

doi: 10.12029/gc20200511

梅西,李学杰,密蓓蓓,赵利,王中波,钟和贤,杨浩,黄湘通,何梦颖,熊伟,张勇. 2020. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式[J]. 中国地质, 47(5): 1447-1462.

Mei Xi, Li Xuejie, Mi Beibei, Zhao Li, Wang Zhongbo, Zhong Hexian, Yang Hao, Huang Xiangtong, He Mengying, Zhang Yong. 2020. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments[J]. Geology in China, 47(5):1447-1462(in Chinese with English abstract).

中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式

梅西¹,李学杰²,密蓓蓓¹,赵利²,王中波¹,钟和贤²,杨浩³,
黄湘通⁴,何梦颖⁵,熊伟⁶,张勇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; 3. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 4. 同济大学, 上海 210092; 5. 南京师范大学, 江苏 南京 210023; 6. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

摘要:中国海域拥有宽广的大陆架,同时还有陆坡和深海盆,有众多河流入海并输入巨量的陆源物质,沉积物记录了海陆变迁、环流变化、海平面升降、物质输送和气候变化等环境信息。沉积物的粒度特征可以反映沉积动力、物质来源和搬运距离等,可以通过沉积物粒度组成、参数及各种图解来研究沉积环境的变化。前人对中国海域表层沉积物的粒度分布特征展开了大量的研究,取得了丰富的研究成果,但这些研究多集中在某一海域或区域,缺乏对整个中国海域的表层沉积物类型的宏观系统认识。本文基于中国地质调查局“1:100万海洋区域地质调查项目”获取了中国海域4300个海底表层沉积物样品,通过沉积物粒度分析,结合前人已发表资料,对中国海域表层沉积物的沉积类型特征、物质来源和运移模式等开展了系统的研究。本文把浅海和半深海沉积物按照含砾石和不含砾石主要划分出5个和7个沉积物类型,深海沉积物主要划分了9个沉积类型,研究结果表明:中国海域表层沉积物沉积类型多样、来源复杂,主要受控于物质来源、水动力条件和地形地貌的变化,在东部海域总体呈现“大江大河-宽缓陆架-残留慢速沉积”的条带状沉积分异模式,而在南部海域呈现的是“短源性河流-多类型陆架-重力流快速沉积”的环带状沉积分异模式。本文的结果对研究中国海域沉积物的宏观分布规律提供了基础资料,对理解海洋沉积动力过程具有重要意义,同时沉积物粒度的特征对海底砂矿分布也具有指示意义。

关键词:粒度;物质来源;海底砂矿;海洋地质调查工程;中国海

中图分类号: P736.21¹ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)05-1447-16

Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments

MEI Xi¹, LI Xuejie², MI Beibei¹, ZHAO Li², WANG Zhongbo¹, ZHONG Hexian²,
YANG Hao³, HUANG Xiangtong⁴, HE Mengying⁵, XIONG Wei⁶, ZHANG Yong¹

(1. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China; 3. China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. Tongji University, Shanghai 210092, China;

收稿日期: 2020-04-26; 改回日期: 2020-07-08

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160137, DD20160138, DD20190208)资助。

作者简介: 梅西, 男, 1981年生, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋地球化学方面的研究; E-mail: meixi@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 张勇, 男, 1970年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事海洋地质学方面的研究; E-mail: qimgzy@163.com。

5. *Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China*; 6. *Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China*)

Abstract: China seas have broad continental shelf, continental slope and deep sea basin, with many rivers entering the seas and transporting a huge amount of terrigenous materials into these seas. The sediments record such environmental information as sea-land interactions, sea circulation changes, sea level change, material transport and climate change. The grain size characteristics of sediments can reflect such information as sedimentary dynamics, material sources and transport distance, and the changes of sedimentary environment can be studied through the grain size composition, parameters and various diagrams. Previous researchers have carried out lots of studies concerning the grain size distribution characteristics of China seas surface sediments, and obtained many achievements. However, most of these studies were concentrated on a certain sea area or region, lacking a macroscopic and systematic understanding of the sedimentary types in the whole sea area of China. Based on "1: 1 000 000 marine regional geological survey project" performed by China Geological Survey, the authors collected 4300 samples of surface sediments from China seas and, through the sediment grain size analysis in combination with data available, studied characteristics of sea surface sediment deposition type, material sources and migration patterns in China seas. In this paper, the shallow sea and bathyal sediments are mainly divided into 5 and 7 sediment types according to the gravel bearing and non-gravel bearing nature, and the deep-sea sediments are mainly divided into 9 sediment types. The results show that sea surface sediment deposition exhibits varied types and complicated sources, which is mainly controlled by the material sources, hydrodynamic condition and the change of landform. Generally the eastern sea areas exhibit "large rivers - broad shelf - residual slow deposition" banded sedimentary differentiation model, whereas in the sea areas of the South China Sea, there is "short source river - multi-type shelf - rapid gravity flow deposits" ring banded sedimentary differentiation model. The results obtained by the authors provide basic data for studying the macroscopic distribution of marine sediments in China seas and are of great significance for understanding the dynamic process of marine sedimentation. At the same time, the distribution characteristics of sediment grain size also have an indicative significance for sea placers distribution.

Key words: grain size; material sources; sea placers distribution; marine geological survey engineering; China seas

About the first author: MEI Xi, male, born in 1981, senior engineer, mainly engages in marine geochemistry; E-mail: meixi@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: ZHANG Yong, male, born in 1970, senior researcher, mainly engages in marine geology; E-mail: qimgzy@163.com.

Fund support: Supported by the Project of China Geological Survey (No. DD20160137, No. DD20160138, No. DD20190208).

1 引 言

沉积物粒度特征是沉积物的基本性质之一,是沉积物物源、地形地貌、水动力条件、搬运距离等综合作用的结果(Mclaren and Bowles, 1985; Gao et al., 1994; 高抒, 2001; 殷志强等, 2008; 缪卫东等, 2016; Gao et al., 2019),在沉积物粒度中包含了沉积物物源、搬运路径、气候环境等丰富信息。因而可以通过沉积物粒度组成、粒度参数及各种图解来分析影响沉积物粒度变化的环境因素,特别是沉积物所处的地形地貌、水动力条件和物源信息。

前人对中国海域表层沉积物粒度分布特征展开了大量研究,如对渤海(乔淑卿等, 2010; 王中波等, 2016;)、北黄海(王伟等, 2009; 张剑等, 2016; 方

海超等, 2019)、南黄海(王中波等, 2008; 张晓东等, 2015; 汤世凯等, 2019)、东海(刘升发等, 2009; 王中波等, 2012; 窦衍光等, 2018; 段晓勇等, 2019)、南海(邱燕等, 2008; 杨群慧等, 2013; 钟和贤等, 2013; 张晋等, 2016; 赵利等, 2016)等表层沉积物粒度组成及参数研究取得了丰富成果,但这些研究多集中在某一海域或区域,缺乏对整个中国海域的沉积类型宏观的系统认识,仅有少量研究对中国边缘海的沉积类型及沉积环境进行了探讨(刘锡清, 1990, 1996; 杨旭辉等, 2012)。此外,不同人员所开展的调查区域与所采用的分析方法存在一定的差异,如粒度的前处理以及测试方法(筛析法、沉降法、激光粒度法等)及测试精度的差异,求取沉积物粒度参数方法的差异,沉积物分类方法(Shepard与Folk分类)的

差异,沉积物粒度参数定性描述术语的差异等,造成了不同海域粒度资料很难进行统一对比与整合的情形(杨旭辉等, 2012)。

本文基于中国地质调查局“1:100万海洋区域地质调查项目”获取的中国海域4300个海底表层沉积物样品,开展沉积物粒度分析,为中国海域沉积学的研究提供基础资料;通过对粒度数据的分析,进一步了解中国海域海底沉积物的底质类型以及粒度参数受控的主要因素,并在此基础上探讨中国海域表层沉积物的分布规律和沉积分异模式。本成果为中国海洋沉积环境分析提供了基础资料,同时为研究中国海底砂矿分布提供了重要的参考数据。

2 材料与方法

2.1 样品采集

中国地质调查局1:100万海洋区域地质调查项目对整个中国管辖海域进行了全覆盖调查,本文所用的表层样品都是采用箱式或抓斗取样器取得,一共4300个样品。样品采集方法按照《1:1 000 000海洋区域地质调查规范》(DZ/T 0247-2009)执行,绝大部分样品采集时间在6—10月,样品采集的网格间距约为20 km×20 km,部分区域加密或抽稀取样,将取得样品顶部5 cm样品装入塑料袋,并标识站位和样品号,样品密封保存。其中部分站位的粒度数据已经发表(邱燕等, 2008;王中波等, 2008, 2012;杨群慧等, 2013;钟和贤等, 2013;王中波等, 2016;张剑等, 2016;赵利等, 2016)。

2.2 分析方法

粒度分析时,取适量沉积物样品,分别加入双氧水和稀盐酸进行前处理,以消除有机质和自生碳酸盐的影响,对于粒径小于2000 μm的样品,直接利用英国MALVERN公司产的Mastersizer 2000型激光粒度仪进行测试,测量范围为0.02~2000 μm,粒度分辨率为0.01 φ,重复测试的相对误差<2%。对粒径大于2000 μm的部分,采用传统的筛析法分析(1φ间隔),最后利用粒度仪自带软件的仿真程序得到完整的粒度组成。对于典型的深海沉积(水深大于3000 m),用目镜半定量鉴定分析沉积物涂片中的物质组分(生物和非生物组分,钙质生物和硅质生物组分)、非生物组分的颗粒大小(粒度结构),鉴定分析沉积物中的黏土、硅质生物、钙质生物这三

