

深水峡谷体系研究现状及其地质意义

毛凯楠, 解习农

(中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074)

摘要:深水峡谷广泛发育于大陆边缘,是沉积物由浅水到深水搬运的重要通道。近年来,深水峡谷研究成为当前深水沉积研究的热点之一。综合利用旁侧扫描声纳、海底锚系、地震技术和深水钻探等技术手段,在深水峡谷体系研究方面取得了丰硕的成果。其突出进展包括:从地貌学的角度对峡谷的形态学进行了精细描述;利用深海观测技术对现代峡谷沉积进行了原位观测;通过物理和数值模拟等技术再现了峡谷的沉积演化过程;从沉积学的角度对峡谷内部构成进行了精细分析,总结了沉积充填演化及沉积模式、探讨了峡谷成因等。深水峡谷作为深海区重要的沉积体系之一,一方面通过对深水峡谷中充填沉积物的分析能够提供丰富的古气候、海平面变化和区域构造演化史的信息;另一方面深水峡谷也是深水油气储层发育的重要场所之一,对深水油气勘探具有重要指导意义。

关键词:深水峡谷;峡谷形态;沉积模式;原位观测;物理和数值模拟;峡谷成因

中图分类号: P512.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7849(2014)02-0021-07

深水峡谷是海底长条形且窄而深的负地形,是深水区常见的沉积体系类型。在主动和被动大陆边缘以及岛弧附近都有出现,横剖面上常显示为U型和V型2种形态^[1-3]。峡谷沉积充填包括浊流、块体流、深海底流、潮汐流等沉积物,峡谷演化往往经历了侵蚀、过路不沉积、充填等演化过程^[4-7]。它不仅是沉积物向深海搬运的主要通道^[8-10],还是深海粗粒碎屑沉积的主要场所^[4-5,11]。研究者们对深水峡谷的重视,一方面是由于大型海底峡谷记录了丰富的古气候、海平面变化和区域构造演化史信息^[12-16];另一方面也因为它常常是深水油气的重要储层^[16-18]。

深水峡谷目前主要分为两大类:有头型和无头型。前者主要发育于沉积物供给充足的陆架陆坡上,峡谷头部一般有大型河流的沉积物源的充足供给,其中有些峡谷头部与河流三角洲有直接联系,而有些峡谷的头部却与河流三角洲无直接联系,甚至相隔几百公里的距离,而在峡谷中段一般会发育深海水道及堤坝,其尾端则发育大型的深海扇;无头型峡谷一般发育在沉积物供给不足的区域,其上端一般没有河流沉积物的供给,只能下切陆坡形成陆坡峡谷,并且不能形成深海河道以及深海扇(图1)。据Harris等^[20]的统计,现今大型海底峡谷有5 849

条。大型峡谷统计的标准包括:①峡谷深度范围必须大于1 000 m;②峡谷宽度和深度比必须小于150:1,且下切深度要超过100 m,也就是100 m等值线向陆偏转至少15 km而且间距至少15 km的峡谷;③峡谷头部出现在水深超过4 000 m的除外;④包括出现在大陆边缘、海岛陆坡或者海底台地的峡谷。深水峡谷在主动和被动大陆边缘以及岛屿附近都有出现,并且各自具有不同的特征。根据长度、坡度、分支等统计数据的研究发现,位于主动和被动大陆边缘的深水峡谷有着截然不同的区别^[20]。主动大陆边缘(不包括岛屿)的深水峡谷数量比被动大陆边缘多15%。

