科学通报 2009 年 第 54 卷 第 9 期: 1303 ~ 1310
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE IN CHINA PRESS

冲绳海槽西南端中全新世以来的沉积速率与物源分析

李传顺[①②], 江波[①②③*], 李安春[①], 李铁刚[①], 蒋富清[①]

① 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071;
② 中国科学院研究生院, 北京 100049;
③ 海洋出版社, 北京 100081
* 联系人, E-mail: bjiangh@163.com

2008-07-18 收稿, 2008-11-15 接受
国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB815903)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 90411014)和国家自然科学基金(批准号: 40776030 和 40506016)资助

摘要 冲绳海槽西南端作为黑潮路径下一个高速沉降中心一直受到地球科学界的关注. 在实验室对 2005 年 5 月中法合作航次在冲绳海槽南部取得的原状无搅动的深海沉积柱状样 MD05-2908 岩芯进行了沉积通量与沉积特征分析, 并对物质来源进行了探讨. 样品在分割后分别进行了 AMS^{14}C 分析、粗颗粒组分(>63 μm)的提取及含水量的测定. 结果显示, 该 34 m 长柱状岩芯底部年龄仅为 6.8 ka BP, 其平均线性沉积速率达到了 5 m/ka, 揭示出冲绳海槽西南端自中全新世以来具有非常高的沉积速率; 结合含水量数据, 其沉积通量也与研究区现代沉积通量相符合. 根据 17 个 AMS^{14}C 数据识别出了 5 期快速沉积事件(6790~6600, 5690~5600, 4820~4720, 1090~880 以及 260~190 a BP), 其持续时间为 70~200 a 不等, 快速沉积期间其最大沉积速率可以达到 21.2 m/ka. 通过与相邻的 ODP1202 站对比后发现, 研究区沉积物皆以细颗粒的黏土与粉砂质为主, 粗颗粒组分所占比重总体不到 5%. 台湾岛东北部丰富的降雨量使得宜兰境内的兰阳溪可以携带大量陆源物质进入宜兰陆架并进一步向冲绳海槽输运, 成为研究区重要的物质来源. 这 5 期快速堆积事件主要是与气候变化引起的区域性降水增加有关, 另外岩芯也记录到由地震、风暴等因素引起的小时间尺度的沉积增强事件. 由地震、风暴等引起的侧向与底层传输使得研究区的沉积环境更为复杂, 但同时也为冲绳海槽提供了丰富的物质供应.

关键词
冲绳海槽西南端
中全新世
沉积速率
物质来源

近年来国内外学者注重研究边缘海域, 因边缘海的岩芯具有较高的地层分辨率和较快的沉积速率, 更有利于系统地揭示古海洋事件. 作为大陆向大洋的过渡带, 由于享有得天独厚的沉积环境, 具有独特的构造特征以及与黑潮主流之间的密切关系, 一直以来, 冲绳海槽都是中外学者研究的重点靶区[1~10]. 对于冲绳海槽西南端一个非常显著的特点就是在水深大于 1000 m的下部陆坡处堆积速率非常高(根据 ^{210}Pb活度的估算达到 0.25~0.52 cm/a), 而在水深小于 1000 m的上部陆坡处其堆积速率则较低[11]. ODP195 航次之 1202 孔(图 1)揭示出晚全新世以来的平均沉积速率为 325 cm/a[12]. 由此可见, 冲绳海槽西南端是一个高速沉降中心. 另外, 下部陆坡(>1000 m)沉积物几乎全部以黏土与粉砂组成[13], 细粒泥质组分含量超过 97%[14], 而上部陆坡(<1000 m)处的沉积物主要由砂质组成, 含少量泥质组分[15]. 冲绳海槽西南端具有如此高的堆积速率并且沉积物又主要以细颗粒泥质组分为主, 其必定有充足的物质来源. 然而, 对物源问题的争论已经持续了二十多年, 总结前人的研究可以得出研究区的物质来源主要有 3 种, 即台

引用格式: 李传顺, 江波, 李安春, 等. 冲绳海槽西南端中全新世以来的沉积速率与物源分析. 科学通报, 2009, 54(9): 1303~1310
Li C S, Jiang B, Li A C, et al. Sedimentation rates and provenance analysis in the Southwestern Okinawa Trough since the mid-Holocene. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0010-0

