



## 中国-东盟海区及邻域表层沉积物类型研究现状与展望

王中波, 田浩正, 武宗荟, 王保军, 王 洋, 褚宏宪, 温珍河, 李 杰, 张训华

### Research status and prospect of surface sediment types in the China-ASEAN seas and adjacent areas

WANG Zhongbo, TIAN Haozheng, WU Zonghui, WANG Baojun, WANG Yang, CHU Hongxian, WEN Zhenhe, LI Jie, and ZHANG Xunhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023050802>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 中国海区及邻域立体地貌图的设计与制作实践

The three-dimensional geomorphologic map of China Seas and adjacent regions: design and practice

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 1

#### 海洋沉积物中金属依赖型甲烷厌氧氧化作用研究进展及展望

Research progress and prospects of metal-dependent anaerobic methane oxidation in marine sediments

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 58

#### 中国东部陆架海锋面的时空变化及其对细颗粒沉积物输运和沉积的影响

Temporal and spatial variations of oceanic fronts and their impact on transportation and deposition of fine-grained sediments in the East China Shelf Seas

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 25

#### 南海北部陆坡神狐海域沉积物失稳类型探讨

SEDIMENT FAILURES IN THE SHENHU AREA, NORTHERN CONTINENTAL SLOPE OF THE SOUTH CHINA SEA

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(5): 184

#### 砂质海底沉积物压缩波速与物理参数关系试验研究

Experimental study on the relation between compressional wave velocity and physical properties of sandy sediments

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 222

#### 海南岛东南浅海表层沉积物粒度特征及沉积环境

Grain size distribution of surface sediments in the area off southeast Hainan Island and its implications for environmental interpretation

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 64



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王中波, 田浩正, 武宗荟, 等. 中国-东盟海区及邻域表层沉积物类型研究现状与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(3): 49-60.

WANG Zhongbo, TIAN Haozheng, WU Zonghui, et al. Research status and prospect of surface sediment types in the China-ASEAN seas and adjacent areas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(3): 49-60.

# 中国-东盟海区及邻域表层沉积物类型研究现状与展望

王中波<sup>1,2</sup>, 田浩正<sup>1</sup>, 武宗荟<sup>1</sup>, 王保军<sup>2,3</sup>, 王洋<sup>4</sup>, 褚宏宪<sup>5</sup>, 温珍河<sup>2,3</sup>, 李杰<sup>2,3</sup>, 张训华<sup>2,3</sup>

1. 海洋灾害预警与防护广东省重点实验室, 汕头大学理学院, 汕头 515063

2. 崂山实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

4. 中国地质调查局海口海洋调查中心, 海口 570100

5. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264004

**摘要:** 表层沉积物类型图是海洋地质系列图的主要图件之一, 可直观反映出海底沉积物的分布特征和变化规律。中国-东盟海区及邻域海底沉积物类型调查和研究程度差异明显, 中国海域调查程度较高, 底质数据详细可靠, 马六甲海峡和印度尼西亚西部海区相对较好, 而西太平洋和印度洋北部大部分地区资料较为缺乏。该海域表层沉积物主要是陆源碎屑沉积物、生物源-陆源碎屑沉积物、深海沉积物、生物源沉积物和火山源沉积物, 综合已有资料划分为三个沉积区。东亚大陆边缘海沉积区以陆源碎屑沉积物为主, 西太平洋大陆坡沉积区以陆源碎屑沉积物和生物源-陆源碎屑沉积物为主, 西太平洋和印度洋北部远洋沉积区以内源成因沉积物为主。影响该区海底沉积物分布的主要因素是沉积物物源、地形、水动力环境以及构造活动等。中国-东盟海区及邻域表层沉积物类型图的编制可为深入理解不同地质和气候背景下太平洋和印度洋的沉积物分布及规律提供依据。

**关键词:** 中国-东盟海区; 海底沉积物; 沉积物类型; 研究现状; 展望

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023050802

## Research status and prospect of surface sediment types in the China-ASEAN seas and adjacent areas

WANG Zhongbo<sup>1,2</sup>, TIAN Haozheng<sup>1</sup>, WU Zonghui<sup>1</sup>, WANG Baojun<sup>2,3</sup>, WANG Yang<sup>4</sup>, CHU Hongxian<sup>5</sup>, WEN Zhenhe<sup>2,3</sup>, LI Jie<sup>2,3</sup>,

ZHANG Xunhua<sup>2,3</sup>

1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Disaster Prediction and Prevention, Institute of Marine Sciences, Shantou University, Shantou 515063, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

4. Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 570100, China

5. Yantai center of Coastal Geology, China Geological Survey, Yantai 264004, China

**Abstract:** The map of surface sediment types is one of the main components of marine geological series maps, which is used to describe the distribution characteristics and variation patterns of seafloor sediments. There are significant differences in the investigation and research levels of seafloor sediment types in the China-ASEAN seas and its adjacent regions. The investigation level in Chinese seas is relatively high, and the bottom data is detailed and reliable. The Malacca Strait and the western Indonesian sea areas are relatively well-investigated, while most of the data in the western Pacific and northern Indian Ocean are lacking. The surface sediments in those areas are mainly composed of terrigenous clastic sediments, biogenic-terrigenous clastic sediments, deep-sea sediments, biogenic sediments, and volcanogenic sediments, which are divided into three sedimentary areas based on the present data. The sedimentary area of the East Asian continental margin sea is dominated by terrigenous clastic sediments, while the sedimentary area of the western Pacific continental slope is dominated by terrigenous clastic sediments and biogenic-terrigenous clastic sediments. The pelagic sedimentary area of the western Pacific and northern Indian Ocean is significantly dominated by endogenic sediments. The main factors affecting the distribution of seafloor sediments in the areas are sediment sources, topography, hydrodynamic environment, and tectonic activity. The compilation of the map of surface sediment types in the China-ASEAN seas

资助项目: 中国-东盟海上合作基金 (121201005000151110); 国家自然科学基金“晚第四纪长江和黄河物质在东海外陆架的沉积记录及其对环境变化的响应”(41876059); 中国地质调查局项目 (DD20190377, DD20230415, DD20211553, DD20190236)

作者简介: 王中波 (1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋沉积与环境研究, E-mail: zhwang@stu.edu.cn

收稿日期: 2023-05-08; 改回日期: 2023-05-23. 周立君编辑

and adjacent areas helps us to understand the distribution and patterns of sediment in the Pacific and Indian Oceans under different geological and climatic backgrounds.

**Key words:** China-ASEAN seas; surface sediments; sediment type; current research; prospect

海底表层沉积物类型可以直观地反映出沉积物的粒度、成分组成及沉积深度等,通过其粒度特征揭示沉积物搬运、沉积和再悬浮过程,用于判别沉积物成因的沉积环境、水动力强弱及搬运能力等<sup>[1-6]</sup>。通常,以海洋沉积物类型图形式来对比和研究不同区域的海底沉积物,其是海洋地质系列图的基础图件。

近年来,随着中国政府“一带一路”战略的提出,中国与东盟开展了越来越多的合作,其中包括2015年开始的中国和东盟周边海域的海洋地质研究工作,即中国-东盟海上合作基金项目(2015—2019),主要目的是编制相关海域的系列地质图件,沉积物类型图是其中之一。本文将基于中国-东盟及周边海域陆源入海碎屑物质通量和沉积物类型的调查研究现状分析,根据地质构造和地形地貌特征,对中国-东盟海域海底沉积物分布进行沉积分区,并提出研究展望。

## 1 地质背景

中国和东盟周边海域是泛指中国和东盟各国相邻的海域,主要包括中国东海南部和南海全部、太平洋西部及菲律宾海、马来西亚与菲律宾之间的苏禄海和苏拉威西海、缅甸与马来西亚之间的安达曼海、印度尼西亚周边的爪哇海和弗洛勒斯海、班达海、马鲁古海、阿拉弗拉海部分等,覆盖面积约 $2.4 \times 10^7 \text{ km}^2$ (图1)。

东海是西太平洋典型的开放型边缘海,由中国大陆和中国台湾岛以及朝鲜半岛、日本九州岛、琉球群岛等围绕,是世界上最宽阔、最平缓的陆架海之一。其东北部通过对马海峡与日本海相通,西南部通过台湾海峡与南海相连。东海陆架每年接纳长江和黄河携带的大量陆源碎屑物质,使其成为我国东部大陆边缘主要的陆源沉积汇。第四纪冰期

