

菲律宾海钱洲深海峡谷沉积作用与发育演化

吴时国^① 坂本泉^②(①中国科学院海洋研究所地质与地球物理室, 青岛 266071; ②日本海洋科学技术中心 OD21 准备室, 横须贺 237-0061, 日本.
E-mail: swu@ms.qdio.ac.cn)

摘要 根据高分辨率多波束探测和载人深潜器 Shinkai6500 直接观察, 钱洲深海峡谷表层沉积过程与其他大型深海峡谷相同的特征。钱洲海槽上段遭受剥蚀或见有少量沉积, 中、下段则以浊流和碎屑流沉积为特征。在斜坡下部发现涌水低温动物群、活动断裂和流体活动。钱洲海槽垂向沉积层序的变化包括四国盆地扩张后的4个沉积层序, 其中上部层序 A 和 B 是浊流沉积。然而, 深海峡谷的演化则与构造极为密切。上段深切谷与南北向的剪切断裂有关, 东西向扇道则与东西向剪切断裂有关。而海槽轴向水道发育则与盆地中央的沉降有关。

关键词 深海峡谷 沉积作用 载人深潜 多波束测深 菲律宾海

深海峡谷是沉积物由大陆到海洋的搬运通道^[1]。世界上大多数深海峡谷与大河口相连^[2~4]。然而, 钱洲深海峡谷却发育于火山岩背景——伊豆小笠原岛弧, 具有十分独特的沉积和演化特征(图1)。伊豆小笠原岛弧是一个十分活跃的构造活动带。上新世以来强烈隆升导致钱洲海槽中沉积物质显著增加, 大量的火山碎屑通过钱洲深海峡谷搬运到钱洲海槽^[5]。

到目前为止, 我们对深海底的动力沉积过程知之甚少, 对深海峡谷的动力过程更是如此。如今, 随着海洋高科技的发展, 如高分辨率多波束水深探测和载人深潜器技术的发展, 使得我们探索深海过程成为可能。Shinkai6500 载人深潜器是目前世界上最先进的深潜系统, 最大深度可达 6517 m, 在当今海洋资源与环境调查中担当重要的角色。本文根据两个研究航次(YK99-09 Leg02 和 YK00-06 Leg01)的多波束测深和 3 次 Shinkai6500 潜航(第 371, 399 和 523 次)观测资料, 其中包括作者本人在 1999 年 11 月 3 日利用 Shinkai6500 对钱洲海槽西侧的第 523 次潜航观测资料^[6], 探讨深海峡谷的沉积过程与发育演化。

1 深海峡谷的地形地貌特征

从多波束水深资料看, 该峡谷明显分为 3 段: 即钱洲深切谷、东西向扇道和钱洲海槽轴向扇道。钱洲深海峡谷各段具有不同的地形地貌特征。

上段钱洲深切谷, 分布在 33° 40' N, 深切伊豆小笠原岛弧(图 1)。峡谷的头部起源于神津岛附近, 水深小于 1000 m, 表现是十分狭窄的沟谷, 宽约 1~2 km, 谷高 10~750 m(图 2(a), (b)), 平均坡度 2°, 其中头部遭受剥蚀, 近在断裂下降盘见有少量的沉积物。

中段东西向扇道, 在 33° 40' N 钱洲深海峡谷突然改变方向, 转向西流, 呈东西向延伸, 且峡谷开始变宽, 我们称之为扇道, 平均坡度 1.2°。见有沉积物, 小型浊积扇广泛分布在其末端。

下段轴向扇道, 发育在钱洲海槽轴部, 扇道清晰可辨, 呈北东 43° 延伸 40 余公里, 仅在钱洲角海山处分支, 并改变方向。谷道深 40~50 m, 宽 500~1000 m(图 2(c), (d)), 谷地坡度较中、上段相比已经大大平缓, 并最终消失在钱洲海槽。