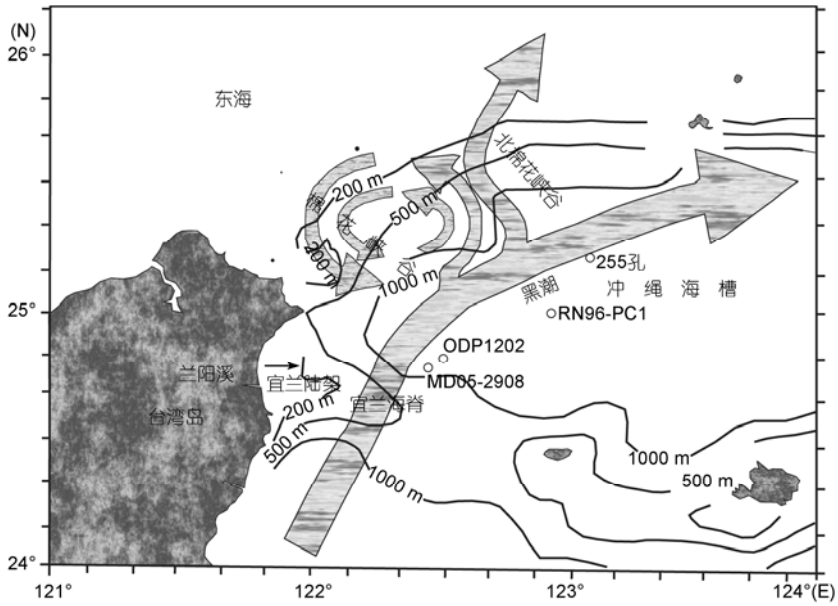

图 1 台湾东北海域海底地形及站位分布图

湾陆源物质的输入(以兰阳溪河流输入为代表)、大陆陆源物质的输入(包括陆架上堆积物质的再悬浮以及长江沿岸流的输入)以及海洋表层自生生产力的直接输入[16~19]. 关于海表自生生产力的输入已有共识, 然而关于陆源物质的输入却存在较大争议: 包括大陆物质来源为主[16,19,20]和台湾岛物质输入为主[11,18,21,22]两种观点. 前人工作主要是利用表层沉积物样品和水体中的沉降颗粒来研究现代沉积通量与物源问题, 而利用柱状岩芯来探讨地质历史时期的物质来源所做的工作仍然不足. 本文将利用 2005 年中法合作航次在冲绳海槽南部所取得的 34 m长柱状岩芯来揭示中全新世以来该区高速沉积特征并对物质来源进行探讨.

1 材料与方法

研究所用 MD05-2908 柱状岩芯为 2005 年 6 月中法联合“马可波罗”航次, 利用法国极地研究所的“Marion Dufresne”号极地考察船在台湾岛东北海域利用 Calypso 重力活塞取样器所获取, 岩芯站位为: 24°48.04′N, 122°29.35′E, 水深为 1275 m. 该柱状岩芯为一 34.17 m 长高质量的连续沉积记录, 岩性以深灰色黏土质粉砂为主, 含水量较高, 黏性、可塑性强, 含有数层厚度不等的粗粉砂夹层.

在实验室对样品进行分割时按照平均 4 cm的间隔共对 854 个样品进行了含水量的测定. 并对岩芯的粗颗粒组分(>63 μm)按照 8 cm的平均间隔共 419 个层位进行提取: 首先将样品低温(60℃恒温)烘干并称重, 然后用蒸馏水浸泡 48 h使其充分分散开, 浸泡后的样品过 250 目水筛, 将上部粗颗粒组分烘干称重, 然后计算各层位粗颗粒组分的含量. 年代测试选取了 17 个层位, 由于沉积物中所含有孔虫数量较少, 分别挑取沉积物中粒径>154 μm的浮游有孔虫*G. sacculife*与*G. ruber*洁净壳体, 重量保持在 4 mg以上, 然后送往美国Woods Hole海洋研究所AMS年代测试中心测试. 对原始测年数据利用CALIB5.0 程序进行了日历年龄校正[23], 文中所用年龄均为日历年龄.

2 结果

2.1 岩芯描述

根据对各层位>63 μm 颗粒组分的计算, 该孔上部(0~850 cm)粗颗粒组分的含量在 2%以下, 该层段主要由细粉砂及黏土组成, 含有部分粗粉砂及砂. 850~2300 cm 层段, 粗颗粒含量有所增加, 但仍然在 2%上下浮动, 最高不超过 5%. 2300~2750 cm 层位, 粗颗粒含量仍以 2%为主, 但是出现了 3 个明显的高值, 分别是 2349 cm 处的 13.12%, 2581 cm 处的 9.28%以及 2733 cm 处的 10.30%, 这 3 个异常高值层位可能对应了 3 次快速沉积事件, 在实验室进行分样的过程中也记录到这 3 个层位为非常明显的砂质夹层, 与上下层位岩性明显不一致, 层厚都在 2 cm 左右, 并且这些粗颗粒夹层的含水量相对上下层位较低. 粗颗

粒组分主要以石英、长石、云母、绿泥石等矿物为主, 含少量有孔虫等生物壳体. 2750~3414 cm 层位, 粗颗粒含量再次回到 2%的基准, 变化不明显(图 2(b)).

2.2 年代模式与沉积速率

MD05-2908 孔年代模式的建立基于 17 个 AMS^{14}C 测年数据(表 1)控制点, 控制点之间的年代序列采用逐次线性内插法求得, 控制点以外采取线性外推法求得. 根据 ^{14}C 测年数据,岩芯底部年龄为 6800 a BP 左右, 为中全新世以来的沉积. 由测年结果可以看出, 年龄-深度模式(图 2(a))呈现出非常好的对应关系, 两者相关系数为 0.998, 近乎成直线. 年龄测试数据没有出现倒转现象, 说明该柱状岩芯的沉积连续性很好, 并且年代分辨率较高, 为深入研究全新世以来的气候变化, 探明千年至十年尺度的气候波动事件以及其中的影响机制提供了不可多得的研究素材.