者的百分含量。

2.3 粒度参数的计算

粒度参数采用福克-沃德(Folk, 2010)提出的4种参数,分别是平均粒径(Mz)、标准偏差(σ_1)、偏态(SK_1)和峰态(K_G)。 Mz 是沉积物的主要粒度特征参数,指示了沉积物粒径频率分布的中心趋向,大小反映了沉积物的平均动能情况。标准偏差(σ_1)是沉积物粒径的分选程度,即颗粒大小的均匀性,若粒级小,主要粒级很突出,百分含量高,分选就好,标准偏差就小;反之,粒级分布范围很广,主要粒级不突出,甚至是双峰或者多峰沉积物,则分选就差,标准偏差数值就大。偏态(SK_1)是一个对沉积环境很灵敏的指标,反映沉积过程中能量的变异。峰态(K_G)是用来测量频率曲线两段的分选与曲线中央分选的比率。

计算公式如下:

$$\text{平均粒径 } Mz = (\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}) / 3 \quad (1)$$

$$\text{标准偏差 } \sigma_1 = (\phi_{84} - \phi_{16}) / 4 + (\phi_{95-1} - \phi_5) / 6.6 \quad (2)$$

$$\text{偏度 } SK_1 = (\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}) / 2 (\phi_{84} - \phi_{16}) + (\phi_5 + \phi_{95-1} - 2\phi_{50}) / 2 (\phi_{95-1} - \phi_5) \quad (3)$$

$$\text{峰度 } K_G = (\phi_{95-1} - \phi_5) / 2.44 (\phi_{75-1} - \phi_{25}) \quad (4)$$

2.4 沉积物类型命名及分类方法

2.4.1 水深小于3000 m的陆源碎屑沉积物分类方案

陆源碎屑沉积物的命名参照Folk(2010)沉积物分类方法,即按粒度含量的三角形命名方法,Folk法将含砾的沉积物和不含砾的沉积物分别进行命名(图1)。

2.4.2 水深大于3000 m的沉积物分类方案

对于大于3000 m的沉积物,目前中国使用的海洋调查规范把深海沉积物分为26种沉积物(Dean et al., 1985;中国国家标准化管理委员会, 2007),其种类繁多,混合沉积物分类不明确,每种沉积物的图形和量变指标不相同,实际使用非常困难。近些年,也有中国学者提出了自己的分类办法,如将深海沉积物细分为4类16种沉积物(张富元等, 2010)。本文采用的深海远洋沉积物分类命名方案(Berger, 1974)(表1),主要包括远洋黏土和软泥两大类10种沉积物,达到基本了解深海沉积物类型与分布的目的。远洋黏土命名规则为 CaCO_3 和硅质生物化石>1%时参加命名; CaCO_3 含量1%~10%,为含钙质黏土; CaCO_3 含量10%~30%,为钙质黏土;硅质

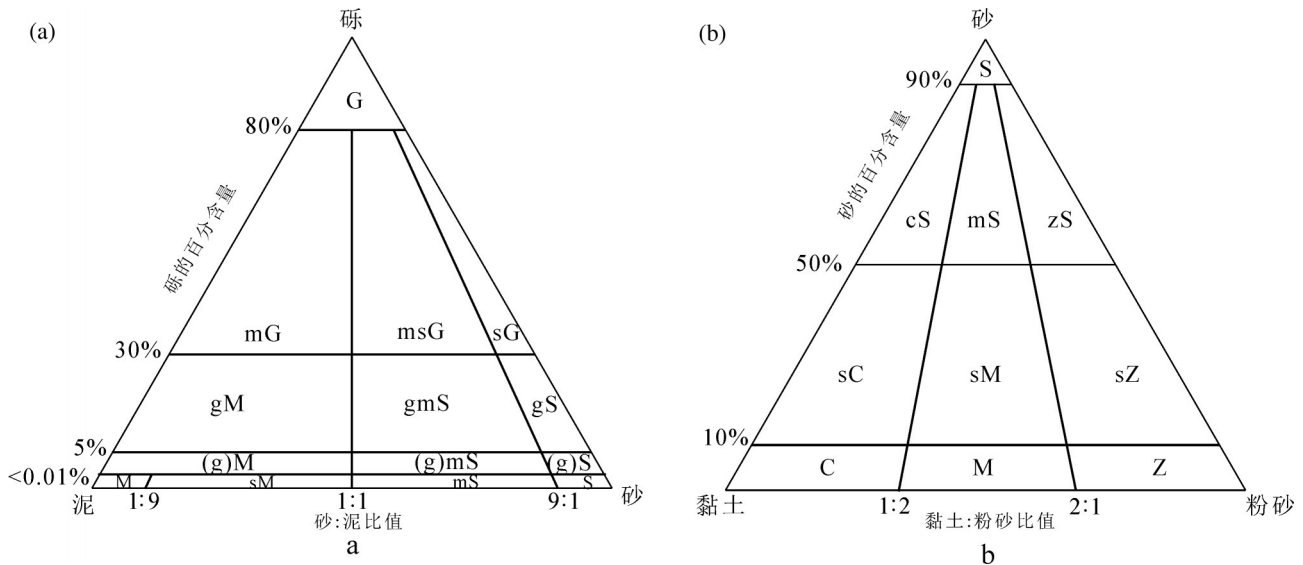


图1 沉积物三角形分类图解 (据Folk, 2010)

a—含砾碎屑沉积物的分类: G—砾; sG—砂质砾; msG—泥质砂质砾; mG—泥质砾; gS—砾质砂; gmS—砾质泥质砂; gM—砾质泥; (g)S—含砾砂; (g)mS—含砾泥质砂; (g)M—含砾泥; S—砂; mS—泥质砂; sM—砂质泥; M—泥; b—不含砾碎屑沉积物的分类: S—砂; zS—粉砂质砂; mS—泥质砂; cS—黏土质砂; sZ—砂质粉砂; sM—砂质泥; sC—砂质黏土; Z—粉砂; M—泥; C—黏土

Fig.1 Sediment triangulation diagram (after Folk, 2010)

a—Classification of gravelly clastic sediments: G—Gravel; sG—Sandy gravel; msG—Argillaceous sandy gravel; mG— Argillaceous gravel; gS—Gravelly sand; gmS —Gravelly argillaceous sand; gM— Gravelly mud; (g)S—Gravelly sand; (g)mS—Gravelly argillaceous sand; (g)M—Gravelly mud; S—Sand; ms—Argillaceous sand; sM—Sandy mud; M—Mud; b—Classification of gravel free clastic sediments: S—Sand; zS—Silty sand; mS—Argillaceous sand; cS — Clayey sand; sZ — Sandy silt; sM—Sandy mud; sC— Sandy clay; Z—Silt; M—Mud; C—Clay

表1 水深大于3000 m沉积物分类 (据Berger, 1974)
Table 1 Classification of sediments in water depth greater than 3000 m (after Berger, 1974)

CaCO ₃ 含量/%	硅质生物含量/%	沉积物名称
<1	1~10	含硅质黏土
<1	11~30	硅质黏土
<30	>30	硅质软泥
1~10	<1	含钙质黏土
1~10	1~10	含钙质含硅质黏土
1~10	11~30	含钙质硅质黏土
11~30	<1	钙质黏土
11~30	1~10	含硅质钙质黏土
11~30	11~30	硅质钙质黏土
>30%但<2/3		钙质软泥

化石含量1%~10%,为含硅质黏土;硅质化石含量10%~30%,为硅质黏土;当CaCO₃含量和硅质化石含量均可参加命名时,则采用混合命名,如CaCO₃含量5%,硅质化石4%,命名为含硅质含钙质黏土。软泥的命名规则是当沉积物中CaCO₃含量或硅质化石含量>30%时参加命名,CaCO₃含量>30%但<2/3,为

钙质软泥,CaCO₃含量<30%硅质化石含量>30%,为硅质软泥(藻软泥或放射虫软泥)。

3 结 果

3.1 沉积物类型和分布特征

根据沉积物分类命名方案,按照1:100万比例尺编制了中国海域沉积物类型图。本文将原图进行了简化,展示了主要的沉积物类型分布特征(图2),部分沉积物类型仅在非常小的区域分布,在本文中不予讨论。从图3中可以看出主要沉积物类型的分布特征如下:

3.1.1 浅海和半深海沉积(水深<3000 m)