2 沉积作用过程

2.1 表层沉积过程——载人深潜观测

深海峡谷上、中、下段的表层沉积过程差异十分明显。上段深切谷遭受剥蚀或少见沉积, 中段扇道见有大量浊流沉积和碎屑流沉积。由于底层水流强而形成明显的底形。下段轴向水道及钱洲海槽则以浊流和碎屑流沉积为特征。根据潜航和多波束精确水深资料, 轴向扇道分布区主要有 3 种沉积类型(图 3):

第 1 种类型是浊流沉积物, 依其固结程度, 又可划分两类。年轻的浊流沉积为河道——冲溢扇体系, 分布在钱洲海槽底部, 并向海槽中央增厚, 为晚更新世砂、泥沉积物。由于近现代火山源区沉积物中火山物质甚多, 如氟石、玄武岩等岩石碎屑, 这些物质大多通过钱洲海底谷搬运到该区沉积下来, 属河道-冲溢扇或海槽充填体系。第 371 次潜航始于钱洲峡谷轴向扇道。沉积物砂坡等沉积构造见于这次潜航(CAM2, 时间 11:59:37)。潜航发现很强的底层水流, 速度通常大于每小时 1 海里(= 1852 m), 以致于

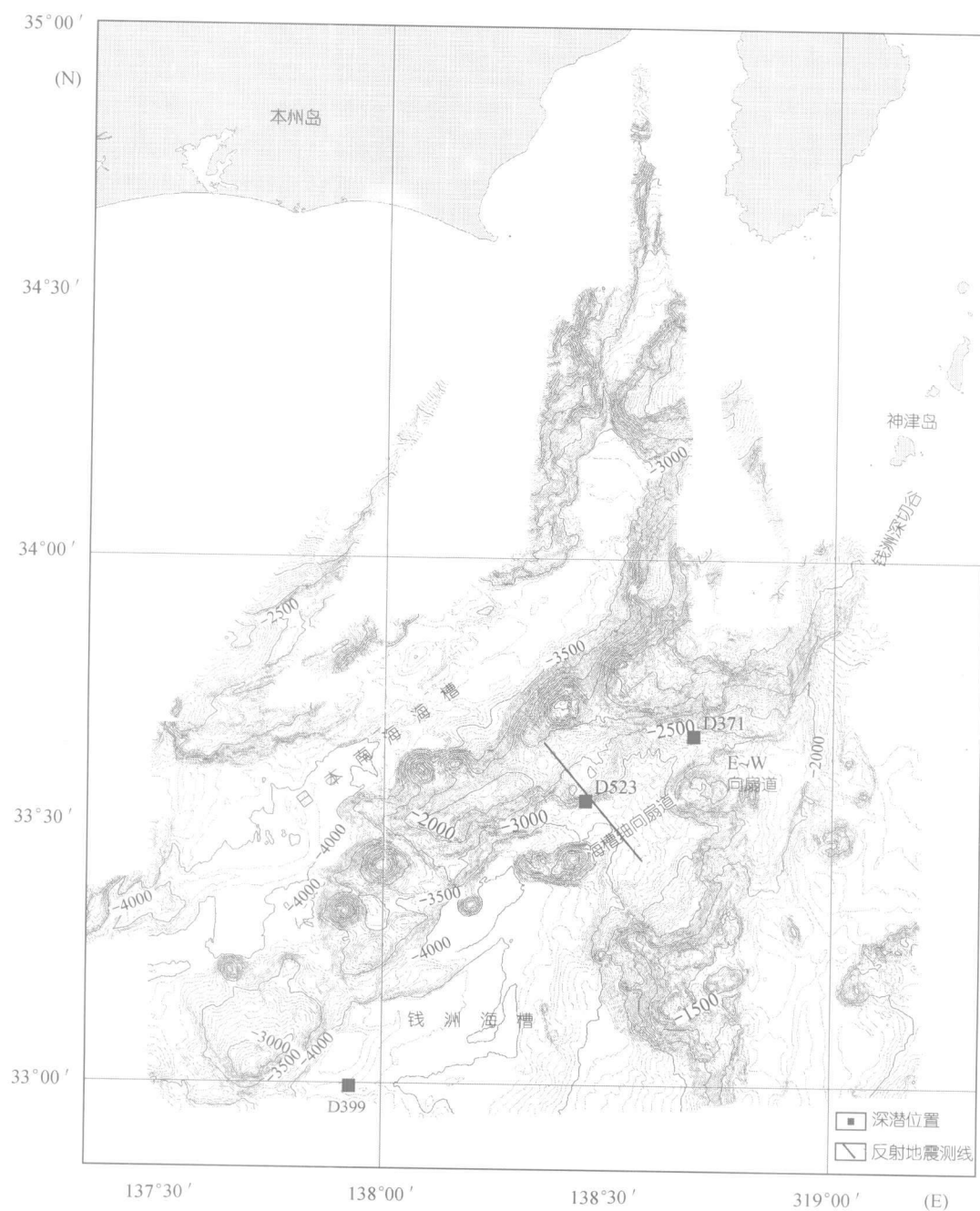


图1 菲律宾海钱洲海岭多波束水深图
粗线代表反射地震测线位置, 黑方点表示潜航位置

Shinkai6500 载人深潜器很难航行. 在潜航过程中发现大量的浑浊体. 这种大量的浑浊体在第399次也见到, 能见度极低, 系由湍流所致.

时代较老的浊流沉积为半固结沉积物, 在钱洲海槽周缘的斜坡及海山区, 为我们第523次潜航所观测. 岩层中粒序层理和波状层理十分发育, 多为细粒