依据测年数据, 该孔线性沉积速率在 1.8~21.2 m/ka之间变动, 平均值为 5 m/ka(图 2). 根据前人对冲绳海槽南部不同站位的研究结果来看, 沉积速率大约在 0.5 m/ka左右. 例如, RN96-PC1 孔(24°58.5′N, 122°56.1′E)记录到的平均沉积速率为 0.4 m/ka[24]; 而在北部的一个站位, 255 孔(25°12′N, 123°07′E)记录到过去 8 千年以来的平均沉积速率为 0.6 m/ka[25]. MD05-2908 岩芯在过去 6800 a BP以来堆积了 34 m厚的沉积物, 这比前人在其他站位得到的沉积速率值整整高出了一个数量级. ODP195 航次 1202B孔(24°48′N, 122°30′E)与本研究站位的距离仅有 1 海里(1 海里=1.852 km)左右, 根据其全新世以来 5 个 ^{14}C 测年数据得知, 1202 站全新世以来平均沉积速率也达到了 3.5 m/ka[10]. MD05-2908 孔与ODP1202 孔巨量的物质堆积都说明这个区域是一个高速沉降中心. 由含水量测试结果得知, 该孔含水量由顶至底逐渐降低, 干密度呈线性上升趋势. 由线性沉积速率结合干密度数据, 我们得出MD05-2908 孔 6800 a BP以来的沉积通量(图 2(c)), 其变化趋势与线性沉积速率相一致.

MD05-2908 孔中全新世以来不仅平均沉积速率很大, 而且根据 17 个精确测年资料识别出了 5 期快速沉积事件, 其层位分别在 3405~3005, 2805~2621, 2405~2253, 813~613 以及 213~105 cm 处, 对应的沉积速率分别为 21.2, 19.6, 15.0, 9.3 和 15.2 m/ka. 这 5 期快速沉积事件分别发生在 6790~6600, 5690~5600, 4820~4720, 1090~880 以及 260~190 a BP 期间. 虽然受到测年取样间隔的影响, 但仍然可以看出这 5 期沉积高值事件显著高于相邻层位之沉积速率, 表明这五段时间内有大量沉积物输入.

3 讨论

3.1 物质来源

MD05-2908 岩芯位于冲绳海槽西南端, 水深在 1275 m左右, 该孔沉积速率非常高, 比其他边缘海中的沉积速率要高出许多, 比如华盛顿陆架外的水下峡谷[26], 美国东海岸巴尔的摩峡谷[27]、地中海西部的海湾[28,29]以及陆架边缘物质交换区[30,31]. 岩芯沉积物以细粒的陆源粉砂和黏土组成, 粗颗粒组分(>63 μm)只占沉积物的很少一部分. 我国台湾岛在东海南部执行了KEEP研究计划(黑潮及东海边界流研究计划)十年之久, 从他们利用沉积物捕捉器所得到的研究结果来看, 研究区上部水体中的沉降颗粒主要来自陆源输入, 并且自岸向海呈递减趋势, 颗粒粒度也由粗变细[18], 说明来自台湾岛东部河流(特别是兰阳溪)的物质输入占据主导地位. 兰阳溪口正对冲绳海槽西南端, 由于上游区丰富的降雨加之陡峭的地势, 集水区土壤侵蚀率较高, 使得兰阳溪每年从台湾东北部输出约 1000 万吨的冲积物进入宜兰外海[32], 成为冲绳海槽南部一个重要的物质来源[22,33,34]. 另外研究区内所有收集器测站的颗粒通量值皆有随深度剧增的现象, 显示水柱中除垂直沉降颗粒外, 必定有来自陆架与陆坡之侧向传输或再悬浮颗粒对不同深度的不同程度的贡献,才造成上、下层通量的差异, 这与台湾岛频发的暴风雨和地震活动有关[22]. 在台风暴雨期间, 兰阳溪所输出的沉积物将被快速传输至研究区, 使得该区沉积通量大为增加; 另外, 由于暴风雨期间高能波浪的搅动加之研究区海底地震频发, 东海陆架与宜兰陆架、宜兰海脊上堆积的沉积物容易滑动崩移至邻近的海槽里, 底层与侧向输送是研究区沉积物的另一个重要来源. Huh等人[18]将冲绳海槽南部的沉积速率作了修正, 除了宜兰陆架外的陆架陆坡交界处具有较高的堆积速率外(1.44 $g\cdot(cm^2\cdot a)^{-1}$), 最高堆积速率(1.46 $g\cdot(cm^2\cdot a)^{-1}$)位于 24°50′N, 122°30′E附近, 正好处在MD05-2908 岩芯附近.

