

doi:10.3799/dqkx.2014.065

琼州海峡及周边海域沉积环境及 近万年以来沉积演化

陈亮^{1,2}, 张玉芬^{2*}, 李团结¹, 杨文丰¹, 陈静¹

1. 国家海洋局南海工程勘察中心, 广东广州 510300

2. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘要: 对琼州海峡及周边海域约600个表层样品进行粒度分析后发现, 琼州海峡内沉积物以粗粒的含砾砂及砂为主, 自海峡内向口外则由砂向粉砂过渡, 最外侧分布有更细粒的粘土质粉砂, 东口砂质沉积物边缘以弧形分布为主, 西口呈指状分布. 按峰态类型可将粒度频率曲线分布划分为海峡东单峰态、海峡东双峰态、海峡内单双峰态、海峡西单峰态及海峡西双峰态5个区域. 采用GSTA模型对沉积物运移趋势分析后发现, 沉积物在海峡内主要由南北两侧向中间运移, 海峡东口沉积物具有比较明显的由口内向口外输运的趋势, 海峡西部沉积物出海峡口后显示了向北输运的趋势, 沉积物粒度特征分布及运移趋势说明海峡内及两侧三角洲内沉积物主要来自于海峡底部及南北两岸的潮流冲刷物. 根据琼州海峡现代沉积环境, 结合周边4个柱状沉积物粒度及¹⁴C测年分析, 发现琼州海峡的最终形成大约开始在距今8000 a前, 由于海平面的上升, 潮流作用塑造了海峡初期的地貌, 直到距今约5000~4600 a前, 琼州海峡一直处于快速发展阶段, 潮流三角洲发育也最广, 之后由于暖期的结束, 海平面下降, 随着潮流作用的减弱, 琼州海峡趋于稳定状态, 逐渐形成今天的海峡及口外水下三角洲地貌.

关键词: 粒度; 沉积物; 沉积演化; 琼州海峡; 海洋学.

中图分类号: P736.21

文章编号: 1000-2383(2014)06-0696-09

收稿日期: 2013-12-22

Sedimentary Environment and Its Evolution of Qiongzhou Strait and Nearby Seas since Last Ten Thousand Years

Chen Liang^{1,2}, Zhang Yufen^{2*}, Li Tuanjie¹, Yang Wenfeng¹, Chen Jing¹

1. South China Sea Marine Engineering Surveying Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China

2. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: About 600 surface sediment samples were collected in the Qiongzhou Strait and the surrounding marine environment, and were analyzed particle-size distribution. Results show that the sediments are dominated by sand and gravel sands inside the Qiongzhou Strait, and the sediments change gradually from coarser to finer particles, mostly silt and clay sized, away from the inner strait areas to the outside areas. The boundaries of sand sediments spread arched in the east mouth, whereas they spread in the shape of fingers in the west. The distribution of grain size frequency curve can be divided into 5 categories, (a) single kurtosis to the east strait, (b) east strait double kurtosis, (c) single and double kurtosis in the strait, (d) west strait single kurtosis, and (e) west strait double kurtosis. The sediment transport trends was analyzed by the GSTA model, which shows that the sediment mainly moved from the north and south sides to the middle into the strait, whereas in the east area the sediments moved obviously from the strait to the outside sea, and there was a northward trend in the west area. Both the distribution of grain size and the transport trend of the sediments show that the sediments mainly originated from the bottom and side of the strait which were eroded by the tides. Based on interpretation of the modern depositional environment in the Qiongzhou Strait, combined with the grain size characters and the AMS-¹⁴C data of 4 core samples which were obtained by the gravity corer, it is concluded that the final formation of the Qiongzhou Strait began about 8000 a ago due to the rise of sea level, and the

基金项目: 我国近海海洋综合调查与评价专项 (Nos. 908-01-CJ16, 908-01-CJ17).

作者简介: 陈亮(1981-), 男, 湖北当阳人, 博士生, 主要从事海洋沉积环境方面研究. E-mail: randal34@163.com

* 通讯作者: 张玉芬, E-mail: zhyfug@163.com

initial landform was shaped by the tides. In addition, about 5 000 to 4 600 a ago, the Qiongzhou Strait has been in a stage of rapid development, and the tidal deltas spread most widely until the end of the warm period when the sea level dropped and the tide power weakened, which led to the stabilization and formation of the present Qiongzhou Strait.

Key words: grain size; sediment; sedimentary evolution; Qiongzhou Strait; oceanography.

琼州海峡为冲刷性海槽,位于海南岛与雷州半岛之间,东西长 80.3 km,中间南北最窄处为 19.4 km. 基底主要由古生界、白垩系岩石及花岗岩组成,盖层主要为第三系砂页岩和第四系砂砾、粘土,深度多在 1 000 m 以上(张虎男和陈伟光,1987),南北海岸岬角主要由花岗岩及玄武岩组成(金波等,1982). 近年来的钻探资料显示,琼州海峡上新世以来的地层包括:全新世北尖组、更新世玄武岩、早更新世湛江组 and 上新世望楼港组,除了更新世海峡两岸发生大规模玄武岩喷发,其余时期地层主要为海相及陆相沉积(彭学超,2000;李学杰等,2002).

当前对琼州海峡沉积历史研究的焦点主要为琼州海峡的成因及时代,前人对琼州海峡的成因主要有构造断裂说和海侵说,也有学者认为是在内外动力的共同作用下于第四纪历次间冰期期间形成(张虎男和陈伟光,1987),随着调查研究的深入,琼州海峡现今地貌形成于最后一次海侵的观点得到大多数学者的认可(金波等,1982;张虎男和陈伟光,1987;彭学超,2000;赵焕庭等,2007);但对琼州海峡最终形成的具体时代及海峡内沉积物影响范围并没有最终定论. 粒度分析为沉积学研究的基本内容,其研究方法很早便开始建立(Emery and Gould, 1948; Swan *et al.*, 1978),随着研究方法的逐渐成熟及多样化,目前广泛运用在沉积环境的判定、古环境的重塑及物质运移趋势的分析(Klovan, 1966; Allen, 1971; McLaren, 1981; McLaren and Bowles, 1985; Hajek *et al.*, 2010). 目前已有部分学者对南海近海沉积物粒度进行过分析研究(陈明,2001;高为利等,2009),但还未见对琼州海峡大范围沉积物的粒度研究,本文在琼州海峡内及周边海域进行了表层及柱状沉积物取样调查,通过粒度及测年分析,有利于厘清该海域沉积环境及沉积历史演变.

