

周娇, 蔡观强, 邹佩琦, 等. 海南岛东南部海域有用重砂的资源潜力[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(12): 58-65.

海南岛东南部海域有用重砂的资源潜力

周娇^{1,2}, 蔡观强¹, 邹佩琦¹, 钟和贤¹, 黄永健¹

(1 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075;

2 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458)

摘要: 为了进一步查明海南岛东南部海域砂矿资源潜力, 在海南岛东南部平均水深 30~100 m 的海域, 通过对 815 km 的单道地震资料处理解释, 发现晚更新世以来研究区发育大量三角洲沉积, 为有利砂矿沉积区; 并通过在该区域采集的 70 个表层及 23 个柱状样沉积物样品进行了重矿物研究, 计算了钛铁矿、锆石、金红石、独居石 4 种有用重砂矿物的品位, 讨论了这 4 种有用重砂矿物平面上和纵向的品位状况。结果表明, 有用重砂矿物主要矿种为锆石和独居石, 其次为金红石和钛铁矿; 有用重砂矿物的富集受到成矿物质来源、沉积物类型、水动力分选等多种因素控制。最终在海南岛东南部海域划分了 2 个潜在的有用重砂资源成矿远景区, 其中黎安港-港坡港近海重砂矿物成矿远景区, 平均水深 30~60 m, 面积为 1 019.19 km², 沉积厚度约 1.5 m, 保守估计重砂矿潜在资源量为 4.92×10⁸ t, 具有较大资源潜力, 为将来开采指明方向。

关键词: 单道地震; 柱状样; 有用重砂; 工业品位; 潜在资源量; 海南岛

中图分类号: P744.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.221

0 引言

在滨(浅)海地带, 由于河流、波浪、海流和潮汐作用, 具有工业价值的黑色金属矿物、有色金属矿物、稀有金属矿物以及非金属矿物等富集于滨海沉积物中, 从而形成次生富集矿床, 其主要包括磁铁矿、金红石、钛铁矿、锆石、独居石、铬铁矿、石榴石、金、锡石、铂、铌钽铁矿等常见矿种^[1]。它们多是稀有元素和贵重金属, 用途极其广泛, 且在高新技术与新材料开发中有重大作用^[2]。海南省环岛海岸类型多样, 有利于砂矿沉积和富集, 形成丰富的砂矿资源, 矿种为钛铁矿、锆石、独居石等^[3-5]。

20 世纪 60 年代至 21 世纪初, 一些学者如陈忠等^[5]、刘洪滨^[6]、阮汀^[7]、谭启新^[8-9]、杨慧宁等^[10]总结了我国浅海砂矿分布异常, 在南海圈定锆英石、钛铁矿、金红石、锐钛矿、独居石等 I 级异常区

10 处、II 级异常区 20 处。近几年, 也有不少学者^[11-17]

在海南岛周边浅海区开展了砂矿资源潜力调查与评价工作, 对海南岛周边浅海表层沉积物砂矿资源分布有一定的认识。但总得来说, 海南岛海域砂矿还属于普查-普查阶段^[15], 对于海南岛东南部地区的重砂矿物调查程度较局部, 林明坤等^[11]和潘燕俊等^[12]仅对海南岛东部万宁市某浅海以及东澳南后海至田头港一带 <30 m 水深锆钛矿物特征进行了分析, 对于 >30 m 水深的重砂矿物未作研究, 更缺乏深度上重砂矿分布研究, 而韩孝辉等^[13]对海南岛东部滨海砂矿资源分布特征做了初步总结, 未对其进行重矿物品位分析, 缺乏进一步的勘查与深入研究。

本文针对现存研究的不足, 依托 1: 25 万三亚幅海洋区调项目, 利用近年在海南岛东南部 30~100 m 水深海域采集的 70 个表层样和 23 个柱状样样品进行了重矿物平面和垂向研究, 利用高分辨率单道地震资料(图 1)获取有效浅地层信息, 在此基础上详细讨论了钛铁矿、锆石、金红石、独居石品位状况及其形成条件, 并划分了海南岛东南部海域潜在的有用重砂资源远景区, 并估算了资源量, 为将来的进一步勘探开发提供了科学依据。

收稿日期: 2020-12-24

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项(GML2019ZD0201); 中国地质调查局项目(DD20190627, DD20160138, DD20191002, DD20190209, DD20190378, DD20189642)

作者简介: 周娇(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事海洋地质调查、矿产地地质研究方面的工作。E-mail: 464946523@qq.com

