

文章编号:1000-0550(2014)06-1089-11

晚更新世以来台湾浅滩西部地层结构与古环境演化^①

王利波^{1,2,3} 李 军^{2,3} 陈正新^{2,3} 赵京涛^{2,3} 白凤龙^{2,3}
胡邦琦^{2,3} 窦衍光^{2,3} 翟 滨^{2,3}

(1.中国海洋大学海洋地球科学学院 山东青岛 266100;

2.国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室 山东青岛 266071; 3.青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071)

摘 要 根据对台湾浅滩西部地质浅钻的沉积相、粒度和 AMS ¹⁴C 年代分析及高分辨率浅地层剖面解释,本文研究了浅滩大型沙波区的地层结构与沉积环境演化。台湾浅滩西部保存了三期海相层和两期陆相层。下部的海相层(DU6)可能形成于氧同位素 5.1 期,以潮间带—潮下带浅海沉积为主;中间的海相层(DU4)可能形成于氧同位素 3 期,以滨岸—潮间带沉积为主;上部的海相层(DU2 和 DU1)为形成于末次冰消期以来的海侵砂和潮流砂。两期陆相层(DU5 和 DU3)为沟谷充填沉积,可能形成于氧同位素 4 和 2 期。冰后期海侵过程形成的中粗砂层构成了沙波的基底部分(DU2)。沙波的主体部分(DU1)形成于全新世高海平面以来,主要由中粗砂和含砾中粗砂组成。沙波的粒度频率分布曲线主要众数组分-1~3 φ,形态尖陡;概率累积曲线多为两段式,跃移组分含量高于 80%,悬移组分不足 20%,滚动组分缺失或很少。潮流砂(DU1)的平均粒径与分选系数呈良好的正相关,反映潮流的淘洗作用越强,沉积物粒径越粗、分选越好。

关键词 台湾浅滩 潮流沉积 沉积环境 晚更新世

第一作者简介 王利波 男 1983 年出生 硕士 助理研究员 海洋沉积专业 E-mail:wanglibowlb@gmail.com

通讯作者 李 军 男 研究员 E-mail:junli741001@gmail.com

中图分类号 P736.21 **文献标识码** A

0 引言

陆架海处于洋—陆过渡带,沉积作用受海洋和陆地各种自然过程共同影响,沉积物记录了海平面、海洋环境、河流入海沉积物和气候变化等丰富信息。台湾海峡是东海和南海进行物质和能量交换的主要通道,区内地震、台风等短时灾害过程多发,潮流作用强,同时受黑潮分支、南海暖流和东海环流等多种水系的影响,并且周边有众多山溪性中小型河流入海,成为海洋沉积环境研究的理想区域。在台湾海峡开展晚更新世以来的地层结构和沉积环境研究,有助于丰富中国陆架晚第四纪层序地层的认识,有助于认识东部陆架和南海陆架层序地层之间的联系,并对研究该区的海洋沉积过程有重要意义。前人根据柱状样、地质浅钻和地震剖面等资料,对中国东部陆架晚第四纪层序地层和古环境演化进行了深入研究^[1~10],对南海北部陆架的层序地层和沉积环境研究也有丰硕成果^[11~13]。然而,台湾海峡作为连接东海和南海的纽带,研究成果多侧重于现代沉积过程^[14~16],长时间尺度地层结构和沉积环境演化的研究报道较少。

台湾海峡潮流沉积体系是中国陆架六大潮流沉积体系之一^[17],它可划分为两个侵蚀区和两个沉积区,台湾浅滩属于沉积区之一^[15,17]。浅滩底质以砂质粗颗粒沉积物为主,海底分布着潮流沙脊和沙波^[18~22]。浅滩中粗砂是 20 ka 前的异地物质,在 10~20 ka 期间由单向海流搬运而来^[19]。柱状岩芯揭示台湾海峡西部保存了晚更新世以来的 5 个沉积层序^[23,24],浅滩冰后期沉积环境演变经历了三角洲沉积环境、滨岸海滩环境和现代浅滩沉积环境三个阶段^[20]。上述研究对台湾浅滩中粗砂的时代与成因、晚第四纪地层划分及古环境演变等方面进行了探讨,具有重要意义,但对于浅滩潮流砂体地层结构的研究少见于报道,对于浅滩层序地层和沉积环境演化的研究多利用柱状样而缺少长岩芯的记录。本文拟分析取自台湾浅滩西部长度 40 m 的岩芯以及浅地层剖面资料,划分浅滩地层结构、探讨浅滩沉积环境演化。

1 研究区概况

台湾海峡位于福建和台湾之间,受热带型季风气候影响,从 5 月到 11 月,特别在 7~9 月份,台风频繁

①国家自然科学基金(批准号:41406074, 40746036, 41376079, 41206049)与国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室开放基金(编号: MRE201234)资助

收稿日期:2013-08-20;收修改稿日期:2014-04-04

出现。海峡主要受浙闽沿岸水、南海水和黑潮的控制,表层海流流向随季节变化,而底层的海流流向基本不变,终年向北流动^[25,26]。海峡潮流作用强,为不正规半日潮,以 M_2 分潮占主导^[22],潮流椭圆以北东—南西向和南北向为主^[27,28],多年平均流速 0.46 m/s,最大可达 0.8 m/s^[28],台湾浅滩处的最大流速达 1.2 m/s 以上^[29]。台湾浅滩位于台湾海峡南部,面积约 13 000 km²,中心位置在 23° N, 118° 30' E 附近^[30],地质构造上是周边被陡坎围限的构造台地^[31],水深较浅,平均水深仅 20 m 左右,向南以较大坡度降入大陆坡,朝北降为较开阔的海峡平原^[32]。底质主要由粗砂和砂组成^[18-21],其上分布着北北东—南南西、北—南向的潮流沙脊和近东—西向的沙波,沙脊走向与潮流椭圆长轴方向基本一致,而沙波走向大致与其垂直^[22]。前人报道到沙波尺度差别大:郑铁民等观测的沙波高 6~20 m,宽度 100~2 000 m^[18];杨顺良观测的沙波高 3~23 m,以 4~12 m 为甚,宽度 225~568 m,平均宽度 377 m,间距 319~1 126 m,平均间距 917 m^[32];蔡爱智等观测的沙波高 10~20 m,沙波长 350~500 m,最大的沙波高可达 27~30 m,沙波长超过 1 000 m^[20];杜晓琴等观测的沙波高 14.4~20.3 m,沙波长 325~822 m^[29];卫星遥感数据显示沙波高 3~25 m,沙波长 300~1 120 m^[33]。沙波的形态有单峰、双峰、复杂、对称和不对称等模式,并且它们处于活动状态^[20]。

2 材料与方法

本文 TWS1208 孔位于台湾浅滩西部(图 1),地理坐标 117°49' E, 22°59' N,由青岛海洋地质研究所组织航次,勘 407 号钻探船施工,于 2012 年取得,水深 32.5 m,砂质沉积物取芯率平均 70%以上,泥质沉积物取芯率平均 80%以上,完井深度 40 m。所取岩芯经密封保存后运往实验室内进行详细描述和取样,取样间隔视岩性变化情况调整,一般 10~15 cm。根据每个回次的进尺和取芯率,将取样深度换算为实际深度。

粒度在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室完成测试。粗颗粒沉积物采用筛析法,筛子孔径 -3.5~4 ϕ ,间隔 1 ϕ ,称重后,根据各粒级的质量百分含量计算粒度参数。细颗粒沉积物采用激光法,使用的仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,统计粒级范围 -1~10 ϕ ,间隔 0.25 ϕ 。本文粒度参数均根据福克—沃德公式计算得出。