1 研究方法

样品采集工作分别于 2007 年春季及 2008 年春季完成,共取得表层样品约 1 000 个,表层样采样间距为 5 km,采用的采样工具主要为蚌式采样器,采

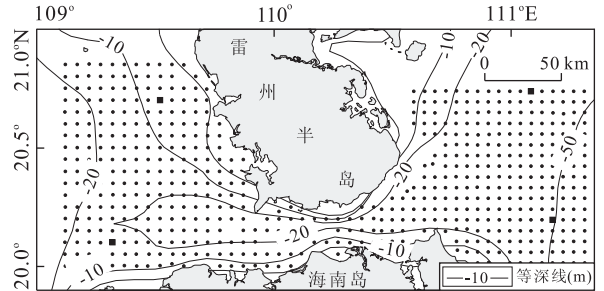


图 1 沉积物站位分布

Fig. 1 The distribution of sediment positions

·. 表层采样样点; ■. 柱状采样样点; 自东北顺时针方向依次为: B1098, B1047, B429, B620

取样品为表层 0~10 cm 内沉积物,并采用重力取样器采集了柱状样,本文选取约 600 个表层样及 4 个柱状样(图 1)进行分析.

本次实验数据主要包括粒度分析及年代学测定,采用的方法均按照《我国近海海洋综合调查与评价专项——海洋底质调查技术规程》执行,沉积物粒度由国家海洋局南海工程勘察中心实验室完成,细粒部分采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行分析,首先去除样品中有机质、钙质胶结物及生物壳体,然后加入偏磷酸钠用超声波振荡使样品分散后上机测试,粗粒部分采用筛析法分析,沉积物命名采用谢帕德分类法,粒度参数按照规程中提供的矩法公式计算. 样品¹⁴C 数据由中国科学院广州地球化学研究所 AMS-¹⁴C 制样实验室和北京大学核物理与核技术国家重点实验室联合完成,日历年龄经¹⁴C 年代校正软件 CALIB 6.0.1 版本 IntCal09 树轮曲线校正后获得.

2 结果分析

2.1 沉积物类型

由于琼州海峡独特的海流特征,使得海峡内及周边海域沉积物类型较多(图 2),自海峡内向外沉积物粒度逐渐变细,由含砾砂及砂逐渐过渡到粉砂及粘土质粉砂. 琼州海峡中部至东口区域分布有较大片砂,砂质沉积物向北一直延伸到涠洲岛,其间分布有小片的含砾砂及粉砂质砂,在海峡东口以东沉

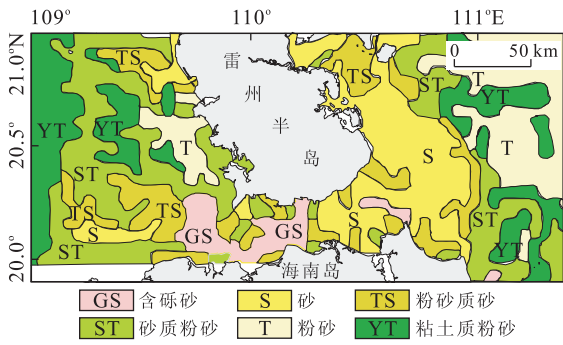


图 2 表层沉积物类型

Fig. 2 The distribution of surface sediment types

积物类型以细粒的粉砂及粘土质粉砂为主。琼州海峡西部沉积物类型分布与东部存在较大差异，西部存在较大范围的含砾砂，口外并没有呈大片分布的砂质沉积物，沉积物类型主要为粉砂质砂及砂质粉砂。

2.2 沉积物粒度特征

沉积物粒度参数主要有平均粒径、中值粒径、分选系数、偏态、峰态等，本文选取比较有代表性的平均粒径、分选系数、偏态及峰态类型进行分析。沉积物平均粒径分布范围为 $-0.73 \sim 7.06\phi$ 之间，等值线图(图 3a)显示以海峡中间为界，东西海域存在较大差异；海峡内东部海域粗粒沉积物主要分布在中间位置，向南北两侧逐渐变细，至东部海峡口外，沉积物粒径仍然较粗，主要为砂质沉积物，且扩大至口外南北两侧及以东海域，在口外东经 111°附近粒径迅速降低，沉积物过渡为粉砂，过渡带呈弧状；海峡内西部海域粗粒沉积物偏向南部分布，至西部海峡口外粗粒沉积物范围没有明显扩大，呈条带状向外延伸，并逐渐变细，与海峡东部沉积物分布存在较大差异。

沉积物分选系数值介于 0.40~4.15 之间，按照大多数学者的分类方式 (McManus, 1988; 贾建军等, 2002): 当 $1 < \text{分选系数} < 2$ 时, 判定为较差; 当 $2 < \text{分选系数} < 4$ 时, 判定为差。由图 3b 可以看出, 研究区域分选性大多为较差及差, 仅在东口个别站位分选性为较好(分选系数位于 0.50~0.71 之间), 部分区域分选性中等, 海峡东部分选性略好于西部, 说明东部水动力环境较稳定。

沉积物偏态值位于 $-3.18 \sim 3.45$ 之间, 根据偏态分类标准 (McManus, 1988; 贾建军等, 2002), 由图 3c 可以看出, 琼州海峡内沉积物大多为极正偏(偏态值 > 1.5), 在远离海峡的区域大多为极负偏(偏态值 < -1.5)。