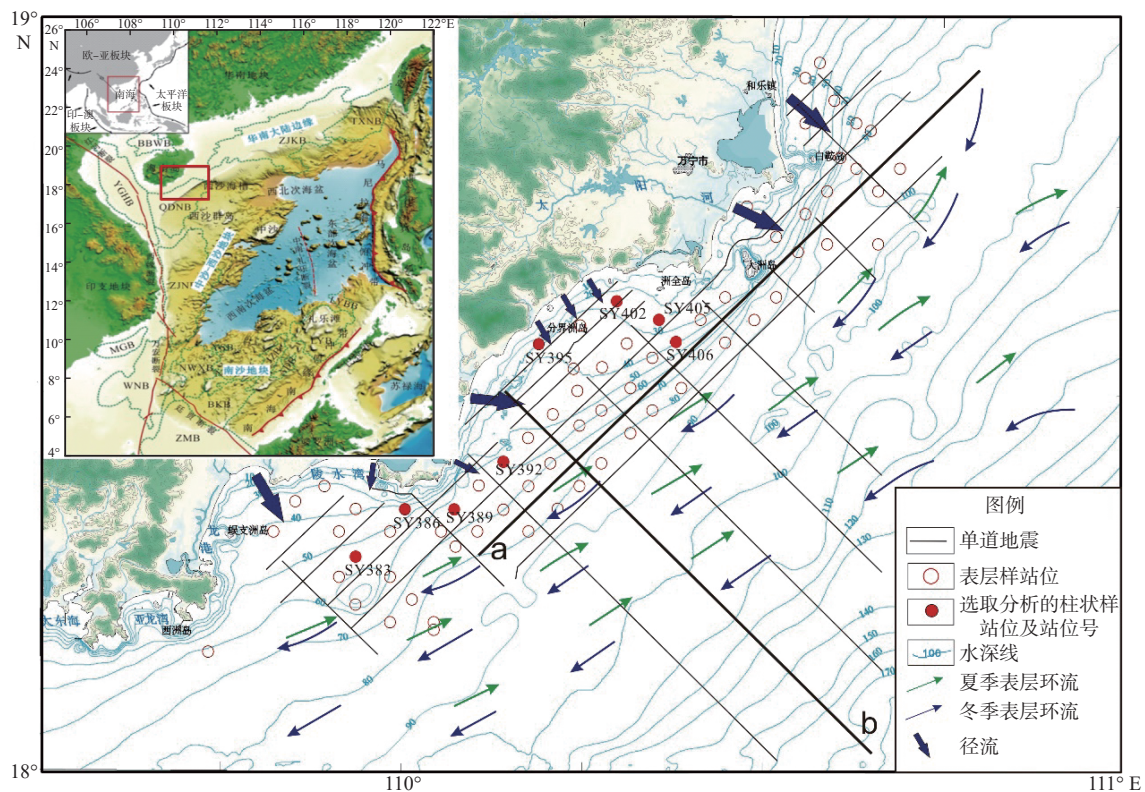


图 1 研究区站位位置及海南岛东南部夏冬海流模式^[18]

Fig.1 Location of sampling stations in study area and summer and winter water circulation patterns in southeastern waters off Hainan Island^[18]

1 资料采集与处理

1.1 单道地震

为了查清研究区海底沉积地层特征,在海南岛东南部浅海布设了多条单道地震测线(图 1),辅助砂矿资源调查。本次单道地震剖面的采集采用电火花震源,采集数据记录长度 1 000 ms,打印模拟剖面宽度 400 ms;垂直分辨率满足 >3 m;数据同时进行纸记录和硬盘记录,数据记录格式为标准 SEG-Y 格式;正常情况下,连续漏测 <250 m,累计漏测小于整条测线的 6%;全部资料经自检,合格率 100%。单道地震采集采用的软件为 Ixsea Delph Seismic。地震数据处理使用 Omega2018 地震资料处理系统,处理进行了去除噪声提高剖面信噪比、道间振幅均衡、压制多次波、地理位置计算等,能够分辨出海底更新世以来的沉积层。

1.2 表层样及柱状样

(1) 样品与鉴定标准

在研究区海域布置了 70 个取样站位(图 1),通

过箱式取样及重力柱状取样获得了 70 个表层沉积物样品、23 个柱状样样品,对其进行了重矿物鉴定分析。样品测试在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。检测依据《中华人民共和国国家标准 GB/T 12763.8—2007 中海洋调查规范》第八部分,海洋地质地球物理调查中 6.4 海底矿物鉴定的要求完成的。主要检测仪器为双目显微镜、高频介电矿物分选仪、带式矿物电磁分选仪。鉴定依据参考《地质矿产实验室测试质量管理规范》岩石矿物鉴定 DZ/T 0130.9—2006。在鉴定过程中选取了 10% 的样品进行了重复内检质量控制,鉴定数据合格率 100%。满足研究需求。

(2) 品位计算

按照 1975 年《海洋调查规范》的公式计算独居石、钛铁矿、锆石和金红石(锐钛矿)的重量百分含量和品位,每立方米沉积物的干重以 1 800 kg 计^[19-20]。参照地质矿产部 1972 年出版的《矿产工业要求参考手册》和国家矿产委员会 1986 年颁布的《金属砂矿工业要求及矿床规模标准》的砂矿品位评价要求,并根据研究区海域样品的实际情况,确定了各有用重砂矿物品位级别的划分方案(表 1、2)。

表 1 各有用重砂矿物划分标准
Table 1 Classification standard of some valuable heavy sand minerals