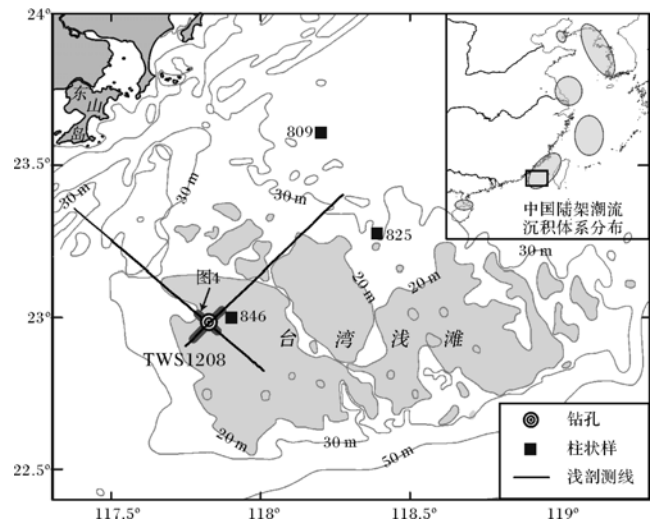


图 1 台湾浅滩西部浅地层剖面测线及钻孔站位图(柱状样引自蓝东兆等^[19],中国潮流沉积体系分布引自刘振夏等^[17])
Fig.1 Bathymetric map of the western Taiwan Shoal, showing tracklines of high-resolution subbottom profiles, locations of Core TWS1208 and piston cores^[19], distributions of tidal sands in the China seas^[17]

选取完整的贝壳送往美国 Beta 实验室进行 AMS¹⁴C 测年,用 Calib 6.1.0 软件将¹⁴C 年龄转换为日历年龄^[34]。年龄转换时采用 Marine09 曲线,本海域对全球海洋碳储库偏离量(ΔR)参照 Yoneda 等在台湾西北近岸的研究数据^[35],设置为 113±37 a。本文和前人测年结果如表 1 所示。

表 1 TWS1208 孔和邻近柱状样 AMS¹⁴C 测年数据
Table 1 AMS¹⁴C ages of Core TWS1208 and adjacent piston cores

样品	深度 /m	测试 材料	¹⁴ C 年龄	日历年龄	来源
			/a B.P.	/cal a B.P.	
TWS1208	7.06	贝壳	3 210±30	2 871	本文
TWS1208	9.51	贝壳	5 400±40	5 649	本文
TWS1208	26.52	贝壳	>43 500	>43 500	本文
809	1.08		3 349±130		蓝东兆等 ^[19]
809	2.63		13 927±219		蓝东兆等 ^[19]
809	4.05		27 746±559		蓝东兆等 ^[19]
825	0.05		5 556±241		蓝东兆等 ^[19]
825	0.90		14 107±349		蓝东兆等 ^[19]

浅地层剖面测量使用英国 AAE 公司生产的 CSP2200 震源控制器,电火花震源、20 单元组合检波水听器,以及 CodaOctopus 公司生产的 DA2000 采集系统。设置激发能量 500 J,激发间隔 1 s,带通滤波 100~5 000 Hz。

3 结果

3.1 沉积地层结构

根据沉积物岩性、结构、构造和沉积相序列关系, TWS1208 岩芯可划分为 6 个沉积地层单元, 从下到上依次是 DU6-DU1, 岩芯柱状图如图 2 所示, 典型照片如图 3 所示。

DU6(40~30.92 m) 下部由青灰色砂质粉砂、粉砂及深灰色黏土质粉砂组成, 具脉状、波状和透镜状层理, 贝壳碎片呈夹层状富集, 局部层位壳体保存较完整, 为牡蛎壳, 最大直径达 7 cm 左右, 该段为潮间坪沉积。中下部由灰色、深灰色黏土质粉砂夹毫米级粉砂、砂质粉砂纹层组成, 具波状层理, 部分层位黏土质粉砂与砂质粉砂互层, 单层厚度在 0.2~0.8 cm 左右, 局部见砂质粉砂透镜体, 含生物潜穴, 生物扰动程度轻微到中等, 该段为朝下带浅海沉积。中上部由灰色粉砂、砂质粉砂夹毫米级黏土质粉砂、粉砂质黏土纹层组成, 具波状、脉状层理, 部分层位砂质粉砂与黏土质粉砂互层, 单层厚度在 0.3~1 cm 左右, 含生物潜穴, 生物扰动程度轻微, 该段也为朝下带浅海沉积, 以粉砂或砂质粉砂为主, 粒度比中下段稍粗。上部由灰色粉砂质细砂组成, 具脉状层理, 含少量贝壳碎片, 夹有砾石、泥质团块和贝壳碎片组成的砾石层, 夹层厚约 12 cm, 可能是潮沟底部冲刷而成的滞留碎屑, 该段为潮沟改造的潮间坪沉积。

DU5(30.92~30.16 m) 由灰黄、黄褐色含砾粗砂组成, 块状构造, 与下伏地层侵蚀接触, 颜色特征显示该层经受暴露氧化。

DU4(30.16~22.91 m) 底部主要由灰黄、褐黄色表面粘有粗砂和贝壳碎片的泥质团块组成, 厚度约 15 cm, 具砾状构造和侵蚀槽, 可能因海水入侵改造下伏沉积物而成, 是滞留层。下部由黄灰色砂质粉砂组成, 以块状构造为主, 局部见脉状和透镜状层理, 含钙质结核, 具铁锈色斑块和条带, 有两个灰黄色中细砂夹层, 夹层厚度在 12 cm 左右, 该段可能为滨岸沉积。中下部主要由黄灰色、灰色砂质粉砂、黏土质粉砂组成, 具脉状、波状、透镜状层理, 局部见钙质结核和铁锈色斑块, 含贝壳碎片, 偶见保存较完整的腹足类壳体, 局部见生物潜穴, 轻微生物扰动, 该段为潮间坪—潮下带沉积。中上部由灰黑色、深灰色含砾粉砂质砂组成, 以块状构造为主, 偶见脉状黏土质纹层, 含贝壳碎片和植物根茎碎片, 植物碎片在灰黑色层内含量较高, 该段可能为滨岸盐沼沉积。上部由灰色黏土质粉

