

冲绳海槽西部陆坡地震相模式与沉积体系*

李西双 刘保华 吴金龙 赵月霞[†] 王揆洋

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

[†](中国海洋大学 青岛 266003)

提要 对冲绳海槽西部陆坡上两个航次(95航次和99航次)共计2000多公里的单道地震资料进行分析和解译,对斜坡沉积环境下沉积体系发育、分布特征进行了研究。结果表明:a)冲绳海槽西部斜坡环境下,上新世以来的沉积层均不同程度的变形和错动;b)存在两种斜坡相地震反射模式——退覆模式和叠覆模式,这两种模式都反映了冲绳海槽西部陆坡得到充足的沉积物供给;c)斜坡环境下主要发育陆架边缘三角洲、重力流沉积和水道充填等沉积体系;d)沉积层发育特征表明,冲绳海槽西部陆坡具有北段坡度缓、沉积物供应丰富、构造相对不活跃,中段坡度陡、沉积物供应充足、构造活动强烈,南段坡度陡、沉积供应相对较少、构造和火山活动十分强烈3种主要沉积环境。西部陆坡的沉积特征也揭示了东海陆架向陆坡提供了大量碎屑沉积物质。

关键词 冲绳海槽,地震层序,地震相,沉积体系

中图分类号 P736

冲绳海槽是中新世以来形成的弧后盆地(Kimura, 1985; Letouzey *et al.*, 1985; Park *et al.*, 1998)。国内外许多学者从不同的角度对冲绳海槽进行了研究(Nagumo *et al.*, 1986; 秦蕴珊等, 1987; 金翔龙, 1992; Chen *et al.*, 1995; 李铁刚等, 1996; 李培英等, 1999; Katsumi *et al.*, 1999; 韩喜球等, 2002; 曹奇原等, 2002; 曾志刚等, 2003; 高金耀等, 2002; 孙荣涛等, 2003; 向荣等, 2003),但未见有关冲绳海槽陆坡沉积环境及伴生沉积体系研究的详细报道。冲绳海槽西槽坡(东海陆坡)坡度比东槽坡小(图1),以往的研究工作表明,冲绳海槽轴线以西沉积物以陆源成分占优势(赵一阳等, 1984; 郑铁民等, 1989; 吴明清等, 1988, 1991; 孟宪伟等, 1997),东海陆架向冲绳海槽输送了大量的陆源沉积物质(秦蕴珊等, 1987; 金翔龙, 1992; 孟宪伟等, 1997; Park *et al.*, 1998; Huhs *et al.*, 1999)。陆架陆源物质的大量输送和冲绳海槽强烈的构造活动,使西槽坡形成非常独特的陆坡沉积环境及其伴生的沉积体系。作者根据冲绳海槽实测单道地震调查资料,结合前人的研究成果,对冲绳海槽

西槽坡的斜坡相模式及沉积格式进行研究,这有助于进一步对冲绳海槽陆坡性质、陆架向海槽物质输送方式的深入了解,并对冲绳海槽扩张性质的认识具有重要的意义。

1 资料的获得与处理

本文中使用的资料为单道地震剖面,是“向阳红9号”1995年航次和“东方红2号”1999年航次在冲绳海槽进行地球物理调查时获得的,测线分布基本上覆盖整个海槽的西侧及部分东海陆架。单道地震的调查为拖缆走航式,船的走航速度为6kn,采集系统为TRITON ELECS公司的DELPH系统,工作时剖面的记录长度为2s,压电检波器(水听器)接收地震信号,接收电缆沉放深度在水下4—6m之间。震源为G.I枪系统,工作时枪压力为1700—2000PSI,发射时间间隔为10s或11.05s,枪的沉放深度约为2.5m。地震资料处理时先利用DELPH作预处理,然后在工作站上用PROMAX作精细处理。

* 国际海底区域研究开发十五项目“地球物理等调查资料处理解释技术”课题资助, DY105-03-01号。李西双, 实习研究员, E-mail: lixishuangmail@163.com