矿种	工业品位/(g/m ³)	边界品位/(g/m ³)	异常区/(g/m ³)	参考资料
钛铁矿	15 000	10 000	1 500	谭启新等 ^[8] ; 沈若慧等 ^[21]
锆石	1 000	500	250	陈忠等 ^[22] ; 金秉福等 ^[19]
金红石 (锐钛矿)	2 000	1 000	100	周娇等 ^[14] ; 砂矿(金属矿产) 地质勘查规范 (DZ/T 0208—2002)
独居石	300	100	30	

表 2 南海浅海重砂异常区矿物品位分级
Table 2 Grade classification of heavy sands abnormals in the shallow sea of South China Sea

有用矿物	I	II	III	IV	V
独居石	>100	100~75	75~50	50~25	<25
锆石	>1 000	1 000~750	750~500	500~250	<250
钛铁矿	>10 000	10 000~7 500	7 500~5 000	5 000~2 500	<2 500
金红石	>1 000	1 000~75	750~500	500~250	<250

注: 据《矿产资源储量划分标准》(2000年)和《海洋调查规范》(1992年)改。

2 资料分析

2.1 单道地震剖面解释

以地震测线资料 a 和 b 为例(图 2), R_0 、 R_1 是沉积地层地震反射界面, R_0 为海底界面, 呈高频、

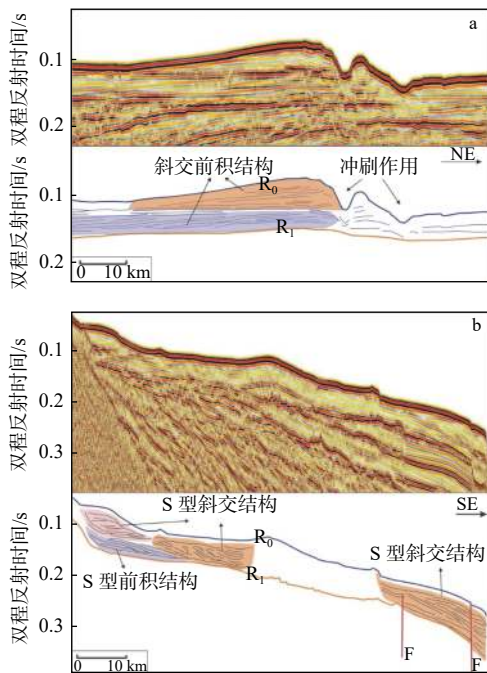


图 2 单道地震剖面上三角洲相地震反射特征

Fig.2 Seismic reflection characteristics of delta facies on a single-channel seismic profile.

强振幅、高连续、双相位反射特征, 随海底起伏而变化; R_1 界面全区均有分布, 总体呈中频、中振幅、高连续、双相位反射特征, 反射同相轴总体上相对平直、稳定, 可连续追踪, 为晚更新世^[23]的 2 个地震反射界面。从单道地震资料上也可看出, 测线 a 地震剖面上地震相以斜交前积结构为特征, 地震反射层向顶界顶超, 向底部收敛, 与顶界呈斜交接触, 内部呈斜交结构(图 2a), 局部由于水流的冲刷而缺失顶积层, 反映高能水流环境, 沉积物供给速度快, 水流作用强, 向底部收敛代表的是典型陆架外缘或三角洲前缘沉积, 向西南方向减薄; 测线 b 地震剖面上(图 2b)地震相特征为下部 S 形上部斜交前积结构, 反映水动力由弱到强、由海退向海进沉积过程, 在远陆方向 120~200 m 水深发育晚更新世海进型三角洲。研究区晚更新世以来浅层地层发育大量滨海三角洲沉积, 向陆方向减薄; 三角洲砂体平均沉积厚度为 40 m; 晚更新世以来的滨海三角洲相地层是砂矿的有利赋存区。

2.2 有用重砂矿物的品位与分布

本研究区选取 70 个站位表层沉积物及 23 个柱状沉积物(0.125~0.063 mm 粒级)中共鉴定出重矿物 20 余种, 包括磁铁矿、钛铁矿、赤褐铁矿、赤铁矿、锆石、电气石、独居石、金红石、云母、绿泥石、硅酸盐矿物辉石、角闪石、帘石, 自生矿物海绿石以及岩屑和风化矿物等。通过对各站位样品进行重矿物品位计算, 根据研究区有用重砂矿物异常区及品位划分标准(表 2), 分析了表层及柱状样钛铁矿、独居石、锆石、金红石(锐钛矿)等 4 种有用重矿物的品位及分布特征。