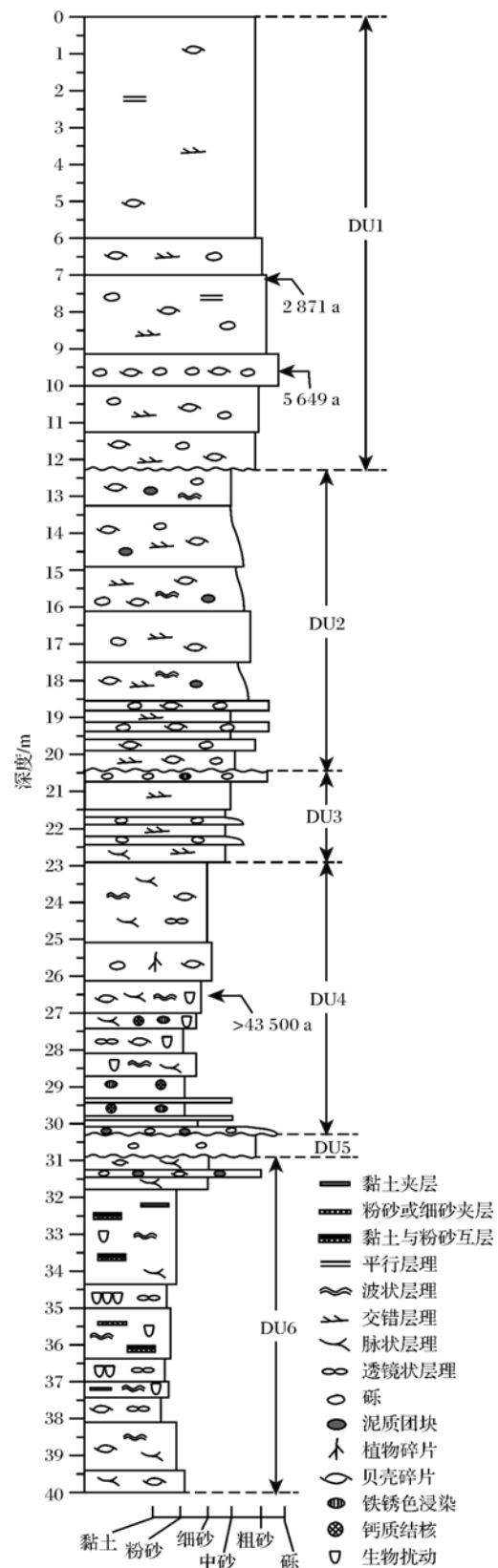


图 2 TWS1208 孔柱状图 (DU1-DU6 为沉积地层单元)

Fig.2 Geologic column of Core TWS1208, showing depositional units DU1 to DU6

砂和细砂质粉砂组成,以脉状层理为主,局部见波状和透镜状层理,含少量贝壳碎片和生物潜穴,有轻微生物扰动,该段为潮间坪沉积。809孔对应层位的测年结果是27 746 a B.P.,中下部26.5 m处的AMS¹⁴C年龄>43 500 a B.P.,该层可能形成于氧同位素3期。

DU3(22.91~20.50 m)下部和中上部由浅灰色中细砂和中砂组成,具交错层理,局部夹黏土质纹层,下部有两个厚度约20 cm的粗粒级夹层,夹层含砾石并有向上变细的粒序。上部为黄褐色含砾粗砂,有铁锈色浸染,显示暴露氧化的特征。809和825孔对应层位的测年分别是13 927 a B.P.和141 017 a B.P.^[19]。此时处于末次冰期,中国东部陆架广泛暴露^[36],推测该层可能是低海平面时小型切割沟谷充填而成。

DU2(20.50~12.29 m)下部灰黄色中粗砂层与砾质砂或砂质砾层交替互层,单层厚度在15~25 cm,中

砂层具交错层理,砾质层具砾状构造,松散,含贝壳碎片。中下部由黄灰色泥质中砂组成,向上泥含量增加,具交错层理和波状层理,含贝壳碎片,偶见泥质团块。中上部由褐黄、灰黄色含砾中粗砂组成,具交错层理,偶见贝壳碎片。上部由浅灰色泥质中砂或泥质粗砂组成,有两个泥质含量向上增加的粒序,具交错层理和波状层理,含贝壳碎片且在局部层位含量较高,偶见泥质团块。蔡爱智等认为DU2对应层位形成于滨岸海滩环境^[20],海滩沉积一般具有很好的分选性且悬移组分少,而本文粒度特征显示该层分选性不好且悬移组分含量较高,与典型海滩沉积物粒度特征不符。Uehara等数值模拟结果显示全新世海平面上升以来台湾浅滩附近潮流底应力较强^[37],因此DU2层可能是受强烈潮流作用的海侵砂体。

DU1(12.29~0 m)下部由黄灰、灰黄色含砾中粗

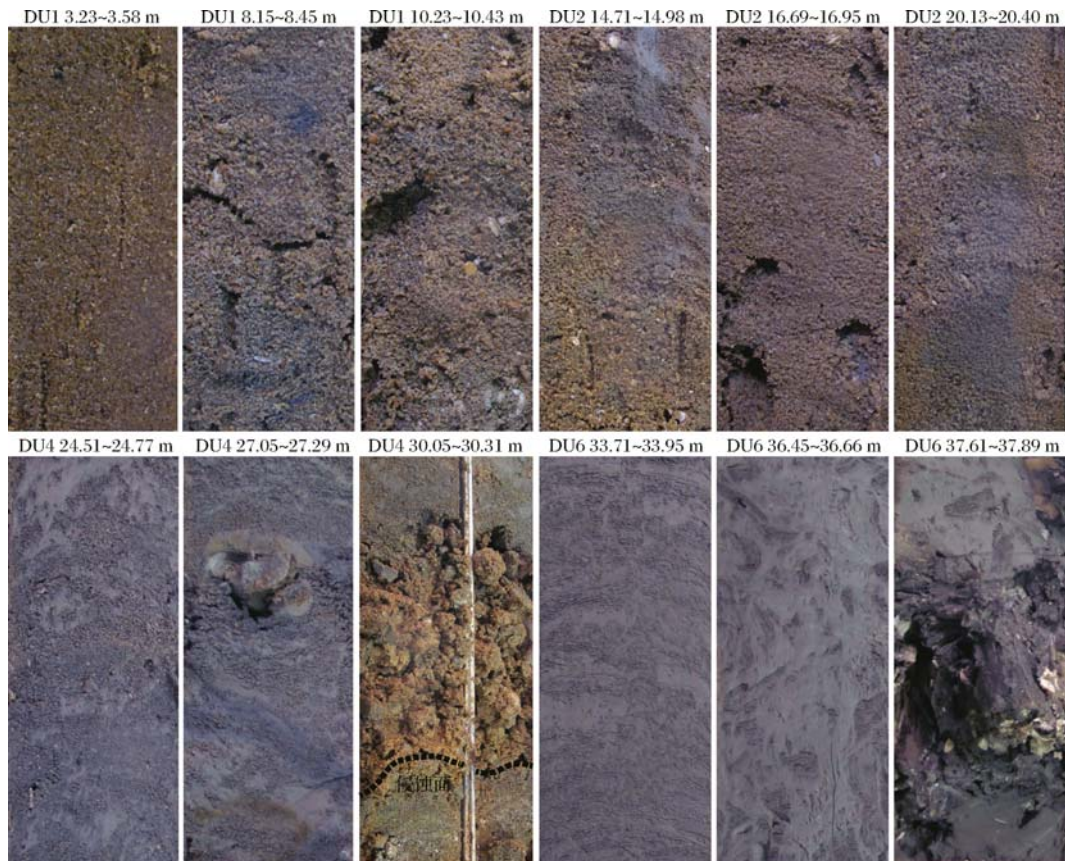


图3 TWS1208孔典型岩芯照片

DU1 潮流砂,上部受潮流改造频繁,分选好;DU2 海侵砂,部分层位含有一定的泥质组分;DU4 滨岸—潮坪沉积,局部含钙质结核(27.05~27.29 m),底部有滞留层(30.05~30.31 m);DU6 潮坪—潮下带浅海沉积,局部含保存较完整的牡蛎壳(37.61~37.89 m)。

Fig.3 Typical photographs of Core TWS1208

Tidalsands (DU1) are well sorted on the top of the core as a result of frequently tidal current scouring; Transgressive sands (DU2) contain a certain amount of mud in some layers; In littoral or tidal flat deposits (DU4), calcareous concretions are found in some layers (27.05~27.29 m) and a gravelly layer is bedded at the bottom (30.05~30.31 m); DU6 is mainly composed of tidal flat or subtidal shallow sea deposit, conserving unbroken ostracean shell in some layers (37.61~37.89 m).

