

doi: 10.12029/gc20200520

全长亮, 张匡华, 陈飞, 苟鹏飞. 2020. 海南岛北部海域海砂资源潜力评价[J]. 中国地质, 47(5): 1567–1575.

Tong Changliang, Zhang Kuanghua, Chen Fei, Gou Pengfei. 2020. The potential evaluation of marine sand resources in the northern sea areas of Hainan Island[J]. Geology in China, 47(5):1567–1575(in Chinese with English abstract).

海南岛北部海域海砂资源潜力评价

全长亮, 张匡华, 陈飞, 苟鹏飞

(海南省海洋地质调查研究院, 海口 570206, 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海口 570206)

摘要:海南岛北部浅海海砂资源丰富, 以砂砾质沉积为主, 集中于琼州海峡东口潮流沙脊区、河口三角洲和沿岸水下岸坡等海域。本文通过对海南岛北部海域的地形地貌、地层、底质类型等方面的调查, 分东、西两个区域研究了海砂资源的分布、范围、规模和类型等地质特征, 并估算了海砂资源量, 结合沉积环境, 评价了各区域海砂的资源潜力。研究区海砂分布广泛, 但东、西区特征和规模具有较大差异, 西区海砂以砂质砾和泥质砂为主, 厚度 5~10 m; 东区海砂以砂、砾质砂和砂质砾为主, 厚度 10~50 m, 规模远超西区。研究区共圈定出 9 处资源潜力区, 资源量为 91.4 亿 m³, 其余区域为远景区, 其资源量为 71.5 亿 m³。根据地形地貌、水动力和沉积环境等因素, 研究区海砂可分为潮流沙脊堆积体系、河口水下三角洲堆积体系、岬湾海岸水下岸坡堆积体系和侵蚀残留体系几种类型。其中位于琼州海峡东口浅滩区的潮流沙脊堆积体系海砂连续分布面积达 328 km², 平均厚度超过 25 m, 资源量 83.9 亿 m³, 最具潜力。

关键词:海砂资源; 资源潜力; 评价; 南岛北部

中图分类号: P744 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)05-1567-10

The Potential evaluation of marine sand resources in the northern sea areas of Hainan Island

TONG Changliang, ZHANG Kuanghua, CHEN Fei, GOU Pengfei

(Marine Geological Institute of Hainan Province, Haikou 570206, Hainan, China; Laboratory of Marine Geology Resources and Environment of Hainan Province, Haikou 570206, Hainan, China)

Abstract: The shallow sea in the north of Hainan Island is rich in marine sand resources, which are mainly composed of sand and gravel deposits. The marine sand resources are concentrated on the tidal ridge area of the east mouth of Qiongzhou Strait, estuary delta and submarine coastal slope. Through the investigation of the bedform, strata and sediments of the seafloor, the distribution and the scale of marine sand resources in two regions were discussed separately together with the marine sand geological features, and the marine sand resource volumes were also estimated. On the basis of the different sediment environments, marine sand resources potential has been discussed systematically. The marine sand in the study area is widely distributed, but the characteristics and scale of the east region and the west region are quite different. The marine sand in the west region is mainly sandy gravel and

收稿日期: 2019-06-25; 改回日期: 2020-03-03

基金项目: 2019 年海南省基础与应用基础研究计划(自然科学领域)高层次人才项目(2019RC349)、海南省国土资源厅项目“海南岛北部海砂资源调查评价”(HZ2015-235)资助。

作者简介: 全长亮, 男, 1981 年生, 高级工程师, 主要从事矿产地质和海洋地质调查研究工作; E-mail: tongchangliang@163.com。

muddy sand with a thickness of 5 to 10 meters, whereas the marine sand in the east region is dominated by sand, gravel sand and gravel with a thickness of 10 to 50 meters, suggesting a larger scale than the west region. There are totally 9 resource potential areas with a resource volume of 9.14 billion m^3 , and the rest of the area is a prospective area with a resource volume of 7.15 billion m^3 . According to such factors as topography, hydrodynamic and sedimentary environment, the marine sand sediment system can be divided into tidal sand ridge accumulation system, estuary underwater Delta accumulation system, submarine coastal slope accumulation system and erosion residue system. Among them, the tidal sand ridge accumulation system located in the shallow water area of the eastern part of the Qiongzhou Strait has a continuous distribution area of 328 km^2 , an average thickness of more than 25 meters, and a resource volume of 8.39 billion m^3 , suggesting huge resource potential.

Key words: northern sea area; marine sand resources; potentiality; evaluation; Hainan Island

About the first author: TONG Changliang, male, born in 1981, senior engineer, mainly engages in mineral geological and marine geological survey and research work; E-mail: tongchangliang@163.com.

Fund support: Supported by High-level Talent Program of Basic and Applied Basic Research Programs (Field of Natural Science) in Hainan Province (No. 2019RC349) and Hainan Provincial Department of Land and Resources project: Survey and Evaluation of Sea Sand Resources in Northern Hainan Island (No. HZ2015-235).

1 引言

中国海岸线18000多千米,陆架宽广,第四系发育,在海岸带地区的海砂资源量可观,是除了油气资源外的第二大海洋矿产资源(谭启新等,1988;印萍等,2017)。据统计,世界上约90%以上的金红石、钛铁矿、锆英石赋存于海砂中,海砂还常常富含独居石、锡石、金、金刚石、稀土等矿物,经济价值巨大(谭启新等,1988)。此外,海砂还是一种重要的非金属材料,在建筑、填料、铸造、耐火、水泥、玻璃等领域用途广泛(邵厥年等,2014)。

中国的海砂资主要集中在辽东半岛、山东半岛、台湾浅滩、琼州海峡东口、珠江口外(谭启新,1998;王圣杰等,2003)。海南岛北侧琼州海峡一带,由于受较强的往复潮流控制,沉积物类型多以砂质、砾质沉积物为主。在海峡出口处,由于流速的减缓,大量的砂质沉积物发生分选、堆积,形成了规模较大的指状沙脊,是中国重要的海砂资源富集区。