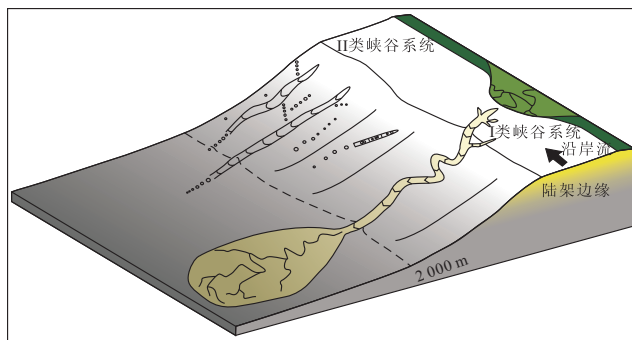


图1 深水峡谷的两种类型^[19]

Fig.1 Two types of submarine canyon

收稿日期: 2013-09-12 编辑: 杨 勇

基金项目: 国家自然科学基金项目(91028009);教育部博士点基金项目(20100145110002);国家“十二五”重大科技专项(2011ZX05025-002-020-03);湖北省自然科学基金重点项目(2008CDA095)

作者简介: 毛凯楠(1987—),男,现正攻读海洋地质与资源专业博士学位,主要从事海洋地质与资源研究。E-mail: maokn1207@163.com

通信作者: 解习农(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事盆地动力学分析、海洋地质与资源研究。E-mail: xnxie@cug.edu.cn

近几十年来,随着深海能源、海洋地质灾害、古气候和古生物的深海地质记录以及深海沉积动力学研究的发展,深水沉积环境和沉积过程研究越来越引起人们的关注^[21],而海底峡谷因其所处的特殊地质背景必然成为深水沉积环境和沉积过程研究的焦点。国际地学界“从源到汇——大陆边缘沉积作用计划”的提出,更加凸显了海底峡谷研究的重要性^[22]。随着海洋探测技术的进步,深水峡谷体系的研究取得了大量丰硕的成果。

1 峡谷形态特征

随着地震资料分辨率的提高、深海钻探技术的日益完善和海底锚系及 ROV 等深海观测技术的逐渐成熟,人们能够对深水峡谷(水道)体系进行更加详细而直接的研究。对其剖面 and 平面形态特征的详细刻画,能够提供关于峡谷形成、演化的关键信息。

利用海底多波束测量,还可以定量刻画深水峡谷体系的剖面形态(如深度、宽度等)并进行对比。Cronin 等^[1]对爱尔兰 Rockall 东北边缘的 Donegal 峡谷进行了研究,通过从陆架到陆隆的 11 条剖面的三维显示图,将 Donegal 峡谷分成了 3 个部分:①侵蚀区,以对称型侵蚀为主。在海底 1 000~1 500 m 处,V 型冲沟被海底凸起所分割,在 1 500 m 处进入宽的沟谷中成为一个支流。在 V 型冲沟汇聚区域,下切谷的宽度迅速增至 20 km,深度可达到 625 m。在 1 800 m 处,受一个发育天然堤—溢岸流—阶地的下切谷影响,峡谷具有典型的水道化特征,深度约 450 m。②侵蚀—沉积区,在 2 200~2 500 m 处,Donegal 峡谷成为补给水道,并且可以观察到一些小型的水道由南部和北部汇聚进来。同时,在这个区域由于海底坚硬程度的增强和下切能力的减弱,该段整个峡谷的下切深度没有超过 100 m。③沉积区,这一部分也包括了 Donegal Bay 峡谷的下游部分。与前 2 个部分相比,在 2 595~2 665 m 处,整个地貌显得特别的平缓。这一段剖面的底部常见席状沉积物,且厚度不一,可能是侵蚀阶地被后来的泥质碎屑流所充填而形成。峡谷西部边缘可能与断裂活动有关(图 2)。

Antobreh 等^[10]综合利用多波速侧扫成像技术及高分辨多道地震数据研究了 Cap Timiris 峡谷的演化。Cap Timiris 峡谷是在毛里塔尼亚远滨新近发现的海底峡谷,总长约 290 km。峡谷在陆架边缘和上陆坡区域,呈 NE—SW 向展布,在深水区域则呈 EW 向展布。基于峡谷走向变化将整个峡谷分为 2 段(图 3):①Cap Timiris 峡谷上部,位于 50 m 水深陆架至 2 850 m 下陆坡区。剖面 A-F 显示峡谷