进入到冲绳海槽的陆源沉积物除了兰阳溪的传输之外, 还有 3 种可能的形式[35]. 这 3 种方式主要是受东海的主要海流系统所影响, 分别为: (1) 沿浙闽沿岸向南输运的长江沿岸流, 此沿岸流遇台湾暖流后转

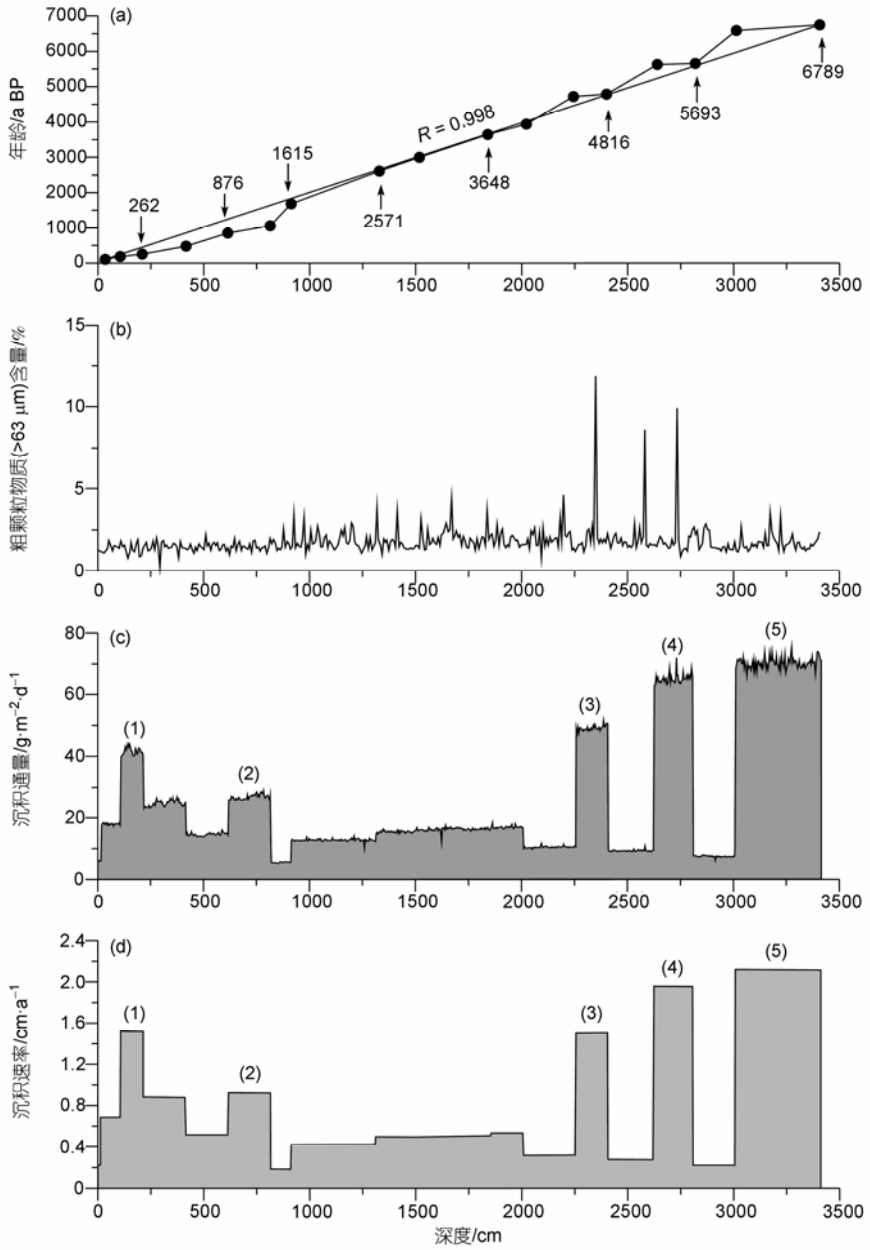

图 2

(a) 基于 17 个深度 AMS^{14}C 测年资料建立的深度-年龄模式; (b) 柱状岩芯中粗颗粒组分(>63 μm)的含量变化趋势; (c) 柱状样由顶至底之沉积通量的变化; (d) 柱状样沉积速率的变化

向台湾岛东北海域, 然后进入冲绳海槽, 并带来了中国大陆的陆源沉积物[36,37], 但是目前关于长江物质进入冲绳海槽的问题尚未有定论, 确切证据尚不足. (2) 台湾暖流的影响. 夏季时由长江输出的河水会受西南季风压制并受台湾暖流的影响, 部分往东北外海扩散进入冲绳海槽, 而将长江输出的中国大陆源的陆源沉积物及台湾暖流所传输的台湾西部陆源沉积物带入冲绳海槽. 冬季时台湾暖流较弱与南下的大陆沿岸流会在台湾海峡中段相遇, 使得长江输出的大陆源沉积物及台湾暖流所传输的台湾源沉积物留在台湾海峡西侧, 形成中国沿岸的泥质楔形体[38,39]. (3) 黑潮的影响. 黑潮为一强烈的西边界流, 经过台湾岛时沿台湾岛东岸向北流, 到达台湾岛东北海域时, 于 24°40′N附近受到宜兰海脊的阻挡, 但由于宜兰海脊东缘有一宜兰海

表 1　冲绳海槽西南端 MD05-2908 孔 AMS^{14}C 测年数据

层位 /cm	AMS^{14}C 年龄/a BP	校正年龄 /a BP	测试材料	沉积速率 /cm·a^{-1}
13	470±30	57		0.228
105	600±45	191		0.687
213	650±30	262		1.521
413	900±25	489		0.881
613	1370±40	876		0.517
813	1570±25	1092		0.926
909	2080±40	1615		0.184
1309	2850±30	2571	*G. sacculife*	0.418
1501	3200±35	2958	+	0.496
1853	3760±30	3648	*G. ruber*	0.510
2005	3980±25	3933		0.533
2253	4550±40	4715		0.317
2405	4630±30	4816		1.505
2621	5270±40	5599		0.276
2805	5370±35	5693		1.957
3005	6200±45	6600		0.221
3405	6360±40	6789		2.116