在水深<3000 m的陆架和陆坡区域,按照Folk沉积物类型命名方法,分为含砾沉积物 and 不含砾沉积物两大类。

(1)含砾沉积物类型

中国海域内的砾石沉积物基本上分布在陆架区,主要分布的有5种:砾质砂(gS)、含砾泥((g)M)、泥质砂质砾(msG)、含砾泥质砂((g)mS)、含砾

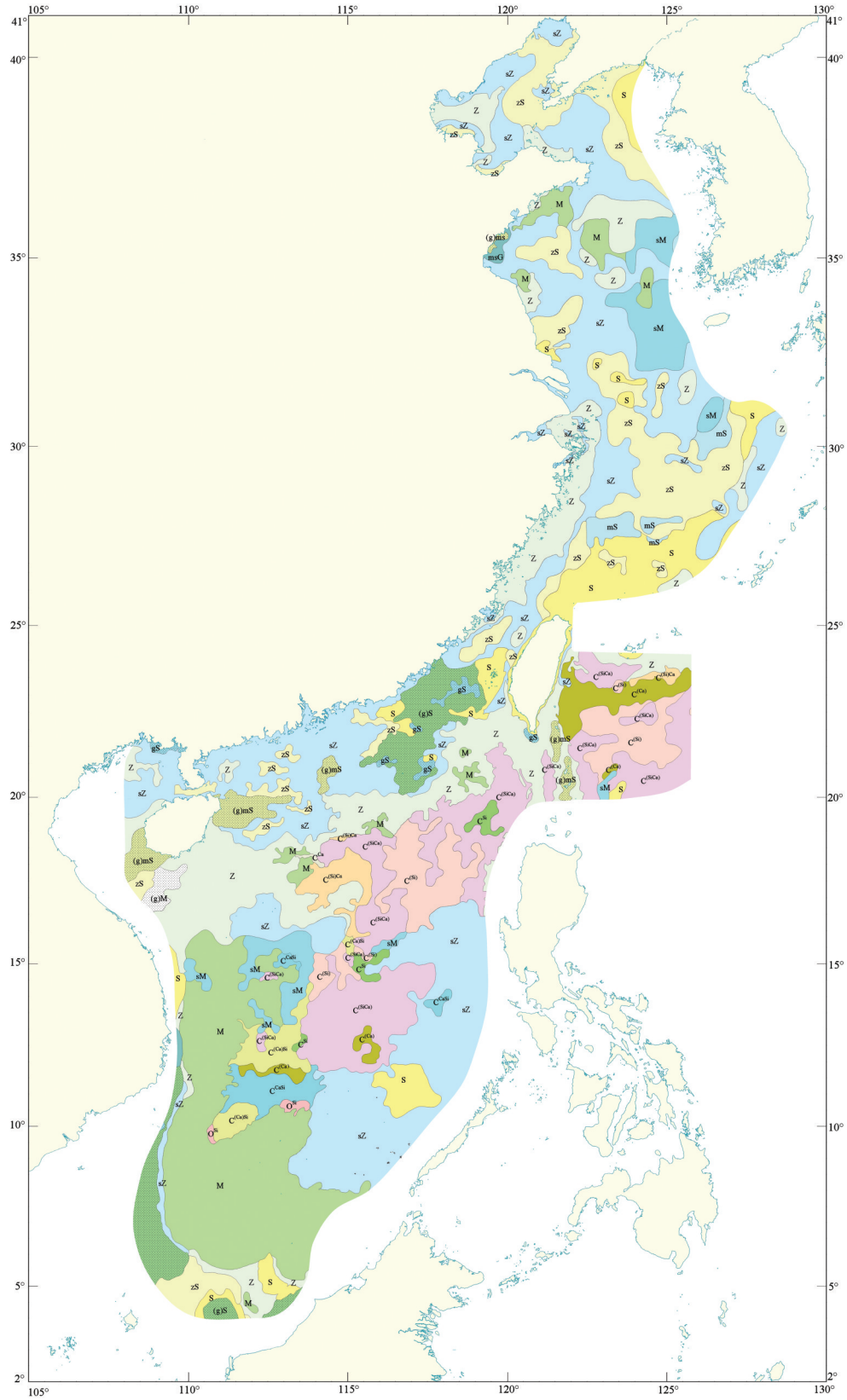


图2 沉积物类型分布图(图例见正文)
Fig.2 Sediment type distribution map(see text for legend)

<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2020, 47(5)

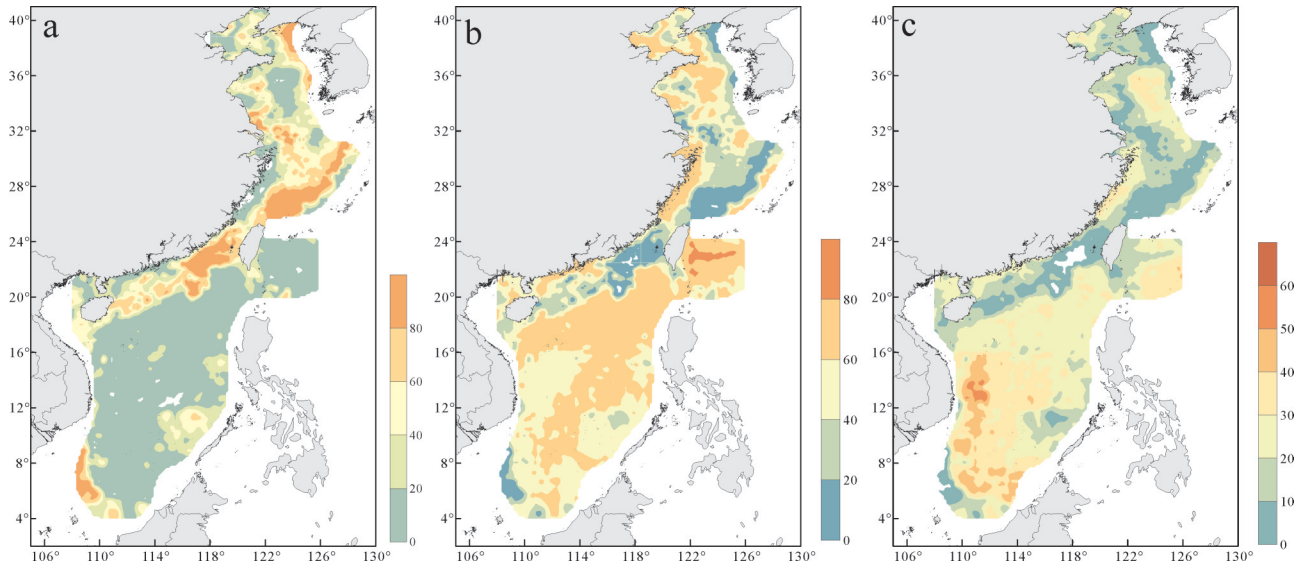


图3 表层沉积物不同粒级组分(a—砂,b—粉砂,c—黏土)百分含量分布

Fig.3 Surface sediment percentage distribution of components of different grain sizes (a—sand, b—silty sand, c—clay)

砂((g)S)。含砾沉积物集中分布在废黄河口外、台湾海峡、南海北部陆架以及巽他陆架区,另外在渤海的老铁山水道附近以及海洲湾近岸也有一定的分布。

总体来看,整个中国海域砾石含量分布规模较小,含砾石沉积物类型组合变化较大且混杂分布,没有形成大规模的沉积区。

(2) 不含砾沉积物类型

不含砾表层沉积物主要可以分成7种,分别是砂(S)、粉砂(Z)、泥质砂(mS)、粉砂质砂(zS)、砂质泥(sM)、砂质粉砂(sZ)、泥(M)。

中国海域内分布面积最广的是砂质粉砂,最集中的一块区域位于南海东南部海域,即吕宋岛和巴拉望岛的西部陆坡,其他的多分布在近岸陆架区。粉砂在中国海域的分布面积仅次于砂质粉砂,分布范围最广的在闽浙沿岸的东海内陆架内,而在南黄海泥质区,粉砂为主要组成部分,另外还有泥、砂质粉砂等多种沉积物类型组合。粉砂质砂在东部海域的分布面积明显大于南海海域,在东部海域主要集中分布于32°N以南,28°E以北的东海外陆架区;块状分布于辽东湾的西部以及渤海海峡的中部,在海洲湾中部地区、苏北浅滩区以及长江口东部海域也有一定面积的粉砂质砂分布;在近岸地区与砂质粉砂交替出现。砂主要分布于100 m等深线以东的东海外陆架区,也就是所谓的“残留砂”;北黄海中

西部以及江苏岸外的潮流沙脊区有集中分布;台湾海峡的中南部、中南半岛的东部近岸海域也有一定规模的砂沉积区。泥主要大面积集中分布于南海的西南部陆坡海域,在东部海域主要出现在山东半岛南部近岸以及南黄海中部的泥质区的小块区域。砂质泥和泥质砂主要呈零星小斑块状分布在中国海域的陆架区域,砂质泥和泥质砂这两种沉积物多伴生在一起。

3.1.2 深海沉积(水深>3000 m)

在水深>3000 m的南海海盆区域,沉积物既有陆源碎屑,又有生物源沉积。按照上述的分类原则,主要划分为以下9种类型:含钙质黏土(C^{Ca})、钙质黏土(C^{Ca})、含硅质黏土(C^{Si})、硅质黏土(C^{Si})、硅质钙质黏土(C^{SiCa})、含硅质钙质黏土(C^{SiCa})、含钙质硅质黏土(C^{CaSi})、含钙质钙质黏土(C^{CaCa})和硅质软泥(O^{Si})。其中含硅质黏土(C^{Si})和含硅质钙质黏土(C^{SiCa})分布最为广泛。

3.2 沉积物不同粒级组分分布特征

3.2.1 砾石组分

中国海域大部分站位不含砾石,即使含砾石的站位,其含量大部分也在20%以下。主要分布在以下几个区域:渤海海峡老铁山水道附近海域;辽东湾西部近岸海域;山东与江苏交界处的复洲湾内、台湾海峡西岸的福建省沿岸;南海砾石含量最高值位于南海西部陆架南部海域,主要分布于南海北部

陆架东北部和中部、台湾浅滩、东沙群岛、海南岛周围、北部湾中部、南海北部陆坡北部边缘、南沙岛坡西南部、巽他陆架北部海域,局部分布于南海西部陆坡南部、中沙群岛、南沙群岛南部、台西南岛坡、南海海盆西南部海域,其余海域极罕见。

3.2.2 砂组分

中国海域砂含量的分布(图3a)显示,中国海域的砂含量高值区从东海外陆架的大面积海域沿海岸线穿过台湾海峡至南海北部陆架,一直延伸到海南岛的东部海域。砂的含量普遍高于60%,尤其在东海外陆架的东南部海域以及台湾浅滩地区,砂含量普遍高于80%,有的区域高达100%;位于北黄海东部靠近朝鲜半岛一侧和长江口东部外海以及南海的巽他陆架北部区域,含砂量也普遍高于80%以上,但是分布面积较小。南黄海的海洲湾东部和苏北浅滩的外侧海区,渤海湾内的渤中浅滩、滦河口外近岸海域以及辽东浅滩、南海的南沙群岛的东北部海域沉积物含砂含量也较高的地区,最高含量也可达60%以上。

3.2.3 粉砂组分

中国海域粉砂含量的分布趋势(图3b)正好与砂含量分布趋势相反。整体来看,中国东部海域的粉砂含量为0~100%。含量高值区分布较为分散,主要分布在南黄海中部泥质区、闽浙沿岸泥质区和渤海湾泥质区内,大部分区域含量超过60%以上;南海的粉砂含量高值区较为集中,大部分海域粉砂含量超过40%,其中接近一半的区域粉砂含量超过60%,包括南海北部陆坡、南海西部陆坡、南沙陆坡海域,南海海盆海域以及南海北部红海湾到雷州湾沿岸陆架海域;在整个中国海域粉砂含量最高的区域位于台湾岛以东琉球岛坡南部海域以及菲律宾海盆西北部局部海域,这些区域的粉砂平均含量可高达80%以上。东海外陆架、长江口东部外海以及北黄海东部靠近朝鲜半岛一侧区域、台湾浅滩、南海北部陆架东北部以及巽他陆架北部为整个调查区粉砂含量最低的海域,大范围地区粉砂含量小于20%。