粒度定义中峰态主要用来衡量分布曲线的峰凸程度, 本文中峰态类型主要根据粒度频率图中峰的

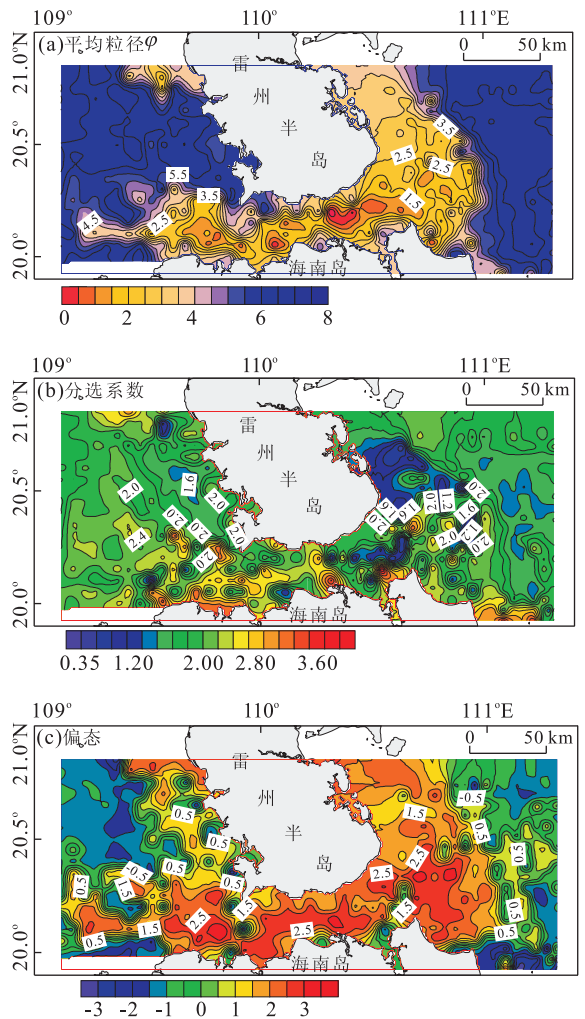


图 3 表层沉积物粒度特征

Fig. 3 The distribution of sediment grain size characteristics

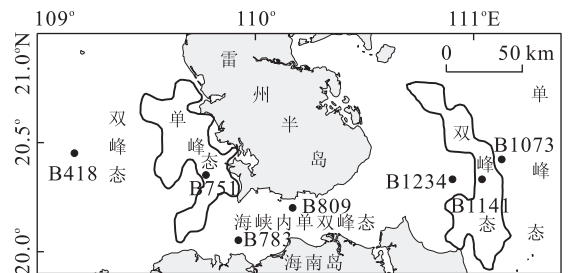


图 4 表层沉积物峰态类型分布

Fig. 4 The distribution of sediment kurtosis types

数目来划分, 如果沉积物在未经改造的情形下便进入新环境, 而且新环境对其改造也不明显, 该处沉积物一般代表了几个物质(总体)直接混合而成, 其分布曲线可能是宽峰、鞍状或者多峰形态。对每站沉积物粒径做频率分布图分析后发现, 该区域粒度频率分布主要为单峰态及双峰态, 仅在个别站位出现 3 峰态。将峰态类型作图(图 4)分析后发现, 按峰态类

型主要可分为 5 个区域,按分布位置分别为海峡东单峰态、海峡东双峰态、海峡内单双峰态、海峡西单峰态及海峡西双峰态。

海峡东单峰态位于调查区域最东侧,沉积物以单峰态为主,沉积物类型主要为粉砂及粘土质粉砂,以 B1073(图 5)为例,粒径多在 $3\sim 11\varphi$ 之间,峰值大多为 $7\sim 8\varphi$,表明该处沉积物形成于同一个总体,反映其表层沉积物来源相似且单一。

海峡东双峰态位于海峡东口外侧,呈弧状分布,沉积物以双峰态为主,沉积物类型主要为粉砂质砂及砂,以代表性站位 B1141 为例(图 5),粒径多在 $2\sim 11\varphi$ 之间,细粒部分峰值多在 $7\sim 8\varphi$ 之间,粗粒部分自口外向口内由 $3\sim 4\varphi$ 逐渐过渡到 $2\sim 3\varphi$,表明沉积物主要来自于 2 个总体,且细粒组分与东侧单峰态区域沉积物来源一致。

海峡内单双峰态区主要位于海峡内及东口海域,沉积物类型以砂及含砾砂为主,沉积物粒径较粗,峰态既有单峰态也有双峰态,平面分布规律性不明显,表明该区域水流状况复杂多变。选取该区域 3 个代表性站位分析(图 5),B1234 位于海峡东口,邻近东部的双峰态区域,频率图显示沉积物主要由粒径为 $1.0\sim 3.5\varphi$ 的粗粒组成,含有少量的 $5\sim 9\varphi$ 的细粒组分,与紧邻的东部双峰态相比细粒组分明显减少。B809 位于海峡中间北部,频率曲线为单峰态,沉积物粒径分布在 $0\sim 11\varphi$ 之间,峰值在 $4\sim 5\varphi$,与其他站位粒级组成存在较大差异。B783 位于海峡内西部,频率曲线显示沉积物由多个组成,分别为小于 -1φ 的砾石组分、 $0\sim 2\varphi$ 的粗中砂及 $4\sim 10\varphi$ 的细

粒组分。可以看出海峡内沉积物粒级组成具有明显的多样化,但基本所有站位都含有小于 2φ 的粗粒沉积物,其中 B1234 及 B783 的细粒组分具有一定的可比性,说明其细粒组分来源相似。

海峡西单峰态位于海峡口西部至雷州半岛中部海域,沉积物类型较多,自粉砂到含砾砂均有,分选性属于海峡西部较好的区域,频率曲线以单峰态为主,说明沉积物主要来自于同一个总体。选取该区域 B751 站位分析(图 5),其位于海峡西口北部,频率曲线为典型单峰态,频率峰值为 5φ 。该区域沉积物距海峡口越远粒径越细,表现出较好的粒度沉积分异性,频率峰值也由 2φ 逐渐过渡到 $6\sim 7\varphi$,与东口沉积物细粒组分相似。

海峡西双峰态,位于海峡西口以外的北部湾内,沉积物类型由砂至粘土质粉砂均有分布,频率曲线以双峰态为主,说明沉积物由多个总体组成。该区域典型站位 B418 位于调查区西部,沉积物主要由 2 个总体组成,峰值分别为 3φ 及 $7\sim 8\varphi$ (图 5)。经过分析可知,该区域沉积物主要由 2 个总体组成,细粒部分组成相似,粗粒部分中部和南部相似,但北部存在较大差异,表明北部沉积物粗粒组分来源与南部存在较大差异。