砂组成,局部为砾含量较高的砾质砂,具交错层理,含贝壳碎片,偶见保存较完整的双壳类壳体。中下部由砾质砂或砂质砾组成,砾石直径最大可达 2 cm,松散,富含贝壳碎片。中上部为灰黄色含砾中粗砂,具交错层理和平行层理,含贝壳碎片,偶见保存较完整的双壳类壳体。上部为褐黄色中粗砂,相对下伏地层分选较好,具交错层理和平行层理,含贝壳碎片。7.06 m和 9.51 m 处的年龄分别为 2 871 a B.P.和 5 649 a B.P.,指示该层形成于全新世高海平面以来,是现代陆架潮流沉积砂体。

3.2 地震地层结构

根据过钻孔的浅地层剖面的地震反射特征,共识别出 6 个主要反射界面,从上到下分别为 T0-T5,划分为 6 个地震地层单元,从上到下分别为 SU1-SU6 (图 4)。

SU1 位于海底 T0 和反射面 T1 之间,内部反射轴难以识别,呈模糊的点状杂乱反射结构,反映了较为均质性的沉积。该层与沉积地层单元 DU1 相对应,是沙波的主体部分。

SU2 位于反射面 T1 和 T2 之间,内部反射振幅和连续性中等,具亚平行或发散反射结构,与底界面 T2 呈上超接触关系,是一组海侵沉积体系。该层与沉积地层单元 DU2 相对应,位于沙波下部,构成沙波的基底。

SU3 位于反射面 T2 和 T3 之间,内部反射不连

续,呈杂乱反射结构。底界面 T3 切割下伏地层,不连续,部分区域与界面 T2 合并。该层是一组切割充填沉积,切割沟谷规模一般很小,大型河道少见,与沉积地层单元 DU3 相对应。

SU4 位于反射面 T2 和 T4 或 T3 和 T4 之间,与沉积地层单元 DU4 相对应。内部反射连续性中等或较好,具平行或亚平行反射结构,厚度稳定,呈席状展布,体现了潮坪沉积的特征,层内局部具有杂乱反射结构的沟谷充填特征,可能是潮沟沉积。

SU5 位于反射面 T4 和 T5 之间,内部反射不连续,具杂乱反射结构。底界面 T5 与 T3 类似,切割下伏地层,不连续,部分区域与界面 T4 合并。该层是一组切割充填沉积,与沉积地层单元 DU5 相对应。

SU6 位于反射界面 T4 或 T5 下部,受多次波的干扰,未能识别出该层的底界面,局部可识别的地震反射特征显示,该层内部反射连续性较好,具平行或亚平行反射结构。该层上部与沉积地层单元 DU6 相对应。

3.3 粒度特征

TWS1208 孔下部的 DU6、DU4 粒度细,而上部的 DU2、DU1 粒度粗(图 5)。DU6 和 DU4 均以潮坪沉积体系为主,两者相比,DU6 各粒度参数波动最小且平均粒径整体较细,指示 DU6 沉积环境可能比 DU4 稳定。DU2 各粒度参数全孔波动最大,反映沉积环境不稳定。DU1 是沙波的主体部分,平均粒径全孔最粗且波动较小,体现了强且稳定的水动力条件。

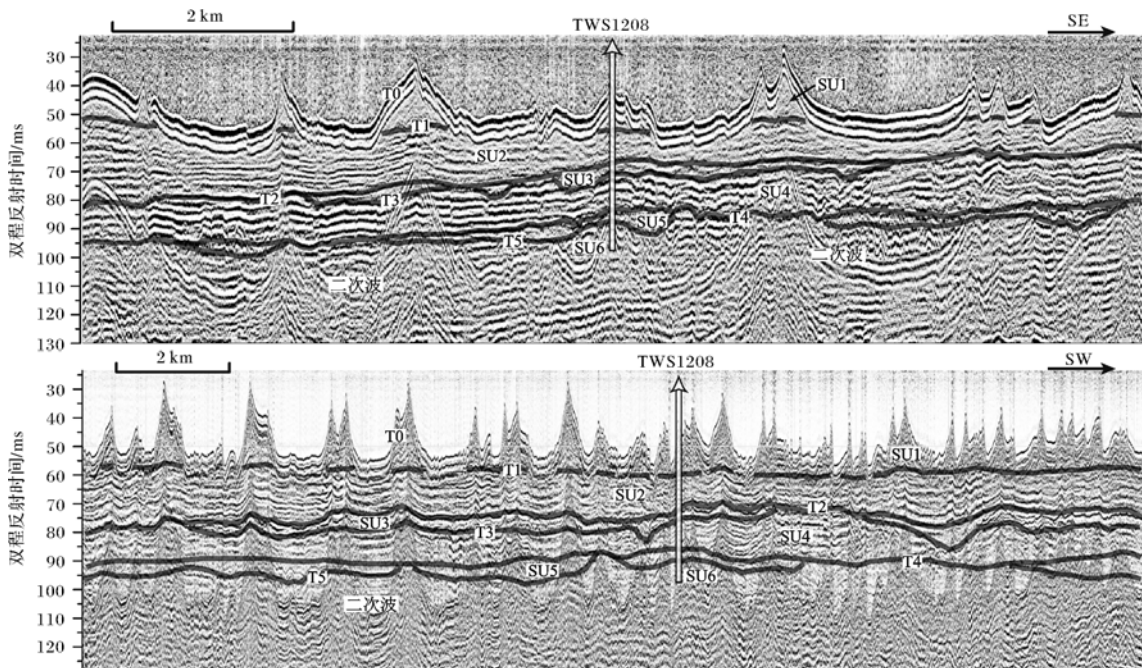


图 4 过钻孔 TWS1208 的北西—南东和北东—南西向浅地层剖面解释图

Fig.4 Interpreted subbottom profiles passing through Core TWS1208 from northwest to southeast and from northeast to southwest

