盆					
		I-8-3 西南次海盆					
	I-9 南沙地块	I-9-1 南薇西盆地					
		I-9-2 北康盆地					
		I-9-3 永暑盆地					
		I-9-4 南薇东盆地					
		I-9-5 永暑-郑和隆起区					
I-9-6 安渡北盆地							
I-9-7 礼乐盆地							
I-9-8 礼乐滩隆起区							
I-9-9 巴拉望盆地							
I-9-10 礼乐北盆地							
I-9-11 卢纶隆起区							
I-9-12 卡拉棉隆起区							

al., 2018), 甚至推测至晚始新世(Jian et al., 2018)。西北次海盆形成年龄尚存争议, 徐行等(2017, 2018)通过近年新获得的大量地热流数据, 结合南海三次大洋钻探结果和高精度地震剖面, 推算西北次海盆的洋壳年龄为 17.1~24.9 Ma, 与西南次海盆形成的年龄相近, 也进一步印证了南海海底扩张从东往西扩张的演化历史。IODP349、367-368X 航次钻探结果揭示, 南海中北部大陆边缘不同于北大西洋发现的贫岩浆(非火山)型和富岩浆(火山)型两种陆缘结构类型, 挑战已有大陆边缘演化模式, 推测南海张裂-破裂过程表现为出岩浆从贫到富的转变, 喜马拉雅晚期岩浆的强烈活动, 在海盆内形成一系列规模宏大的现代海山或海山链得以佐证。

(5) 南沙地块

南沙地块北接南海海盆, 南至南沙海槽—南巴拉望逆冲断裂带—北巴拉望俯冲带, 西以廷贾断裂与曾母地块相隔, 东至马尼拉俯冲带和民都洛—三宝颜弧陆碰撞带。南沙地块海底地形复杂, 岛礁分布密集, 其基底结构复杂。“太阳号”曾在礼乐滩西北侧获得角闪岩、片麻岩、石榴石和云母片岩, 其黑云母的 K-Ar 法年龄为 341~258 Ma, 推测变质基底时代早于石炭纪。礼乐滩西北部的小珍珠隆起 DK-52-2 站位和郑和群礁北部 1yDG 站位均采集到花岗质岩石, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法同位素定年 123~109.7 Ma、锆石 U-Pb 法和离子探针测定年 127~120 Ma (邱燕等, 2008; Xiao et al., 2019), 证实该花岗岩形成于早白垩世晚期。因此, 中南—礼乐断裂带—美济礁断裂以西, 南沙地块的基底主要体现大陆地壳性质, 可能属于华夏地块一部分。

在中南—礼乐断裂带—美济礁断裂以东, 南沙地块基底由一套晚侏罗—早白垩世混杂岩所组成, 以北巴拉望地区出露最为齐全, Malapaya Sound 组基质由厚层砂岩、尼亚及凝灰岩组成, 包括二叠—侏罗纪的灰岩、泥岩、硅质岩及砂岩等外来岩块 (Faure and Ishida, 1990), 代表晚侏罗世大陆边缘俯冲增生带。同样, 在礼乐滩西南拖网获得中三叠世深海硅质岩以及晚三叠—早侏罗世硅质页岩和富含羊齿植物化石的粉砂岩、砂岩和暗灰色泥岩以及蚀变橄榄辉长岩和火山岩 (Kudrass, 1986), 西北巴拉望陆架区和礼乐滩钻井揭示了上侏罗统陆相和海陆过渡相、下白垩统海相碎屑岩, 伴火山岩喷发

(Yao et al., 2012), 推测形成于弧前—弧间盆地构造环境(王利杰等, 2020)。新生代, 南沙地块主要受 NE-SW 向及 NNE-SSW 向正断层控制, 伸展活动一直持续到中中新世—晚中新世。

(6) 曾母地块

曾母地块夹持在南海西缘—卢帕尔断裂带与廷贾断裂带之间, 其基底结构复杂, 西部为中生代岩浆岩复杂化的变质岩, 部分钻井钻遇白垩纪的角闪花岗岩等岩石。南部地区则为晚白垩—中始新世的浅变质岩系, 是西北加里曼丹岛拉让群向海区的延伸。该地块的东北部地区, 是一个较为特殊的地区, 空间重力异常为一个正高值区, 一般在 $25 \times 10^{-5} \sim 35 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$, 最高可达 $45 \times 10^{-5} \text{ms}^{-2}$ 。经向上延拓 5 km 后, 成为一个完整的北西向重力高带, 计算其地壳厚度只有 18~20 km, 而该区新生界沉积层的厚度可达 10~15 km, 最大可超过 16 km, 表明中、下地壳很薄。

(7) 残留古南海洋盆

古南海洋盆曾位于东亚与东南亚大陆之间, 主要指曾母地块、南沙地块南侧的洋壳。最初是以加里曼丹岛北部发现的含蛇绿岩套的混杂岩带(卢帕尔线)作为南海洋盆存在的依据(Williams et al., 1988; Schmidtke et al., 1990), 而拉姜—克罗克群则代表古南海俯冲增生系。卢帕尔线在古近纪至中新世末期整体以右旋走滑运动为主, 早中新世达到张扭活动的高峰, 具超壳走滑拉张性质, 对曾母地块、南沙地块西部边界起转换调节作用。在深部结构上, S 波层析显示西北婆罗洲之下的上地幔中存在宽 500 km、倾角大约 30° 的快速异常体, 推测为古南海的残余 (Tang et al., 2013)。最新的地壳厚度图和莫霍面埋藏深度图表明, 南沙海槽西部的结晶地壳厚度和莫霍面埋深, 与相邻南海洋盆、苏禄海洋盆和苏拉威西海洋盆结晶地壳厚度相近, 推测该处为残留的古南海洋壳。

3.4.2 东亚大陆边缘汇聚带

东亚大陆边缘汇聚带包括日本海沟、南海海槽、琉球海沟、菲律宾海沟、马尼拉—内格罗斯—哥打巴托海沟、新几内亚海沟、马努斯海沟、北所罗门海沟等一系列俯冲带, 延绵数千米, 构成地球上规模最大、最复杂的板块边界, 以台湾岛界大致可以分为南北 2 段。该边缘构造带是中生代以来太平洋

板块与欧亚板块、印度—澳大利亚板块长期演化的结果,地震活动强烈,包含极其复杂俯冲、碰撞、增生以及弧后扩张等。依据其特征,以台湾岛和马鲁古海为界,从北往南大致可以分为3段:千岛群岛—琉球群岛呈北东向,是典型的沟—弧—盆体系,太平洋板块/菲律宾海板块向西北俯冲,导致其后形成岛弧和弧后盆地;菲律宾岛弧呈北北西走向,为双向俯冲带,该构造带北起台湾岛,南至马鲁古海,长约1500 km,宽100~400 km,该构造带由菲律宾岛弧以及东侧吕宋海沟—菲律宾海沟和西侧马尼拉海沟—内格罗斯海沟—哥打巴托海沟俯冲带的双向俯冲带组成,地震资料证实在吕宋岛弧东、西两侧均存在贝尼奥夫带(Hall, 2002);新几内亚群岛往东南延伸呈北西西走向,不仅有不同时期双向俯冲,还伴随大规模走滑和弧间盆地的扩张。

(1) 琉球沟—弧—盆体系

琉球沟—弧—盆体系自台湾岛延伸至九州岛,全长约1300 km,由琉球海沟、琉球岛弧和冲绳海槽组成,形成是一个统一的活动构造系统。菲律宾海板块沿琉球海沟俯冲于欧亚板块之下引起的弧后软流圈上涌和岩石圈伸展,导致冲绳海槽弧后张裂,琉球岛弧自东亚大陆边缘裂离。俯冲板片的熔融形成的琉球火山前锋沿冲绳海槽的东南缘分布,自日本九州西南延伸至台湾东北的龟山岛。冲绳海槽呈NNE—NE—NEE向弧形展布,海槽轴部的雁列状中央地堑和密集的张性断层与海槽走向斜交,与菲律宾海板块的斜向俯冲有关。海槽内岩浆岩分布广泛,具有双峰式组合,基性玄武岩和酸性流纹岩、英安岩共存,是典型的初生弧后盆地岩浆岩特征。以渔山—久米断裂带为界,海槽中—北段的张裂始于中新世但现今仍处于裂谷阶段;海槽南段主要形成于第四纪,局部已具有海底扩张的特征。琉球岛弧由非火山外弧和火山内弧组成。外弧从地质构造上可以分为北琉球(大隅群岛)、中琉球(奄美与冲绳群岛)及南琉球(宫古与八重山群岛)。北、中、南分别被吐噶喇海峡及宫古拗陷所分割,两处分界断层均为左旋走滑断层(Anma, 1976; Ujiie, 1983)。中—北琉球前中新世的沉积地层是日本西南部分的延伸,而南琉球前中新世的地质特征与中国台湾具有一定的相似性(Kizaki, 1986)。琉球隆

起上的沉积物主要由上古生界、中生界和新生界组成,现代火山基本不活动。琉球外弧不是火山岛弧带,而是钓鱼岛隆起由于冲绳海槽扩张向东蠕散的一部分。琉球弧前盆地发育晚中新世以来的海相沉积物,新近纪浅海砂泥沉积物上覆更新世上陆坡浊积物沉积,表现出明显的向东南延伸的前积结构,说明自6 Ma以来弧前地区发生了构造掀斜运动。弧前地区广泛见到更新世剥蚀面,其受控于张性断层和东南方向的掀斜构造。西南端的弧前盆地表现出挤压构造—八重山海脊,为斜列的挤压背斜构造,包括一系列斜向的沉积凹陷,接受厚达5000 m新近纪以来沉积物。

(2) 台湾碰撞造山带

台湾弧陆碰撞带是位于琉球海沟和马尼拉海沟之间的板块俯冲转换带,是西太平洋大陆边缘唯一的弧陆碰撞带。在其东北部,菲律宾海板块经琉球海沟俯冲到欧亚板块之下,形成琉球沟弧盆系;在其南部则发生弧陆碰撞,欧亚板块俯冲到属于菲律宾海板块的吕宋岛弧之下,形成马尼拉俯冲带。台湾弧陆碰撞带是一个十分复杂的板块汇聚边缘构造带,晚中新世之后菲律宾海板块和欧亚板块从北往南斜向碰撞的结果,北部已经碰撞造山,南部正在碰撞,再往南为洋壳俯冲,马尼拉海沟的北端正逐渐卷入碰撞造山过程。台湾岛的中央山脉是东亚大陆边缘的前陆盆地沉积地层,受板块俯冲碰撞的挤压,发生强烈褶皱和逆冲断裂作用而形成的造山带,花莲—台东纵谷正是板块碰撞的缝合线。全球板块运动表明,现在菲律宾海板块相对于欧亚板块,以80~83 mm/a(GPS数据, Lallemand and Liu, 1997; Yu et al., 1997)或90 mm/a(REVEL model, Sella et al., 2002)向西北306°N运动(Seno, 1977; Seno et al., 1993)。北菲律宾岛弧原始走向为N10°W,中国大陆边缘走向N60°E。由于该俯冲—碰撞带的斜向形态,斜向弧—陆碰撞导致的造山过程以~60 km/Ma沿SSW向传递(Suppe, 1984),弧—陆碰撞及台湾山脉往南增生,北部为成熟碰撞,南部逐渐过渡为初始碰撞,再往南仍处于洋壳俯冲形成恒春海脊增生楔。

(3) 菲律宾岛弧和双向俯冲增生体系

该构造带北起台湾岛,南至马鲁古海,长约1500 km,宽100~400 km,为菲律宾海板块与欧亚板块间的活动构造带。与北段的沟—弧—盆体系相比,

本段的板块边界要复杂得多,由菲律宾岛弧以及东侧的菲律宾海沟和西侧的马尼拉海沟—内格罗斯海沟—哥打巴托海沟俯冲带的双向俯冲带组成(Hall, 2002)。该构造带以东的菲律宾海板块从始新世开始沿北段的北吕宋海沟往西俯冲,从上新世开始沿南段的菲律宾海沟俯冲(Hickey-Vargas et al., 2008)。以西的南海从中新世开始沿马尼拉海沟往东俯冲,苏禄海和苏拉威西海从上新世开始分别沿内格罗斯海沟和哥打巴托海沟往东俯冲。

菲律宾岛弧是菲律宾海板块与欧亚板块之间斜向汇聚,新生代随着菲律宾海形成演化而逐渐侵位,形成巨大而复杂的板块边缘构造带。菲律宾岛弧是晚中生代以来形成的交错叠加的岩浆弧(Deschamps et al., 2002)以及蛇绿岩、大陆碎块组成的集合体,与周缘边缘海在年龄上各自对应,它们之间可能具有亲缘或演化关系,是中、新生代多次汇聚、碰撞、拼接而成。早—中中新世巴拉望微陆块与菲律宾岛弧的弧陆碰撞(Karig, 1983)和中新世开始并于上新世停止的卡加延海脊与巴拉望微陆块的弧陆碰撞,以及晚中新世桑义赫弧与哈马黑拉弧的弧—弧碰撞(Aurelio et al., 2013),约6.5 Ma开始且持续进行的吕宋岛弧与欧亚大陆的弧陆碰撞(Huang et al., 2000)。这些岛弧主体为新生代,白垩纪地层仅限于东菲律宾,主要为火山岛弧成因,含蛇绿岩基底(Hall, 2002)。菲律宾岛弧演化历史极其复杂,既有走滑运动又有俯冲作用,其内发育众多与斜向俯冲相关的安山岩为主的岩浆岩和走滑断层,如菲律宾断层,对菲律宾岛弧演化起到控制作用(Karig et al., 1986)。菲律宾岛弧历史至少到白垩纪,往南终止于马鲁古海碰撞带。

3.4.3 菲律宾海板块

菲律宾海板块主要包括花东海盆、加瓜海脊、西菲律宾洋盆3个二级构造单元。西菲律宾洋盆向北俯冲于琉球海沟之下,向西俯冲于菲律宾海沟之下。该洋盆的水深在5000~6000 m。古扩张轴是一条局部深度达到7900 m(Fujioka et al., 1999)的轴向裂谷。钻孔获得的整块岩石的生物地层和Ar/Ar年龄表明西菲律宾海盆的年代为始新世,最老的基底测年(49 Ma)来自于冲大东海脊的南侧和本哈姆海

台(Karig, 1975; Ozima et al., 1983)。在钻孔年龄的约束下,对称于中央海盆断裂的磁异常识别为21~17号磁条带(Louden, 1976; Mrozowski et al., 1982)。越接近中央海盆断裂,海底形态越粗糙,在Hilde and Lee(1984)的模型中,这与扩张停止(33 Ma, 13号磁条带)之前扩张速率降低是一致的。扩张方向在18号磁条带之后发生了较大的逆时针旋转,一次晚期的张裂事件产生了中央海盆断裂的轴部深谷(局部达7900 m)(Deschamps and Lallemand, 2003; Okino and Fujioka, 2003)。DSDP在该区内钻有两口井(445、446),两井的地层和沉积有一定的相似性,剖面最老的部分中始新世,由陆源泥岩、粉砂岩及再沉积砂岩和砾岩组成,砾石包括玄武岩碎屑,安山岩、流纹岩和角闪片岩,446井的下部地层(始新世)中见到了16层侵入拉斑玄武岩。自晚始新世开始到现代为深海沉积,有超微化石软泥、白垩和灰岩(445孔)或棕色黏土(446孔)。Hall et al. (1995)对古地磁进行的综合研究认为,新生代菲律宾海板块旋转不连续;50(或55)Ma至40 Ma,顺时针旋转50°;40~25 Ma,没有明显旋转;25~5 Ma,顺时针旋转34°;5~0 Ma,顺时针旋转5.5°。

花东海盆位于台湾东侧,菲律宾海板块的最西端,西部边界为吕宋火山弧,东邻加瓜海脊。花东海盆的构造属性存在争议。基于洋壳基底年龄,有观点认为花东海盆独立于菲律宾海盆(Deschamps et al., 2000);但从重磁异常场来看,花东洋盆和西菲律宾海盆背景场特征大致相似,笔者推测花东洋盆应属菲律宾海盆的一部分。加瓜海脊自南向北顶部水深逐渐增大,顶底相对高度逐渐减小,海脊的宽度和规模也逐渐变小,最后隐没于琉球海沟之下(刘保华等, 2005)。沿加瓜脊东侧呈近SN向展布一系列东倾正断层组成,延伸约300 km,构成西菲律宾海盆西缘边界断裂。加瓜脊东缘断裂带两侧地形及构造特征差异明显,加瓜脊东缘断裂带分支断层倾角60°~70°,雁列式平面展布表明加瓜脊构造演化可能具有走滑性质。花东海盆具挠曲地壳和隆升上地幔特征,推测与早期菲律宾海板块沿加瓜海脊东侧短暂的西北向俯冲有关,但俯冲规模有限,这与海脊两侧沉积物的微弱变形一致。西菲律宾洋盆向北俯冲于琉球海沟之下,向西俯冲于菲律宾海沟之下,古扩张中心局部深约8 km(Fujioka et al., 1999)。