3.2.4 黏土组分

从中国海域黏土含量的分布(图3c)。可以看出,黏土含量的分布趋势与粉砂含量趋势较为一致,与砂含量的分布趋势相反。整体看来,中国东部海域粉砂含量的变化幅度较粉砂较小,介于0~

60%。黏土含量的高值区集中分布在南海的西南部的的大面积海域以及台湾岛东南部的菲律宾海盆区域,平均含量值超过30%,有些区域甚至达到40%以上;而在东部海域的陆架区仅在南黄海中部和东海内陆架的小范围区域存在黏土含量超过30%的高值区。砂含量的高值区对应黏土含量的低值区,在砂含量值最高的东海外陆架、长江口东部外海以及北黄海东部靠近朝鲜半岛一侧区域、台湾浅滩、南海北部陆架东北部以及巽他陆架北部,这些区域的黏土含量不超过10%,有的区域甚至没有黏土分布。

3.3 沉积物粒度参数分布特征

3.3.1 平均粒径

调查区的平均粒径在0~8.0 ϕ 变化(图4a)。粒径低值区主要分布在台湾海峡东南部的台湾浅滩,其次是南海北部陆架区和东海外陆架的沉积物,平均粒径小于3.0 ϕ ,这些地区的沉积物类型以砾石和砂为主。平均粒径高值区在东部主要分布在闽浙沿岸泥质区、南黄海泥质区、渤海湾泥质区以及冲绳海槽泥质区;在南海,水深大于500 m的陆坡区和深海盆区的表层沉积物的平均粒径较细,在6~8 ϕ 之间变化。

3.3.2 标准偏差

中国海域的沉积物的标准偏差指示的分选程度主要为分选较差和分选差(图4b),其中在东部陆架的近岸区以及南海中部的大部分区域分选程度较差;南海北部陆架、南海中东部的巴拉望岛以西海域以及中国东部海域的中部陆架区,分选程度为差;分选好或较好的区域仅在东海外陆架以及台湾浅滩有小面积分布,这两个区域的沉积物以残留砂为主,粒径较粗,分选程度较好。

3.3.3 偏度

东部海域偏度分布较为复杂,以极正偏和近对称分布为主(图4c),极正偏的海域沉积物多以砂质沉积为主,南黄海中南部海域沉积物偏度为极负偏-负偏,粒径偏细,以粉砂和黏土为主;而在南海海域,绝大部分区域的偏度为近对称分布,仅在台湾海峡以及海南岛的西北部近岸区域有正偏和极正偏分布。

3.3.4 峰度

中国海域沉积物的峰度分布具有陆架区复杂,陆坡和深海盆较为单一的特点(图4d)。东部海域

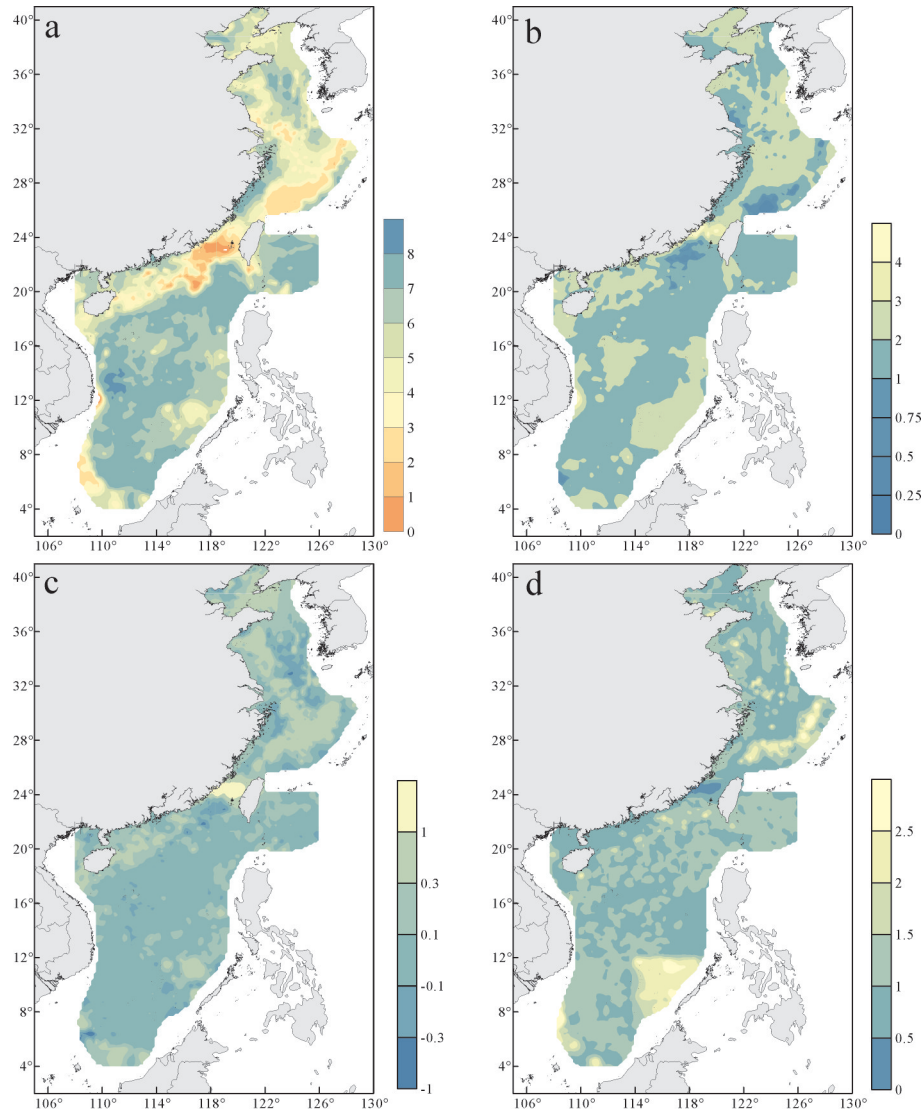


图4 表层沉积物粒度参数等值线

a—平均粒径;b—标准偏差;c—偏度;d—峰度

Fig.4 Contours of surface sediment grain size parameters

a—Average particle size (M_z); b—Standard deviation (σ_1); c—Skewness (Sk_1); d—Kurtosis (K_6)

的近岸区峰态中等,在南黄海和东海北部越往外陆架区峰度有变平坦的趋势;峰度最尖锐的区域分布在东海外陆架区。在南海北部陆架区,海南岛周边及东部海域峰度主要为平坦-很平坦,珠江入海口和台湾海峡之间的近岸区峰态较为尖锐;广大的南海陆坡及海盆区峰态基本无变化,为中等峰态。

4 讨论

4.1 沉积物粒度的主要控制因素

物源和水动力条件是影响海洋沉积物分布格

局的最重要两个因素,其中物源是海陆相互作用和气候变化的物质表现,水动力是沉积物搬运路径的基础(何起祥等, 2011;李亮等, 2017)。此外,海底地形也是影响沉积物分布格局的因素(秦亚超等, 2017)。

4.1.1 物源

众多的河流注入中国东部陆架,这些河流平均每年入海输沙量超过12亿t(Chu et al., 2009),这些河流输入的大量陆源碎屑物质直接影响到整个东部陆架的沉积作用(Chu et al., 2006)。一般认为东

部陆架现代细颗粒沉积物主要来自于长江与黄河(老黄河)的物质输入(Milliman et al., 1985)。中国东部陆架区的细颗粒泥质沉积区主要位于渤海黄河口外、辽东湾北部浅滩、南黄海中部泥质区、苏北老黄河口外泥质区以及长江口外—浙江沿岸的东海内陆架泥质区(图4c)。由于黄河口外泥质区邻近黄河,苏北老黄河口外泥质区邻近老黄河,长江口外泥质区邻近长江,从邻近物源的角度推断这些泥质沉积很可能受到这些河流的控制,应主要属于这些河流水下三角洲部分的前三角洲亚相(杨旭辉等, 2012)。从中国海域沉积物类型分布图(图2)上可以看出,在海洲湾、东海外陆架、台湾海峡以及南海外陆架等存在大规模的陆源碎屑砂质沉积区,这些区域的沉积类型与现代水动力条件和物质来源不符,据研究这是晚更新世低海面时期形成的残留沉积,后经现代水动力改造而形成了现在的分布特征(Saito et al., 1998)。在东海外陆架区,既无强劲的水动力条件,也无充足的砂质沉积物来源,却形成了中国海域范围最大的砂质沉积物分布区,其成因是晚更新世低海面时期形成的滨岸带沉积,不仅沉积物粒径较粗且发育有贝壳堤(Wu et al., 2006)。台湾海峡海域,常年水动力强劲,沉积物粒度较粗,来源包括来自福建和台湾省河流的入海泥沙、海峡两岸的侵蚀和剥蚀物质,台湾海峡晚更新世残留物及部分自生矿物等(方建勇等, 2012)。

每年由河流注入南海的陆源碎屑沉积物超过6亿 t (Milliman and Meade, 1983; Milliman and Syvitski, 1992; 黄维和汪品先, 2007), 主要河流有: 北部韩江和珠江、西部红河、西南部湄公河, 南部加里曼岛上的拉让河等, 除湄公河外, 其他均为短源性河流。南海北部陆架珠江口及粤东近岸沉积区物质来源主要是珠江、韩江等河流运输物质及近岸基岩风化、岛屿剥蚀作用产物为主, 少量东沙群岛海底冲刷剥蚀物; 台湾浅滩及珠江古三角洲残留沉积区, 以晚更新世的残留沉积为主, 同时可能接受了少量现代沉积物质。此外, 在两个区之间还存在混合沉积区域, 为珠江和台湾浅滩的混合陆源沉积物质为主(赵利等, 2016)。前人研究资料表明, 南海南部的外陆架区主要为残留沉积作用区(吴时国和罗又郎, 1994; Wang and Li, 2009), 冰期低海平面时期巽他陆架大部分暴露或处于潮间带(Wang and