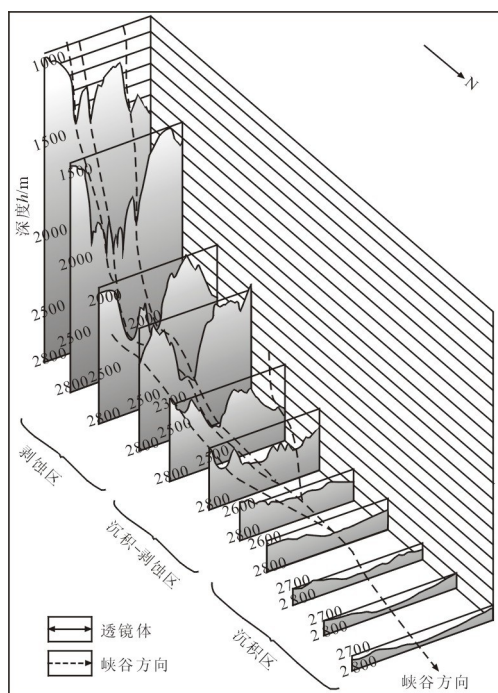


图 2 爱尔兰 Donegal 峡谷剖面三维显示图^[1]

Fig. 2 Three-dimensional view of the Donegal Canyon in Ireland

形态为 V-U 型,下切深度为 460 m,宽度 1.2~5.1 km,峡谷壁通常很陡。剖面 G-I 显示峡谷形态为 U 型,通常具有多期次的谷底和侵蚀阶地。剖面 J-L 显示由于靠近下游盆地,峡谷重新变窄,形态呈 V 型。②Cap Timiris 峡谷下部,位于陆隆至深水盆地,剖面 M-P 显示峡谷平均宽度 2.2 km,形态呈 V 型。剖面 Q-R 显示了 2 个弯折带,主峡谷(剖面 S-Y)和小型分支峡谷(剖面 W-X)均为狭窄的 V 型,主峡谷宽 1.5~5 km,下切深度 300 m,分支峡谷宽 1.2~2.5 km,下切深度 250 m。

除了运用海底测深技术之外,高精度三维地震技术的发展也是精细观测深水峡谷和水道体系的有力工具。特别是利用三维地震资料的空间连续性及高精度来产生等时地震图像,可以提供关于沉积体的时空演化信息。Deptuck 等^[23]利用时间切片对尼日尔三角洲斜坡西部 Benin-major 峡谷内部的深海水道进行了刻画,不仅可以明显地观察到水道的蛇曲形态,同时通过对比不同的时间切片还可以看到由水道侧向加积和垂向加积构成的水道演化。

为了方便研究,通常把峡谷分成 3 段分别进行形态描述:①峡谷头部,作为整个峡谷体系面积最大的区域,呈半圆形或者马蹄形,周缘陡直。其最大的特征就是侵蚀上陆坡并最终侵蚀整个陆架,且带走陆架沉积物而后堆积在深海盆地;在其轴向上经常有流体移动,其中最多的就是浊流伴随着滑移、滑塌和碎屑流间歇性地流过峡谷头部,而这些正是导致