4 中生代以来中国海域及邻区大地构造格局演变

4.1 中生代安第斯型陆缘俯冲体系

印支期华南地块和华北地块拼合成中国东部大陆雏形,开始古特提斯构造体制向古太平洋构造体制的转换。中生代中国东部受古太平洋俯冲控制,此构造背景下发育的安第斯型东亚陆缘推测起始于晚三叠世(李三忠等,2013,2018),但直至燕山期才发育标志成熟岛弧的大套钙碱性岩浆岩带。相对而言,中生代中国西部在新特提斯构造域、中亚构造域近南北向挤压应力作用下。晚中生代期间(80~60 Ma)古太平洋俯冲使东亚陆缘由印支期近东西向构造彻底转变为NNE向构造格局(李三忠等,2013),同时沟-弧体系的安第斯型主动陆缘转换至新生代西太平洋型沟-弧-盆体系。

新生代中国东部西太平洋型沟-弧-盆体系的发展显著改造了中国海域大地构造格局(潘桂棠,2009,2016;李三忠等,2018)。古太平洋俯冲带向西迁移持续到晚白垩世,致使其弧后华南陆缘形成张性环境,发育显著NE向岩浆弧。至古新世,在印度板块往北快速挤入使中国西部地壳物质往东逃逸和太平洋板块向NNW俯冲的双重作用下,促使华南陆缘进一步伸展形成早期裂谷。中晚始新世(约45 Ma),澳大利亚加速往北运动,新特提斯洋加速俯冲消亡,弧后岩浆活动增强,同时印度与欧亚硬碰撞导致地幔侧向挤出。以皇帝海岭转折的夏威夷海岭为标志(Koppers et al.,2001),太平洋板块运动方向由NNW向转变为NWW向。这些因素共同作用在华南陆缘早期裂谷的基础上发育第二期裂谷。此后,中国东部大陆边缘差异演化。

印支运动之后,中国东部海域及邻区在整个中生代期间主要受控于古太平洋板块向欧亚板块的俯冲汇聚。海域构造格局和构造演化与板块汇聚的运动学和动力学过程密切相关,大致可以分为早一中侏罗世和晚侏罗世—白垩纪两个阶段。

4.1.1 早一中侏罗世古太平洋板块向西的渐进式俯冲

早一中侏罗世主要受控于古太平洋板块向西的渐进式俯冲(图9)。三叠纪末—侏罗纪初,古太平洋板块的俯冲启动导致中国东部由古亚洲域向滨太平洋域演化,进入大陆岩浆弧发育的安第斯型

活动陆缘阶段。古太平洋板块的运动方向为NWW向,中国东部陆缘处于左行压扭应力场作用下。就构造变形而言,华北克拉通西部在新特提斯构造域和东部滨太平洋构造域的共同作用下,陆内俯冲变形仍以南北向为主。这种作用力向东的传递,导致华北克拉通东部的构造应力更加复杂。华北东部印支晚期—燕山早期表现为宽阔的挤压变形带,广泛发育NE—NNE走向的逆冲断层和褶皱。就整个华北地区而言,该时期太行山的隆升将华北地区分割成东、西两个大盆,西部鄂尔多斯盆地为一个大沉积盆地,东部渤海湾盆地区在早一中侏罗世的早期为一些小的山间沉积盆地群,晚期表现为披覆式沉积。早一中侏罗世北黄海区域尚处于隆起状态,晚侏罗世才以苏鲁造山带的后-前陆盆地形式出现。而苏鲁造山带南侧的下扬子地区,以嘉山—响水—千里岩断裂为北界,在造山带前缘岩石圈挠曲沉降形成前陆盆地。海域的前陆盆地主要分布于南黄海北部盆地,造山带的隆升剥蚀为其提供了沉积物源。此时的东海陆架盆地在西部坳陷带和中央隆起带位置分别表现为一个位于安第斯型活动陆缘的弧后前陆盆地和增生楔。东海南部钻孔样品的分析结果表明,沿现今东海陆架盆地西部的雁荡低凸起至南海北部存在一条NE—SW向展布的早侏罗世(198~187 Ma)岛弧岩浆岩(Xu et al.,2017)。古增生楔发育于现今中央隆起带向西南至卡拉绵隆起区的位置,其东缘为中生代期间古太平洋俯冲带。正是该时期古太平洋板块俯冲融熔和变质脱水,诱发上覆俯冲板块陆壳或地幔楔部分融熔,导致了雁荡低凸起岛弧岩浆岩的活动。位于雁荡低凸起西部的瓯江凹陷及其更西侧的闽浙隆起带位置隶属于该岛弧的弧后前陆盆地,位于雁荡低凸起东侧的闽江凹陷为位于岛弧向洋一侧的弧前盆地,二者接受早侏罗世地层的沉积。此时南海和华南东南部地区为被动大陆边缘,陆地和南海北部陆缘钻井如LF35-1-1井、南海南部陆缘拖网揭示广泛分布海相中生界。

4.1.2 晚侏罗世—白垩纪期间古太平洋板块回卷

晚侏罗世—白垩纪主要受控于古太平洋板块俯冲回卷(图10)。该时期扬子板块与华北板块已碰撞挤压定型,大别—苏鲁造山带发育的A型花岗岩表明其造山作用结束,进入造山带崩塌和后造山

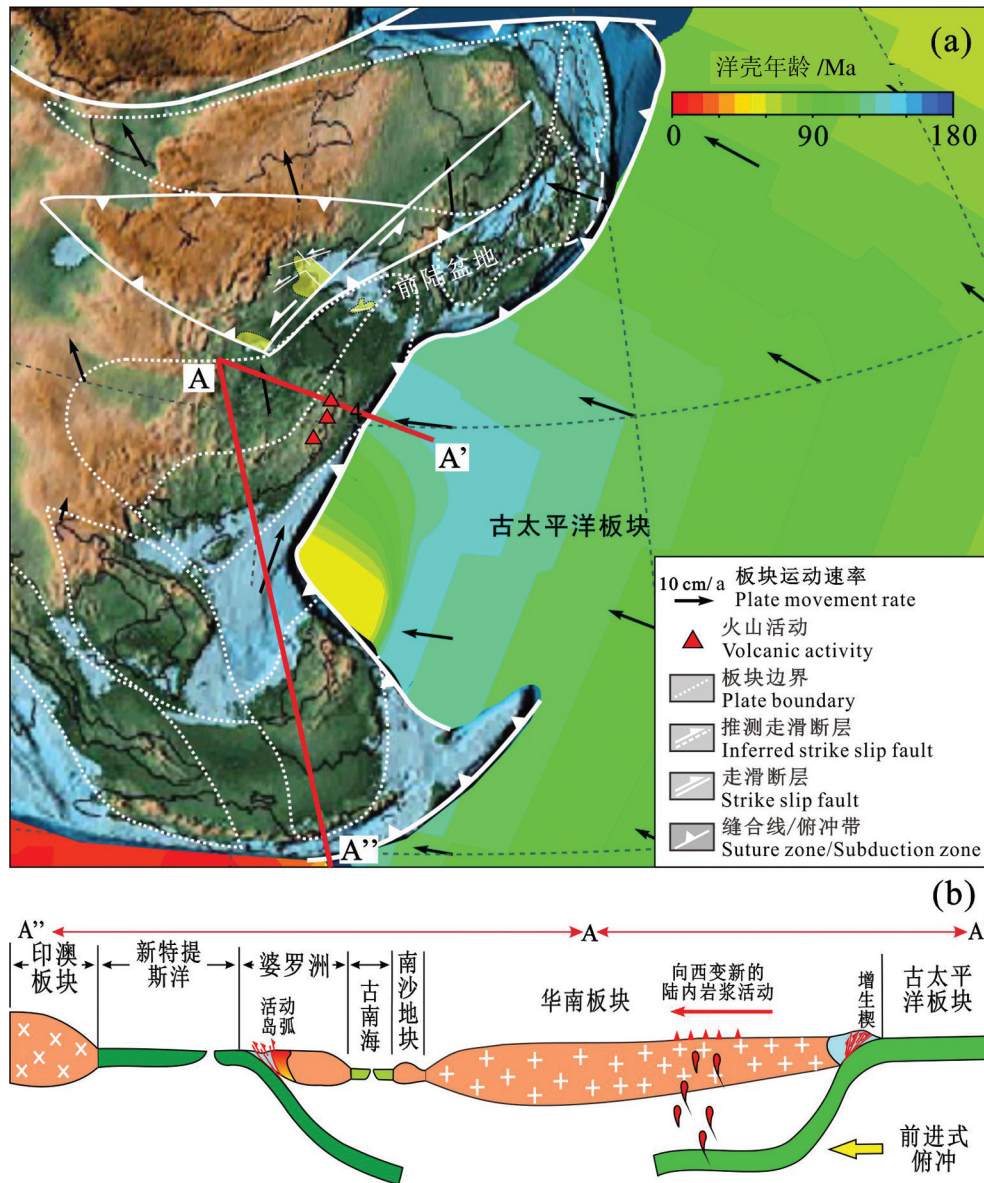


图9 中国海域及邻区早—中侏罗世构造演化
Fig.9 Early–Middle Jurassic tectonic evolution of China seas and adjacent areas

期,中国东部陆缘彻底完成从古亚洲洋域构造域向滨太平洋构造域的转换,从而进入左行走滑拉盆地发育的安第斯型活动陆缘阶段。NWW向的古太平洋板块俯冲导致了中国东部的郯庐断裂带等一系列NNE向左行走滑断裂的形成和活动。受区域性深大断裂的影响,中国东部进入岩石圈减薄的峰期,裂陷或断陷盆地发育,沉积了较厚的晚侏罗—早白垩世地层,并伴有强烈的火山活动。断裂活动年龄数据和盆地隆升—沉降演变迁移规律表明,中国东部陆缘200~135 Ma发生了向西的构造递进,随

后125~100 Ma表现出由西往东逐渐变新的断裂活动和冷却趋势,意味古太平洋板块的俯冲后撤。受NE—NNE向和近EW—NWW向两大断裂系统的控制,该时期渤海湾盆地总体表现为左行张扭性质的走滑拉分盆地。苏鲁造山带北侧的火山岩特征表明其处于裂谷环境,北黄海盆地成为兼有扭动作用的裂陷盆地,南侧下扬子的南黄海盆地仍为陆内前陆盆地。东海陆架盆地西部拗陷带也继续保持弧后前陆盆地和增生楔的性质,并接受了厚层的侏罗纪和白垩纪地层沉积。

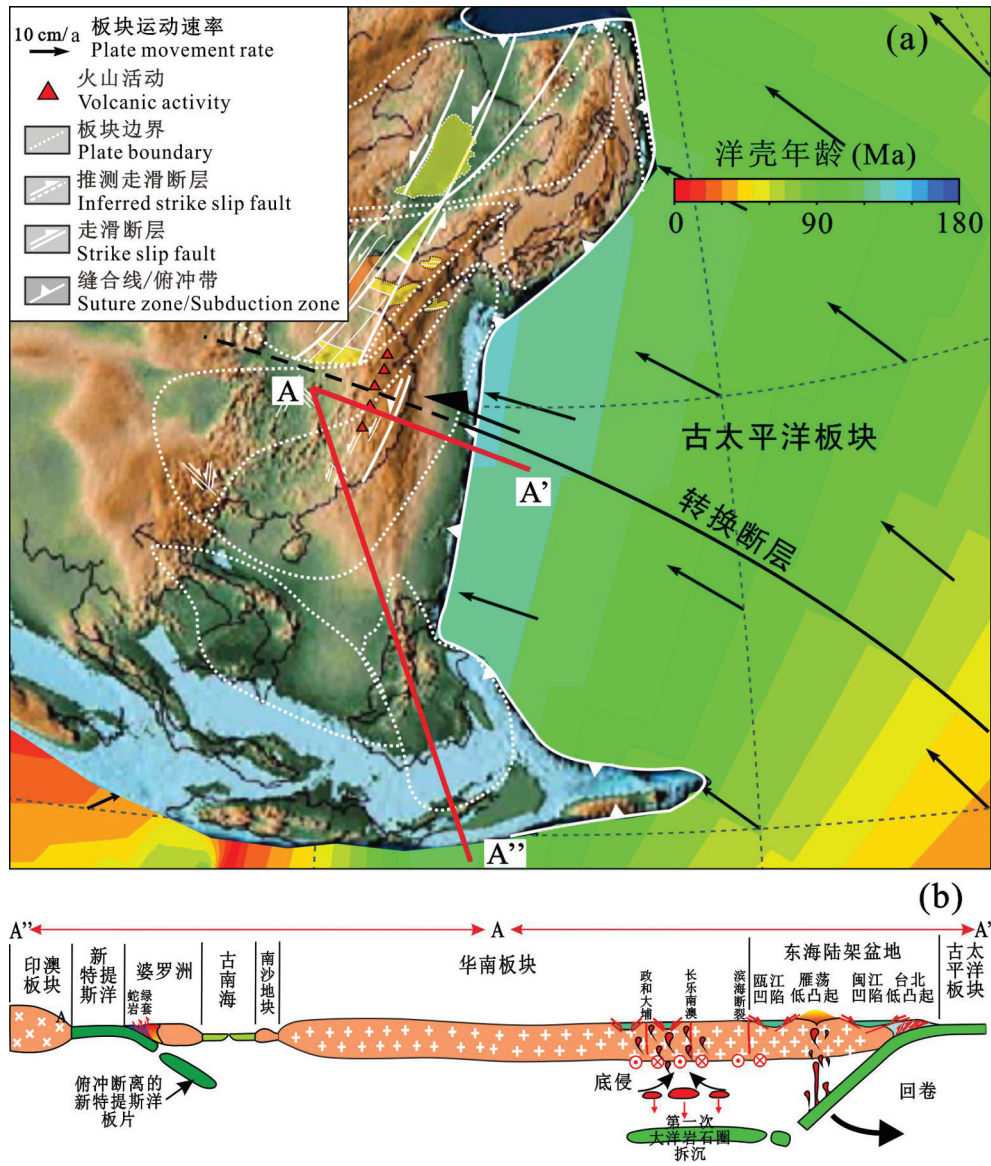


图10 中国海域及邻区晚侏罗世—白垩纪构造演化
Fig.10 Late Jurassic–Cretaceous tectonic evolution of China seas and adjacent areas

南海区域动力学背景发生了变化,原来被动大陆边缘转化为活动安第斯型活动大陆边缘,其东南侧表现为受到古太平洋解体后的伊泽奈崎板块的强烈斜向挤压,而西南发生特提斯俯冲消减,从而在古东南亚大陆东、西两侧构成对冲(挤压)状态。印度洋第一次海底扩张推动了特提斯向北俯冲消减,沿班公湖—东巧—丁青—怒江—一带分布晚侏罗—早白垩世蛇绿岩带(崔军文等,1992)以及沿苏门答腊沃纳带(Woyle)分布的晚侏罗—早白垩世蛇绿岩带,反映了特提斯俯冲消亡的遗迹(李付成等,2018)。滇—缅—马地块与拉萨—西缅地块于早白

垩世发生碰撞,标志着特提斯的终结。古太平洋于晚侏罗世向北西俯冲于华南陆缘之下(Holloway, 1981; Sewell and Campbell, 1997; Zhou and Li, 2000; Li and Li, 2007),基于南海钻井和拖网资料结合磁异常特征的综合分析表明,在其东缘东沙隆起至越南东南部存在一条NE-SW向展布的晚中生代火山弧(Li et al., 2017),现今南海北部潮汕坳陷和东南部礼乐盆地、安渡北盆地、北巴拉望盆地分别位于安第斯型活动陆缘的弧前盆地和增生楔位置,古增生楔发育于现今北巴拉望地区。后期,古太平洋的西北向俯冲停止和后撤,作为古太平洋残片的

古南海在新生代时开始向婆罗洲之下俯冲,俯冲方向为东南向(Hall et al., 2002, 2008)。华南陆缘因与大洋板块在古海沟处强烈耦合,故而会随古南海一起向东南运动,并开始发生伸展作用,进而出现岩石圈张裂和海底扩张,曾母地块于晚始新世与西北婆罗洲发生碰撞,此次事件称为“沙捞越造山运动”。

4.2 新生代西太平洋型沟-弧-盆体系

4.2.1 晚白垩世—渐新世太平洋板块的俯冲后撤

晚白垩世时期,太平洋板块开始代替古太平洋板块向欧亚大陆下SWW向俯冲并开始俯冲后撤(图11)。先存NNE向左行压扭断层转变为右行张扭断层,中国东部陆缘三大近海海域盆地各自开始裂陷的时间大体上从白垩纪末期和古新世初期开始进入到了裂陷作用阶段。晚白垩世,南黄海盆地

发育断裂控制下的箕状断陷盆地,上白垩统不整合沉积在下伏各时代老地层之上。渤海湾盆地的上白垩统只在个别盆地中发育,以陆相红层为主。东海陆架盆地白垩系主要分布于西部拗陷带,最大厚度位于瓯江凹陷。晚白垩世末这些盆地普遍发生了构造反转,古太平洋板块俯冲对这些盆地收缩仍应起局部作用,但主导的方式不是直接挤压作用于内陆盆地,而是通过弧后伸展裂解来推动内陆盆地反转。

从新生代初期开始,由于印度—欧亚开始碰撞,中国东部陆缘处于欧亚板块和太平洋板块相互作用构建的“双板块”动力体制之下,同时开始进入到构造差异性演化阶段:其中渤海湾盆地和北黄海盆地进入斜向走滑拉分阶段,并持续到渐新世末