Wang, 1990), 古巽他等河流沉积物直接沉积于巽他陆架上, 强水动力条件作用下, 细粒黏土被带走, 剩下较粗的稳定碎屑物质, 属近源沉积; 冰后期随着海平面上升, 逐渐沉积以悬移方式搬运的粉砂和黏土为主的远源沉积物, 形成了现代沉积与残留沉积的混合区(Pelejero et al., 1999; Wang, 1999)。因河流带来的陆源物质的影响, 南海陆架区和上陆坡区主要沉积陆源碎屑沉积物和少量陆源碎屑-生物源沉积物; 下陆坡区由于陆源稀释作用逐渐减少, 沉积物中生物的含量大大增加, 分布陆源碎屑-生物源沉积为主的沉积物类型。岛礁附近的生物生产力较高, 则主要为生物碎屑沉积, 因此南海岛礁附近海域碳酸钙含量较高, 珊瑚碎屑、有孔虫等为主要物源。深海盆由于远离河流入海口, 受其影响甚微, 随着水深的增加, 生物含量也发生变化, 钙质生物大部分溶解, 硅质生物较多。南海作为西太平洋一个较大的热带边缘海, 沉积物类型和整个太平洋相似, 根据水深的变化, 具有从陆源碎屑到钙质沉积、硅质沉积和深海黏土沉积的完整系列(刘锡清, 1996)。

4.1.2 水动力

东部陆架海的主要流系, 暖流系统主要包括台湾暖流与黑潮及其分支黄海暖流及对马暖流, 沿岸流系统主要包括闽浙沿岸流、苏北沿岸流、山东半岛沿岸流与朝鲜半岛西部沿岸流等; 此外, 还可识别出渤海海峡“北进南出”的流场分布(图5a)。受山东半岛沿岸流的影响, 黄河入海的部分泥沙经过莱州湾沿山东半岛北部往南黄海输送, 从而沉积从黄河口外绕山东半岛至南黄海中部分布的细颗粒沉积物; 少量或微量夹杂着苏北老黄河口外的再悬浮物质可能越过长江口继续往南面的东海输运。东海陆架沿岸流的流向有随季节变化的特点, 其中流向变化最明显的是闽浙沿岸流与苏北沿岸流, 即在夏季因东南季风盛行流向北, 而在冬季由于偏北风盛行而向南运移。考虑到东部陆架海悬浮体具有“夏储冬输”的沉积物输运格局(杨作升等, 1992), 长江入海的部分泥沙在冬季主要随着闽浙沿岸流往南输运, 并受到北上的台湾暖流影响, 即在相反流向的2个流系分界附近存在1个南北向的狭长的弱海流区, 从而沉积浙江沿岸细颗粒沉积物(图4c)。东部陆架区内细颗粒沉积物大致沿等深

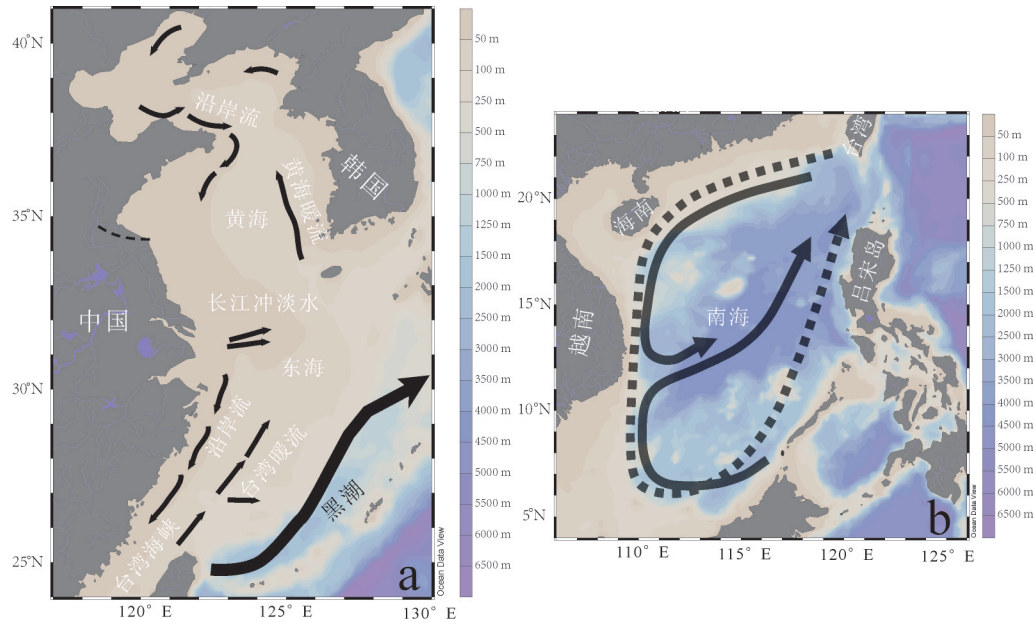


图5 中国海域主要表层海流分布(a, 修改自 Bao et al., 2018; b, 修改自 Wang and Li, 2009)

Fig.5 The distribution of main surface currents in China's sea areas (a, modified from Bao et al., 2018; b, modified from Wang and Li, 2009)

线分布,但南黄海中部与北黄海西部泥质沉积区例外(图4c),二者位于地形起伏较大的斜坡上。在南黄海中部,黄海暖流与山东半岛沿岸流及苏北沿岸流等流系形成了1个中尺度的逆时针海水涡旋;在北黄海西部,北部的黄海环流余脉与南部的山东半岛沿岸流形成一海水涡旋。涡旋内部水动力较弱,从而搬运沉积了细颗粒的泥质沉积(Hu, 1984)。在位于渤海海峡北部老铁山水道附近与长江口外20~50 m水深的扬子浅滩上,这些站位所在的海域水动力较强,主要沉积了砂质粗颗粒物(图4a)。

低海平面时期(末次盛冰期),陆架及坡折区沉积物主要来源于古巽他等河流沉积物,洋流的影响仅限于陆坡区;而现今南海主要受东亚季风的影响形成不同的环流(图5b),来源于河流的粗粒沉积物大多数沉积于河口近岸区,只有少数河流运输的悬浮组分(粉砂和黏土)可以随洋流搬运到更远的陆坡乃至深海(Liu et al., 2011),而受季风驱动的南海洋流是远源搬运的主要动力,洋流对南海的表层沉积物的分布格局起着重要作用。除表层洋流,南海的深水底流和重力流也对沉积物的沉积格局起到重要作用。1994年德国太阳号“Sonne95”航次首次在中国南海北部陆坡取得1315 cm长的岩心柱(SO17940),40 ka以来沉积速率达33 cm/ka(Wang,

1999a)。1999年ODP184航次在南海北部更取得51900 cm的连续柱状岩心(ODP1144孔),1050 ka以来平均沉积速率高达49 cm/ka(邵磊等, 2001)。2005年在南海开展的Marco-Polo航次中从该海区获取1192 cm长的箱式柱状岩心(MD05-2905),其12 ka来沉积速率更是高达97 cm/ka(杨文光等, 2007),是南海目前所知沉积速率最高的海区,沉积速率在全球深海沉积中也十分罕见。研究结果表明南海北部陆坡区存在NE-SW向的深水底流搬运沉积作用,使源自南海北部地区的陆源物质大致沿陆坡等深线位置由东北向西南方向搬运,沿途形成水道以及水道边侧断续分布的高沉积速率堆积体,深水底流的源头极有可能是侵入南海的西太平洋流在科氏力的作用下演变而来,造成南海北部深海区复杂的搬运沉积格局,也揭示了南海深水沉积物源的多样性、复杂性(邵磊等, 2007)。在南海西南部巽他陆坡底部深水区的MD05-2895柱状样发现了数层保存完好的浊流沉积,认为主要来自末次冰期时海平面快速变化形成的快速沉积(赵玉龙等, 2011)。在南海东部,北部陆坡区、中部深海区和南部陆坡区的柱状样中也都发现了正递层理和浊流沉积特征(张富元等, 2003;李梦君等, 2019)。本次研究发现在南海西南深海盆水深超过4000 m的深

海海域(图6),有粗粒的砾石分布,可见该海域有异常的沉积环境存在,推测该海域可能有现代深水浊流的存在。

4.1.3 地形地貌

中国海域覆盖了大陆架、陆坡以及深海盆等多种地貌。中国东部海域大部分地区为平坦宽阔的大陆架地貌,仅在东海的冲绳海槽附近存在陆坡地貌及浅海盆地地貌;东部陆架区以及边缘主要以粗粒的砂砾质和粉砂质沉积物为主(图2),沉积物类型多样,其中粉砂质砂、粉砂、砂质粉砂是陆架区最主要的沉积物类型,其分布范围覆盖渤海、黄海以及东海的大部分海区。沉积物类型分布图(图2)显示,由于受地形、地貌的影响,东部海域沉积类型沿着等深线呈不规则条带状分布。

南海陆架较东部海域窄,位于200 m水深之内,南北向狭长,东西向略窄,为浅海沉积环境;陆坡地貌占大部分,北、西、南都分布不同坡度的陆坡地形,西、东部陡、北部和南部较缓,为陆坡、半深海沉积环境。西北次海盆水深位于3400~4200 m,东部次海盆水深大致为4000~4700 m,西南次海盆水深大致为4000~4400 m为下陆坡和深海盆沉积环境。图3显示陆坡区主要分布细粒沉积物,泥、粉砂、砂质粉砂、砂质泥分布极为广泛。粗粒沉积物分布面积较小,均呈斑块局部分布,一般分布在水动力较强海域。南海海盆区的硅质黏土(C^{Si})、含硅质含钙质黏土(C^{SiCa})、砂质粉砂分布广泛,含钙质黏土(C^{Ca})、含钙质硅质黏土(C^{CaSi})、含硅质钙质黏土(C^{SiCa})、硅质黏土(C^{Si})分布较广泛,钙质黏土(C^{Ca})、硅质钙质黏土(C^{SiCa})、硅质软泥(O^{Si})、砂质泥(sM)、砂质粉砂(sZ)、含砾泥((g)M)、砂(S)局部分布。沉积物类型分布图(图2)显示,由于受地形、地貌的影响,南海沉积类型较明显呈不规则环带状分布。