收稿日期:2003-01-05, 收修改稿日期:2003-11-12

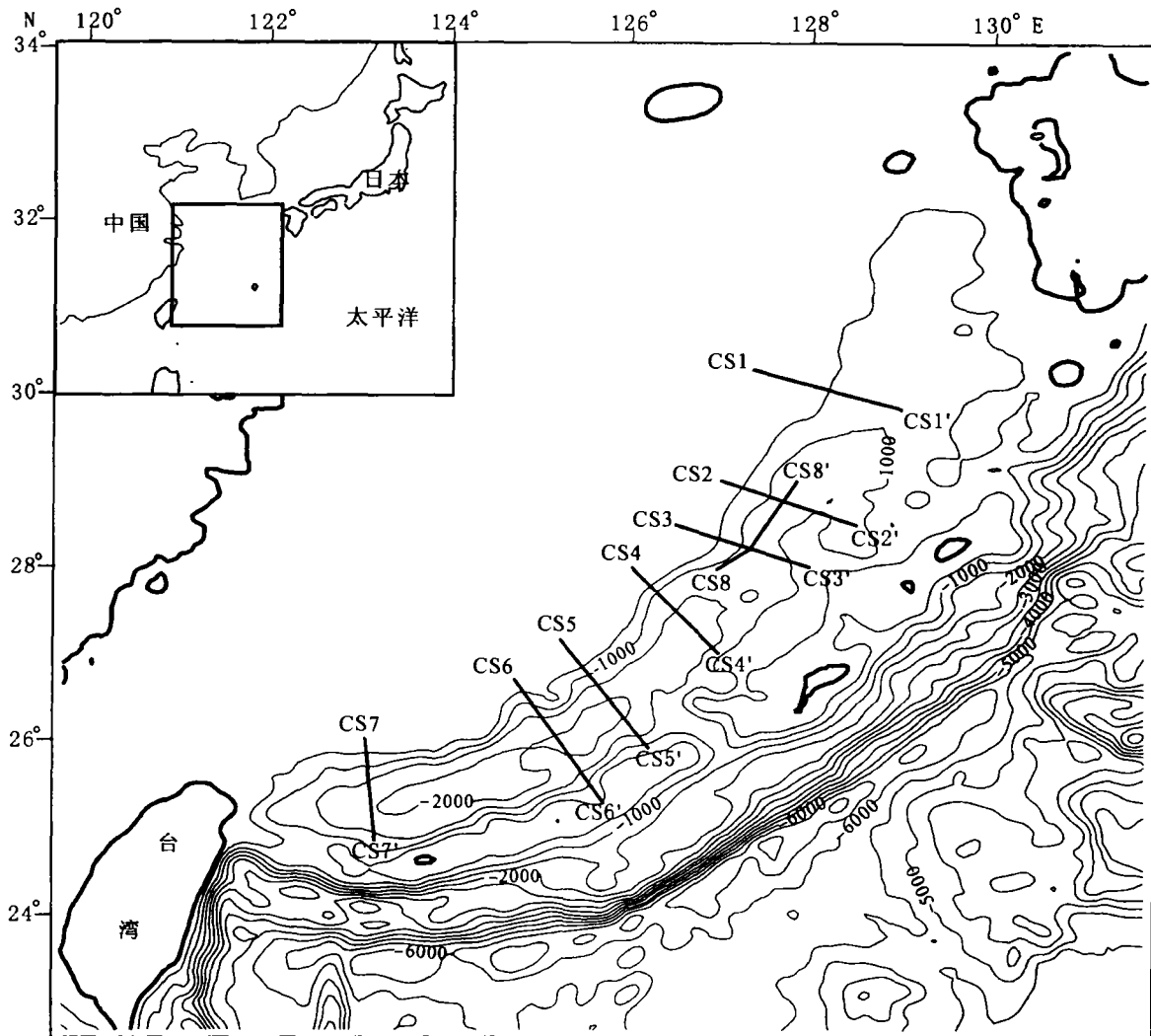


图1 冲绳海槽海底地形图

Fig.1 Seafloor topography of the Okinawa Trough

2 单道地震资料的解释

2.1 地震地层

地震剖面上可以识别出4个主要的不整合界面,分别为R1、R2、R3和R4,划分出5套地震层序(图2),根据沉积的先后,自上而下分别命名为Ua、Ub、Uc、Ud、和Ue。

地震层序 Ua 总体上为平行席状相,视低频,强反射,在陆坡上部为披盖式沉积;在陆坡的中部水深变化剧烈处内部反射变弱,受断层和海底滑塌的影响,厚度变化较大,并有许多滑塌存在;在陆坡坡麓为平行席状的弱反射,局部为透明状地震相,偶尔出现浊流沉积,以强反射、连续性不好并呈透镜状外形为特征。Ua是全新世形成的泥质粉砂沉积以及半深海相的浊流、泥质粘土沉积。

地震层序 Ub 总体上为弱反射,局部为半透明声学相,以平行反射结构为主,局部具杂乱相。顶界面可以连续追踪,底界面连续性差,在局部无法追踪。Ub的地震相随水深和构造单元的不同而发生改变。陆坡上部为良好的三角洲前积层,具明显的斜交前积反射,反射波为视中频、强振幅;前积体下部反射波受滑塌作用的影响而变得零乱,呈半透明声学相,厚度自西向东变厚,在水深开始变大时又变薄;在陆坡的中部,受重力滑塌和断层的影响,反射波比较杂乱,呈弱反射,顶底界面不易识别,厚度变化也大,从几米到数十米不等;在陆坡坡麓 Ub 为连续性不好的弱反射,视中频,整个层序呈连续分布,厚度从十几米到几十米不等,自西向东逐渐变薄,受张性正断层的错动。Ub为晚更新世沉积,主要是浅

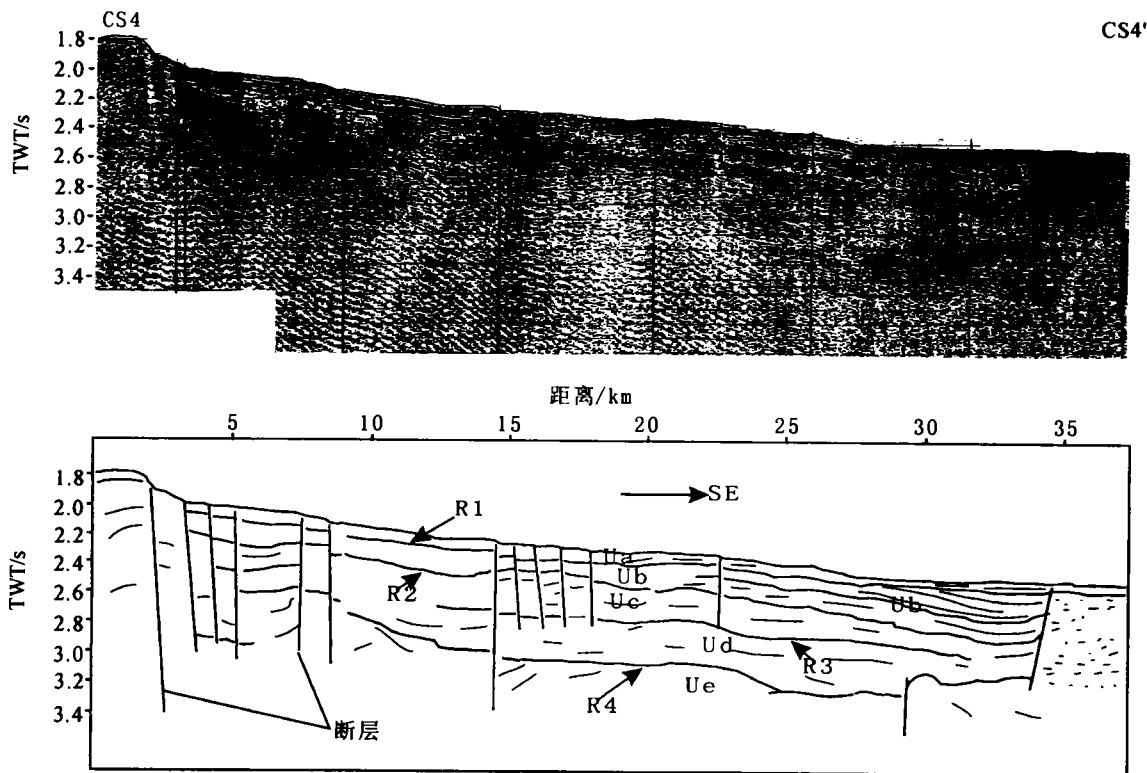


图2 单道地震剖面 CS4 揭示的地震层序

Fig.2 Seismic profile revealed by single channel profile(CS4 Profile)