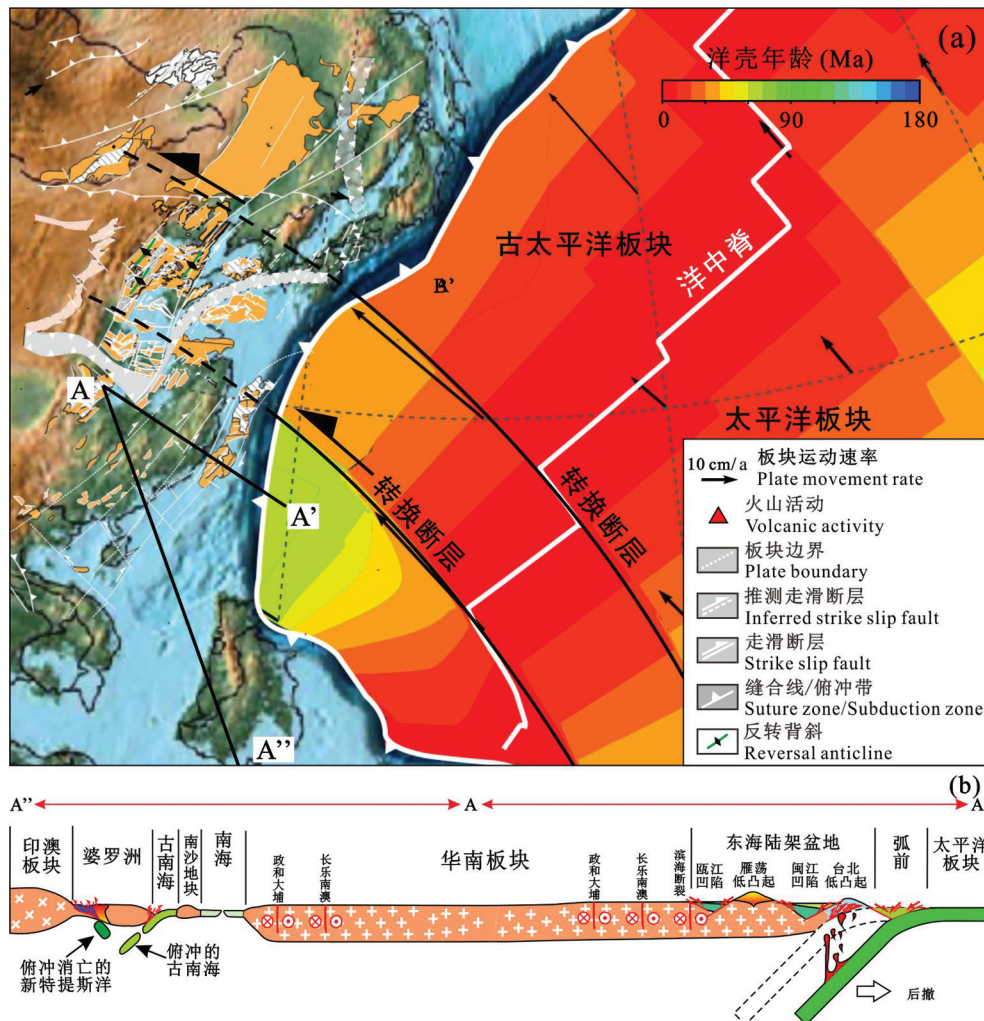


图 11 中国海域及邻区晚白垩世—渐新世构造演化

Fig.11 Late Cretaceous–Oligocene tectonic evolution of China seas and adjacent areas

期,随后是中新世的热沉降和上新世以来的加速沉降过程;东海陆架盆地由于受东侧太平板块和菲律宾海板块俯冲作用更明显,则进入长期的弧后前陆盆地演化阶段,直到上新世开始才进入区域性的沉降过程(任建业等,2018)。

从晚始新世开始(42.5 Ma),三大近海海域盆地,尤其是渤海湾盆地和东海陆架盆地的演化发生了显著的变化,总体上从弥散式分布的孤立小型沉降中心,以多种方式转变为更为集中的大型沉降中心。渤海湾盆地从沙三段到东营组逐渐发展成了一个较小角度斜向拉分盆地,沉降中心从盆地周缘最终集中于渤中坳陷和黄骅坳陷海域的歧口主坳一带,并呈近东西向展布;南黄海古近纪断陷主要是半地堑式,主要断裂的走向为近EW向,南黄海盆地接受了厚度较大的古近纪地层的沉积;北黄海盆地古近纪断陷作用较弱,古近纪地层较薄;东海陆架盆地东部坳陷带在新生代期间发生沉降并接受沉积,从平湖组沉积开始沉降中心从全区分布开始收缩到钓鱼岛隆褶带的西侧。

4.2.2 中新世以来现代沟-弧-盆体系的形成和演化

中新世开始,除了东海陆架盆地之外,近海海域盆地的演化进入平静的裂后热沉降时期。东海陆架盆地这个时期仍然具有强烈的挤压应力作用从而进入构造反转期,从其所形成的构造形迹的样式和平面排列方式来看,左旋压扭作用控制这个时期盆地的演化,一直到上新世开始,东海陆架盆地才停止挤压,进入区域性沉降时期。中中新世以来,冲绳海槽开始打开,大致以鱼山久米断裂带为界,海槽中北段和南段形成时代和演化过程存在差异,以北的海槽中北段的张裂始于中中新世陆架前缘坳陷的裂陷,后向东跃迁并持续至今。海槽南段的演化始于晚中新世的抬升剥蚀作用,但在上新世出现停滞并发生区域沉降,上新世末更新世初的隆升剥蚀之后进入了快速裂陷阶段。分析认为,琉球俯冲带的南北差异、台湾弧陆碰撞作用以及加瓜海台的俯冲拼贴共同构成冲绳海槽南北演化差异的主控机制。

4.2.3 晚白垩世以来南海的形成演化和动力学机制

南海是西太平洋最大的边缘海,地处欧亚板块、菲律宾海板块与印度—澳大利亚板块交汇部位,其形成演化涉及太平洋—特提斯两构造域交互

作用,此复杂构造环境导致南海成因一直存在很大的争议(Taylor et al., 1980, 1982; Tapponnier et al., 1982; Briais et al., 1993; Chung et al., 1997; Sun et al., 2006; Sun, 2016)。南海现有构造演化模式有:挤出模型(Tapponnier et al., 1990; Briais et al., 1993; Replumaz et al., 2003)、弧后扩张模型(Hilde et al., 1977; Sun, 2016)、大西洋型扩张模型(Ben-Avraham et al., 1973; Taylor et al., 1983; 姚伯初, 1996)、古南海俯冲拖曳模型(Holloway, 1981; Taylor et al., 1982; Hall, 1996)、地幔柱引起的拉张模型(邓晋福等, 1992; Flower et al., 1998)、右行走滑拉分模式(栾锡武等, 2009)、古南海拖曳与印支半岛拖曳结合的模型等(Tamaki, 1995; Morley, 2002; Zhou et al., 2002; Sun et al., 2006)。其中,印支半岛挤出模型和古南海俯冲拖曳模型影响最广,法国人提出印度板块和欧亚板块碰撞,将印支半岛从北边“挤出”而形成了南海深海盆,原因在北边;而英国人认为是婆罗洲以北有个古南海,向南俯冲而“拉出”了南海深海盆,原因在南边,但两个模式均包含与地质实况矛盾之处,需提出一种可解释南海及邻区主要地质特征的新模式。

本文综合分析认为,南海的形成主要受始新世后菲律宾海板块形成和北移过程中在华南陆缘形成大规模的左旋走滑断裂带这两方面的影响,其活动是南海扩张的关键,而古南海向南俯冲拖曳作用是南海扩张的动力来源。早白垩世晚期—古新世,澳大利亚北侧的新特提斯洋开始往北俯冲,华南东部陆源处于张性环境,同时西部印度板块往北运动更快,形成往东的挤压,太平洋板块向NNW俯冲,形成往西挤压,导致华南陆缘处于张性环境开始形成早期裂谷。中晚始新世,约45 Ma,澳大利亚加速往北运动,新特提斯洋加速俯冲消亡,弧后岩浆活动增强,同时印度与欧亚碰撞,导致地幔挤出,太平洋板块的俯冲方向由NNW转向NWW,三因素共同作用结果华南陆缘整体处于张性环境,形成大量裂谷。早渐新世,32~33 Ma,受新特提斯往北俯冲加速以及东西两侧菲律宾海板块和印度—欧亚碰撞的影响,华南陆缘持续拉张的结果,陆壳破裂,南海洋壳形成。渐新世末,约24 Ma,随着南海扩张,向西部发展,俯冲后撤,下插板片变陡,扩张中心往南迁移。约16 Ma,南海南缘与苏

禄脊碰撞受阻,南海扩张停止。

5 构造地质过程的资源和环境效应

5.1 海底地貌分布及成因

中国海域位于欧亚大陆东部和东南部边缘,紧邻西北太平洋。西北太平洋边缘沟、弧、盆体系十分发育,毗邻中国海域有两大沟-弧-盆体系条带,其中的琉球海沟-菲律宾海沟以西的沟-弧-盆体系与中国海域海底地貌发展演化关系密切。

西北太平洋总的运动方向为NW向,它推动着菲律宾海板块的西移。大约40 Ma B P,菲律宾海板块逆时针旋转,向NWW移动(刘锡清,2019)。中新世时,菲律宾海板块开始向东亚大陆边缘之下俯冲,在俯冲挤压应力作用下,引起大陆边缘拱起,琉球岛弧开始生成,中新世至上新世初,弧后开始断陷,萌芽状态的裂陷盆地开始诞生,上新世至早更新世时,一方面大陆边缘(岛弧)东移,另一方面菲律宾海板块持续俯冲,弧后地壳活动的主要表现由断陷渐变为以拉张为主,地壳在拉张减薄及断陷等的作用下逐渐下沉,冲绳海槽边缘盆地开始形成(Letouzey, 1985; Iwasaki et al., 1990; 赵金海等, 2003)。由此形成了中国东部海域及邻近海域由陆向海的三大巨型构造地貌,即大陆地貌、过渡带地貌和大洋地貌,总体呈现出南北延伸,东西更替的带状分布格局(图12)。

中国南部海域是太平洋西部一个最大的边缘海,地处欧亚、印澳和太平洋三大板块的汇聚带。南海曾经历了两次扩张,第一次扩张发生在白垩纪-始新世(姚伯初,1991),这次扩张时间较早,地貌组合受后期扩张、构造运动的破坏或干扰较大。第二次扩张发生于晚渐新世-早中新世(黄镇国,2004),形成南海的中央海盆和中央深海平原。在南海第二次扩张的同时,菲律宾聚敛带(包括菲律宾群岛、南沙海槽、马尼拉海沟、菲律宾海沟)一直不断地逆时针旋转,并向北移动。第二次扩张形成的洋壳向吕宋岛俯冲,形成马尼拉海沟(俯冲带),由于和台湾岛碰撞挤压,在台湾岛与吕宋岛之间形成了北吕宋海脊和台湾海脊,以及它们之间的北吕宋海槽,隔断了南海与菲律宾海的联系,形成现今南海的边缘海地貌景观(刘忠臣等,2005)。在壳-幔均衡调整下,陆缘与岛弧发生大规模不同方向的

断裂、解体、沉陷,形成了中国南部海域从周围向中央依次分布着大陆架和岛架、大陆坡和岛坡、深海盆地(西南海盆、中央海盆)的环状格局(图13)。

在这个构造格架的基础上,新生代以来,中国海域陆架区接受了巨厚沉积,并由陆向海倾斜。在漫长的地质时期中经历了多次构造运动的改造,形成了众多的隆起区和拗陷区(Zhu, 1992; 杨文达等, 2010)。第四纪以来,由于气候冷暖期交替出现,导致多次海平面升降变化(黄庆福等,1984; 唐保根, 1996; 钟石兰等, 1999; 蒋梦林等, 2001; 于振江等, 2005; 马明明等, 2016; 赵希涛等, 2017),使大陆架在海进海退的过程中塑造出大片形态各异的陆架地貌,形成各类古地貌。例如,在末次盛冰期时(距今约15 ka),海平面下降到目前的-130 m,即现在的大陆坡附近,中国的整个黄海、东海的大部分和南海的部分陆架区出露地表,成为滨海平原。大陆上的河流延伸到陆架上,形成很多古河道、古河谷、古湖沼洼地,在新生代盆地及盆地近缘地区形成了数十米厚的三角洲复合体(刘忠臣等,2005)。冰后期海面上升,海水淹没陆架区,在潮流系统的作用下,外陆架古三角洲被改造成脊槽相间的古潮流沙脊群(如东海外陆架大型古潮流沙脊群)、残留沙平原等。海平面上升到当前位置后,形成新的潮流系统,在近岸区形成新的脊槽相间的潮流沉积体系,如苏北潮流沙脊群、朝鲜半岛西岸外沙脊群、老铁山水道西北部沙脊群、琼州海峡东西两侧的沙脊群等。陆地沿岸接受大陆入海河流的碎屑物质,形成现代水下三角洲,海湾-河口湾堆积平原等,受沿岸流影响,陆地碎屑物质被沿岸输运、沉积,形成水下岸坡等海岸带地貌。

陆架的向海一侧,第一岛弧链的西侧,为陆(岛)坡,其地貌的形成以断裂构造活动起主导作用,形成海底峡谷(群)、断陷洼地(盆地)、断块台地(海台)、阶地、地垒、地堑等陆(岛)坡地貌,海底火山活动的岩浆沿着断裂带侵入和喷发,形成形状和大小各异的大型海山和海丘等(姚伯初,1991; 鲍才旺等,1992; 马道修,1992; 王颖等,2018)。相比较而言,中国东部海域的陆(岛)坡范围较窄,南部海域陆(岛)坡范围十分宽广,地貌类型复杂多样。