20世纪末至21世纪初,一些学者开展了琼州海峡海砂的研究工作,主要针对中国海砂资源的分布、矿床地质特征、成矿规律、富集状态和找矿方向进行了分析,并初步预测了中国浅海陆架砂矿的资源潜力为约6700亿 m^3 ,其中琼州海峡东口海砂总资源量约8亿 m^3 (刘洪树,1989;谭启新,1998;孙岩等,1999;王圣杰等,2003;曹雪晴等,2007)。但这些研究成果多为定性研究,研究尺度较大,缺少一定的调查数据支撑。本文通过对海南岛北部海域多手

段调查数据(包括水深、单道地震、沉积物粒度等)的综合分析,更加精细地研究了该区域的海砂资源分布、类型、地质特征和资源潜力。

2 研究区概况

研究区位于琼州海峡靠近海南岛一侧(图1),临高角至抱虎弯一带,分为西区 and 东区,面积分别为810 km^2 和1050 km^2 ,水深多小于50 m,只有琼州海峡中部水深急速下降至100 m左右。琼州海峡是典型的冲刷性海槽,基底由古生界、白垩系延伸和花岗岩组成,上覆数千米的新生代沉积,而第四纪以来的沉积厚度只有数十米(张虎男等,1987;彭学超,2000;梁光河,2018)。

琼州海峡是北部湾和粤西海区水沙交换的狭长通道,呈近东西走向,由东向西潮汐类型由不规则半日潮转化规则全日潮,潮流以东西向往复流为主,受地形影响,琼州海峡潮流流速较快;海峡南岸为岬湾型海岸,主要受北东向波浪的塑造,多形成砂质岸滩(陈沈良,1998;陈达森等,2006)。海峡沉积物物源复杂、类型多样,西部主要为含砾砂,东部主要分布有砂和含砾砂,近岸和海峡口门外区域则分布有粉砂质砂和砂质粉砂,显示了其水动力的减弱(陈亮等,2014)。

3 材料与方法

为了调查海砂沉积物的类型和沉积厚度,在琼州海峡海南一侧开展了地球物理、底质取样和地质

浅钻工作,如图1所示。水深测量采用南方SDE-28S单波束测深仪,精度优于0.1 m;单道地震测量采用Geo-Spark2000J单道地震系统,穿透深度超过200 m,分辨率可达亚米级;底质表层样采用箱式取样器,柱状样采用重力活塞取样器;地质浅钻工艺采用“套管护壁孔底锤击绳索取心”的方式,能同时实现高取芯率和岩心无扰动的目标。

单道地震数据采用RadExPro软件进行处理。样品粒度分析,采用筛析法结合激光粒度仪法,沉积物分类参照《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)。本文所定义的海砂是指砂级(粒径大于0.063 mm)含量超过50%的海底松散沉积物,包括砂质和砾质沉积物。

4 海砂资源的地质特征

4.1 海砂资源的自然类型

研究区内表层沉积物底质类型共7种,分别是砾、砂质砾、泥质砾、砂、砾质砂、泥质砂和泥质沉积物,其中,泥质砂、砂质砾、砂的分布面积最大,砂砾质沉积物分布面积超过研究区的85%。西区在金牌港、马袅港、马村港和临高角的近海海域为泥质沉积或岩石,其余区域均为砂砾质沉积,其中临高角外围和天尾角西北部广泛分布着砂质砾,金牌至马村港外围海域则以泥质砂为主。东区的泥质沉积物主要在铺前湾、海南湾和抱虎湾一带,基岩则

在海南角和抱虎角出露较多,其余区域均被砂砾质沉积所覆盖,以海南角为界,东侧以砂质沉积为主,西侧以砾质沉积为主(图2)。

从组分来讲,研究区沉积物以砂质组分为主(图3),平均含量可达60.8%,最大值可达100%(即为纯砂),其次为砾质组分,平均含量为31.4%,而粉砂和黏土组分平均含量为20.8%和10.3%。砂质组分主要集中于0~10%、40%~70%及90%~100%三个区间,其中20个样品砂组分含量为100%,全部位于琼州海峡东口的浅滩海域,也表明该区域沉积物组分集中度好,分选性好,海砂质量优良。有超过一半的样品砾组分含量小于10%,其中不含砾样品超过五分之二,砾组分含量较多的集中于20%和40%左右,主要分布于西区,及东区南渡江至铺前湾一带,表明该区域水动力条件较强,同时也是物质来源的一种指示。粉砂和黏土组分在超过七成的样品中都有体现,但其含量相对较少,其中有七成的样品粉砂和黏土组分含量小于10%,泥质成分含量较高的样品主要集中于近岸海湾内。含泥量的分区性表明了研究区水动力较强,在没有较多物质补给的情况下,细粒沉积物得不到比较好的保存,被潮流搬运至近岸或海湾内。

4.2 海砂资源分布及规模

研究区海砂分布范围较广,几乎覆盖全部区域,砂质与砾质沉积占比相当。根据沉积物类型、

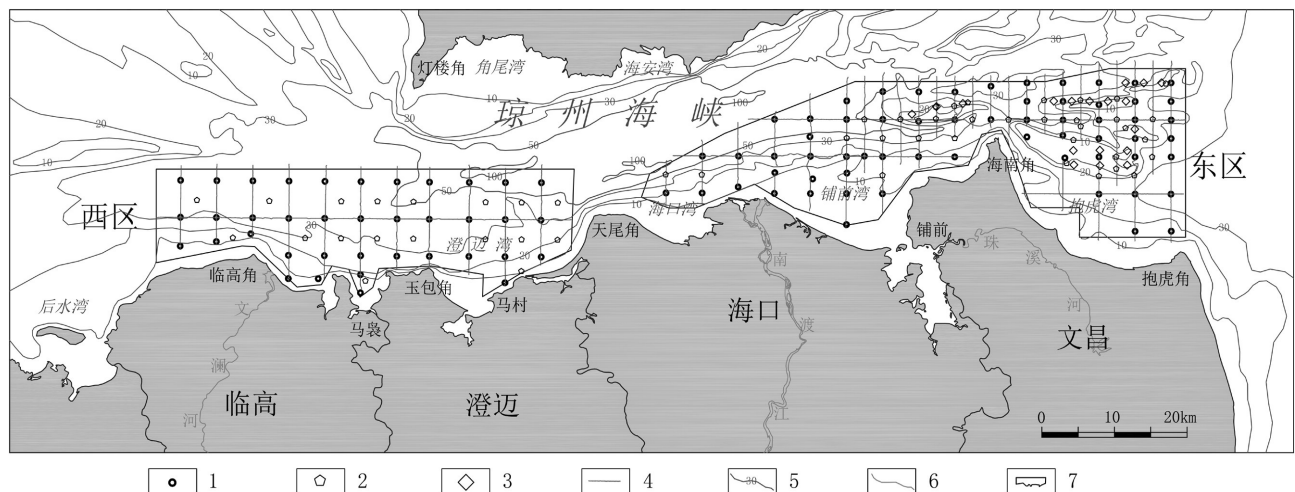


图1 研究区范围及采样位置图

1—表层样;2—柱状样;3—地质浅钻;4—物探测线;5—等深线;6—河流;7—研究区

Fig.1 The location of the study area and sampling sites

1—Surface sediment sample;2—Sediment core;3—Drill hole;4—Geophysical measuring line;5—Submarine contour;6—River;7—Survey area