TWT 表示双程时间,图 3-5、图 7-8 同

海相的三角洲沉积(陆坡上部)、浅海相陆源粉砂质泥和半深海相的软泥、凝灰软泥(海槽中部)。

地震层序 Uc 内部反射波振幅的强度较 Ub 强而较 Ua 弱,视中-高频,层内反射波的密度大,连续性较好。在陆坡的上部 Uc 为三角洲前积层,但从其位置上来说,比上部的三角洲更向西部的陆架靠近。陆坡的中部则由于多次波的干扰和断层的影响而无法确切识别 Uc 的顶底界面。在陆坡坡麓, Uc 为连续性好的强反射,受张性正断层的错动,层面微向陆倾斜,厚度在 200m(速度 $V = 2000\text{m/s}$)左右,自西向东逐渐变厚。Uc 为中更新世形成的陆屑海相沉积。

地震层序 Ud 具半透明声学相,厚层沉积,厚度在 340—460m(速度 $V = 2000\text{m/s}$)之间。层序内可鉴定出两个弱反射波,视低频,受掀斜断层错动,底界不连续分布,但反射强度大。陆坡的中部和上部由于多次波的影响无法识别该层。陆坡坡麓上, Ud 以弱反射为主,连续性不好,厚度稳定,但受断层的错动。该层为早更新世沉积的一套浅海相规则沉积砂页岩。

地震层序 Ue 未探明底界,厚层倾斜沉积层,受断裂掀斜作用强烈,倾角明显大于上部地层,呈角度不整合接触。有关海槽地层层序的研究表明(Kimura, 1985),海槽中新世—第四纪的地层在反射地震剖面上表现为受到强烈掀斜作用的倾斜层, Ue 具有上述地震反射特性,主要包含上新世的地层。

2.2 两种典型的斜坡相地震反射模式

地震剖面上可识别出两种典型的斜坡相地震反射模式:退覆和叠覆模式,这两种模式的反射结构截然不同,代表着斜坡的沉积环境或沉积作用是不同的,但两种模式都反映了冲绳海槽西部陆坡得到充足的沉积供给。下面将对两种模式的反射特征加以描述,因缺乏相应的钻孔资料,对其岩相只能作粗略的推断。

2.2.1 退覆斜坡相 退覆模式以斜交前积反射结构为主(图 3), Sangree 等(1976)称之为削蚀退覆,其特征是反射倾角靠近底部逐渐变小,反射可以变成微微倾斜的、平行的、发散的、或收敛的;反射的连续性不好,振幅由很强到中等。外部形状为楔状或透镜状,向上倾和下倾方向都逐渐尖灭。退覆斜坡

相与东海陆架推进的三角洲相联系,主要分布于冲绳海槽中段和北段。该模式中以陆源碎屑为主,斜交前积反射揭示其发育过程与相对海平面的下降有关,斜交前积反射经常有规律的被一些剥蚀面所分

开,这些剥蚀面可能代表了快速性的强制海退 (Posamentier *et al*, 1992)。退覆斜坡相代表了沉积物的持续供给大于沉降时的沉积作用 (Brown *et al*, 1976)。

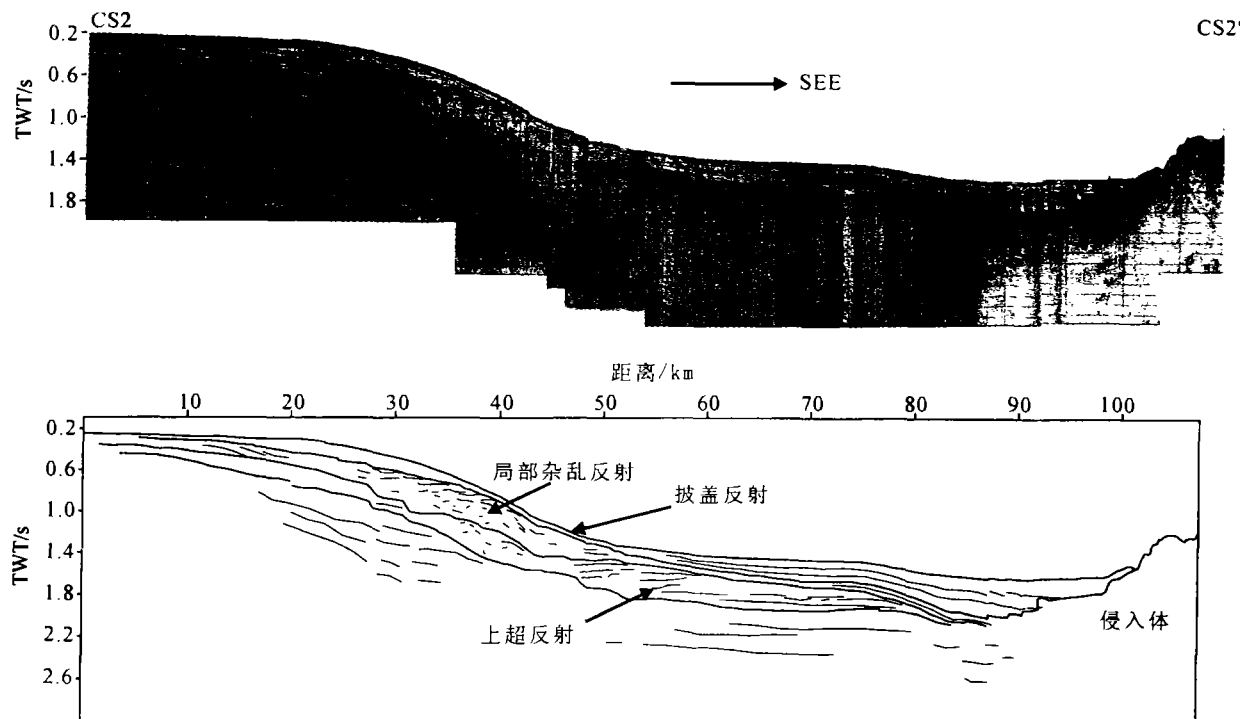


图3 斜坡地震相模式之一:退覆模式(CS2剖面)