大陆坡和第一岛弧链岛坡之间为弧后盆地或边缘海,如东海的冲绳海槽和南海的中央海盆、中央深

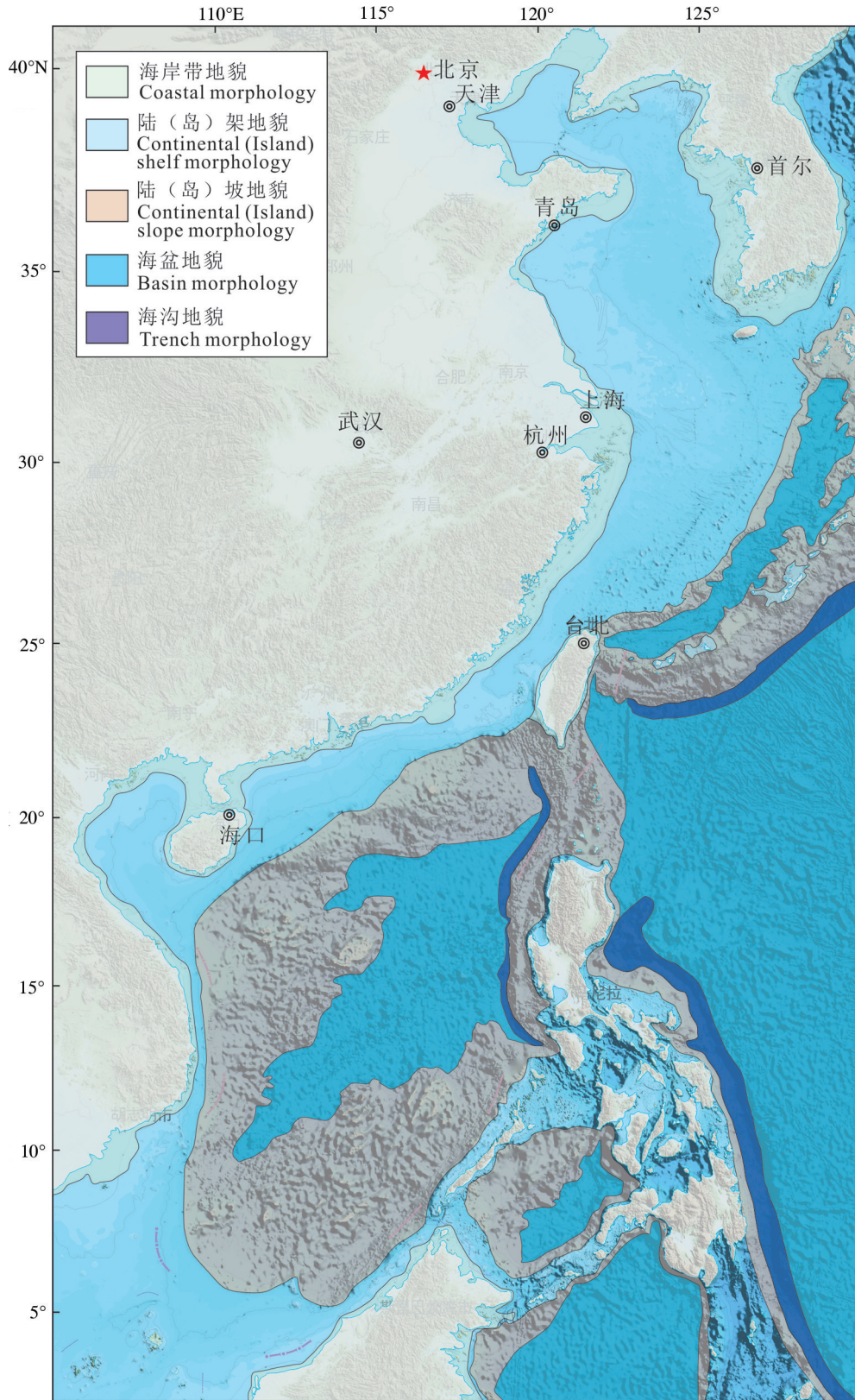


图12 中国海域及邻区海底地貌类型简图

Fig.12 Geomorphologic types of China seas and adjacent areas

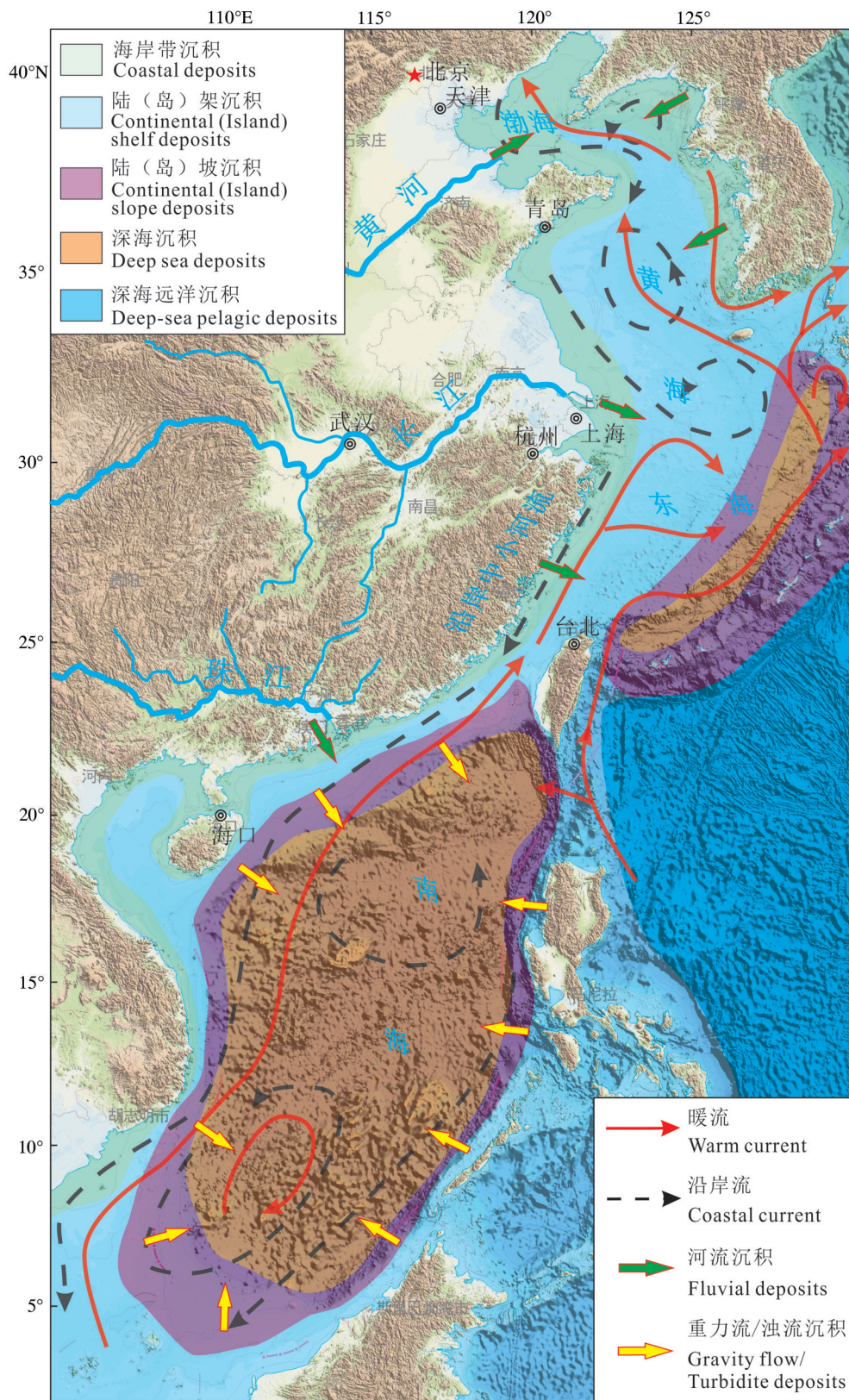


图 13 中国海及邻区表层沉积物分异特征示意图

Fig.13 The surface sediments differentiation in China seas and adjacent areas

海平原、西南海盆等。弧后盆地地貌发育和分布格局主要受断陷和扩张构造控制,沉积作用主要受海底峡谷下泄的海底浊流带来的陆架陆源碎屑和海底火山喷发的火山碎屑的影响。海盆边缘峡谷口处往往形成海底扇,海盆底部形成开阔平坦的深海平原,海盆扩张轴部有链状海山和舟状洼地等。

大洋地貌主要分布于琉球—台湾—吕宋—棉兰老岛弧以东的菲律宾海盆,属典型的大洋板块地貌体系,其地貌发育和演化主要受构造控制,深海平原、海岭和浅洼地中的大洋沉积层厚度较均匀,地形起伏主要受断裂升降活动的控制。目前,其洋壳基岩板块正驮载着其上的深海沉积层及海山、海丘、海岭等地貌体一起向北运动,俯冲到欧亚大陆板块之下,消亡于琉球海沟之中(刘忠臣等,2005)。

5.2 晚第四纪沉积环境演化

不同构造运动背景下的中国海各区海陆相互作用不同,控制海平面波动与沉积物源汇变化。构造控制沉积模式,物源、海平面、海洋环流变化控制沉积相和沉积环境演化。

中国海域表层沉积物受控两种不同的沉积分异模式(图13),东部海域为条带状沉积分异,而南海为牛眼状沉积分异,这两种模式控制了中国海域的海底沉积物分布。中国海域表层沉积物的沉积模式差异表现为构造运动背景的不同,南海为典型的洋壳边缘海,形成为深海沉积;而东部的黄海和渤海为陆壳性质的边缘海,形成浅海沉积,东海为陆壳/洋—陆地壳过渡性质的边缘海,形成了浅海—一半深海沉积。中国东部陆架底质沉积物分布格局是在砂质沉积分布着呈斑块状的泥质沉积区(刘锡清,1996),广泛发育的东部陆架砂质沉积物形成于末次冰期的海退时期,是在冰后期的残留沉积(Saito et al., 1998);北黄海北部西朝鲜湾与南黄海苏北浅滩等的砂质沉积均为现代潮流沙脊群(刘振夏和夏东兴,2004)。细粒沉积区是全新世高海面以来的沉积物堆积中心,是大型河流搬运的沉积物主要的“汇”(李军等,2012)。因此东部陆架沉积以大型河流输入的陆源碎屑堆积为主,在东部海域的泥质区表现为现代沉积速率高,而在广泛发育的东海外陆架砂质沉积区现代沉积速率很低,现代沉积物很难保留,东部海域沉积表现为“大江大河—大三角洲—陆源碎屑—条带状”的沉积分异模式。南

海由大陆架向海盆中心方向,陆源碎屑粒度变细,沉积速率相对变小,沉积厚度变薄,相应的底质类型也由细砂、粉砂、粉砂质黏土,变为深海黏土。同时,生物沉积在南海深海的沉积物中占有重要地位,表明决定沉积作用的一些生物地球化学因素,明显受海水深度控制。南海中央海盆沉积由浅到深显示为钙质生物沉积、硅质生物沉积和深海黏土的完整深海沉积序列。因此南海沉积物沉积总体表现为“短源河流—高角度陆坡—混合物源—环状分布”的沉积分异模式。

在构造运动相对稳定的晚第四纪时期,中国陆架海域晚更新世以来地层发育了3期海相地层,海相地层的形成和演化受控海平面波动和陆源物质通量变化,新构造运动和区域沉降作用对地层的发育和保存具有一定的影响。由北及南,晚第四纪以来中国海域陆架均发生了3次明显的海侵,MIS5以来有3个完整的海相地层。其中,渤海和东海MIS3和MIS1相对较薄,而黄海海相地层较厚。渤海和黄海末次冰期的地层保存较少(LGM大部分地层缺失),东海外陆架末次冰期地层发育完整,较完整地记录10万年以来的沉积记录。南海晚更新世气候较为温凉,内陆架以滨岸和陆相沉积环境为主,外陆架以滨岸和浅海沉积环境为主,全新世气候温暖湿润,发育浅海沉积。总体上,中国海陆架晚第四纪以来沉积环境演变依次是MIS5的浅海—滨海海相沉积,MIS4陆相潟湖—河流—滨海河口相沉积,MIS3浅海相—滨海潮坪沉积,MIS2/LGM时期陆相—河流相沉积,MIS1/全新世海侵潮流砂和浅海泥质沉积。

5.3 中国海域资源赋存

5.3.1 油气资源

中国海及邻区位于欧亚板块、印度—澳大利亚板块和太平洋—菲律宾海板块三大板块的转换交接部位,经历了三大板块多期的裂离和聚合,形成了非常复杂的地球动力学环境和丰富多彩的沉积盆地类型。受自中生代以来经历了多期构造运动影响,区内盆地演化具有明显的旋回性和阶段性,大部分都是叠合盆地。沉积盆地中烃源岩、储集层和圈闭的形成、演化以及油气运移、聚集过程等往往为盆地的形成演化所制约,不同类型的盆地其油气生、储、运、聚过程往往存在明显差别。

(1) 中生界油气资源

随着中国经济的快速发展,对于油气资源的需求也越来越大,但是中国目前各个油田中浅层的探明程度已经很高。在这种情况下,向深部地层出发,寻找后备油气资源,是缓解中国油气资源短缺的一个有效途径。

通过油气赋存规律的综合剖析与总结,突出新区、新层系的找矿思路,对中国海域深部地层油气资源前景及勘探方向进行分析与预测。重磁、地震资料和钻井资料揭示南黄海盆地崂山隆起上发育完整的中古生界海相地层,印支期以来的构造活动较弱,是下扬子最大的稳定区块(王明健等,2014,2018);崂山隆起下寒武统幕府山组盆地相暗色泥岩以及上二叠统龙潭一大隆组海陆交互相泥岩和煤层非常发育,具备形成大型油气田的物质基础。东部坳陷为北黄海盆地中生代的沉降和沉积中心,发育较厚的中生代地层,中—上侏罗统深灰色泥页岩分布广,厚度大,有机质含量高,东部坳陷成为北黄海盆地中生界生烃中心,控制着油气藏的分布。东海陆架盆地南部中生界分布广泛,厚度较大,岩浆活动较弱,基隆凹陷和台北转折带—中侏罗统暗色泥岩和煤系地层非常发育,有机质丰度高,该套烃源岩生成的油气向西侧构造高部位运移成藏,具备了形成大型油气田的地质条件(王明健等,2019;肖国林等,2019)。南海中生界为新特提斯海的一部分,经历了晚三叠世—早侏罗世海侵,中晚侏罗世隆升剥蚀,早白垩世的再次海侵和晚白垩世抬升等四个演化阶段,发育两套海相地层。新生代由于岩石圈伸展裂离,中生界被拆分在南海南北两侧(钟广见等,2006)。目前中生界主要分布在南海北部陆架珠江口盆地东部,南沙海区西北巴拉望、礼乐滩和万安—南薇西—北康盆地及其附近。现有的研究认为,南海北部中生代海相地层厚度大,分布广泛,具备形成大型油气田的物质基础,对于南海中生界油气勘探具有十分重要的意义。

综合以上分析,圈定出南黄海盆地崂山隆起海相中—古生界、北黄海盆地东部坳陷中生界、东海陆架盆地南部中生界、南海东北部中生界等4个中—古生界“深层”油气远景区,为中国油气资源调查的战略部署和选区提供了优选方向。

(2) 新生界油气资源

从垂向上来看,油气资源主要富集在新生界,目前正在投入生产的盆地主要包括渤海湾盆地、东海陆架盆地和南海的台西南盆地、珠江口盆地、北部湾盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地等。通过对3个海域油气赋存规律及主控因素进行归纳梳理发现,盆地的构造演化对新生界的油气成藏具有明显的控制作用。

东部海区新生代的构造演化主要受太平洋板块向欧亚板块俯冲作用的控制。渤海湾盆地和东海陆架盆地新生代经历了先断后坳的盆地演化过程,具有下断上坳的双层盆地结构特征,其中断陷阶段是这两个盆地主要的成盆、生烃和油气成藏期。这一时期盆地中的深大断裂控制着盆地的结构、构造和沉积充填历史。盆地中发育的不同尺度、不同产状、不同性质的断层纵横交错和上下叠置,直接或间接控制了生烃凹陷及沉积体系展布,形成了多种与断裂相关的构造圈闭,同时断裂也是这类盆地油气运移的最好通道,为油气垂向运移和跨层聚集提供了有利条件。因此,与断裂相关的构造油气藏是这两个盆地新生界油气勘探的重点,其次是岩性油气藏。

在南海,其北侧是以拉张作用为主的被动边缘,成因与现今南海的扩张有关;而南侧为碰撞挤压型边缘,受古南海的俯冲消亡所控制,发育一系列自南向北逆掩的叠瓦状构造(姚永坚等,2002;吴世敏等,2004;姚伯初等,2004,2006;刘振湖,2005)。总体来看,处于南海处于“北张、南挤”的大地构造背景之中。前人按照南海南部南北两侧不同的构造演化特征(张功成,2017),将南海南部盆地群分为两个盆地带,分别具有不同的盆地成因、结构、沉积等特征,从而导致了不同的油气成藏地质特征和油气资源赋存差异(图14)。总体来看,南海北部盆地带油气成藏组合主要发育在中新统一上新统,以构造或生物礁油气藏为主,油气成排成带分布;而南海北部盆地带以始新统一渐新统成藏组合为主,主要发育断块油气藏(张功成,2017)。

5.3.2 海砂资源

中国胶辽台隆、华南褶皱区的滨岸以及边缘海陆架区赋存了重矿物砂矿、建筑用砂等丰富的海底砂矿资源,海砂矿种繁多、分布广泛、资源储量巨大,它们大多埋藏在近岸沙堤、沙滩、陆架潮流沙脊和陆

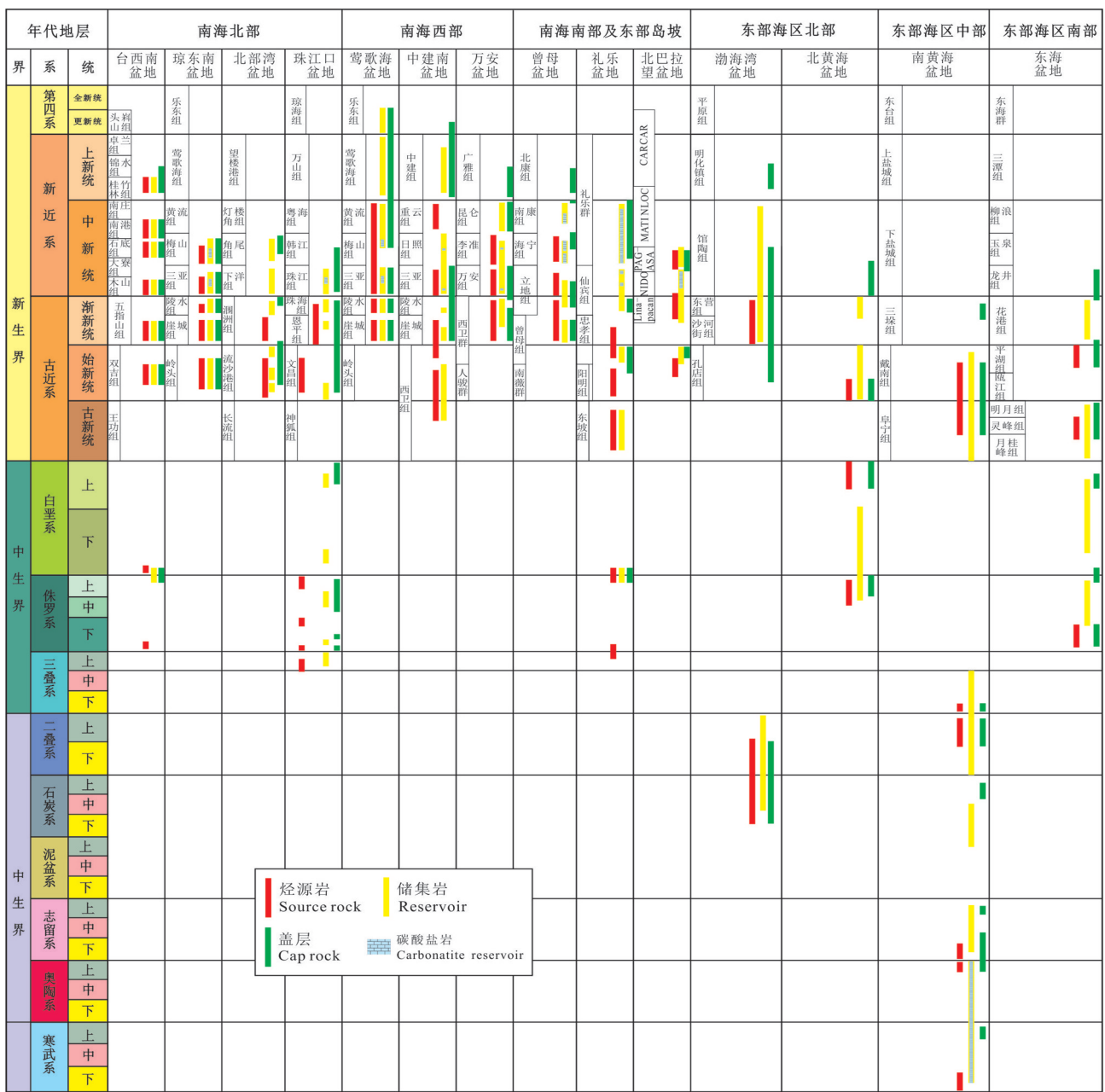


图 14 典型含油气盆地生储盖条件对比

Fig.14 The comparison of source, reservoir and cap conditions in typical petroliferous basins