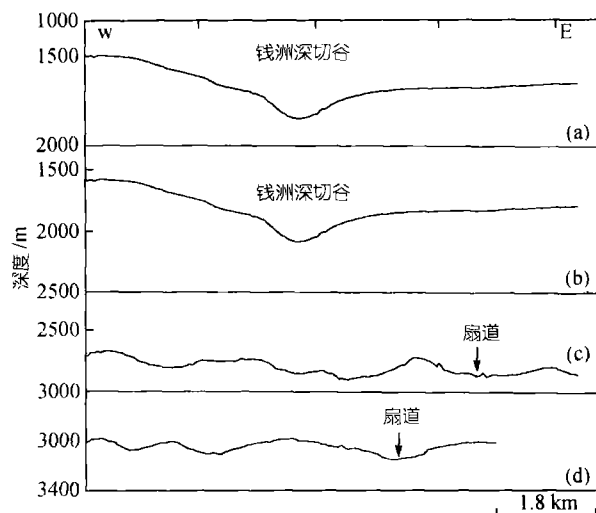


图2 钱洲深海峡谷水深横剖面图

浊积岩, 推测为外扇沉积物。

第2种是碎屑流沉积物, 分布在钱洲峡谷两侧的斜坡坡脚。这种碎屑流沉积物在第523次潜航过程中发现其沿坡脚呈狭窄带状分布, 但向西南, 我们从多波速水深图(图3)识别一个大约25 km²水下滑坡和大量碎屑流沉积。见有完好的构造发育, 包括尾部的断阶、滑体和泥石流。此外, 碎屑流沉积物广泛见于钱洲海槽, 因此碎屑流在深水沉积过程中扮演重要

的角色。

第3种类型现代半深海火山灰和生物沉积物。特别是发现深海生物群落。在近陡坡处平坦海底见大量碎屑流角砾岩。在200 m长的碎屑流锥体发现少量生物壳体, *Calypptogena* sp. 这种底栖生物群是化学合成生物群落, 存在低温、低硫化物和高CH₄浓度的地质环境。这些涌水低温动物群在日本南海海槽通常沿逆冲断裂带分布, 反映了地下流体活动^[7-9]。

2.2 沉积层序垂向变化

在钱洲海槽西侧的海岭, 称之为钱洲海岭^[6], 两者之间是一条逆冲断裂带^[6-10]。断层西侧基底抬升至2000 m埋深, 而逆冲断层东侧, 埋深可达5000 m厚层的浊流体系或碎屑流沉积覆盖在基底上, 无论盖层和声学基底较四国盆地增厚, 属过渡型地壳^[11]。根据地震剖面的声学特征和区域地层学研究, 在声学基底上发育4个层序(层序A、B、C和D, 图4), 自上而下包括:

层序A, 分布在钱洲海槽内, 具有低能、可变的振幅和相对连续的反射层, 代表第四系的河道——充溢扇体系^[4]。

层序B, 具有相对连续的、弱振幅反射层, 厚度变化在500~800 m左右, 由半固结浊流沉积物组成。在第523次潜航中弱固结泥岩、粉砂岩出露在斜坡上,

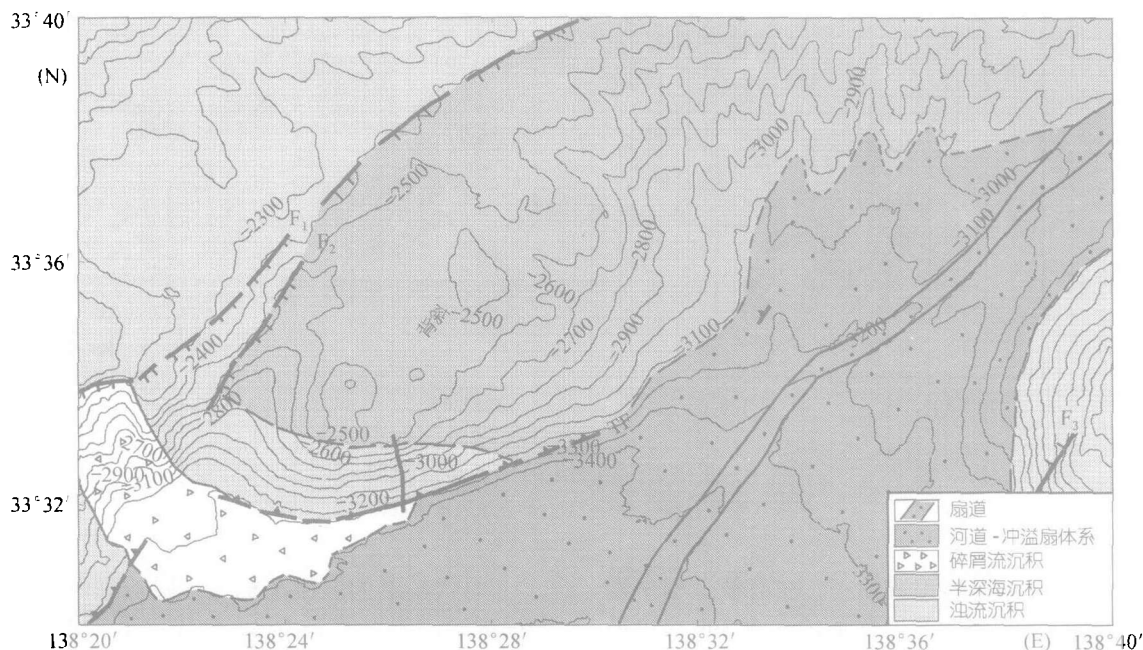


图3 多波束水深和沉积类型分布

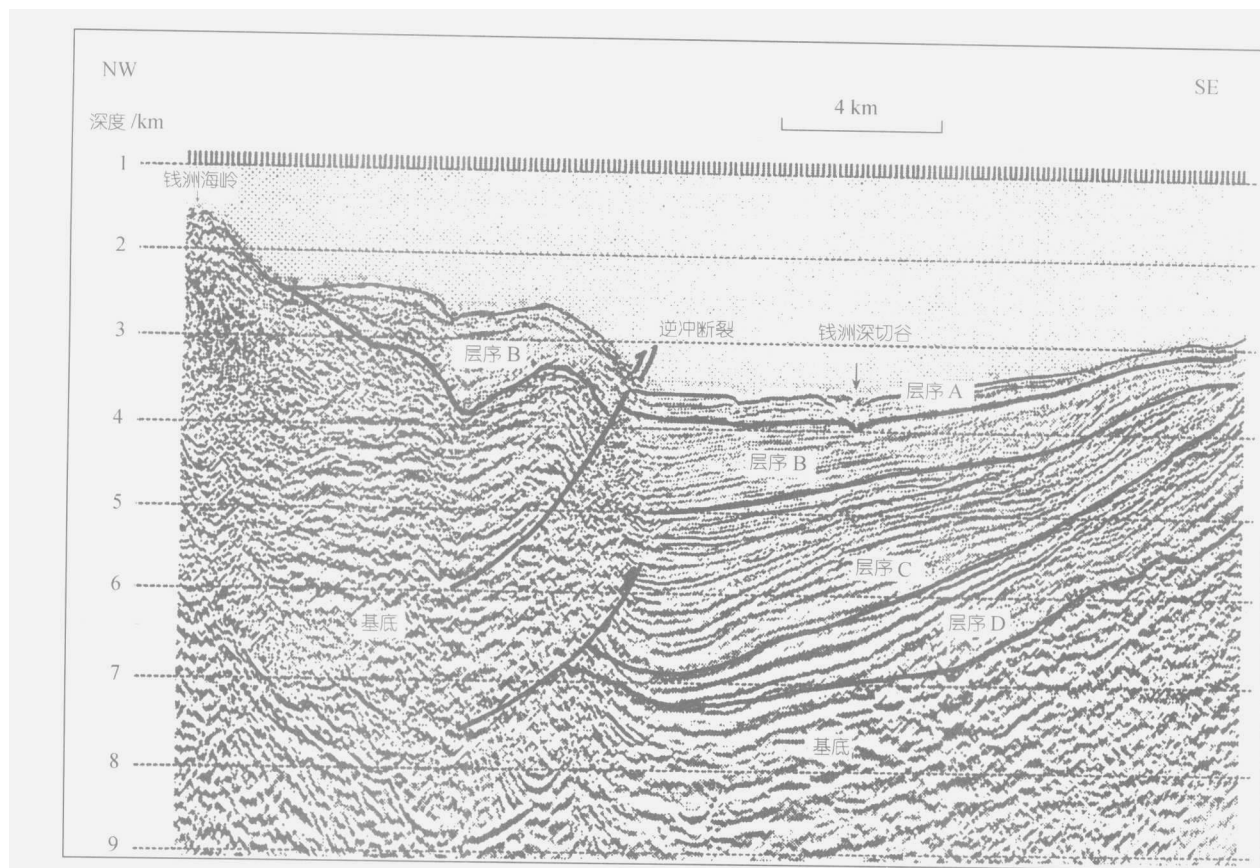


图4 反射地震剖面 NT96-103(深度剖面)(剖面位置如图1所示)

利用深潜所获样品大多数为泥岩, 以及少量砂岩。密集性节理在露头上或手标本均有发现, 节理玫瑰图^[6]显示4组优势方向, 分别是 85° 、 296° 、 232° 和 356° 。无论是手标本还是露头, 该处岩层极为破碎, 该层序相当于四国盆地的上部层序, 时代属于上新世和早更新世^[4]。

层序 C, 具有连续、平行的反射、中等能量和振幅, 在地震剖面 NT96-103 上厚度近 3000 m。根据日本南海海槽西部 ODP808C 孔资料^[4,12], 它对应于四国盆地下部沉积层序, 由互层的浊积层和半深海沉积组成。

层序 D, 不连续反射和不稳定厚度、弱到强振幅, 与伊豆小笠原岛弧邻接, 并向岛弧方向增厚, 推测是来自该火山弧背景的碎屑流沉积^[4], 是近源火山碎屑沉积。

沉积层序 B 的年代主要依据生物地层和区域对比推断。在生物地层含有大量的钙质超微化石, 如第 523 次潜航样品 6K523R1 中包括: *Discoaster brouweri*, *Pseudoemiliana lacunosa*, *Reticulofenestra doricoides*; 样品 6K523R3 中发现 *Discoaster asymmetricus*, *Disco-*