2.3 表层沉积物运移趋势分析

采用 GSTA 模型对沉积物粒度进行分析,其理论依据在于:沉积物在运移方向上分选变好、粒径变细且更加负偏,反之,粒径变粗且更加正偏(高抒和 Collins, 1998)。由于琼州海峡为冲刷性海槽,海峡内及周边粗粒沉积物主要来自槽内及沿岸冲刷物,

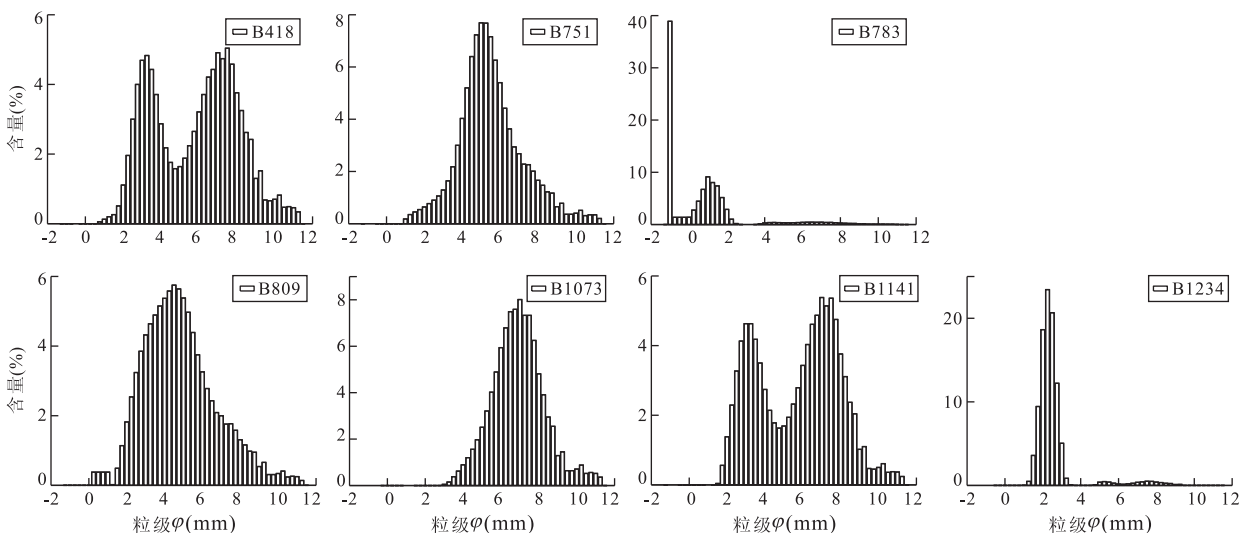


图 5 沉积物粒度频率

Fig. 5 The frequency graph of sediment grain sizes

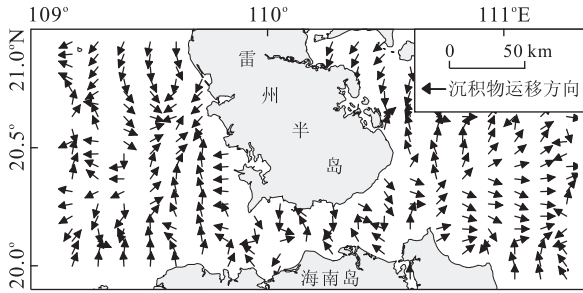


图 6 表层沉积物运移趋势

Fig. 6 The transport trend of surface sediment

因此主物源区较为单一,主要为潮流输运体系,较适合使用该模型(高抒,2009).由于采样间距均为5 km,运用模型时选取8.5 km的间距作为特征距离进行分析,即每站位分析时只与其相邻站位进行比较,将结果作图分析后得出研究区域底质沉积物运移趋势图(图6).分析结果显示:沉积物在琼州海峡内主要由两侧向中间运移,在海峡东部,沉积物具有比较明显的由口内向口外输运的趋势,沉积物在东口呈较强放射状向外输运,沉积物在雷州半岛近岸向北输运到约北纬20.7°附近与北部向南输运的沉积物交汇沉积,东部沉积物输运到东经111.2°后,与外海输运过来的物质相遇沉积,部分区域沉积物仍显示了向东输运的趋势,东口沉积物在向南输运过程中显示在近岸海湾存在一个汇聚中心,沉积物最终未能越过北纬20.0°.海峡西部,沉积物出海峡口后主要显示了向北输运的趋势,在北纬20.6°至20.7°附近与由北向南输运的沉积物共同形成一个汇聚中心,与海峡东口相比,沉积物到达口外后并未呈放射状向外输运,而是以向北输运为主,反映了东西口水动力环境存在较大差异.根据对南海北部近海沉积物常量元素分析结果可知,琼州海峡及东口三角洲内沉积物常量元素组合特征与外海区域存在较大差异,元素组合特征显示物源来自于海峡内冲刷物(陈亮等,2013),其结论与粒径趋势模型模拟结果一致.

2.4 琼州海峡现代沉积环境分析

琼州海峡内地形起伏剧烈,但大体为由两岸向中部加深的趋势(张虎男和陈伟光,1987),琼州海峡内主要为涨落潮流,海峡内流速多在120 cm/s以上,最大流速可达170 cm/s(侍茂崇等,1998),海水及所携带的碎屑物质对海底及两岸强烈冲刷,细粒物质难以沉积,使得海峡内沉积物以砾石及粗砂为主.由于中部流速大,近两岸区域流速小,中部海流携砂能力强,使得两岸冲刷出来的物质大多向中部运移.

