

doi:10.3799/dqkx.2014.121

# 日本南海海槽斜坡盆地重力流沉积特征及其对俯冲构造的响应

孙 辉<sup>1</sup>, 姜 涛<sup>1\*</sup>, 李春峰<sup>2</sup>, 徐 乐<sup>1</sup>

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

**摘要:** 南海海槽是全球大地震发生频率最高的地区之一, 该地区增生楔上斜坡盆地内的重力流沉积记录了多分支断层及大地震活动历史。利用国际综合大洋钻探计划(IODP)314-316航次岩心—地震—综合测井资料, 在详细分析南海海槽增生楔上斜坡盆地内重力流沉积特征基础上, 阐明了其对多分支断层和大地震活动的响应机制。研究结果表明, 南海海槽增生楔上斜坡盆地内依次充填了楔形块体流、峡谷和表层块体流沉积; 楔形块体流形成于多分支断层活动早期, 表现出北厚南薄的楔形特征, 反映了多分支断层的持续活动的特征, 沉积物中富含的粗颗粒泥质角砾岩反映了早期多分支断层剧烈活动的特征; 峡谷系统由密集峡谷, 大型块体流和轴向峡谷组成, 主要受到多分支断层耦合造成斜坡变陡、区域地层孔隙流体压力增大和盆地不均衡抬升的影响; 表层块体流位于盆地顶部, 由多期次弱振幅块体流叠加组成, 现今海底表面表现为大量“马蹄形”的垮塌地形, 这些相对短期内广泛分布的块体流应该是由地震引起的地表震动触发的。斜坡盆地内重力流沉积特征反映了多分支断层活动历史以及大地震的发生过程: 即1.95~1.55 Ma, 多分支断层形成初期活动剧烈, 逆冲活动造成了断层上盘沉积物垮塌, 楔形块体流沉积在斜坡盆地底部; 1.55~1.07 Ma, 多分支断层西部耦合, 导致斜坡盆地出现东高西低的构造格局以及盆地西部区域楔体和断层处能量的集聚; 1.07 Ma至今, 断层处能量间断释放, 引发多次大地震。

**关键词:** 南海海槽; 增生楔; 重力流; 多分支断层; 地震; 沉积物。

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2014)10-1283-12

收稿日期: 2014-03-20

## Characteristics of Gravity Flow Deposits in Slope Basin of Nankai Trough and Their Responses to Subduction Tectonics

Sun Hui<sup>1</sup>, Jiang Tao<sup>1\*</sup>, Li Chunfeng<sup>2</sup>, Xu Le<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract:** Nankai trough is one of seismogenic zones known for massive earthquakes in the world. Gravity flow deposits in slope basin of Nankai trough accretionary prism record the active history of magesplay faults and the recurrences of great earthquakes. Based on the data of integrated ocean drilling program (IODP), this study explores the characteristics of gravity flow deposits in slope basin and illustrates their implications to the activities of magesplay faults and great earthquakes. The results show that the slope basin was filled successively with wedge-shaped mass transport deposits (MTDs), canyon system and superficial MTDs. Wedge-shaped MTDs developed in the initial stage of magesplay fault activity, which is wedge-shaped and mainly composed of muddy breccia, indicating continuous and strong activities of the magesplay faults at the initial stage. Canyon system consists of several kinds of canyons including slope canyons, great MTDs canyon and axial canyon, which are controlled by steepening slope, increasing regional interstitial fluid pressure and anisotropic uplifting. Superficial MTDs consist of stacking multi-stage low amplitude MTDs and represent as plenty of scars, which formed in a relatively short time, but extensively. It may be caused by the seafloor shaking during a great earthquake. These characteristics of gravity flow deposits record

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos.40806019, 40876022, 91028009); 中央高校基本科研业务费专项资金(No.CUGL100409); 国家“十二五”重大科技专项(No.2011ZX05025-0020-020-03)。

**作者简介:** 孙辉(1985—), 男, 博士在读, 主要从事深水沉积动力学研究。E-mail: sunhui616@163.com

\* 通讯作者: 姜涛, E-mail: taojiang@cug.edu.cn

the history of magesplay fault activities and recurrences of great earthquakes as follows: 1.95—1.55 Ma, magesplay fault reactivated sharply at the initial stage which triggered slumps in the upper wall of magesplay fault; 1.55—1.07 Ma, coupling and activities of magesplay fault in the west domain caused strata compressed, deformed and energy assembled in the prism as well as in the magesplay fault; 1.07 Ma to now, energy in the mageplay fault was released discontinuously that resulted in multi great earthquakes.

**Key words:** Nankai trough; accretionary prism; gravity flow; magesplay fault; earthquake; sediment.

## 0 前言

重力流是在一定触发机制控制下,受重力作用沿地形斜坡搬运的沉积物或流体—沉积物混合物(Bouma, 1962; Mutti and Ricci Lucch, 1972; Walker, 1978; Stow and Shanmugam, 1980; Lowe, 1982; Shanmugam, 2000),它是沉积物沿陆坡搬运、沉积和海底地形重塑的重要控制因素,在被动大陆边缘和主动大陆边缘都很常见(Hampton *et al.*, 1996; Locat and Lee, 2002; Lee *et al.*, 2007).由于受到石油工业的推动,被动大陆边缘重力流研究程度较高,尤其是其作为良好的深水油气储层,越来越受到石油地质学家和沉积学家的关注,成为当今沉积学研究的热点领域之一(Pettingill, 1998; Shanmugam, 2000; Stow and Mayal, 2000).主动大陆边缘受到板块汇聚和俯冲作用的影响,具有更加频繁的构造活动、更陡的斜坡环境和相对复杂多样的重力流触发机制,以及更加理想的重力流形成条件和背景.但遗憾的是,目前对主动大陆边缘重力流沉积的研究总体较少,主要集中于对地震、海啸等灾害地质现象的重建(Cochonat *et al.*, 2002; Omura and Ikehara, 2010; Ratzov *et al.*, 2010; Shirai *et al.*, 2010).

重力流的形成受不同触发机制的控制,不同成因的重力流沉积类型及其沉积样式均不同.学者们分别对不同成因的重力流沉积特征进行了研究,阐明了地震活动、海啸、风暴、沉积速率、水合物逸散和人类活动等因素同重力流沉积特征之间的关系(Shiki, 1996; Shiki *et al.*, 2000; Locat and Lee, 2002; Schnellmann *et al.*, 2002; Puig *et al.*, 2004; Sultan *et al.*, 2004; Palanques *et al.*, 2006; Moscardelli *et al.*, 2010; Ratzov *et al.*, 2010),这为通过重力流沉积特征研究其控制因素的演化过程提供了依据和借鉴.

Moore *et al.*(2007)利用高精度三维地震数据体识别和解释了南海海槽多分支断层,并阐述了其空间展布特征及其与该区域大海啸的成因联系. Strasser *et al.*(2009)在此基础上对多分支断层的

发育时间和演化过程进行了研究,认为多分支断层在1.95 Ma左右以无序逆冲断层的形式开始活动,随后活动性减弱,并在 1.55 Ma 活动性加强.Kimura *et al.*(2011)对浅部多分支断层进行了详细的解释,认为断层在南海海槽东部区域和西部区域演化有明显的差异.这些对多分支断层的研究阐明了多分支断层的形成、区域差异以及部分演化过程,但缺乏对断层完整演化过程、断层活动强度、断层活动对重力流沉积控制作用及其与大地震发生过程关系的系统认识.

本文以南海海槽主动大陆边缘增生楔上斜坡盆地内的重力流沉积为例,通过分析国际综合大洋钻探计划(IODP)314-316 航次岩心—地震—综合测井资料,在详细研究重力流沉积特征基础上,阐明了其对多分支断层和大地震活动的响应机制.该研究对研究主动大陆边缘构造对沉积演化的控制及地震海啸发育机制具有重要意义.