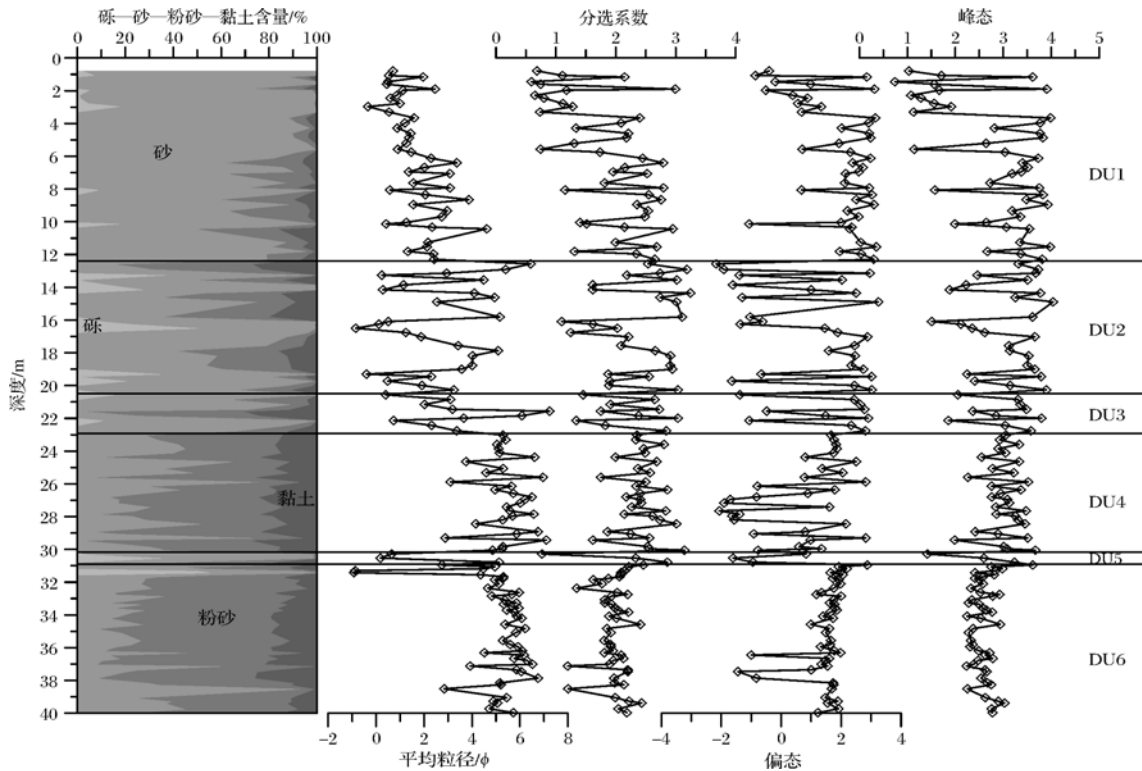


图5 TWS1208 孔粒度参数变化曲线

Fig.5 Downcore variations of grain-size parameters of Core TWS1208

DU1、DU2 的平均粒径与分选系数呈正相关(图6),表现为平均粒径越粗分选越好、越细分选越差。两者主要水动力条件均较强,粒度粗的层位沉积物淘洗充分,细颗粒物质被带走,粗颗粒物质沉积下来,分选较好,而粒度细的层位沉积物淘洗不充分,粗颗粒和细颗粒沉积物混杂,分选较差。DU1 的相关性比 D2 好,说明 DU1 水动力更强、淘洗更充分。DU4 平均粒径与分选系数呈弱负相关(图 6),表现为平均粒径越细分选越好,这可能因为 DU4 以细颗粒沉积物为主,粗颗粒的混入导致平均粒径变粗、分选变差。DU6 平均粒径与分选系数之间无明显的相关性。DU3 和 DU5 各粒度参数波动也较大,平均粒径和分选系数的投点与 DU1 和 DU2 相近。

各沉积单元的典型概率累积曲线和频率分布曲线如图 7 所示。刘振夏等指出潮流砂的滚动组分缺失或很少^[22],DU1 的概率曲线由跃移组分和悬浮组分两段式组成,跃移组分的含量一般在 80% 以上,分选较好,悬移组分的含量一般不足 20%,分选较差,两者的截点在 2~3 φ 左右,这与前人研究一致^[19]。频率曲线尖陡,众数组分 1~3 φ,潮流砂的频率曲线通常带有细颗粒尾巴^[22],DU1 与之相符。DU2 的累

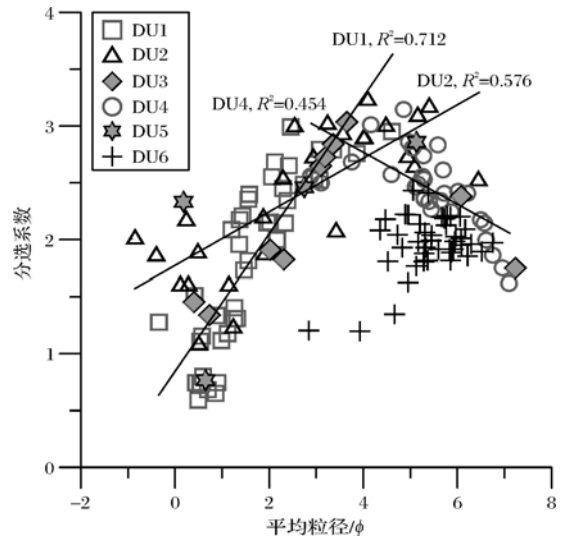


图6 TWS1208 孔平均粒径对分选系数散点图

Fig.6 Scatter plot of mean grain-size vs. sorting coefficient of Core TWS1208

积曲线也为两段式,截点在 2~3 φ 左右,跃移组分含量 30%~80%,悬移组分含量 20%~70%。频率分布曲线有两个众数组分,粗粒众数在 0~2 φ,形态尖陡,细粒众数在 3~11 φ,形态宽缓,不同层位粗细组分含

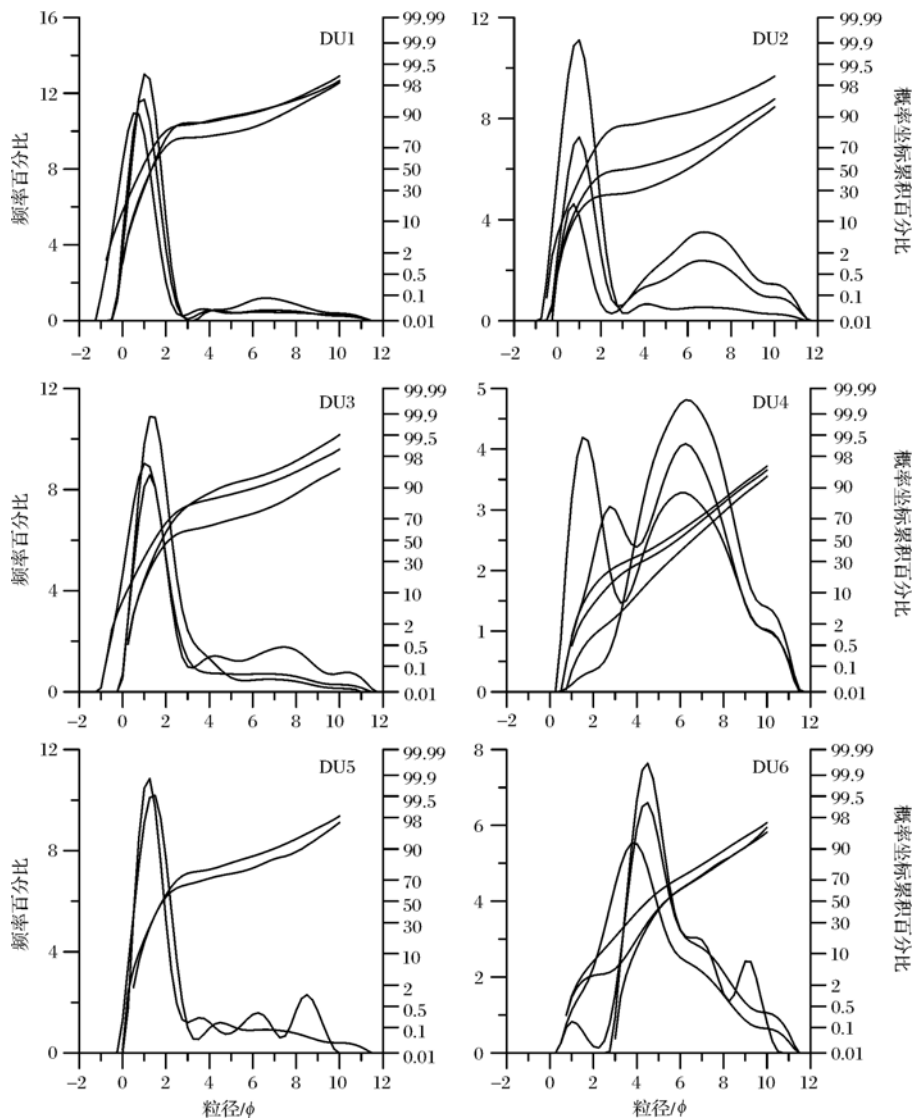


图 7 TWS1208 孔粒度概率累积曲线和频率分布曲线

Fig.7 Grain-size probability cumulative curves and frequency distribution curves of Core TWS1208

