

doi: 10.12029/gc20200505

秦绪文,石显耀,张勇,李学杰,李军,肖桂义,许振强,王宏斌,吕文超,吴浩,姚永坚,尚鲁宁,杨楚鹏,王中波,高红芳,王明健,密蓓蓓,钟和贤,胡刚,陈泓君,黄龙,罗伟东,梅西,徐子英,田陟贤,王忠蕾. 2020. 中国海域 1:100 万区域地质调查主要成果与认识[J]. 中国地质, 47(5): 1355-1369.

Qin Xuwen, Shi Xian Yao, Zhang Yong, Li Xuejie, Li Jun, Xiao Guiyi, Xu Zhenqiang, Wang Hongbin, Lü Wenchao, Wu Hao, Yao Yongjian, Shang Luning, Yang Chupeng, Wang Zhongbo, Gao Hongfang, WANG Mingjian, Mi Beibei, Zhong Hexian, Hu Gang, Chen Hongjun, Huang Long, Luo Weidong, Mei Xi, Xu Ziyang, Tian Zhixian, Wang Zhonglei. 2020. Main achievements and understanding of 1:1 million regional geological survey of China Seas[J]. Geology in China, 47(5):1355-1369(in Chinese with English abstract).

中国海域 1:100 万区域地质调查主要成果与认识

秦绪文¹,石显耀¹,张勇²,李学杰³,李军¹,肖桂义¹,许振强¹,王宏斌¹,吕文超¹,
吴浩²,姚永坚³,尚鲁宁²,杨楚鹏³,王中波²,高红芳³,王明健²,密蓓蓓²,钟和贤³,
胡刚²,陈泓君³,黄龙²,罗伟东³,梅西²,徐子英³,田陟贤²,王忠蕾²

(1. 中国地质调查局,北京 100037;2. 青岛海洋地质研究所,山东 青岛 266071;3. 广州海洋地质调查局,广东 广州 510075)

摘要:中国海域及邻区是建设“21 世纪海上丝绸之路”、打造海洋命运共同体和推动可持续发展的关键地区,也是地球科学最具有典型性和代表性的研究区域之一。中国管辖海域 1:100 万区域地质调查是一项以国家需求为导向、以解决重大地球系统科学问题为目标的基础性公益性工作。中国地质调查局通过近 20 年的持续调查,实现了对中国管辖海域 1:100 万区域地质调查的全面覆盖,系统地获取了海洋地质和地球物理基础数据,形成了基于实测数据的“一图一库一报告”,大幅提升了中国海洋地质调查工作程度。这项工作填补了中国小比例尺海洋地质国情调查的空白,初步摸清了中国管辖海域地质环境条件和资源环境潜力,取得了一批原创性的认识,为建设海洋强国提供了详实可靠的地质资料,为提升区域地质科学的认知水平奠定了坚实基础。

关键词:中国海域;1:100 万区域地质调查;海域构造;海域地层;海域地貌;海域资源;海域沉积;海洋地质调查工程
中图分类号:P714⁺.6;P623.1 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2020)05-1355-15

Main achievements and understanding of 1:1 million regional geological survey of China Seas

QIN Xuwen¹,SHI Xian Yao¹,ZHANG Yong²,LI Xuejie³,LI Jun¹,XIAO Guiyi¹,XU Zhenqiang¹,
WANG Hongbin¹,LÜ Wenchao¹,WU Hao²,YAO Yongjian³,SHANG Luning²,YANG Chupeng³,
WANG Zhongbo²,GAO Hongfang³,WANG Mingjian²,MI Beibei²,ZHONG Hexian³,HU Gang²,
CHEN Hongjun³,HUANG Long²,LUO Weidong³,MEI Xi²,XU Ziyang³,TIAN Zhixian²,
WANG Zhonglei²

(1. China geological Survey, Beijing 100037, China; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China;

收稿日期:2020-04-03;改回日期:2020-08-06

基金项目:中国地质调查局海洋区域地质调查项目(DD20160137, DD20160138)资助。

作者简介:秦绪文,男,1977 年出生,博士,研究员,主要从事地质调查研究与管理工;E-mail:qinxuwen@163.com。

通讯作者:石显耀,男,1983 年出生,硕士,高级工程师,主要从事海洋地质调查研究与管理工;E-mail:stoneskg@qq.com。

3. *Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China*)

Abstract: China seas and their adjacent areas are the key areas for establishing the "21st Century Maritime Silk Road" and building a community of marine destiny and promoting sustainable development. They also constitute one of the most typical and representative research areas in earth science. The 1:1 million regional geological survey of China seas is a national basic public welfare marine geological work guided by national demand. Through the continuous investigation of nearly 20 years, China Geological Survey has realized the comprehensive coverage of 1:1 million regional geological survey of China seas and systematically obtained the basic data of marine geology and geophysics. Based on these numerous data, the comprehensive achievements of "one series of maps, one data set, one research report" have been recently raised to a new level. These results have vigorously improved the overall level of the marine geological work of China and filled in the blank of small-scale marine geological survey of China. The work has preliminarily found out the geological structure situation and the potential of resources and environment in China seas and also provided detailed and reliable geological data to serve the needs of national economy and social development.

Key words: China seas; marine regional geological survey of China; marine tectonics; marine strata; marine geomorphology; marine resource; marine geological survey engineering

About the first author: QIN Xuwen, male, born in 1977, doctor, mainly engages in marine geological research and management; E-mail: qinxunwen@163.com.

About the corresponding author: SHI Xianyao, male, born in 1983, doctor, mainly engages in marine geological research and management; E-mail: stoneskg@qq.com.

Fund support: Supported by Geological Survey Project of China Geological Survey (No. DD20160137, DD20160138).

1 引 言

海洋约占地球表面积的71%,其中蕴含着丰富的矿物、海水化学、海洋生物以及海洋动力等资源。海洋能源、资源的开发与利用,海洋与全球变化、海洋环境与生态的研究是本世纪人类维持自身的生存与发展以及拓展生存空间最为切实可行的途径。未来海洋资源和环境仍是制约中国海洋经济发展的重要因素,如何有效开发利用海洋资源、应对海洋资源退化、海洋生态环境问题的挑战,将成为中国乃至世界各国未来发展海洋经济面临的重大课题,首先需要了解海洋的基础地质特征和资源潜力。海洋区域地质调查,是国家基础“国情”调查的一部分,指利用现代地学新技术、新方法和新理论,按照一定比例尺在特定海域范围内开展系统的地质、地球物理、地球化学、遥感、海洋沉积动力环境等方面的调查工作。其目标是掌握海域基础地学数据,查明海底地形、地貌、海底沉积物类型、地层结构及其分布规律,环境地质因素分布特征,矿产资源类型和分布状况等基础地质信息,瞄准和解决制约海洋资源、环境和地球系统重大科学问题。

自20世纪以来,全球各沿海国家均已陆续开展了对近海、远海乃至深海的地质调查工作,其中欧美以及东亚日韩等发达国家最先开展了海域区域地质调查工作,并取得了丰硕的调查研究成果。20世纪50年代以来,美国、俄罗斯和英国等国家基本已经完成第一轮、第二轮海洋区域地质调查,实现了大陆架以里区域的海洋基础地质普查,并在20世纪末开始了第三轮海洋区域地质调查工作,初步完成了各国领海地区甚至大陆架地区的1:100万、1:50万和1:25万等不同比例尺的调查与填图工作,主要编制了不同比例尺的海底地形图、底质沉积物类型图、地质图、矿产分布图和各种地球物理和地球化学专业图件。日本自20世纪70年代至今,已经布置了四轮海洋区域地质调查,目前已完成了四国盆地、菲律宾海和中国海地形测量以及围绕大陆架海底地质的综合调查研究,调查的比例尺也由第一轮1:300万逐步放大至现今在重点海域进行的1:20万和1:5万海洋地质调查。韩国也已经实现了其临近海域的1:10万~1:5万海洋基础地质调查全覆盖。