海峡东西口沉积物分布特征存在较大差异,东

口以放射状槽、滩相间排列地形为主(金波等,1982),形成边缘为弧状分布的三角洲地貌,且三角洲的边缘与东口双峰态区域有着很好的对应,与河流三角洲类型中的朵状三角洲类似,反映外海存在阻碍三角洲内流水向外扩散的应力.由图7可知,夏季琼州海峡内海流为由东向西,东口存在由北向南的沿岸流,该沿岸流将北部的物质向南部输运,与潮流作用下向北输运的沉积物相会于雷州半岛东部(图6),使得该处成为南海沿岸典型的沉积物浅滩发育区,同时在冬季东北向浪及夏季东南向浪的作用下,使得该处发育了大片分选性较好的砂质沉积物.海流图显示在琼州海峡东部存在逆时针环流,而沉积物运移趋势图也显示在海峡东北部存在汇聚中心,与该环流的分布存在一定的对应.在海峡东口南部,海流主要沿海南岛东部沿岸向东北方向流动,一定程度上阻止了海峡内物质向南输运.因此,海峡东口沉积物主要来自于海峡内潮流冲蚀物,部分来自于沿岸流的输运及外海洋流的带入,海峡内物质被潮流携带出东口后,由于流速的减小,部分推移质开始沉积,沉积物以单峰态为主,含少量的细粒组分;当潮流到达三角洲边缘时,由于外部海流的顶托,流速迅速下降,此时潮流中所有推移质及大量跃移质沉积,在三角洲边缘形成独特的成带状分布的双峰态分布区;更细粒的物质则被带到三角洲外沉积,由于口外其他物源碎屑物质的输入较少,沉积物以单峰态为主.

海峡西口也发育有大量的水下浅滩及浅槽,但形态上更类似于河口三角洲类型中的鸡爪状三角洲,表明外海阻力较小,潮流可以影响的范围较远,由图7可知,海峡内海流流向与西口潮流向外流向

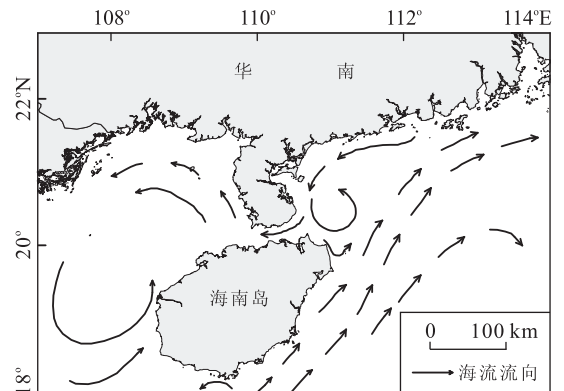


图 7 南海北部夏季海流分布(杨士瑛等,2003)

Fig. 7 The distribution of summer ocean currents in the north of South China Sea

一致,且影响海峡口外潮流的主要为西北向的北部湾环流,对来自海峡内的沉积物向北部湾运输起到了促进作用. 海峡内潮流冲蚀物被运输到西口外后在潮流及西北向环流的共同作用下主要向西北部运移,在雷州半岛西部形成一片以单峰态为主的沉积区域,且由南到北沉积物峰值粒径逐渐变细,反映水动力条件逐渐减弱,沉积物在运移路径上表现出较好的粒径分异现象. 在该单峰态区域的北部沉积物为由北向南输运,与海峡内沉积物在雷州半岛西部交汇,由于该区域北部水深较浅,常年受东北向及西南向浪作用的影响,在波浪作用下沿岸侵蚀物逐步向深水区搬运,同时也阻止了琼州海峡内碎屑物质继续向北搬运. 海峡西口以外的大部分区域中沉积物以双峰态为主,表明该区域存在多个物源区,在海峡西南部沉积物以向北输运为主,沉积物应主要来源于海南岛沿岸侵蚀及河流输砂(马菲等,2008;徐志伟等,2010),同时该区域也沉积有大量的粗碎屑物质,并位于西口三角洲之上,应主要来自于琼州海峡内的碎屑物质,只是在被搬运出海峡后在海流的改造下转变为向北输运的趋势.

2.5 海峡东、西口沉积历史环境分析

选取琼州海峡周边 4 个柱状样对琼州海峡沉积

历史进行分析(图 1),B1098 位于海峡东北部,位于东口三角洲外,从表层沉积物运移图可以看出该站位沉积物以向外输运为主,但仍可接收来自海峡的沉积物质,分别在 65 cm、118 cm 及 159 cm 处进行 ¹⁴C 年代学测试,所得年龄分别为 3 015 ± 20 a BP、4 650 ± 25 a BP 及 6 705 ± 30 a BP,其他层位年龄通过线性插值获取. 由图 8 可以看出,在 90 cm 以下层位,含有少量砾石,由底层到顶层,沉积物逐渐变细,砂逐渐变少,粘土及粉砂增多,分选性也逐渐变好,表明该区域沉积水动力环境逐渐由强变弱,并逐渐变得稳定,以砾石含量为界,该柱大体可以分为 2 个部分,底部粒径较粗,并含有少量砾石,粒径参数值存在数次波动,表明早期沉积环境不稳定,上部反映后期沉积环境逐渐趋于稳定,且水动力逐渐减弱. 将该站位 C-M 图(图 9)与理想牵引力流沉积 C-M 图对比后发现,该站沉积物成因主要为悬浮搬运沉积及滚动搬运沉积,底部以滚动搬运为主,上部主要为悬浮搬运,所反映的沉积环境与粒度曲线揭示的水动力变化相符.

