

文章编号: 1000-0550(2008) 01-0039-07

南海东北部台湾浅滩陆坡的浊流沉积物波的发育及其成因的构造控制¹

王海荣^{1,2} 王英民¹ 邱 燕³ 彭学超³ 黄奇志⁴

(1 中国地质大学能源学院 北京 100083; 2 中国石油大学盆地与油藏研究中心 北京 102249;
3 广州海洋地质调查局区域地质调查所 广州 510760; 4 中国石油天然气勘探开发公司 北京 100083)

摘 要 南海东北部马尼拉海沟发育有面积达 35 000 km²的、壮观的沉积物波波域,水深 2 600~4 100 m。基于波域的特征、区域分布、物质组成等,判断其为重力流成因。该波域于 1.2 Ma 开始启动,从而形成了和下伏平行反射截然不同的波状反射,二者之间为沉积物波的起动力面。该波域的发育史受控于台湾造山运动的发育史,吕宋岛弧在北西西向运动的菲律宾海板块的携带下,于 6.5 Ma 左右和欧亚大陆边缘发生斜向弧—陆碰撞,碰撞焦点持续向南转移,于 1.2 Ma 左右转移至台湾南部,造成台湾南部的物理剥蚀,乃至向毗邻深水的碎屑供应急剧增加,改变了深水沉积动力学状态,浊流活动的强度和频率极大加强,从而开始了该波域的启动和发育。该沉积物波的发育和台湾造山运动构成了完美的构造活动和沉积响应关系。

关键词 南海 沉积物波 台湾造山运动 弧—陆碰撞 浊流

第一作者简介 王海荣 男 1972 年出生 在读博士 构造和深水沉积 E-mail geo_marine@yahoo.com.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

大洋深水环境常见波状底形,称之为沉积物波。其具有多种成因机制^[1],其中等深流或浊流形成的建设型波状沉积底形往往具有迁移特征,而由诸如因气体渗漏、剪切滑动、重力变形之类因素的触发所形成的波状底形则为非沉积的变形成因,不具迁移特征。此外,内波和内潮汐亦是深水环境的重要沉积作用机制, Karl 等提出了内波模式^[2], Gao 和 Eriksson 于古代地层中确认了内潮汐成因的地层^[3,4]。内波在形成海底大型沉积物波(特别是向上坡迁移的沉积物波)方面同样可能起到相当大的作用^[5-9]。

其中 Cadiz 海湾^[10]、洛克海槽的 Barra 海底扇^[11]、阿根廷盆地^[12,13]、美国东部海域的下陆隆^[14,15]、布莱克—巴哈马外海脊^[16]、非洲西北部海域的下陆坡^[17]等均发育有等深流沉积物波。而 Canary 岛屿外海的水下峡谷、葡萄牙海域的峡谷口、劳伦海底扇^[18]、蒙特里(Monterey)海底扇、亚马逊海底扇、Hueneme 海底扇、尼日尔和印度尼西亚海域的堤坝上、名湖(Lake Superior)内的储备扇^[19,20]、法国东南海域的 Var 沉积脊^[21]等则发育了浊流沉积物波。沉积变形所致的沉积物波则见于法国西南的比斯开湾上陆坡的 Landes 台地^[22]。王海荣等于南海北部深

水环境识别出成因各异的、多处沉积物波波域^[23]。

南海东北部的马尼拉海沟介于 N—S 向的吕宋岛弧—台湾、NEE 向的台湾浅滩陆坡和向海凸出的东沙陆坡之间,由北而南由 N—S 向逐渐转为 NE—SW 向,它们构成一个三角区域,向南逐渐开阔且加深。澎湖峡谷的主干形成了台湾西南陆坡和台湾浅滩陆坡的地理界线,这两个陆坡的上陆坡地形陡峭,峡谷众多,而向深水区域则趋于平缓,逐渐过渡为马尼拉海沟(图 1)。马尼拉海沟是南海板块向吕宋岛弧之下俯冲的地貌表现,其两翼极不对称,其中东部陆坡地形陡峭而复杂,是水下部分的台湾造山运动的体现;而西翼为东沙陆坡的下陆坡、陆隆和深海区域,地形平缓。基于高质量多道地震剖面、3.5 kHz 单道地震剖面和重力活塞柱状样的研究,本文确认本区域发育浊流沉积物波,其发育史蕴含了周边地区、尤其是台湾造山运动的重要信息。