4.2 中国海域表层沉积物的沉积分异模式

中国东部陆架底质沉积物类型分布的基本格局,是在砂质沉积区的背景上分布着呈斑块状发育的泥质沉积区(刘锡清,1990)。广泛分布的东海陆架砂质沉积物主要形成于末次冰期的海退时期,是在冰后期的海流改造下形成的以砂为主的残留沉积体(Saito et al., 1998),而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(李广雪等,2005)。东部陆架细粒沉积区是全新

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)。总而言之,东部陆架海的沉积物以大型河流输入的陆源碎屑为主,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,东部海域沉积总体表现为“大江大河-陆源碎屑-条带状-慢速沉积(东海外陆架)”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。而生物组分在南海深海的沉积物中占有重要地位,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具有钙质生物沉积、硅质生物沉积和深海黏土的完整系列。整个南海沉积物沉积总体表现为“短源河流-混合物源-环状分布-快速沉积(深水底流、重力流)”的沉积分异模式。

5 粒度特征对中国海域海底砂矿分布的指示意义

海砂是目前海洋固体矿产中开采最广泛、利用最多的矿产资源,已成为仅次于石油天然气的第二大海洋矿产。中国海域沿海分布着漫长的海岸线,所属海域陆架宽广,蕴藏着较为丰富的海洋砂矿资源。海洋砂矿一般按照重矿物成矿环境可分为滨海砂矿和浅海砂矿(谭启新,1998)。全国现已探明具工业价值的滨海砂矿矿种有钛铁矿、金红石、锆英石、磷钇矿、独居石、磁铁矿、锡砂矿、铬铁矿、铌铁矿、钽铁矿、砂金、玻璃用石英砂、金刚石、砷铂矿等,主要分布于海南岛、辽宁、山东、广东、广西、福建和台湾临近海域(孙岩和韩昌甫,1999;黄龙等,2012;潘燕俊等,2017)。此外,建筑用海砂也是重要的海洋资源。海洋砂砾石(即海砂),是指分布于海岸线和浅海陆架区域,以中砂和粗砂为主,包括部分细砂和砾石的砂质堆积。砂体类型主要有岸外沙脊(砂堤)体系、潮流沙脊/沙席体系、进积三角洲和滨海平原体系、古海进沙席、古滨岸沉积及残留砂等等,其成因和分布与近海沉积过程或水动力过程密切相关。中国海域用于建筑用途的海洋砂砾石资源包括细砂、中砂、粗砂和砾质粗砂等。建

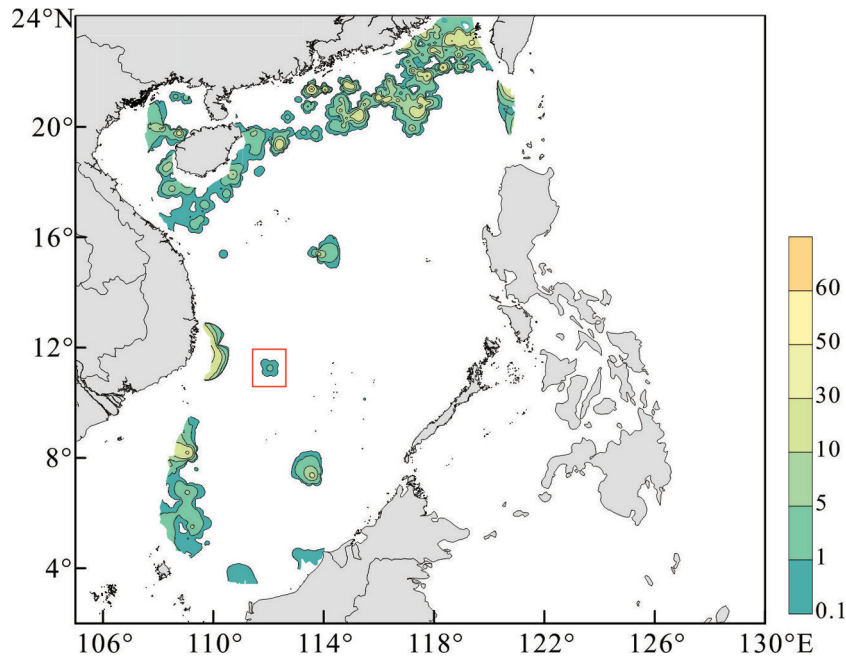


图6 南海表层沉积物砾石百分含量分布图(红框内为水深4000 m的砾石区)

Fig.6 Gravel percentage distribution map of surface sediments in the South China Sea (gravel area with a water depth of 4000m shown in the red box)

筑用砂评价不仅受沉积物粒级方面的制约,而且还需要满足沉积物颗粒级配、化学组成、含泥量、泥块含量和有害物质(云母、轻物质、有机物、硫化物及硫酸盐、氯盐)等方面的评价标准要求。

本研究主要基于小比例尺(1:100万)的海洋区域调查项目实测海底表层沉积物的粒度分析数据为标准,其目的主要是圈定广义的、具有产出可能的建筑用海砂资源潜力区,而非实际可供开采的建筑用砂砾石资源。本次评价依据表层沉积物粒度分析结果4300组,绘制了中国海域表层沉积物的砂质(粒径大于 $63\ \mu\text{m}$)百分含量分布图(图3a)与平均粒径分布图(图4a)。根据中国海域底质沉积物平均粒径和砂质(粒径大于 $63\ \mu\text{m}$)百分含量揭示的分布特征来看,海域粗粒沉积物(海砂)可以确定为9个主要的分布区,它们分别是:渤海辽东湾砂质沉积区、北黄海东部中细砂、细砂沉积区、海州湾中部砂质沉积区、苏北浅滩砂质沉积、长江口外大沙滩、东海外陆架砂质沉积区、台湾浅滩及海峡砂质堆积、南海北部陆架砂质区和海南岛周边砂质沉积区,这些区域将成为建筑用海砂的主要分布区域。

6 结论

对在中国管辖海域获取的4300个表层沉积物样品,开展了粒度测试分析,基于Folk分类法划分了研究区沉积物类型,初步讨论了物源、水动力条件和地形地貌对沉积物分布格局的影响。

(1)中国海域内的砾石沉积物基本上分布在陆架区,主要分布的有5种:砾质砂(gS)、含砾泥((g)M)、泥质砂质砾(msG)、含砾泥质砂((g)mS)、含砾砂((g)S)。整个中国海域砾石含量分布规模较小,含砾石沉积物类型组合变化较大且混杂分布,没有形成大规模的沉积区。不含砾表层沉积物主要可以分成7种,分别是砂(S)、粉砂(Z)、泥质砂(mS)、粉砂质砂(zS)、砂质泥(sM)、砂质粉砂(sZ),泥(M),中国海域内分布面积最广的是砂质粉砂。

(2)南海中央海盆沉积物既有陆源碎屑,又有生物源沉积。主要划分为9种类型:含钙质黏土(C^{Ca})、钙质黏土(C^{Ca})、含硅质黏土(C^{Si})、硅质黏土(C^{Si})、硅质钙质黏土(C^{SiCa})、含硅质钙质黏土(C^{SiCa})、含钙质硅质黏土(C^{CaSi})、含钙质钙质黏土(C^{CaCa})和硅质软泥(O^{Si})。南海深海沉积由浅到深

具有钙质生物沉积、硅质生物沉积和深海黏土的完整系列。

(3)表层沉积物粒度分布特征主要受物源、水动力条件、水深与地形及洋流等影响因素控制。东部海域沉积总体表现为“大江大河-陆源碎屑-条带状-慢速沉积(东海外陆架)”的沉积分异模式。南海沉积物沉积总体表现为“短源河流-混合物源-环状分布-快速沉积(深水底流、重力流)”的沉积分异模式。

(4)中国海域粗粒沉积物(海砂)可以确定为9个主要的分布区:渤海辽东湾砂质沉积区、北黄海东部中细砂、细砂沉积区、海州湾中部砂质沉积区、苏北浅滩砂质沉积、长江口外大沙滩、东海外陆架砂质沉积区、台湾浅滩及海峡砂质堆积、南海北部陆架砂质区和海南岛周边砂质沉积区,这些区域将成为建筑用海砂的主要分布区域。