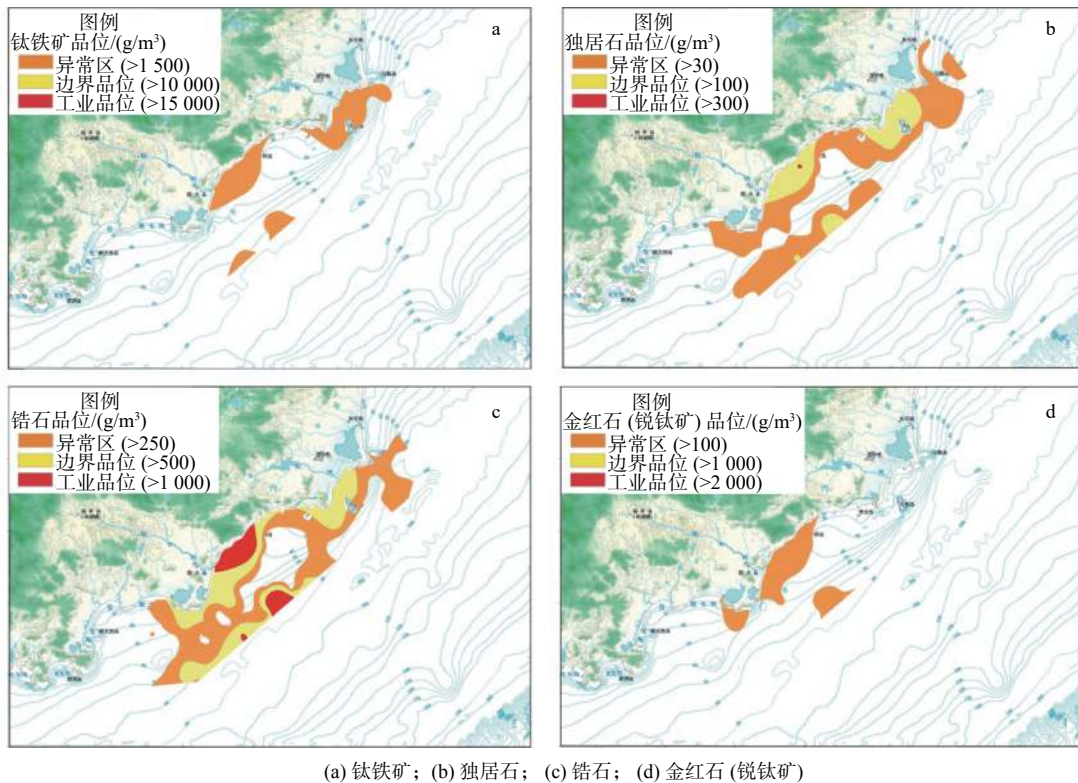
2.2.1 表层有用重砂矿物的品位与分布

(1) 钛铁矿品位与分布特征

钛铁矿在重矿物中较为常见, 其出现几率 100%。钛铁矿达到异常品位以上的站位有 7 个, 异常范围 2 121.9~5 701.5 g/m³, 异常品位区面积约 417.41 km²。异常区在图幅海域主要分布于 3 个区域(图 3a), 主要分布于在海南岛东南沿岸港头港-田头港区域和坡头港-包定海区域以及黎安港东南向陆架区域。

(2) 独居石品位与分布特征

独居石在研究区重砂矿物中常见, 其出现几率 90.5%; 含量中低, 分布广泛。独居石矿达到异常品位以上的站位有 29 个, 其中, 达到边界品位的站位只有 5 个, 达工业品位的站位 1 个。异常区在研究



(a) 钛铁矿; (b) 独居石; (c) 锆石; (d) 金红石 (锐钛矿)

图 3 海南岛东南部海域有用重砂矿品位异常区分布

Fig.3 Grade distribution of valuable heavy minerals in the southwestern off Hainan Island

区海域分布广泛(图 3b), 在海南岛东南沿岸以及研究区中南部。其中, 达异常品位区域主要呈条带状分布于陵水湾以东、港坡港以东、田头港、坡头港、后海以东、保定海, 呈环状分布在图幅海域中南部; 其中, 在港坡港有呈斑点状分布的钛铁矿含量较高, 最高品位可达 316.5 g/m^3 , 达到了工业品位; 边界品位区域被异常品位区域包围, 呈斑块状分布。独居石异常品位及以上异常区面积约 $1\,301.56 \text{ km}^2$, 其中达到边界品位的区域面积约为 310.4 km^2 , 达工业品位的区域面积为 0.63 km^2 , 具有较好成矿前景。

(3) 锆石品位与分布特征

锆石在研究区重砂矿物中较为常见, 出现几率 100%, 含量较高, 具有一定的成矿前景, 分布广泛。锆石达到异常品位及以上的站位有 30 个, 其中, 达到边界品位站位 8 个, 达到工业品位 3 个站位。主要分布在陵水湾至包定海的沿岸及中部 $70\sim 80 \text{ m}$ 水深海区(图 3c); 达异常品位的区域呈环带状展布; 边界品位区域被包围在里面呈环状和条带状; 工业品位区域被包围在最里面, 主要分布在港坡港以及研究区中部。锆石异常品位及以上异常区面积约 $1\,410.24 \text{ km}^2$, 其中, 达到边界品位的区域面积约为 461.46 km^2 , 工业品位区面积约为 131.36 km^2 。工业品位较大一块范围呈斑片状展布, 分布在陵水河入

海方向附近的港坡港近岸, 水深 $30\sim 40 \text{ m}$, 面积达 88.77 km^2 ; 另一块位于港坡港远岸, 水深约 85 m , 面积达 39.48 km^2 。