## 1 区域地质背景

南海海槽位于日本岛弧西南,纪伊半岛外,菲律宾板块在此以 4~6.5 cm/a 俯冲到欧亚板块之下(图 1a, 1b; Seno *et al.*, 1993; Miyazaki and Heki, 2001).海沟充填沉积物和菲律宾板块之上的沉积物在日本岛弧被“刮”下来,通过一系列的构造挤压和再沉积作用形成了一个平行于海沟的巨大增生楔体(Moore *et al.*, 1991; Pickering *et al.*, 1992; Underwood *et al.*, 1993; Fergusson, 2003; Underwood *et al.*, 2003; Moore *et al.*, 2009; 李春峰等, 2010).根据增生楔内部构造特征,可将增生楔沿倾向划分为 6 个构造单元,从北往南依次为弧前盆地(熊野盆地)、弧前盆地边界断层带、多分支断层带、叠瓦状断层带、前缘逆冲断层带和海沟(Moore *et al.*, 2009)(图 1c).

其中,多分支断层是南海海槽增生楔最主要的构造特征(Park *et al.*, 2004; Moore *et al.*, 2007),它将增生楔划分为陆侧地震活动强烈的内部楔体和海

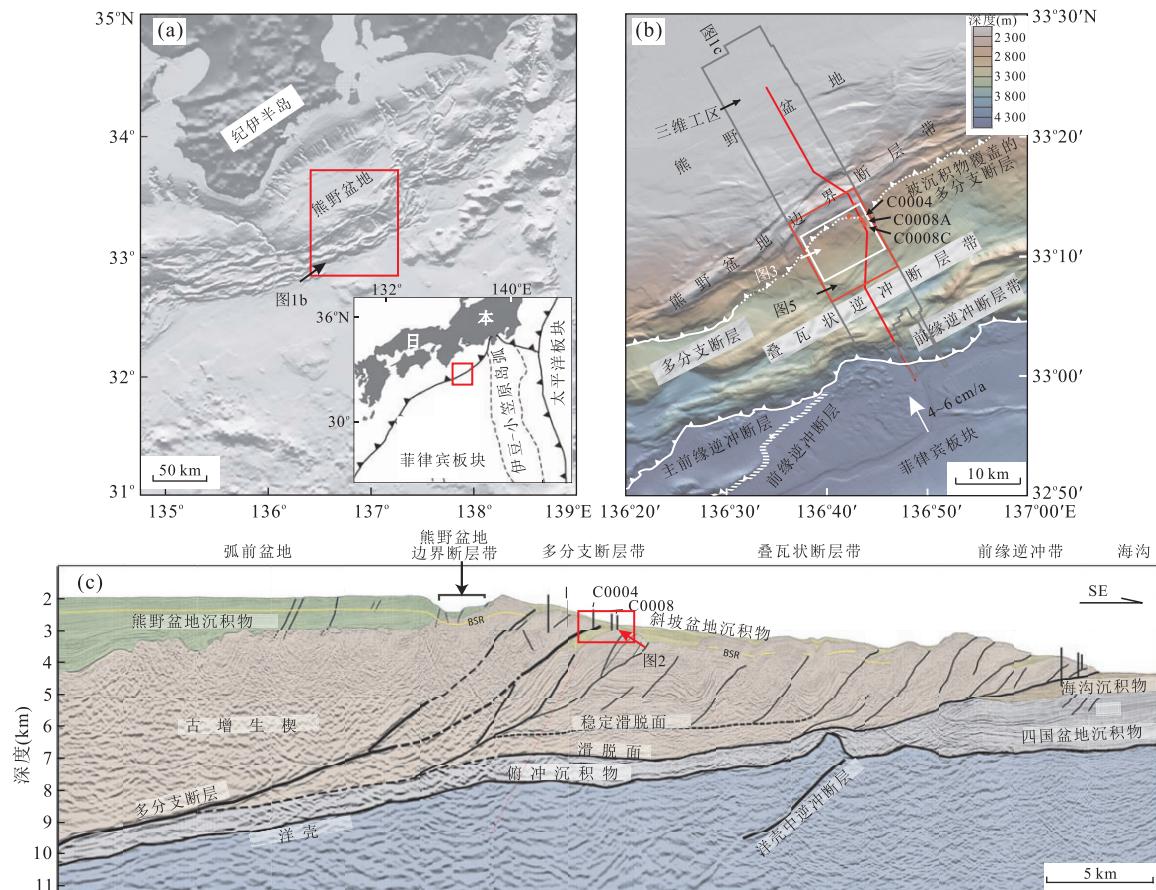


图 1 南海海槽增生楔区域地质背景(据 Kimura *et al.*, 2011, 修改)

Fig.1 Geological setting and strata of Nankai trough accretionary prism

a.南海海槽区域位置图;b.研究区位置及区域构造图;c.南海海槽增生楔构造及地层特征

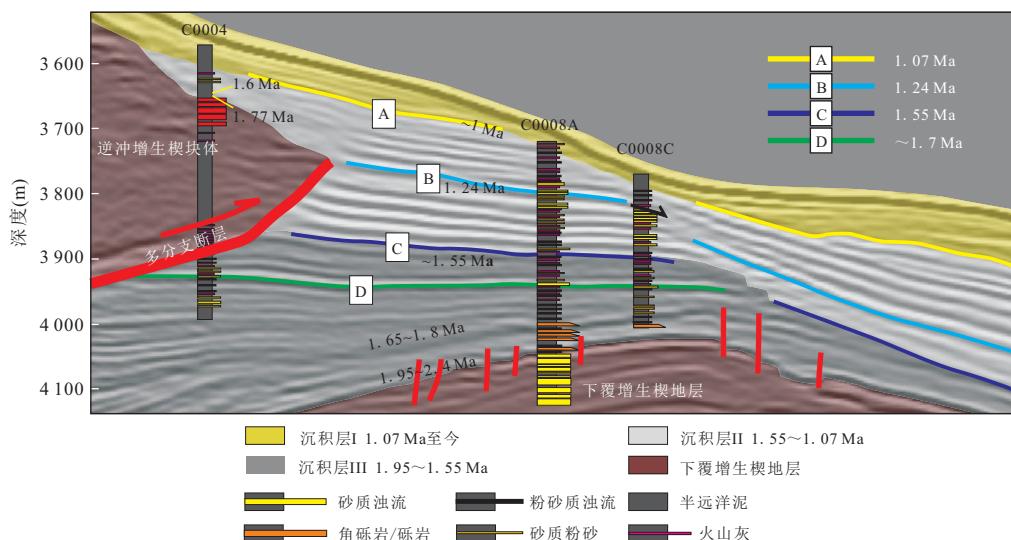


图 2 南海海槽增生楔斜坡盆地地层划分(剖面位置如图 1c 所示)

Fig.2 Stratigraphic classification in slope basin of Nankai trough accretionary prism

侧地震活动较弱的外部楔体(Wang and Hu, 2006).

南海海槽增生楔多分支断层发育有两个分支

(图1c),其中北部分支贯穿了楔体上部地层到达海底表面,晚于南部分支形成,两个分支活动共同控制

了约 1.95 Ma 以来南海海槽增生楔的演化过程 (Moore *et al.*, 2007; Strasser *et al.*, 2009). 斜坡盆地位于增生楔表面多分支断层靠海一侧低洼地带, 基底为多个叠瓦状逆冲背斜, 北部边界为多分支断层, 南部边界为出露的叠瓦状逆冲块体(图 1c). 作为增生楔表面最主要的沉积区, 斜坡盆地内丰富的重力流沉积物记录了多分支断层的活动历史以及大地震的活动过程。

结合国际综合大洋钻探计划 314-316 航次在南海海槽增生楔斜坡盆地北部的钻探认识和三维地震反射特征(图 2), 斜坡盆地可划分出 3 套地层, 即底部楔形块体流沉积层(沉积层Ⅲ, 1.95~1.55 Ma); 中弱振幅、连续反射层, 此段地层可以分为两个部分, 早期沉积的 40 m 块体流沉积和后期夹有层状砂、粉砂和火山灰的绿色—灰色粉砂质粘土地层; 中部浊流沉积层(沉积层Ⅱ, 1.55~1.07 Ma); 强振幅、连续反射层, 主要为夹有绿色—灰色粉砂质粘土和火山灰层的大量粗颗粒浊流层; 表层块体流沉积层(沉积层Ⅰ, 1.07 Ma 至今); 弱振幅、中差连续性反射层, 主要为含有少量火山灰和砂质粉砂的半远洋泥质沉积 (Kimura *et al.*, 2008; Strasser *et al.*, 2011).