Fig.3 Seismic facies of offlapping patterns (CS2 Profile)

2.2.2 叠覆斜坡相 叠覆模式特征是水平或平行或稍微倾斜反射,并且具有很好的连续性。地震反射对着盆地陡侧上超,盖在古水下凸起上面的为披盖反射,以中强振幅为主(图4)。叠覆模式的岩相可能与退覆模式的岩相相似,但由于构造的原因,细粒成分可能相对多一些。叠覆模式的斜坡相通常代表着强烈的构造活动 (Brown *et al*, 1980):断层或岩浆侵入(或火山)。这种模式主要出现于冲绳海槽的南段,与这里强烈而持续的构造活动有密切的关系。在叠覆模式中,陆坡沉降和沉积物供应保持相对平衡。

2.3 斜坡伴生沉积体系

Fisher 等(1967)把沉积体系定义为,从成因上由现实的(现代)或推断的(古代)沉积过程和沉积环境联系在一起的岩相的三维组合。沉积体系的基本单元是岩相,它是一个被沉积界面(或侵蚀面)所分开的三维的沉积物或沉积岩体。根据地震反射的形态和样式,进一步结合水动力条件和沉积环境等,在冲

绳海槽西部陆坡环境下解释出陆架边缘三角洲、重力流沉积、海底滑塌及水道(Channel)充填沉积等具有代表意义的沉积体系。这些沉积体系的空间组合在一定程度上揭示了西槽坡在构造活动、沉积物供应及海平面变化共同作用下的沉积环境。

2.3.1 陆架边缘三角洲 在上陆坡位置,三角洲通常与退覆斜坡相联系在一起,其内部具有复合S斜交型前积反射结构,层理清晰、连续性较好、振幅中强,局部呈现楔形半透明状。冲绳海槽中、北段,上陆坡的沉积层是由叠置的三角洲楔状体所组成,所有楔状体向陆架坡折方向前积。斜层理常有规律地被一些倾斜面所切断,这种斜面具有向下位移和斜层理下超的特征,这可能反映了海退时期沉积向盆地方向的推进。

2.3.2 重力流沉积 冲绳海槽西槽坡重力流沉积主要表现为3种形式:(1)沉积物重力蠕动(软弱沉积物在重力作用下发生变形),通常位于较陡的陆坡,沿着倾斜的海底面沉积物表现为波状起伏或不

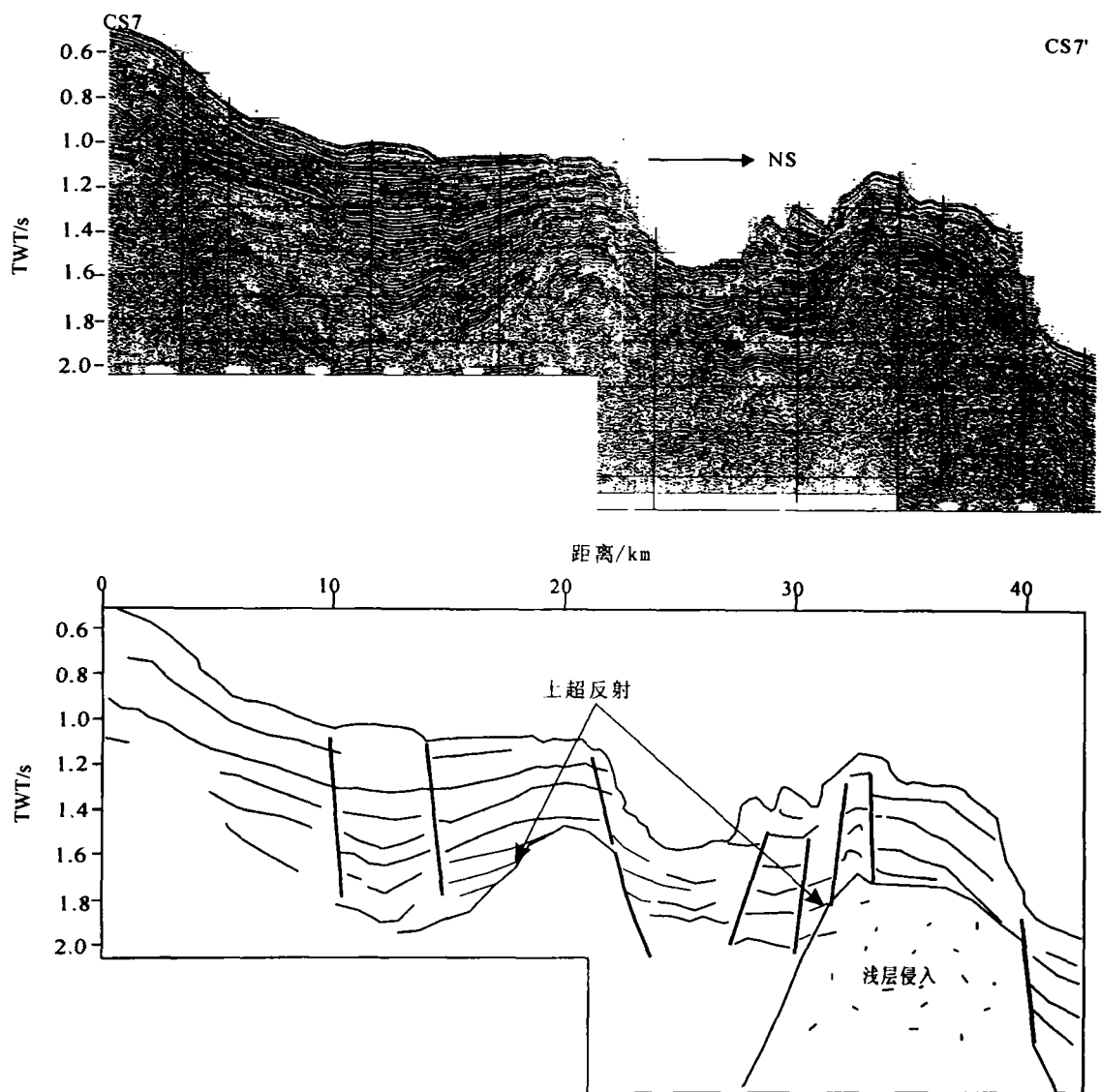


图4 斜坡地震相模式之二:叠覆模式(CS7剖面)