架埋藏古河道等位置,中国绵长的海岸线、宽广平坦的浅海陆架为海砂资源的富集提供了巨大的空间,海砂的整体分布深受这种地貌格局的控制。

宏观地貌格局演化是深部地球动力作用的浅表响应和直观表现,是认识地球深部过程及其对浅表层影响的重要途径(郑洪波等,2013)。在新生代,中国东部岩石圈在中生代基础上继续伸展减薄,在拉张应力场作用下广泛发育断陷盆地,西太

平洋边缘海逐渐形成,西部岩石圈挤压加厚,青藏高原整体隆升,中国西高东低的宏观地形地貌格局最终建立。新生代以来青藏高原的隆升还直接控制着长江、黄河等大型河流的人海贯通,从而影响着滨、浅海砂矿成矿物质的来源。另一方面,在大陆边缘地块长期构造下沉形成的宽大浅海陆架区,自晚更新世以来,受海平面升降的影响控制下,往往在此类陆架的陆源沉积建造中如埋藏古河道(图

15)、河床或一些凹地中富集成建筑用砂矿床。

5.3.3 水合物资源

陆缘深水区是形成天然气水合物矿藏的理想场所,南海陆坡和东海冲绳海槽陆坡等深水区已发现有大量的天然气水合物分布。构造环境是天然气水合物富集成藏的重要控制因素,中国海边缘陆坡区发育许多大中型新生代沉积盆地及陆隆等构造单元,自晚白垩世以来经历了多次构造运动,盆地差异沉降明显,断裂褶皱构造发育,有利于形成天然气水合物。

在活动陆缘,由于板块俯冲,富含有机质的洋壳物质被刮落到增生楔内,堆积于变形前缘,使俯冲带沉积物不断加厚。同时,由于构造挤压作用,增生楔沉积物脱水脱气,所形成的孔隙流体沿一系列叠瓦状逆冲断层快速向上排出,在适宜的温压条件下聚集形成水合物矿藏。在被动陆缘地区,受拉张、挤压和剪切应力场等构造因素控制,较深部位的热解气、生物气或混源气沿断裂、泥火山或其他构造通道快速运移至水合物稳定域内形成相应的水合物矿藏。

因中国海陆缘各盆地构造活动的差异,所形成的水合物矿藏也不尽相同(张光学等,2006)。据统

计,中国海周缘陆坡区主要发育有增生楔型、断褶型、盆缘斜坡型、底辟型和滑塌型等5种与构造活动有关的水合物矿藏。南海东部岛坡区是形成增生楔型水合物矿藏的有利场所,北部陆坡区则是形成断褶型及滑塌型水合物矿藏的有利地区,而(泥)底辟型水合物矿藏多见于琼东南盆地、东沙附近海域、曾母盆地及南沙海槽等(泥)底辟发育区,盆缘斜坡型水合物矿藏则广见于各新生代沉积盆地的盆缘斜坡。

5.3.4 海底热液资源

冲绳海槽的构造地质特征和形成演化过程受控于晚新生代以来东亚大陆边缘向东的蠕散和菲律宾海板块向西的俯冲作用(Shiono et al., 1980; Taylor et al, 1983; Sibue et al., 1987),是现今全球为数不多的张裂于弧后陆壳基底之上且处于形成初期的弧后盆地之一(Kimura, 1985; 周祖翼等, 2001),其海底热液活动及成矿作用与洋中脊和成熟弧后盆地存在显著差异,成为海底热液地质学研究的热点地区之一。冲绳海槽目前所发现的海底热液活动区有10余处,主要集中在冲绳海槽中部的伊是名海洼区、伊平屋海洼区、南奄西海丘等(尚鲁宁等,2018b)。以冲绳海槽为代表的弧后盆地在全

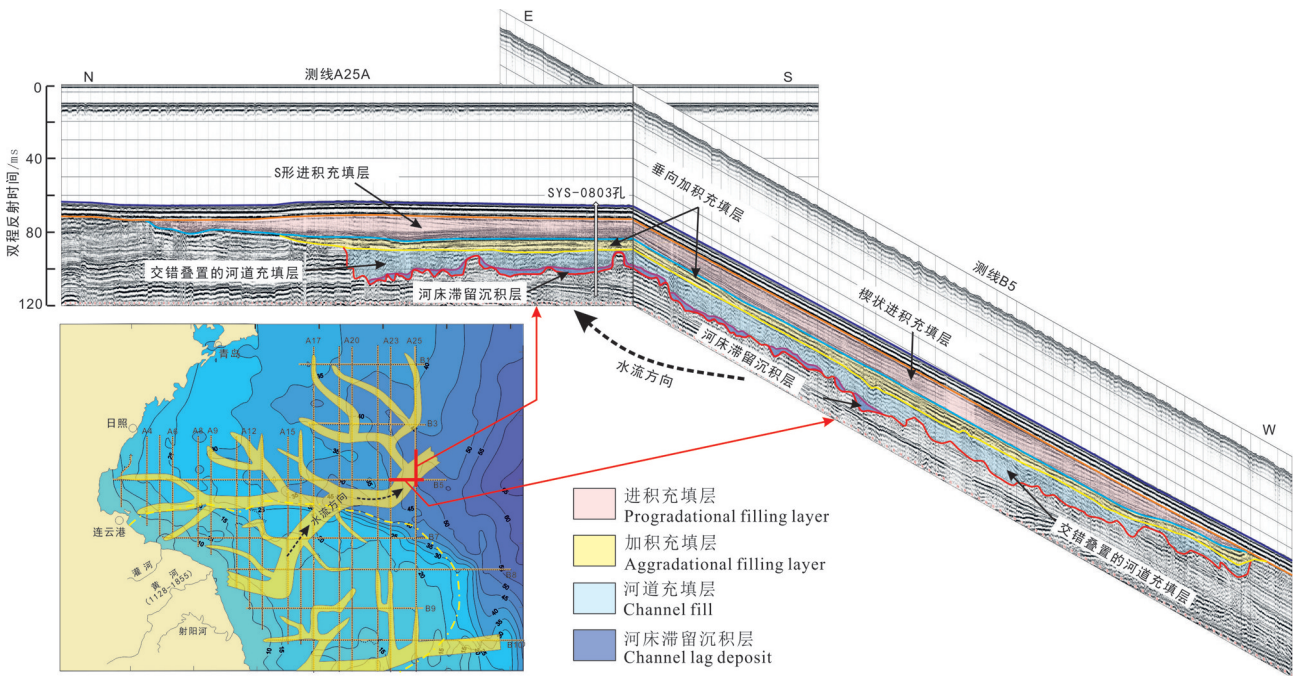


图15 黄海陆架区埋藏古河道型建筑用砂分布图

Fig.15 The distribution map of building sand of the buried ancient channel type in the Yellow Sea shelf area

球海底热液活动及成矿作用研究中占据特殊地位,阐明冲绳海槽构造地质过程对热液活动和成矿作用的影响和控制,是深入理解海槽热液活动过程、摸清多金属硫化物资源分布规律的重要一环,对服务于中国的海底资源战略具有重要的理论和现实意义(栾锡武等,2001;曾志刚等,2003)。

流体、热源和通道系统是海底热液活动的三要素。流体主要由下渗海水组成,也包含少量岩浆脱水、去气形成的高温流体;深部岩浆上涌为热液系统提供了热源,驱动了热液流体循环;海底张性正断层是流体循环的主要通道。流体在水-岩反应过程中从岩石中淋滤和置换出的金属、非金属元素是热液成矿的主要物质来源。在厚层沉积物覆盖的盆地内,流体在沉积层内的运移和储集,促进了流体与沉积物之间的相互作用,显著改变了热液流体的地球化学成分。沉积层的岩石物性对流体的物理化学行为也产生了显著的影响,从而在热液产物类型和特征方面留下了印记。在冲绳海槽弧后盆地内,构造地质过程通过控制上述因素和过程,控制了海底热液活动和成矿作用(尚鲁宁等,2018b)。

(1) 板块俯冲和弧后张裂打开通道

东亚大陆边缘在中尺度地幔流应力场作用下,发生向东的蠕散(李家彪,2008)。菲律宾海之下中尺度地幔流应力场驱动了菲律宾海板块的向西运动。两种地幔流应力场在东海发生汇聚,导致菲律宾海板块沿琉球海沟向欧亚板块之下的俯冲。俯冲的板片扰动了仰冲板块边缘之下的软流圈,引起弧后小尺度地幔对流、软流圈上涌、岩石圈和地壳减薄以及冲绳海槽的弧后张裂等一系列深-浅部构造地质效应。俯冲的板片在深部分隔了东、西两侧的地幔流,阻碍了东亚地幔流的向东运动和菲律宾海地幔流的向西运动。俯冲板片东侧的应力强度低于西侧的应力强度。这样,西侧欧亚板块之下向东的地幔流受俯冲板片阻挡,在弧后地区分裂为沿俯冲带走向运动的地幔流,甚至存在向下和向西的回流。另一方面,西侧地幔流的撞击加速了俯冲板片的反卷后撤,由此在弧后地区形成张性应力场,进一步加剧了弧后软流圈的被动上涌和冲绳海槽的快速张裂。

弧后张裂作用导致冲绳海槽及邻区的刚性岩石圈发生破裂,形成大量张性断裂。部分断裂切割

深度较大,为超壳断裂甚至是岩石圈断裂。这些深大断裂一方面降低了深部围压,有利于深部地壳和上地幔物质的减压熔融,形成高温熔体;另一方面,断裂本身成为深部熔体-流体上涌和浅部海水下渗的通道,为以流体循环为主要方式的深-浅部物质能量交换创造了有利条件。

(2) 岩浆活动提供了热源和成矿物质来源

在沟-弧-盆体系中,与板块俯冲作用有关的岩浆作用主要包括弧后盆地岩浆作用和岛弧岩浆作用两种类型。二者在形成机制和产物类型等方面均存在显著差异。弧后盆地岩浆作用通常分布于弧后盆地的张裂中心,与板块俯冲引起的弧后软流圈上涌有关,来自上地幔的基性岩浆沿张裂中心向上侵位并喷出海底,形成的海底岩石以玄武岩为主。当俯冲板片到达一定深度时(约50 km),由于受热导致板片脱水和去气,水和二氧化碳作为热的流体进入仰冲板块地幔楔,形成含水系统,降低了地幔物质的熔点,导致地幔楔的部分熔融,熔融物质向上运移并喷出海底,形成岛弧岩浆作用,其产物主要为中酸性安山岩-英安岩-流纹岩。

冲绳海槽内的海底热液活动主要分布于海槽东侧,与岛弧型或亲岛弧型岩浆作用有关,单纯由中央地堑内玄武岩岩浆作用产生的热液活动较少。中央地堑与火山前锋的交汇处,强烈的地壳拉张破裂与充足的岛弧岩浆供应叠加,是形成海底热液活动最有利的地区。热液活动多发育于海底火山东部的破火山口内或海底火山侧坡上。侵入岩石层浅部的岩浆形成高位岩浆房,为热液流体循环提供了热源,流体循环以浅部循环为主(Kawagucci et al., 2010, 2011; Masaki et al., 2011; Tsuji et al., 2012)。

(3) 沉积盖层的影响

冲绳海槽自晚中新世以来堆积了以陆源碎屑为主的巨厚沉积层(李家彪,2008; Shang et al., 2017)。沉积层成为冷海水下渗和热液喷出的必经之路,与洋中脊热液区相比,沉积层的存在使得流体运移过程更加复杂。沉积层岩性和物性特征对流体的运移产生了显著影响。高孔渗性地层为流体运移提供了良好通道,也为流体的聚集提供了储集空间;低孔渗性地层阻碍了流体的运移,形成良好的盖层。地层和断裂的空间配置关系决定了热

液区之下独特的流体循环过程和水动力系统(图16),其最显著的特征是流体的垂向成层分布(Takai et al., 2012; Kawagucci et al., 2013)。

(4)相分异导致了广域成矿作用

流体在海底之下的相分异和相分离是海底热液活动区普遍存在的现象。相分异和相分离能够对热液区多金属硫化物成矿作用产生显著影响。相分异过程中,流体中不同组物理化学行为的差异导致了流体化学成分的改变。流体中的挥发分在相分异过程中优先进入蒸汽相,导致流体pH值的剧烈变动,从而会对金属元素离子的溶解度产生显著影响。

由于弧后盆地热液区水深较浅,沸点较低,容易发生超临界或次临界相分异。西太平洋边缘弧后盆地热液活动区为探索热液流体相分异与成矿作用的关系提供了良好的试验场(Ishibashi et al., 1995)。Nakamura et al.(2005)报道了中冲绳海槽伊平屋北

海丘的广域成矿作用,并探讨了流体化学特征与微生物生态系统之间的关系。Sakai(1990)、Konno et al.(2006)分别探讨了JADE热液区和第四与那国海丘热液区海底液态CO₂喷溢与相分异之间的关系。Suzuki et al.(2008)对第四与那国海丘热液区高温热液流体的地球化学特征及广域成矿作用进行了研究,并探讨相分异作用对海底热液成矿的影响。

冲绳海槽的热液活动区内通常采集到了多种类型的热液堆积物,具有广域成矿作用的特点。通过对比不同热液点堆积物的矿物、元素组成与流体的化学成分,认为广域成矿作用主要受流体相分异和相分离作用的控制。不同元素在相分异过程中表现出不同的地球化学迁移行为。总的来看,硫化物/硫酸盐成矿作用多发生于贫蒸汽相(富Cl⁻)流体喷出的烟囱体和丘状体;硫化物/碳酸盐成矿作用则发生于富蒸汽相(贫Cl⁻)流体喷出的地区;结壳(硅

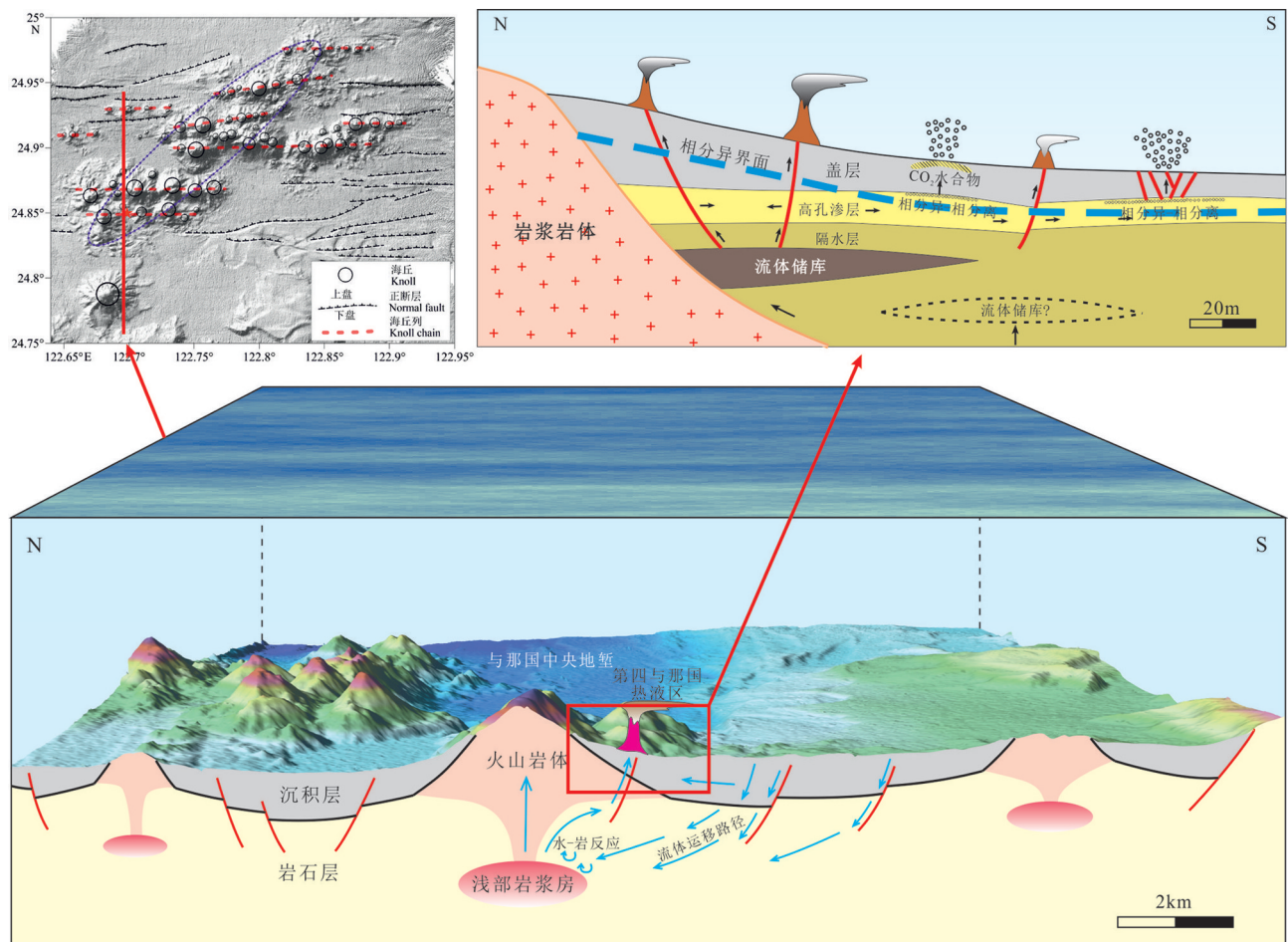


图16 冲绳海槽典型海底热液活动区流体循环模式图(据尚鲁宁等, 2017)