## 2 斜坡盆地重力流沉积地震反射特征

### 2.1 斜坡盆地底部楔状块体流(1.95~1.55 Ma)

斜坡盆地底部块体流层整体上可分为底部低振幅杂乱反射的块体流沉积和上部低振幅连续反射的楔状块体流沉积。底部低振幅杂乱反射对应着钻孔 C0008A 岩心中约 40 m 的以粗颗粒泥质角砾岩为主的块体流沉积, 其沉积层展布面积较大, 覆盖了断层下盘(图 1c). 上部低振幅楔状块体流层为一低振幅多期次块体流沉积, 单期次块体流内部为低振幅中强连续的楔形反射特征, 各期次之间由强振幅、连续性好的界面分割, 这些分割各期次块体流的界面侧向连续性较好, 在盆地范围内可全区追踪. 靠近多分支断层区域, 沉积层各期次呈现北厚南薄的楔状特征, 南部大多上超到下伏增生楔块体或下伏沉积层之上, 由老到新依次向南进积, 且各期次块体流展布面积逐渐增大(图 2).

### 2.2 斜坡峡谷(1.55~1.07 Ma)

中部浊流层整体上为振幅强、连续性极好的平行反射, 根据地层内部反射特征, 以 B 界面为界可将其分为两部分: 上部(1.24~1.07 Ma) 和下部

(1.55~1.24 Ma)(图 3). 上部水道化地层内部同向轴呈现波状反射特征, 发育规模不等的密集“U”型凹槽; 下部水平沉积层内部同向轴较为“平直”, 峡谷不发育.

斜坡盆地峡谷系统发育于上部水道化地层中, 通过对峡谷化地层底界面 B 的追踪, 从该界面三维立体图(图 4)可以发现斜坡盆地内复杂的峡谷体系. 其峡谷类型主要有 3 种, 即斜坡峡谷, 轴向峡谷和大型块体流峡谷.

以盆地低洼处的轴向峡谷为界, 斜坡盆地被划分为北坡和南坡两个区域(图 4). 北坡占据盆地主要区域, 其形成受控于盆地北部多分支断层活动引起的抬升, 南北向平均距离近 4 km, 密集发育了大量斜坡峡谷以及盆地西部的大型块体流峡谷; 南坡位于出露的叠瓦状逆冲背斜北侧, 南北向距离短, 平均 1.0~1.5 km, 其中部发育大量长度较短的斜坡峡谷. 1.55~1.24 Ma 期间, 盆地东部遭受抬升, 沿盆地走向形成近 3° 的倾斜, 斜坡盆地整体表现为东高西低的地势格局, 这造成了盆地低洼处轴向峡谷的形成.

斜坡峡谷发育于盆地东部, 盆地南北两坡均有发育, 大多垂直于轴向峡谷, 呈现近 NE-SW 延展, 密集发育, 平均间距小于 0.5 km, 所有峡谷均汇聚到轴向峡谷之中. 根据峡谷规模及形成机制, 可将盆地东部斜坡峡谷分为 2 种类型, 即北坡峡谷和南坡峡谷. 北坡峡谷头部发育明显“马蹄形”垮塌地形, 峡谷长度一般大于 2 km. 南坡峡谷靠近盆地南部的逆冲背斜, 其规模较小, 轴向长度大多近 1 km. 相比于北坡峡谷, 其轴向呈 NW-SE 向伸展, 但是峡谷间更为密集, 间距近 0.25 km. 盆地南坡处峡谷主要集中在中部区域, 这种发育于叠瓦状逆冲断层带背斜区域的无头峡谷头部无明显的“马蹄形”垮塌地形.

斜坡峡谷规模均较小(图 3), 宽度小于 200 m, 但发育时间较长, 贯穿沉积层Ⅱ上部地层, 说明了其受到持续且相对稳定的构造活动(即北部斜坡的稳定抬升)的控制. 此外, 在盆地东部, 沉积层Ⅱ中普遍发育了向西南倾斜的正断层, 并受控于盆地东部的持续抬升.

轴向峡谷位于斜坡盆地南北坡之间的低洼地带, 与盆地走向近平行, 主体呈 NE-SW 向(图 4), 其头部为“Y”型汇聚特征. 轴向峡谷长度大于 12 km, 宽近 200 m, 其截面形态为浅缓“U”型特征(图 5), 由东到西峡谷逐渐变得宽缓. 盆地西部, 轴向峡谷同盆地低洼处挤压背斜相邻, 位于挤压背斜的南侧, 其为挤压背斜同南部叠瓦状逆冲块体之间的低洼地

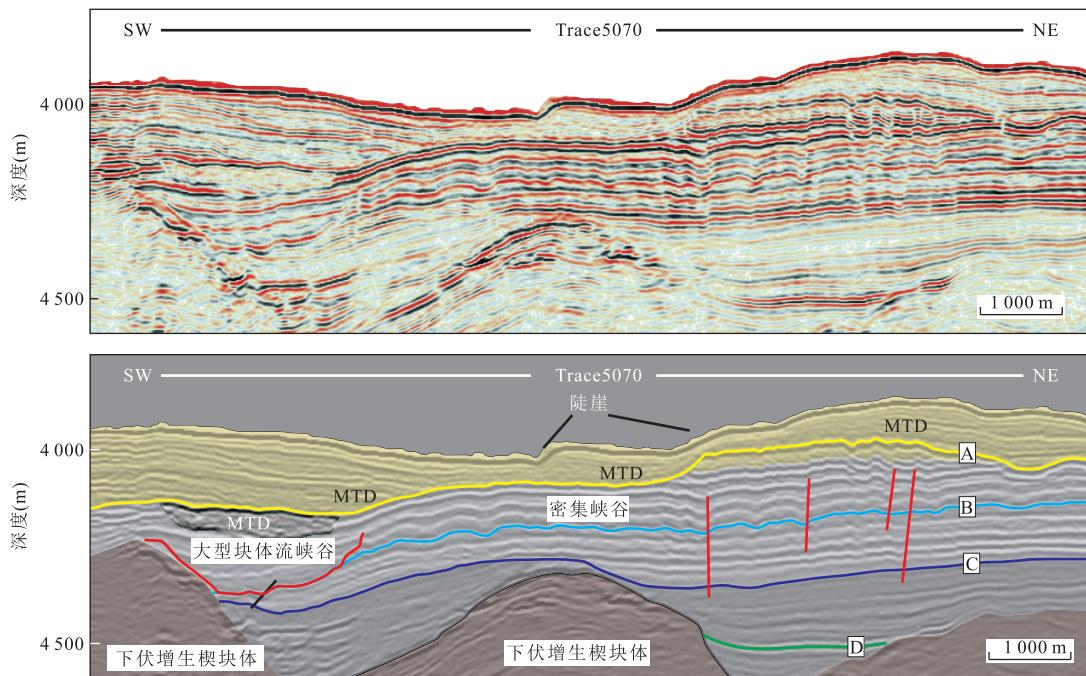


图 3 斜坡盆地密集峡谷及大型块体流峡谷剖面特征(剖面位置同图 4 所示)