相比之下,中国海洋地质调查起步较晚、工作

程度很低,最早的调查工作起始于20世纪50年代末的近海海洋综合调查,1958—1960年由国家科委海洋组统一部署的近海综合调查拉开了中国开展海洋调查的序幕。迄今为止,中国海域地质调查工作大致可分3个阶段:第一阶段,从20世纪50年代末起到70年代初,中国海洋地质工作者首先在渤海、东海海域,继而在黄海等海域进行了初步地质地球物理方面的研究和勘查工作,首次采集了海域重力、磁力、热流、地震和测深等方面的数据,并进行了少量的钻探和地质取样工作,取得了首批海域地质、地球物理等方面的资料(范时清等,1959;郑执中等,1960;秦蕴珊等,1962;秦蕴珊,1963;王颖,1964)。第二阶段,从20世纪70年代中期到90年代末,主要以海域油气资源勘察以及海岸带和海涂资源评价为主要任务,后期陆续在不同海域开展了构造、沉积以及地球化学相关的专题研究。这一阶段的海域地质调查工作获取了大量的高精度实测数据,绘制了一批中大比例尺图件,然而数据之间缺乏统一的精度要求、图件之间缺乏统一的标准控制,数据资料主要集中于部分海域,缺乏对中国管辖海域的全面覆盖(秦蕴珊,1985;何起祥等,1986;刘敏厚等,1987;秦蕴珊等,1987;刘昭蜀等,1988;金翔龙,1992;刘光鼎,1993;王成厚,1995;姚伯初等,1999;杨子赓,2004;高金耀等,2014)。第三阶段,从21世纪初至今,这一时期,国家海洋局、中国地质调查局、中国科学院等多家研究单位对中国管辖海域开展了各种专项研究和资源调查等一系列系统的海洋地质地球物理调查工作(杨文达等,2001;刘申叔等,2001;刘昭蜀等,2002;李广雪,2005;陈丽蓉,2008;李家彪,2008;陈洁等,2010;张洪涛等,2011;张训华等,2013;杨胜雄等,2013;高金耀等,2014)。1999年,中国地质调查局在财政部的支持下,启动实施1:100万海洋区域地质调查工作,至2015年完成了南通幅、海南岛幅、上海幅、大连幅等16个完整图幅和4个不完整图幅的调查,并于2019年完成综合集成工作(张勇等,2019)。1:100万海洋区域地质调查工作一项以国家需求为导向、自上而下顶层设计确定的国家基础性公益性海洋地质工作。也是中国首次按照国际标准分幅开展的海洋地质国情调查,实现对中国管辖海域基础地质调查工作的全面覆盖。

本文较系统总结了1:100万海洋区域地质调查的进展和主要成果,尤其是对中国东部海域沟-弧-盆形成的动力学机制、南海扩张机制、重大成矿带机理等关键科学问题取得了新认识,初步形成海域大地构造划分与演化、海洋沉积演化和沉积建造、活动构造和火山岩分布、海洋成矿等系统理论体系。

2 海域地质背景

中国海域属于西太平洋边缘海体系,毗邻中国大陆的东部和南部,西邻欧亚大陆,东起第一岛链,东北部通过对马海峡与日本海相通,南沿中南半岛直达曾母暗沙,横跨42个纬度,由北向南依次包括渤海、黄海、东海、台湾岛以东部分海域和南海(刘光鼎等,2007)。中国主张的管辖海域面积约300万 km^2 ,拥有18000 km的大陆岸线和14000 km的岛屿岸线,以及7600余个海岛岛屿,海岛陆域总面积近8万 km^2 。中国海域及周边被众多的岛屿和半岛环绕,东北有朝鲜半岛,东部有九州岛,琉球群岛,东南部有菲律宾群岛,西南有马来半岛和中南半岛。

由于太平洋板块、欧亚板块、印-澳板块和菲律宾海板块在中国海及邻区交汇碰撞,塑造了蔚为壮观的沟-弧-盆体系和复杂的洋陆构造格局(李家彪,2008;李家彪等,2017;Shang et al.,2017;李三忠等,2019)。特提斯构造域的演化与青藏高原的隆升为中国海域提供了源源不断的物质输送,形成了巨厚的沉积建造,产生了独特的盆地发育模式和资源环境效应,形成了中国海域丰富的油气能源和固体矿产资源,海底、海岛和海岸带国土空间资源,多圈层物质能量交换和输送的环境资源,大陆边缘裂解-聚合动力学过程与岩石圈内部结构构造的科学资源(图1)。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。相关地质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,2017)。

3 数据获取和处理方法

3.1 海上数据采集

20年来,我们利用多维多参量综合调查手段,

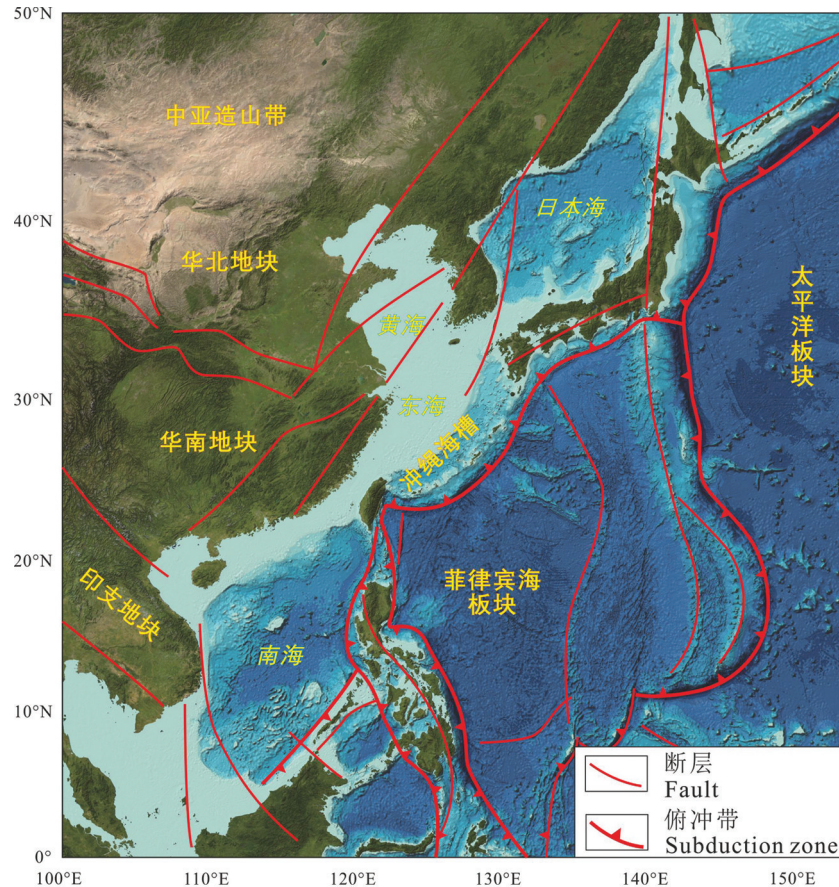


图1 西太平洋洋陆过渡带地貌格局

Fig.1 Elevation and bathymetry of the West Pacific continent-ocean connection zone

开展了1:100万海洋区域地质调查工作,系统采集了海量高精度的地质、地球物理和地球化学数据,累计获得多波束41.6万km、单波束23.8万km、侧扫声纳4.6万km、浅地层剖面7.1万km、单道地震13.5万km、多道地震4.0万km、海洋重力19.6万km、海洋磁力19.1万km、航空重力28.2万km、地质浅钻32口、地质取样6008站位等,地球物理测量的网度基本达到20 km×40 km,地质取样间隔基本达到20 km×20 km。对比其他国家,中国1:100万海洋区域地质调查具有系统性强、手段齐全、精度更高、海陆衔接的特点。这项工作是中国海洋地质调查史上完全由中国海洋地质工作者主导并完成的第一次系统的对管辖海域地质构造状况的本底调查,获得的宝贵资料和数据既是中国海洋地质国情调查原始性创新的丰硕成果,也是继续开展各专业领域海洋地质调查和科学研究的坚实基础。

3.2 图件编制方法

坚持实测为主、区域覆盖、重点突出、成果创新

的原则,采用深部与浅部结合、海洋与陆地结合、地质与地球物理相结合的技术方法,全面编制完成了中国管辖海域第一代以实测资料为基础的海洋地质系列图,包括地形图、地貌图、地质图、构造图、矿产图和环境地质因素图等6种基础性图件,空间重力异常图、布格重力异常图、陆岛改正重力异常、磁力异常图(ΔT)和元素地球化学图等19种专业性图件,中—新生代盆地分布图和表层沉积物类型图2种应用性图件。本套系列图具有4个特点:一是资料翔实,以海量实测资料为依托,系统收集了陆域及部分海域的最新资料。二是种类齐全,涵盖了地质、地球物理和地球化学等内容。三是内容创新,将调查获得的新发现、形成的新认识充分反映到图件中,体现了地球系统科学思想。四是技术先进,创新运用叠置法、透视法、陆岛改正等多种方法,实现了客观性、科学性、可读性的结合。