1 马尼拉海沟浊流沉积物波的组成和空间分布

马尼拉海沟的沉积物波顺海沟流向分布于该海沟平缓的西翼斜坡上,水深 2 600~4 100 m 之间,波

¹ 国家自然科学基金(批准号:40572067)资助。

收稿日期:2007-03-30 收修修改稿日期:2007-06-15

域自海沟底部向西向上延伸达 800 余米高, 顺海沟流向延展达 400 余千米, 构成了总面积达 35 000 km² 的宽广波域, 其中包括 Damuth^[24] 所识别的两万余 km² 的浊流沉积物波波域 (图 1)。

该沉积物波的地层厚度 210~390 ms(双程反射时

间), 波状地层之下为平行反射的层状地层, 两套地层截然不同, 突峻接触, 显示该沉积物波地层自图 2 所示的界面上发动并逐渐形成。另外, 就任一单波而言, 其上坡一翼较之下坡一翼要厚许多, 厚度比 1.2~1.6 且波形呈现向上坡方向的规律性迁移 (图 2 图 3)。

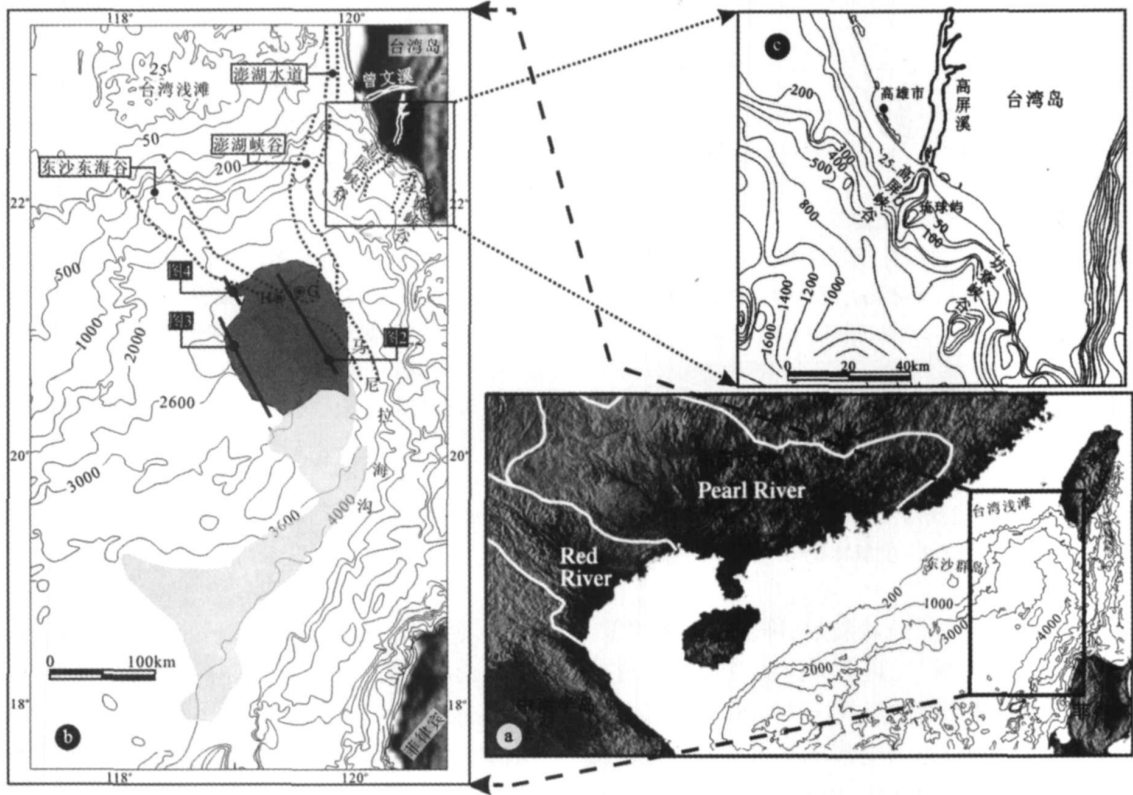


图 1 马尼拉海沟北部的浊流沉积物波, 其中深色区域为本文作者利用多种资料所绘制, 而浅灰色区域为 Damuth^[24] 所识别的浊流沉积物波的范围

Fig 1 Turbidite sediment wave field in Manila Trench which include the deep-gray zone identified by authors and gray zone of Damuth^[24]