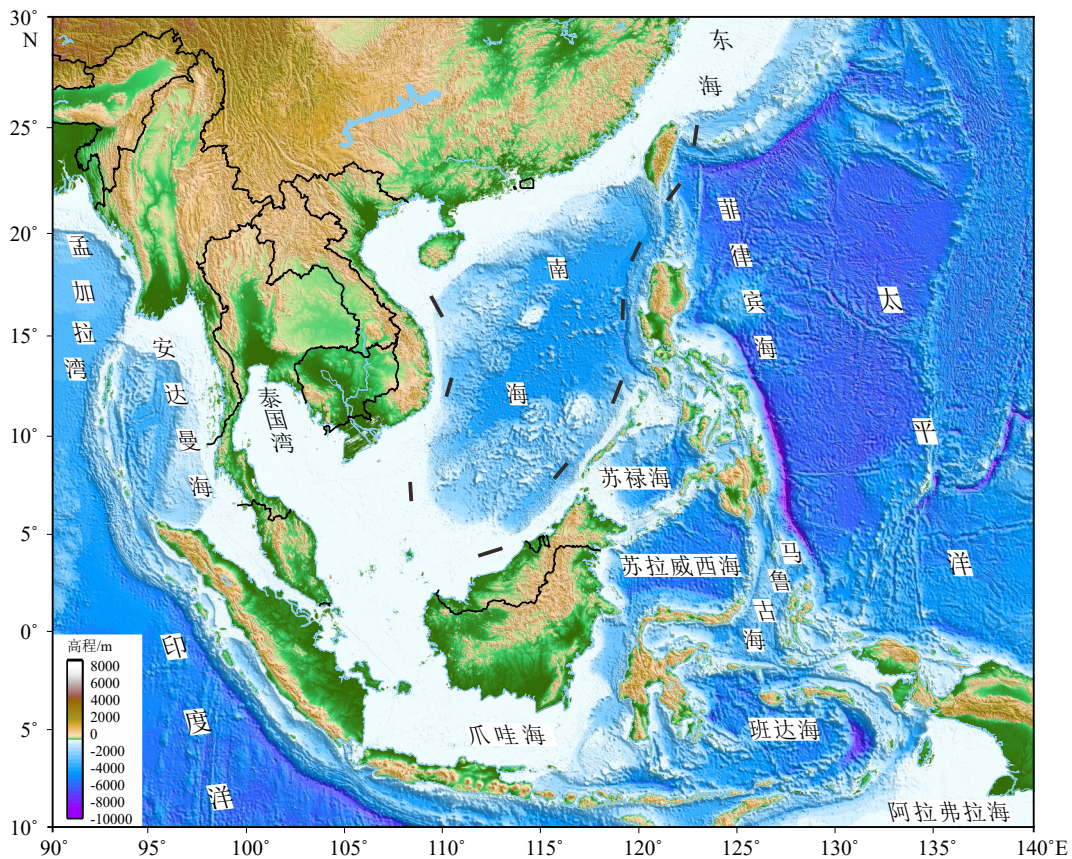


图1 中国-东盟海区及邻域地势图

Fig.1 Chorography of China-ASEAN seas and adjacent areas

和间冰期旋回中季风气候、海平面变化和海洋环流控制陆源沉积物的入海通量和陆架沉积体系的发育过程。末次冰盛期, 东海陆架大部分暴露成陆, 随后海平面上升, 在太平洋潮流的强烈作用下, 沉积物被多次改造, 形成目前广泛分布的砂质沉积和泥质沉积, 是特征的海侵体系域和高位体系域地层<sup>[7]</sup>。冲绳海槽位于东海陆架与琉球岛弧之间, 是一个狭长带状弧形盆地, 大部分地区水深超过 1 000 m, 接受来自中国大陆和陆架的陆源碎屑物质沉积。另外海槽中断裂发育, 火山和岩浆活动活跃<sup>[8-9]</sup>。

南海是西太平洋最大的边缘海, 处在欧亚板块、印度板块、澳大利亚板块和太平洋板块相互作用的交接处<sup>[10]</sup>, 决定了其沉积物具有鲜明的区域性特点, 来源多样, 既有湄公河、红河及珠江等河流携带的大量陆源碎屑物质, 又有特征的海底火山物质, 也有深海区大量的自生物质。此外, 由于其处于季风强烈作用地带, 具有特征的海洋环流, 随季节变化的沿岸流与上升流交相作用, 与周边海域存在的诸多水道贯通形成物质交换, 因此其沉积物的形成极其复杂, 沉积物类型多样。

菲律宾海处在太平洋西北边缘, 发育有典型的沟-弧-盆体系<sup>[11]</sup>, 菲律宾海沟、琉球海沟、马里亚纳海沟及伊豆-小笠原海沟等呈链状分布, 九州-帕劳海脊和马里亚纳岛弧呈南北分布, 海盆包括西菲律宾海盆、帕里西维拉海盆及四国海盆等<sup>[12]</sup>。菲律宾海板块由三大块体组成, 包括西菲律宾块体、四国-帕里西维斯块体和伊豆-博宁-马里亚纳块体。西菲律宾块体进一步划分为西菲律宾海盆、大东岭盆、帕劳海盆、花东海盆和吕宋岛弧。西菲律宾海盆水深多介于 5 000~6 000 m, 研究表明其 27~15 Ma 发生慢速扩张, 形成了海盆的轴部深谷<sup>[13-14]</sup>, 帕劳海盆水深则较浅, 海底覆盖巨厚远洋沉积物, 海盆洋壳年龄较老<sup>[15]</sup>。

孟加拉湾是世界上最大的海湾, 毗邻东南亚和南亚大陆, 处于印度洋的东北部, 东侧是安达曼海, 是典型的半封闭海湾, 形成于亚欧大陆和印度次大陆碰撞过程中, 其北侧发育了恒河三角洲沉积体<sup>[16]</sup>。湾内沉积物主要来源是恒河、布拉马普特拉河及戈达瓦里河等携带陆源碎屑物质, 在频发的浊流作用下搬运沉降, 形成孟加拉深海扇<sup>[17]</sup>。

安达曼海是典型的半封闭边缘海, 分布在安达曼群岛、尼科巴群岛和马来半岛之间, 地形复杂, 北部是伊洛瓦底陆架, 东南部分布莫塔马海底峡谷, 东部是马来半岛陆架, 西部是安达曼海中央海槽和苏门答腊陆架盆地, 对外通过格雷特海峡和十度海

峡、马六甲海峡分别和孟加拉湾与南海进行水体交换<sup>[18-19]</sup>。该区沉积物来源主要是北部的伊洛瓦底江和萨尔温江等河流携带的陆源碎屑物质, 多年平均入海泥沙通量约 600 Mt<sup>[20]</sup>, 其海洋环流主要受印度季风驱动。

苏禄海处于南海的南侧, 菲律宾群岛的西侧, 是菲律宾的最大内海, 呈矩形被加里曼丹、菲律宾群岛、巴拉望和苏禄群岛封闭, 北部是巴拉望陆架, 西南部是沙巴陆架, 面积约  $3.5 \times 10^5$  km<sup>2</sup>, 最大深度 5 580 m, 通过浅水海峡连接周边的南海、苏拉威西海和太平洋, 而东部通过在民都洛和班乃深水海峡对外联通, 同时接受周边岛屿河流携带的陆源物质沉积<sup>[21-22]</sup>, 主要有塞加马河、基纳巴唐岸河、拉克布河、苏古特河等, 多数河流短而流急, 岸边开阔, 多河口湾。苏禄海底被卡加延脊分为西北部苏禄海盆和东南苏禄海盆, 西南部海盆水深平均 4 000 m, 而西北部海盆水深相对较浅, 平均 1 800 m。