3.3 空间数据库建设方法

按照数据库建设统一标准的指导原则,编制了

海洋区域地质调查空间数据库数据结构,实现了多学科、多调查手段、多测试指标的多源异构数据有机融合、外业调查和内业测试分析的全流程数据有效衔接、空间和非空间数据实体的完整关联、多文件类型和大数据实体的集中管理,以及数据库数据结构、元数据内容、图例图式和质量控制体系标准的完整统一。建立了以实测数据为主导的中国海域1:100万海洋区域地质调查成果空间数据库,收录了中国海域16种调查数据、5大类分析数据、10类成果图件,共计758个数据集。实现了数据查询、地图浏览、地图检索、元数据浏览、统计分析、在线制图和数据申请与审批等功能,为地质调查、科学研究和社会公众提供全面和高效的数据服务。

4 取得的主要成果

4.1 建立了东亚大陆边缘构造格局

(1)提出“东亚大陆边缘汇聚带”概念,建立了中国海域及邻区构造单元划分新方案

东亚大陆边缘汇聚带是指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,反映由大洋岩石圈向大陆岩石圈转换的过程,构成西太平洋一级构造边界。分析认为,东亚大陆边缘汇聚带控制了整个东亚大陆边缘的构造-岩浆演化、盆地发育、源汇过程和资源分布。建立了中国海域及邻区构造单元划分新方案。将中国海域及邻区划分为欧亚板块、菲律宾海板块和东亚边缘汇聚带3个一级构造单元,并进一步划分出39个二级构造单元和70个三级构造单元,更加清晰地展示了东亚大陆边缘中—新生代构造格局和地球动力系统。

(2)系统查明了中国海域及邻区断裂发育特征

本文将海域断裂划分为岩石圈断裂、地壳断裂、基底断裂和盖层断裂4个级别。其中,岩石圈断裂5条(I级),地壳断裂12条(II级),基底断裂13条(III级),盖层断裂16条(IV级)。研究表明,中国东部海域及邻区NE-NNE向、NW向、EW及NS向断裂相互截切,海域断裂的优势走向为NE—NNE向,控制了东西分带的构造格局。断裂分布、

性质和演化史体现了中国东部海域及邻区多期构造运动的叠加。受古亚洲洋、特提斯和太平洋三大构造域的作用,中国东部中—新生代发育4期主要构造变形,中生代总体表现为向西迁移的左行压扭变形,新生代具有向东迁移的趋势且南北有别,北部右行张扭,南部左行张扭(表1)。

(3)揭示了中—新生代中国海域及邻区深部壳幔结构特征

中国东部地壳厚度自西向东减薄、莫霍面自西向东阶梯状抬升,华北和华夏板块相对于扬子板块的减薄程度较大。海域地壳的结构和走向与陆地相同,是大陆地壳向海域的延伸。渤海海域地壳厚度约30 km,南黄海约28~30 km,具有与华北地区具有相似的地壳结构,说明秦岭大别造山带深部的地壳界线向南发生了持续延伸。东海海域地壳厚度变化较大,由陆架区30 km向东减薄为冲绳海槽的21.5 km,地壳性质也由陆壳转变为洋壳。南海北部陆坡具有和东海陆坡相似的地壳厚度和结构,厚度由陆架的28 km过渡为海盆的13~10 km且性质也由陆壳转变为洋壳。南海北部陆坡和东海陆架盆地相似的地壳结构说明二者在深部可能为统一的斜坡,只是在后期构造运动过程中浅部的地壳结构发生了差异性演化。南海南缘地壳厚度为25~30 km、北苏禄海地壳厚度约15 km。

4.2 厘定了中国海域及邻区地层系统

建立中国海中—新生代地层格架,实现了全海域地层对比,海陆统筹,实现了跨构造单元、跨区域的地层对比。把中国海及邻区作为一个大的沉积盆地进行整体分析。以构造运动、充填演化历程、海平面变化控制的地层层序为单元,以求同存异为原则进行海域地层统一对比分析。通过区域不整合面的识别,建立垂向地层格架,实现地层横向对比。

(1)建立了综合地层分区方案

首次开展了中国海域及邻区的综合地层分区,将中国海域划分为欧亚和菲律宾海3个地层大区 and 8个地层区(表2)。该分区方案整体上反映了不同构造单元的地层发育特征,从层序地层的角度揭示了东亚大陆边缘中—新生代的构造格局与沉积演化规律。

(2)总结了中—新生代地层发育特征和规律

中国海域及邻区中生代广泛发育海相地层,三叠系残留于渤海、南黄海及南海北部局部区域,总

表1 中国海及邻区断裂系统划分

Table 1 Main faults attributes of China's sea areas and their adjacent areas

断裂名称	级别	断裂性质	走向	倾角	倾向
琉球海沟断裂带	I	俯冲断层	NE	40°~60°	NW
琉球海沟北缘断裂带	I	正断层	NE	40°~60°	NW
东吕宋—菲律宾海沟断裂	I	俯冲断层	SN—NW	40°~60°	SWW
台东纵谷断裂	I	逆冲断层	NE	70°~80°	SE
马尼拉—内格罗斯—哥达巴托俯冲断裂	I	俯冲断层	近SN	40°~60°	E
郟城—庐江断裂带	II	转换断层	NNE	70°~80°	—
五莲—青岛—海州断裂带	II	走滑断裂	NE	40°~60°	NW
连云港—千里岩—开城断裂带	II	走滑断裂	NE	40°~60°	NW
江山—绍兴—光州深断裂	II	缝合带	NE	45°~88°	NW
钓鱼岛隆起东侧断裂	II	正断层	NNE	30°~50°	SE
冲绳海槽大断裂	II	正断层	NNE	30°~50°	NWW
红河断裂带	II	走滑断层	NW	40°~50°	SE
南海西缘断裂带	II	走滑断层	近NS	30°~50°	SE
卢帕尔断裂	II	走滑断层	NW	30°~50°	SE
廷贾断裂	II	走滑断层	NW	30°~50°	SE
巴拉望北线断裂	II	走滑断层	NE	5°~10°	SE
加瓜脊东缘断裂	II	正断层	近SN	40°~50°	E
桃村—鸭绿江断裂带	III	走滑断裂	NE	70°	—
南汇—朝中南断裂带	III	正断层	NE	30°~50°	NW
东引—海礁大断裂	III	正断层	NNE	30°~50°	NW
西湖—基隆大断裂	III	正断层	NNE	30°~50°	NW
渔山—久米大断裂带	III	走滑断层	NW	30°~50°	—
观音—与那国断裂	III	走滑断层	NWW	—	—
莲花山断裂带	III	走滑断层	NE	30°~50°	SE
闽粤滨海断裂带	III	走滑断层	近SN	60°~70°	SE
中南—礼乐断裂	III	转换/走滑断	近SN	70°~80°	EW
巴拉巴克断裂	III	走滑断层	NW	40°~50°	SW
美济礁断裂带	III	右旋走滑断层	NW	70°~80°	NE
乌鲁根断裂	III	右旋走滑断	NNW	60°~70°	NE
菲律宾断裂	III	走滑断层	NNW	30°~50°	SW
琉球大断裂	IV	正断层	NE	30°~50°	NW
张家口—蓬莱断裂	IV	走滑断层	NW	60°~70°	—
中建洋陆边界断裂	IV	正断层	NE	60°~70°	SE
广乐隆起东断裂	IV	正断层	NE	70°~80°	E
中建南盆地控拗断裂	IV	正断层	NE	30°~40°	SE
中沙海槽西北断裂	IV	正断层	NE	60°~70°	SE
洋中脊断裂	IV	正断层	NE	75°~85°	SE
断裂名称	级别	断裂性质	走向	倾角	倾向
中沙海台南断裂	IV	正断层	EW	60°~70°	S
南沙海槽北缘断裂	IV	逆冲断层	NE	40°~50°	SE
九章盆地南控拗西断裂	IV	正断层	NE	30°~50°	NW
安渡北盆地北控拗断裂	IV	正断层	NE	30°~50°	SE
九章盆地南控拗东断裂	IV	正断层	NE	40°~60°	NW
南沙海槽盆地南控拗断裂	IV	正断层	NE	20°~40°	NW
礼乐盆地南控拗断裂	IV	正断层	NE	20°~50°	NW
礼东断裂	IV	右旋走滑断层	NW	70°~80°	NE
北吕宋海槽西缘逆冲断裂	IV	逆冲断层	近SN	70°~80°	E

表2 中国海域及邻区地层对比一览表
Table 2 Stratigraphic correlation of China seas and their adjacent areas

Table with columns for geological periods (年代地层), major regions (欧亚地层大区, 东亚大陆边缘, 菲律宾海), and sub-regions (华北, 辽东, 苏鲁, etc.). It details stratigraphic units like 平原组, 明化镇组, 东营组, etc., across different basins.