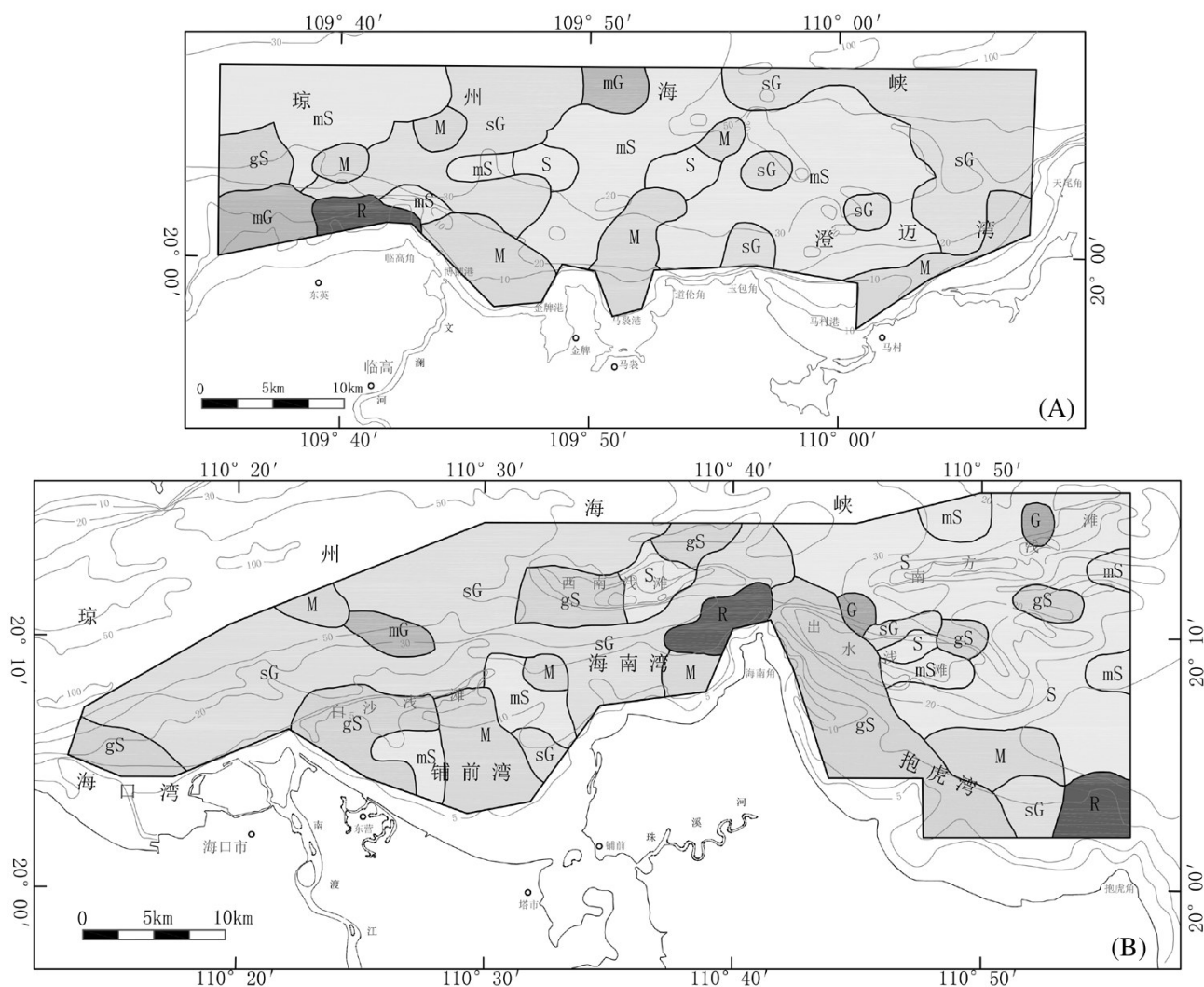


图2 研究区底质类型图(A—西区;B—东区)

R—基岩;G—砾;sG—砂质砾;mG—泥质砾;S—砂;gS—砾质砂;mS—泥质砂;M—泥质沉积物(粉砂和黏土)

Fig. 2 The classification of surface sediments in the study area

R—Bedrock; G—Gravel; sG—Sandy gravel; mG—Muddy gravel; S—Sand; gS—Gravy sand; mS—Muddy sand; M—Muddy sediment (silty sand and clay)

水下地形地貌、水动力条件和沉积环境等因素,可将研究区海砂大致分为7个区域,其中西区4个,东区3个(图4)。

研究区西区等深线走向与海岸基本一致,水深一般在20~50 m,潮流流速快,处于侵蚀环境,属琼州海峡冲刷槽地貌。其中位于西区东北部(天尾角外)海域是琼州海峡最窄段,地貌上为中央水道的冲刷深槽区,侵蚀强烈,砂泥质保留较少,与天尾角近岸的水下三角洲沉积共同组成了W4区的砾质沉积区。W3区位于澄迈湾广大海域,水深10~50 m,近岸为岬湾海岸的水下岸坡,远岸为冲刷槽,水动

力较海峡中部稍弱,局部地形、环流和近岸物质的输入,使得该区域以泥质砂为主,并伴有少量的砾质沉积;W2区和W1区均位于琼州海峡西口,水动力向西逐渐减弱,使得砾质成分可能优先沉积,形成了“东砾西砂”的沉积格局。