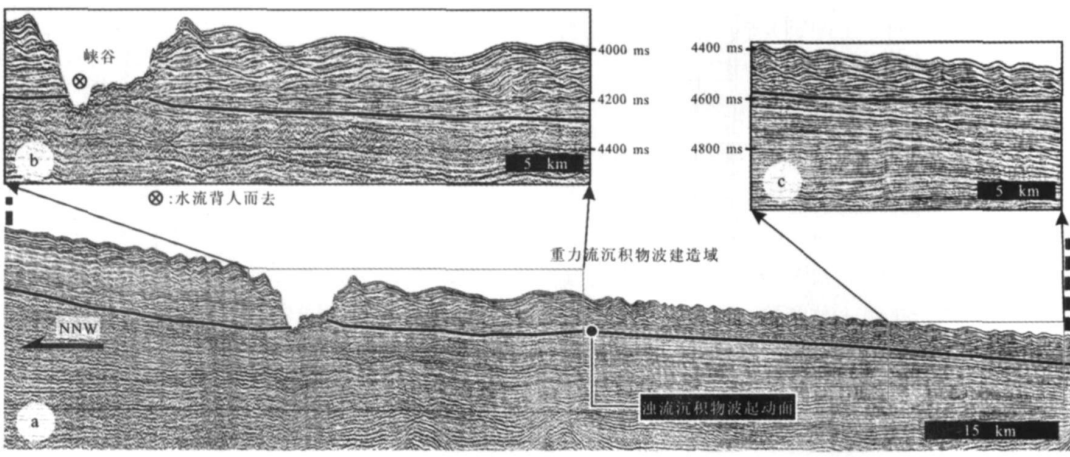


图 2 多道地震剖面所显示的沉积物波。注意波形在横向上的变化, 这反映了重力流所专有的、其能量顺流向会发生显著变化; 而这是等深流 (或底流) 所不具备的。测线地理位置参加图 2。详细说明参见文中

Fig 2 Sediment Wave discerned by multi-channel seismic profile. Note the great variation of wave form which

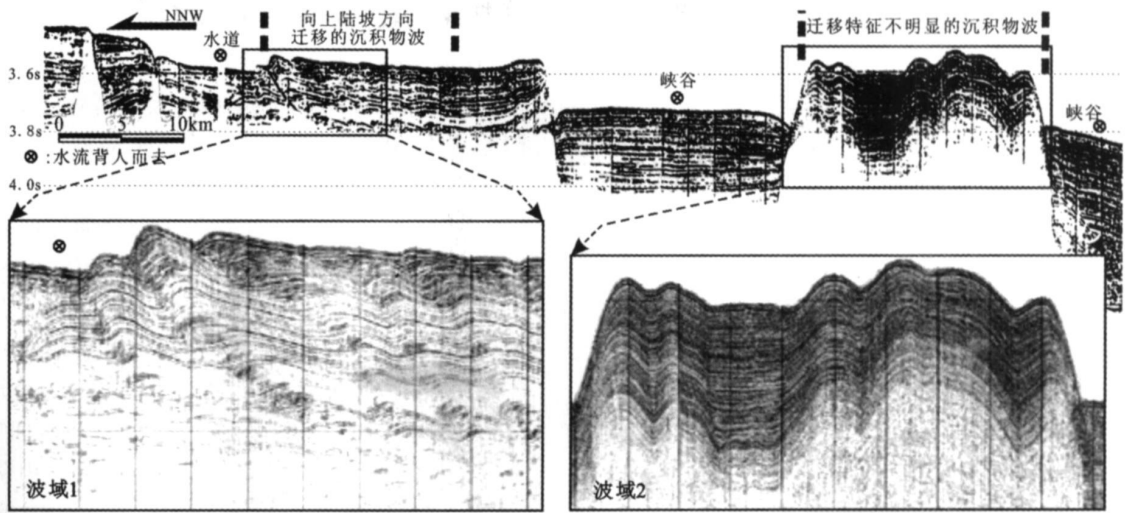


图 3 在本单道地震剖面上,体现了波域和峡谷(水道)的地理上的依存关系。注意波域 1、2 之间的差别具有重要的水动力学意义,详见文中。剖面地理位置参见图 1

Fig 3 Sediment wave discerned by single-channel seismic profile. Note the great variation of wave form between field 1 and 2. See Figure 1 for location. Further discussion is given in the text