B1047 站位于海峡东口三角洲外边缘,现代沉积物主要来自琼州海峡内,该站沉积速率较快,由老到新,沉积物粒径逐渐变细,分选性始终处于波动状

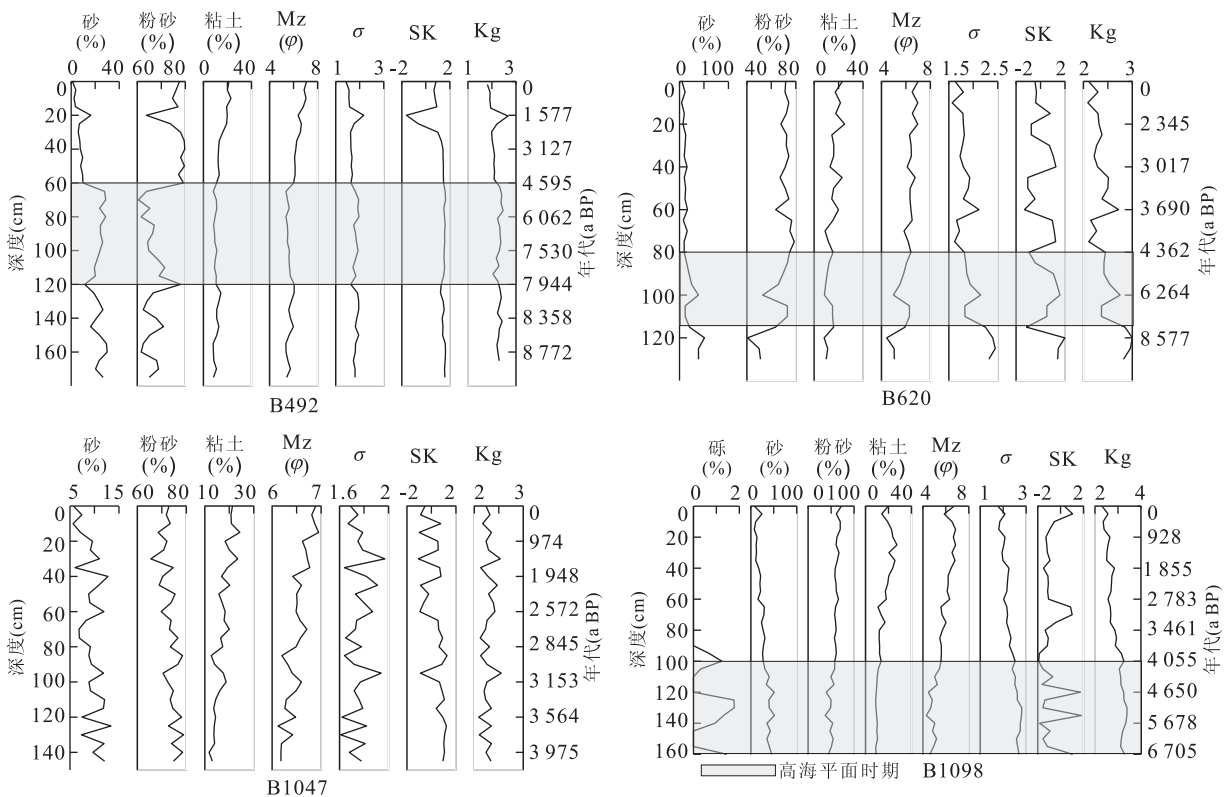


图 8 柱状样粒度特征曲线
Fig. 8 The grain size characteristic graphs of cores

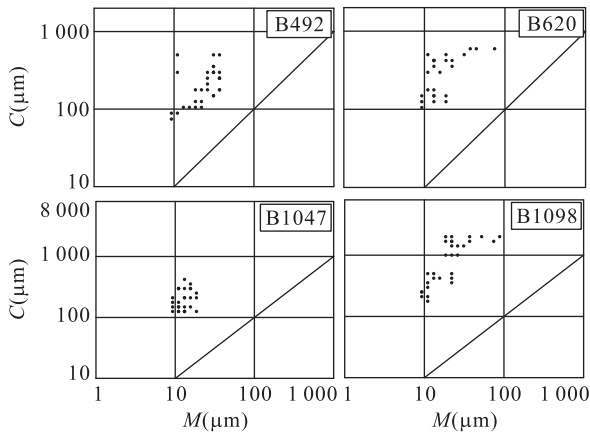


图 9 柱状沉积物 C-M

Fig. 9 The C-M plot of core sediment

态, C-M 图显示该站沉积物以悬浮搬运为主, 且沉积环境较为单一, 说明该柱状沉积物所揭示沉积环境在距今 4 000 a 以来未发生大的变化, 粘土的增加及砂的减少, 一方面说明水动力条件的减弱, 同时由于后期沉积物粉砂含量变化不大, 也反映源区物质在潮流冲刷作用下逐渐向细粒组分靠近。

B492 位于琼州海峡西口外, 海南岛西北部, 现代沉积物主要来自于海南岛西部陆源物质及琼州海峡内的侵蚀物质, 分别在该站 36 cm、100 cm 及 170 cm 处进行¹⁴C 年代学测试, 所得年龄分别为 $2\,760 \pm 20$ a BP、 $7\,530 \pm 30$ a BP 及 $8\,875 \pm 30$ a BP, 通过线性插值获取其他层位年龄. 由图 8 可以看出, 在距今约 4 961~4 595 a 间, 该站沉积环境发生了重大改变, 砂含量骤然降低, 粉砂含量急剧升高, 粘土含量也逐渐升高, 表明这一时期水动力环境发生了较大改变. C-M 图显示该站沉积成因以递变悬浮及悬浮搬运为主, 早期以悬浮搬运为主, 并含有少量滚动组分, 后期则以递变悬浮为主, 说明后期水环境中涡流较发育。

B620 位于琼州海峡西口北部, 位于琼州海峡物质向北输运的北边缘, 该站揭示了近万年以来该区域沉积环境的变化, ¹⁴C 测年位置分别位于 20 cm、88 cm 及 126 cm 处, 所得年龄分别为 $2\,345 \pm 25$ a BP、 $4\,530 \pm 25$ a BP 及 $9\,155 \pm 30$ a BP, 通过线性插值获取其他层位年龄. 由图 8 可以看出, 在距今 6 264 a 之前, 沉积环境发生过数次波动, 表现在砂的增多及粉砂的减少, 分选性也相应变差; 距今 6 264~4 362 a 间, 沉积物中砂含量逐渐减少, 粉砂含量逐渐增多, 分选性也转好, 表明这一时期, 沉积水动力逐渐减弱, 且趋于稳定; 距今 4 362 a 之后沉积物各类型含量变化波动不大, 主要表现在砂的略

微减少及粘土的微弱上升, 之后沉积环境与现代已较为接近. C-M 图显示该站沉积成因主要为悬浮搬运及滚动搬运, 其中底部倾向于滚动搬运, 上部更多为悬浮搬运, 也反映了水动力减弱的趋势。