ster brouweri, *Discoaster pentaradiatus*, *Discoaster surculus*, *Discoaster tamales*, *Pseudoemiliana lacunosa*, *Reticulofenestra pseudoumbilica* etc.; 样品 6K523R4 中发现 *Ceratolithus rugosus*, *Discoaster asymmetricus*, *Discoaster brouweri*, *Discoaster pentaradiatus*, *Discoaster surculus*, *Pseudoemiliana lacunosa*, *D. asymmetricus* 最早出现在 4.1 Ma, 通常作为 NN13/14 的界限。据日本南海海槽 ODP808 钻孔资料, *Discoaster brouweri* 的上限层位在 NN16 上部, 约 1.89 Ma^[13]。上述化石组合可与 Okuda 等人^[14]的 CN11b-CN12a 亚带比较, 代表年龄为 4.16~2.65 Ma。由于 *D. tamales* 的绝灭年代上限是 2.65 Ma, 所以, 层序时代推断是 4.16~2.65 Ma。由于浊流沉积的复杂性, 其时代可能更晚。层序 C 和 D 年代应是扩张后的四国盆地沉积(22 Ma 以来)。

3 构造与深海峡谷的发育演化

世界上许多大型峡谷发育演化与全球海平面变化和沉积物供应有关^[3,15], 而钱洲深海峡谷的发育与地震作用和火山活动密切相关。火山活动提供了浊流物源, 地震成为浊流的诱发机制。

上段深切谷沿北南向断层发育,在多波速水深图上表现为陡坎、平直延伸(图3),断面陡倾,控制盆地沉积边界。据区域应力场分析,最大剪应力方向与断裂走向基本相同^[9],具有剪切断裂特征,因此,河道也表现为非常平直。

中段的突然转向是东西向断裂所致,东西向断裂是四国盆地和伊豆小笠原火山岛弧的构造分界线,除明显的地形地貌特征(图1)外,火山岩成分、地壳结构都明显不同。根据深潜和拖网样品研究结果, Sakamoto 等人^[16]认为分布在 33° 20'~33° 40'N 之间的火山岩,既不是典型的岛弧火山岩,也不是典型的大洋中脊火山岩,属于过渡型地壳。据 K-Ar 法测定年龄值,这是上新世火山岩,最年轻的值是 2.03 Ma。

下段的构造控制虽不如上、中段直接,但仍旧十分明显。在海槽西侧潜航中发现北东东至南西西向逆冲断层^[6~10],这一活动断层存在的主要证据包括:(1)陡峭的地形或断层崖;(2)倾斜的地层;(3)破碎的岩层;(4)密集的节理;(5)伴生的背斜构造;(6)低温涌水生物群落 *Vesicomyidae* sp. 的存在。

多波束水深和潜航观测揭示了断层的表层几何特征,反射地震方法揭示了深部的断面形态。反射地震剖面 NT96-103(图4)是一条穿过钱洲海槽的北西至南东向剖面。断层上盘是明显抬升的声学基底和上覆的沉积层序(层序 B, C),上升盘的强反射层显示明显的背斜构造,顶部的亮反射层也显示中等强度的褶皱。断层下盘是钱洲海槽,随着钱洲海岭的强烈隆升,在其边缘造成盆地沉降,海底谷逐渐向东迁移,并沿沉降中心形成海槽轴部扇道。类型的构造现象, Catuneanu 等人^[17]对其进行了详细地构造模拟和理论分析。

4 结论

钱洲海底峡谷明显分为3段,即钱洲深切谷、东西向扇道和轴向扇道。上段深切谷以剥蚀和少量沉积为主,而在中、下段则以浊流和碎屑流沉积为主。在载人潜航中发现了海底浑浊体、流体活动和涌水低温动物群, *Vesicomyidae* sp. 反射地震剖面 NT96-103 揭示钱洲海槽垂向沉积层序变化(层序 A, B, C, D),沉积层厚度较四国盆地明显增厚,其中浊流沉积层序包括层序 A 和 B。

钱洲深海峡谷的发育演化与海底受构造和地形控制。钱洲海底峡谷上段深切谷与南北向的剪切断裂有关,而东西向扇道则与东西向断裂有关。海槽轴向水道则平行于新生俯冲带,与盆地中央的沉降有关。