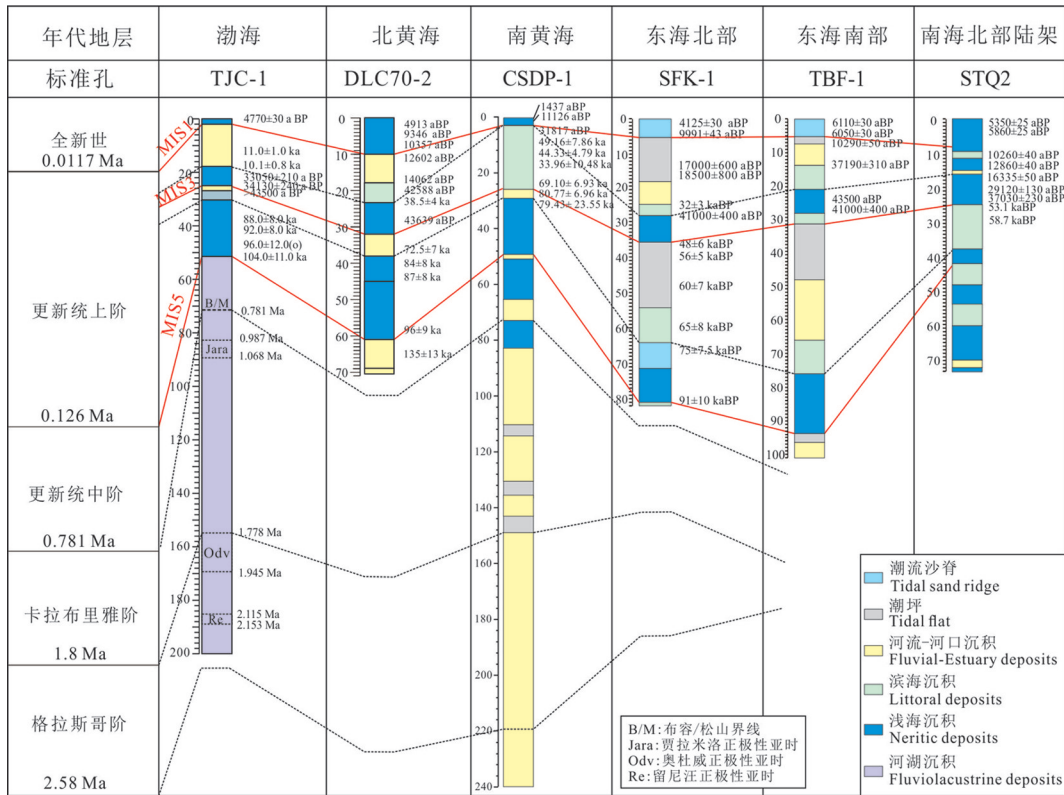


图2 中国海域陆架第四纪标准钻孔地层对比图

Fig.2 Stratigraphic correlation of Quaternary standard boreholes in the continental shelf of China seas

体上该时期具有西陆东海的沉积环境特点。侏罗系残留于渤海、黄海、东海以及南海北部和南部海域,总体上自南向北沉积环境由海变陆,依次发育深海、滨浅海、海陆过渡、陆相沉积。白垩系残留于渤海、黄海、东海以及南海北部和南部海域,在南海南部发育海相沉积,在南海北部早白垩世发育海陆过渡相沉积,其余地区总体为一套河湖相碎屑岩夹火山碎屑岩沉积。区域上来看,白垩系由东南向西北方向发生海退,沉积体系由海相逐渐向陆相演变。

古近纪晚期中国海域南北发生差异性演化,北部盆地群仍呈分散状,南部则是由封闭分割的沉积格局逐渐演变为统一连片沉积。渤海、黄海及东海北部海域在古近纪一直处于陆相沉积环境;东海中南部、南海东北部海域为浅海相沉积环境。古新世末期,花东海盆开始扩张,接受了海相沉积。至渐新世,南海北部、西部海域接受了海陆过渡相—滨浅海相沉积,南海海盆开始扩张,发育深海相沉积;花东海盆停止扩张,发育深海相泥岩和火山碎屑岩等。

新近纪中国海域处于相对稳定的沉积环境,渤海、黄海、东海海域为陆相拗陷沉积,南海全海域为海相沉积。北部海域以河泛平原、河流、滨湖相为主,至上新世末发生海侵才接受滨浅海相沉积;南部南海海域以广海相碎屑岩沉积为主,同时也广泛发育三角洲及台地碳酸盐岩沉积。第四纪渤海、黄海海域为三角洲至滨浅海相沉积,东海、南海及台湾以东海域为三角洲、滨浅海、半深海、深海相沉积。

(3)建立了中国陆架晚第四纪地层标准钻孔柱状图

进行了海陆地层对比,厘定了中国海域第四纪地层的基本格架(图2)。渤海标准钻孔揭示了2.28 Ma年以来的地层,发现渤海自第四纪以来至0.128 Ma为典型陆相沉积,几乎不含海相生物化石,以陆相介形虫分布为主,受气候和海平面变化的影响,晚更新世开始发生海侵,形成了3期海相地层。建立了南黄海陆架区第四纪以来地层格架,首次确证南黄海陆架的形成时间是1.66 Ma;南黄海陆架沉积物在0.85 Ma之前以长江物质为主,其后转为黄河物质为主。首次发现东海陆架沉积在0.08 Ma发生重大物源转换,沉积物由黄河控制为主变为长江控制为主;同时发现典型的河道沉积,为末次盛冰期东海陆架存在古长江的观点提供了直接证据。

南海标准钻孔研究表明,中更新世—晚更新世南海气候较为温凉,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,海平面变化频繁,经历了多次海侵和海退过程;全新世气候温暖湿润,区域海平面上升,发育浅海沉积。

(4)重点海域地层属性获得新的认识

一是系统厘定了花东海盆地格架和沉积体系,获得了对中国台湾以东海域地质新认识。建立了花东海盆的地层格架,海盆主体发育始新世以来地层,总体呈现“西厚东薄、北厚南薄”的特征,与西菲律宾海盆基本可对比,确定花东海盆为新生代盆地,解决了长期悬而未决的花东海盆形成时代的争议(Deschamps et al., 2000)(图3)。揭示了花东海盆独特的深海沉积体系,盆内以水下扇和埋藏水道等重力流沉积为主,海底峡谷向东延伸至加瓜海脊后,向北汇合流入琉球海沟,构成典型的超深海—深海沉积体系,综合分析认为海平面波动是浊流沉积的主要诱发机制,这些新认识补充完善了边缘海深海重力流沉积理论。二是初步证实“中生代大东海盆地”存在。中生代“大东海盆地”涵盖现今东海陆架盆地中南部和南海北部的台西盆地、台西南盆地、潮汕拗陷及笔架盆地(图4)。重—磁—震研究揭示,从东海南部到南海北部,中生代盆地边界断裂和主干大断裂均为北东和北北东向,经历了雁荡、瓯江等构造运动。井震对比揭示中生界依次发育滨海—浅海相沉积、半深海和火山碎屑岩沉积、滨海相沉积、河湖相和海陆过渡相沉积,两个海区在沉积相类型以及沉积演化过程等方面具有较好的一致性。三是首次厘定南海海盆地层属性并发现大型浊积扇体系。厘定了南海海盆沉积地层属性(图5),揭示海盆地层为渐新统一第四系,厚度一般为1000~3000 m,改变了以往认为海盆沉积厚度一般小于1000 m的传统认识。