量变化较大。DU4 和 DU6 的累积曲线均以悬移质为主,DU4 频率曲线单峰和双峰均较常见,主要众数组分为细颗粒沉积物,DU6 频率曲线以单峰为主,多呈正偏态,主要众数组分尖陡,部分层位含有少量粗粒或细粒峰值组分。DU3 和 DU5 相似,累积曲线为两段式,跃移质含量一般在 70% 以上,悬移质含量低,截点在 2~3 φ 左右。频率曲线的主要众数组分为粗颗粒沉积物,粒径一般在 0~3 φ,形态尖陡,细颗粒组分形态宽缓,个别层位有多个细粒峰值组分。

TW1208 孔各沉积单元在 C-M 图上的投点如图 8 所示。DU1 的 C 值一般大于 1 000 μm, M 值一般大于 300 μm,相当于 NO 段,基本上由滚动颗粒组成。DU2 的投点近似与横轴平行, C 值一般大于

700 μm, M 值变化明显,大致相当于 NO-OP 段,以滚动搬运为主,但因悬浮组分的混入使得 M 值有明显的变化。DU4 和 DU6 具有均匀悬浮的特征。DU3 和 DU5 虽然投点较少,但主要位于滚动搬运段。值得注意的是 CM 图只有滚动组分和悬浮组分,其中的滚动组分应该对应于粒度概率累积曲线的滚动组分和跃移组分。

4 讨论

钻孔沉积相分析和高分辨率浅地层剖面解释发现,台湾浅滩西部大型沙波下部保存了三期海相地层。最下部的沉积地层单元 DU6 是一组潮间坪—潮下带浅海—潮间坪沉积,以潮下带浅海沉积为主。

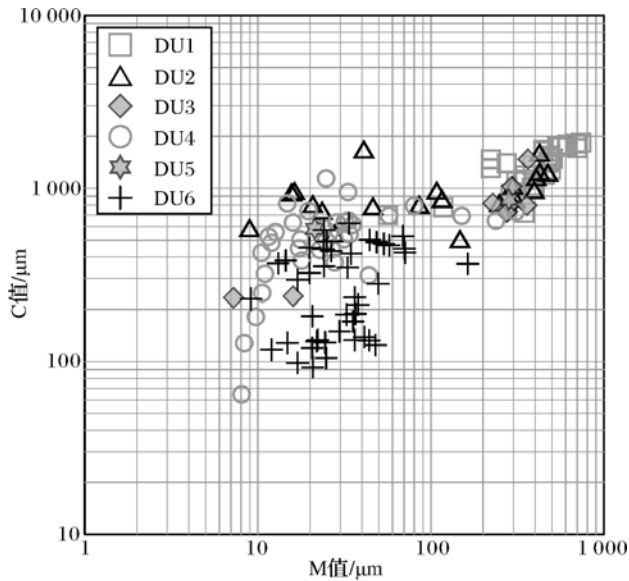


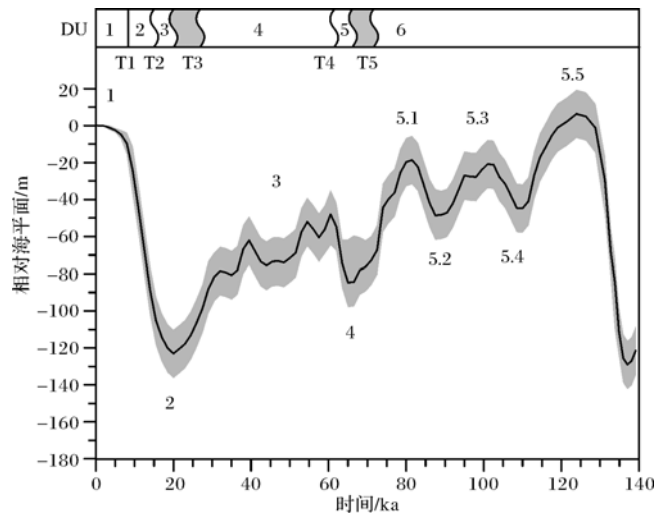
图8 TWS1208孔 C-M图

Fig.8 C-M plot of Core TWS1208

DU4 是一组滨岸—潮间坪/潮下带—滨岸盐沼—潮间坪沉积,以潮间坪/潮下带沉积为主。DU2 是海进过程中潮流改造下伏沉积物而形成海侵砂体,DU1 是现代潮流砂沉积。这三组海相地层被 DU6 和 DU4 之间的 DU5 以及 DU4 和 DU2 之间的 DU3 分割,DU5 和 DU3 具有地表暴露氧化的特征,两者的下界面 T5 和 T3 切割下伏地层,结合地层对比,推测这两层可能是陆相切割充填沉积。

前人通过对台湾海峡西部若干柱状样的综合分析,将海峡西部晚第四纪沉积层序划分为 E、D、C、B 和 A 层^[23,24];E 层为浅海沉积,水深小于 30 m,形成年代早于 70 ka B.P.,沉积地层单元 DU6 与之对应;D 层下部为陆相沉积,形成于 70~60 ka B.P.的低海平面时期,DU5 与之对应;D 层上部和 C 层为滨海相沉积,分别形成于 60~42 ka B.P.和 42~23 ka B.P.,DU4 与之对应;B 层形成时代在 23~11 ka B.P.,该时段内中国东部陆架大部分出露地表^[36],从而形成了经受暴露氧化的陆相切割充填沉积 DU3;A 层是冰后期沉积,可进一步划分为三层,A1 层形成于 11~8.5 ka B.P.,A2 和 A3 层形成与 8.5 ka B.P.以来,DU2 与 A1 层对应,DU1 与 A2 和 A3 对应。通过与海平面变化曲线的对比(图 9),DU6 形成于氧同位素 5.1 期,DU5 形成于氧同位素 4 期,DU4 形成于氧同位素 3 期,DU3 形成于氧同位素 2 期,DU2 形成于末次海侵期,DU1 形成于高位期。

浅地层剖面显示海相层 DU6 的顶界一般在现代

图9 台湾浅滩西部地层单元与全球相对海平面变化的关系(海平面变化曲线引自 Waelbroeck 等^[38])Fig.9 Correlation of stratigraphic sequence in the western Taiwan Shoal and global relative sea-level changes (relative sea-level curve is modified after Waelbroeck^[38])