谷，有助于洋流的通过，使得黑潮能直接进入冲绳海槽并将沉积物送至海槽[40]，但相对河流输出物以及东海陆架上的悬浮颗粒浓度来说，黑潮是相对比较“清澈”的[41]. 这 3 种主要海流系统除了北向的黑潮之外，其他两种是否能越过三貂角而进入宜兰外海目前仍未有详细的资料可以讨论.

3.2　5 期快速沉积事件成因探讨

沉积通量在时序变化上的偶发高值常和表层水的初级生产力[30,42~44]、暴雨时河流输出物的大量增加[45]、高能波浪或潮流所造成的底部沉积物再悬浮作用[46~48]以及地震等活动引发的浊流有关[22]. 研究区附近有 3 个海底峡谷(图 3)，其中最北边的海底峡谷源自兰阳溪，另二支峡谷为源自宜兰陆架，每年由兰阳溪等河流携带入海的巨量冲积物快速堆积在水深不足 200 m的宜兰陆架上(据刘敬圃等未发表的浅地层剖面记录)，然后通过这些海底峡谷向冲绳海槽南部运移. 在陆源物质的强势稀释作用下，研究区生物源颗粒的贡献对颗粒通量时序变化的影响非常有限[16,49].

台风与洪水发生时，波浪动能增加所造成的沉积物再悬浮及河流携带陆源物质的剧增常造成沉降颗粒通量的极大变化，研究显示暴风雨期间河流所贡献的通量占整体颗粒通量的约 50%以上[31,48]. 台湾岛每年向周围海域输送巨量沉积物，这其中通过暴风雨期间河流的输送占据了绝大部分(~75%)[50,51]. 研究区离海岸仅有 70 km左右，加之有 3 个海底峡谷作为运送通道，所以在台风暴雨期间，兰阳溪的输出物能快速运移到冲绳海槽南端，并且高能波浪会造

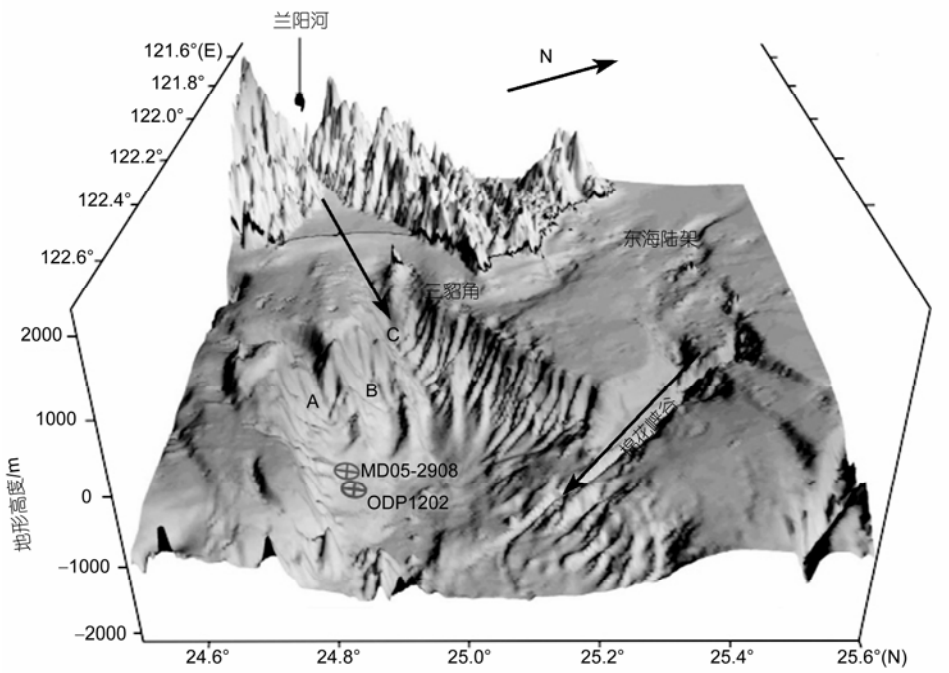

图 3　冲绳海槽西南端与台湾东北角地形图

MD05-2908 与ODP1202 站通过十字示于图上; A, B, C为 3 个海底峡谷，其中C峡谷为龟山岛南侧的南龟山水道, A, B两峡谷形成于宜兰陆架，它们是陆架与上部陆坡中的物质向冲绳海槽输运的主要通道. 该图引自文献[10](略有修改)