4.3 基本摸清了中国海域多期次岩浆分布规律

将中国海及邻区的岩浆作用划分为6期,分别为前兴凯期、加里东期、海西期、印支期、燕山期和喜山期。其中,海域以燕山期和喜山期岩浆活动为主。燕山期东部海域以白垩纪中—酸性岩浆岩为主,与板块俯冲引起的岛弧岩浆作用有关;少量中—基性岩浆岩分布于渤海和南黄海,主要与岩石圈伸展和裂陷盆地形成早期地壳破裂引起的深部熔

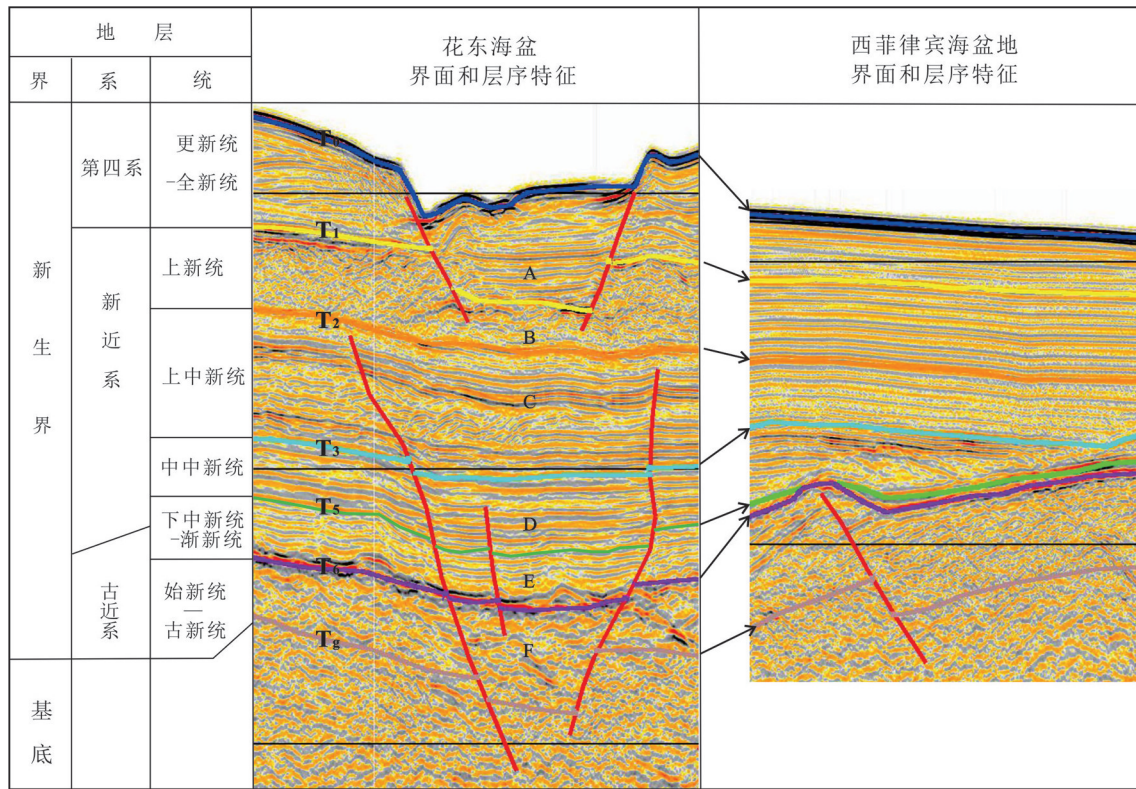


图3 花东海盆与西菲律宾海盆地层对比图
Fig.3 Stratigraphic correlation between Huadong Basin and West Philippine Basin

体上涌有关。钻井资料证实南海燕山期岩浆岩以花岗岩为主,酸性与中酸性岩浆岩空间分带性不明显;K-Ar测年结果表明岩浆活动以晚白垩世(70~105 Ma)为主,其次为早白垩世—晚侏罗世(118~153 Ma),具有自西向东逐渐变新的特征(Li et al., 2007, 2019)。喜山期东部海域岩浆作用存在显著的南北差异,渤、黄海海域以基性岩为主,是与克拉通破坏和地幔柱活动等有关的板内岩浆作用;东海受太平洋板块和菲律宾海板块俯冲的影响,发育多期岛弧和弧后盆地,岛弧型中酸性岩与弧后盆地基性岩相间分布,呈现出显著的自西向东迁移趋势。钻井、拖网和IODP钻探、地震剖面揭示的岩体与围岩地层的接触关系等表明,南海在扩张停止后的喜山期二幕(晚中新世—第四纪),存在大规模岩浆活动,早期(17~8 Ma)为大规模溢流式喷发,形成石英拉斑玄武岩及橄榄拉斑玄武岩,晚期(8~5 Ma)为中心式喷发,形成碱性橄榄玄武岩及碧玄岩,反映了南海及邻区岩浆-热活动中心由洋中脊向板内边缘迁移的规律。从全海域来看,燕山期和喜山期岩浆来源和规模不同,前者规模宏大,岩浆活动主要与

太平洋板块向西俯冲、后撤等作用相关(李三忠等, 2013, 2018);后者规模小而局限,岩浆活动与边缘海形成演化过程中深部岩浆量多少密切相关(Li et al., 2014, 2015)。

4.4 揭示了中国海域及邻区重磁场特征

一是重力异常场直观地展示出中国东部海域“东西分带、南北分块”和南部海域“东西分块、南北分带”的构造格局。布格重力异常场总体变化趋势为由东至西、由南向北逐渐减小,正异常的最大值区位于苏拉威西海盆,负异常的最小值位于华南桂西北区域。二是磁异常显示出东部海域北东向和北北东向条带状走向和南部海域团块状特征,清晰地刻画出郯庐断裂带、钓鱼岛隆褶带两侧大断裂、冲绳海槽大断裂、琉球岛弧西缘断裂、马尼拉俯冲断裂带、中南—礼乐断裂带、廷贾断裂带和南海西缘断裂带等形态特征。