东区海砂资源主要分为3个区域,E1区位于海峡中部,近岸为南渡江水下三角洲沉积,水深不超过30 m,远岸水深迅速超过50 m(最长达100 m),属冲刷深槽地貌,受到南渡江物源和中央水道的强潮流作用,沉积物以砂质砾为主。E2区主要包括铺前湾和海南湾一带,属岬湾海岸水下岸坡地貌,水

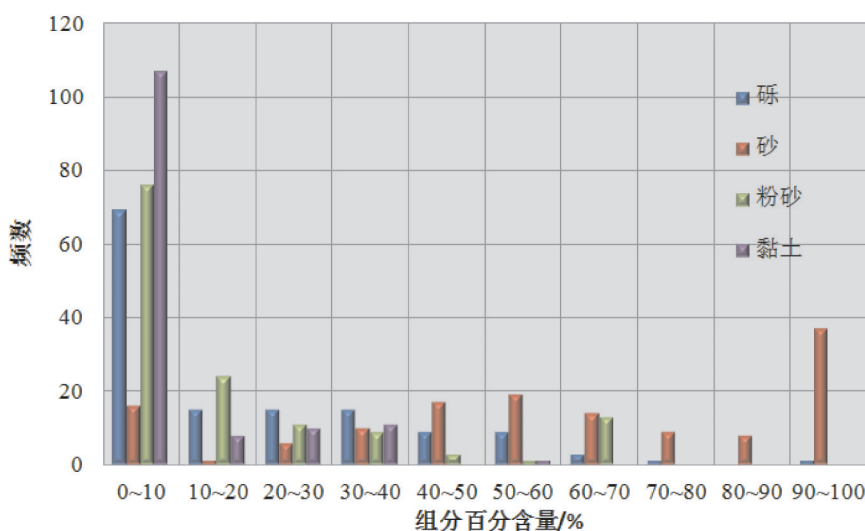


图3 沉积物粒度组分统计

Fig.3 The statistics of grain size composition of sediments

深小于20 m,由于白沙浅滩等地形的遮蔽,该区域水动力较弱,海砂中局部含泥量较高(含泥5%~15%),加上局部水动力、地形的影响,和南渡江粗粒物质的注入,部分区域砾石组分同样较高,显示出E2区复杂的沉积环境和物源。E3区位于琼州海峡东口,主要由三处浅滩和其中的冲刷槽组成,浅滩5~20 m之间,冲刷槽水深30~50 m,由于流速减慢,大量砂质组分在此沉积,形成了巨大的指状沙脊群,而冲刷槽一方面接受海峡内粗粒物质的沉积,一方面发生侧蚀,使得一部分砂质向浅滩处再次发生堆积,浅滩规模进一步加大(金波等,1982;叶春池,1986)。E3区沉积物主要为砂质成分,包括砂和砾质砂,局部为砾和砂质砾。砾含量分别是5%~15%和30%~60%,多数含泥量小于5%,粒级以中砂为主。

4.3 海砂沉积厚度

从琼州海峡东口浅滩区的典型地震剖面(22号线)分析(图5),大致可识别出4个反射界面,共3层,分别对应全新统T1、更新统T2(推测)和前第四系T3(推测),其基底为燕山期花岗岩。沙脊处T1层内部多呈空白或杂乱反射结构,反映了其内部能力消减较大,这与砂质沉积物的特性相近。而通过钻孔揭露(平均孔深约15 m),T1层岩性均为砂,粒级主要为中砂和细砂。从剖面图上可知,全新世沉积T1厚度变化较大,侵蚀沟槽处大致10 m,而沙脊处则有40~50 m,且侵蚀沟槽地层成层性较好,代表

了原生的沉积环境,而沙脊处则具有明显的多次堆积的特点。

根据底质和物探资料,圈定了本区域海砂的厚度范围(图6)。研究区海砂多为全新世沉积,厚度具有一定规模,但东西区差异较大。西区由于受到强潮流的侵蚀,海峡中部缺少全新世沉积,一般厚度在5~10 m,局部厚度较大,但与沉积物类型并无太大关联。在天尾角西北部海域,虽然水动力较强,但其水下为南渡江古三角洲,沉积量巨大,厚度可超30 m(全长亮等,2018)。东区除中央水道和部分基岩外,全新世沉积厚度较大,E3区为海峡东口潮流沙脊区,由于海峡内物质的输入和堆积,形成了厚大的浅滩砂体,一般厚度15~40 m,多数被钻孔所证实,最厚处位于南方浅滩,可达67 m,浅滩间冲刷槽厚度稍薄,但也在15 m左右。东区其他地段海砂厚度不大,基本在10~15 m,只有在白沙浅滩、南渡江口和西南浅滩西部深槽中有超过20 m的海砂,主要可能是陆源物质注入和局部水动力差异所致。

5 海砂资源成因分析

海砂的形成受控于地貌形态、物质供给和水动力环境等因素(谭启新等,1988)。不同沉积环境的海砂在分布、规模、成分、质量等方面存在较大差异。研究区属琼州海峡水道,东西向潮流为主要水动力环境,北东向的常浪环境则塑造了沿岸岬湾海岸地貌,陆源物质主要来源与南渡江和其他中小河