Fig.3 Characteristics of serried canyons and great MTDs canyon in slope basin

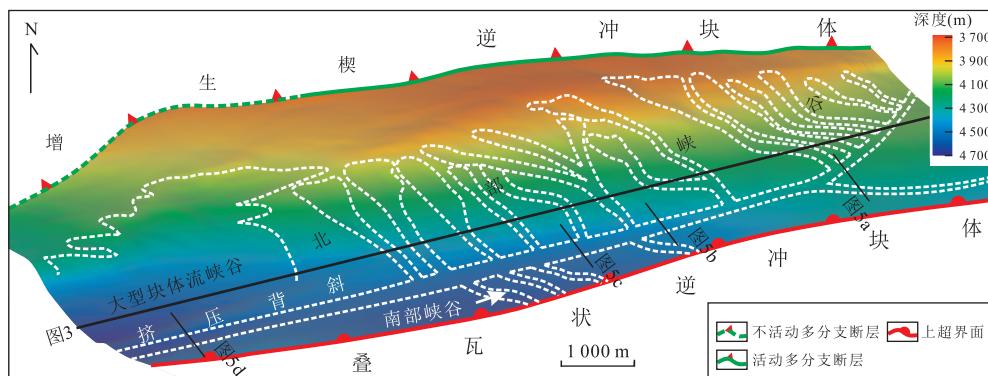


图 4 南海海槽增生楔斜坡盆地峡谷体系三维特征(位置同图 1b 所示)

Fig.4 3D Characteristics of canyons system in slope basin of Nankai trough accretionary prism

带。盆地东部,峡谷两壁北高南低,倾斜角度同盆地北坡一致,约 $3^{\circ}$ ,这主要是受到了后期多分支断层逆冲活动的影响,北部斜坡受到抬升并发生顺时针旋转所致。轴向峡谷主要作为盆地内斜坡峡谷的转运通道,将来自斜坡峡谷的沉积物运输到盆地西部的沉积中心。大型块体流峡谷位于盆地西部,约 $3 \times 3 \text{ km}^2$ ,向 SW 开口状地形(图 4)。峡谷头部发育大量“马蹄形”垮塌,东部同密集峡谷区相邻,内部由明显的 3 期沉积充填组成(图 3),各期次内部为杂乱低振幅反射的块体流沉积,期次间为连续性好的强振幅界面相隔,其南部边界受到了盆地西部挤压背斜的控制。

### 2.3 表层块体流(约 1.07 Ma 至今)

表层块体流(MTDs)发育在斜坡盆地顶部地层(沉积层 I)之中。由三维地震数据所作的高分辨率海底地形图(图 6)可以看出,斜坡盆地海底地形继承了前期盆地构造特征,分为东西两个主要区域:东部斜坡走向近 ENE,受多分支断层下盘抬升的影响,发育扇形隆起;西部斜坡走向近 EW,其北部边界为一较陡的陡壁,陡壁下地形平缓。盆地南侧边界外为一系列出露的叠瓦状逆冲背斜,其东部区域,表层沉积物未受到该背斜的控制,块体流越过背斜;西部区域,表层块体流受到南部背斜区的限制。

斜坡盆地北部区域发育大量高角度( $>10^{\circ}$ )的

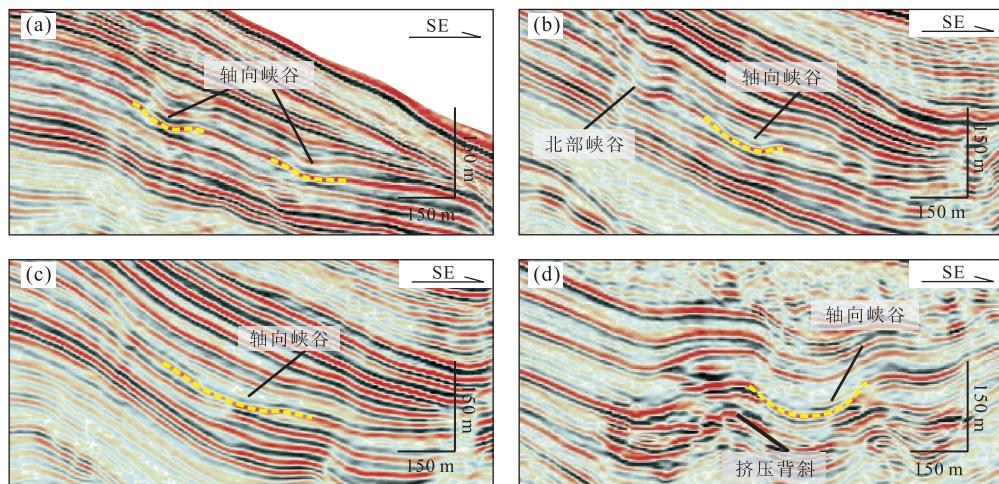


图 5 斜坡盆地轴向峡谷地震反射特征(位置同图 4 所示)

Fig.5 Characteristics of axis canyon in slope basin

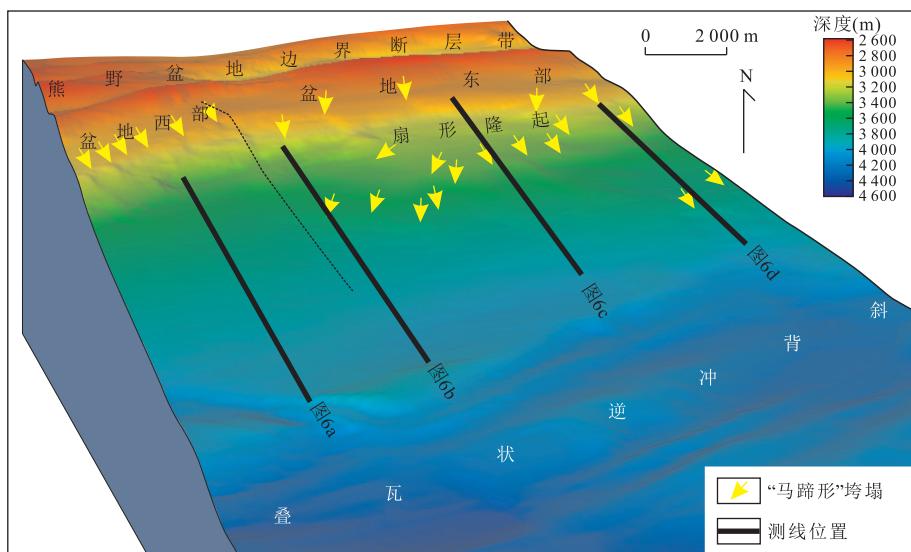


图 6 斜坡盆地表层块体流平面特征(位置如图 1b 所示)

Fig.6 Characteristics of superficial MTDs on seafloor of slope basin

“马蹄形”陡崖(scar)(图 6),这种“马蹄形”陡崖发育于块体流的头部,“马蹄”开口方向指示了块体流的运动学方向(Bull *et al.*, 2009).在盆地西部区域陡崖处,形成窄一陡的“马蹄形”垮塌地形,块体流沿斜坡指向 SE 或者 S. 盆地东部陡崖发育于扇形隆起周围,形成宽缓的“马蹄形”垮塌地形,其规模较盆地西部要大,块体流运动方向受到扇形隆起的影响,形成以扇形隆起为中心的辐射状展布。

表层块体流在剖面上整体表现为弱振幅杂乱反射,其间有少量中强振幅、连续性较好的界面(图 7),将表层块体流划分为不同的期次,其界面不可全区追踪,大多为局部性连续界面,反映了不同期次块

体流相互叠置的特征.表层块体流整体厚度变化较大,西部区域块体流平均厚度近 150~200 m,东部区域平均厚度约 100 m,表现为向盆地西南部增厚的特征.