苏拉威西海位于苏禄海南部, 二者以苏禄群岛为界, 东部是桑义赫群岛, 南边是苏拉威西群岛四大半岛之一的米纳哈萨半岛, 西边是加里曼丹岛, 南北长 675 km, 东西长 840 km, 面积大约  $4.2 \times 10^5$  km<sup>2</sup>, 大部分水深在 2 000 m 以深, 最大水深超过 6 000 m, 通过西南部麦卡锡海峡与爪哇海联通。苏拉威西海是太平洋水体进入印度洋的重要通道之一, 其表层洋流较复杂, 表层水来源于北赤道暖流, 向南在吕宋岛南部海域形成的棉兰老涡流, 其分支进入苏拉威西海, 形成苏拉威西海涡流。该涡流具有明显的季节性特征, 春秋季节活动性较强, 而冬季活动范围明显缩小, 形成小型逆时针涡流, 苏拉威西海涡流的强弱变化对生物源沉积物的形成和分布具有重要的影响<sup>[23]</sup>。

爪哇海是分布在巽他陆架上的一个浅海, 面积约  $3.1 \times 10^5$  km<sup>2</sup>, 水深分布于 40~100 m, 位于加里曼丹岛和爪哇岛之间, 西边是苏门答腊岛, 东边是苏拉威西岛, 分别通过马六甲海峡、巽他海峡和卡里马塔海峡与西部的安达曼海、南部印度洋及北部的南海连通, 在东边通过麦卡锡海峡与苏拉威西海连通<sup>[24-25]</sup>。由于陆架水浅特点, 爪哇海水团混合显著, 其主要驱动力是季风<sup>[26]</sup>。该区位于印度尼西亚俯冲带, 印度-澳大利亚板块向欧亚板块俯冲<sup>[27]</sup>, 导致大量火山和地震出现, 爪哇岛上有超过 100 多座火山, 因此爪哇海海底沉积物明显受到火山物质影响。南爪哇流和印度尼西亚表层流是区域内的主要海洋环流, 前者低盐高温, 后者携带淡水向西进入印度洋<sup>[28]</sup>。

班达海位于南太平洋的西部,面积约 $47 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,平均深度3000 m,分别与弗洛勒斯海、萨武海、帝汶海、阿拉弗拉海及塞兰海等连通。珊瑚岛海脊将班达海分为南、北班达海盆,其中南班达海盆被阿比火山等系列岛弧分为南班达海和韦塔海盆,后者是班达海的最深部分,深度超过7000 m。

阿拉弗拉海位于印度洋东部,处于新几内亚岛和澳大利亚之间,北面是班达海和塞兰海,是一个典型陆架海,位于阿拉弗拉陆架,南北宽约560 km,东西长约1280 km,呈东西方向延伸,面积约 $104 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,大部分水深超过180 m,西北部的阿鲁海槽最深,可达3680 m,向西延伸至爪哇海沟。阿拉弗拉海与东南边的帝汶海是连接印度洋和太平洋的重要海域,对全球海洋环流和气候变化起到关键作用,部分周围岛屿河流携带入海的陆源物质对全球海洋沉积物贡献较大<sup>[29]</sup>。

泰国湾位于南海巽他陆架的北部,被泰国、柬埔寨和马来西亚陆地环绕,水深较浅,最深处在80 m以深,由陆地向海逐渐变深,面积约 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,受季风影响,湾内环流呈季节性变化,主要入海河流包括湄南河、邦巴功河及拉塞河等,多年平均入海泥沙约 $6.3 \times 10^6 \text{ t}$ ,是该湾的主要陆源碎屑沉积物物源。此外,由于泰国湾内地形坡度较低,河流携带的陆源物质基本全部沉积在湾内<sup>[30]</sup>。

## 2 调查和研究现状

中国-东盟诸海区由于处于不同的地理位置、构造单元、洋流范围等,因此其沉积物的物质来源、成因及分布各具特点。

### 2.1 中国-东盟及周边海域陆源入海碎屑物质通量分析

东南亚地区风化作用强烈,是世界上河流剥蚀速率最高的地区,提供了全球70%的悬浮泥沙入海通量<sup>[31-34]</sup>。中国和东盟海域及周边入海河流携带的陆源沉积物来源于不同的构造单元、地层组以及气候环境,入海后经历各种沿岸流、表层及底层环流搬运和动力分异过程。从陆架到深海的沉积过程包括不同沉积速率转换、半深海对流和浊流沉积等作用。

其中,河流沉积物在海岸带区的搬运与沉积是理解沉积物在海区分布的首要问题<sup>[35]</sup>。南海北部是相对宽阔的近海大陆架,地形平坦,坡度很小。珠江和红河带来的大量陆源碎屑沉积物通过海流

等作用广泛地沉积在南海<sup>[36]</sup>。台湾岛周边河流的流域面积尽管很小,但降水丰富,剥蚀速率高,每年向海洋输送大量悬浮沉积物<sup>[37]</sup>,甚至长江的碎屑物质都能够通过穿越台湾海峡的沿岸流搬运至南海沉积下来<sup>[35]</sup>。Unverricht等通过分析湄公河水下三角洲和邻近陆架海区悬浮沉积物的沉降及分布,发现潮流控制沉积物的搬运和沉积,沉积物主要是砂质粉砂和黏土质粉砂,南海侧沉积物分选性差,且比泰国湾侧沉积物的粒径粗<sup>[38-39]</sup>。此外,湄公河水下三角洲浅部地层研究并未发现湄公河物质在三角洲地区的稳定或快速堆积,而是陆源和陆架源的混合沉积物<sup>[39]</sup>。高分辨率地层分析揭示出冰期旋回中分别发育海岸平原、河流、滨海和陆架沉积,并在中陆架全新世沉积物中发现越南中部物源特征<sup>[40]</sup>。湄公河口及周边陆架地区沉积动力研究发现,洪水季节湄公河三角洲沉积向陆架展布,而枯水季节河口和陆架地区冲淤基本平衡,但湄公河三角洲西部靠近泰国湾地区则在波浪和潮流等强水动力作用下侵蚀明显,部分细粒物质被沿岸流携带进入泰国湾<sup>[41-42]</sup>。

吕宋岛形成于晚始新世到晚渐新世期间的造山运动,在晚渐新世到早中新世期间陆核大幅抬升,同时发生火山活动和沉积地层的褶皱和断裂作用,相关构造运动持续到全新世<sup>[14]</sup>。该岛属于热带气候,兼之火山和构造活动活跃,这些因素直接导致岛上河流域化学风化作用剧烈。河流沉积物物源特征研究表明,沉积物黏土矿物组合以蒙脱石为主,平均含量超过85%,其次是高岭石、绿泥石和极少量的伊利石,反映了吕宋岛大量出露的玄武-安山质火山岩及沉积岩在强烈构造活动作用下,在亚热带-热带东亚季风驱动下,快速风化,经河流搬运入海<sup>[34]</sup>。

此外,近年来随着高分辨率多波束、地震测量及无损钻探等技术手段的综合应用,深水沉积物的搬运和沉降等方面的研究得以发展。南海东北部东沙群岛附近的水下斜坡发现了分布广泛的沙波沉积,其分别由东沙水道、台湾水道和澎湖水道的海底浊流形成。表层沉积物主要是含钙的灰色黏土质粉砂,沙波沉积主要是灰色砂、钙质砂和黏土质粉砂<sup>[43]</sup>。

### 2.2 中国-东盟及周边海域沉积物类型调查与研究现状

总体来看,中国-东盟海区及邻域海底沉积物类型调查和研究程度差异巨大,东海、南海及周边海域调查程度相对较高,底质数据详细可靠;马六甲

海峡和印度尼西亚西部海区相对较好; 而西太平洋和印度洋北部大部分地区资料较为缺乏。

### 2.2.1 中国边缘海表层沉积物类型分布特征

目前, 随着近几十年来中国海域 1: 100 万和 1: 25 万比例尺海洋区域地质调查及各专项调查工作的开展和完成, 在中国东海、南海及其周边海域实现了 1: 100 万比例尺地质调查的全面覆盖, 基于实测的高精度地质数据编制了一系列的海洋地质和地球物理系列图件, 其中海底沉积物类型图是重要的图件之一, 并据此编写了相关著作, 如《东海地质》(秦蕴珊等, 1987), 《东海海洋地质》(金翔龙, 1992), 《渤海、黄海、东海海洋图集》(李全兴, 1992), 《中国海区及邻域地质地球物理特征》(刘光鼎, 1992), 《中国海洋地理》(王颖, 1996), 《中国近海地质》(许东禹等, 1997), 《南海地质》(刘昭蜀等, 2002), 《中国近海潮流沉积沙体》(刘振夏和夏东兴, 2004), 《中国东部海域海底沉积环境成因研究》(李广雪等, 2005), 《南海海洋地质地球物理图集》(2007), 《中国边缘海形成演化与资源效应》(李家彪, 2005), 《东海区域地质》(李家彪, 2008), 《东海地质与矿产》(杨文达等, 2010), 《中国东部海区及邻域地质地球物理系列图(1: 100 万)》和《中国南部海区及邻域地质地球物理系列图(1: 100 万)》(张洪涛等, 2010、2018), 《南海地质地球物理图系》(杨胜雄等, 2015), 《中国海海洋地质系列图》(吴自银和温珍河, 2019), 《中国近海海洋地质》(吴自银等, 2021) 和《渤海、黄海和东海沉积物类型图》(石学法等, 2021) 等, 这些专著详细地阐述了中国管辖海区及邻域沉积物类型及分布规律。