Fig.4 Seismic facies of uplapping patterns (CS7 Profile)

规则的中断;(2)斜坡碎屑流,表现为沿斜坡的一系列丘状沉积体,其内部为连续性较差的强反射;(3)浊流沉积,比较常见的是透镜状浊积体和层状的浊积平原,内部反射通常规则,发育于近槽底部位。

地震资料和柱状样都揭示,在 28°N 以南的槽坡重力流十分发育,而 28°N 以北相对较少,这种分布特征与陆坡地形、沉积物供应及地震、火山活动有关。

2.3.3 海底滑塌 在上陆坡断裂带部位,地形坡度突然变陡,并且上陆坡堆积了来自中国大陆的大量沉积物质,使得该部位海底滑塌十分发育。地震剖面上表现为海底的强相位突然变得不规则或断

开,具有丘状外形,滑块后壁沉积物突然终止,以倾斜、不连续、杂乱为反射特征。

2.3.4 水道充填沉积 地震资料和最新的多波束资料都表明,冲绳海槽西槽坡存在许多深浅不同、长短不一的海底水道(范奉鑫等,1998),这些水道在早期是陆架沉积物向海槽输送沉积物质的重要通道,随着沉积环境的改变,水道被沉积物充填。从现有的地震资料来看,水道充填沉积主要发现于冲绳海槽中段的北部,其位置约为 $127^{\circ}30' - 128^{\circ}\text{E}$ 、 29°N 。图5展示了3个被充填了的大型水道(或峡谷),中间的一条被地震剖面所揭示。水道沉积内呈连续性好的发散型强反射,层理比较清晰,横切海槽的剖面

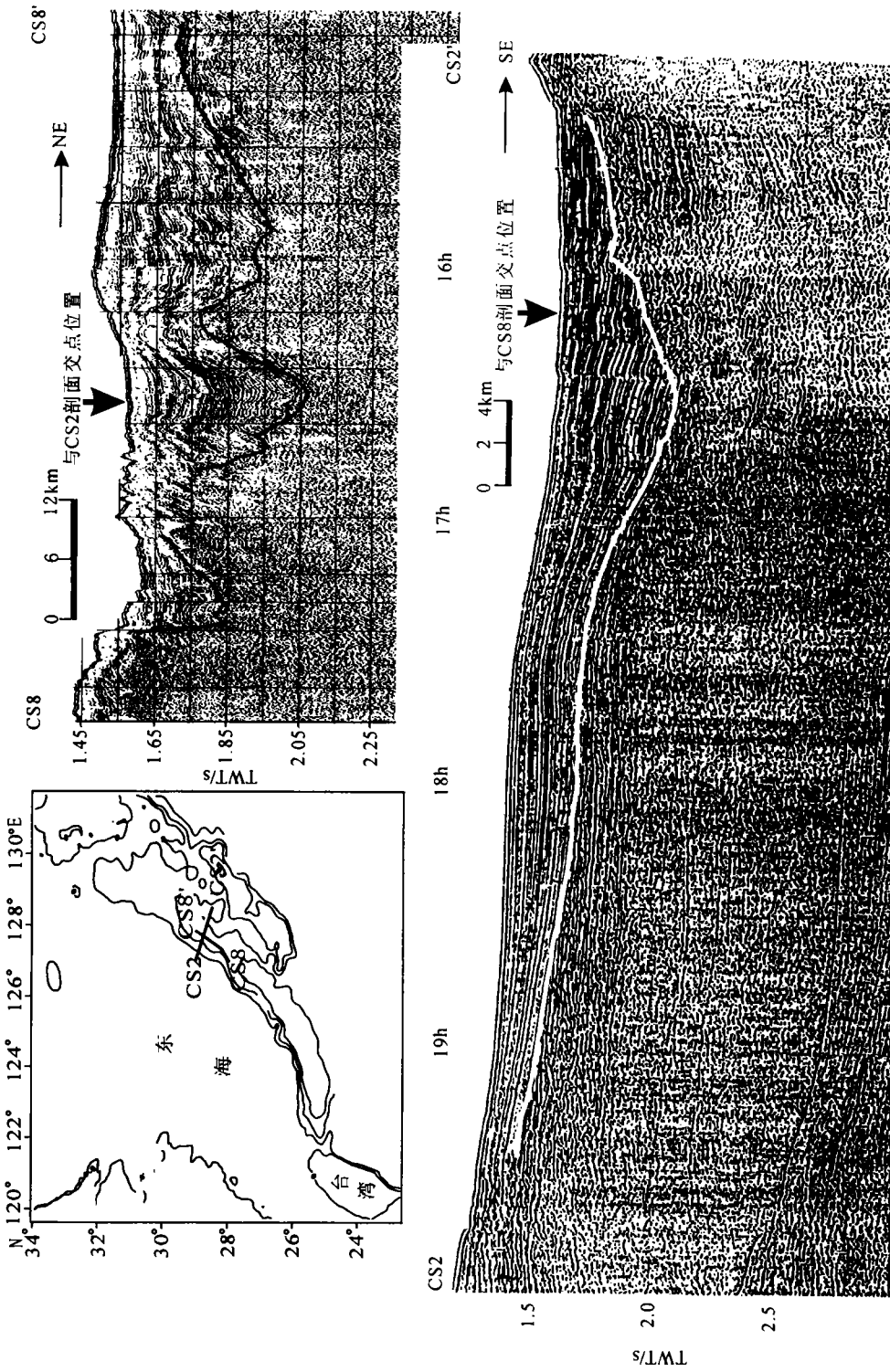


图 5 一条被沉积充填的大型水道(CS2 和 CS8 剖面)

Fig.5 Large channel filled with sediments(CS2 and CS8 Profile)