单期次块体流表现为北厚南薄的楔形特征,其内部不同部位发育了两种不同类型的不整合界面.块体流头部发育的向下突出的不整合界面(图 7)对应着现代海底地形(图 6)中的陡崖,这些不整合界面往往是上覆低振幅杂乱反射地震相与下伏强振幅连续性好的地震相之间的分界面,其南部的块体流沉积上超到这些陡崖之上.块体流中部的侵蚀界面为块体流头部和主要沉积区之间的底部剪切界面

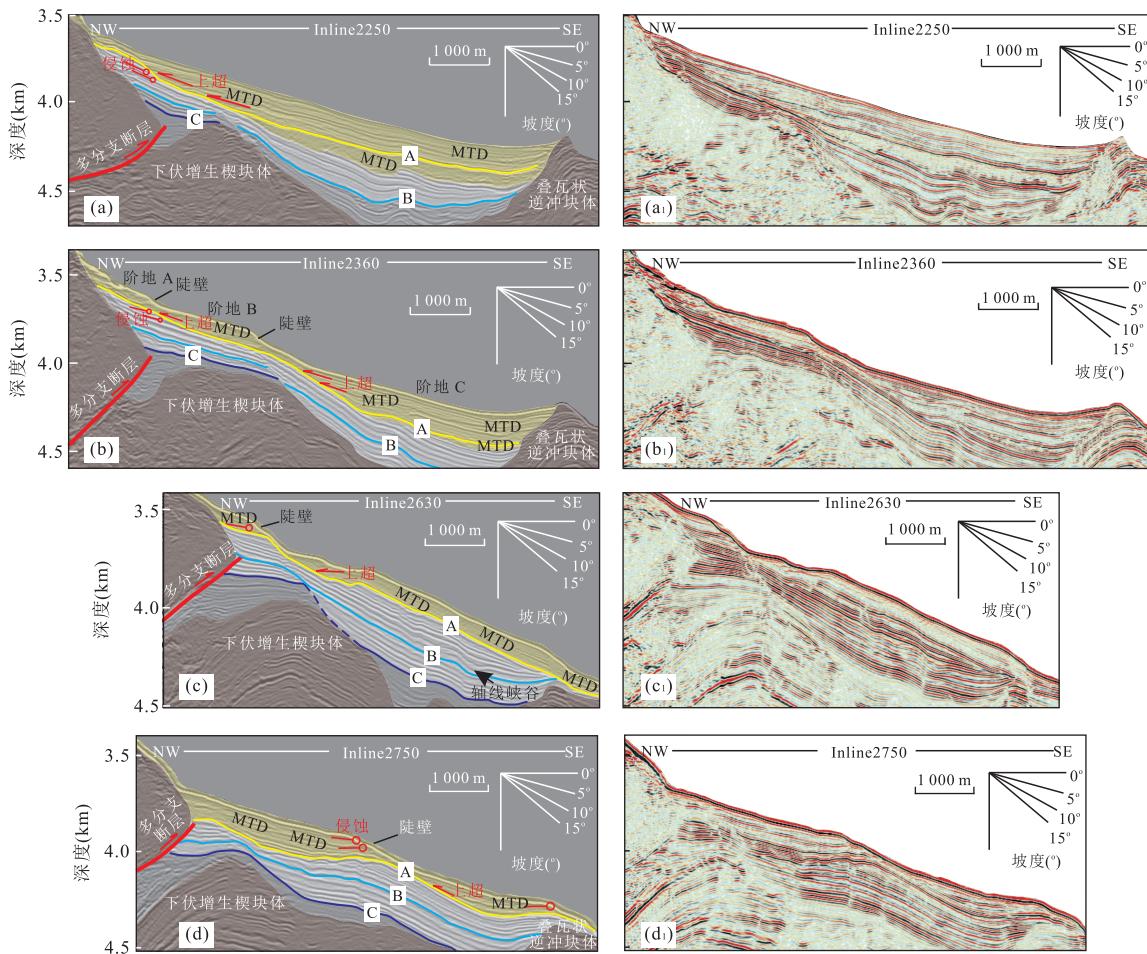


图 7 南海海槽增生楔斜坡盆地块体流沉积样式(剖面位置同图 6 中所示)

Fig.7 Depositional styles of superficial MTDs in slope basin of Nankai trough accretionary prism

(Bull *et al.*, 2009).向海侧(主沉积方向),底部剪切界面依次切过更为年轻的地层,形成台阶状地形(图 7),这种地形同块体运移旋转模型一致,即在转换带沿着平行于下伏地层的最小平移面滑动,并且在垮塌体趾部形成前缘斜坡(Lee *et al.*, 2007).块体流头部的陡崖和转换带区域的底部侵蚀界面共同造成了下伏地层的缺失,地层缺失厚度为 50~100 m 不等,这同 C0004 站位和 C0008 站位岩心中沉积层 I 地层年代缺失相对应(Strasser *et al.*, 2011).

受增生楔东西差异构造活动所形成的地貌格局的影响,表层块体流沉积样式差别较大.盆地西部,叠瓦状逆冲断层带背斜将表层块体流限制在斜坡盆地内,形成“整体式”块体流充填(图 7a).盆地东部,受到扇形隆起的影响,沉积物逐级垮塌沉积,形成“多阶地式”块体流充填(图 7b),此处叠瓦状逆冲断层背斜依然限制表层块体流向南搬运,斜坡盆地充填满;向东,叠瓦状逆冲断层背斜对表层块体流限制作用减小,块体流切过盆地南侧背斜块体限制(图

7c),形成“断阶式”块体流充填,或者越过南侧背斜块体(图 7d),形成“断坡式”块体流充填.

### 3 斜坡盆地重力流沉积岩心特征

IODP 316 航次在南海海槽斜坡盆地北侧进行了 4 个站位的全井段取样(图 2),其中,C0008A 站位的钻井获取了斜坡盆地完整的岩心数据,该岩心揭示了更为精细的重力流沉积特征.

如 C0008 站位岩心所示(图 8),沉积层 III 可以分为两个部分,即早期沉积的 40 m 块体流沉积(图 8a)和后期以夹有层状砂、粉砂和火山灰的绿色—灰色粉砂质粘土为主地层(图 8b).在其底部钻遇块体流沉积物中,发育大量粗颗粒的泥质角砾岩,角砾粒径在 2~5 cm 左右,受到块体流搬运过程中颗粒间相互摩擦的影响,部分泥质块体具有一定的磨圆度.后期沉积中以半远洋粉砂质粘土与层状粉砂互层为主,粉砂层厚 2~3 cm.早期块体流沉积物来自于浅