上述调查和研究显示, 中国边缘海东海、南海的沉积物以陆源碎屑沉积物为主, 深海沉积物为辅。因此, 东海和南海海区的沉积物分类调查和研究基本采用以沉积物结构为主, 辅以物质成分-成因综合分类命名的分类原则, 应用碎屑沉积物分类方法<sup>[44]</sup>和深海沉积物分类方法(海洋调查规范, GB/T12763.8-2007), 按照物源组分和沉积物结构组成将沉积物划分为四大类<sup>[45]</sup>。

第一类广泛分布于东海和南海陆架及陆坡等地区, 由陆源碎屑物质含量大于 70% 的碎屑沉积物组成, 其构成本区沉积物类型的主体, 分布面积最广, 几乎覆盖了整个海区的陆架、陆坡及冲绳海槽地区。按照谢帕德分类方法<sup>[44]</sup>, 陆源碎屑沉积物类型主要划分为砾质砂、砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂、黏土质砂、黏土质粉砂、粉砂质黏土、砂-粉砂-黏土等 12 类。

第二类是以陆源碎屑为主, 钙质生物和硅质生物等生物碎屑含量  $\geq 10\%$  且  $< 30\%$  的生物源—陆源碎屑沉积物, 主要分布于南海周边陆坡及海盆部分海域, 按照生物碎屑种类和沉积物粒度组合、陆源碎屑含量的变化可细分为钙质生物砂、含钙质生物粉砂质砂、钙质生物粉砂质砂等亚类型。

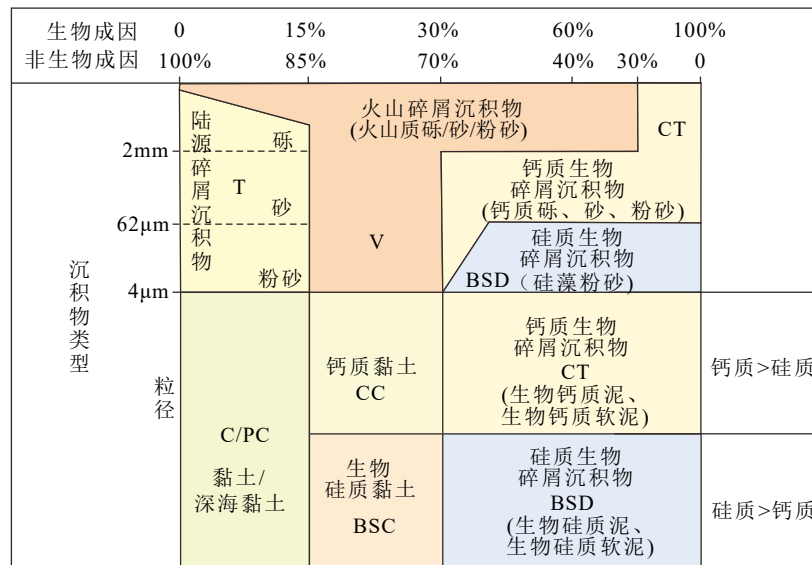
第三类是深海沉积物, 主要分布在南海中央海盆及周边水深超过 3000 m 的海域, 以深海黏土、含钙质黏土、钙质黏土等为主, 如深海黏土广泛分布于南海中东部中央海盆和台湾岛东面陆坡、吕宋岛西北面东部下陆坡、南海中央海盆边缘以及中部中央海盆区。

第四类是生物源沉积物, 零星分布在南海诸群岛周边, 如在曾母暗沙浅滩, 西沙群岛、黄岩岛等周围海域, 以有孔虫泥、生物礁砾和贝壳珊瑚碎屑砾质砂等为主。

整体来看, 南海底质沉积物分布明显呈现出环陆地带性、深度地带性<sup>[46]</sup>, 即由陆地向海盆中心方向, 陆源碎屑粒度逐渐变细, 沉积速率降低, 沉积厚度变薄。沉积物类型对应为碎屑沉积物、碎屑-生物沉积物和深海沉积物。同时, 南海沉积物分布还表现出明显的深度地带性, 水深 0~200 m 主要是陆源碎屑沉积区, 200~3000 m 为明显的陆源碎屑-钙质沉积区, 3000~4000 m 是放射虫沉积区, 而 4000 m 以下则主要是深海黏土和硅质软泥分布区<sup>[45]</sup>。而东海陆架表层沉积物类型以潮流沉积为主, 外陆架至冲绳海槽沉积以陆源碎屑物质为主向生物碎屑为主过渡<sup>[5]</sup>。

### 2.2.2 东盟及周边海域表层沉积物类型分布特征

由于工作程度的差异, 东盟及周边海域的海底沉积物类型调查范围呈现零星、局部分布。美国地质调查局编制的“1: 1700 0000 环太平洋地区地质图”是目前相对系统的地质图件, 其沉积物类型图范围包括了东盟周边海域, 通过划分陆源碎屑沉积物、生物源沉积物和深海沉积物等成因类型揭示出其在近岸、陆架、海盆等海区的分布特征<sup>[47]</sup>, 但比例尺小, 且近岸及陆架等区域的陆源碎屑沉积物的结构类型变化无法识别。该图根据沉积物主要组分进行分类, 进而按照沉积物粒径进行细分(图 2)<sup>[47]</sup>。决定不同沉积物类型间的界线主要是依据地形和碳酸盐补偿深度的区域水深变化、海洋学和生物学水柱现象以及海底沉积作用控制的地质现象。其中, 非生物成因沉积物划分为粗粒级( $\geq 4 \mu\text{m}$ )陆源碎屑沉积物(砾、砂、粉砂等)和细粒级沉积物( $< 4 \mu\text{m}$ )(碎屑黏土和深海黏土)。由于其采用显

图2 环太平洋海域表层沉积物分类图解<sup>[47]</sup>Fig.2 Classification diagram of the surface sediment for Circum-Pacific Region<sup>[47]</sup>

显微镜薄片鉴定法无法区分陆源或自生黏土,深海黏土也划归为该类。生物成因沉积物包括自生钙质生物碎屑沉积物(钙质砾/砂/粉砂、钙质泥和钙质软泥)和硅质生物碎屑沉积物(硅藻粉砂、生物硅质泥和生物硅质软泥)。生物钙质泥包括生物钙质黏土和生物钙质粉砂。钙质黏土和生物硅质黏土分类用以明确生物和非生物物质混合的海域。

此外,东亚东南亚地学计划协调委员会(Coordinating Committee for Geoscience Programs in East and Southeast Asia, CCOP)不同时期的技术报告也对该区部分海域开展了沉积物类型图编制和相关分析,如马六甲海峡、爪哇海和南海南部等海域,但区域相对较小。调查区的主要类型为陆源碎屑沉积物,其分类也相对简单,按照沉积物粒度分为砾、砂、砂-泥、泥,以及基岩和珊瑚<sup>[48-49]</sup>。

更多的研究则是对不同区域海底表层沉积物粒度、地球化学、微体古生物等组成开展物源、成因和环境等综合分析,间接地讨论了沉积物类型的分布特征及规律。

孟加拉湾沉积过程研究主要集中在西部印度海岸带滨岸浅海区域,通过沉积物的粒度、地球化学、黏土矿物等研究沉积物的物质来源以及晚第四纪沉积过程等<sup>[50-53]</sup>,但针对沉积物类型特征的研究相对较少。