基于如下几点,可以判断该巨型沉积物波域为重力流所形成,而非等深流。其一,顺海沟流向(或随水深加大),无论波状地层厚度还是沉积物波的规模总体上均呈规律性的渐次减小,图 2b 的波长(以 WL 表示)约 7 000 m,波高(以 WH 表示)约 38 m, $WL:WH = 180:1$;而在图 2c 中, WL 最小约 1 750 m 左右, WH 约 15 m, $WL:WH = 116:1$ 。图 3 有两个波域,波域 1 位于峡谷右侧,沉积物波呈明显的不对称,上坡一翼厚度大,波翼短而陡,波形呈向上陆坡方向的迁移特征;而波域 2 则不然,非对称性明显变差,尤其是迁移特征不甚明显。波形参数的如此显著变化鲜见于底流(等深流),但于重力流则极为普遍,是重力流流体流态和流体动能有序减小的标志,此外,垂直于区域海岸的长条状波域也是局限在峡谷或水道内的重力流的特征。其二,沉积物波的发育和陆坡峡谷(或水道)有着密不可分的关系,几乎所有沉积物波均毗邻于马尼拉海沟或陆坡水道(图 3 图 4);而远离峡谷(水道),沉积物波或规模缩小甚或消失(图 4),Shepard 认为水下峡谷是陆源和浅海沉积物向深海输送的通道^[25],因此沉积物波域和峡谷(水道)的这种关系完全符合重力流活动的特性,而与等深流则迥异。其三,柱状样剖面呈粗粒($\phi \leq 8$ 以粉沙级为主)和细粒($\phi \geq 8$)的交替出现,多达 10 个旋回以上,其中最大单层厚度达 138 cm,而沙级以上颗粒的含量则介于 81.57% ~ 91.01% (图 5),是为间歇性重力

流活动、(半)永久等深流活动和永久远洋悬浮沉降综合效应的体现。其四,波域在地理位置上局限在马尼拉海沟的西翼斜坡(图 1),是为科力奥利效应(Coriolis effect)作用于由北而南的重力流,迫使流体逐渐向右偏斜,于西翼斜坡沉积的结果。其五,该沉积物波域如果为底流(等深流)所成,那么既然形成于地形相对平缓的海沟西斜坡,以等深流作用的区域性这一特点,则于继续西向的地形变化逐渐陡峻的陆坡区更易形成壮观的波域,可事实并非如此。

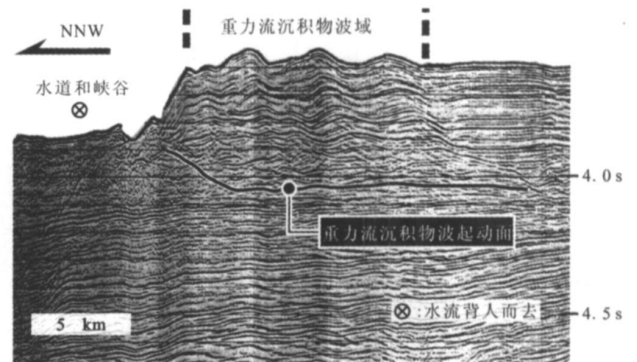


图 4 在本多道地震剖面上,分布局限的沉积物波域和峡谷的毗邻关系体现了其重力流成因。剖面地理位置参见图 1

Fig 4 Sediment wave discerned by multi-channel seismic profile. Note the neighboring relationship between canyon and wave field. See Figure 1 for location. Further discussion is given in the text

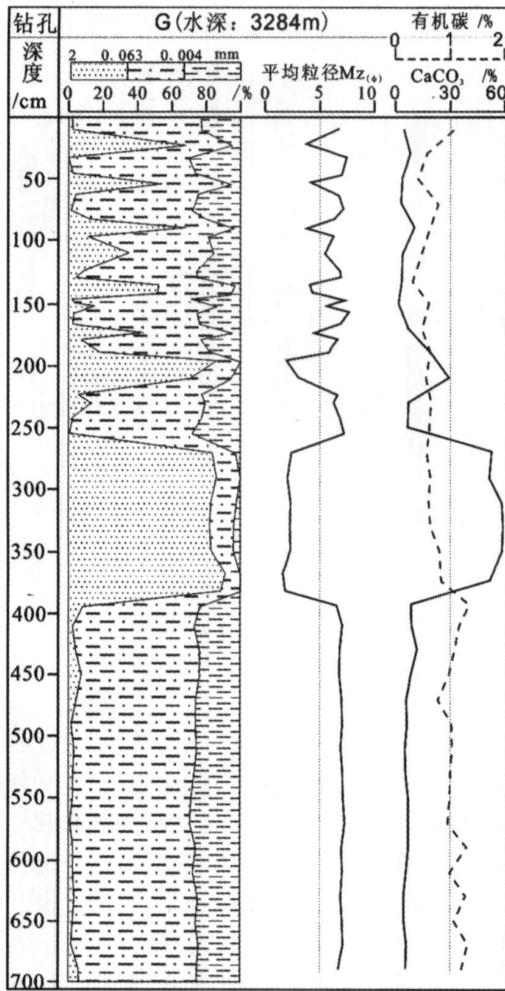


图 5 重力活塞柱状样 G 的沉积剖面 (包括粒级组成、平均粒径、有机碳和碳酸钙含量等)