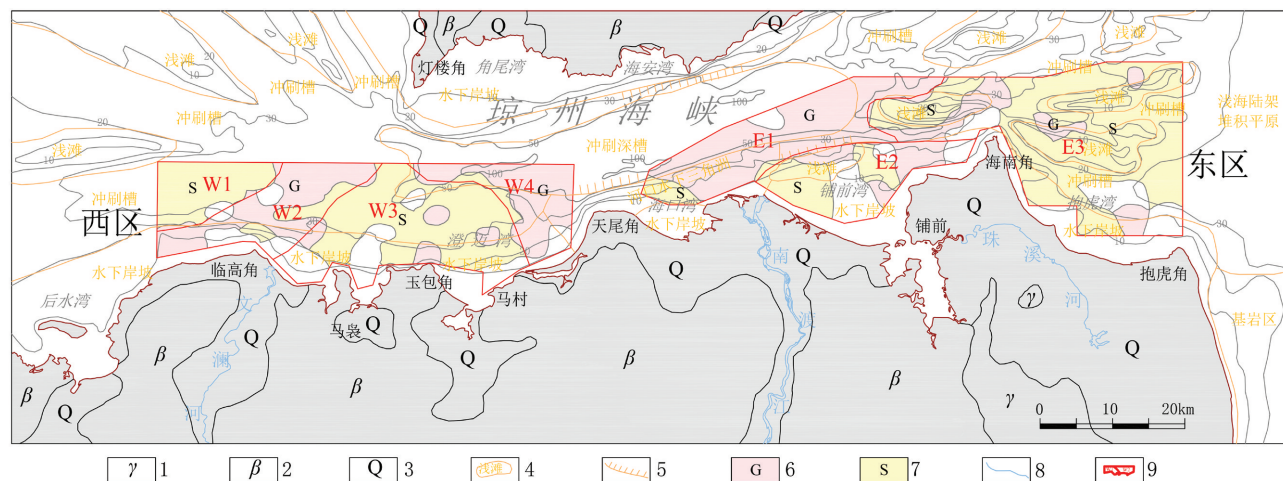


图4 研究区海砂分布图

1—花岗岩;2—第四纪火山岩;3—第四系;4—地貌类型;5—水下陡坡;6—砾质沉积物;7—砂质沉积物;8—河流;9—海砂分区

Fig.4 The distribution of marine sand in the study area

1—Granite;2—Volcanic Rock;3—Quaternary;4—Geomorphic type;5—Underwater slope;6—Gravel sediments;7—Sand sediments;8—River;9—The region of marine sand

流,海峡内属侵蚀环境,大量物质被搬运至海峡口门处堆积。因此,根据海砂的地貌形态、沉积环境和形成机制,可将海砂沉积体系初步划分为4类。

(1)潮流沙脊堆积体系。主要位于琼州海峡东口,分布有西南浅滩、南方浅滩和出水浅滩,及浅滩间冲刷槽,浅滩水深一般小于20 m,其中心部位小于5 m或低潮时出露。由于琼州海峡受到地形轮廓的影响,东西向往复潮流强劲,对海底的冲刷作用

强烈。前人研究结果显示,琼州海峡内出露大范围的砾质碎屑沉积,或青灰色硬黏土,其中青灰色硬黏土为前第四纪的浅海相沉积,侵蚀特征明显,最大侵蚀厚度达100 m(张虎男等,1987)。

潮流沙脊的物源主要来自于海峡中央水道,全新世以来,受到海峡强潮流的作用,使得海底沉积物发生再悬浮和分选,粗粒(砂质和砾质)物质堆积于沙脊区,细粒物质无法沉积(被搬运至水动力较