安达曼海东南部表层沉积物类型组成包括砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂、砂质泥等,以粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂为主,沉积物的平均粒径变化范围为1.9~7.8  $\Phi$ ,平均值为5.7  $\Phi$ ,表现为西部和西南部粒径偏细,而东部海域粒径变化较大<sup>[54]</sup>。

苏禄海陆架和海底平原的沉积物包括钙质砂和钙质砾,主要来自周边的珊瑚礁、有孔虫壳体、火山及陆源碎屑物质<sup>[55-56]</sup>,其中碳酸钙组成超过80%。沉积物的粒径随水深的增加而变细,同时生物碳酸钙来源逐步由底栖有孔虫为主变为浮游有孔虫为主,陆坡沉积物主要是有孔虫粉砂和有孔虫黏土,其中碳酸钙含量为50%~70%。浊流沉积物主要出现在深海平原,以有孔虫碎屑、火山和来自东部陆架的陆源碎屑为主。苏禄海底的第四纪沉积物厚度最高可达4000 m<sup>[57]</sup>。表层沉积物中CaCO<sub>3</sub>含量变化并未呈现明显的线性特征,比如其在500 m水深含量为60%,而在4500 m水深含量降低为40%,因此苏禄海的碳酸钙补充深度(Carbonate Compensation Depth, CCD)不能简单的与南海及太平洋进行对比。其主要原因可能是由于深水盆地相对高的水温,也与南海和苏禄海不同的陆源碎屑物质沉积量有关,其导致生物钙的浓度发生稀释<sup>[58]</sup>。

菲律宾海沉积物主要是来自周边岛弧的火山物质,以及东亚地区的风尘物质<sup>[57-58]</sup>。菲律宾海吕宋岛附近、西菲律宾海、帕劳海脊及帕里西维拉海盆表层沉积物石英物源示踪研究揭示,风尘沉积物主要来自塔克拉玛干沙漠,陆源沉积物主要来自周边岛屿和海底火山物质,二者的区别在于是否经历化学风化和搬运沉降作用<sup>[59]</sup>。东菲律宾海帕里西维拉海盆水深处于CCD界面以下,碳酸钙含量较低,表层沉积物主要是深海黏土和少量硅质软泥,沉积速率比东海、南海等海区低,物源主要是当地及附近的海脊火山物质的蚀变,由于北赤道流和深海沟脊阻隔,又远离陆地和岛屿,陆源物质贡献极

少<sup>[60-61]</sup>。西菲律宾表层沉积物碎屑矿物分析揭示, 沉积物类型是半远洋-远洋沉积, 来自菲律宾岛弧的火山风化碎屑贡献较少, 菲律宾海沟以东以钙质和硅质生物壳体为主, 也有少量火山碎屑, 中部沉积物以附近中酸性岩浆事件的长石、石英和火山玻璃为主, 而帛琉-九州海岭以西沉积物组成复杂, 既有岩浆事件产物<sup>[62]</sup>, 也有火山喷发的火山渣<sup>[63]</sup>。

苏拉威西海底沉积物主要是半深海的粉砂和黏土, 粉砂主要组成是火山岩屑和火山玻璃, 黏土组成主要是蒙脱石, 更新世地层中有薄层火山灰出现, 其碳酸钙含量极低, 只有 3%~4%, 说明其当时沉积深度在 CCD 界面以下, 新生代沉积速率为 33~60 m/Ma<sup>[64-65]</sup>。马哈坎河携带陆源碎屑进入麦卡锡海峡, 是其主要物源之一<sup>[66]</sup>。

爪哇海表层沉积具有的明显特点是碳酸钙礁在陆源碎屑沉积物大量存在的环境中广泛分布, 比较典型的是位于爪哇岛北部的帕劳千岛群岛碳酸盐礁群, 长约 40 km, 呈 NNE-SSW 分布, 在地形上隔出东部阿朱那坳陷和西部巽他坳陷。千岛群岛珊瑚礁沉积物主要是砂和砾, 而充填物质主要是珊瑚、贝壳、有孔虫和藻类壳体, 即钙质砂和砾。钙质泥主要出现在潟湖, 位于砂质黏土和礁滩之间。礁滩是钙质砂和砾的主要源区, 在波浪作用下破碎堆积<sup>[67-68]</sup>, 根据沉积物组成将之划分为三个沉积分区, 分别是珊瑚礁顶部的珊瑚-软体动物沉积区、珊瑚-藻类沉积区和陆架沉积区。沿岸流将陆源碎屑沉积物的细组分黏土及部分粉砂搬运到该区, 形成珊瑚礁混合沉积<sup>[69]</sup>。

苏门答腊岛和爪哇岛南部东印度洋近海表层沉积物是均匀的含有孔虫泥黄色-黑灰色黏土, 表层不同深度有火山灰薄层, 柱状样分析表明全新世以来, 粗粒级砂组分明降低, 而中全新世以来黏土粒级显著增加<sup>[70]</sup>。

泰国湾内沉积物类型包括砂、粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂等, 其中, 粉砂分布最广泛, 砂质粉砂主要分布在中北部和南部, 西南近岸区域分布粉砂质砂<sup>[71]</sup>。大片细粒沉积物沉积在湄南河、邦巴功河及拉塞河等河口地区, 即泰国湾的顶部<sup>[71-72]</sup>, 其中, 湄南河水下三角洲沉积物相对粗, 而由于泰国中部和南部并没有大型河流入海, 因此南部细粒沉积物分布可能是来自泰国湾外部物质<sup>[73]</sup>。此外, 表层沉积物的元素地球化学和矿物学分析揭示出, 沉积物分布主要受控泰国湾沿岸流<sup>[74]</sup>。黏土矿物物源研究也发现泰国湾表层沉积物形成三个物源沉积区, 湾顶沉积物主要来自湄南河等河流携带碎屑物质, 中

部沉积区主要是受到湄公河和南海细颗粒物影响<sup>[41]</sup>, 而西南部沿岸沉积区的物源比较复杂, 部分细粒沉积物或来自湄公河再悬浮物质<sup>[30]</sup>。

班达海表层沉积物的研究相对薄弱, 已有的研究多基于 1984—1985 年荷兰海洋研究理事会和印度尼西亚科学研究所联合开展的班达海科学考察, 主要开展了沉积物的微体古生物组合、地球化学组成以及周围海区地形地貌研究。此外, 还开展海底地层分布、重力场特征以及周围火山作用等调查。班达海表层沉积物分布的明显特点是新构造运动引起的浊流沉积影响明显, 火山斜坡地区 1000 m 深度以上的粗粒沉积物主要是火山碎屑, 而 1000 m 以深粗粒沉积物主要是浊流沉积; 上陆坡粗粒沉积物与碳酸钙含量有明显的相关性<sup>[75]</sup>。调查还发现放射虫在表层沉积物中的含量随水深发生明显变化, 其含量在 0~950 m 最低, 在 950~4800 m 最高, 低于 4800 m 深度又异常低, 这种分布可能受控于碎屑沉积物的空间分布<sup>[76]</sup>。班达海北部靠近斯兰岛表层沉积物的孢粉组合分析揭示出河流入海携带的陆源碎屑物质对其含量具有绝对影响, 而不是传统认为的上升流的影响<sup>[77]</sup>。Ganssen 等通过两个柱状沉积物样品的碳酸钙含量、有孔虫和放射虫组合、碳氧同位素曲线综合分析, 认为 10.5 ka 以来班达海地区开始变湿润, 在约 9.2 ka 上升流开始加强, 而 2.7 ka 季风开始变弱<sup>[78]</sup>。

### 3 中国-东盟海域海底沉积物类型分布特征与研究展望

综上所述, 基于沉积物区域分布特征、调查程度和现有资料, 根据地质构造和地形地貌特征, 可将中国-东盟海域划分为 3 个沉积区(图 3a), 进而进行沉积物类型分布及特征分析(图 3b)。

(1) 东亚大陆边缘海沉积区: 沉积物分类采用以沉积物结构为主, 辅以物质成分-成因综合分类命名的分类原则。按照主要物源组分, 沉积物类型可以进一步划分为陆架和陆坡地区的陆源碎屑沉积物、南海周边陆坡及海盆部分海域的生物源-陆源碎屑沉积物、中央海盆深海沉积物、南海诸群岛周边零星分布的生物源沉积物。