Fig.16 The fluid circulation model of the typical subsea hydrothermal active zone in the Okinawa Trough (after Shang Luning et al., 2017)

化沉积物)则与海底沉积物中弥散流的喷溢有关。

作为典型的初生弧后盆地,冲绳海槽内的海底热液活动及其成矿作用与洋中脊热液区和成熟弧后盆地存在显著的区别,构造地质过程的不同是造成这些区别的主要原因。在冲绳海槽,地幔对流、板块相互作用、弧后张裂、岩浆作用、热液活动和成矿作用之间存在从宏观到微观的逐级控制关系。对冲绳海槽热液活动和成矿作用的构造地质学约束进行深入研究,为海槽内海底资源的勘探和开发提供了依据。

6 结 语

东亚地区自中生代经历了两个一级构造过程的影响:东特提斯关闭、印—亚大陆碰撞造山,(古)太平洋板块及菲律宾海板块的俯冲消减、海沟东撤。与之相关的多幕次、多期性构造过程的联合作用,使得东亚区域构造体制完成了从被动大陆边缘到活动大陆边缘的连续而深刻的变革。异常持久的多期次陆缘伸展拉张,继以岩石圈裂解和海底扩张,形成了包括日本海、东海、南海在内的西太平洋大陆边缘海盆地体系。中国海域1:100万区域地质调查取得的全覆盖、多维度地质和地球物理资料及原创性研究成果,揭示了中—新生代东亚大陆边缘从地幔到岩石圈尺度的一系列动力和热力过程的剧烈转折。这些重大变化重塑了整个东亚大陆边缘的深部驱动系统、板块应力与运动、岩浆活动性质与分布、地貌特征与源—汇过程、生态环境和资源分布。大洋岩石圈俯冲消减和地幔扰动等深部过程的时空差异使得构造—地貌演化过程在同一区域呈现出阶段性,在相同时代的不同区域对比鲜明。边缘海盆地构造—地貌的差异演化导致中国海域沉积物分布特征呈现出两种截然不同的沉积分异模式:东部海域为条带状沉积分异,而南海为牛眼状沉积分异。不同圈层尺度下的构造、沉积、生物过程则联合控制了油气、天然气水合物、海底热液多金属硫化物、海砂等海底矿产资源的生成、运移和成藏。综上,将大地构造学研究推进到广泛联系的地球多圈层动力系统的宏大视角,在东亚洋陆汇聚边缘有着广阔的研究前景。

致谢:感谢国务院参事张洪涛研究员、李廷栋院士、任纪舜院士、吴能友研究员、刘守全研究员、何起祥研究员、黄永祥研究员、杨作升教授、李三忠

教授、王厚杰教授、傅命佐研究员、邱燕研究员、杨守业教授等对本文部分内容提出的建议!

References

- Abd Al-Halim M A. 2010. Simulation of Plasma Focus Devices with Hemisphere Electrodes [J]. *Journal of Fusion Energy*, 29(2): 134–140.
- Anma K. 1976. Geological structure of the Tokara Channel [J]. *Geol. Study Ryukyu Isl., Assoc. Okinawan Geologists, Naka*, 1: 163–175.
- Aurelio M A, Peña R E, Taguibao K J L. 2013. Sculpting the Philippine archipelago since the Cretaceous through rifting, oceanic spreading, subduction, obduction, collision and strike-slip faulting: Contribution to IGMA5000 [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72: 102–107.
- Ben-Avraham Z, Uyeda S. 1973. The evolution of the China Basin and the mesozoic paleogeography of Borneo [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 18(2): 365–376.
- Briaux A, Patriat P, Tapponnier P. 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the south China Sea: Implications for the Tertiary tectonics of Southeast Asia [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B4): 6299–6328.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Wu Zongxu. 1992. A mantle plume beneath the north part of China continent and lithosphere motion [J]. *Geoscience*, 6(3): 267–274 (in Chinese with English abstract).
- Deschamps A, Lallemand S. 2003. Geodynamic setting of Izu–Bonin–Mariana boninites [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 219(1): 163–185.
- Deschamps A, Monié P, Lallemand S, Hsu S K, Yeh K Y. 2000. Evidence for Early Cretaceous oceanic crust trapped in the Philippine Sea Plate [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 179 (3–4): 503–516.
- Faure M, Ishida K. 1990. The Mid–Upper Jurassic olistostrome of the west Philippines: a distinctive key–marker for the North Palawan block [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 4(1): 61–67.
- Flower M. 1998. Mantle extrusion: A model for dispersed volcanism and DUPAL–like asthenosphere in East Asian and the Western Pacific [J]. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*, 27: 67–88.
- Fu Mingzuo, Liu Lejun, Zheng Yanpeng, Liu Baohua, Wu Jinlong, Xu Xiaowei. 2004. Tectonic geomorphology of the Ryukyu Trench–Arc–Backarc System: Geological–geophysical exploration and mapping [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(14): 1512–1526.
- Fujioka K, Okino K, Kanamatsu T, Ohara Y, Ishizuka O, Haraguchi S, Ishii T. 1999. Enigmatic extinct spreading center in the West Philippine backarc basin unveiled [J]. *Geology*, 27(12): 1135.

- Guo Lingzhi, Ma Ruishi, Shi Yangshen, Lu Huafu, Zhu Wenbin, Zhang Qinglong, Shu Liangshu, Dong Jia. 1998. On the generation and evolution of Mesozoic–Cenozoic back–arc basins of Western Pacific active continental margin [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2: 28–38 (in Chinese with English abstract).
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen. 1983. On the formation and evolution of the Mesozoic–Cenozoic active continental margin and island arc tectonics of the western Pacific Ocean [J]. *Acta Geologica Sinica*, 57(1): 11–21 (in Chinese with English abstract).
- Hall R, Van Hattum M W A, Spakman W. 2008. Impact of India–Asia collision on SE Asia: The record in Borneo [J]. *Tectonophysics*, 451 (1/4): 366–389.
- Hall R. 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer–based reconstructions, model and animations [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(4): 353–431.
- Hall, R. 1996. Tectonic Evolution of Southeast Asia [J]. *Journal of Structural Geology*, 18(9): 1181–1190.
- Hickey–Vargas R, Bizimis M, Deschamps A. 2008. Onset of the Indian Ocean isotopic signature in the Philippine Sea Plate: Hf and Pb isotope evidence from Early Cretaceous terranes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 268(3/4): 255–267.
- Hilde T W C, Chao–Shing L. 1984. Origin and evolution of the West Philippine Basin: A new interpretation [J]. *Tectonophysics*, 102(1): 85–104.
- Hilde T W C, Uyeda S, Kroenke L. 1977. Evolution of the western Pacific and its margin [J]. *Tectonophysics*, 38(1): 145–165.
- Holloway N H. 1981. North Palawan Block, Philippines – It's relation to Asia Mainland and role in evolution of South China Sea [J]. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 66: 1355–1383.
- Hu Kaiming. 2001. Initial Discussion on the Tectonic Evolution of Jiangshan–Shaoxing Fault Zone [J]. *Geology of Zhejiang*, 17(2): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Huan Wenlin, Shi Zhenliang, Yan Jiaquan. 1982. Meso–Cenozoic tectonic evolution of eastern China and adjacent area and movement of the Pacific Plate [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2: 179–190 (in Chinese with English abstract).
- Huang C Y, Yuan P B, Lin C W, Wang T K, Chang C P. 2000. Geodynamic processes of Taiwan arc–continent collision and comparison with analogs in Timor, Papua New Guinea, Urals and Corsica [J]. *Tectonophysics*, 325: 1–21.
- Huang Qingfu, Gou Shuming, Sun Weimin. 1984. The stratigraphical division of DC–2 columnar core from the East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 4(1): 11–26.
- Huang T K. 1945. On major tectonic forms of China [J]. *Geological Memoirs*, 20: 1–165.
- Huang Zhenguo, Zhang Weiqiang. 2004. Geomorphological effects of plate movement during Quaternary in China's tropics [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 24(3): 286–291.
- Ishibashi J, Urabe T. 1995. Hydrothermal Activity Related to Arc–Backarc Magmatism in the Western Pacific [C]//Taylor B (ed.). *Backarc Basins: Tectonics and Magmatism*: Boston, MA, Springer US: 451–495.
- Iwasaki T, Hirata N, Kanazawa T, Melles J, Suyehiro K, Urabe T, Möller L, Makris J, Shimamura H. 1990. Crustal and upper mantle structure in the Ryukyu island arc deduced from deep seismic sounding [J]. *Geophysical Journal International*, 102(3): 631–651.
- Jian Zhimin, Jin Haiyan, Kaminski M A, Ferreira F, Li Baohua, Yu Paissen. 2019. Discovery of the marine Eocene in the northern South China Sea [J]. *National Science Review*, 6(5): 881–885.
- Jiang Menglin, Liu Zhiping. 2001. The Quaternary marine transgression in the Northwest of Taihu Lake Plain [J]. *Jiangsu Geology*, 25 (2): 78–81 (in Chinese with English abstract).
- Johnson D R, Ruzek M, Kalb M. 1997. What Is Earth System Science? [M]. 682: 688–691.
- Karig D E, Sarewitz D R, Haeck G D. 1986. Role of strike–slip faulting in the evolution of allocthonous terranes in the Philippines [J]. *Geology*, 14: 852–855.
- Karig D E. 1975. Basin genesis in the Philippine Sea [J]. *Init. Rep. DSDP*, 31: 857–879.
- Karig D E. 1983. Accreted terranes in the northern part of the Philippine Archipelago [J]. *Tectonics*, 2: 211–236.
- Karig E D. 1971. Origin and development of marginal basins in the western Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 76(11): 2542–2561.
- Kawagucci S, Chiba H, Ishibashi J–i, Yamanaka T, Toki T, Muramatsu Y, Ueno Y, Makabe A, Inoue K, Yoshida N, Nakagawa S, Nunoura T, Takai K, Takahata N, Sano Y, Narita T, Teranishi G, Obata H, Gamo T. 2011. Hydrothermal fluid geochemistry at the Iheya North field in the mid–Okinawa Trough: Implication for origin of methane in seafloor fluid circulation systems [J]. *Geochemical Journal*, 45: 109–124.
- Kawagucci S, Miyazaki J, Nakajima R, Nozaki T, Takaya Y, Kato Y, Shibuya T, Konno U, Nakaguchi Y, Hatada K, Hirayama H, Fujikura K, Furushima Y, Yamamoto H, Watsuji T–o, Ishibashi J–i, Takai K. 2013. Post–drilling changes in fluid discharge pattern, mineral deposition, and fluid chemistry in the Iheya North hydrothermal field, Okinawa Trough [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(11): 4774–4790.
- Kimura M. 1985. Back–arc rifting in the Okinawa Trough [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2(3): 222–240.
- Kizaki K. 1986. Geology and tectonics of the Ryukyu Islands [J]. *Tectonophysics*, 125: 193–207.
- Konno U, Tsunogai U, Nakagawa F, Nakaseama M, Ishibashi J, Nunoura T, Nakamura K. 2006. Liquid CO₂ venting on the seafloor: Yonaguni Knoll IV hydrothermal system, Okinawa Trough [J]. *Geophysical Research Letters – Geophys. Res. Lett.*

- 331(16): 627–642.
- Koppers A, Staudigel H, Wijbrans J R, Pringle M. 2001a. Long-lived but Discontinuous Hotspot Volcanism of the South Pacific Mantle [C]. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Koppers A A P, Morgan J P, Morgan J W, Staudigel H. 2001b. Testing the fixed hotspot hypothesis using $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age progressions along seamount trails [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 185(3): 237–252.
- Kudrass H R, Wiedicke M, Cepeck P, Kreuser H, Muller P. 1986. Pre-Quaternary rocks dredged from the South China Sea (Reed Bank area) and Sulu Sea, during Sonne Cruises in 1982–83 and their significance for the plate tectonic reconstructions [J]. *Marin Pet. Geof.* 3:19–30.
- Lallemant S, Liu C S, Angelier J, Collot J Y, Deffontaines B, Dominguez S, Fournier M, Hsu S K, Formal J P, Liu S, Lu C Y, Malavieille J, Schnurle P, Sibuet J C, Thureau N, Wang F. 1997. Swath bathymetry reveals active arc-continent collision near Taiwan [J]. *EOS*, 78.
- Lei Baohua, Chen Jianwen, Liang Jie, Zhang Yinguo, Li Gang. 2018. Tectonic deformation and evolution of the South Yellow Sea basin since Indosinian movement [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(3): 45–54 (in Chinese with English abstract).
- Letouzey J. 1985. Okinawa Trough genesis: Structure and evolution of back-arc basin development in a continent [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2(2):111–130.
- Li Chunfeng, Xu Xing, Lin Jian, Sun Zhen, Zhu Jian, Yao Yongjian, Zhao Xixi, Liu Qingsong, Kulhanek D K, Wang Jian, Song Taoran, Zhao Junfeng, Qiu Ning, Guan Yongxian, Zhou Zhiyuan, Williams Trevor, Bao Rui, Briais Anne, Brown E A, Chen Yifeng, Clift Peter D, Colwell Frederick S, Dadd K A, Ding Weiwei, Almeida I H, Huang Xiaolong, Hyun Sangmin, Jiang Tao, Koppers A A P, Li Qianyu, Liu Chuanlian, Liu Zhifei, Nagai R H, Peleó-Alampay Alyssa, Su Xin, Tejada M L G, Trinh Haison, Yeh Yiching, Zhang Chuanlun, Zhang Fan, Zhang Guoliang. 2014. Ages and magnetic structures of the South China Sea constrained by deep tow magnetic surveys and IODP Expedition 349 [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(12): 4958–4983.
- Li Chunfeng. 2009. Opening of the South China Sea and its implications for Southeast Asian tectonics since the late Mesozoic [J]. *Advances in Earth Science*, 24(12): 1339–1351 (in Chinese with English abstract).
- Li F, Sun Z, Yang H. 2017. Possible spatial distribution of the Mesozoic volcanic arc in the present-day South China Sea continental margin and its tectonic implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123: 6215–6235.
- Li Jiabiao, Ding Weiwei, Wu Ziyin, Sun Qiuci. 2017. Origin of the East China Sea [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 47(4): 406–411 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiabiao. 2008. Marginal Sea Formation and Evolution of Resource Effects in China [M]. Beijing: China Ocean Press (in Chinese).
- Li Jinyi. 1998. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas [J]. *Geological Review*, 44(4): 339–347 (in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 2001. Pattern and time of the collision between the Sino-Korean and Yangtze blocks: Evolution of the Sinian–Jurassic sedimentary settings in the middle–lower reaches of the Yangtze river [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1: 25–34.
- Li Jun, Hu Bangqi, Dou Yanguang, Zhao Jingtao, Li Guogang. 2012. Modern sedimentation rate, budget and supply of the muddy deposits in the East China Seas [J]. *Geological Review*, 58(4): 745–756 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Cao Xianzhi, Wang Guangzeng, Liu Bo, Li Xiyao, Suo Yanhui, Jiang Zhaoxia, Guo Lingli, Zhou Jie, Wang Pengcheng, Zhu Junjiang, Wang Gang, Zhao Shujuan, Liu Yongjiang, Zhang Guowei. 2019. Meso-Cenozoic tectonic evolution and plate reconstruction of the Pacific Plate [J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 642–677 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Shan Yu, Zhao Shujuan, Liu Xin, Gong Shuyun, Suo Yanhui, Dai Liming, Ma Yun, Liqing X U, Cao Xianzhi. 2013. Tectonic transition and plate reconstructions of the East Asian continental margin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(3): 65–94 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Suo Yanhui, Li Xiyao, Wang Yongming, Cao Xianzhi, Wang Pengcheng, Guo Lingli, Yu Shengyao, Lan Haoyuan, Li Shaojun. 2018. Mesozoic plate subduction in West Pacific and tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone [J]. *Chinese Science Bulletin*, 63(16): 1550–1593 (in Chinese with English abstract).
- Li Tingdong, Xiao Qinghui, Pan Guitang, Lu Songnian, Ding Xiaozhong, Liu Yong. 2019. A Consideration about the Development of Ocean Plate Geology [J]. *Earth Science*, 44(5): 1441–1451 (in Chinese with English abstract).
- Li Z X, Li X. H. 2007. Formation of the 1300 km wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction mode 1 [J]. *Geology*, 35(2): 179–182.
- Lin Jian, Xu Yigang, Sun Zhen, Zhou Zhiyuan. 2019. Mantle upwelling beneath the South China Sea and links to surrounding subduction systems [J]. *National Science Review*, 6(5): 877–881.
- Liu Baohua, Zheng Yanpeng, Wu Jinlong, Han Guozhong. 2005. The topographical characteristics in the area off eastern Taiwan Island and their tectonic implication [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 27(5): 82–91 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiqing, Liu Zhehao. 2019. The three-dimensional geomorphologic map of China Seas and adjacent regions: Design and practice [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(4): 1–11.
- Liu Xiqing. 1996. Sedimentary division in marginal seas of China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 16(3): 1–11 (in Chinese