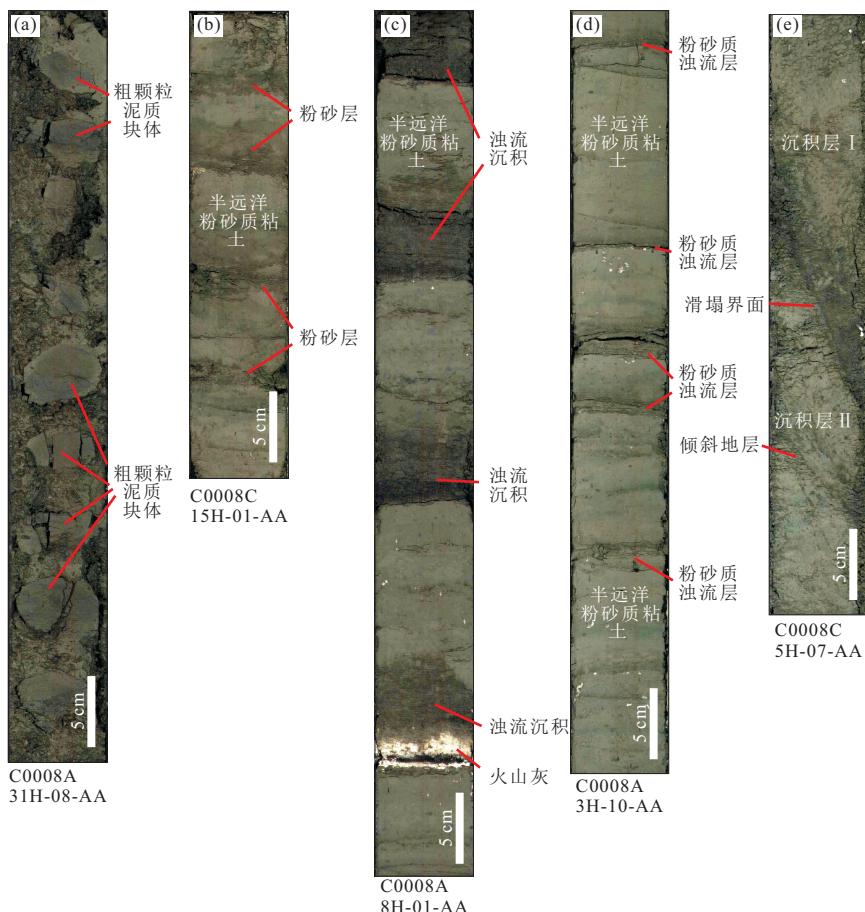


图 8 C0008 站位岩心所揭示的斜坡盆地重力流沉积特征

Fig.8 Characteristics of gravity flow in cores of slope basin

部多分支断层上盘,其粗颗粒泥质角砾岩可能与早期多分支断层初始活动期的剧烈活动有关。

沉积层Ⅱ为夹有绿色—灰色粉砂质粘土和火山灰层的大量粗颗粒浊流层,同沉积层Ⅰ相比,此段地层浊流沉积物颗粒较粗,厚度较大,一般5~8 cm,且可以看见明显的鲍马序列,岩心中常见白色火山灰沉积(图8c)。沉积层Ⅰ和沉积层Ⅱ之间为一较陡的不整合界面,界面之下沉积层Ⅱ段地层呈现高度倾斜的特征(图8e),这主要是斜坡处受到了上覆沉积层Ⅰ中块体流侵蚀的影响。

沉积层Ⅰ为含有少量粉砂质浊流和火山灰的半远洋沉积,此段地层中的粉砂质浊流通常很薄且较少发育(图8d),C0004 站位在斜坡盆地北部钻遇了逆冲增生楔块体表面的含有粉砂质粘土碎屑的角砾岩地层,这些可能是由于逆冲增生楔块体在不稳定状态下形成的滑坡和块体滑移所导致的(Kimura *et al.*, 2008)。

#### 4 重力流沉积对增生楔构造活动的响应

南海海槽增生楔斜坡盆地内发育了多种类型重力流沉积,不同时期重力流沉积样式及其空间展布特征反映了多分支断层的活动过程。

1.95 Ma 到 1.55 Ma 之间,斜坡盆地内重力流沉积以多分支断层附近的块体流沉积为主。1.95 Ma 多分支断层以无序逆冲断层的形式作为板块边界断层开始活动(Strasser *et al.*, 2009),底部含粗颗粒泥质角砾岩的块体流沉积层可能是受多分支断层形成初期剧烈活动的影响而形成的。上部楔形块体流沉积层中具有明显的向海侧进积特征,单个期次块体流表现靠近断层处厚,向海侧减薄的楔形特征,均是由于断层逆冲活动造成了靠近断层处可容纳空间更大,更容易堆积较多的沉积物所致。各期块体流均表现为北厚南薄的楔形特征,说明了多分支断层持续的逆冲活动造成了可容纳空间稳步增加,总体上多分支断层可能处于相对稳定的活动期。其中,盆地西部的底部块体流沉积越过了挤压背斜并在盆地南部

沉积(图 9a).沉积层Ⅲ地层各期次块体流沉积在全盆可追踪对比,不同于表层块体流明显的侧向堆积特征,说明了其由相对单一的物源提供沉积物,即沉积物主要来自多分支断层上盘,整套地层块体流沉积主要受到了多分支断层活动的控制.

1.55~1.07 Ma 期间,沉积层Ⅱ地层可分为上部峡谷浊流沉积层和下部平行沉积层,其中,1.55~1.24 Ma 期间,以盆地范围内具有较强振幅、连续性极好的水平沉积为主,其岩性为连续的半深海泥岩夹杂少量薄层粉砂质砂岩,其粉砂质沉积可能来自斜坡盆地北侧垮塌沉积.盆地西部发育平行于增生楔走向的挤压背斜(图 9b),说明了多分支断层处于耦合状态,其作为板块边界断层的作用消失,板块汇聚造成的挤压应力分散到增生楔体之上,造成楔体挤压变形.此外,沉积层Ⅱ中发育的向西南倾斜的正断层说明盆地东部处于稳定的抬升过程,造成了盆地东高西低的构造格局,并直接控制了后期轴向峡谷的形成.

1.24~1.07 Ma 间,盆地内发育复杂的峡谷系统,可分为斜坡峡谷、大型块体流峡谷和轴向峡谷,其中斜坡峡谷可分为北部峡谷和南部峡谷.北部峡

谷头部对应发育有“马蹄形”垮塌地形,这种由“马蹄形”垮塌提供沉积物供给的峡谷属于无头峡谷的范畴,受峡谷中垮塌作用的影响,峡谷不断向源头侵蚀延伸,北部峡谷形态主要受到斜坡地形的控制.多分支断层耦合造成了增生楔体的挤压变形和盆地北部的稳定抬升(图 9c),斜坡角度的持续增大为北部峡谷的发育提供了条件.

多分支断层的这种耦合挤压作用同样也体现在盆地南坡密集峡谷中.南坡峡谷不同于北坡,其仅在南坡中部靠近挤压背斜边界,且发育于盆地南部逆冲背斜之上,笔者推测其是由增生楔倾向方向上的汇聚挤压造成的逆冲背斜附近空隙水压力增大所致,当孔隙水压力达到地表沉积物稳定极限时,沉积物开始液化垮塌,形成重力流并顺斜坡向下冲刷形成盆地南坡的密集峡谷,这同 Orange and Breen (1992)对现今增生楔发育于逆冲背斜之上的峡谷形成机制研究的认识是一致的.

大型块体流峡谷同斜坡峡谷和轴向峡谷所反映的相对稳定连续的构造活动不同,其反映了相对剧烈的构造活动.1.55 Ma 开始,西部多分支断层停止活动,并在 1.24 Ma 左右经历了短暂地快速运动