沉积物类型及各粒级的变化主要受控于物源及水动力等因素的变化, 在沉积物来源稳定的前提下, 历史时期近岸沉积物粒径的变化大多可以反映气候的冷暖及海平面的升降, 由于调查海域位于琼州海峡周边区域, 沉积径流输入少, 主要为海峡内及沿岸侵蚀物, 因此该区域沉积物粒径的变化在反映气候变化的同时, 还记录了琼州海峡在形成过程中对周边海域沉积物质供应的变化, 同时由于琼州海峡的形成及发育对周边海域海流环境也会发生重大影响, 伴随而来的便是对沉积物类型及粒径的改造. 全新世以来南海海平面主要处于上升的趋势, 相关资料表明距今 12~11 ka 前, 古海平面升至现代海面下 50 m 处, 距今 8 ka 前, 古海面升至现代海面下 20 m 处, 距今 8~5 ka 前, 为桂洲海进时期, 海平面较现代高 6 m 以上, 之后, 海平面逐渐下降到现今位置(刘昭蜀等, 2002). 该区域柱状样也揭示在距今 4~5 ka 之间, 沉积环境发生很大改变, 早期沉积环境变动较大, B492 及 B620 均显示, 在距今 8 ka 以前, 砂的含量在波动中减少, 说明随着海平面的上升, 逐渐向深水环境过渡, 水动力逐渐减弱. B492 显示在距今 8~5 ka 之间, 砂的含量在逐渐增多, 粉砂的含量逐渐减少, 而这一时期为南海高海平面时期, 说明这一时期粒径的粗化并不是海退引起, 而是有新的物质输入, 推测琼州海峡在距今 8 ka 以前, 由于海平面的上升, 海水漫过琼州海峡低地, 在潮流的作用下海水开始做往复流动, 松散的物质被带至东西两侧沉积, 随着海平面的上升及海槽的下切, 潮流作用愈加强烈, 更粗粒的物质被搬运出海峡, 对应 B492 砂的含量逐渐增多. B1098 在 4~5 ka 年前也沉积了大量粗粒物质, 由于对应为高海平面时期, 可排除大陆粗粒物质的输入, 反映了这时期琼州海峡粗粒物质的沉积范围. 约在距今 5 000~4 600 a 期间, 沉积环境发生重大改变, 可能是这一时期暖期趋于结束, 海平面逐渐下降, 流经海峡内的海水大幅缩减, 潮流作用减弱, 影响范围也大幅收缩, 周边海流对潮流的抑制及改造作用也大幅增强, 使得之前能接受粗粒沉积物的区域只能接受更细粒的物质. 自距今 4 000 a 之前到现代, 琼州海峡及周边海域未发生重大沉积事件, 海峡趋于稳定状态, 沉积物在潮流改造下逐渐变细, 分选性也逐渐变好。

3 结论

琼州海峡及周边海域表层沉积物类型较多,海峡内以粗粒的含砾砂及砂为主,至口外则由砂向粉砂过渡,最外侧分布有更细粒的粘土质粉砂,平均粒径也表现出由海峡内向口外逐渐变细的分布趋势,东西口沉积物类型平面分布存在较大差异,东口边缘以弧形分布为主,西口呈指状分布. 粒度频率分布主要为单峰态及双峰态,按峰态类型可划分出海峡东单峰态、海峡东双峰态、海峡内单双峰态、海峡西单峰态及海峡西双峰态 5 个区域.

本文采用 GSTA 模型对沉积物运移趋势分析后发现,沉积物在琼州海峡内主要由两侧向中间运移,在海峡东口,沉积物具有比较明显的由口内向口外输运的趋势,在海峡西部,沉积物出海峡口后主要显示了向北输运的趋势,反映了海峡东西口沉积环境及水动力条件存在较大差异,海峡内及两侧三角洲内沉积物主要来自于海峡底部及两侧潮流冲刷物.

琼州海峡的最终形成大约在距今 8 000 a 前开始,由于海平面的上升,潮流在海峡低地发育并开始侵蚀形成海峡初期地貌,随着海平面的进一步上升,直到距今约 5 000~4 600 a 前,琼州海峡一直处于快速发展阶段,潮流三角洲发育也最广,潮流三角洲冲刷出的粗粒物质被携带到更远的位置,之后由于暖期的结束,海平面下降,随着潮流作用的减弱,琼州海峡趋于稳定状态,三角洲的规模也进一步缩小.

致谢:感谢外业人员及实验人员的辛苦工作,感谢夏华永研究员在文章成稿过程中给出的宝贵建议.

References

Allen, G. P., 1971. Relationship between Grain Size Parameter Distribution and Current Patterns in the Gironde Estuary (France). *Journal of Sedimentary Research*, 41 (1): 74–88. doi: 10. 1306/74D721EE-2B21-11D7-8648000102C1865D

Chen, L., Zhang, Y. F., Li, T. J., et al., 2013. Geochemical Characteristics and the Source of Major Elements in the Surface Sediments from Pearl River Estuary to Hainan in South China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31 (1): 130–138 (in Chinese with English abstract).

Chen, M., 2001. Granularity Characters of Sediments in Northeastern South China Sea. *Geological Research of South China Sea*, 13: 80–89 (in Chinese with English abstract).

Emery, K. O., Gould, H., 1948. A Code for Expressing Grain Size Distribution. *Journal of Sedimentary Research*, 18 (1): 14–23. doi: 10. 1306/d42692dd-2b26-11d7-8648000102c1865d

Gao, S., 2009. Grain Size Trend Analysis: Principle and Applicability. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27 (5): 826–836 (in Chinese with English abstract).

Gao, S., Collins, M., 1998. The Use of Grain Size Trends in Marine Sediment Dynamics. *Bulletin of National Science Foundation of China*, 4: 241–246 (in Chinese with English abstract).

Gao, W. L., Zhang, F. Y., Zhang, W. Y., et al., 2009. Characteristics of Grain Size Distributions of Surface Sediments in the Hainan Island Offshore Area. *Marine Science Bulletin*, 28 (2): 71–80 (in Chinese with English abstract).