成堆积在宜兰陆架和上部陆坡处的物质再悬浮并进一步向冲绳海槽输运, 由此可见这种热带、亚热带地区的山地型小型河流对邻近区域沉积环境的影响是非常重要的[52]. 因此, MD05-2908 岩芯沉积速率的增加很可能源自突发性的气候事件, 如台风、暴雨及持续性的降水引起的陆源物质输入的增加. 虽然岩芯线性沉积速率的计算受到测年取样点的限制, 但根据 17 个测年资料可以看出: 6.8~4.0 ka期间沉积速率相对较低, 但存在着 3 期明显的沉积增强事件, 分别位于 6790~6600, 5690~5600 及 4820~4720 a BP期间; 4.0~1.1 ka期间沉积比较稳定, 沉积速率变化不明显, 表示物质来源较稳定; 1.1 ka以来沉积明显增强, 这可能与人类活动的影响相关, 并且在 1090~880 与 260~190 a BP期间达到两次高值. 这 5 期快速沉积事件都与地史期间丰富的降水有很好的对应, 6790~6600 a BP期间快速堆积事件是在全新世大暖期的气候背景之下, 根据台湾中部山区孢粉资料显示, 在 6900~6800 a BP气候适宜期, 孢子的峰值可能表示一次大的降雨事件[53]; 在宜昌葛洲坝地区出现的古树 ^{14}C测年数据显示在(6570±110) a BP出现过洪水[54]. 5690~5600 a BP期间是长江下游岸段洪水发生频率较高时期[55], 宝华山地区沉积物及埋藏古树和炭化木等的孢粉、粒度、扫描电子显微镜等多重指标反映出(5720±80) a BP期间发生了较大的山地洪水[56]. 4820~4720 a BP对应着我国史前洪水频发的时期. 1090~880 a BP位于唐懿宗(859~873 AD)至宋神宗(1067~1085 AD)期间, 据史料记载, 宋元时期(960~1368 AD)为气候波动频繁时期, 其中 1000~800 a BP为我国历史上第三冷期, 发生洪水 18 次. 260~190 a BP位于小冰期期间, 根据史料记载, 在 500~100 a BP期间, 共发生洪水 52 次, 尤其是在小冰期最冷期高达 40 次.

由于台湾岛处于欧亚大陆板块和菲律宾海板块间的碰撞地带, 构造和地震活动频繁, 研究区附近每年发生的 5 级以上地震就有近 10 次(http://www.iris.washington.edu), 多发的地震活动可能对研究区的沉积产生直接或间接的影响, 致使快速堆积在陆架与陆坡处的沉积物由于受到地震活动的触发或沉积物自身的重力滑塌作用而引起沉积物的再悬浮并向深水区运移, 这也为沉积物捕捉器所证实[57]. MD05-2908 岩芯中没有发现明显的浊流层, 但是在实验室对样品进行分割的过程中发现数层厚度不等的粗颗粒夹层, 根据含水量数据, 这些夹层含水量较低, 利用含水量的变化可以分辨出几十层规模较小的粗颗粒纹层, 这与后期我们粒度分析的结果相一致, 表明中全新世以来MD05-2908 岩芯记录了几十次沉积增强事件, 这些沉积增强事件有可能是地震引起的, 但也有可能是风暴、海啸等因素引起的.

4 结论

近年来的工作揭示出冲绳海槽西南端具有较高的沉积速率, 而且沉积物以细粒的黏土及粉砂为主, 这从根本上改变了前人对冲绳海槽南部沉积速率较低的认识. 我们利用在冲绳海槽南部海域取得的柱状岩芯揭示出研究区自中全新世以来一直具有较高的沉积速率并且识别出了 5 期快速沉积事件, 在快速沉积期间, 其最大线性沉积速率可以达到 21.2 m/ka. 研究区物质来源主要为台湾东部陆源物质的输入以及宜兰陆架、宜兰海脊处的堆积物质受到风暴、地震等因素的触发而再次悬浮, 以侧向传输与底层输运的方式向冲绳海槽搬运. 中全新世以来的 5 期快速沉积事件主要与气候变化引起的区域性降水量的增加有关. 另外, 小规模的沉积增强事件主要与地震、风暴、海啸等因素有关.

致谢 刘敬圃教授及评审专家提出的建设性修改意见使本文得以很大提高, 研究样品由法国极地研究所“Marion Dufresne”号极地考察船取得, 调查队成员及全体船员为此付出了艰辛的劳动, 特此一并致谢.

参考文献

1 Thompson P R. Planktonic foraminifera in the western North Pacific during the past 150000 years: Comparison of modern and fossil assemblages. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 1981, 4: 241—279[DOI]

2 Shieh Y T, Wang C H, Chen M P, et al. The last glacial maximum to Holocene environment changes in the southern Okinawa Trough. J Asian Earth Sci, 1997, 15(1): 3—8

3 Li B H, Jian Z M, Wang P X. *Pulleniatina obliquiloculata* as paleoceanogrphic indicator in the southern Okinawa Trough during the last 20000 years. Mar Micropaleontol, 1997, 32: 59—69[DOI]

4 Li T G, Liu Z X, Michael A, et al. Heinrich event imprints in the Okinawa Trough: Evidence from oxygen isotope and planktonic foraminifera. Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol, 2001, 176: 133—146[DOI]

5 苍树溪, 阎军. 西太平洋特定海域古海洋学. 青岛: 青岛出版社, 1992

6 翦知湣, 李保华, Pflaumann U, 等. 西太平洋晚全新世变冷事件. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 26(5): 461—466