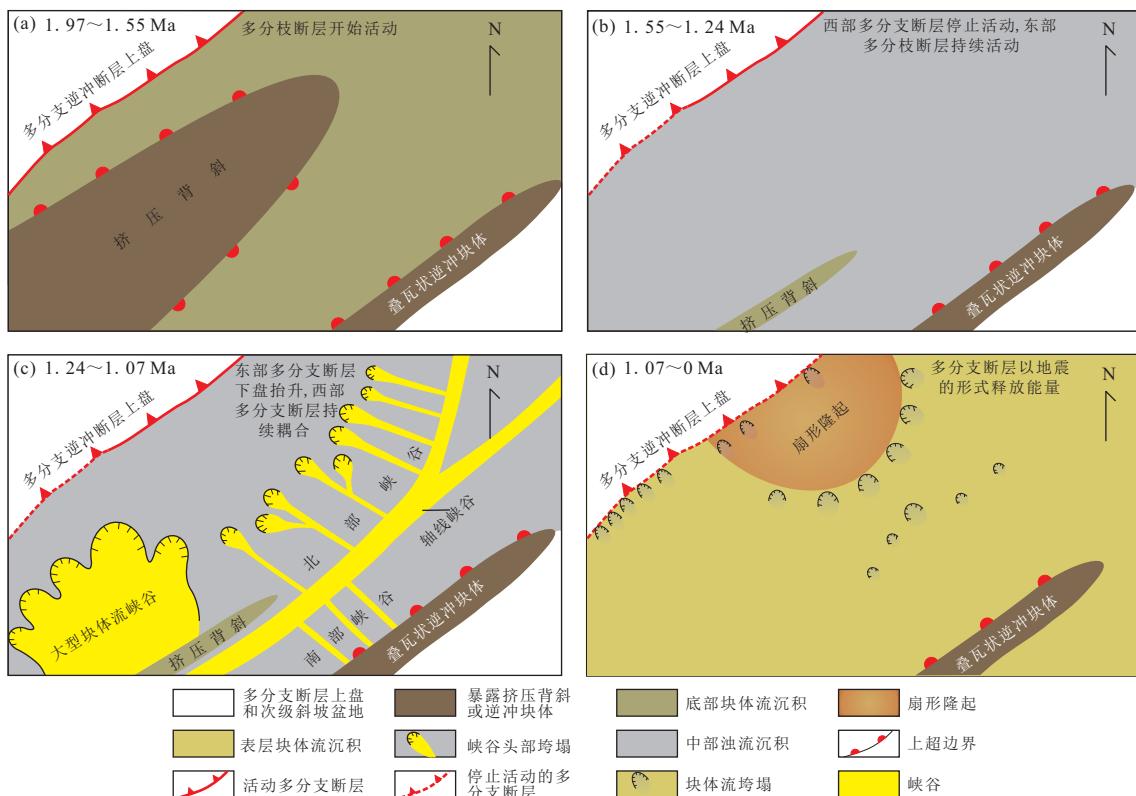


图 9 增生楔斜坡盆地重力流分布及其与构造的响应关系

(Kimura *et al.*, 2011), 该活动可能控制了盆地西部大型块体流峡谷的形成。

与沉积层Ⅱ相对稳定连续的浊流沉积不同的是, 1.07 Ma至今, 盆地范围内发育了大量的弱振幅块体流沉积, 这反映了整个盆地构造背景的剧烈转变, 这些块体流沉积在盆地范围相对均匀分布, 局部受到了地形的控制, 且在垂向上相互叠加, 空间上不连续(图9d). 该时期多分支断层并无明显活动, 因此, 其对表层块体流的形成无直接控制作用. Sakaguchi *et al.*(2011)通过对表层块体流中的泥质角砾岩的定年研究, 认为其形成于1944年Tonankai大地震期间, 这说明了表层块体流主要受到大地震活动的触发作用. 盆地内不同区域均匀分布的“马蹄形”垮塌反映了表层块体流受到一个具有较大作用范围的控制, 这与大地震触发机制是相吻合的.

此外, 徐纪人等(2003)通过重力异常、GPS和热流量等地球物理观测数据对四国—纪伊半岛以南的俯冲带进行了研究, 认为该段俯冲带属于年轻的板块俯冲带, 俯冲角度低、俯冲深度浅, 在俯冲过程中遭到强烈的抵抗摩擦, 并产生相当高的应力积累, 一旦应力超过其承受极限时, 大地震即发生. 根据以上对重力流沉积特征及其对构造活动的响应关系研究可知, 1.55~1.07 Ma间盆地西部受多分支断层耦合的影响, 多分支断层深部集聚了大量的构造挤压和应力集聚, 1.07 Ma之后能量释放, 大地震频繁发生, 控制了表层块体流的形成.

## 5 结论

通过IODP钻探岩心的解释和地质资料的分析, 本文详细研究了该区构造活动的演化以及深水沉积体系(块体搬运流、水道沉积等)分布和演化, 探讨了沉积对构造和地震活动响应. 即, 1.95 Ma, 多分支断层以板块边界断层的形式开始活动, 剧烈的逆冲活动控制了斜坡盆地底部含有大量粗粒泥质角砾岩的块体流的形成. 1.95~1.55 Ma, 多分支断层以逆冲活动为主, 这种逆冲活动控制了盆地底层楔形块体流的形成. 1.55~1.24 Ma, 西部多分支断层耦合并停止活动, 东部多分支断层持续活动, 造成叠瓦状逆冲背斜孔隙水压力增大、盆地北部斜坡变陡以及东高西低的构造格局. 1.24~1.07 Ma, 持续的挤压活动以及盆地北部和东部的抬升活动控制了复杂峡谷系统的形成. 1.07 Ma至今, 盆地西部断层耦合所聚集的能量得到释放, 大地震频繁发生, 控制了表层块体

流的形成.

致谢: 感谢 IODP314-316航次全体科研人员对本文所提供的帮助.

## References

- Bouma, A. H., 1962. Sedimentology of Some Flysch Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation. Elsevier, Amsterdam, 168.
- Bull, S., Cartwright, J., Huuse, M., 2009. A Review of Kinematic Indicators from Mass-Transport Complexes Using 3D Seismic Data. *Marine and Petroleum Geology*, 26(7): 1132—1151. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2008.09.011
- Cochonat, P., Cadet, J. P., Lallemand, S. J., et al., 2002. Slope Instabilities and Gravity Processes in Fluid Migration and Tectonically Active Environment in the Eastern Nankai Accretionary Wedge (KAIKO-Tokai'96 Cruise). *Marine Geology*, 187(1): 193—202. doi: 10.1016/S0025-3227(02)00266-9
- Fergusson, C. L., 2003. Provenance of Miocene-Pleistocene Turbidite Sands and Sandstones, Nankai Trough, Ocean Drilling Program Leg 190. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 190(196): 1—28. doi: 10.2973/odp.proc.sr.190196.205.2003
- Hampton, M. A., Lee, H. J., Locat, J., 1996. Submarine Landslides. *Reviews of Geophysics*, 34(1): 33—59. doi: 10.1029/95RG03287
- Kimura, G., Moore, G. F., Strasser, M., et al., 2011. Spatial and Temporal Evolution of the Megasplay Fault in the Nankai Trough. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(3): Q0A008. doi: 10.1029/2010GC003335
- Kimura, G., Screamton, E. J., Curewitz, D., et al., 2008. NanTroSEIZE Stage 1A: NanTroSEIZE Shallow Megasplay and Frontal Thrusts. *IODP Prel. Rept.*, 316. doi: 10.2204/iodp.pr.316.2008
- Lee, H. J., Locat, J., Desgagnés, P., et al., 2007. Submarine Mass Movements on Continental Margins. In: Nittrouer, C. A., Austin, J. A., Field, M. E., et al., eds., *Continental Margin Sedimentation: From Sediment Transport to Sequence Stratigraphy*, Int. Assoc. Sedimentol., Gent, 213—274. doi: 10.1002/9781444304398.ch5
- Li, C. F., Su, X., Jiang, T., et al., 2010. Deformation at the Front of the Accretionary Prism of the Nankai Trough, Japan: Evidence from Core Samples. *Advances in Earth Science*, 25(2): 203—211 (in Chinese with English abstract).
- Locat, J., Lee, H. J., 2002. Submarine Landslides: Advances and Challenges. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(1):