4.5 查明了表层沉积物元素地球化学特征

在大量地球化学数据的基础上,对海域地球化学元素分布规律及其成因进行了研究。一是查明了表层地球化学元素分布规律。地球化学元素含

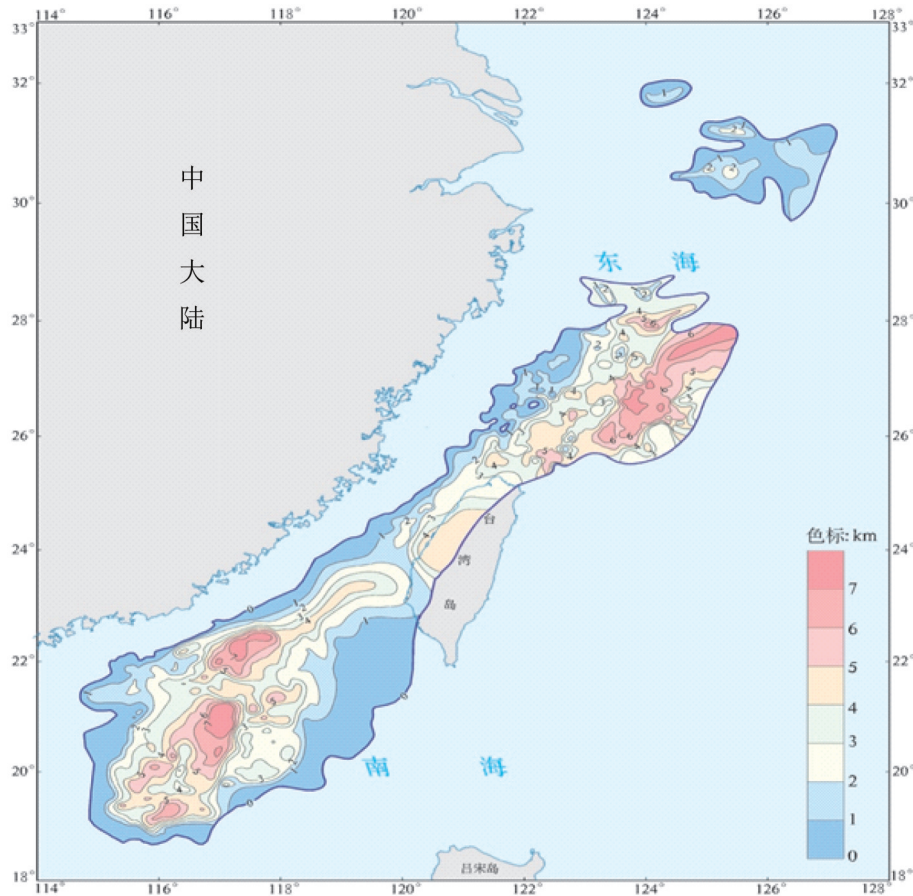


图4 中生代“大东海”盆地厚度图

Fig.4 Thickness of the Mesozoic Great East China Sea Basin

量在东部海域平行于海岸线呈条带状分布,而在南海则显示从陆架到海盆的环状分布。常量元素 SiO_2 高含量位于台湾浅滩和南黄海中东部靠近朝鲜半岛的砂质区,而其他常量元素高含量位于东海内陆架、南海中央海盆及菲律宾海盆等泥质区。主要微量元素 Cd 主要分布于长江口、辽河口和珠江口, As、Hg 分布在辽河口和珠江口。二是总结了地球化学分布影响因素。分析认为控制地球化学分布的主要因素是物源、粒度、气候和人类活动。长江口高 Cd 是由于扬子和秦岭相对富 Cd 岩石的风化产物输入。 SiO_2 、 Al_2O_3 和 MgO 等分布与粒度控制相关, Na_2O 含量分布受不同纬度的气候控制明显。三是东部海域与南海北缘地球化学表现为不相容元素的富集,并具有向海降低的趋势,表明陆源沉积物的影响逐渐减弱;南海海盆地球化学特征表现出相容元素的富集,表明主要受到深部海盆基岩的影响。

4.6 刻画了中国边缘海及邻区地貌形态

采用“形态与成因、内营力与外营力、分类与分级相结合”的原则划分了四级地貌单元。根据地貌形成的主次因素,采取分析组合方法,依据发育规模,先宏观后微观,先群体后个体的惯例划分了四级地貌单元。其中海岸带地貌、大陆架地貌等二级地貌 4 类,水下三角洲、海底峡谷群等三级地貌 57 类,海山、潮流沙脊等四级地貌 64 类。

新发现了 21 种地貌类型。中国管辖及邻近海域海底地貌图,是依据国标 GB/T 1276310-2007 进行编制的,根据多波束等实测资料,新发现了 21 种地貌类型,包括海湾—河口湾平原、水下侵蚀—堆积台地、水下侵蚀—堆积浅滩、水下构造台地、水下构造台地 5 种海岸带地貌;陆架侵蚀—堆积斜坡、陆(岛)架外缘斜坡、陆架大型潮流冲刷槽、陆架峡谷群、陆架浅谷 5 种陆(岛)架地貌;陆坡海岭、陆坡海隆、陆坡高地、大型麻坑群、大型海谷、岛坡海槛、陆

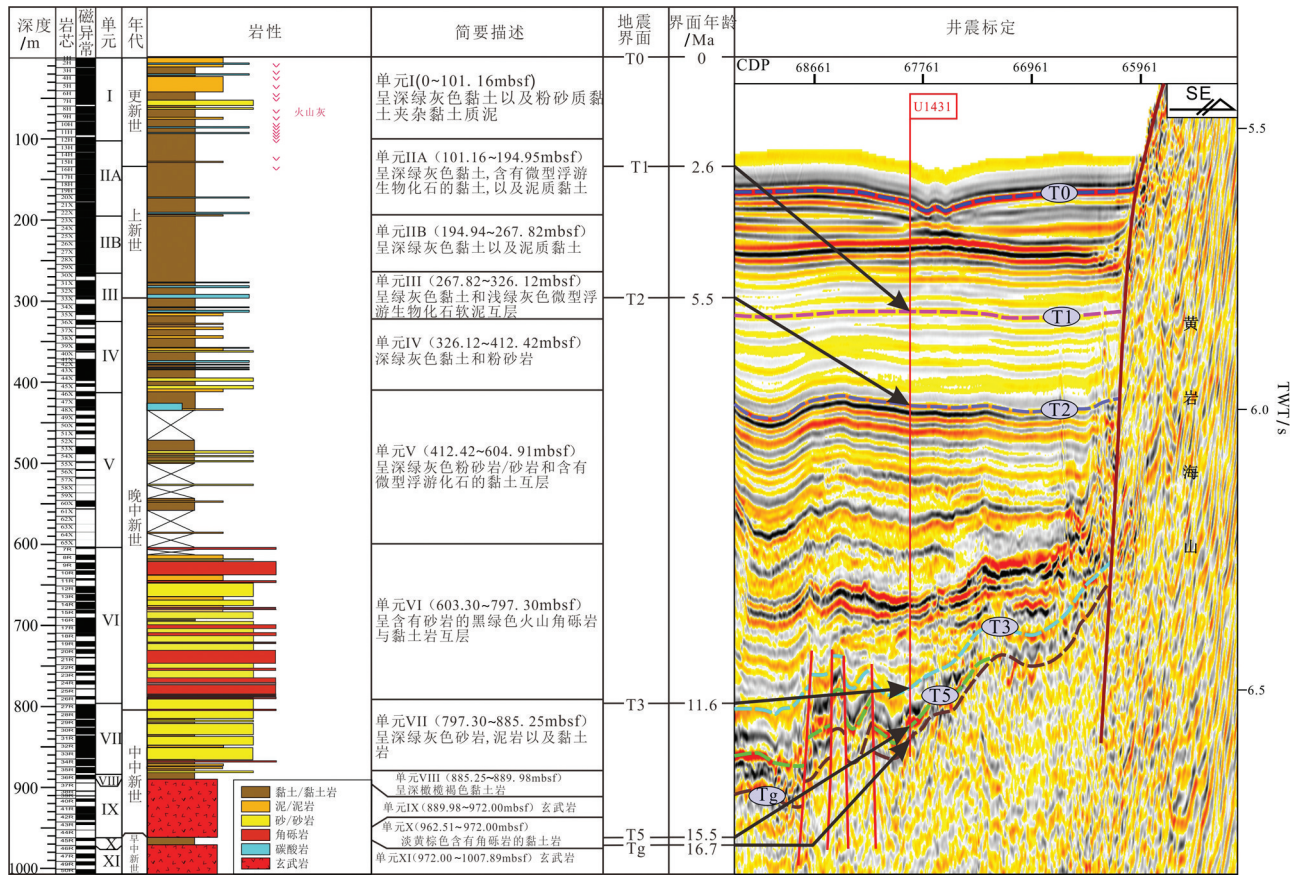


图5 南海东部次海盆地层格架图

Fig.5 Stratigraphic framework of subbasin in the east of South China Sea

坡山谷7种陆(岛)坡地貌;深海大型峡谷群、深海海脊、深海海山链、深海大型盆地4种深海盆地地貌。

阐明了海域基本地貌格局。中国海域及邻区依次发育着海岸带地貌、陆架和岛架地貌、陆坡和岛坡地貌、深海盆地地貌,东部海域呈“南北延伸、东西更替”的条带状分布,宽广大陆架和沟-弧-盆体系是东部海域主要地貌特征。南部海域地貌格局呈环状分布,多类型陆架和海底峡谷群是主要地貌特征。分析认为,构造运动、海平面升降及海洋洋动力是塑造地貌形态的主控因素。

识别和命名780个地理实体,其中245个获国务院批准。在南海,利用海量的实测数据,首次系统命名245个中国管辖海域海底地理实体,包括南海北部陆坡、南沙陆坡等一级地理实体16个;东沙斜坡、神狐峡谷群等二级地理实体49个;南海深海盆西南深海扇、玳瑁东和管事西海底火山等180个三级和四级地理实体;地理实体命名方案已获国务院批准,极大提高了对海底及海岛归属的认知程度。

4.7 揭示晚第四纪沉积演化过程

系统地揭示沉积物区域分布规律,总结提出了中国东部海域“大江大河—大三角洲—宽缓陆架—深水海槽”条带状沉积分异模式和南海“短源性河流—多类型陆架—高角度陆坡—深海海盆”的环带状沉积分异模式(图6)。中国海陆架区以砂砾质和粉砂质陆源沉积物为主,受中国大型河流物质的控制,在海洋流场作用下自岸向海发生沉积分异,形成粗—细—粗的沉积物分布格局。陆坡以细粒陆源沉积物为主,海盆以远洋相的陆源—生物源混合沉积物为主。由于地形地貌影响,南海沉积物类型呈不规则环带状分布,受陆源和生物源双重因素影响。海州湾和台湾海峡存在大规模的砂质沉积区及所谓“残留沉积”是晚更新世低海面时期形成的沉积物质残留。东海外陆架大规模分布的潮流沙脊,是在强潮流作用下形成末次海侵物质的改造沉积。陆架泥质区的物质来源和发育机制各不相同,除涡旋流外,大多为高位体系域的细粒沉积。南海