致谢 作者感谢日本海洋科学技术中心 Shinkai6500 载人深潜器和支援母船 Yokosuka 的船长和船员队伍。本工作受国家重点基础研究发展规划(G2000047604)和中国国家海洋局海底科学实验室基金资助。

参 考 文 献

- 1 Carter R M. The nature and evolution of deep-sea channel system. *Basin Research*, 1988, 1: 41~54
- 2 Clark J D, Pickering K T. Architectural elements and growth patterns of submarine channels: Application to hydrocarbon exploration. *AAPG Bulletin*, 1993, 80: 194~221
- 3 Damuth J R, Flood R G, Kowsmann R O, et al. Anatomy and growth pattern of Amazon Deep-sea fan as revealed by long range side-scan sonar and high resolution seismic studies. *AAPG Bulletin*, 1988, 72: 885~911
- 4 Pickering K T, Underwood M B, Taira A. Open-ocean to trench turbidity-current flow in the Nankai Trough: Flow collapse and flow reflection. In: Hill I A, Taira A, Firth J V, et al. eds. *Proceeding of the Ocean Drilling Program. Scientific Results: College Station, TX*, 1993, 131: 35~43
- 5 Soh W, Nakayama K, Kimura T. Arc-arc collision in the Izu collision zone, central Japan, deduced from the Ashigara Basin and adjacent Tanzawa Mountains. *The Island Arc*, 1998, 7: 300~341
- 6 Wu S, Sakamoto I, Horiuchi S, et al. Sedimentation and deformation in the adolescent subduction zone, south flank of Zenisu Ridge, northern Philippine Sea revealed by manned submersible and seismic data. *JAMSTEC J Deep Sea Res*, 2000, 17: 53~64
- 7 Le Pichon X, Iiyama T, Boutegue J, et al. Nankai Trough and Zenisu Ridge: A deep-sea submersible survey. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 87: 285~299
- 8 Le Pichon X, Kobayashi K, Kaiko-Nankai Scientific Crew. Fluid venting activity within the eastern Nankai Trough accretionary wedge: A summary of the Kaiko-Nankai results. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 109: 303~318
- 9 Lallemant S, Chamot-Rooke N, Le Pichon X, et al. Zenisu Ridge: A deep intraoceanic thrust related to subduction, off Southwest Japan. *Tectonophysics*, 1989, 160: 151~174
- 10 Tokuyama H, Ashi J, Soh W, et al. *Active Submarine Faults off Tokai*. Tokyo: University of Tokyo Press, 1998. 1~151
- 11 Nakanishi A, Shiobara H, Hino R, et al. Detailed subduction structure across the eastern Nankai Trough obtained from ocean bottom seismographic profiles. *J Geophys Res*, 1998, 103: 27151~27168
- 12 Moore G F, Shipley T H, Stoffa P L, et al. Structure of the Nankai Trough accretionary zone from multichannel seismic reflection data. *J Geophys Res*, 1990, 95: 8753~8765
- 13 Olafsson G. Calcareous nannofossil biostratigraphy of the Nankai Trough. In: Hill I A, Taira A, Firth J V, et al. *Proc ODP, Scientific Result: College Station, TX*, 1993, 131: 3~13
- 14 Okuda H, Bukry D. Supplementary modification and introduction of code number to the low-latitude coccolith Biostratigraphic zonation. *Marine Micropalaeontology*, 1980, 5: 321~325
- 15 Reading H G. *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. 3rd ed. Oxford: Blackwell Science, 1996. 418~446
- 16 Sakamoto I, Wu S, Misawa Y, et al. Characteristics of topography and geology around the central part of Zenisu Ridge, off central Japan-Preliminary report of 'Dorphan 3K' and 'Shinkai 6500' dive cruises. *EOS Transaction Supplement*, 2000, 8(22): 183
- 17 Catuneanu O, Beaumont C, Waschbusch P. Interplay of static loads and subduction dynamics in the foreland basins: Reciprocal stratigraphies and the missing peripheral bulge. *Geology*, 1997, 25: 1087~1090

(2001-09-30 收稿, 2001-12-14 收修改稿)