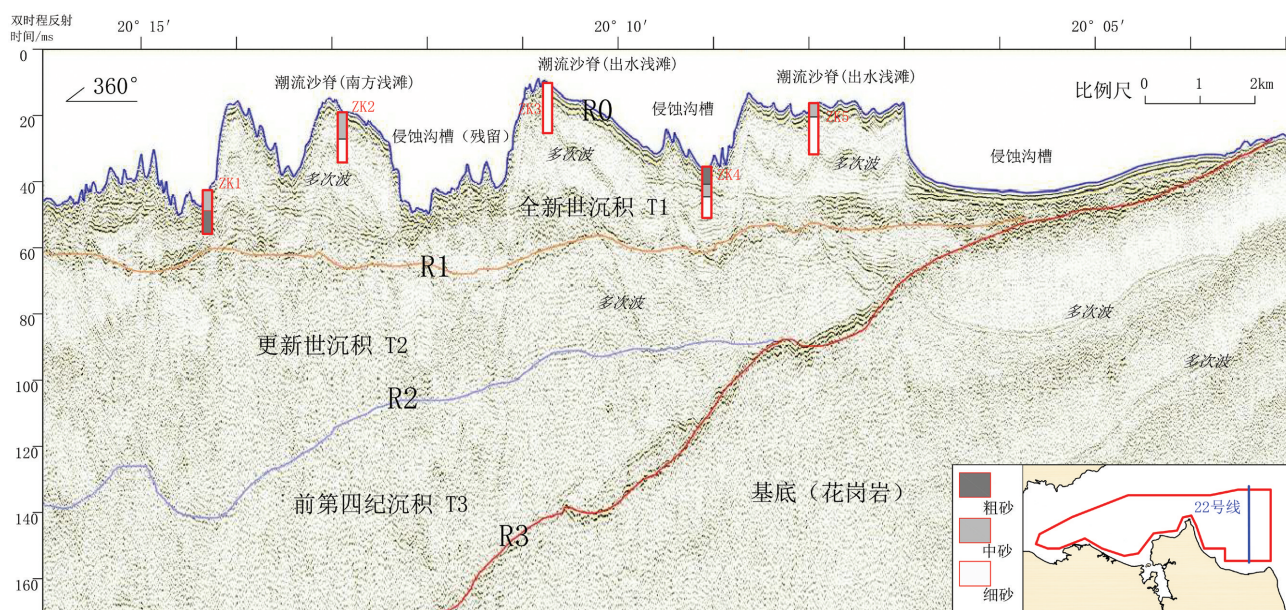


图5 研究区22号线综合地震剖面图

Fig.5 The integrated seismic profile of Line 22 in the study area

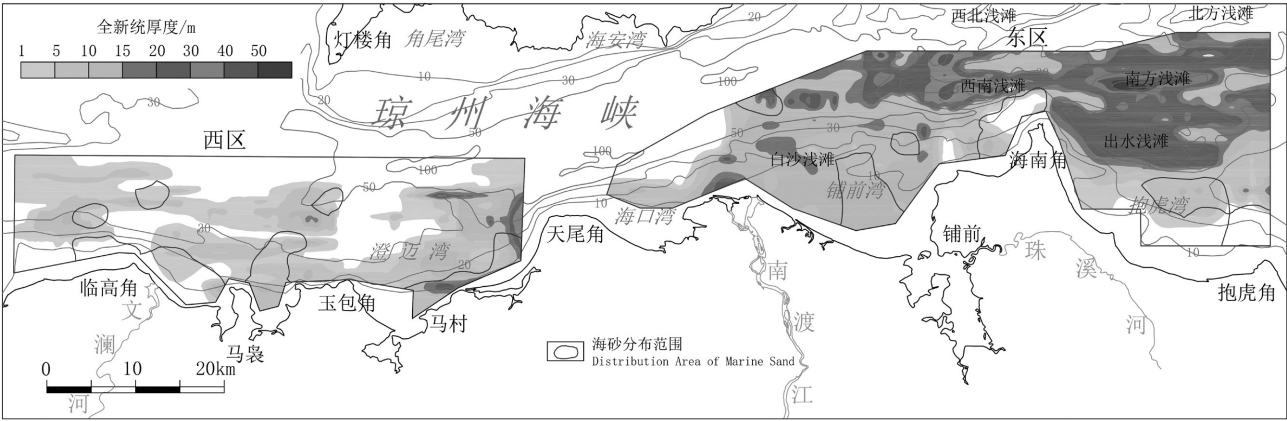


图6 研究区全新统沉积厚度图
Fig.6 The Holocene sediment thickness in the study area

弱的海湾内部),导致浅滩处砂质沉积逐渐增多,而浅滩间形成冲刷槽,水动力增强,物质进一步向浅滩发生横向运移,最终形成现在的形态(金波等,1982;刘振夏等,1998)。浅滩长度几十千米,宽度数千米,平均厚度超过20 m,大致呈近东西走向,并向东呈辐射状发散(开口角度约为30°)。潮流砂脊沉积物类型以砂、砾质砂、砂质砾为主,粒级为中粗砂和中细砂,分选中等或较好。根据其底形特征,潮流沙脊堆积体系还处在不断向东南堆积的动态

过程中,沙脊顶部在加高,沟槽在加深,潮流三角洲规模在进一步扩大(金波等,1982;刘振夏等,1998;程和琴等,2003)。因此,潮流沉积体系具有充足的物质来源、合适的水动力环境和巨大的堆积空间,海砂资源潜力巨大,且在不断加积中。

(2)河口水下三角洲堆积体系。主要位于南渡江口和天尾角外缘海域,及附近海域,水深一般小于40 m,地貌类型主要为河口外的水下三角洲和被潮流切割为水下陡坎的三角洲前缘,沉积物以泥质

表1 研究区海砂资源潜力估算
Table 1 The estimation of marine sand resource potential in the study area

分区类型	区块名称	平均厚度/m	分布面积/km ²	体积/10 ⁸ m ³	沉积物类型	自然地理特征
潜力区 资源量	P1	21.3	2.3	0.50	砂质砾、泥质砂	琼州海峡中部接近冲刷深槽 天尾角西北侧,古南渡江水下 三角洲(Pe-Piper. et al,2016)
	P2	25.3	8.7	2.20	砂质砾	
	西区小计	24.5	11.0	2.70		
	P3	19.6	7.6	1.49	砂质砾	南渡江水下三角洲堆积体
	P4	17.5	12.5	2.18	砾质砂、砂质砾	白沙浅滩及北侧冲刷槽
	P5	17.5	2.2	0.39	砂质砾	铺前湾外围冲刷槽
	P6	18.8	3.6	0.68	砂质砾、泥质砂	铺前湾外围冲刷槽
	P7	29.4	63.5	18.6	砾质砂、砂、砂质砾	西南浅滩及周边
	P8	27.2	116	31.6	砂、砾质砂、泥质砂、砾	南方浅滩及周边
	P9	22.7	148	33.7	砂、砾质砂、泥质砂、砾	出水浅滩及周边
远景区 资源量	东区小计	25.1	354	88.7		
	合计	25.1	365	91.4		
	西区	5.2	390	20.3	泥质砂、砂质砾、泥质砾、 泥质砂、砂	岬湾海岸水下岸坡,琼州海峡 冲刷槽及部分浅滩区
	东区	9.7	528	51.2	砂、砂质砾、砾质砂、泥质 砂、砾	
	合计	7.8	919	71.5		

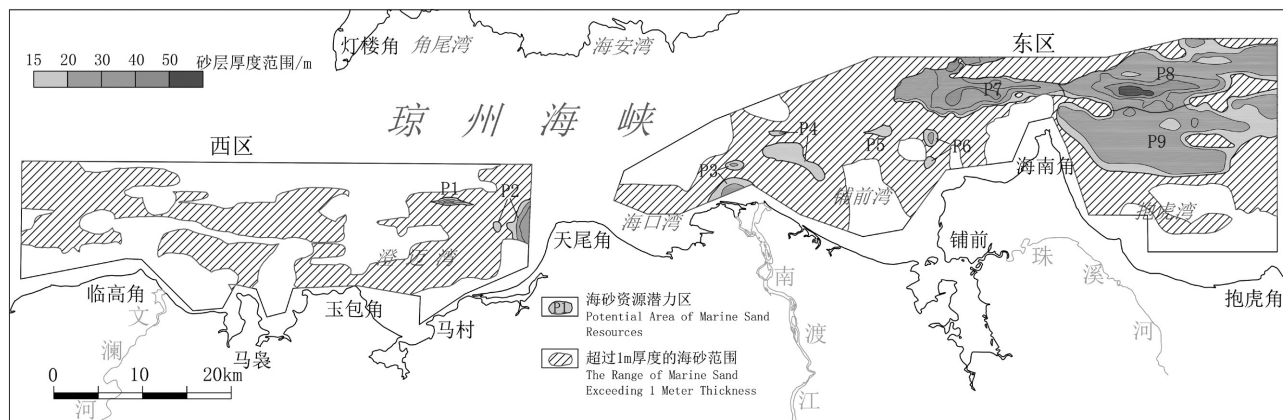


图7 研究区海砂资源潜力图

Fig.7 The marine sand resource potential in the study area

砂质砾和砂质砾为主, 粒级为中砂和中细砂, 含泥量一般不超过 15%, 分选较差, 具有一定陆源沉积物特点。该堆积体系的物质主要来源于晚更新世以来的南渡江流域, 粗颗粒物较多, 同时受到琼州海峡往复流的侵蚀, 其三角洲影响范围不大, 多分布于离岸不超过 5 km 的扇形范围, 全新统厚度 15~20 m, 向海方向逐渐减薄, 由于海平面的升降影响, 其内部多含泥质夹层 (Pe-Piper et al, 2016)。河口水下三角洲堆积体系物质来源充足 (近年来由于上游水库的建设泥沙在逐步减少), 但受到潮流的冲刷, 其沉积空间有限, 无法形成数十千米的堆积体, 且海砂分选较差, 含泥量较高, 海砂资源潜力虽不及潮流沙脊体系, 但其离岸近、厚度大、分布集中和易于开采, 是海南省海砂资源的重要来源地。