- 193—212.doi:10.1139/T01—089
- Lowe, D. R., 1982. Sediment Gravity Flows: II. Depositional Models with Special Reference to the Deposits of High-Density Turbidity Currents. *Journal of Sedimentary Research*, 52(1):279—297.
- Miyazaki, S., Heki, K., 2001. Crustal Velocity Field of Southwest Japan: Subduction and Arc-Arc Collision. *Journal of Geophysical Research*, 106 (B3): 4305—4326.doi:10.1029/2000JB900312
- Moore, G. F., Bangs, N. L., Taira, A., et al., 2007. Three-Dimensional Splay Fault Geometry and Implications for Tsunami Generation. *Science*, 318 (5853): 1128—1131. doi:10.1126/science.1147195
- Moore, G. F., Karig, D. E., Shipley, T. H., et al., 1991. Structural Framework of the ODP LEG 131 Area, Nankai Trough. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, 131: 15—20. doi: 10.2973/odp.proc.ir.131.102.1991
- Moore, G. F., Park, J. O., Bangs, N. L., et al., 2009. Structural and Seismic Stratigraphic Framework of the NanTro-SEIZE Stage 1 Transect. In: Kinoshita, M., Tobin, H., Ashi, J., et al., eds., *Proceedings of IOOP, Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., Texas*, 314—316: 1—46. doi: 10.2204/iodp.proc.314315316.102.200
- Moscardelli, L., Hornbach, M., Wood, L., 2010. Tsunamigenic Risks Associated with Mass Transport Complexes in Offshore Trinidad and Venezuela. Submarine Mass Movements and Their Consequences. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 28: 733—744.doi:10.1007/978—90—481—3071—9\_59
- Mutti, E., Ricci Lucchi, F., 1972. Le Torbiditi Dell'Appennino Settentrionale; Introduzione All'analisi Di Facies. *Memoire della Societa Geologica Italiana*, 11(2):161—199.
- Omura, A., Ikehara, K., 2010. Deep-Sea Sedimentation Controlled by Sea-Level Rise during the Last Deglaciation, an Example from the Kumano Trough, Japan. *Marine Geology*, 274(1):177—186.doi:10.1016/j.margeo.2010.04.002
- Orange, D. L., Breen, N. A., 1992. The Effects of Fluid Escape on Accretionary Wedges 2. Seepage Force, Slope Failure, Headless Submarine Canyons, and Vents. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B6):9277—9295.doi:10.1029/92JB00460
- Palanques, A., Martín, J., Puig, P., et al., 2006. Evidence of Sediment Gravity Flows Induced by Trawling in the Palamos (Fonera) Submarine Canyon (Northwestern Mediterranean). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53 (2): 201—214. doi: 10.1016/j.dsr.2005.10.003
- Park, J., Moore, G. F., Tsuru, T., et al., 2004. A Subducted Oceanic Ridge Influencing the Nankai Megathrust Earthquake Rupture. *Earth and Planetary Science Letters*, 217(1): 77—84. doi: 10.1016/S0012—821X(03)00553—3
- Pettingill, H. S., 1998. Turbidite Giants—Lessons from the World's 40 Largest Turbidite Discoveries. EAGE/AAPG 3rd Research Symposium—Developing and Managing Turbidite Reservoirs, Almeria.
- Pickering, K. T., Underwood, M. B., Taira, A., 1992. Open-Ocean to Trench Turbidity-Current Flow in the Nankai Trough: Flow Collapse and Reflection. *Geology*, 20 (12): 1099—1102. doi: 10.2973/odp.proc.sr.131.104.1993
- Puig, P., Ogston, A. S., Mullenbach, B. L., et al., 2004. Storm-Induced Sediment Gravity Flows at the Head of the Eel Submarine Canyon, Northern California Margin. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C3):1—10. doi:10.1029/2003JC001918
- Ratzov, G., Collot, J., Sosson, M., et al., 2010. Mass-Transport Deposits in the Northern Ecuador Subduction Trench: Result of Frontal Erosion over Multiple Seismic Cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 296(1): 89—102.doi:10.1016/j.epsl.2010.04.048
- Sakaguchi, A., Kimura, G., Strasser, M., et al., 2011. Episodic Seafloor Mud Brecciation due to Great Subduction Zone Earthquakes. *Geology*, 39 (10): 919—922. doi: 10.1130/G32043.1
- Schnellmann, M., Anselmetti, F. S., Giardini, D., et al., 2002. Prehistoric Earthquake History Revealed by Lacustrine Slump Deposits. *Geology*, 30(12): 1131—1134. doi: 10.1130/0091—7613 (2002) 030<1131: PEHRBL>2.0.CO;2
- Seno, T., Stein, S., Gripp, A. E., 1993. A Model for the Motion of the Philippine Sea Plate Consistent with NUVEL-1 and Geological Data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98 (B10): 17941—17948. doi: 10.1029/93JB00782
- Shanmugam, G., 2000. 50 Years of the Turbidite Paradigm (1950s—1990s): Deep-Water Processes and Facies Models—A Critical Perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 285—342. doi: 10.1016/S0264—8172(99)00011—2
- Shiki, T., 1996. Reading of the Trigger Records of Sedimentary Events—A Problem for Future Studies. *Sedimentary Geology*, 104(1—4): 249—255. doi: 10.1016/0037—

0738(95)00132—8

Shiki, T., Cita, M.B., Gorsline, D.S., 2000. Sedimentary Features of Seismites, Seismo-Turbidites and Tsunamiites—An Introduction. *Sedimentary Geology*, 135(1—4): 7—9. doi: 10.1016/s0037-0738(00)00058-0

Shirai, M., Omura, A., Wakabayashi, T., et al., 2010. Depositional Age and Triggering Event of Turbidites in the Western Kumano Trough, Central Japan during the Last ca. 100 Years. *Marine Geology*, 271(3—4): 225—235. doi: 10.1016/j.margeo.2010.02.015

Stow, D.A., Mayall, M., 2000. Deep-Water Sedimentary Systems: New Models for the 21st Century. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 125—135. doi: 10.1016/S0264-8172(99)00064-1

Stow, D.A., Shanmugam, G., 1980. Sequence of Structures in Fine-Grained Turbidites: Comparison of Recent Deep-Sea and Ancient Flysch Sediments. *Sedimentary Geology*, 25(1—2): 23—42. doi: 10.1016/0037-0738(80)90052-4

Strasser, M., Moore, G.F., Kimura, G., et al., 2009. Origin and Evolution of a Splay Fault in the Nankai Accretionary Wedge. *Nature Geoscience*, 2(9): 648—652. doi: 10.1038/NGEO609

Strasser, M., Moore, G.F., Kimura, G., et al., 2011. Slumping and Mass Transport Deposition in the Nankai Fore Arc: Evidence from IODP Drilling and 3-D Reflection Seismic Data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(5): 1—24. doi: 10.1029/2010GC003431

Sultan, N., Cochonat, P., Canals, M., et al., 2004. Triggering Mechanisms of Slope Instability Processes and Sediment Failures on Continental Margins: A Geotechnical Approach. *Marine Geology*, 213(1—4): 291—321. doi:

10.1016/j.margeo.2004.10.011

Underwood, M.B., Moore, G.F., Taira, A., et al., 2003. Sedimentary and Tectonic Evolution of a Trench-Slope Basin in the Nankai Subduction Zone of Southwest Japan. *Journal of Sedimentary Research*, 73(4): 589—602. doi: 10.1306/092002730589

Underwood, M.B., Orr, R., Pickering, K.T., et al., 1993. Provenance and Dispersal Patterns of Sediments in the Turbidite Wedge of Nankai Trough. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Leg 131*, 131: 15—34. doi: 10.2973/odp.proc.sr.131.105.1993

Walker, R.G., 1978. Deep-water Sandstone Facies and Ancient Submarine Fans: Models for Exploration for Stratigraphic Traps. *AAPG Bulletin*, 62(6): 932—966.

Wang, K., Hu, Y., 2006. Accretionary Prisms in Subduction Earthquake Cycles: The Theory of Dynamic Coulomb Wedge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111, B06410. doi: 10.1029/2005JB004094

Xu, J.R., Zhao, Z.X., Kono, Y., et al., 2003. Regional Characteristics of Stress Field and Its Dynamics in and around the Nankai Trough, Japan. *Chinese Journal of Geophysics*, 46(4): 488—494 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 李春峰, 苏新, 姜涛, 等, 2010. 日本南海海槽俯冲增生楔前缘的构造变形特征. 地球科学进展, 25(2): 203—211.
- 徐纪人, 赵志新, 河野芳辉, 等, 2003. 日本南海海槽地震区域应力场及其板块构造动力学特征. 地球物理学报, 46(4): 488—494.