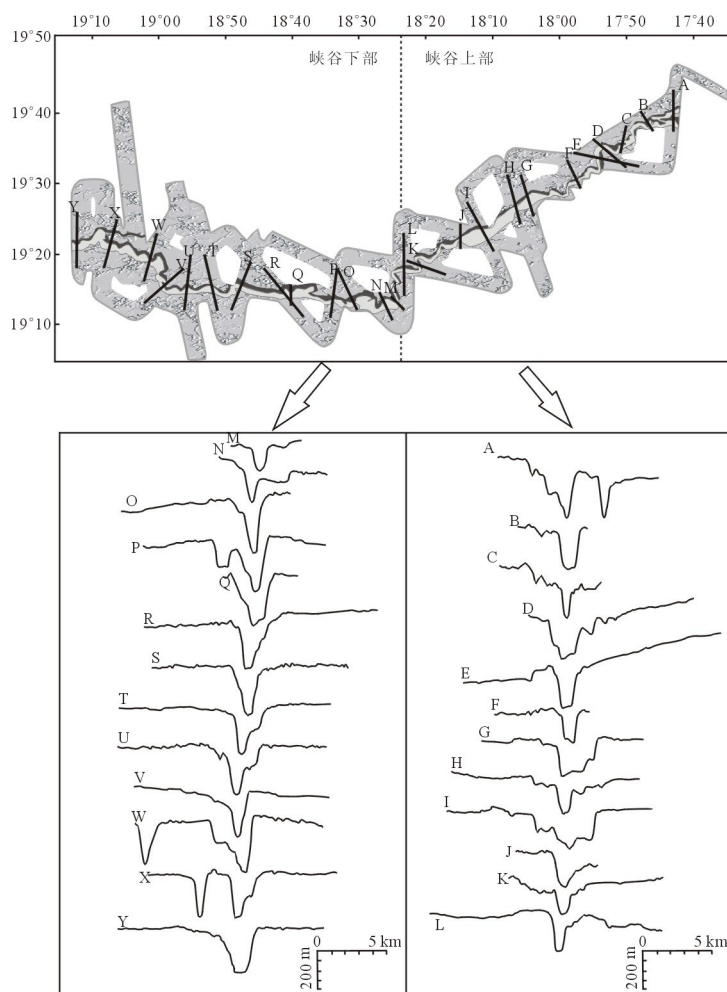
图3 北非 Cap Timiris 峡谷剖面形态特征^[10]

Fig. 3 Cross-sectional morphological characteristics of Cap Timiris canyon in North Africa

溯源侵蚀的原因。②峡谷躯干,在某些区段是直的,但总体上曾蜿蜒展布,其走向常受断层控制,也会受海底地形,比如滑塌体和盐丘等的影响,而其平面形态主要受控于陆坡的坡降。总的来说,深水峡谷躯干的走向通常受基底结构的控制,其路径则受一系列海底地形的强烈控制,而峡谷的间距则受陆坡的坡度所控制。③峡谷尾部,该处峡谷形态逐渐消失,演化成峡谷扇或海底扇,谷道逐渐过渡为水道,在峡谷扇上可见水道切割后的侵蚀地貌。

2 峡谷充填精细刻画及沉积模式

高精度地震资料可以精细刻画深水峡谷的剖面和平面形态。通过剖面特征、组合样式、平面形态3个方面的综合分析可以精细刻画深水峡谷和水道内部的结构单元。经过近20年的研究,特别是高分辨率地震数据和大量野外露头研究使人们意识到深水峡谷和浊积水道是一种非常复杂的储集体。即便使用高质量的地震资料,由于剧烈变化的沉积相和复

杂的内部地层的存在使得对于储层的评价和描述都非常困难。这些影响因素使得每一个水道都是独一无二的。因此,深水峡谷体系沉积模式以及储层控制因素的研究对于深水勘探、预测和开发而言,意义重大。很多学者从各自研究的角度出发,建立了一些典型的深水峡谷和水道的沉积模式。

Mayall等^[24]建立了一个水道充填的简单模式(图4),这一模式是基于他们多年研究的结果,被称为“BP模式”。综合利用地震、岩心和钻井识别出4种沉积单元:①底部滞留沉积,由粗砂岩或砾岩、含泥砾岩或者泥砾组成。②滑塌或碎屑流沉积体,由局部水道侧壁崩塌或经过长距离输送所形成。③高砂泥比水道,这种沉积相可形成最好的储层。④低砂泥比天然堤—水道复合体,浊积水道充填和溢流沉积。当然,在高位体系域时期沉积的泥岩夹层通常也是水道充填的重要组成部分。他们认为大部分深水水道都包含了这些沉积单元,但是在各单元厚度差异较大。