(4) 金红石 (锐钛矿) 品位与分布特征

金红石 (锐钛矿) 在研究区部分海域广泛分布, 达到异常品位的站位有 5 个, 没有站位达到边界品位以上。异常区在坡头港和陵水湾东部沿岸呈斑块状分布(图 3d)。金红石 (锐钛矿) 异常品位区面积约 301.99 km^2 ; 最大一块面积位于陵水角-分界洲岛之间近岸, 面积为 61.59 km^2 , 水深 $< 65 \text{ m}$ 。

2.2.2 柱状沉积物有用重砂矿物的品位与分布

从图 4 中可看出, 位于港坡港的 SY395 站位, 水深 33 m , 沉积物类型为黏土质粉砂。该柱子长 125 cm , 分 5 个层位统计, 沉积物中钛铁矿、锆石、独居石、金红石 (锐钛矿) 4 种有用重砂矿物品位都达到异常品位及以上。其中, 钛铁矿在 $0\sim 125 \text{ cm}$ 都达异常品位; 锆石每个层位都达到工业品位; 独居石 $0\sim 25 \text{ cm}$ 层位达工业品位, $25\sim 50$ 、 $50\sim 75$ 、 $75\sim 100$ 、 $100\sim 125 \text{ cm}$ 4 个层位达到边界品位; 金红石 (锐钛矿) 每个层位都达异常品位。位于陵水湾的 SY386 站位, 水深 53 m , 沉积物类型为黏土质粉砂。该柱子中锆石和独居石具有较好的成矿前景。锆石在 $0\sim 155 \text{ cm}$ 6 个层位中均达到边界品位;

独居石在 6 个层位中都达到异常品位, 25~50 cm 层位达边界品位; 钛铁矿在 25~50 cm 层位中达异常品位, 其他层位略低于异常品位; 金红石在 0~75 cm 3 个层位中达异常品位, 其他层位低于异常品位值。位于坡头港 SY405 站位, 水深 37 m, 沉积物类型为黏土质粉砂。锆石和独居石具有较好的成矿前景。锆石在 25~125、150~170 cm 5 个层位中均达到异常品位, 0~2、125~150 cm 2 个层位略低于异常品位; 独居石在 25~75、150~170 cm 的层位中达边界品位值, 75~170 cm 层位达异常品位;

钛铁矿和金红石(锐钛矿)在该站位均未达到异常品位值。

总的来说, 从西南往东北方向沿陵水湾-黎安港-港坡港-坡头港整体呈中间高两边低的趋势, 4 种有用重砂矿物在港坡港的 SY395 站位品位值同时达到最大; 锆石、独居石品位整体较好, 在各站位都在异常品位以上, 甚至可达边界品位、工业品位。除了在陵水湾、坡头港 25~75 cm 层各矿物品位变高, 其他区域该层各品位都较差, 从浅层到深层存在品位逐渐变低趋势。

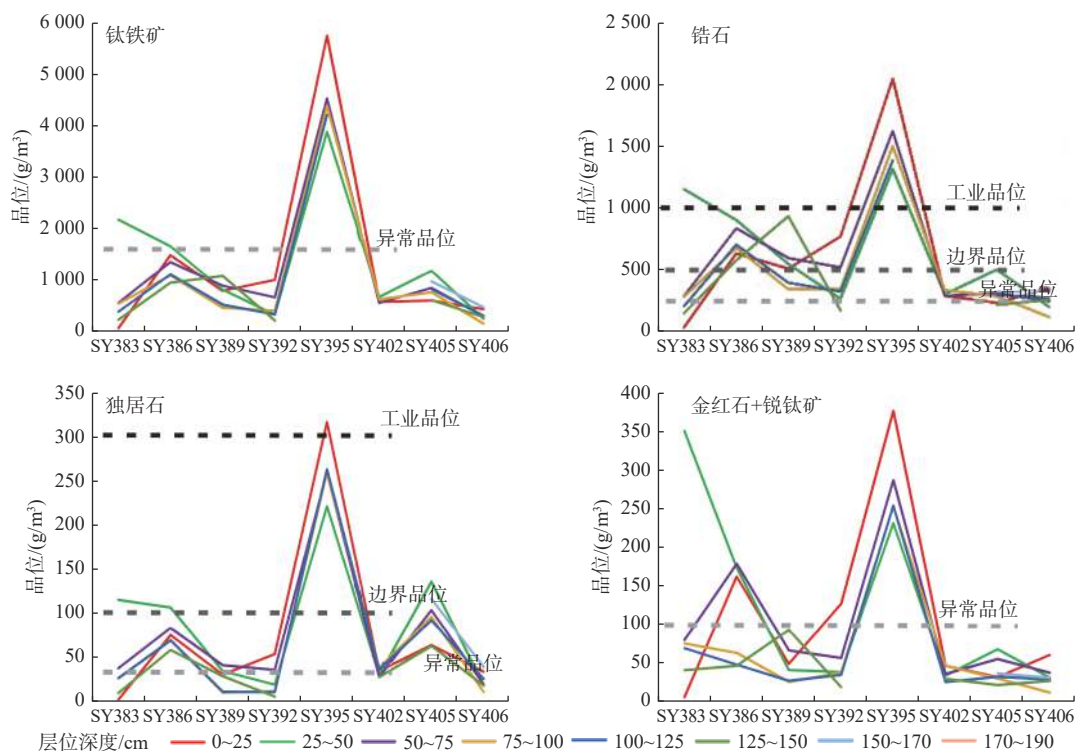


图 4 柱状样中 4 种有用重矿物异常品位随深度变化对比

Fig.4 Curves of abnormal grades for the four useful heavy minerals in column samples versus depth