References

- Berger W H. 1974. Deep-Sea Sedimentation. Burke C A and Darke C D, The Geology of Continental Margins[M]. New York: Springer, 213-241.
- Bao R, Voort T S V D, Zhao M, Guo X, Montluçon D B, McIntyre C, Eglinton T I. 2018. Influence of hydrodynamic processes on the fate of sedimentary organic matter on continental margins[J]. *Global Biogeochem. Cycle*, 32. <https://doi.org/10.1029/2018G B005921>.
- Chu Z X, Sun X G, Zhai S K, Xu K H. 2006. Changing pattern of accretion/erosion of the modern Yellow River (Huanghe) subaerial delta, China: Based on remote sensing images[J]. *Marine Geology* 227: 13-30.
- Chu Z X, Zhai S K, Lu X X, Liu J P, Xu J X, Xu K H. 2009. A quantitative assessment of human impacts on decrease in sediment flux from major Chinese rivers entering the western Pacific Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 36: 446-449.
- Dean W E, Leinen M, Stow D A V. 1985. Classification of deep sea fine grained sediments[J]. *Journal of Sedimentary Research* 55: 250-256.
- Duan Xiaoyong, Yin Ping, Liu Jinqing, Cao Ke, Gao Fei, Chen Xiaoying. 2019. Modern sedimentation environments in the coastal zone of East China[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 39 (2): 14-20(in Chinese with English abstract).
- Dou Yanguang, Chen Xiaohui, Li Jun, Cai Feng, Wen Zhenhe, Xu Gang, Zou Liang. 2018. Origin and provenance of the surficial sediments in the subenvironments of the East China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 38 (4) :21-31(in Chinese with English abstract).
- Fang Haichao, Huang Peng, Sun Jiawen, Yu Yonghai, Li Anchun. 2019. Provenance and controlling factors of major elements in graded components of sediments from the Yalu River[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 39(3): 72-83(in Chinese with English abstract).
- Fang Jianyong, Chen Jian, Wang Aijun, Lai Zhikun, Wang Weiguo, Li Yunhai, Li Dongyi, Xu Yonghang, Ye Xiang, Yin Xijie. 2012. The distribution characteristics of grain size and mineral of surface sediment in the Taiwan Strait [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 34 (5) : 91-99(in Chinese with English abstract).
- Folk R L. 2010. A review of grain-size parameters[J]. *Sedimentology* 6: 73-93.
- Gao Shu. 2001. The Use of Grain Size Trends In Marine Sediment Dynamics: A Review[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 19(3): 265-271.
- Gao S, Collins M B, Lanckneus J, Moor G D, Lancker V V. 1994. Grain size trends associated with net sediment transport patterns: An example from the Belgian continental shelf[J]. *Marine Geology*, 121: 171-185.
- Gao Maosheng, Guo Fei, Huang Xueyong, Hou Guohua. 2019. Sediment distribution and provenance since Late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. *China Geology*, 2: 16-25.
- He Qixiang. 2011. Sediment source and its bearing on marine sedimentation[J]. *Marine Geology Frontiers*, 27(1): 8-13(in Chinese with English abstract).
- Huang Long, Zhang Zhixun, Yang Huiliang. 2012. Formation and prospect of valuable heavy minerals in surface sediments in the northern East China Sea shelf[J]. *Marine Geology Frontier*, 28(7): 10-16(in Chinese with English abstract).
- Huang Wei, Wang Pinxian. 2007. Accumulation rate characteristics of deep water sedimentation in the South China Sea during the last glaciation and the Holocene[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 29(15): 69-73(in Chinese with English abstract).
- Hu D. 1984. Upwelling and sedimentation dynamics[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2: 12-19.
- Liu J, Xiang R, Chen M, Chen Z, Yan W, Liu F. 2011. Influence of the Kuroshio current intrusion on depositional environment in the Northern South China Sea: Evidence from surface sediment records[J]. *Marine Geology*, 285: 59-68.
- Li Guangxue, Yang Zigeng, Liu Yong. 2005. The Research of the Origin of the Sea Bottom Sedimentary Environment in China Seas[M]. Beijing: Science Press, 1-44(in Chinese).
- 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 Liang, He Qijiang, Long Genyuan, He Chao, Yang Fan. 2017. Sediment grain size distribution pattern and transportation trend in the Xuande water, South China Sea[J]. *Marine Geology and*

- Quaternary Geology, 37 (6) :140–148(in Chinese with English abstract).
- Li Mengjun, Bi Naishang, Hu Lisha, Liu Xiaohang, Xu Jingping. 2019. Sedimentary characteristics and processes revealed by the push cores of the 140th dive of DSV 'Jiaolong' in the Taiwan Submarine Canyon, Northern South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2019, 39(4): 23–33(in Chinese with English abstract).
- Liu Shengfa, Liu Yanguang, Zhu Aimei, Li Chaoxin, Shi Xuefa. 2009. Grain size trends and net transport pattern of surface sediment in the east China Sea inner continental shelf[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 29 (1) :1–6(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiqing. 1990. Sediment division in China continental shelf[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 10(1):13–24(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiqing. 1996. Sedimentary division in marginal seas of China[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 16(3):1–11(in Chinese with English abstract).
- McLaren P, Bowles D. 1985. The effects of sediment transport on grain–size distributions[J]. Journal of Sedimentary Research 55: 457–470.
- Miao Weidong, Li Shijie, Fen Jinshun, Gao Li, E Jian. 2016. Stratigraphic division of NB5 core in the Yangtze delta area and its environmental change information[J]. Chinese Geology, 2016, 43 (6): 2022–2035 (in Chinese with English abstract) .
- Milliman J D, Beardsley R C, Yang Z S, Limeburner R. 1985. Modern Huanghe–derived muds on the outer shelf of the East China Sea: identification and potential transport mechanisms[J]. Continental Shelf Research, 4: 175–188.
- Milliman J D, Meade R H. 1983. World–wide delivery of river sediment to the oceans[J]. Journal of Geology, 91: 1–21.
- Milliman J D, Syvitski J P M. 1992. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of Small Mountainous Rivers[J]. Journal of Geology, 100: 525–544.
- Pan Y J, Cui R Y, Lin M K, Chen F, Hu B Q. 2017. Preliminary analysis of placer resources potential in Hainan Island offshore area[J]. Marine Science Bulletin, 36(4): 458–467.
- Pelejero C, Kienast M, Wang L, Grimalt J O. 1999. The flooding of Sundaland during the last deglaciation: Imprints in hemipelagic sediments from the southern South China Sea[J]. Earth and Planetary Science Letters, 171: 661–671.
- Qiao Shuqing, Shi Xuefa, Wang Guoqing, Yang Gang, Hu Ningjing, Liu Shengfa, Liu Yanguang, Zhu Aimei, Li Chaoxin. 2010. Discussion on grain–size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 32 (4) :139–147(in Chinese with English abstract).
- Qin Yachao. 2017. Grain–size characteristics of bottom sediments and its implications offshore between Rizhao and Lianyungang in the western South Yellow Sea[J]. Quaternary Sciences, 37(6): 1412–1428(in Chinese with English abstract).
- Qiu Yan, Zhong Hexian, Liu Jian. 2008. Type, distribution and hydrodynamic condition of seafloor sediments in the middle and southern parts of South China Sea[J]. Geological Research of South China Sea, 1:1–13(in Chinese with English abstract).
- Shao Lei, Li Xianhua, Wei Gangjian, Liu Ying, Fang Dianyong. 2001. Provenance of a prominent sediment drift on the northern slope of the South China Sea[J]. Science in China:Series D, 31 (10) :828–833(in Chinese).
- Shao Lei, Li Xuejie, Geng Jianhua, Pang Xiong, Lei Yongchang, Qiao Peijun, Wang Liaoliang, Wang Hongbin. 2007. Deepsea bottom current sedimentation in northern South China Sea[J]. Science in China: Series D, 37 (6) :771–777(in Chinese).
- 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: 217–232.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. 2007. Specifications for Oceanographic Survey Part 8 (marine Geology and Geophysics Survey, GB/T 12763.8 – 2007) [M]. Beijing:Standards Press of China.
- Sun Yan, Han Changfu. 1999. Distribution and exploitation of placer deposit resources in China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 19 (1) :117–121(in Chinese).
- Tan Qixin. 1998. Marine placer mines in China[J]. Chinese Geology, 25(4):23–26(in Chinese).
- Tang Shikai, Yu Jianfeng, Li Jinpeng, Wang Wei, Zhao Hui, Li Hengjian, Qiang Menglin, Yuan Shuaishuai, Gu Xiaoyuan, Shi Meng. 2019. Grain size characteristics and dynamic environment of surface sediments on the near shore seabed of Dingzi Bay[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 39(2): 70–78(in Chinese with English abstract).
- Wang L, Wang P. 1990. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: Glacial–interglacial contrasts in an enclosed basin[J]. Paleoceanography, 5: 77–90.
- Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, Grimalt J, Grootes P, Heilig S, Ivanova E, Kienast M., Pelejero C, Pflaumann U. 1999. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high–resolution sediment records from the South China Sea[J]. Marine Geology, 156: 245–284.
- Wang P. 1999. Response of Western Pacific marginal seas to glacial cycles: Paleoceanographic and sedimentological features[J]. Marine Geology, 156: 5–39.
- Wang P, Li Q. 2009. The South China Sea. Developments in Paleoenvironmental Research, Springer, New York. 30: 165–178.
- Wang Wei, Li Anchun, Xu Fangjian, Huang Peng, Li Yan. 2009. Distribution of surface sediments and sedimentary environment in the North Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 40 (5): 525–531(in Chinese with English abstract).