7 刘振夏, Saito Y, 李铁刚. 冲绳海槽晚第四纪千年尺度的古海洋学研究. 科学通报, 1999, 44(8): 883—887

8 刘振夏, 李培英, 李铁刚, 等. 冲绳海槽 5 万年以来的古气候事件. 科学通报, 2000, 45(16): 1776—1781

9 孟宪伟, 刘焱光, 刘振夏, 等. 冲绳海槽全新世表层水温、盐度和大气 CO_2 恢复及其古气候意义. 科学通报, 2001, 46(增刊): 80—83

10 Wei K Y. Leg 195 synthesis: Site 1202—Late Quaternary sedimentation and paleoceanography in the southern Okinawa Trough. In: Shinohara M, Salisbury M H, Richter C, eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 2006, 195(3): 1—31

11 Chung Y, Chang W C. Pb-210 fluxes and sedimentation rates on the lower continental slope between Taiwan and the South Okinawa Trough. Cont Shelf Res, 1995, 15: 149—164

12 Salisbury M H, Shinohara M, Richter C, et al. Shipboard scientific party. Proc ODP Init Repts, 195: 1—46

13 Chen S K. Sediment Accumulation Rates and Organic Carbon Deposition in the East China Sea Continental Margin Sediments. M. S. Thesis, Taipei: National Taiwan University, 1995. 80

14 Jeng W L, Chen M P. Grain size effect on bound lipids in sediments off northeastern Taiwan. Org Geochem, 1995, 23: 301—310[DOI]

15 陈民本, 林庚玲, 黄奇瑜. 台湾东北外海黑潮转向区表层沉积物之沉积性质及构造. 地质(台湾), 1995, 15: 15—47

16 Sheu D D, Jou W C, Chung Y C, et al. Geochemical and carbon isotopic characterization of particles collected in sediment traps from the East China Sea continental slope and the Okinawa Trough northeast of Taiwan. Cont Shelf Res, 1999, 19: 183—203[DOI]

17 Jeng W L, Huh C A. A comparison of sedimentary aliphatic hydrocarbon distribution between the southern Okinawa Trough and a nearby river with high sediment discharge. Estuar Coast Shelf Sci, 2006, 66: 217—224[DOI]

18 Huh C A, Su C C, Wang C H, et al. Sedimentation in the Southern Okinawa Trough—Rates, turbidities and a sediment budget. Mar Geol, 2006, 231: 129—139[DOI]

19 Jeng W L. Aliphatic hydrocarbon concentrations in short sediment cores from the southern Okinawa Trough: Implications for lipid deposition in a complex environment. Cont Shelf Res, 2007, 27: 2066—2078[DOI]

20 Kao S J, Lin F J, Liu K K. Organic carbon and nitrogen contents and their isotopic compositions in surficial sediments from the East China Sea shelf and the southern Okinawa Trough. Deep-Sea Res Ⅱ, 2003, 50: 1203—1217[DOI]

21 Hsu S C, Lin F J, Jeng W L. The effect of a cyclonic eddy on the distribution of lithogenic particles in the southern East China Sea. J Mar Res, 1998, 56: 813—832[DOI]

22 Hsu S C, Lin F J, Jeng W L, et al. Observed sediment fluxes in the southwesternmost Okinawa Trough enhanced by episodic events: Flood runoff from Taiwan rivers and large earthquakes. Deep-Sea Res, Part I, 2004, 51: 979—997

23 Stuiver M, Reimer P J, Bard E. INTCAL98 Radiocarbon age calibration 24000—0 cal a BP. Radiocarbon, 1998, 40: 1041—1083

24 Ujiié Y, Ujjié H, Taira A, et al. Spatial and temporal variability of surface water in the Kuroshio source region, Pacific Ocean over the past 21000 years: Evidence from planktonic foraminifera. Mar Micropaleontol, 2003, 49: 335—364[DOI]

25 Jian Z, Li B, Huang B, et al. *Globorotalia trucatulinoides* as indicator of upper-ocean thermal structure during the Quaternary: Evidence from the South China Sea and Okinawa Trough. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2000, 162: 287—298[DOI]

26 Baker E T, Hickey B M. Contemporary sedimentation processes in and around an active west coast submarine canyon. Mar Geol, 1986, 71: 15—34[DOI]

27 Gardner W D. Baltimore Canyon as a modern conduit of sediment to the deep sea. Deep-Sea Res, 1989, 36: 323—358[DOI]

28 Monaco A, Courp T, Heussner S, et al. Seasonality and composition of particulate fluxes during ECOMARGE-I, western Gulf of Lions. Cont Shelf Res, 1990, 10: 959—987[DOI]

29 Tommaso T, Stefano M, Miguel A, et al. Source, transport and fate of terrestrial organic carbon on the western Mediterranean Sea, Gulf of Lions, France. Mar Chem, 2007, 105(2): 101—117[DOI]

30 Biscaye P E, Anderson R F, Deck B L. Fluxes of particles and constituents to the eastern United States continental slope and rise: SEEP-I. Cont Shelf Res, 1988, 8: 855—904[DOI]