Hajek, E. A., Huzurbazar, S. V., Mohrig, D., et al., 2010. Statistical Characterization of Grain-Size Distributions in Sandy Fluvial Systems. *Journal of Sedimentary Research*, 80 (2): 184–192. doi: 10. 2110/jsr. 2010. 020

Jia, J. J., Gao, S., Xue, Y. C., 2002. Grain-Size Parameters Derived from Graphic and Moment Methods: A Comparative Study. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 33 (6): 577–582 (in Chinese with English abstract).

Jin, B., Bao, C. W., Lin, J. S., 1982. Geomorphic Feature and Origin of the Deltas at the East and West Mouthes of Qiongzhou Strait. *Marine Geological Research*, 2 (4): 94–101 (in Chinese with English abstract).

Klovan, J. E., 1966. The Use of Factor Analysis in Determining Depositional Environments from Grain-Size Distributions. *Journal of Sedimentary Research*, 36 (1): 115–125. doi: 10. 1306/74d7141a-2b21-11d7-8648000102c1865d

Li, X. J., Wang, L. Q., Liang, K., et al., 2002. Stratigraphic Classification and Engineering Geological Characteristics of the Sea Floor in Qiongzhou Strait. *Guangdong Geology*, 17 (4): 50–57 (in Chinese with English abstract).

Liu, Z. S., Zhao, H. T., Fan, S. Q., et al., 2002. South China Sea Geology. Science Press, Beijing, 73–77 (in Chinese).

Ma, F., Wang, Y. P., Li, Y., et al., 2008. The Application of Geostatistics to Analysis of Grain Size Trend in the Eastern Beibu Gulf. *Acta Geographica Sinica*, 63 (11): 1207–1217 (in Chinese with English abstract).

McLaren, P., 1981. An Interpretation of Trends in Grain Size Measures. *Journal of Sedimentary Research*, 51 (2): 611–624. doi: 10. 1306/212f7cf2-2b24-11d7-

8648000102c1865d

- McLaren, P., Bowles, D., 1985. The Effects of Sediment Transport on Grain-Size Distributions. *Journal of Sedimentary Research*, 55(4): 457—470. doi: 10.1306/212f86fc-2b24-11d7-8648000102c1865d
- McManus, J., 1988. Grain Size Determination and Interpretation. In: Tucker, M., ed., *Techniques in Sedimentology*. Blackwell Scientific Publication, Oxford, 63—85.
- Peng, X. C., 2000. Geological Structure Characteristics and Cause of Formation Analyzing in Qiongzhou Strait, South China Sea. *Geological Research of South China Sea*, (12): 44—57 (in Chinese with English abstract).
- Shi, M. C., Chen, C. H., Huang, F., et al., 1998. Characteristics of Tidal Current and Residual Current in the Qiongzhou Straits in Period between End of Winter and Beginning of Spring. *Acta Oceanologica Sinica*, 20(1): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Swan, D., Clague, J. J., Luternauer, J. L., 1978. Grain-Size Statistics I: Evaluation of the Folk and Ward Graphic Measures. *Journal of Sedimentary Research*, 48(3): 863—878. doi: 10.1306/212f7595-2b24-11d7-8648000102c1865d
- Xu, Z. W., Wang, Y. P., Li, Y., et al., 2010. Sediment Transport Patterns in the Eastern Beibu Gulf Based on Grain-Size Multivariate Statistics and Provenance Analysis. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(3): 67—78 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Bao, X. W., Chen, C. S., et al., 2003. Analysis on Characteristics and Mechanism of Current System in West Coast of Guangdong Province in the Summer. *Acta Oceanologica Sinica*, 25(6): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. N., Chen, W. G., 1987. Preliminary Study of the Formation for Qiongzhou Strait. *Acta Oceanologica Sinica*, 9(5): 594—602 (in Chinese).
- Zhao, H. T., Wang, L. R., Yuan, J. Y., 2007. Origin and Time of Qiongzhou Strait. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27(2): 33—40 (in Chinese with English

abstract).

附中文参考文献

- 陈亮, 张玉芬, 李团结, 等, 2013. 珠江口及琼东北海区元素地球化学特征及物质来源. *沉积学报*, 31(1): 130—138.
- 陈明, 2001. 南海东北部沉积物粒度特征. *南海地质研究*, 13: 80—89.
- 高抒, 2009. 沉积物粒径趋势分析: 原理与应用条件. *沉积学报*, 27(5): 826—836.
- 高抒, Collins, M., 1998. 沉积物粒径趋势与海洋沉积动力学. *中国科学基金*, 4: 241—246.
- 高为利, 张富元, 章伟艳, 等, 2009. 海南岛周边海域表层沉积物粒度分布特征. *海洋通报*, 28(2): 71—80.
- 贾建军, 高抒, 薛允传, 2002. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比. *海洋与湖沼*, 33(6): 577—582.
- 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. *海洋地质研究*, 2(4): 94—101.
- 李学杰, 汪良旗, 梁开, 等, 2002. 琼州海峡海底地层划分及工程地质特性. *广东地质*, 17(4): 50—57.
- 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等, 2002. *南海地质*. 北京: 科学出版社, 73—77.
- 马菲, 汪亚平, 李炎, 等, 2008. 地统计法支持的北部湾东部海域沉积物粒径趋势分析. *地理学报*, 63(11): 1207—1217.
- 彭学超, 2000. 琼州海峡地质构造特征及成因分析. *南海地质研究*, (12): 44—57.
- 侍茂崇, 陈春华, 黄方, 等, 1998. 琼州海峡冬末春初潮流场特征. *海洋学报(中文版)*, 20(1): 1—10.
- 徐志伟, 汪亚平, 李炎, 等, 2010. 多元统计及物源分析支持的北部湾东部海域沉积物输运趋势. *海洋学报(中文版)*, 32(2): 67—78.
- 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等, 2003. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制. *海洋学报(中文版)*, 25(6): 1—8.
- 张虎男, 陈伟光, 1987. 琼州海峡成因初探. *海洋学报(中文版)*, 9(5): 594—602.
- 赵焕庭, 王丽荣, 袁家义, 2007. 琼州海峡成因与时代. *海洋地质与第四纪地质*, 27(2): 33—40.