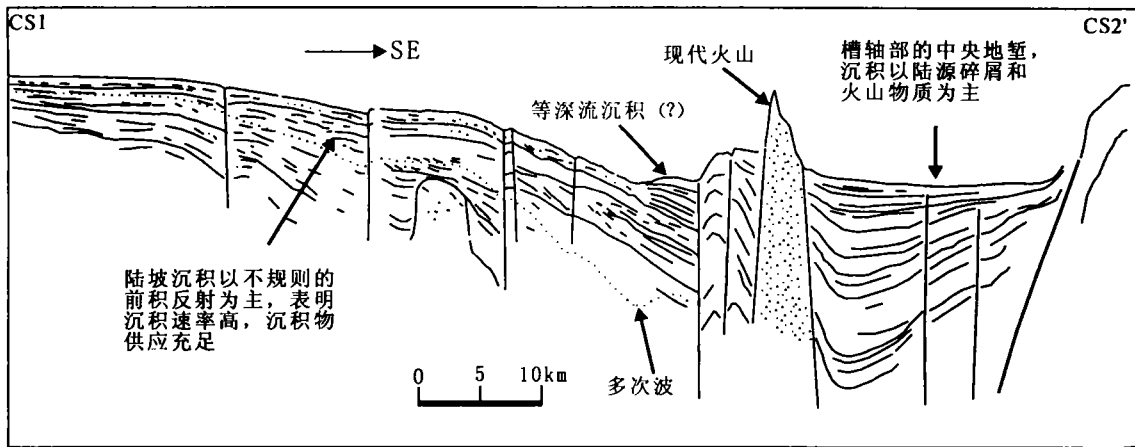


图6 冲绳海槽西部陆坡北段的沉积格架

Fig.6 Sedimentary framework in the west slope of the north segment of Okinawa Trough

上呈勺形,中间厚两边薄。沉积体的最大厚度大约在400m,长度约40km,宽度在7—10km左右。利用陆源石英百分比含量圈定出的平面形状为向海槽方向突出的舌状(李巍然等,2001)。

2.4 冲绳海槽西坡沉积特征

冲绳海槽陆坡沉积作用和过程受沉积物供应和构造活动控制明显,并由此形成不同的沉积格式。

2.4.1 北段沉积特征 冲绳海槽北段的沉积环境特征是坡度缓、沉积物充足以及构造活动相对较弱。古长江(或古黄河)向中国东部海域陆架输送了大量沉积物质(秦蕴珊等,1987;李凡等,1998;刘振夏等,2000),冲绳海槽北段陆坡接受了大量的陆源碎屑物质,加之构造和岩浆活动主要集中于海槽的裂谷中心,因而陆坡的坡度比较缓,沉积物质在陆坡上的分配相对均匀,滑塌与重力流现象相对较少(图6),前人通过岩芯资料的研究也表明了这一点(秦蕴珊等,1987;李巍然等,2001)。

2.4.2 中段沉积特征 冲绳海槽中段的沉积环境特征是坡度陡、沉积供应充足,并且构造、火山活动强烈。中段上陆坡陆架边缘三角洲发育十分完整(图7),使得陆坡下部沉积物供应相对不足。陆架边缘三角洲是由叠置的楔状体组成,所有楔状体向陆架坡折方向前积,斜层理具有下超特征,并有规律地被一些倾斜面切断;倾斜面向下位移反映了海退时期沉积向盆地推进和相对海平面的下降。陆坡断裂的强烈活动使三角洲下方存在着一个沉积物剧烈变形带,滑塌与重力流经常出现在变形带的下方。

在陆坡断裂带和冲绳海槽轴部活动带(表现为地堑和现代火山)之间,沉积层呈中间厚、两边薄的形态,且现代高角度的正断层切割了沉积层。

2.4.3 南段沉积特征 冲绳海槽南段的沉积特征是沉积物相对少、构造活动十分强烈。南段陆坡上部三角洲不发育,受陆坡断裂破碎带活动的影响,地层发生变形。由于陆坡上部沉积物相对较少,而使斜坡地震相以叠覆模式为主(图8)。陆坡处岩浆的侵入使得沉积层发生褶皱变形,而且造成了沉积物分布不均,在陆坡断裂带和海槽轴部裂谷之间的地层常被出露到海底的现代活动断层所切割。

2.5 对冲绳海槽西部陆坡性质的探讨

东海大陆边缘通常被认为是活动大陆边缘,但最新的地质地球物理调查资料表明,冲绳海槽西部陆坡可能属于一新生的被动陆缘。其证据如下:a)西部陆坡的下部发育有多不连续的断陷盆地,性质上为半地堑拉张盆地¹⁾;b)陆坡存在大量高角度张性正断层;c)地层由下部的浅海相到上部的半深海相,表明在拉张过程中随着地幔抬升地壳减薄而水深不断加大;d)轴部裂谷在构造性质上属于拉张成因的裂谷;e)无论地球物理场特征还是地壳结构上均可以与大西洋型陆缘对比¹⁾。冲绳海槽西部陆坡的沉积特征和地球物理特征都可与被动型陆缘对比,因而冲绳海槽西部陆坡随着海槽的扩张而转变为一个新的被动陆缘。