(2) 西太平洋大陆坡沉积区: 该区以陆源碎屑沉积物的重力沉积物为主, 以内源沉积物为辅, 主要区域为南海东南部陆坡, 包括马来西亚、印度尼西亚和菲律宾群岛周边水深低于 3000 m 海域。除爪哇海和马六甲海峡等陆架浅海主要为陆源碎屑



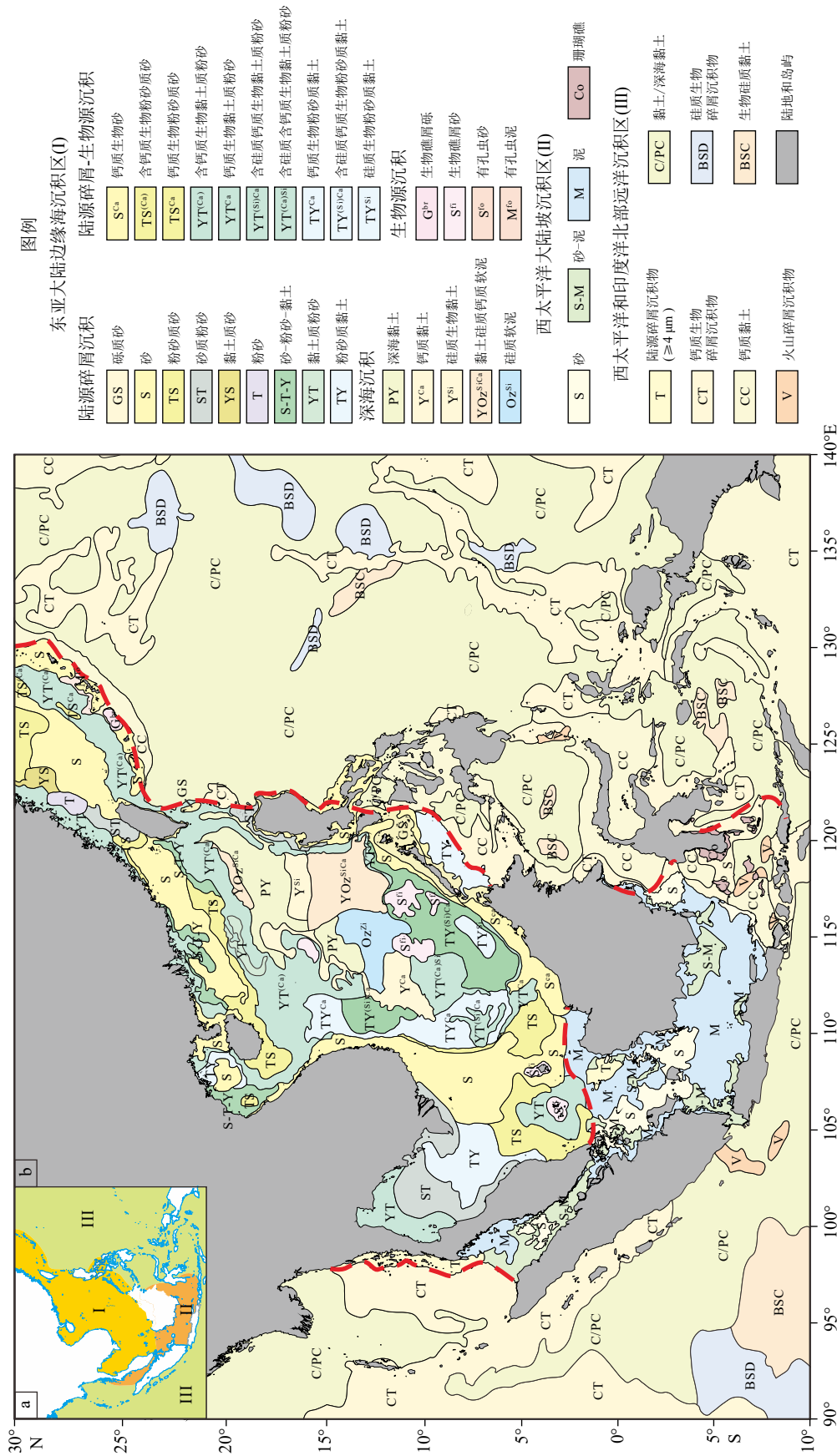


图 3 中国-东盟海区及邻域表层沉积物类型分布图  
 a. 分区概图, b. 沉积物类型图。  
 Fig.3 Surface sediment type map of China-ASEAN seas and adjacent areas  
 a: schematic map of the sedimentary areas, b: sediment type map.

沉积物外,其他大部分海域多以生物源-陆源碎屑沉积物为主,包括钙质生物砂、钙质生物砾、钙质生物粉砂和钙质生物黏土。其次,陆源碎屑沉积物主要分布在巽他陆架南部、爪哇海陆架大部以及吕宋岛东部沿岸海域。此外,部分海区有少量火山源和生物源沉积物分布。

(3)西太平洋和印度洋北部远洋沉积区:该区主要以内源成因沉积为主,沉积物组成是以钙质生物、硅质生物和深海黏土三个端元为主的深海沉积物。此外,还有零星的火山沉积物和生物硅质黏土分布。

其中,东亚大陆边缘海沉积区和西太平洋陆坡沉积区海底表层沉积物调查和研究相对充分,但存在沉积物类型划分不一致;而西太平洋和印度洋北部远洋沉积区由于水深较深、远离陆地和岛屿,而调查程度薄弱。因此,未来可结合现有各国调查和研究资料,依托“中国-东盟海上合作基金”等国际间合作项目,基于统一的沉积物分类方法,开展全海域沉积物类型图的编制,这将为深入理解不同地质和气候背景下太平洋和印度洋的沉积物分布及规律提供直接依据。

## 4 结论

(1)中国-东盟海区及邻域表层沉积物主要由五种类型组成,分别是陆源碎屑沉积物、生物源-陆源碎屑沉积物、深海沉积物、生物源沉积物和火山源沉积物。其中,陆源碎屑沉积物主要分布在大陆及岛屿周边的陆架和陆坡地区;生物源-陆源碎屑沉积物主要分布在陆架与深海之间的过渡海区,尤其是碳酸钙补偿深度(CCD)以浅海域;深海沉积物主要分布在大洋和南海海盆;生物源沉积物分布在珊瑚岛礁周边附近生物生产力较高海域;火山源沉积物主要分布在冲绳海槽和火山岛屿周边海域。

(2)基于地质构造、地形地貌和海底沉积物类型组成,受控于调查和研究现状,根据沉积物类型分布及组合,将中国-东盟海区及邻域划分为三个沉积区。东亚大陆边缘海沉积区包括南海和东海部分海区,以陆源碎屑沉积物为主;西太平洋大陆坡沉积区以陆源碎屑沉积物的重力沉积物为主,同时有部分内源沉积物出现,即生物源-陆源碎屑沉积物;西太平洋和印度洋北部远洋沉积区以内源成因沉积为主,组成是以钙质生物、硅质生物和深海黏土三个端元为主的深海沉积物。影响海底沉积物分布的主要因素有沉积物物源、地形、水动力环境