3 讨论

3.1 成矿条件

(1) 物源及水动力条件

研究区位于海南岛东南陆架浅水海域, 岛体母岩和浅海滨海沉积物是周边近海沉积的首要物质来源。海南岛主要为岩浆岩原生源, 呈岩基、岩株产出, 近海海域碎屑沉积物多数由母岩风化、冲刷沉积导致。海南岛地形地貌变化从中部山区向四周海洋逐渐降低, 十分有利于地表径流搬运物质, 为周边砂矿形成提供了有利的砂矿物源条件^[24-27]。

海南岛东南沿岸的陵水湾、坡头港、保定海后海、石梅湾、后鞍海等是有用重砂矿物富集的地区, 推测主要也与海南岛东南沿岸陵水河、太阳河等大型河流的流入有关(图 1)。研究区西南部海域为东南及南向近垂直岸线运输趋势, 主要与夏季海南岛东岸多东南与东向风浪及南岸多偏南向风浪影响有关; 部分沿岸区域运输趋势多变, 可能与海岸多港湾有关, 风浪与潮流均为沿岸沉积的主要动力^[28]。李凤业^[29]对海南岛东南外陆架浅海的 B289 站位进行了现代沉积速率的研究, 发现该站位的沉积速率高达 1.6 cm/a, 由于海南岛东南陆架海底坡度大, 源自岛内东南甚至华南大陆的陆源物质能在东南陆架上输运较远距离并能维持不低的沉积速率, 说

明这种速度足以使悬移质组分起动并迁移^[20], 有利于重砂矿物的进一步富集与成矿。

(2) 沉积物类型

本文通过对研究区水深<150 m 的陆架区表层沉积物粒度分析发现, 沉积物底质类型丰富多样, 以砂质粉砂、砂质泥和粉砂分布最为广泛。海湾和近岸陆架以细粒沉积物为主, 粗粒沉积物相对较少, 沿岸海域西南部和中部以砂质粉砂和粉砂为主, 东北部沿岸以粉砂质砂为主; 东南部远岸陆坡海域以粉砂为主, 其余类型极少见。结合重砂矿物品位与

沉积物平均粒径 $Mz(\Phi)$ 和分选系数(σ)之间相关性分析表明(表 3), 品位值与沉积物平均粒径和分选系数存在一定的负相关性, 异常及以上品位站位沉积物平均粒径 $Mz(\Phi)$ 均值为 3.72~6.94, 分选系数(σ)均值为 1.08~2.89。重矿物品位与平均粒径 $Mz(\Phi)$ 呈负相关, 与分选系数(σ)间呈正相关。结合该区沉积物类型分布来看, 异常及以上品位重砂矿物赋存的沉积物类型主要为砂质粉砂、粉砂、粉砂质砂、砂质泥和砾质泥等粒径较粗的沉积物。

表 3 重矿物品位与沉积物平均粒径 $Mz(\Phi)$ 、分选系数(σ)关系统计
Table 3 Grades of heavy minerals and their relation with sediment properties

重矿物	工业品位		边界品位		异常品位	
	Mz均值(个数)	σ 均值(个数)	Mz均值(个数)	σ 均值(个数)	Mz均值(个数)	σ 均值(个数)
钛铁矿	—	—	—	—	3.85(6)	2.33(6)
锆石	4.69(2)	2.41(2)	5.09(5)	2.27(5)	5.70(15)	2.31(15)
金红石	—	—	—	—	5.67(5)	2.53(5)
独居石	—	—	3.86(5)	1.98(5)	5.73(23)	2.41(23)

3.2 成矿远景圈定

(1) 黎安港-港坡港近海重砂矿物成矿远景区 (A-1)