(3) 岬湾海岸水下岸坡堆积体系。主要位于海南岛北部近岸 20 m 以浅的海湾内。该沉积体系主要是全新世岸滩的自然延伸, 受北东向波浪塑造和沿岸流影响较大, 海砂沉积一般延伸至海峡冲刷槽边缘, 厚度在 10 m 左右, 粒度组分多样, 反映了其多源的物质供给。该体系物源主要分两类, 一类为琼州海峡水道沉积物的再搬运, 颗粒往往较粗, 堆积于湾口, 形成沙坝或线状浅滩; 另一类来自于陆源物质的输入, 经过湾内沿岸流和波浪的改造和分选, 粒度相对较细, 且分布具有一定的韵律性, 同时由于水动力较弱, 细粒悬浮物多在此堆积, 部分区域含泥量较高 (刘振夏等, 1998; 彭学超, 2000; 李占海等, 2003)。该体系的物质来源多为中小河流, 其沉积规模不大, 且湾内水动力较弱, 泥质成分较多,

海砂成矿条件一般, 资源潜力有限。

(4) 侵蚀残留体系。主要位于琼州海峡中央水道的冲刷深槽或冲刷槽, 水深一般 30~50 m, 局部超过 100 m。沉积物类型多样, 包括砂、砾质砂、泥质砂、砂质砾等, 目前处于潮流侵蚀环境中, 沉积物组分中多含砂和砾质, 泥质保存较少。沉积厚度较小, 侵蚀较强烈, 部分区域基本无全新世沉积, 出露更新世或上新世地层, 其沉积环境复杂 (彭学超, 2000)。因此, 该体系可能含少量海砂, 但其规模较小, 且在不断侵蚀中, 资源开发意义不大。

6 海砂资源潜力评价

根据不同地形、水动力和沉积环境, 设置一定的边界条件对研究区海砂资源进行圈定, 进而估算其资源潜力。圈定依据为: 在现阶段技术条件下, 开采环境条件较好, 具有一定厚度 (全新统) 海砂。以目前的技术水平, 采砂活动多位于 50 m 水深以浅的区域, 本次计算将 50 m 作为开采技术条件的最大值。考虑到本区域海砂沉积厚度差异较大, 将平面面积不小于 1 km²、厚度不低于 15 m 的砂质 (包括砾质) 沉积物看做规模较大的砂体。以此为依据, 分别将水下地形图、砂层等厚度图和海砂分布图进行叠置分析, 取其公共区域作为资源潜力区范围。其他沉积厚度超过 1 m 的海砂区 (不考虑水深条件) 将作为海砂远景区进行资源量的估算。资源量估算采用公式 (1):

$$V=SH \quad (1)$$

式中: V —海砂体积 (m³); S —海砂分布面积

(m^2); H —海砂平均厚度(m)。

研究区共划分出9处资源潜力区块,2处位于西区,7处位于东区,面积合计365 km^2 ,平均厚度25.1 m,资源量为91.4亿 m^3 。详见图7和表1。总体来说,东区的海砂规模远大于西区,分布面积达354 km^2 ,资源量达88.7亿 m^3 ,占比超过97%。而研究区的海砂远景区分布面积较大,合计919 km^2 ,东西区相差不大,厚度均不超过10 m,其远景资源量仅为71.5亿 m^3 ,不及琼州海峡东口浅滩区,表明远景区的资源潜力有限。

7 结 论

(1)研究区内表层沉积物底质类型共7种,分别是砾、砂质砾、泥质砾、砂、砾质砂、泥质砂和泥质沉积物,其中泥质砂、砂质砾、砂的分布最广,砂、砾组分占比相当,且具有一定的分带性。研究区海砂资源分布面积超85%,西区水动力较强,以侵蚀环境为主,呈现砂砾相间分布格局;东区则以海南角为界,以西为砾质沉积,以东为砂质沉积。

(2)研究区海砂多为全新世沉积,厚度具有一定规模,但东西区差异较大。西区厚度5~10 m,东区厚度一般超过10 m,其中在琼州海峡东口的指状沙脊区、白沙浅滩和南渡江口处,沉积厚度相对较大,多在20~50 m。

(3)研究区可划分9处资源潜力区,面积365 km^2 ,平均厚度25.1 m,其资源量为91.4亿 m^3 ,远景区资源量为71.5亿 m^3 。根据地形地貌、水动力和沉积环境等因素,研究区海砂可分为4类沉积体系,分别是潮流沙脊堆积体系、河口水下三角洲堆积体系、岬湾海岸水下岸坡堆积体系和侵蚀残留体系。其中潮流沙脊堆积体系海砂资源潜力最大,其潜力区资源量估算可达83.9亿 m^3 。