Fig 5 The section of gravity piston column
See Figure 1 for location. Further discussion
is given in the text

2 发育史和其控制因素的讨论

马尼拉海沟的浊流沉积物波虽然分布范围广阔,但发育时间很短,沉积厚度不大。从图 2 可以看出,沉积物波的双程时间厚度 210~390 m 之间,依据时深关系可换算其实际厚度 170~345 m。沉积物波之下即为平行反射,二者间为突变接触,接触面构成了沉积物波的起动力面。南海北部虽有 ODP184 航次的 5 个站位可以提供高分辨的地层划分,然而因距离研究区达数百千米且中间隔有数个构造单元,难以进行有效对比。因此采用重力活塞柱状样 H 的有关数据 (图 1),柱状样 H 的氧同位素 1 期和 2 期的平均沉积速率为 16.65 cm/ka 而邻近剖面的沉积物波的厚度

为 210 ms (双程时间),厚度 188 m,折算该波域起动力面的年龄约 1.2 Ma

该沉积物波于 120 Ma 前的起动力有重要的区域构造意义。6.5 Ma 左右^[26],携吕宋岛弧作北西西向运动的菲律宾海板块于花莲附近和欧亚大陆发生碰撞^[27],开始了台湾造山运动。由于碰撞方向斜向于聚敛边界 (约呈 50°),台湾造山带向南传播,现今造山带主要集中在台湾西南海域 (图 6a 的 3 阶段)。Huang 等因而将台湾弧陆碰撞带自台湾西南海域向其东北,依次划分为四个阶段:洋内俯冲带、初始弧陆碰撞带、成熟期弧陆碰撞带和岛弧陷落 / 俯冲带^[28]。王海荣等依据台湾西部前陆盆地在其演化史所接受物源方向的重大变化,将该盆地自南而北依次划分为 4 个阶段^[29]。台湾西部前陆盆地的四阶段划分和台湾碰撞带的 4 阶段划分有内在的逻辑关系。

台湾造山运动如此剧烈,迅速形成了整个环太平洋岛弧带最为壮观的构造地貌,玉山海拔高达 3 952 m。与此相伴,台湾岛的物理剥蚀速率几乎为全球之最,达 1 300 mg/cm² yr (图 6B)^[30]。众多短急流湍的河流扮演了物质分散体系的角色,巨大的物质供应迅速填平了因台湾造山带的重荷而挠曲形成的台湾西部前陆盆地,尤其台湾中北部的所谓成熟期前陆盆地^[31]。受控于台湾造山运动的南向传播的特性,台湾岛物理剥蚀速率和物质供应方向的中心也迅速南向转移 (图 6B),台湾最强的剥蚀区是高峻雄伟的中央山脉区,而台湾西部地势相对平缓的海岸平原带和西部麓山带理应具有相对低的物理剥蚀速率,海岸平原带和西部麓山带的中北部的确如此,但南部则不同,南部具有一个物理剥蚀速率平均达 1 796 mg/cm² yr 的三角形区域 (图 6B 的深色区域),如此巨量碎屑供应通过高屏溪之类的河流来实现,对毗邻陆地乃至海域形成了巨大的侵蚀,从图 1c 可以看到,海域的高屏峡谷的头部深深切入陆架区域,和高屏溪的入海口融为一体,高屏溪和高屏峡谷实际构成了一个连续的物质输送通道,毗邻陆域的碎屑物质通过这一通道直接输入深海,而不需陆架作为物质卸载的场所。这一高剥蚀三角区与这一区域的晚中新世和上新世的、松散的粉砂岩和泥岩有关,更和弧陆碰撞的焦点的南移密不可分,碰撞带的南移,迫使地形高差快速加大,为重力、河流等侵蚀作用的发生创造了条件。

因此,1.2 Ma 蕴含着台湾造山运动,也即弧陆碰撞南向转移的重要信息。1.2 Ma 左右,台湾造山运动可能发生了一个大的南向跃迁,碰撞着力点转移至

现今台湾南部(图 6a 的 2 阶段), 迫使增生楔迅速隆升, 山脉带快速形成, 碎屑物质的侵蚀速率加快, 并通过高屏溪等河流以超重流形式过路陆架, 直接输入深水乃至马尼拉海沟, 深水区域的重力流活动强度、频