海平面下 60 m 以深,氧同位素 5.1 期的海平面高度比现代海平面低 20~30 m 左右^[38],刘健等估算渤海沉积物 50 ka 以来的沉降深度约 20 m^[2],如果研究区沉降速率与之相近,台湾浅滩在氧同位素 5.1 期可能处于 10~20 m 以深的潮下带浅海环境,与 DU6 沉积相分析相符。氧同位素 4 期,海平面降低到现代海平面以下约 80 m 处^[38],海相层 DU6 暴露地表遭受氧化,并形成了削蚀面 T5 和沟谷充填沉积 DU5。随后,海平面快速上升,海水入侵过程中 T5 遭受改造并形成海侵面 T4,仅局部被 DU5 覆盖的部位得以保存。氧同位素 3 期的海平面在现代海平面以下约 40~80 m 处^[38],结合 DU4 沉积相分析,推测台湾浅滩可能处于 0~20 m 之间的盐沼—潮间带—潮下带更替环境。末次冰期,海平面最低下降到现代海平面以下 130 m 左右^[36],研究区暴露地表并遭受侵蚀,形成削蚀面 T3 和沟谷充填沉积 DU3。末次冰期结束,海水大规模入侵,部分区域 T3 遭受改造并形成海侵面 T2,上超于 T2 之上的 DU2 层也在此阶段形成,属于海侵体系域。DU2 由中粗砂和泥质中砂组成,三个泥含量向上增加的粒序可能与中国东部陆架末次海侵的阶段性的上升特点有关^[36],海平面快速上升后可容纳空间突然增大,粗颗粒沉积物不能及时供应,同时由于深度增大,水动力对沉积物的淘洗减弱,细颗粒物质得以沉积下来。蓝东兆等认为台湾浅滩的中粗砂在 10~20 ka B.P.之间从异地搬运而来^[19],此时

期中国东部陆架海水阶段性入侵^[36],DU2开始形成,该中粗砂层构成了沙波的基底部分。全新世海平面达到现今的高度并相对稳定后,台湾浅滩处于潮控陆架浅海环境,DU2层遭受潮流、风暴流等强水动力的不断改造,在其上部广泛发育沙波,沙波下部的反射面T1大致相当于潮流、风暴流作用的下界面或最大海泛面。DU1层是沙波的主体部分,上部沉积物颜色和岩性稳定单一,尤其是顶部3m沉积物分选全孔最好,说明该段受水动力作用频繁,沉积物淘洗充分,可能普通潮流作用就能够将其改造;下部的沉积物分选变差,以含砾中粗砂为主,局部发育砾质砂或砂质砾层,可能强风暴流作用时才能将其改造。

5 结论

台湾浅滩西部保存了三期海相地层:下部的海相层(DU6)是以黏土质粉砂和粉砂质黏土为主的潮间带—潮下带浅海沉积;中间的海相层(DU4)是以细砂质粉砂和黏土质粉砂为主的滨岸—潮间带沉积;上部的海相层以中粗砂为主,DU2为海侵砂,DU1为现代潮流砂。海相层被两期遭受暴露氧化的沟谷充填沉积(DU5和DU3)分割。

末次冰消期以来的海侵过程形成的中粗砂层构成了沙波的基底部分(DU2)。沙波的主体部分(DU1)形成于全新世高海平面以来,主要由中粗砂和含砾中粗砂组成,上部岩性稳定且分选相对较好,体现了潮流作用的频繁改造。沙波的粒度频率分布曲线主要众数组分在 $-1\sim 3\phi$,概率累积曲线多为两段式,跃移组分高、悬移组分低、滚动组分缺失或很少。潮流砂(DU1)的平均粒径与分选系数呈良好的正相关性,指示潮流的淘洗作用越强,沉积物粒径越粗、分选越好。

参考文献 (References)

- 秦蕴珊,赵一阳,赵松龄,等.渤海地质[M].北京:科学出版社,1985:161-211 [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Zhao Songling, *et al.* Geology of the Bohai Sea [M]. Beijing: Science Press, 1985: 161-211]
- Liu J, Saito Y, Wang H, *et al.* Stratigraphic development during the Late Pleistocene and Holocene offshore of the Yellow River delta, Bohai Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36: 318-331
- 刘敏厚,吴世迎,王永吉,等.黄海晚第四纪地质[M].北京:海洋出版社,1987:292-302 [Liu Minhou, Wu Shiyong, Wang Yongji, *et al.* Late Quaternary Geology of the Yellow Sea [M]. Beijing: Ocean Press, 1987: 292-302]
- 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等.黄海地质[M].北京:海洋出版社,1989:39-180 [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong, *et al.* Geology of the Yellow Sea [M]. Beijing: Ocean Press, 1989: 39-180]
- 杨子庚. Olduvai 亚期以来南黄海沉积层序及古地理变迁[J].地质学报,1993,67(4):357-366 [Yang Zigeng. The sedimentary sequence and palaeogeographic changes of the south Yellow Sea since the olduvai subchron [J]. Acta Geologica Sinica, 1993, 67(4): 357-366]
- 葛淑兰,石学法,朱日祥,等.南黄海 EY02-2 孔磁性地层及古环境意义[J].科学通报,2005,50(22):2531-2540 [Ge Shulan, Shi Xuefa, Zhu Rixiang, *et al.* Magnetostratigraphy of Borehole EY02-2 in the southern Yellow Sea and its paleoenvironmental significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(22): 2531-2540]
- Liu J, Saito Y, Kong X, *et al.* Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea [J]. Marine Geology, 2010, 278(1): 54-76
- Liu Z X, Berne S, Saito Y, *et al.* Quaternary seismic stratigraphy and paleoenvironments on the continental shelf of the East China Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(4): 441-452
- 葛淑兰,石学法,吴永华,等.东海外部陆架 EY02-1 孔磁性地层研究[J].海洋学报,2008,30(2):51-61 [Ge Shulan, Shi Xuefa, Wu Yonghua, *et al.* Magnetostratigraphy of Borehole EY02-1 in the northern outer continental shelf of the East China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(2): 51-61]
- 杨子庚,林和茂.中国东部第四纪进程与国际对比[M].北京:地质出版社,1993:1-125 [Yang Zigeng, Lin Hemao. Quaternary Processes in East China and International Correlation [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-125]
- Chen P P, Chen Z Y, Zhang Q M. Sequence stratigraphy and continental margin development of the northwestern shelf of the South China Sea [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(5): 842-862
- Ludmann T, Kin W H, Wang P. Plio - Quaternary sedimentation processes and neotectonics of the northern continental margin of the South China Sea [J]. Marine Geology, 2001, 172(3/4): 331-358
- 葛黄敏,李前裕,钟广法,等.南海北部第四纪高分辨率地震层序地层与古环境演化[J].海洋地质与第四纪地质,2012,32(4):49-60 [Ge Huangmin, Li Qianyu, Zhong Guangfa, *et al.* High resolution Quaternary seismic sequence stratigraphy and paleoenvironment evolution in the northern South China Sea [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2012, 32(4): 49-60]
- Liu J P, Liu C S, Xu K H, *et al.* Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait [J]. Marine Geology, 2008, 256(1/2/3/4): 65-76
- Liao H R, Yu H S, Su C C. Morphology and sedimentation of sand bodies in the tidal shelf sea of eastern Taiwan Strait [J]. Marine Geology, 2008, 248: 161-178
- Huh C A, Chen W, Hsu F H, *et al.* Modern (<100 years) sedimentation in the Taiwan Strait: Rates and source-to-sink pathways elucidated from radionuclides and particle size distribution [J]. Continental Shelf Research, 2011, 31(1): 47-63
- Liu Z, Xia D, Berne S, *et al.* Tidal deposition systems of China's continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea [J]. Marine Geology, 1998, 145: 225-253
- 郑铁民,张君元.台湾浅滩及其附近大陆架的地形和沉积特征的