1) 国家海洋局第一海洋研究所,1995. 冲绳海槽中段构造特征. 150—201

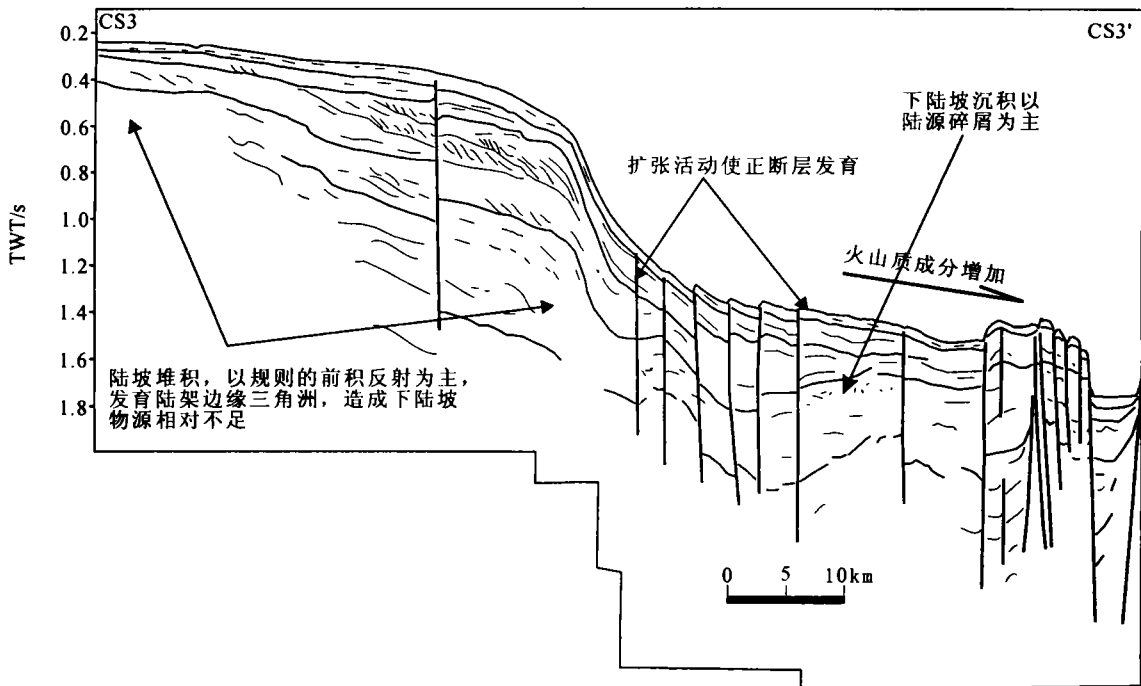


图 7 冲绳海槽西部陆坡中段的沉积格架

Fig.7 Sedimentary framework in the west slope of the central segment of Okinawa Trough

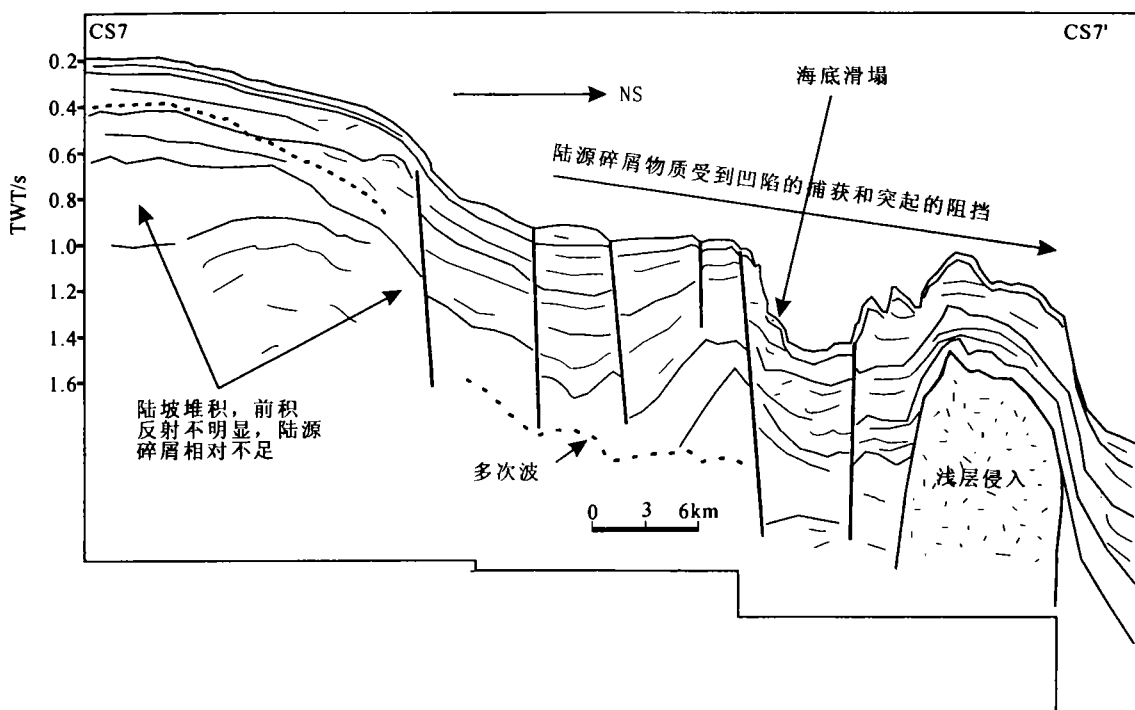


图 8 冲绳海槽西部陆坡的南段沉积格架

Fig.8 Sedimentary framework in the west slope of the south segment of Okinawa Trough

3 结论

通过单道地震资料对冲绳海槽西部陆坡地震相研究,主要得出以下认识:

(1) 单道地震剖面上可以划分出 5 套地震层序,分别代表了全新世,晚更新世,中更新世,早更新世,上新世、前上新世的沉积,上述层序均受到不同程度的变形、错动。

(2) 冲绳海槽西部陆坡存在两种斜坡地震反射相模式:退覆斜坡相和叠覆斜坡相,反映了冲绳海槽西部陆坡得到充足的沉积供给。

(3) 冲绳海槽西部陆坡南、中、北三段的沉积发育演化存有差异,并各自具有不同的沉积环境特征:北段以坡度缓、沉积物供应丰富、构造相对不活跃为特征;中段以坡度陡、沉积物供应充足、构造活动强烈为特征;南段以坡度陡、沉积供应相对较少、构造和火山活动十分强烈为特征。