率较前大为增加, 开始了浊流沉积物波的发育(图 6a c)。因而, 该浊流沉积物的发育是响应于台湾造山运动向南转移的结果, 二者构成了完美的构造活动和沉积响应。

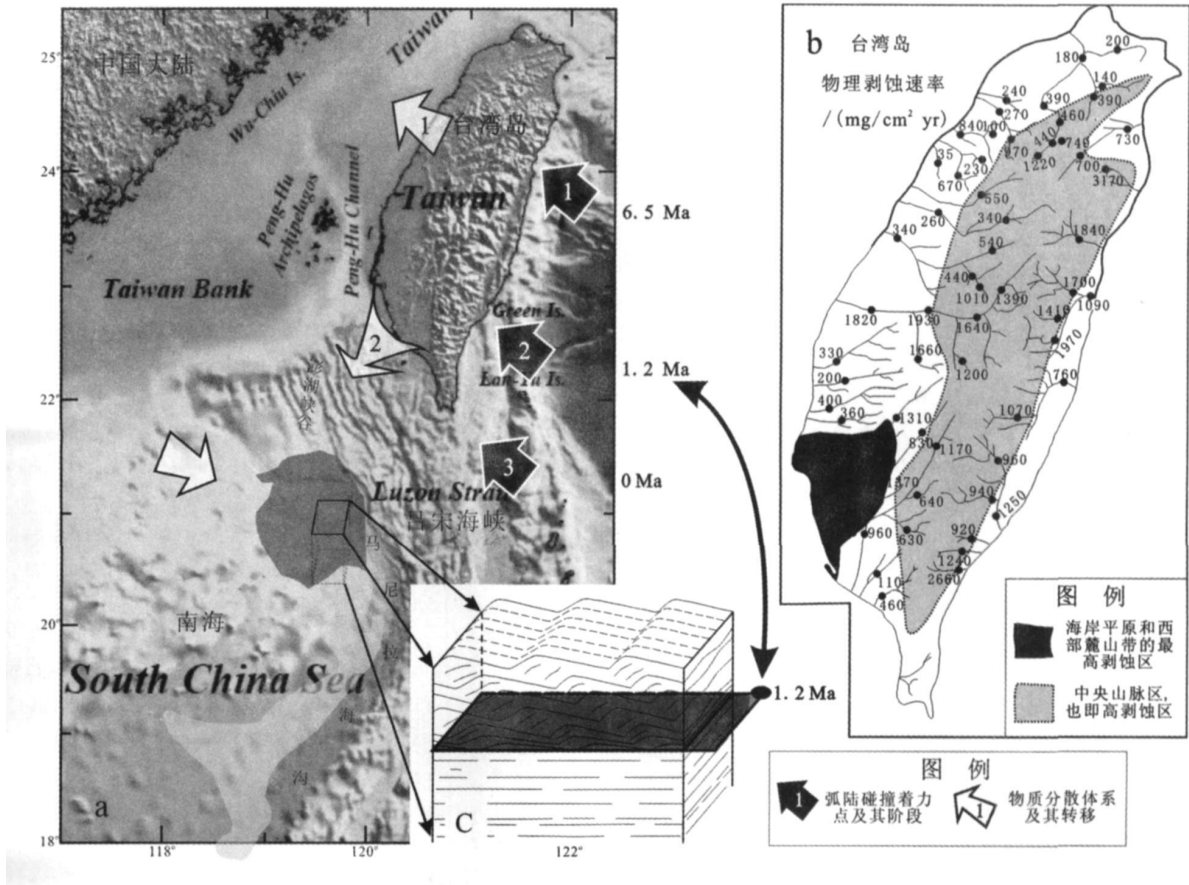


图 6 浊流沉积物波的起、形成和台湾造山运动的关系。其中 b 引自 [30], 并经修改; a 的地貌底图引自 [32], 并经修改。参见文中详细说明

Fig 6 The relationship between Taiwan arc-continent collision and the onset and formation of sediment wave field of turbidity flow. Subfigure b is modified from [30]. The base geomorphology is referred from [32]. Further discussion is given in the text

3 结论

台湾造山运动具有向南转移的特征, 约 1.2 Ma 左右, 碰撞焦点移至台湾南部, 致使南部地区的碎屑剥蚀极大加强, 深水重力流活动的强度和频率急剧加大, 马尼拉海沟的浊流沉积物波就此开始形成。

参考文献 (References)

- 1 Faugeres JC, Stow DAV, Imbert P, et al. Seismic features diagnostic of contourite drifts [J]. Marine Geology, 1999, 62: 1-38
- 2 Karl HA, Cacchione DA, Carlson PR. Internal-wave currents as a mechanism to account for large sand waves in Navarinsky Canyon Head, Bering Sea [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1986, 56