Mayall等^[25]提出用4个构成要素来刻画浊积

图4 深水水道充填的“BP模式”^[24]

Fig. 4 “BP model” of the deep water channel filling

水道特征:弯曲度、沉积微相、频繁下切和充填以及堆积样式。弯曲度是由侵蚀、侧向堆积、侧向加积以及海底地形所致,弯曲度的不同样式对储层相分布具有明显影响;有利储层的沉积微相包括底部粗粒滞留沉积、长距离搬运的块体流沉积、高砂质含量(N:G)的叠加水道以及低砂质含量(N:G)的弯曲水道天然堤;堆积样式往往具有高度变化性(图5),即使是在沿水道延伸方向很短的距离内这种特征也非常明显,因此堆积样式对于开发井的设计具有很大的影响。

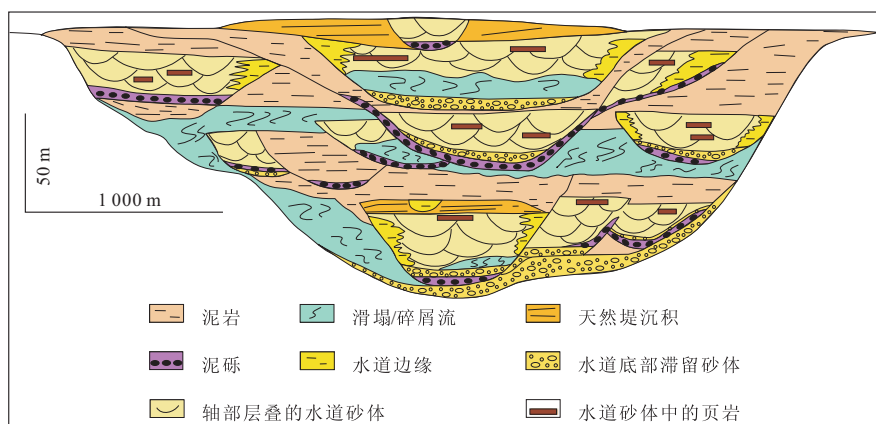
图5 大型深水水道储层分布特征综合模式图^[25]

Fig. 5 Composite mode chart of distribution of reservoirs in large-scale deep water channel

3 原位观测

为了研究海底峡谷的沉积和侵蚀作用,一些学者对峡谷进行了长时间的定点跟踪观察与研究。例如,Smith等^[26]就利用7个航次的高精度海底多波束测深数据对蒙特利峡谷地貌的演变进行研究后发现,在29个月中蒙特利峡谷上部在体积上增加了 $1.0 \times 10^6 \sim 7.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。29个月间峡谷轴部和末端主要发生了侵蚀作用,峡谷边部以及末端边部主要发生了沉积作用;而在2003年9月至2004年9月期间侵蚀主要发生于峡谷末端。

在对台湾高屏峡谷的研究中,Liu等^[27]发现高屏峡谷中的海水具有稳定的温度分层。峡谷深部充满了更冷和盐度更大的海水,那里几乎不受季节变化的影响。在夏季河流洪水季节水层是稳定的,而在干燥的秋冬季节却不太稳定。另外在向秋季过渡期间,峡谷上部仍然非常稳定,但深部却变得不太稳定。Lee等^[28]对高屏峡谷中的海水透光率进行了研究,通过沿峡谷轴向的横切面透光率的观测,发现不同阶段沿每个横切面观测到的水道起伏波动是由