以及构造活动等。

未来中国-东盟海上合作基金等项目的实施,可结合现有各国调查和研究资料,基于统一的沉积物分类方法,开展全海域沉积物类型图的编制。

**致谢:**感谢何起祥先生对本文中国-东盟海区及邻域海底沉积物分区方案的指导和帮助。

## 参考文献 (References)

- [1] 程鹏,高抒.北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净运输趋势[J].海洋与湖沼,2000,31(6):604-615.[CHENG Peng, GAO Shu. Net sediment transport patterns over the northwestern Yellow Sea, based upon grain size trend analysis [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31 (6): 604-615.]
- [2] 乔淑卿,石学法,王国庆,等.渤海底质沉积物粒度特征及运输趋势探讨[J].海洋学报,2010,32(4):139-147.[QIAO Shuqing, SHI Xuefa, WANG Guoqing, et al. Discussion on grain-size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the Bohai Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32 (4): 139-147.]
- [3] 王中波,杨守业,张志珣,等.东海外陆架晚第四纪若干沉积学问题的研究现状与展望[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(3):1-10.[WANG Zhongbo, YANG Shouye, ZHANG Zhixun, et al. A review of the Late Quaternary sedimentological studies on the outer shelf of the East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32 (3): 1-10.]
- [4] 王中波,杨守业,张志珣,等.东海陆架中北部沉积物粒度特征及其沉积环境[J].海洋与湖沼,2012,43(6):1039-1049.[WANG Zhongbo, YANG Shouye, ZHANG Zhixun, et al. The grain size compositions of the surface sediments in the East China Sea: indication for sedimentary environments [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43 (6): 1039-1049.]
- [5] 王中波,陆凯,温珍河,等.中国东部海域表层沉积物粒度组成及影响因素[J].地球科学,2020,45(7):2709-2721.[WANG Zhongbo, LU Kai, WEN Zhenhe, et al. Grain size compositions and their influencing factors of the surface sediments in Eastern China Seas [J]. *Earth Science*, 2020, 45 (7): 2709-2721.]
- [6] 石学法,刘焱光,乔淑卿,等.渤海、黄海和东海沉积物类型图[M].北京:科学出版社,2021.[SHI Xuefa, LIU Yanguang, QIAO Shuqing, et al. *Sediment Type Map of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea* [M]. Beijing: Science Press, 2021.]
- [7] Chen Z Y, Stanley D J. Quaternary subsidence and river channel migration in the Yangtze delta plain, Eastern China [J]. *Journal of Coastal Research*, 1995, 11 (3): 927-945.
- [8] 李乃胜.冲绳海槽的地质构造属性[J].海洋与湖沼,1990,21(6):536-543.[LI Naisheng. On the geologic nature of Okinawa Trough [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1990, 21 (6): 536-543.]
- [9] Li N S. On tectonic problems of the Okinawa Trough [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2001, 19 (3): 255-264.

- [10] 孙卫东, 林秋婷, 张丽鹏, 等. 跳出南海看南海—新特提斯洋闭合与南海的形成演化[J]. 岩石学报, 2018, 34(12): 3467-3478. [SUN Weidong, LIN Qiuting, ZHANG Lipeng, et al. The Formation of the South China Sea resulted from the closure of the Neo-Tethys: a perspective from regional geology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(12): 3467-3478.]
- [11] 张国良, 王帅, 张吉, 等. 西太平洋若干沟-弧-盆体系及板内岩浆成因研究进展[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1220-1234. [ZHANG Guoliang, WANG Shuai, ZHANG Ji, et al. Proceedings of subduction system and intra-oceanic volcanism of the Western Pacific [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(6): 1220-1234.]
- [12] 李常珍, 李乃胜, 林美华. 菲律宾海的地势特征[J]. 海洋科学, 2000, 24(6): 47-51. [LI Changzhen, LI Naisheng, LIN Meihua. Terrain features of the Philippine Sea [J]. *Marine Sciences*, 2000, 24(6): 47-51.]
- [13] Okino K, Fujioka K. 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*, 2003, 108(B1): 2040.
- [14] 吴时国, 范建柯, 董冬冬. 论菲律宾海板块大地构造分区[J]. 地质科学, 2013, 48(3): 677-692. [WU Shiguo, FAN Jianke, DONG Dongdong. Discussion on the tectonic division of the Philippine Sea plate [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2013, 48(3): 677-692.]
- [15] Mrozowski C L, Lewis S D, Hayes D E. Complexities in the tectonic evolution of the west Philippine Basin [J]. *Tectonophysics*, 1982, 82(1-2): 1-24.
- [16] Curry J R. The Bengal depositional system: from rift to orogeny [J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 59-69.
- [17] Curry J R. Sediment volume and mass beneath the Bay of Bengal [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 125(1-4): 371-383.
- [18] Varkey M J, Murty V S N, Suryanarayana A. Physical oceanography of the Bay of Bengal and Andaman Sea [J]. *Oceanography and Marine Biology:An Annual Review*, 1996, 34: 1-70.
- [19] Suwannathatsa S, Wongwiset P, Vongvisessomjai S, et al. Phytoplankton tracking by oceanic model and satellite data in the Bay of Bengal and Andaman Sea [J]. *APCBEE Procedia*, 2012, 2: 183-189.
- [20] Robinson R A J, Bird M I, Oo N W, et al. The Irrawaddy River sediment flux to the Indian Ocean: the original nineteenth-century data revisited [J]. *The Journal of Geology*, 2007, 115(6): 629-640.
- [21] Tessler Z D, Gordon A L, Pratt L J, et al. Transport and dynamics of the Panay sill overflow in the Philippine seas [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(12): 2679-2695.
- [22] Ferrera C M, Jacinto G S, Chen C T A, et al. Carbonate parameters in high and low productivity areas of the Sulu Sea, Philippines [J]. *Marine Chemistry*, 2017, 195: 2-14.
- [23] Masumoto Y, Kagimoto T, Yoshida M, et al. Intraseasonal eddies in the Sulawesi Sea simulated in an ocean general circulation model [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(8): 1631-1634.
- [24] Nagara G A, Adi Sasongko N, Olakunle O J. Introduction to Java Sea[M]. Stavanger: University of Stavanger, 2007.
- [25] Poliakova A, Zonneveld K A F, Kwiatkowski C, et al. Marine environment, vegetation and land use changes during the Late Holocene in South Kalimantan and East Java reconstructed based on pollen and organic-walled dinoflagellate cysts analysis [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2017, 238: 105-121.
- [26] Wyrski K. Physical oceanography of the southeast Asian water[R]. La Jolla: Scripps Institution of Oceanography, 1961.
- [27] Handley H K, Blichert-Toft J, Gertisser R, et al. Insights from Pb and O isotopes into along-arc variations in subduction inputs and crustal assimilation for volcanic rocks in Java, Sunda arc, Indonesia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 139: 205-226.
- [28] Sprintall J, Wijffels S, Molcard R, et al. Direct evidence of the south Java current system in Ombai Strait [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2010, 50(2): 140-156.
- [29] Alongi D M, da Silva M, Wasson R J, et al. Sediment discharge and export of fluvial carbon and nutrients into the Arafura and Timor Seas: a regional synthesis [J]. *Marine Geology*, 2013, 343: 146-158.
- [30] Shi X F, Liu S F, Fang X S, et al. Distribution of clay minerals in surface sediments of the western Gulf of Thailand: sources and transport patterns [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 105: 390-398.
- [31] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers [J]. *The Journal of Geology*, 1992, 100(5): 525-544.
- [32] Milliman J D, Farnsworth K L, Albertin C S. Flux and fate of fluvial sediments leaving large islands in the East Indies [J]. *Journal of Sea Research*, 1999, 41(1-2): 97-107.
- [33] Summerfield M A, Hulton N J. Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins [J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 1994, 99(B7): 13871-13883.
- [34] Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(11): 2195-2205.
- [35] Liu Z F, Statterger K. South China Sea fluvial sediments: an introduction [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 507-508.
- [36] Liu J G, Xiang R, Chen M H, et al. Influence of the Kuroshio current intrusion on depositional environment in the Northern South China Sea: evidence from surface sediment records [J]. *Marine Geology*, 2011, 285(1-4): 59-68.
- [37] Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis[M]. New York: Cambridge University Press, 2011.
- [38] Unverricht D, Nguyen T C, Heinrich C, et al. Suspended sediment dynamics during the inter-monsoon season in the subaqueous Mekong Delta and adjacent shelf, southern Vietnam [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 509-519.
- [39] Xue Z, Liu J P, DeMaster D, et al. Sedimentary processes on the Mekong subaqueous delta: clay mineral and geochemical analysis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 520-528.
- [40] Tan M T, Dung L V, Bach L D, et al. Pliocene-Quaternary evolution of the continental shelf of central Vietnam based on high resolution seismic data [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 529-539.
- [41] Hein H, Hein B, Pohlmann T. Recent sediment dynamics in the region of Mekong water influence [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 183-194.