31 Biscaye P E, Anderson R F. Fluxes of particulate matter on the slope of the southern Middle Atlantic Bight: SEEP-Ⅱ. Deep-Sea Res Ⅱ, 1994, 41: 459—509[DOI]

32 Dadson S J. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. Nature, 2003, 426: 648—651[DOI]

33 Jeng W L, Lin S, Kao S J. Distribution of terrigenous lipids in marine sediments off northeastern Taiwan. Deep-Sea Res, Part Ⅱ, 2003, 50: 1179—1201

34 Liu K K, Peng T H, Shaw P T, et al. Circulation and biogeochemical processes in the East China Sea and the vicinity of Taiwan: An overview and a brief synthesis. Deep-Sea Res, Part Ⅱ, 2003, 50: 1055—1064

35 洪国璋. 台湾东北海域陆坡区之沈降颗粒: 通量、粒径分布及铅钋不平衡. 博士学位论文. 高雄: 台湾中山大学海洋地质与化学研究所, 2000

36 Chen M P, Lo S C, Lin K L. Composition and texture of surface sediment indicating the depositional environments off Northeast Taiwan. Terr Atmos Ocean Sci, 1992, 3(3): 395—417

37 林庚铃. 台湾东北外海表层沉积物之构造、组织和黏土矿物. 硕士学位论文. 台北: 台湾大学海洋研究所, 1992

38 Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea. Cont Shelf Res, 2006, 26: 2141—2156[DOI]

39 Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. Geomorphology, 2007, 85: 208—224[DOI]

40 张晓岚. 宜兰陆架与周围沉积物分布及特征之初步研究. 硕士学位论文. 台北: 台湾大学海洋研究所, 2003

41 Chung Y, Huang G W. Particulate fluxes and transports on the slope between the southern East China Sea and the South Okinawa Trough. Cont Shelf Res, 2000, 20: 571—597[DOI]

42 Deuser W G, Ross E H, Anderson R F. Seasonality in the supply of sediment to the deep Sargasso Sea and implications for the rapid transfer of matter to the deep ocean. Deep Sea Res Part A, Oceanogr Res Pap, 1981, 28(5): 495—505[DOI]

43 Deuser W G, Ross E H, Hemleben C, et al. Seasonal changes in species composition, numbers, mass, size, and isotopic composition of planktonic foraminifera settling into the deep Sargasso sea. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 1981, 33(1): 103—127[DOI]

44 Ramaswamy V, Nair R R, Manganini S, et al. Lithogenic fluxes to the deep Arabian sea measured by sediment traps. Deep Sea Res Part A, Oceanogr Res Pap, 1991, 38(2): 169—184[DOI]

45 Wheatcroft R A. Oceanic flood sedimentation: A new perspective. Cont Shelf Res, 2000, 20(16): 2059—2066[DOI]

46 Andre M, Pierre B, Jacques S. Particle fluxes and ecosystem response on a continental margin: The 1985—1988 Mediterranean ECOMARGE experiment. Cont Shelf Res, 1990, 10(9-11): 809—839[DOI]

47 Biscaye P E, Anderson R F. Fluxes of particulate matter on the slope of the southern Middle Atlantic Bight: SEEP-II. Deep Sea Res Part II: Top Stud Oceanogr, 1994, 41(2-3): 459—509[DOI]

48 Walsh J P, Nittrouer C A. Observations of sediment flux to the Eel continental slope, northern California. Mar Geol, 1999, 154(1-4): 55—68[DOI]

49 Hung J J, Lin C S, Hung G W, et al. Lateral transport of lithogenic particles from the continental margin of the southern East China Sea. Estuar Coast Shelf Sci, 1999, 49: 483—499[DOI]

50 Kao S J, Liu K K. Estimating the suspended sediment load by using the historical hydrometric record from the Lanyang-Hsi watershed. Terrest Atmos Ocean Sci, 2001, 12: 401—414

51 Milliman J D, Kao S J. Hyperpycnal discharge of fluvial sediment to the ocean: Impact of Super-typhoon Herb (1996) on Taiwanese Rivers. J Geol, 2005, 113: 503—516[DOI]

52 Milliman J D, Syvitski J P. Geomorphic tectonic control of sediment discharge to the ocean—the importance of small mountainous rivers. J Geol, 1992, 100: 525—544

53 Liew P M, Lee C Y, Kuo C M. Holocene thermal optimal and climate variability of East Asian monsoon inferred from forest reconstruction of a subalpine pollen sequence, Taiwan. Earth Planet Sci Lett, 2006, 250: 596—605[DOI]

54 周凤琴. 从红花套遗址的发掘探讨该区新构造运动特征及古地理环境. 见: 林春, 主编. 葛洲坝工程文物考古成果汇编. 武汉: 武汉大学出版社, 1990

55 何华春, 王颖, 李书桓. 长江南京段历史洪水位追溯. 地理学报, 2004, 59(6): 938—947

56 朱诚, 于世永, 张兵. 南京宝华山地区全新世沉积环境研究. 地理科学, 1997, 17(3): 253—258

57 Huh C A, Su C C, Liang W T, et al. Linkages between turbidities in the southern Okinawa Trough and submarine earthquakes. Geophys Res Lett, 2004, 31: L12304[DOI]