- Wang Zhongbo, He Qixiang, Yang Shouye, Lan Xianhong, Zhang Zhixun. 2008. Comparison and application of Shepard's and Folk's classifications to the subsurface mapping in the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 28(1):1-10(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhongbo, Yang Shouye, Zhang Zhixun, Li Rihui, Wang Hong, Lan Xianhong. 2012. The grain size compositions of the surface sediments in the East China Sea: Indication sedimentary environments[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 43(6):1039-1049(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhongbo, Li Rihui, Zhang Zhixun, Zhang Xunhua, Zhang Jian, Chen Shanshan, Meixi. 2016. Grain size composition and distribution pattern of seafloor sediments in Bohai Bay and adjacent areas[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 36(6): 101-109(in Chinese with English abstract).
- Wu Ziyin, Jin Xianglong, Li Jiabiao, Zheng Yulong, Wang Xiaobo. 2006. The linear sand ridges on continental shelf of East China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1(1) :93-103 (in Chinese with English abstract).
- Wu Shiguo, Luo Youlang. 1994. The relict sediments in the south shelf of South China Sea[J]. *Tropic Oceanology*, 13(3):47-53 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huiqun, Li Mujun, Yang Shengxiong, Zhu Benduo, Ji Fuwu, Wang Hu, Zhou Huaiyang. 2013. Grain size distribution of surface sediments in the southwestern South China Sea and transport trend analysis[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 33(6): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- Yang Wenguang, Zheng Hongbo, Wang Ke, Xie Xin, Chen Guocheng, Mei Xi. 2007. Sedimentary characteristic of terrigenous clast of Site MD05-2905 in the northeastern part of South China Sea after 36 ka and evolution of East Asian monsoon[J]. *Advances in Earth Science*, 22(10): 1012-1018(in Chinese with English abstract).
- Yang Xuhui, Feng Xiuli, Chu Zhongxin, Fan Dejiang, Dong Aiguo. 2012. Surface sediment distribution and sedimentary environment on the East China continental shelf[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 42(7):126-134(in Chinese with English abstract).
- Yang Zuosheng, Guo Zhigang, Wang Zhaoxiang, Xu Jingping, Gao Wenbing. 1992. Yellow Sea continental shelf and other macro pattern of suspension conveying its deep-sea areas east of Oceanography[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 14(2):81-90(in Chinese with English abstract).
- Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Li Yumei, Ning Bo. 2008. Influence of the dust source distance on the multimodal grain-size distribution characteristics of loess[J]. *Geology in China*, 35(5): 1037-1044(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fuyuan, Zhang Weiyuan, Yang Qunhui. 2003. Characteristics of grain size distributions of surface sediments in the Eastern South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 452-460(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jian, Li Rihui, Wang Zhongbo, Zhang Xunhua, Huang Long, Sun Rongtao. 2016. Grain size characteristics of surface sediments in the east Bohai Sea and the northern Yellow Sea and their implications for environments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(5): 1-12(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jin, Li Anchun, Wan Shiming, Huang Jie, Lu Jian, Jiang Fuqing, Li Tiegang. 2016. Grain size distribution of surface sediments in the southern South China Sea and influencing factors[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 36 (2) :1-10 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaodong, Ji Yang, Yang Zuosheng, Wang Zhongbo, Liu Dongsheng, Jia Peimeng. 2015. End member inversion of surface sediment grain size in the South Yellow Sea and its implications for dynamic sedimentary environments[J]. *Science China: Earth Sciences*, 45(10): 1515-1523(in Chinese with English abstract).
- Zhao Li, Peng Xuechao, Zhong Hexian, Cai Guanqiang, Li Bo, Li Shun, Tian Chengjing. 2016. Characteristics of grain size distribution of surface sediments and depositional environments in the northern shelf region of the South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 36(6): 111-122(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yulong, Liu Zhifei, Colin C., Xie Xin, Wu Qiong. 2011. Turbidite deposition in the southern South China Sea during the last glacial: Evidence from grain-size and major elements records[J]. *Chinese Science Bulletin*, 56: 2535-2543(in Chinese with English abstract).
- Zhong Hexian, Huang Lei, Cui Zhaotong. 2013. Grainsize distribution of surface sediments in the northwestern South China Sea and influence factors[J]. *Marine Geology Frontier*, 29(11): 22-31(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 段晓勇, 印萍, 刘金庆, 曹珂, 高飞, 陈小英. 2019. 中国东部近海现代沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 39(2): 14-20.
- 窦衍光, 陈晓辉, 李军, 蔡峰, 温珍河, 徐刚, 邹亮. 2018. 东海外陆架-陆坡-冲绳海槽不同沉积单元底质沉积物成因及物源分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 38(4):21-31.
- 方建勇, 陈坚, 王爱军, 赖志坤, 汪卫国, 李云海, 李东义, 徐勇航, 叶翔, 尹希杰. 2012. 台湾海峡表层沉积物的粒度和碎屑矿物分布特征[J]. *海洋学报* 34, 91-99.
- 方海超, 黄朋, 孙家文, 于永海, 李安春. 2019. 鸭绿江端元粒度分级样品常量元素控制因素分析及物源识别[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 72-83.
- 何起祥. 2011. 海洋沉积作用的物源控制[J]. *海洋地质前沿*, 27(1):8-13.
- 黄维, 汪品先. 2007. 南海深水区末次冰期和冰后期沉积物堆积速率的特征[J]. *海洋学报*, 29(15):69-73.
- 黄龙, 张志珣, 杨慧良. 2012. 东海陆架北部表层有用重砂资源形成

- 条件及成矿远景[J]. 海洋地质前沿, 28(7):10-16.
- 李广雪, 杨子庚, 刘勇. 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, 1-44.
- 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.
- 李亮, 何其江, 龙根元, 贺超, 杨凡. 2017. 南海宣德海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 37(6): 140-148.
- 李梦君, 毕乃双, 胡丽沙, 刘晓航, 徐景平. 2019. 南海北部台湾峡谷“蛟龙号”第140潜次沉积物特征及其沉积过程指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(4): 23-33.
- 刘升发, 刘焱光, 朱爱美, 李朝新, 石学法. 2009. 东海内陆架表层沉积物粒度及其净输运模式[J]. 海洋地质与第四纪地质, 29(1): 1-6.
- 刘锡清. 1990. 中国大陆架的沉积物分区[J]. 海洋地质与第四纪地质, 10(1):13-24.
- 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.
- 缪卫东, 李世杰, 冯金顺, 高立, 鄂建. 2016. 长江三角洲NB5孔第四纪地层划分及环境变化信息[J]. 中国地质, 43(6): 2022-2035.
- 潘燕俊, 崔汝勇, 林明坤, 陈飞, 胡邦琦. 2017. 海南岛周边浅海砂矿资源潜力浅析[J]. 海洋通报, 36(4):458-467.
- 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 杨刚, 胡宁静, 刘升发, 刘焱光, 朱爱美, 李朝新. 2010. 渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨[J]. 海洋学报 32(4), 139-147.
- 秦亚超. 2017. 南黄海西部日照至连云港海域表层沉积物粒度特征及其指示意义[J]. 第四纪研究, 37(6): 1412-1428.
- 邱燕, 钟和贤, 刘坚. 2008. 南海中南部表层沉积物类型、分布与水动力条件[J]. 南海地质研究, 1:1-13.
- 邵磊, 李献华, 韦刚健, 刘颖, 房殿勇. 2001. 南海陆坡高速堆积体的物质来源[J]. 中国科学:地球科学 31(10): 828-833.
- 邵磊, 李学杰, 耿建华, 庞雄, 雷永昌, 乔培军, 王嘹亮, 王宏斌. 2007. 南海北部深水底流沉积作用[J]. 中国科学:地球科学 37(6): 771-777.
- 孙岩, 韩昌甫. 1999. 我国滨海砂矿资源的分布及开发[J]. 海洋地质与第四纪地质, 19(1): 117-121.
- 谭启新. 1998. 中国的海洋砂矿[J]. 中国地质, 25(4): 23-26.
- 汤世凯, 于剑峰, 李金鹏, 王伟, 赵辉, 李亨健, 强萌麟, 原帅帅, 顾效源, 史猛. 2019. 丁字湾近岸海域表层沉积物粒度特征及沉积动力环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(2): 70-78.
- 王伟, 李安春, 徐方建, 黄朋, 李艳. 2009. 北黄海表沉积物粒度分布特征及其物源环境分析[J]. 海洋与湖沼, 40(5):525-531.
- 王中波, 何起祥, 杨守业, 蓝先洪, 张志珣. 2008. 谢帕德和福克碎屑沉积物分类方法在南黄海表层沉积物编图中的应用与比较[J]. 海洋地质与第四纪地质, 28(1): 1-10.
- 王中波, 杨守业, 张志珣, 李日辉, 王红, 蓝先洪. 2012. 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 43(6): 1039-1049.
- 王中波, 李日辉, 张志珣, 张训华, 张剑, 陈珊珊, 梅西. 2016. 渤海及邻近海区表层沉积物粒度组成及沉积分区[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(6):101-109.
- 吴自银, 金翔龙, 李家彪, 郑玉龙, 王小波. 2006. 东海外陆架线状沙脊群[J]. 科学通报 51(1), 93-103.
- 吴时国, 罗又郎. 1994. 南海南部大陆架的残留沉积[J]. 热带海洋学报, 13(3):47-53.
- 杨群慧, 李木军, 杨胜雄, 朱本铎, 季福武, 王虎, 周怀阳. 2013. 南海西南部表层沉积物粒度特征及输运趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1-7.
- 杨文光, 郑洪波, 王可, 谢昕, 陈国成, 梅西. 2007. 南海东北部MD05-2905站36 ka BP以来的陆源碎屑沉积特征与东亚季风的演化[J]. 地球科学进展, 22(10): 1012-1018.
- 杨旭辉, 冯秀丽, 褚忠信, 范德江, 董爱国. 2012. 中国东部陆架表层沉积物粒度特征及其沉积环境浅析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 42(7): 126-134.
- 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 徐景平, 高文兵. 1992. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局[J]. 海洋学报 14(2): 81-90.
- 殷志强, 秦小光, 李玉梅, 宁波. 2008. 源区距离对黄土粒度多组分分布特征的影响[J]. 中国地质, 35(5): 1037-1044.
- 张富元, 章伟艳, 杨群慧. 2003. 南海东部海域沉积物粒度分布特征[J]. 沉积学报, 21(3): 452-460.
- 张剑, 李日辉, 王中波, 张训华, 黄龙, 孙荣涛. 2016. 渤海东部与黄海南部表层沉积物的粒度特征及其沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1-12.
- 张晋, 李安春, 万世明, 黄杰, 卢健, 蒋富清, 李铁刚. 2016. 南海南部表层沉积物粒度分布特征及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(2):1-10.
- 张晓东, 季阳, 杨作升, 王中波, 刘东生, 贾培蒙. 2015. 南黄海表层沉积物粒度端元反演及其对沉积动力环境的指示意义[J]. 中国科学:地球科学 45(10): 1515-1523.
- 赵利, 彭学超, 钟和贤, 蔡观强, 李波, 李顺, 田成静. 2016. 南海北部陆架区表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(6):111-122.
- 赵玉龙, 刘志飞, Colin Christophe, 谢昕, 吴琼. 2011. 南海南部末次冰期浊流沉积的高分辨率沉积学和地球化学研究[J]. 科学通报 56, 2535-2543.
- 钟和贤, 黄磊, 崔兆同. 2013. 南海西北部海域表层沉积物粒度分布特征及其影响因素[J]. 海洋地质前沿, 29(11):22-31.
- 中国国家标准化管理委员会. 2007. 海洋调查规范:第8部分(海洋地质地球物理调查, GB/T 12763.8-2007)[M]. 北京: 中国标准出版社.