- [42] Liu J P, DeMaster D J, Nittrouer C A, et al. A seismic study of the Mekong subaqueous delta: proximal versus distal sediment accumulation [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 147: 197-212.
- [43] Kuang Z G, Zhong G F, Wang L L, et al. Channel-related sediment waves on the eastern slope offshore Dongsha Islands, northern South China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 540-551.
- [44] Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24(3): 151-158.
- [45] 王中波, 密蓓蓓. 中国南部海域海底沉积物类型图[M]//吴自银, 温珍河. 中国海海洋地质系列图. 北京: 科学出版社, 2019. [WANG Zhongbo, MI Beibe. Submarine sediment type map of Southern China Seas[M]//WU Ziyin, WEN Zhenhe. Map Series of Marine Geology of China Seas. Beijing: Science Press, 2019.]
- [46] 刘锡清. 中国边缘海的沉积物分区[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(3): 1-11. [LIU Xiqing. Sedimentary division in marginal seas of China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16(3): 1-11.]
- [47] Kenneth J D, José C, Johnson R W, et al. Geological Map of the Circum-Pacific Region (1: 17 000 000, Pacific Basin Sheet)[Z]. U. S. Geological Survey, 2000.
- [48] Emery. Bottom sediment map of Malacca Strait. In: Economic Commission for Asia and the Far East Committee for Co-ordination of Joint Prospecting for Mineral Resources in Asian Offshore Areas. Technical Bulletin[Z]. 1971, 4: 149-152.
- [49] Emery. Distribution pattern of sediments on the continental shelves of western Indonesia. In: Economic Commission for Asia and the Far East Committee for Co-ordination of Joint Prospecting for Mineral Resources in Asian Offshore Areas. Technical Bulletin[Z]. 1969, 2: 79-82.
- [50] Roonwal G S, Glasby G P, Chugh R. Mineralogy and geochemistry of surface sediments from the Bengal Fan, Indian Ocean [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1997, 15(1): 33-41.
- [51] 李景瑞, 刘升发, 冯秀丽, 等. 孟加拉湾中部表层沉积物稀土元素特征及其物源指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(4): 41-50. [LI Jingrui, LIU Shengfa, FENG Xiuli, et al. Rare earth element geochemistry of surface sediments in mid-Bengal Bay and implications for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(4): 41-50.]
- [52] Li J R, Liu S F, Shi X F, et al. Distributions of clay minerals in surface sediments of the Middle Bay of Bengal: source and transport pattern [J]. *Continental Shelf Research*, 2017, 145: 59-67.
- [53] 孙兴全, 刘升发, 李景瑞, 等. 孟加拉湾南部表层沉积物稀土元素组成及其物源指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(2): 80-89. [SUN Xingquan, LIU Shengfa, LI Jingrui, et al. Rare earth element composition of the surface sediments from the South Bay of Bengal and its implications for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(2): 80-89.]
- [54] 曹鹏, 石学法, 李巍然, 等. 安达曼海东南部海域表层沉积物稀土元素特征及其物源指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(5): 57-67. [CAO Peng, SHI Xuefa, LI Weiran, et al. Rare earth element geochemistry of surface sediments in southeastern Andaman Sea and implications for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(5): 57-67.]
- [55] Exon N F, Haake F W, Hartmann M, et al. Morphology, water characteristics and sedimentation in the silled Sulu Sea, southeast Asia [J]. *Marine Geology*, 1981, 39(3-4): 165-195.
- [56] Calvert S E, Pedersen T F, Thunell R C. Geochemistry of the surface sediments of the Sulu and South China Seas [J]. *Marine Geology*, 1993, 114(3-4): 207-231.
- [57] Wan S M, Yu Z J, Clift P D, et al. History of Asian eolian input to the West Philippine Sea over the last one million years [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 326-328: 152-159.
- [58] Xu Z K, Li T G, Clift P D, et al. Quantitative estimates of Asian dust input to the western Philippine Sea in the mid-Late Quaternary and its potential significance for paleoenvironment [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(9): 3182-3196.
- [59] 朱潇, 蒋富清, 冯旭光, 等. 菲律宾海沉积物中石英的来源及其搬运方式[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(6): 1190-1202. [ZHU Xiao, JIANG Fuqing, FENG Xuguang, et al. The provenance and transportation of quartz in the Philippine Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(6): 1190-1202.]
- [60] Asahara Y, Tanaka T, Kamioka H, et al. Provenance of the north Pacific sediments and process of source material transport as derived from Rb-Sr isotopic systematics [J]. *Chemical Geology*, 1999, 158(3-4): 271-291.
- [61] Xu Z K, Li A C, Jiang F Q, et al. Geochemical character and material source of sediments in the eastern Philippine Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(6): 923-931.
- [62] Savov I P, Hickey-Vargas R, D'antonio M, et al. Petrology and geochemistry of West Philippine Basin basalts and early Palau-Kyushu Arc volcanic clasts from ODP Leg 195, Site 1201D: implications for the early history of the Izu-Bonin-Mariana arc [J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(2): 277-299.
- [63] 鄢全树, 石学法, 王昆山, 等. 西菲律宾海盆表层沉积物中的轻碎屑分区及物质来源[J]. *地质论评*, 2007, 53(6): 765-773. [YAN Quanshu, SHI Xuefa, WANG Kunshan, et al. Provinces and material provenance of light detritus in the surficial sediments from the Western Philippine Sea [J]. *Geological Review*, 2007, 53(6): 765-773.]
- [64] Smith R B, Betzler C, Brass G W, et al. Depositional history of the Celebes Sea from ODP Sites 767 and 770 [J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(11): 2061-2064.
- [65] Nichols G, Hall R. History of the Celebes Sea Basin based on its stratigraphic and sedimentological record [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1999, 17(1-2): 47-59.
- [66] Dekov V M, Van Put A, Eisma D, et al. Single particle analysis of suspended matter in the Makasar Strait and Flores Sea with particular reference to tin-bearing particles [J]. *Journal of Sea Research*, 1999, 41(1-2): 35-53.
- [67] Friedman G M. Case histories of coexisting reefs and terrigenous sediments: the Gulf of Elat (Red Sea), Java Sea, and Neogene Basin of the Negev, Israel [J]. *Developments in Sedimentology*, 1988, 42: 77-97.
- [68] Mount J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments [J]. *Geology*, 1984, 12(7): 432-435.
- [69] Xu Y H, Wang L, Yin X J, et al. The influence of the Sunda Strait

- opening on paleoenvironmental changes in the eastern Indian Ocean [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 146: 402-411.
- [70] 张杨硕, 乔淑卿, 石学法, 等. 泰国湾底质沉积物输运趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(1): 86-92. [ZHANG Yangshuo, QIAO Shuqing, SHI Xuefa, et al. Moving trend of bottom sediments in Gulf of Thailand [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(1): 86-92.]
- [71] Emery K O, Niino H. Sediments of the Gulf of Thailand and adjacent continental shelf [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1963, 74(5): 541-554.
- [72] Meksumpun S, Meksumpun C, Hoshika A, et al. Stable carbon and nitrogen isotope ratios of sediment in the gulf of Thailand: evidence for understanding of marine environment [J]. *Continental Shelf Research*, 2005, 25(15): 1905-1915.
- [73] Srisuksawad K, Pomtepkasemsan B, Nouchpramool S, et al. Radionuclide activities, geochemistry, and accumulation rates of sediments in the Gulf of Thailand [J]. *Continental Shelf Research*, 1997, 17(8): 925-965.
- [74] Liu S F, Zhang H, Zhu A M, et al. Distribution of rare earth elements in surface sediments of the western Gulf of Thailand: constraints from sedimentology and mineralogy [J]. *Quaternary International*, 2019, 527: 52-63.
- [75] Troelstra S R, Klaver G J, Kleijne A, et al. Actinomicropalaeontology and sediment distribution of three transects across the Banda Arc, Indonesia (Snellius-II expedition, Cruise G5) [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1989, 24(4): 477-489.
- [76] van de Paverd P J, Bjørklund K R. Frequency distribution of polycystine radiolarians in surface sediments of the Banda Sea, eastern Indonesia [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1989, 24(4): 511-521.
- [77] van Waveren I M. Palynofacies analysis of surface sediments from the northeastern Banda Sea (Indonesia) [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1989, 24(4): 501-509.
- [78] Kroon D, Ganssen G. Northern Indian Ocean upwelling cells and the stable isotope composition of living planktonic foraminifers [J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1989, 36(8): 1219-1236.