References

- Cao Xueqing, Tan Qixin, Zhang Yong, Jiang Yuchi, Yuan Xiaojun. 2007. Characteristics of construction marine sand deposits in offshore area of China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(2): 164–170(in Chinese with English abstract).
- Chen Heqin, Hu Hongbin, Jiang Zhiyong, Wang Baocan. 2003. Equilibrium range spectra analysis of nearshore bedforms in the East Qiongzhou Strait[J]. *The Ocean Engineering*, 21(4):97–103(in Chinese with English abstract).
- Chen Dasen, Chen Bo, Yan Jinhui, Xu Huifen. 2006. The seasonal variation characteristics of residual currents in the Qiongzhou Strait[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (2):12–17 (in Chinese with English abstract).
- Chen Liang, Zhang Yufen, Li Tuanjie, Yang Wenfeng, Chen Jing. 2014. Sedimentary environment and its evolution of Qiongzhou Strait and nearby seas since last ten thousand years[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geoscience*, 39(6):696–704(in Chinese with English abstract).
- Chen Shenliang. 1998. Coastal dynamic geomorphological researches on south coast of Qiongzhou Strait[J]. *Tropic Oceanology*, 17(3):35–42(in Chinese with English abstract).
- Jin Bo, Bao Caiwang, Lin Jisheng. 1982. Geomorphic feature and origin of the deltas at the east and west mouths of Qiongzhou Strait[J]. *Marine Geological Research*, 2(4):94–101(in Chinese with English abstract).
- Liang Guanghe. 2018. A study of the genesis of Hainan Island[J]. *Geology in China*, 45(4): 693–705(in Chinese with English abstract).
- Liu Hongshu. 1989. Enrichment laws of quaternary littoral placer deposits in China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 9(2): 41–49(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhenxia, Xia Dongxing, Wang Kuiyang. 1998. Tidal depositional systems and patterns of China's continental shelf[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 29(2):141–147(in Chinese with English abstract).
- Li Zhanhai, Ke Xiankun, Wang Qian, Gao Jianhua. 2003. Characteristics of water and sediment transport in the Qiongzhou Strait[J]. *Geographical Research*, 22(2):151–159(in Chinese with English abstract).
- Pe—Piper G, Piper D J W, Wang Ying, Zhang Yongzhan, Corwin Trotter, Ge Chendong, YinYong. 2016. Quaternary evolution of the rivers of northeast Hainan Island, China: Tracking the history of avulsion from mineralogy and geochemistry of river and delta sands[J]. *Sedimentary Geology*, 333:84–99.
- Peng Xuechao. 2000. Geological structure characteristics and cause of formation analyzing in Qiongzhou Strait, South China Sea[J]. *Geological Research of South China Sea*, (12):44–57.
- Shao Juenian, Tao Weipin. 2014. Handbook of Industrial Requirements for Mineral Resources[M]. Beijing: Geological Publishing House, 563–585(in Chinese).
- 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 with English abstract).
- Tan Qixin. 1998. The marine sand deposits of China[J]. *Geology in China*, 25(4):23–26(in Chinese with English abstract).
- Tan Qixin, Sun Yan. 1988. The Placer Deposits of China's Sea Coast[M]. Beijing: Science Press, 83–142(in Chinese).
- Tong Changliang, Li Gang, Chen Fei, Zhang Kuanghua. 2018. The geological characteristics of marine sand resources in the northeast

- sea of Hainan Island and the formation study[J]. Marine Geology Frontiers, 34(1):12–19(in Chinese with English abstract).
- Wang Shengjie, Liu Xiqing, Dai Qinfen, Li Xuejie, Chen Hong. 2003. Distribution characteristics of marine aggregate resources and potential prospect in China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 23(3):83–89(in Chinese with English abstract).
- Wang Wenjie. 1995. The development of the wave control coast in the northeast Hainan Island[J]. Acta Oceanologica Sinica, 17(3):65–71 (in Chinese with English abstract).
- Ye Chunchi. 1986. Distribution of sediments and submarine topography of Qiongzhou Strait[J]. Tropical Geography, 6(4):346–353(in Chinese with English abstract).
- Yin Ping, Lin Liangjun, Chen Bin, Xiao Guoqiang, Cao Ke, Yang Jilong, Li Meina, Duan Xiaoyong, Qiu Jiandong, Hu Yunzhuang, Wang Lei, Sun Xiaoming. 2017. Coastal zone geo-resources and geo-environment in China[J]. Geology in China, 44(5): 842–856 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hunan, Chen Weiguang. 1987. Preliminary study on formation of Qiongzhou Strait[J]. Acta Oceanologica Sinica, 9(5):594–602(in Chinese with English abstract).
- 曹雪晴, 谭启新, 张勇, 姜玉池, 原晓军. 2007. 中国近海建筑砂矿床特征[J]. 岩石矿物学杂志, 26(2):164–170.
- 程和琴, 胡红兵, 蒋智勇, 王宝灿. 2003. 琼州海峡东口底形平衡域谱分析[J]. 海洋工程, 21(4):97–103.
- 陈达森, 陈波, 严金辉, 徐辉奋. 2006. 琼州海峡余流场季节性变化特征[J]. 海洋湖沼通报, (2):12–17.
- 陈亮, 张玉芬, 李团结, 杨文丰, 陈静. 2014. 琼州海峡及周边海域沉积环境及近万年以来沉积演化[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 39(6):696–704.
- 陈沈良. 1998. 琼州海峡南岸海岸动力地貌研究[J]. 热带海洋, 17(3): 35–42.
- 金波, 鲍才旺, 林吉胜. 1982. 琼州海峡东、西口地貌特征及其成因初探[J]. 海洋地质研究, 2(4):94–101.
- 梁光河. 2018. 海南岛的成因机制研究[J]. 中国地质, 45(4): 693–705.
- 刘洪树. 1989. 我国滨海砂矿在第四系中的富集规律[J]. 海洋地质与第四纪地质, 9(2):41–49.
- 刘振夏, 夏东兴, 望揆洋. 1998. 中国陆架潮流沉积体系和模式[J]. 海洋湖沼通报, 29(2):141–147.
- 李占海, 柯贤坤, 王倩, 高建华. 2003. 琼州海峡水沙输运特征研究[J]. 地理研究, 22(2):151–159.
- 彭学超. 2000. 琼州海峡地质构造特征及成因分析[J]. 南海地质研究, (12):44–57.
- 邵厥年, 陶维屏. 2014. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京:地质出版社, 563–585.
- 孙岩, 韩昌甫. 1999. 我国滨海砂矿资源分布及开发[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.
- 谭启新, 孙岩. 1988. 中国滨海砂矿[M]. 北京:科学出版社, 83–142.
- 全长亮, 黎刚, 陈飞, 张匡华. 2018. 海南岛东北部海域海砂资源特征及成因[J]. 海洋地质前沿, 34(1):12–19.
- 王圣洁, 刘锡清, 戴勤奋, 李学杰, 陈弘. 2003. 中国海砂资源分布特征及找矿方向[J]. 海洋地质与第四纪地质, 23(3):83–89.
- 王文介. 1995. 琼东北浪控海岸的发育[J]. 海洋科学, 17(3):65–71.
- 叶春池. 1986. 琼州海峡沉积与地形发育[J]. 热带地理, 6(4):346–353.
- 印萍, 林良俊, 陈斌, 肖国强, 曹珂, 杨吉龙, 李梅娜, 段晓勇, 仇建东, 胡云壮, 王磊, 孙晓明. 2017. 中国海岸带地质资源与环境评价研究[J]. 中国地质, 44(5):842–856.
- 张虎男, 陈伟光. 1987. 琼州海峡成因初探[J]. 海洋学报, 9(5):594–602.

附中文参考文献