- (5): 706-714
- 3 Gao Zhenzhong, Eriksson KA. Internal-tide deposits in an Ordovician submarine channel: previously unrecognized facies [J]. Geology, 1991, 19(7): 734-737
- 4 高振中, Eriksson KA. 美国阿巴拉契亚山脉芬卡苏地区奥陶纪海底水道中的内潮汐沉积 [J]. 沉积学报, 1993, 11(1): 12-22 [Gao Zhenzhong, Eriksson KA. Internal-tide deposits in an Ordovician submarine channel: Fincastle Appalachians, USA [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1993, 11(1): 12-22]
- 5 高振中, 何幼斌, 罗顺社, 等. 深水牵引流沉积——内潮汐、内波和等深流沉积研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1996 [Gao Zhenzhong, He Youbin, Luo Shunshu, et al. Deep water traction current deposits: a study on internal tides, internal waves, contour currents and their deposits [M]. Beijing: Science Press, 1996]
- 6 Gao Zhenzhong, Eriksson KA, He Youbin, et al. Deep-water traction

- current deposits: a study of internal tides, internal waves, contour currents and their deposits[M]. Beijing and New York: Science Press, 1998
- 7 张兴阳, 高振中, 姚雪根. 北大西洋洛克尔海槽东北部内波沉积——深水大型沉积物波成因的再解释[J]. 沉积学报, 1999, 17(3): 464-472 [Zhang Xinyang, Gao Zhenzhong, Yao Xuegen. Internal wave deposits in the Northeastern rockall trough, North Atlantic Ocean: Reinterpretation of deep-water sediment waves formation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(3): 464-472]
 - 8 张兴阳, 何幼斌, 罗顺社, 等. 内波单独作用形成的深水沉积物波[J]. 古地理学报, 2002, 4(1): 83-89 [Zhang Xinyang, He Youbin, Luo Shunsheng, et al. Deep-water sediment waves formed by internal waves[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(1): 83-89]
 - 9 高振中, 何幼斌, 张兴阳, 等. 塔中地区中晚奥陶世内波、内潮汐沉积[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 400-407 [Gao Zhenzhong, He Youbin, Zhang Xinyang, et al. Internal wave and internal-tide deposits of the Middle-Upper Ordovician in the Center-Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 400-407]
 - 10 Habgood E L, Kenyon N H, Masson D G, et al. Deep-water sediment wave fields: bottom current sand channels and gravity flow channel lobe systems, Gulf of Cadiz, NE Atlantic[J]. *Sedimentology*, 2003, 50: 483-510
 - 11 Knutz P C, Jones E J W, Howe J A, et al. Wave-form sheared contourite drift on the Barra Fan, NW UK continental margin[C]// Stow D A V, Pudsey C J, Howe J A, et al. Deep-Water Contourite Systems: Modern Drifts and Ancient Series. Seismic and Sedimentary Characteristics. Geological Society, London, Memoirs, 2002, 22: 85-97
 - 12 Flood R D, Shor A N, Manley P D. Morphology of abyssal mud waves at Project MU DWAVES sites in the Argentine Basin[J]. *Deep-Sea Research*, 1993, 40: 859-888
 - 13 Lam-Keil H, Spieß V, Hopfau V. Fine-grained sediment waves on the western flank of the Zapichá Drift, Argentine Basin: evidence for variations in Late Quaternary bottom flow activity[J]. *Marine Geology*, 2002, 192: 239-258
 - 14 Ballard J A. Structure of the lower continental rise hills of the western North Atlantic[J]. *Geophysics*, 1966, 31: 506-523
 - 15 Fox P J, Heezen B C, Harian A M. Abyssal anti-tunes[J]. *Nature*, 1968, 220: 470-472
 - 16 Hollister C D. Abyssal furrows and hyperbolic echo traces on the Bahama Outer Ridge[J]. *Geology*, 1974, 2: 395-400
 - 17 Wynn R B, Masson D G, Stow D A V, et al. The Northwest African slope apron: a modern analogue for deep-water systems with complex seafloor topography[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17: 253-265
 - 18 Wynn R B, Piper D J W, Gee M J R. Generation and migration of coarse-grained sediment waves in turbidity current channels and channel lobe transition zones[J]. *Marine Geology*, 2002, 192: 59-78
 - 19 Nomark W R, Hess G R, Stow D A V, et al. Sediment waves on the Monterey Fan levee: a preliminary physical interpretation[J]. *Marine Geology*, 1980, 37: 1-18
 - 20 Nomark W R, Piper D J W, Posamentier H, et al. Variability in form and growth of sediment waves on turbidite channel levees[J]. *Marine Geology*, 2002, 192: 23-58
 - 21 Migeon S, Savoye B, Zanella E, et al. Detailed seismic-reflection and sedimentary study of turbidite sediment waves on the Var Sedimentary Ridge (SE France): significance for sediment transport and deposition and for the mechanisms of sediment wave construction[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18: 179-208
 - 22 Kenyon N H, Bellerson R H, Stride A H. Channels, canyons and slump folds on the continental slope between South-West Ireland and Spain[J]. *Oceanology Acta*, 1978(1): 369-380
 - 23 王海荣, 王英民, 邱燕, 等. 南海北部大陆边缘深水环境的沉积物波[J]. 自然科学进展, 2007, 17(9): 1235-1243 [Wang Hairong, Wang Yingmin, Qiu Yan, et al. Sediment waves of deep-water environment of the continental margin, South China Sea[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(9): 1235-1243]
 - 24 Danuth J E. Migrating sediment waves created by turbidity currents in the northern South China Basin[J]. *Geology*, 1979, 7: 520-523
 - 25 Shepard F P. *Submarine Geology*[M]. New York: Harper and Row, 1973: 517
 - 26 Lin A T S, Watts A B, Hessebo S P. Cenozoic stratigraphy and subsidence history of the south China Sea margin in the Taiwan region[J]. *Basin Research*, 2003, 15: 453-478
 - 27 Suppe J. Kinematics of arc-continent collision: flipping of subduction and back-arc spreading near Taiwan[J]. *Mem. Geol. Soc. China*, 1984, 6: 21-34
 - 28 Huang C Y, Yuan P B, Lin C W, et al. Geodynamic processes of Taiwan arc-continent collision and comparison with analogs in Timor, Papua New Guinea, Ural and Corsica[J]. *Tectonophysics*, 2000, 325: 1-21
 - 29 王海荣, 王英民, 刘振湖, 等. 台湾西部前陆盆地的构造格局和演化规律[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(3): 275-282 [Wang Hairong, Wang Yingmin, Liu Zhenhu, et al. Static framework and dynamic evolution of western Taiwan Foreland Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2006, 30(3): 275-282]
 - 30 Li Y H. Denudation of Taiwan island since the Pliocene Epoch[J]. *Geology*, 1976, 4: 105-107
 - 31 Yu H S, Chou Y W. Characteristics and development of the flexural forebulge and basal unconformity of Western Taiwan Foreland Basin[J]. *Tectonophysics*, 2001, 333: 277-291
 - 32 Liang W D, Tang T Y, Yang Y J, et al. Upper-ocean currents around Taiwan[J]. *Deep-Sea Research*, 2003, 50: 1085-1105