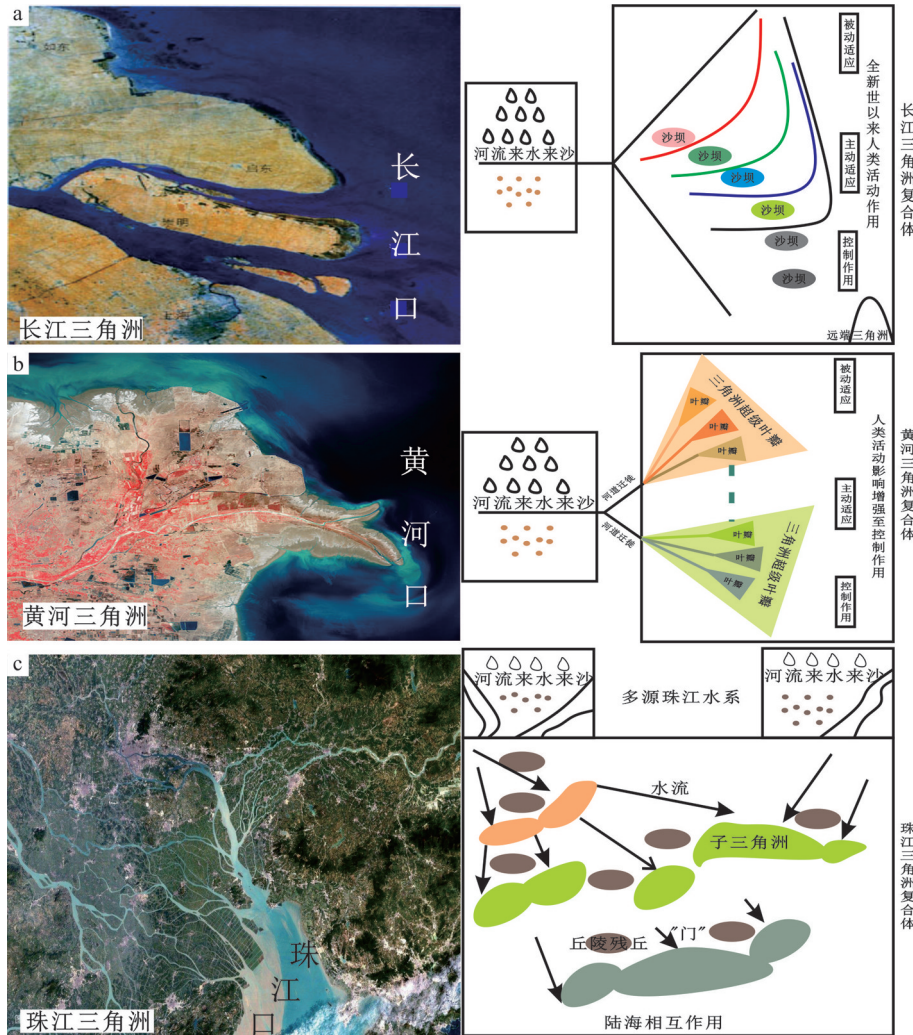


图6 中国大河三角洲全新世以来演化影像图和模式图

Fig.6 Image and model maps of the evolution of China's Great River Delta since Holocene

海盆水深大于 3000 m 海域发现的高砂含量异常分布区和超过 4000 m 海域砾石异常分布区,是深水海盆重力流的有力证据。

晚第四纪期间中国陆架地区相对稳定沉降,海平面波动控制了沉积作用,形成典型的海相层序地层。研究表明, MIS5 (74~130 ka) 以来中国海陆架沉积记录了 3 次明显的海侵过程,发育了 3 个相对完整的海相地层。其中,渤海和东海 MIS3 (24~60 ka) 和 MIS1 (12ka—至今) 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,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。南海晚更新世内陆架以滨岸和陆相沉积为主,外陆架为滨岸和浅海沉积;全

新世发育浅海沉积。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 (60~74 ka) 陆相潟湖—河流—滨海河口相沉积, MIS3 浅海相—滨海潮坪沉积, MIS2 (12~24 ka)/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。此外,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。上述认识为深入研究中国晚第四纪沉积与全球气候变化对比提供直接依据。

三角洲地区处于海陆交互作用强烈的特殊地带,是全球环境系统的关键组成部分,该区域自然资源丰富,人口高度密集,城市化程度高,人类活动活跃,生态环境脆弱。全新世以来中国三大河口三

角洲都经历3个明显的发育阶段:全新世早期到2000a BP左右为千年尺度变化,完全以自然作用为控制因素;2000a BP至新中国建立为百年尺度的变化,以自然作用为主辅以人类活动为控制因素;新中国建立至今是十年到年际尺度的变化,人类活动的干预力度急速加剧。三大河口三角洲的发育演变过程,清晰地表明人类活动强力塑造了三角洲的形态,正在成为三角洲演化的主导因素。长江三角洲的发育模式基本可以概括为“三个阶段,三个尺度,北岸沙岛并岸,南岸不断推展”(图6a)。黄河三角洲演变模式为“三个阶段,三个尺度,超级叶瓣与叶瓣演替”(图6b)。珠江三角洲全新世以来的发育模式总结为“三个阶段,丘陵残丘控制,河网发育充填,逐级分汊延伸,形成复合三角洲”(图6c)。以上模式准确地揭示了气候变化和人类活动对三角洲地区陆海交互作用的影响机理,对于全球变化背景下地球系统科学的研究有着重要的科学意义,这些研究成果和演化模式为政府和社会公众认知自然规律,提高按照自然规律改造生态环境、以利于人类社会发展的意识,减少和预防自然灾害已经并将继续发挥重要作用。

4.8 总结了中国海域及邻区成矿成藏规律

通过海洋基础地质调查,在油气、水合物、热液和固体矿产等方面获得了新的发现与新的认识,首次基于高质量多道地震剖面上,通过地震地层学研究及和下扬子陆地区域地层对比,确认了南黄海北部盆地存在大套大面积分布的中、古生代地层,南黄海南部盆地和勿南沙隆起区存在可靠的下中生界和古生界海相地层的反射,有效拓展了这一海域的油气资源领域。在东海、台湾以东海域、南海北部深水区发现可能属中生界的新地层层位,在南海北部及台湾西南恒春海脊西侧增生楔地区存在典型而连续的BSR。这些新的发现,为油气和水合物资源勘查提供了翔实可靠的基础资料。对中国管辖海域38个中—新生代沉积盆地特征进行了系统分析,圈定盆地总面积约170万 km^2 ,其中油气新区、新层系分布面积达120万 km^2 ,蕴藏着丰富的油气资源。圈定水合物40个天然气水合物资源远景区,面积19.8万 km^2 ;圈定了石榴子石、金红石、锆石等重矿物资源潜力区85个,计算了其矿产品位;圈定了建筑用海砂潜力区总面积约2万 km^2 ,其资源量约

3434.3亿t;圈定了热液资源区10个,面积可达10000 km^2 。

5 结语与展望

实现1:100万海洋区域地质调查全覆盖,是中国海洋地质调查史上的一个里程碑。首次形成了基于实测数据的“一图一库一报告”,包括海洋地质地球物理系列图件3类27张,涵盖700余个数据集的海洋地质空间数据库,1套分层次分区域分图幅的调查报告。在此基础上,获得了一批原创性认识,如创新提出了“东亚洋陆汇聚带多圈层作用”和南海“弧后扩张与左旋剪切”理论模式,总结了中国东部海域“陆源条带状”和南海“多源环带状”沉积分异特点,厘定了花东海盆地层格架和沉积体系等,有关成果将推动西太平洋边缘海重大基础科学问题的研究。后续将持续深化成果总结与凝练,更加精准有效地支撑服务能源资源安全保障、自然资源综合管理和海洋国土空间规划,沿海省市经济社会发展,以及海洋地质科学研究等。

推动海洋高质量发展及生态文明建设离不开海洋基础地质调查。未来中国海洋基础地质调查工作,一方面将重点开展1:25万和1:5万海洋区域地质调查,获取高精度基础资料,成果支撑海洋生态文明、资源评价和重大工程建设。另一方面加强国际合作。中国海域存在一系列独特的、世界关注的地质科学问题,包括第四纪气候环境和海面变化、边缘海盆形成演化、台湾弧陆碰撞、南海特提斯关闭过程和东亚岩石圈热状态及物质能量交换机制等关键地学问题,通过加强国际合作,将整体提升中国海洋地质调查研究的总体水平及在世界地学界的地位。

致谢:感谢国务院参事张洪涛研究员、裴荣富院士、李廷栋院士、任纪舜院士、叶建良研究员、吴能友研究员、刘守全研究员、何起祥研究员、黄永祥研究员、戴春山研究员等对本文部分内容提出的建议!