该远景区位于黎安港-田头港近岸海域到港坡港近岸海域(图 5), 水动力强, 砂体富集, 底质沉积物类型显示, 该区表层沉积物为砂质粉砂、粉砂质砂, 其次为砾质砂; 在地形上也可以看出远景区位于三亚市幅大型水下岸坡分布区; 从地震资料上看出, 该区域发育大量三角洲沉积。该远景区水深 30~60 m, 面积(s)约为 1 300 km², 沉积厚度 1.25 m, 平均含砂量(r)约为 70%, 矿种主要为锆石, 其次独居石, 然后为金红石和钛铁矿, 其中, 锆石品位达工业品位, 独居石品位达边界品位, 金红石和钛铁矿都达异常品位; 锆石、独居石都为 I—Ⅲ级砂矿异常区, 金红石为Ⅳ—Ⅴ级砂矿异常区, 钛铁矿为Ⅲ—Ⅳ级异常区, 4 种矿物异常区相互重合。通过对柱状样垂向分析, 中部锆石、独居石 I 级异常区厚度达 125 cm; 金红石(锐钛矿)、钛铁矿在 0~125 cm 处都达异常品位, 4 种矿物异常区在田头港、后海多有重合; 西部各重砂矿物厚度也在发生变化。由于技术条件有限, 存在很多不确定因素和体积的不规则性, 本文采用棱柱体积的 1/2 的保守计算方法来估算砂体体积 V , 计算公式为 $V=s \times h \times r/2$, 根据现有

柱状样取厚度平均值为 75 cm, 初步估算重矿物砂体规模为 3.41×10⁸ m³, 石英砂体潜在资源量计算方法 $Q=V \times d$ (密度 $d=1.567 \text{ t/m}^3$)^[30], 得出该范围重砂矿潜在资源量 Q 为 4.92×10⁸ t。

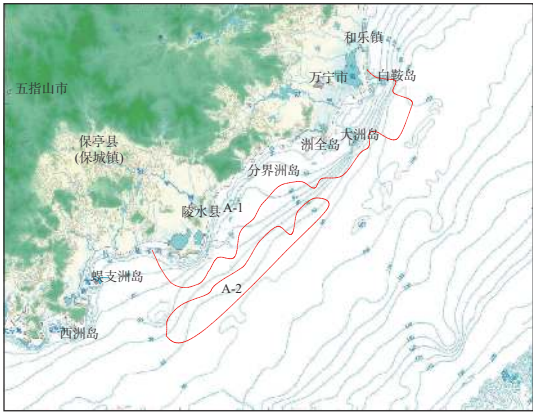


图 5 研究区有用重砂矿成矿远景区分布
Fig.5 Prospective distribution of valuable heavy minerals in study area

(2) 中南部海域重砂矿成矿远景区 (A-2)

该预测区位于研究区海域中南部(图 5), 砂体富集, 底质沉积物类型显示, 该区表层沉积物为泥质砂、砂质粉砂、粉砂质砂、砂质泥。推测的重砂矿异常区呈条带状, NE 走向, 规模大。该异常区平均离岸距离 4 km, 水深 70~85 m, 远景区面积为 1 582.73 km²。其成矿物质与海南岛沉积物输入密

切相关。有用矿物以锆石、独居石为主,其次为金红石、钛铁矿;远景区中部具有较好的成矿远景,其中,锆石、独居石砂矿品位较高,都为 I 级异常区;远景区外环,4 种有用重矿物都达 III—IV 级异常区;该远景区各重砂矿物异常区重合,具有较好的开发潜力。

4 结论

(1) 本文通过对单道地震资料处理解译,发现晚更新世以来黎安港-坡头港间发育大量三角洲沉积,指示了有利砂矿沉积区。

(2) 研究区有用重砂矿主要有钛铁矿、锆石、金红石、独居石等 4 种,重砂矿物主要富集在黎安港-港坡港近海及研究区中部 70~80 m 水深陆架区;主要矿种为锆石和独居石,其次为金红石和钛铁矿。

(3) 在海南岛东南部海域划分了 2 个潜在的有用重砂资源成矿远景区,其中黎安港-港坡港近海重砂矿物成矿远景区,平均水深 30~60 m,面积为 1 019.19 km²,沉积厚度可达 1.5~40 m,保守估计重砂矿潜在资源量 Q 至少为 4.92×10^8 t,具有较大资源潜力,为将来开采指明方向。

参考文献:

- [1] 吕炳全. 海洋地质学概论[M]. 上海: 同济大学出版社, 2008: 277-281.
- [2] 张仲英. 雷州半岛滨海砂矿的分布富集规律[J]. 地理科学, 1991, 11(2): 134-141.
- [3] 张本. 海南海洋资源与开发[J]. 世界科技研究与发展, 1998, 20(4): 106-110.
- [4] 陈春福. 海南省海岸带和海洋资源与环境问题及对策研究[J]. 海洋通报, 2002, 21(2): 62-68.
- [5] 陈忠, 杨慧宁, 颜文, 等. 中国海域固体矿产资源分布及其区划-砂矿资源和铁锰(微)结核结壳[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(5): 101-108.
- [6] 刘洪滨. 中国滨海砂矿调查研究概况[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1984, 4(2): 86-90.
- [7] 阮汀. 论中国海洋砂矿床类型[J]. 宁波大学学报, 1988, 1(2): 49-62.
- [8] 谭启新, 孙岩. 中国滨海砂矿[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [9] 谭启新. 中国的海洋砂矿[J]. 中国地质, 1998, 25(4): 23-26.
- [10] 杨慧宁, 陈忠, 颜文, 等. 南海海域固体矿产资源与分布[M]// 我国近海地质与矿产资源. 北京: 海洋出版社, 2005: 368-375.
- [11] 林明坤, 林川善, 潘燕俊, 等. 海南省东部浅海锆钛砂矿物特征及成矿条件浅析[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(11): 141-143.
- [12] 潘燕俊, 催汝勇, 林明坤, 等. 海南岛周边浅海砂矿资源潜力浅析[J]. 海洋通报, 2017, 36(4): 458-467.
- [13] 韩孝辉, 王雪木, 陈卫, 等. 海南岛东部滨海海砂矿资源分布特征[J]. 中国矿业, 2017, 26(增刊1): 246-250.
- [14] 周娇, 杨楚鹏, 孙桂华, 等. 海南岛西南浅海域有用重砂资源潜力分析[J]. 地质科技情报, 2018, 37(2): 89-96.
- [15] 全光亮. 海南岛海砂资源的分类特征及成矿特点分析[J]. 中国地质调查, 2018, 5(3): 74-80.
- [16] 全光亮, 黎刚, 陈飞, 等. 海南岛东北部海域海砂资源特征及成因[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(1): 12-19.
- [17] 全光亮, 陈飞, 张匡华. 海南岛东北部海域海砂资源分布特征及开发前景分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(1): 58-65.
- [18] 李立. 南海上层环流观测研究进展[J]. 台湾海峡, 2002, 21(1): 114-125.
- [19] 金秉福, 林振宏, 时振波, 等. 东海外陆架晚更新世沉积物中的有用重矿物及其资源潜力[J]. 古地理学报, 2004, 6(3): 372-379.
- [20] 黄龙, 张志珣, 杨慧良. 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, 2012, 28(7): 10-16.
- [21] 沈若慧, 周定成, 廖连招. 台湾海峡西部海底有用重砂高品位分布与找矿意义[J]. 台湾海峡, 1999, 18(2): 131-139.
- [22] 陈忠, 颜文, 古森昌, 等. 南沙海槽南部表层重矿物及其成矿远景[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(1): 13-18.
- [23] 黄文凯, 陈泓君, 邱燕. 南海西北部莺歌海盆地晚更新世三角洲地震地层反射特征[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(8): 10-15.
- [24] DILL H G, MELCHER F, FUSSEL M, et al. Accessory minerals in cassiterite: a tool for provenance and environmental analyses of colluvial-fluvial placer deposits(NE Bavaria, Germany)[J]. Sedimentary Geology, 2006, 191(3/4): 171-189.
- [25] CASCALHO J, FRADIQUE C. The sources and hydraulic sorting of heavy minerals on the Northern Portuguese continental margin[J]. Developments in Sedimentology, 2007, 58: 75-100.
- [26] 李家庆, 刘彭江. 莫桑比克东南部滨海重砂矿特征及成矿条件[J]. 现代矿业, 2019, 35(10): 55-57.
- [27] 杨奕, 齐荣, 刘秀娟, 等. 海南岛昌化江河口与邻近海域锆、钛矿化远景及成矿地质条件分析[J]. 地质科技情报, 2010, 29(1): 80-85.
- [28] 李刚, 万荣胜, 陈泓君, 等. 海南岛南部海岸线变迁及其成因[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(1): 51-57.
- [29] 李凤业. 用²¹⁰Pb法测定南海陆架浅海沉积速率[J]. 海洋科学, 1988(3): 64-66.
- [30] 王加林, 屠强责. 海洋地质地球物理补充调查及矿产资源评价(1996—2002)[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.

RESOURCE POTENTIAL OF VALUABLE HEAVY MINERALS IN THE SOUTHEAST WATER OFF HAINAN ISLAND

ZHOU Jiao^{1,2}, CAI Guanqiang¹, ZOU Liqi¹, ZHONG Hexian¹, HUANG Yongjian¹

(1 Key Laboratory of Marine Mineral Resources of Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, China Geology Survey, Guangzhou 510075, China ; 2 Project for Introduced Talents Team of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China)

Abstract: For the purpose to evaluate the resource potential of placer deposits between the water depth of 30~100 m in the southeast water off Hainan Island, the latest data acquired by various survey methods are applied. 815 km of single channel seismic data are processed and interpreted and a huge amount of deltaic deposits since Late Pleistocene are discovered in the study area, which are favorable for the formation of placer deposits. Based on 70 surface sediment samples and 23 sediment cores collected in this area, the reserve and grades of the four valuable heavy minerals, i.e. ilmenite, zircon, rutile and monazite, are calculated, and the spatial and vertical grade changes of the four valuable heavy sand minerals revealed. The heavy minerals are dominated by zircon and monazite, followed by rutile and ilmenite and the enrichment of the valuable heavy minerals are controlled by many factors, such as the source of ore-forming materials, the type of sediments and the hydrodynamic separation during transportation. Two potential areas of useful heavy sand resources are delineated, which are 30~60 m in water depth, 1 019.19 km² in area and about 1.5 m in thickness. A conservative estimation of the potential heavy sand resources is around 4.92×10^8 t in amount, that is valuable for further investigation.

Key words: single channel seismic; sediment core; valuable heavy sand minerals; industrial grade; potential resources; Hainan Island