- 初步研究[M]//中国科学院海洋研究所. 黄东海地质. 北京: 科学出版社, 1982: 52-66 [Zheng Tiemin, Zhang Junyuan. Preliminary Researches of Geomorphology and Sedimentary Characteristics in the Taiwan Shoal and Surrounding Shelf [M]//Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Geology of the Yellow Sea and East China Sea. Beijing: Science Press, 1982: 52-66]
- 19 蓝东兆, 张维林, 陈承惠, 等. 台湾浅滩中粗砂的时代与成因[J]. 台湾海峡, 1991, 10(2): 156-161 [Lan Dongzhao, Zhang Weilin, Chen Chenghui, *et al.* Preliminary study on age and origin of medium-coarse sand in Taiwan Shoal [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1991, 10(2): 156-161]
- 20 Cai A, Zhu X, Li Y, *et al.* Sedimentary environment in Taiwan Shoal [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1992, 10(4): 331-339
- 21 廉耀康, 李炎. 台湾浅滩沉积物粒度特征及输运趋势[J]. 台湾海峡, 2011, 30(1): 122-127 [Lian Yaokang, Li Yan. Grain size characteristics and transport trend in the Taiwan Bank [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30(1): 122-127]
- 22 刘振夏, 夏东兴. 中国近海潮流沉积沙体[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 129-210 [Liu Zhenxia, Xia Dongxing. Tidal Sands in the China Seas [M]. Beijing: Ocean Press, 2004: 129-210]
- 23 陈承惠, 蓝东兆, 于永芬, 等. 台湾海峡西部海域晚第四纪地层[J]. 第四纪研究, 1990(4): 301-307 [Chen Chenghui, Lan Dongzhao, Yu Yongfen, *et al.* Late Quaternary stratigraphy in the western Taiwan Strait [J]. Quaternary Sciences, 1990(4): 301-307]
- 24 蓝东兆, 张维林, 陈承惠, 等. 晚更新世以来台湾海峡西部的海侵及海平面变化[J]. 海洋学报, 1993, 15(4): 77-84 [Lan Dongzhao, Zhang Weilin, Chen Chenghui, *et al.* Transgression and sea-level change in western Taiwan Strait since the Late Pleiocene [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1993, 15(4): 77-84]
- 25 伍伯瑜. 台湾海峡及其邻近水域的流型和水文特征[J]. 海洋通报, 1983, 2(4): 1-8 [Wu Boyu. The current pattern and hydrologic character in the Taiwan Straits and its adjacent waters [J]. Marine Science Bulletin, 1983, 2(4): 1-8]
- 26 李立, 郭小钢, 吴日升. 台湾海峡南部的海洋锋[J]. 台湾海峡, 2000, 19(2): 147-156 [Li Li, Guo Xiaogang, Wu Risheng. Oceanic fronts in southern Taiwan Strait [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2000, 19(2): 147-156]
- 27 Jan S, Chern C S, Wang J, *et al.* The anomalous amplification of M2 tide in the Taiwan Strait [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31: L07308
- 28 Wang Y H, Jan S, Wang D P. Transports and tidal current estimates in the Taiwan Strait from shipboard ADCP observations (1999 - 2001) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57: 193-199
- 29 杜晓琴, 李炎, 高抒. 台湾浅滩大型沙波、潮流结构和推移质输运特征[J]. 海洋学报, 2008, 30(5): 124-136 [Du Xiaoqin, Li Yan, Gao Shu. Characteristics of the large scale sandwaves, tidal flow structure and bedload transport over the Taiwan Bank in southern China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(5): 124-136]
- 30 刘振夏. 中国陆架潮流沉积研究新进展[J]. 地球科学进展, 1996, 11(4): 414-416 [Liu Zhenxia. Advances of tidal deposit researches in the China Shelves [J]. Advance in Earth Science, 1996, 11(4): 414-416]
- 31 马修道, 刘锡清. 台湾浅滩构造台地的形成与发展[J]. 海洋地质动态, 1994(7): 4-6 [Ma Xiudao, Liu Xiqing. Formation and development of tectonic platform in the Taiwan Shoal [J]. Marine Geology Frontiers, 1994(7): 4-6]
- 32 杨顺良. 闽南—台湾浅滩渔场地形地貌与上升流的关系[M]//洪华生, 丘书院, 阮五崎, 等. 闽南—台湾浅滩渔场上升流区生态系统研究. 北京: 科学出版社, 1991: 39-46 [Yang Shunliang. Correlation of geomorphology and upwelling in Minnan-Taiwan bank fishing ground [M]//Hong Huasheng, Qiu Shuyuan, Ruan Wuqi, *et al.* Minnan-Taiwan Bank Fishing Ground Upwelling Ecosystem Study. Beijing: Science Press, 1991: 39-46]
- 33 Hsu M K, Mitnik L M, Shih S M. Mapping of sand waves and channels in the Taiwan Tan area with ERS SAR [M]//Guyenne T D, Danesy D. Third ERS Symposium on Space at the Service of Our Environment. Florence, Italy: European Space Agency, 1997: 453-456
- 34 Stuiver M, Reimer P J. Extended ¹⁴C database and revised CALIB radiocarbon calibration program [J]. Radiocarbon, 1993, 35: 215-230
- 35 Yoneda M, Uno H, Shibata Y, *et al.* Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2007, 259(1): 432-437
- 36 Liu J P, Milliman J D, Gao S, *et al.* Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. Marine Geology, 2004, 209(1/2/3/4): 45-67
- 37 Uehara K, Saito Y. Late Quaternary evolution of the Yellow/East China Sea tidal regime and its impacts on sediments dispersal and seafloor morphology [J]. Sedimentary Geology, 2003, 162(1/2): 25-38
- 38 Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E, *et al.* Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records [J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21: 295-305

Late Pleistocene and Holocene Stratigraphy and Paleoenvironmental Evolution in the Western Taiwan Shoal

WANG Li-bo^{1,2,3} LI Jun^{2,3} CHEN Zheng-xing^{2,3} ZHAO Jing-tao^{2,3} BAI Feng-long^{2,3}
HU Bang-qi^{2,3} DOU Yan-guang^{2,3} ZHAI Bin^{2,3}

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100;

2. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao, Shandong 266071;

3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong 266071)

Abstract: Sediment core and high-resolution subbottom profiles from the western Taiwan Shoal were analyzed to research stratigraphic sequence, paleo-environmental development of the Shoal. According to the analyses of sedimentary characteristics, grain-sizes and AMS ¹⁴C dating, three marine strata and two terrestrial strata were recovered in the core, which were confidently correlated with seismic units in the profiles. The bottom marine strata (DU6) were mainly composed of intertidal and subtidal deposits and were formed in the Marine Isotope Stage (MIS) 5.1; the middle marine strata (DU4) mainly consisted of littoral and intertidal deposits and were formed in the MIS 3; the top marine strata (DU2 and DU1) were transgressive sands and tidal sands in the last deglaciation, respectively. The two terrestrial strata (DU5 and DU3) were incised valley filling deposits, and were formed in the MIS 4 and MIS 2, respectively. Transgressive medium - coarse sands (DU2) constructed the base of sand waves. The main body of sand waves (DU1), which had been formed since the high sea-level stage in Holocene, mainly consisted of medium - coarse sands and gravelly medium - coarse sands, with stable grain-size and good sorting on the top. Grain-size frequency distribution curves of sand waves have a modal number of -1 to 3 ϕ ; probability cumulative curves are two-segment pattern generally, with leap composition more than 80% and suspension composition less than 20%. Correlative analysis shows that there is a positive correlative between mean grain-size and sorting coefficient of tidal sand deposits (DU1), indicating that the stronger tidal current scouring the coarser grain-size and the better sorting is the sandy deposits.

Key words: Taiwan Shoal; tidal deposits; sedimentary environment; Late Pleistocene