References

- Chen Jie, Wen Ning. 2010. Geophysical Atlas of the South China Sea [M]. Beijing: Science Press (in China).
- Chen Lirong. 2008. Marine Sedimentary Mineralogy of China [M]. Beijing: China Ocean Press (in Chinese).
- 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.
- Fan Shiqing, Qin Yunshan. 1959. A preliminary study on the bottom sediments of the East China Sea and the Southern Yellow Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2: 82–85 (in Chinese with English abstract).
- Gao Jinyao. 2014. *China Offshore Ocean* [M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- He Qixiang, Zhang Mingshu. 1986. *Reef Facies Geology of Xisha, China* [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Jin Xianglong. 1992. *Marine geology of the East China Sea* [M]. Beijing: China Ocean Press.
- Li C F, Li J B, Ding W W, Franke D. 2015. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 120(3): 1377–1399.
- Li C F, Xu X, Lin J, Sun Z, Zhu J, Yao Y J, Zhao X X, Liu Q S, Kulhanek D K, Wang J. 2014. Age 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 Guangxue. 2005. *Genesis of the Submarine Sedimentary Environment in the East China Sea Area* [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 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 Jiabiao. 2008. *Regional Geology of the East China Sea* [M]. Beijing: China Ocean Press.
- 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 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 model [J]. *Geology*, 35(2):179–182.
- Liu Guangding, Chen Jie. 2007. Construct China seas adhering to idea of scientific development [J]. *Progress in Geophysics*, 3: 661–666 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guangding. 1993. *Geological and geophysical Atlas of China Seas and Adjacent Regions* [M]. Beijing: Science Press.
- Liu Minhou, Wu Shiyong, Wang Yongjie. 1987. *Late Quaternary Deposits in the Yellow Sea* [M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- Liu Shenshu. 2001. *Geophysical Exploration of Hydrocarbon Gas in the East China Sea* [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Liu Zhaoshu, Zhao Huanting, Fan Shiqing. 2002. *Geology of South China Sea* [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Liu Zhaoshu. 1988. *Geological structure and continental margin expansion of South China Sea* [M]. Beijing: Science Press.
- Qin Yunshan, Liao Xiangui. 1962. A Preliminary Study on the Sedimentation of the Bohai Bay [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 22: 199–207 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong, Zhao Songling. 1987. *Geology of the East China Sea* [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Qin Yunshan. 1963. A Preliminary Study on the topography and sedimentary types of the shelf sea in China [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1: 73–87 (in Chinese with English abstract).
- Qin Yunshan. 1985. *Marine Geology of the Bohai Sea* [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 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.
- Wang Chenghou. 1995. *Sedimentary geochemistry of the East China Sea* [M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- Wang Ying. 1964. The Shell Coast Ridges And The Old Coastlines Of the West Coast Of The Pohai Bay [J]. *Journal of Nanjing University*, 3: 74–90+112–114 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shengxiong, Qiu Yan, Zhu Benduo. 2013. *Geological and geophysical atlas of South China Sea and its adjacent areas (1: 2000000)* [M]. Tianjin: China Navigation Publications Press.
- Yang Wenda, Cui Zhengke, Zhang Yi. 2001. *Geology and Mineral Resources of the East China Sea* [M]. Beijing: China Ocean Press.
- Yang Zigeng. 2004. *Marine Geology* [M]. Jinan: Shandong Education Press.
- Yao Bochu, Qiu Yan, Wu Nengyou. 1999. *Geological Structure and Cenozoic Sedimentation in the Western South China Sea* [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Zhang Guowei, Li Sanzhong. 2017. *West Pacific and North Indian*

- Ocean seafloor and their ocean-continent connection zones: evolution and debates [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 91(06): 2283-2301(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongtao, Zhang Xunhua, Wen Zhenhe, Lan Xianhong. 2011. Map Series of Geology-- Geophysics of East China Sea and Adjacent Areas [M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- Zhang Xunhua, Zhang Zhixun, Lan Xianhong, Li Rihui. 2013. Regional Geology of the South Yellow Sea [M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- 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).
- Zheng Zhizhong, Zheng Shouyi. 1960. The planktonic foraminifera of the Yellow sea and the East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 3: 125-152, 218-229 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈洁, 温宁. 2010. 南海地球物理图集 [M]. 北京: 科学出版社.
- 陈丽蓉. 2008. 中国海沉积矿物学 [M]. 北京: 海洋出版社.
- 范时清, 秦蕴珊. 1959. 中国东海和黄海南部底质的初步研究 [J]. *海洋与湖沼*(02): 82-85.
- 高金耀, 刘保华. 2014. 中国近海海洋—海洋地球物理 [M]. 北京: 海洋出版社.
- 何起祥, 张明书. 1986. 中国西沙礁相地质 [M]. 北京: 科学出版社.
- 金翔龙. 1992. 东海海洋地质 [M]. 北京: 海洋出版社.
- 李广雪. 2005. 中国东部海域海底沉积环境成因研究 [M]. 北京: 科学出版社.
- 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. 东海区域地质 [M]. 北京: 海洋出版社.
- 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.
- 刘光鼎, 陈洁. 2007. 坚持科学发展观建设中国海 [J]. *地球物理学进展*, 3: 661-666.
- 刘光鼎. 1993. 中国海区及邻域地质地球物理图集 [M]. 北京: 科学出版社.
- 刘敏厚, 吴世迎, 王永吉. 1987. 黄海晚第四纪沉积 [M]. 北京: 海洋出版社.
- 刘申叔. 2001. 东海油气地球物理勘探 [M]. 北京: 地质出版社.
- 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清. 2002. 南海地质 [M]. 北京: 科学出版社.
- 刘昭蜀. 1988. 南海地质构造与陆缘扩张 [M]. 北京: 科学出版社.
- 秦蕴珊, 廖先贵. 1962. 渤海湾海底沉积作用的初步探讨 [J]. *海洋与湖沼*, 2: 199-207.
- 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 赵松龄. 1987. 东海地质 [M]. 北京: 科学出版社.
- 秦蕴珊. 1963. 中国陆棚海的地形及沉积类型的初步研究 [J]. *海洋与湖沼*, (1): 71-85.
- 秦蕴珊. 1985. 渤海地质 [M]. 北京: 科学出版社.
- 王成厚. 1995. 东海海底沉积地球化学 [M]. 北京: 海洋出版社.
- 王颖. 1964. 渤海湾西部贝壳堤与古海岸线问题 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*(03): 424-440, 462-464.
- 杨胜雄, 邱燕, 朱本铎. 2013. 南海及邻域地质—地球物理系列图(1: 2000000) [M]. 天津: 中国航海图书出版社.
- 杨文达, 崔征科, 张昇. 2001. 东海地质与矿产 [M]. 北京: 海洋出版社.
- 杨子庚. 2004. 海洋地质学 [M]. 济南: 山东教育出版社.
- 姚伯初, 邱燕, 吴能友. 1999. 南海西部海域地质构造特征和新生代沉积 [M]. 北京: 地质出版社.
- 张国伟, 李三忠. 2017. 西太平洋—北印度洋及其洋陆过渡带: 古今演变与论争 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 37(4): 1-17.
- 张洪涛, 张训华, 温珍河, 蓝先洪. 2011. 中国东部海区及邻域地质地球物理系列图 [M]. 北京: 海洋出版社.
- 张训华, 张志珣, 蓝先洪, 李日辉. 2013. 南黄海区域地质 [M]. 北京: 海洋出版社.
- 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.
- 郑执中, 郑守仪. 1960. 黄海和东海的浮游有孔虫 [J]. *海洋与湖沼*, 3: 125-152, 218-229.