- with English abstract).
- Liu Zhenhu. 2005. Distribution of sedimentary basins and petroleum potential in southern South China Sea [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(3): 410–417 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhenxia, Xia Dongxing. 2004. Tidal Sands in China Seas [M]. Beijing: Ocean Press (in Chinese).
- Liu Zhongchen, Liu Baohua, Huang Zhenzong, Zhu Benduo, Fu Mingzuo, Yan Jun, Zhang Xunhua, Zheng Yanpeng. 2005. Topography and Geomorphology of China's Offshore and Adjacent Areas [M]. Beijing: Ocean Press, 140–224(in Chinese).
- Louden K E. 1977. Paleomagnetism of DSDP sediments, phase shifting of magnetic anomalies and rotations of the West Philippine Basin [J]. *Journal of Geophysical Research*, 82B, 2989–3002.
- Luan Xiwu, Zhai Shikui, Gan Xiaoqun. 2001. Tectonophysical features of the hydrothermal fields in the Middle Okinawa Trough [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1: 43–47 (in Chinese with English abstract).
- Luan Xiwu, Zhang Liang. 2010. Tectonic evolution modes of south China sea: Passive spreading under complex actions [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(6): 59–74 (in Chinese with English abstract).
- Ma Daoxiu. 1992. Continental and island slope Landforms of Northwest Pacific [C]// Liu Guangding. Geological and geophysical Characteristics of China Seas and Its Adjacent Areas. Beijing: Science Press, 25–32 (in Chinese).
- Ma Mingming, Liu Xiuming, Zhou Guohua, Liu Gengyu, Che Bolin. 2016. A Review of Late Quaternary Transgression Studies and Some Basic Questions in Fujian Coastal Area[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 11 (3): 9–19(in Chinese with English abstract).
- Masaki Y, Kinoshita M, Inagaki F, Nakagawa S, Takai K. 2011. Possible kilometer– scale hydrothermal circulation within the Iheya– North field, mid– Okinawa Trough, as inferred from heat flow data [J]. *Jamstec Report of Research and Development*, 12: 1–12.
- Morley C K. 2002. A tectonic model for the Tertiary evolution of strike–slip faults and rift basins in SE Asia [J]. *Tectonophysics*, 347 (4): 189–215.
- Mrozowski CL, Lewis SD, Hayes DE, 1982. Complexities in the tectonic evolution of the West Philippine Basin [J]. *Tectonophysics* 82:1–24.
- Okino K, Fujioka K. 2003. The Central Basin Spreading Center in the Philippine Sea: Structure of an extinct spreading center and implications for marginal basin formation [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1): 2040.
- Ozima M, I Kaneoka, K Saito, M Honda, M Yanagisawa, Y Takigami. 1983. Summary of geochronological studies of submarine rocks from the western Pacific Ocean, in geodynamics of the Western Pacific–Indonesian Region [J]. *Geodynamics Series*, 11:137–142.
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, Yuan S H, Ji W H, Yin F G, Zhang W P, Wang B D. 2012. Tectonic evolution of the Qinghai– Tibet plateau [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3–14.
- Pan Guitang, Lu Songnian, Xiao Qinghui, Zhang Kexin, Yin Fuguang, Hao Guojie, Luo Mansheng, Ren Fei, Yuan Sihua. 2016. Division of tectonic stages and tectonic evolution in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 1–23(in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, Feng Yanfang. 2009. Subdivision of tectonic units in China [J]. *Geology in China*, 36(1): 1–28,255(in Chinese with English abstract).
- Qiu Yan, Chen Guoneng, Liu Fanglan, Peng Zhuo. 2008. Discovery of granite and its tectonic significance in southwestern basin of the South China Sea [J]. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2104–2107.
- Ren Jishun, Zhao Lei, Li Chong, Zhu Junbin, Xiao Liwei. Thinking on Chinese tectonics—Duty and responsibility of Chinese geologists[J]. *Geology in China*, 44(1): 33–43 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Zhao Lei, Xu Qinqin, Zhu Junbin. 2016. Global tectonic position and geodynamic system of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2100–2108(in Chinese with English abstract).
- Ren, Jishun, Niu Baogui, Liu Zhigang. 1999. Soft collision, superposition orogeny and polycyclic suturing [J]. *Earth Science Frontiers*, 6(3): 85–93(in Chinese with English abstract).
- Replumaz A, Tapponnier P. 2003. Reconstruction of the deformed collision zone Between India and Asia by backward motion of lithospheric blocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B6): 2285.
- Saito Y, Katayama H, Ikehara K, Kato Y, Matsumoto E, Oguri K, Oda M, Yumoto M. 1998. Transgressive and highstand systems tracts and post–glacial transgression, the East China Sea [J]. *Sedimentary Geology*, 122(1): 217–232.
- Sakai H, Gamo T, Kim E– S, Tsutsumi M, Tanaka T, Ishibashi J, Wakita H, Yamano M, Oomori T. 1990. Venting of carbon dioxide– rich fluid and hydrate formation in Mid–Okinawa trough backarc basin [J]. *Science*, 248(4959): 1093–1096.
- Schmidtke E, Fuller M, Haston R. 1990. Paleomagnetic data from Sarawak, Malaysian Borneo, and the Late Mesozoic and Cenozoic tectonics of Sundaland [J]. *Tectonics*, 9(1): 123–140.
- Sella G F, Dixon T H, Mao A. 2002. REVEL: A model for Recent plate velocities from space geodesy [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4): ETG 11–11–ETG 11–30.
- Seno E, Pieper R, Huber F. 1977. Terminal Stages in the Biosynthesis of Tylosin [J]. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 11: 455–461.
- Seno K, Knorpp K, Shu L L, Teshima N, Kihara H, Sato H, Miyaji F, Takeda M, Sasaki M, Tomo Y, Chuang P, Kobayashi K. 1993. A 9–

- ns 16-Mb CMOS SRAM with offset-compensated current sense amplifier [J]. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, 28: 1119-1124.
- Seno T, Stein S, Gripp A E. 1993. A model for the motion of the Philippine Sea plate consistent with NUVEL-1 and geologic data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 98, B, 17941-17948.
- Seno T. 1977. The instantaneous rotation vector of the Philippine sea plate relative to the Eurasian plate [J]. *Tectonophysics*, 42, 209-226.
- Sewell R J, Campbell S D G. 1997. Geochemistry of Coeval Mesozoic Plutonic and Volcanic Suites in HongKong [J]. *Journal of the Geological Society*, 154(6): 1053-1066.
- Shang Luning, Zhang Xunhua, Jia Yonggang, Han Bo, Yang Chuansheng, Geng Wei, Pang Yumao. 2017. Late Cenozoic evolution of the East China continental margin: Insights from seismic, gravity, and magnetic analyses [J]. *Tectonophysics*, 698: 1-15.
- Shang Luning, Zhang Xunhua, Zhang Yong, Cao Rui, Yang Chuansheng, Han Xiwei. 2018a. Review of tectonic constraints on the hydrothermal activity and hydrothermal mineralization in the okinawa trough [J]. *Marine Science Bulletin*, 37(5): 494-505(in Chinese with English abstract).
- Shang Luning, Zhang Yong, Zhang Xunhua, Cao Rui, Sun Zhilei. 2018b. Tectonic structure of the outer shelf of the East China sea and the formation mechanism [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 49(6): 1178-1189(in Chinese with English abstract).
- Shang Luning. 2017. The tectonic constraints of the submarine hydrothermal activity and mineralization in the Okinawa Trough[R]. Ocean University of China, Postdoctoral Report.
- Shiono K, Mikumo T, Ishikawa Y. 1980. Tectonics of the Kyushu-Ryukyu arc as evidenced from seismicity and focal mechanism of shallow to intermediate-depth earthquakes [J]. *Journal of Physics of the Earth*, 28(1): 17-43.
- Shu Liangshu. 2006. Predevonian tectonic evolution of South China: From Cathaysian Block to Caledonian period folded orogenic belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418-431 (in Chinese with English abstract).
- Sibuet J C, Letouzey J, Barbier F, Charvet J, Foucher J-P, Hilde T W C, Kimura M, Chiao L-Y, Marsset B, Muller C, Stéphan J-F. 1987. Back arc extension in the Okinawa Trough [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 92(B13): 14041-14063.
- Song Chuansheng, Li Jiahao, Yan Jiayong, Wang Yangyang, Liu Zhendong, Yuan Fang, Li Zhenwei. 2019. A tentative discussion on some tectonic problems in the east of South China continent [J]. *Geology in China*, 46(4): 704-722 (in Chinese with English abstract).
- Sun L, Sun Z, Huang X, Jiang J, Joann Miriam Stock. 2019. Microstructures documenting Cenozoic extension processes in the northern continental margin of the South China Sea [J]. *International Geology Review*, (3):1-14.
- Sun Weidong. 2016. Initiation and evolution of the South China Sea: An overview [J]. *Acta Geochimica*, 35(3): 215-225.
- Sun Zhen, Zhou Di, Zhong Zhihong, Xia Bin, Qiu Xuelin, Zeng Zuoxun, Jiang Jianqun. 2006. Research on the dynamics of the South China Sea opening: Evidence from analogue modeling [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 49(10): 1053.
- Suppe J. 1984. Kinematics of arc-continent collision, flipping of subduction, and back-arc spreading near Taiwan [J]. *Mem. Geol. Soc. China*, 6: 21-33.
- Suzuki R, Ishibashi J, Nakaseama M, Konno U, Tsunogai U, Gena K, Chiba H. 2008. Diverse range of mineralization induced by phase separation of hydrothermal fluid: Case study of the Yonaguni Knoll IV hydrothermal field in the Okinawa Trough Back-Arc Basin [J]. *Resource Geology*, 58: 267-288.
- Takai K, Mottl M, Nielsen S. 2012. IODP Expedition 331: Strong and expansive seafloor hydrothermal activities in the Okinawa Trough the IODP expedition 331 scientists [J]. *Scientific Drilling*, 13.
- Tang Baogen. 1996. Preliminary Study on the Quaternary stratigraphic sequence in the continental shelf of the East China Sea [J]. *Shanghai Geology*, 58(2): 22-30(in Chinese with English abstract).
- Tang Q, Zheng C. 2013. Crust and upper mantle structure and its tectonic implications in the South China Sea and adjacent regions [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 510-525.
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, Sch, rer U, Dalai Z, Haiwei W, Liu X, Ji S, Lianshang Z, Jiayou Z. 1990. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and South China [J]. *Nature*, 343: 431-437.
- Tapponnier P, Peltzer G, Dain A Y L, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine [J]. *Geology*, 10(10): 611.
- Taylor B, Hayes D E. 1983. Origin and history of the South China Sea basin [J]. *Geophysical Monograph*, 27: 23-56.
- Tsuji T, Takai K, Oiwan H, Nakamura Y, Masaki Y, Kumagai H, Kinoshita M, Yamamoto F, Okano T, Kuramoto S i. 2012. Hydrothermal fluid flow system around the Iheya North Knoll in the mid-Okinawa trough based on seismic reflection data [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 213-214: 41-50.
- Ujiié H. 1983. Submarine geology west off the Okinawa Islands in relation to the Ryukyu Arc development [J]. *Mem. Geol. Sot. Jpn.*, 22: 131-40.
- Wang Hongzhen. 1986. Precambrian geochronologic and chronostratigraphic subdivision of China[J]. *Earth Science*, 5: 447-453(in Chinese with English abstract).
- Wang Lijie, Yao Yongjian, Sun Zhen, Li Fucheng. 2020. Mesozoic distribution and tectonic deformation in the eastern Nansha block [J]. *Geological Review*, (s1): 77-80(in Chinese with English

- abstract).
- Wang Mingjian, Chen Xi, Lei Baohua, Zhu Xiaoping. 2014. Current status and problems of oil and gas exploration in South Yellow Sea basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 34(11): 20–25(in Chinese with English abstract).
- Wang Mingjian, Xiao Guolin, Zhang Yong, Yang Yanqiu, Yang Changqing. 2019. Cretaceous hydrocarbon accumulation conditions in the southeastern East China Sea Shelf Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(6):169–176(in Chinese with English abstract).
- Wang Mingjian, Zhang Xunhua, Xiao Guolin. 2014. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation since Triassic of the southern depression in South Yellow Sea Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 25(7): 991–998(in Chinese with English abstract).
- Wang Pinxian, Huang Chiyue, Lin Jian, Jian Zhimin, Sun Zhen, Zhao Minghui. 2019. The South China Sea is not a mini-Atlantic: Plate-edge rifting vs intra-plate rifting [J]. *National Science Review*, 6(5): 902–913.
- Wang Pinxian, Tian Jun, Huang Enqing. 2018. Global monsoon and ocean drilling[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 48: 960–963(in Chinese).
- Wang Pinxian. 2019. Ocean drilling and marine geology in China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(1): 7–14(in Chinese with English abstract).
- Wang Ying, Ji Xiaomei. 2011. Environmental Characteristics and changes of coastal ocean as land-ocean transitional zone of China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2: 129–135(in Chinese with English abstract).
- Wang Ying, Wang Minjing. 2018. A summarization of volcanic geomorphologies [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(4):1–20(in Chinese with English abstract).
- Williams P R, Johnston R A, Simamora W H. 1988. Late Cretaceous to Early Tertiary structural elements of West Kalimantan [J]. *Tectonophysics*, 148: 279–297.
- Wu H, Chen J, Wang Q, Yu Y. 2019. Spatial and temporal variations in the geochemistry of Cretaceous high-Sr/Y rocks in Central Tibet [J]. *American Journal of Science*, 319(2): 105–121.
- Wu Shimin, Zhou Di, Liu Hailing. 2004. Tectonic framework and evolutionary characteristics of Nansha block, South China Sea [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(1): 23–28.
- Xiao Guolin, Wang Mingjian, Yang Changqing. 2019. Numerical simulation of Mesozoic hydrocarbon generation, migration and accumulation in the southern East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(6): 138–149(in Chinese with English abstract).
- Xiao M, Yao Y, Cai Y, Qiu H N, Xu Y G, Xu X, Jiang Y D, Li Y B, Xia X P, Yu Y J. 2019. Evidence of Cretaceous lower arc crust delamination and its role in the opening of the South China Sea [J]. *Gondwana Research*, 7:123–145.
- Xing Fengming, Xu Xiang, Chen Jiangfeng, Zhou Taixi, Foland K A. 1992. The Late Proterozoic continental accretionary history of the southeastern margin of Jiangnaniania[J]. *Acta Geologica Sinica*, (3): 283–299.
- Xu Jiawei, Ma Guofeng. 1992. Review of ten years (1981–1991) of research on the Tancheng–Lujiang fault zone [J]. *Geological Review*, 38(4): 316–324(in Chinese with English abstract).
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, Shu Liangshu, Wang Ruirui. 2009. Early Mesozoic geotectonic processes in South China [J]. *Geology in China*, 36(3): 95–115 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xing, Dong Miao, Chen Aihua, Zhang Jian, Jia Xiang. 2017. Contents of heat producing elements in drilling cores from IODP expedition 349 in South China Sea Basin and geological implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(6): 1128–1134 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xing, Yao Yongjian, Peng Deng, Yao Bochu. 2018. The characteristics and analysis of heat flow in the Southwest sub-basin of South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 061(7): 2915–2925.
- Xu Zhiqian, Zhao Zhongbao, Peng Miao, Ma Xuxuan, Li Huaqi, Zhao Junmeng. 2016. Review of “orogenic plateau”[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(12): 3557–3571(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqian, Li Haibing, Yang Jingsui. 2006. An orogenic plateau—the orogenic collage and orogenic types of the Qinghai–Tibet plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 1–17(in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Ma Fang, Song Yongqin, Xie Yaping. 2010. Geochronology and geochemistry of the neoproterozoic granitoid association from eastern segment of the Jiangnan orogen, China: constraints on the timing and process of amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3215–3244(in Chinese with English abstract).
- Yang Changqing, Yang Yanqiu, Yang Chuansheng, Sun Jing, Wang Jianqiang, Xiao Guolin, Wang Jiao, Wang Mingjian. 2019. Tectono-sedimentary evolution of the Mesozoic in the southern East China Sea Shelf Basin and its bearing on petroleum exploration[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 39(6): 30–40 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chuansheng, Yang Changqing, Yang Yanqiu, Sun Jing, Yan Zhonghui, Wang Jianqiang. 2020. Meso-Cenozoic deformation and dynamic mechanism of the ocean-continent transitional zone in the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(1): 71–84 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenda, Cui Zhengke, Zhang Yibiao. 2010. *Geology and Mineral Resources of the East China Sea* [M]. Beijing: Ocean Press (in Chinese).
- Yao Bochu, Liu Zhenhu. 2006. Sedimentary basins and petroleum resources in Nansha offshore area, South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 18(3): 150–160(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Yao Bochu, Wan Ling, Liu Zhenhu. 2004. Tectonic dynamics of cenozoic sedimentary basins and hydrocarbon resources in the south china sea [J]. *Earth Science*, 29(5): 543–549(in Chinese with English abstract).
- Yao Bochu. 1991. The tectonic evolution in the south China sea basin during the Cenozoic [J]. *Research of Ecological South China Sea*, 3: 9–23(in Chinese with English abstract).
- Yao Y, Liu H, Yang C, Han B, Tian J, Yin Z, Gong J, Xu Q. 2012. Characteristics and evolution of Cenozoic sediments in the Liyue Basin, SE South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114–129.
- Yao Yongjian, Jiang Yukun, Zeng Xianghui. 2002. Cenozoic tectonic movements in nansha area, South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 16(2): 113–124(in Chinese with English abstract).
- Yu S B, Chen H Y, Kuo L C. 1997. Velocity field of GPS stations in the Taiwan area [J]. *Tectonophysics*, 274: 41–59.
- Yu Zhenjiang, Guo Shengqiao, Liang Xiaohong, Zhang Yuping, Wang Runhua. 2005. Division and age assignment of the Quaternary transgression layers in the Yangtze delta area (Southern Yangtze) [J]. *Journal of Stratigraphy*, 29: 618–625(in Chinese with English abstract).
- Zeng Zhigang, Zhai Shikui, Du Andao. 2003. Os Isotopic compositions of seafloor massive sulfides from the Jade hydrothermal field in the Okinawa Trough [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 34(4): 407–413 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guangxue, Zhu Youhai, Liang Jinqiang, Wu Shiguo, Yang Muzhuang, Sha Zhibing. 2006. Tectonic controls on gas hydrate deposits and their characteristics [J]. *Geoscience*, 4: 605–612(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Li Sanzhong, Guo Anlin, Suo Yanhui. 2017. West Pacific and North Indian Ocean seafloor and their ocean–continent connection zones: Evolution and debates [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 91(6): 2283–2301(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Li Xuejie, Shang Luning, Mei Xi, 2018. Great progress in “1: 1 million Marine Geological Survey of China Seas” [J]. *Marine Geology Frontiers*, 34(11): 72 (in Chinese).
- Zhao Jinhai, Tang Jian, Wang Shunjie. 2003. Structural evolution of Cenozoic of the Okinawa Trough [J]. *Offshore Oil*, 23(3): 1–9(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xitao, Hu Daogong, Wu Zhonghai, Yang Xiaodong. 2017. Reviews on the reserach of Late Cenozoic geology and environment of the Yangtze river delta area[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(1): 1–64(in Chinese with English abstract).
- Zheng Hongbo, Wang Ping, He Mengying, Luo Chao, Huang Xiangtong, Jia Juntao. 2013. Timing of the establishment of the east–flowing Yangtze River and tectonic–geomorphic implications[J]. *Quaternary Sciences*, 33(4): 620–630 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Guangjian, Gao Hongfang, Chen Ling, Li Wenyong, Lin Zhen. 2004. Mesozoic stratigraphic characteristic of South China Sea [J]. *Gresearch of Ecological South China Sea*, 1: 10–15(in Chinese with English abstract).
- Zhong Shilan, Liu Jinling, Li Xingxue, Mu Xinan, Zhou Songmei, Liu Zhiping, Zhu Zhiyuan. 1999. Preliminary study of biota and environments since late pleistocene in the Tai–Ge area, southern Jiangsu Province, China [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 16 (2) :167–180(in Chinese with English abstract).
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 326(3/4): 269–287.
- Zhou Xinhua, Jiang Ronghua, Chen Huanjiang, Hu Shiling, Xu Baotong, Lao Qiuyuan. 1993. Sm–Nd and Ar–Ar dating of the P1–amphibolite, Jinshan Group, Shanghai region [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 418–421 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zuyi, Liao Zongting, Jin Xingchun, Jia Jianyi. 2001. Okinawa trough: The highest stage of continental tension rifting in back arc setting [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(1):51–55 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Niu Manlan, Liu Guosheng, Wang Daoxuan, Song Chuanzhong. 2002. Structural, Magmatic and Sedimentary Events of the Tan–Lu Fault Belt During its Early Cretaceous Strike–Slip Movement [J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(3): 325–334 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xia. 1992. On the evolution of continental margins of China–By way of introduction [C]/Liu Guangding. *Geological and Geophysical Characteristics of China Sea and Adjacent Regions*. Beijing: Science Press(in Chinese).