(4) 西部陆坡接受了来自东海陆架的大量碎屑沉积物质。

参 考 文 献

- 孙荣涛,李铁刚,向荣,2003. 冲绳海槽北部表层沉积物中浮游有孔虫的分布与海洋环境. 海洋与湖沼,34(5): 511—518
- 李铁刚,阎军,苍树溪,1996. 冲绳海槽北部 R-d82 和 Rd-86 孔氧同位素记录及其古环境分析. 海洋地质与第四纪地质,16(2):57—63
- 李凡,张秀荣,唐宝钰著,1998. 黄海埋藏古河道及灾害地质图籍. 济南:济南出版社,117—123
- 李巍然,杨作升,王琦等,2001. 冲绳海槽陆源碎屑峡谷通道搬运与海底扇沉积. 海洋与湖沼,32(4):371—380
- 李培英,王永吉,刘振夏,1999. 冲绳海槽年代地层与沉积速率. 中国科学,29(1):52—55
- 刘振夏,Berne, S., 2000. 东海陆架的古河道和古三角洲. 海洋地质与第四纪地质,20(1):9—14
- 向荣,李铁刚,杨作升等,2003. 冲绳海槽北部表层沉积物中底栖有孔虫分布与海洋环境. 海洋与湖沼,34(6): 671—682
- 孟宪伟,王永吉,吕成功,1997. 冲绳海槽中段沉积地球化学分区及其物源示踪意义. 海洋地质与第四纪地质,17(3):37—43
- 吴明清,王贤觉,1988. 冲绳海槽化学成分特征及其地质意义. 海洋与湖沼,19(6):593—598
- 吴明清,王贤觉,1991. 东海沉积物的稀土和微量元素. 地球化学,1:40—46
- 郑铁民,徐善民,徐志明,1989. 冲绳海槽表层沉积物沉积特

- 征的初步研究. 海洋与湖沼,20(1):113—121
- 金翔龙主编,1992. 东海海洋地质. 北京:海洋出版社,123—218
- 范奉鑫,林美华,1998. 东海北部陆架外缘的边缘沟、坎. 海洋学报,3:53—56
- 赵一阳,何丽娟,张秀莲等,1984. 冲绳海槽沉积物地球化学的基本特征. 海洋与湖沼,15(4):371—379
- 秦蕴珊,赵一阳,陈丽容,赵松龄,1987. 东海地质. 北京:科学出版社,125—134
- 高金耀,李家彪,林长松,2002. 南冲绳海槽岩石圈构造动力作用机制探讨. 海洋与湖沼,33(4):349—355
- 曹奇原,苍树溪,李铁刚,2002. 冲绳海槽北部表层沉积物中的钙质超微化石及其环境特征. 海洋与湖沼,33(6): 600—607
- 曾志刚,翟世奎,杜安道,2003. 冲绳海槽 Jade 热液区海底块状硫化物的 Os 同位素组成. 海洋与湖沼,34(4): 406—413
- 韩喜球,马维林,金翔龙等,2002. 冲绳海槽南部玄武岩中的流体包裹体成分及其意义. 海洋与湖沼,33(1):42—46
- Brown L F, Fisher W L, 1980. 沉积层序的地震地层学解释:巴西断裂和拉张盆地的实例. 见:佩顿 E C 主编. 地震地层学. 北京:石油工业出版社,153—186
- Chen C H, Lee T, Shieh Y N *et al*, 1995. Magmatism at the onset of back-arc basin spreading in the Okinawa Trough. J Volcan Geotherm Res, 69: 313—322
- Fisher W L, McGowen J H, 1967. Depositional systems in the Wilcom Group of Texas and their relationship to occurrence of oil and gas: Gulf Coast Assoc. Geol Soc's Trans, 17:105—125
- Huhs S, Yi H-I, Beme S *et al*, 1999. High-resolution sequence stratigraphy in the East China Sea. In: IOCAC ed. Fourth International Conference on Asian Marine Geology (Abstract). Beijing: Ocean Press, 47
- Katsumi Marumo I, K' eiko Hattori H, 1999. Seafloor hydrothermal clay alteration at Jade in the back-arc Okinawa Trough: Mineralogy, geochemistry and isotope characteristics. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(18): 2785—2790
- Kimura, 1985. Back-arc rifting in the Okinawa Trough. Marine and Petroleum Geology, 2:224—240
- Letouzey J, Kimura M, 1985. Okinawa Trough genesis: structure and evolution of back-arc basin development in a continent. Mar Pet Geol, 2: 111—128
- Nagumo S, Kinoshita H, Kasahara J *et al*, 1986. Report on DELP1984 Cruises in the middle Okinawa Trough-2: seismic structural studies. Bull Earth Res Inst Univ Tokyo, 61:167—202
- Park J-O, Hidekzu Tokuyama, Masanao Shinohara *et al*, 1998. Seismic record of tectonic evolution and backarc rifting in the Southern Ryukyu island arc system. Tectonophysics, 294:21—42

- Posamentier H W, Allen G P, James D P *et al*, 1992. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples and exploration significance. *AAPG Bulletin*, 76: 1687—1709
- Sangree J B, Widmier J M, 1976. Recognition of continental slope seismic faces, offshore Texas Louisiana. In: Bouma A H, Moore G T, Coleman J M ed. *Beyond the Shelf Break: AAPG Marine Geology Comm. Short Course, V.2: F10—F54*

SEISMIC REFLECTION FACIES AND DEPOSIT SYSTEMS IN THE WEST SLOPE OF THE OKINAWA TROUGH

LI Xi-Shuang, LIU Bao-Hua, WU Jin-Long, ZHAO Yue-Xia[†], WANG Kui-Yang

(*First institute of Oceanography, State Oceanography Administration, Qingdao, 266061*)

[†](*Ocean University of China, Qingdao, 266003*)

Abstract The Okinawa Trough is an active back-arc basin. In order to better understand the character, development and evolution of this trough, deposit systems and deposit processes in the slope, were analyzed and interpreted using 2000 line-km high-resolution single channel seismic reflection profiles (collected from cruises in 1995 and 1999). Studies have shown that Pre-Pliocene and Pliocene-Holocene strata had been distorted by normal faults. New data refutes the viewpoint that modern sediments have not been distorted. Two seismic reflection models were identified in the west slope of the Okinawa Trough: offlapping and uplapping. Results from both infer the west slope has rich sediment supply. Dominant depositional systems in the west slope include continental margin delta, gravity flow deposits and channel (or canyon)-filled deposits. Three depositional frameworks were summarized in the west slope of the Okinawa Trough corresponding to three depositional environments: a) slow slope, rich sediment supply with poor tectonic movements in the northern segment; b) steep morphology, rich sediment supply with violent tectonic movements in the middle segment; c) steep morphology, poor sediment supply with violent tectonic movements in the southern segment.

Key words Okinawa Trough, Seismic sequence, Seismic facies, Depositional system