Development and Its Tectonic Activity's Origin of Turbidity Current Sediment Wave in Manila Trench, the South China Sea

WANG Hai-rong^{1,2} WANG Ying-min¹ QIU Yan³ PENG Xue-chao³ HUANG Qi-zhi⁴

(1 School of Energy, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2 Basin and Reservoir Research Center, University of Petroleum, Beijing 102249;

3 Institute of Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760;

4 China National Oil and Gas Exploration and Development Corporation, Beijing 100083)

Abstract A spectacular sediment wave field which situated at water depth of 2 600~ 4 100m cover area of approximately 35 000 km² in Manila Trench, the northeast South China Sea. The sediment field can be judged the turbidity current's origin based on its related characters, regional distribution and material composition, which initiated at 1.2 Ma and build the sediment body exhibiting the wave seismic reflection and thus is different from the underlying parallel seismic reflection distinctly. A surface of initiation can be distinguished between the two different sediment bodies. The development of the sediment wave is totally controlled by the characteristic development of Taiwan Orogenesis. Luzon Arc be part of the Philippine Sea Plate which move towards NWW direction collide with Eurasian Continent Margin at approximately 6.5 Ma obliquely and the focus of collision propagated southward consistently because of the inherent oblique collision. In 1.2 Ma the focus of collision arrived at the present south part of Taiwan Island and so significantly enhanced the physical denudation rate of related region, thus the rapidly increased the supply of material to deepwater environment and result in quite enhancement of the strength and the frequency of turbidity current and resultantly significantly modified the sediment dynamics status of deepwater environment. Just under such setting the development of sediment wave can be initiated and developed. The Taiwan Orogenesis and development of sediment wave constitute a perfect pair of tectonic activity and response of sedimentation.

Key words South China Sea, sediment wave, Taiwan Orogenesis, arc-continent collision, turbidity current