附中文参考文献

- 曾志刚, 杜安道. 2003. 冲绳海槽 Jade 热液区海底块状硫化物的 Os 同位素组成 [J]. *海洋与湖沼*, 34(4): 407–413.
- 邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪, 罗照华, 莫宣学, 吴宗祭. 1992. 中国北方大陆下的地幔热柱与岩石圈运动 [J]. *现代地质*, 6(3): 267–274.
- 傅命佐, 刘乐军, 郑彦鹏, 刘保华, 吴金龙, 徐小微. 2004. 琉球“沟–弧–盆系”构造地貌: 地质地球物理探测与制图 [J]. *科学通报*, 49 (14): 1447–1460.
- 郭令智, 马瑞士, 施央申, 卢华复, 朱文斌, 张庆龙, 舒良树, 贾东. 1998. 论西太平洋活动大陆边缘中—新生代弧后盆地的分类和演化 [J]. *成都理工学院学报*, 2: 28–38.
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1983. 西太平洋中、新生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成及演化 [J]. *地质学报*, 57(1): 11–21.
- 胡开明. 2001. 江绍断裂带的构造演化初探 [J]. *浙江地质*, 17(2): 1–11.
- 环文林, 时振梁, 鄢家全. 1982. 中国东部及邻区中生代构造演化

- 与太平洋板块运动[J]. 地质科学, 2: 179-190.
- 黄庆福, 苟淑名, 孙维敏. 1984. 东海 DC-2 孔柱状岩芯的地层划分[J]. 海洋地质与第四纪地质, 4(1): 11-26.
- 黄镇国, 张伟强. 2004. 中国热带第四纪板块构造的地貌效应[J]. 地理科学, 24(3): 286-291.
- 蒋梦林, 刘志平. 2001. 太湖平原西北部第四纪海侵[J]. 江苏地质, 25(2): 78-81.
- 雷宝华, 陈建文, 梁杰, 张银国, 李刚. 2018. 印支运动以来南海黄盆地的构造变形与演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 38(3): 45-54.
- 李春峰, 汪品先, Franke D, 李家彪, Stephenson R, 许树坤, Michael P, 周祖翼, 葛知潜, 李前裕, 刘志飞, 耿建华, 木村学, 阎贫, 丘学林, 王嘹亮, 解习农, 吴时国, 吴能友. 2009. 南海张裂过程及其对晚中生代以来东南亚构造的启示——IODP 建议书 735-Full 介绍[J]. 地球科学进展, 24(12): 1339-1351.
- 李家彪, 丁巍伟, 吴自银, 孙淑词. 2017. 东海的来历[J]. 中国科学: 地球科学, 47(4): 406-411.
- 李家彪. 2008. 中国边缘海形成演化与资源效应[M]. 北京: 海洋出版社.
- 李锦轶. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识[J]. 地质论评, 44(4): 339-347.
- 李锦轶. 2001. 中朝地块与扬子地块碰撞的时限与方式——长江中下游地区震旦纪—侏罗纪沉积环境的演变[J]. 地质学报, 1: 25-34.
- 李军, 胡邦琦, 窦衍光, 赵京涛, 李国刚. 2012. 中国东部海域泥质沉积区现代沉积速率及其物源控制效应初探[J]. 地质论评, 58(4): 745-756.
- 李三忠, 曹现志, 王光增, 刘博, 李玺瑶, 索艳慧, 姜兆霞, 郭玲莉, 周洁, 王鹏程, 朱俊江, 汪刚, 赵淑娟, 刘永江, 张国伟. 2019. 太平洋板块中—新生代构造演化及板块重建[J]. 地质力学学报, 25(5): 642-677.
- 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 王永明, 曹现志, 王鹏程, 郭玲莉, 于胜尧, 兰浩圆, 李少俊, 赵淑娟, 周在征, 张臻, 张国伟. 2018. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造—岩浆响应[J]. 科学通报, 63(16): 1550-1593.
- 李三忠, 余珊, 赵淑娟, 刘鑫, 龚淑云, 索艳慧, 戴黎明, 马云, 许立青, 曹现志, 王鹏程, 孙文军, 杨朝, 朱俊江. 2013. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换[J]. 海洋地质与第四纪地质, 33(3): 65-94.
- 李廷栋, 肖庆辉, 潘桂棠, 陆松年, 丁孝忠, 刘勇. 2019. 关于发展洋板块地质学的思考[J]. 地球科学, 44(5): 1441-1451.
- 刘保华, 郑彦鹏, 吴金龙, 韩国忠. 2005. 台湾岛以东海域海底地形特征及其构造控制[J]. 海洋学报(中文版), 27(5): 82-91.
- 刘锡清, 刘喆昊. 2019. 中国海区及邻域立体地貌图的设计与制作实践[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(4): 1-11.
- 刘锡清. 1996. 中国边缘海的沉积物分区[J]. 海洋地质与第四纪地质, 16(3): 1-11.
- 刘振湖. 2005. 南海南沙海域沉积盆地与油气分布[J]. 大地构造与成矿学, 29(3): 410-417.
- 刘振夏, 夏东兴. 2004. 中国近海潮流沉积砂体[M]. 北京: 海洋出版社.
- 刘忠臣, 刘保华, 黄振宗, 朱本铎, 傅命佐, 阎军, 张训华, 郑彦鹏. 2005. 中国近海及邻近海域地形地貌[M]. 北京: 海洋出版社, 140-224.
- 栾锡武, 翟世奎, 干晓群. 2001. 冲绳海槽中部热液活动区构造地球物理特征分析[J]. 沉积学报, 1: 43-47.
- 栾锡武, 张亮. 2009. 南海构造演化模式: 综合作用下的被动扩张[J]. 海洋地质与第四纪地质, 29(6): 59-74.
- 马道修. 1992. 西北太平洋大陆坡、岛坡地貌[M]//刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理特征. 北京: 科学出版社, 25-32.
- 马明明, 刘秀铭, 周国华, 刘庚余, 车柏林. 2016. 福建沿海地区晚第四纪海侵研究进展及存在的问题[J]. 亚热带资源与环境学报, 11(3): 9-19.
- 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 张克信, 尹福光, 郝国杰, 骆满生, 任飞, 袁四化. 2016. 中国大地构造阶段划分和演化[J]. 地学前缘, 23(6): 1-23.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 邓晋福, 冯益民, 张克信, 张智勇, 王方国, 邢光福, 郝国杰, 冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 36(1): 1-28, 255.
- 邱燕, 陈国能, 刘方兰, 彭卓. 2008. 南海西南海盆花岗岩的发现及其构造意义[J]. 地质通报, 27(12): 2104-2107.
- 任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 1999. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用[J]. 地学前缘, 6(3): 85-93.
- 任纪舜, 赵磊, 李崇, 朱俊宾, 肖黎微. 2017. 中国大地构造研究之思考——中国地质学家的责任与担当[J]. 中国地质, 44(1): 33-43.
- 任纪舜, 赵磊, 徐芹芹, 朱俊宾. 2016. 中国的全球构造位置和地球动力系统[J]. 地质学报, 90(9): 2100-2108.
- 尚鲁宁, 张训华, 张勇, 曹瑞, 杨传胜, 韩希伟. 2018a. 构造地质过程对冲绳海槽热液活动及成矿作用的控制研究综述[J]. 海洋通报, 37(5): 494-505.
- 尚鲁宁, 张勇, 张训华, 曹瑞, 孙治雷. 2018b. 东海陆架外缘区构造特征及其成因机制[J]. 海洋与湖沼, 49(6): 1178-1189.
- 尚鲁宁. 2017. 冲绳海槽海底热液活动的构造地质学约束[R]. 中国海洋大学, 博士后出站报告.
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带[J]. 高校地质学报, 12(4): 418-431.
- 宋传中, 李加好, 严加永, 王阳阳, 刘振东, 袁芳, 李振伟. 2019. 华南大陆东部若干构造问题的思考[J]. 中国地质, 46(4): 704-722.
- 唐保根. 1996. 东海陆架第四纪地层层序的初步研究[J]. 上海地质, 58(2): 22-30.
- 汪品先, 田军, 黄恩清. 2018. 全球季风与大洋钻探[J]. 中国科学: 地球科学, 48(7): 960-963.
- 汪品先. 2019. 大洋钻探与中国的海洋地质[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(1): 7-14.
- 王鸿祯. 1986. 论中国前寒武纪地质时代及年代地层的划分[J]. 地球科学, 5: 447-453.
- 王利杰, 姚永坚, 孙珍, 李付成. 2020. 南沙地块东部中生界分布及构造变形特征[J]. 地质论评, (s1): 77-80.
- 王明健, 陈畴, 雷宝华, 朱晓青. 2014. 南海黄盆地油气勘探现状及存在问题[J]. 海洋地质前沿, 34(11): 20-25.

- 王明健,肖国林,张勇,杨艳秋,杨长清. 2019. 东海陆架盆地东南部白垩系油气成藏条件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(6): 169-176.
- 王明健,张训华,肖国林. 2014. 南黄海盆地南部坳陷三叠纪以来的构造演化与油气成藏[J]. 天然气地球科学, 25(7): 991-998.
- 王颖,季小梅. 2011. 中国海陆过渡带——海岸海洋环境特征与变化研究[J]. 地理科学, 2: 129-135.
- 王颖,王敏京. 2018. 火山地貌例述[J]. 海洋地质与第四纪地质, 38(4): 1-20.
- 吴世敏,周蒂,刘海龄. 2004. 南沙地块构造格局及其演化特征[J]. 大地构造与成矿学, 28(1): 23-28.
- 肖国林,王明健,杨长清. 2019. 东海南部中生界烃类生成、运聚与成藏数值模拟[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(6): 138-149.
- 邢凤鸣,徐祥,陈江峰,周泰禧, Foland K A. 1992. 江南古陆东南缘晚元古代大陆增生史[J]. 地质学报, 66(1): 59-72.
- 徐行,董森,陈爱华,张健,贾香. 2017. 南海海盆IODP349钻井岩心的生热元素测试与应用研究[J]. 大地构造与成矿学, 41(6): 1128-1134.
- 徐行,姚永坚,彭登,姚伯初. 2018. 南海西南次海盆的地热流特征与分析[J]. 地球物理学报, 61(7): 2915-2925.
- 徐嘉炜,马国锋. 1992. 郯庐断裂带研究的十年回顾[J]. 地质论评, 38(4): 316-324.
- 徐先兵,张岳桥,贾东,舒良树,王瑞瑞. 2009. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 36(3): 95-115.
- 许志琴,李海兵,杨经绥. 2006. 造山的高原——青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型[J]. 地学前缘, (4): 1-17.
- 许志琴,赵中宝,彭森,马绪宣,李化启,赵俊猛. 2016. 论“造山的高原”[J]. 岩石学报, 32(12): 3557-3571.
- 薛怀民,马芳,宋永勤,谢亚平. 2010. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学:对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束[J]. 岩石学报, 26(11): 3215-3244.
- 杨传胜,杨长清,杨艳秋,孙晶,颜中辉,王建强. 2020. 东海洋陆过渡带中—新生代构造变形及动力学机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 40(1): 71-84.
- 杨文达,崔征科,张异彪. 2010. 东海地质与矿产[M]. 北京:海洋出版社.
- 杨长清,杨艳秋,杨传胜,孙晶,王建强,肖国林,王蛟,王明健. 2019. 东海陆架盆地南部中生代构造—沉积演化与油气勘探方向[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(6): 30-40.
- 姚伯初,刘振湖. 2006. 南沙海域沉积盆地及油气资源分布[J]. 中国海上油气, 18(3): 150-160.
- 姚伯初,万玲,刘振湖. 2004. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源[J]. 地球科学, 29(5): 543-549.
- 姚伯初. 1991. 南海海盆在中生代的构造演化[J]. 南海地质研究, 3: 9-23.
- 姚永坚,姜玉坤,曾祥辉. 2002. 南沙海域新生代构造运动特征[J]. 中国海上油气, 16(2): 113-124.
- 于振江,郭盛乔,梁晓红,等. 2005. 长江三角洲(江南)地区第四纪海侵层的划分及时代归属[J]. 地层学杂志, 29: 618-625.
- 张光学,祝有海,梁金强,吴时国,杨木壮,沙志彬. 2006. 构造控制型天然气水合物矿藏及其特征[J]. 现代地质, 20(4): 605-612.
- 张国伟,李三忠. 2017. 西太平洋—北印度洋及其洋陆过渡带:古今演变与争论[J]. 海洋地质与第四纪地质, 37(4): 1-17.
- 张勇,李学杰,尚鲁宁,梅西. 2018. “中国海域1:100万区域地质调查集成及应用研究”取得重大进展[J]. 海洋地质前沿, 34(11): 72.
- 赵金海,唐建,王禹杰. 2003. 冲绳海槽新生代构造演化讨论[J]. 海洋石油, 23(3): 1-9.
- 赵希涛,胡道功,吴中海,杨晓东. 2017. 长江三角洲地区晚新生代地质与环境研究进展述评[J]. 地质力学学报, 23(1): 1-64.
- 郑洪波,王平,何梦颖,罗超,黄湘通,贾军涛. 2013. 长江东流水系建立的时限及其构造地貌意义[J]. 第四纪研究, 33(4): 620-630.
- 钟广见,高红芳,陈玲,李文勇,林珍. 2004. 南海中生代地层初探[J]. 南海地质研究, 1: 10-15.
- 钟石兰,刘金陵,李星学,穆西南,邹松梅,刘志平,朱志远. 1999. 江苏太湖地区晚更新世以来古生物群及环境[J]. 微体古生物学报, 16(2): 167-180.
- 周新华,蒋荣华,陈焕疆,胡世玲,许保桐,劳秋元. 1993. 上海金山群斜长角闪岩Sm-Nd和Ar-Ar同位素年龄测定[J]. 岩石学报, 9(04): 418-421.
- 周祖翼,廖宗廷,金性春,贾健谊. 2001. 冲绳海槽——弧后背景下大陆张裂的最高阶段[J]. 海洋地质与第四纪地质, 21(1): 51-55.
- 朱光,牛漫兰,刘国生,王道轩,宋传中. 2002. 郯庐断裂带早白垩世走滑运动中的构造、岩浆、沉积事件[J]. 地质学报, 76(3): 325-334.