潮汐所控制。Liu等^[27]从透光率测量结果推断出悬浮沉积物浓度,观测到的悬浮沉积物浓度分布表现出以下共同的特点:①高浓度的悬浮沉积物通常分布在下部水层。除了2个汛期外,其他时间段较高浓度的悬浮沉积物往往会出现现在峡谷的向海一端。②汛期由河水带来的高浓度悬浮沉积物明显影响了峡谷头部附近的表层海水。③局部区域有时发育高浓度的悬浮沉积物。

4 物理和数值模拟

浊流作为一个运送陆源沉积物至深水的重要机制存在于蜿蜒的海底水道,其储集层已成为越来越重要的油气勘探目标。但是,对于海底水道系统的结构和动力学研究还不是很清楚。即使人们已经注意到海底水道与河流系统中水道演化和流体力学的差异,但是由于其平面形态与河流系统的相似性还是经常被人们绘制成类似于河道的形态。

物理实验模拟深水浊积水道的流动状态,其差异决定了水道内部沉积相的空间展布。前人的实验和数值模拟工作表明,海底水道弯道流体与河流流

体动力学有明显的不同之处。值得注意的是,在海底水道弯道顶点有一个反向的二次流(螺旋状的)出现。Peakall 等^[29]通过一系列物理实验得出的研究结果显示具有弯道内侧堆积和外侧侵蚀的沉积特点。这些沉积模式明显地类似于曲流河的边滩和离岸沉积,这就证明了轴向流体的作用相对于横向流体来说占了主导地位。

5 峡谷成因及演化

关于深水峡谷体系的成因,最初是尝试通过精细的几何学描述和深水峡谷的形态分类来解决这一问题^[30]。研究者们采用形态—成因研究思路将其分为2类:陆架侵蚀型峡谷和陆坡限制型峡谷^[31-32]。陆架侵蚀型峡谷一般与陆相河流体系关系密切,常常是河流—海洋体系中的一部分,因此被认为峡谷是河流下切的产物。但是对现代陆架边缘的研究表明,一般情况下深水峡谷体系的头部与河流三角洲之间都存在不小的距离^[33-35]。这些观测结果使得人们更倾向于使用低位时期海平面下降来解释深水峡谷的成因,因为低位时期陆架将处于暴露环境,同时陆架边缘的砂质沉积物供给将增多。但是对于陆坡限制型峡谷,由于远离陆架坡折,受低位体系域和陆架边缘下切谷侵蚀影响的可能性较小,对于这种峡谷就需要另外的机制来解释,如退积型滑移及潮汐控制的底流等^[36-37]。同时,断层活动能够决定侵蚀发生的位置,因此构造活动也是控制深水峡谷体系形成的重要因素之一。

一般认为峡谷成因有以下几个方面:陆上河流的侵蚀、海底浊流的冲刷、块体滑移形成峡谷雏形,构造运动(断层、底辟)形成凹槽等。现在广泛认可的观点是强烈的海底侵蚀作用导致了峡谷的形成,而海底峡谷的加宽是由于侵蚀作用导致峡谷壁坡度变陡而垮塌所致,世界上许多地方都存在这类实例^[38-41]。如 Green^[40]发现在 Diepgat 峡谷头部有明显的滑塌作用形成的下切峡谷和突出的半圆形滑塌结构。

6 深水峡谷研究的发展趋势及其地质意义

近年来国际深水峡谷体系研究具有以下发展趋势:①提高深水地震资料的分辨率。目前地震资料是了解整个峡谷体系的重要手段,提高地震资料的分辨率就能为准确认识地下地质体提供技术保障。②峡谷内部充填多样性研究。从现有的实例来看,峡谷内部充填特征复杂多变,难以用一个固定的沉积模式加以描述。对于峡谷内部结构的刻画,利用

野外露头资料的类比和三维地震成像资料精细解剖仍是主要的研究手段。③峡谷成因机制复杂性研究。已有的研究表明,单一控制因素无法对深水峡谷的成因和演化进行合理解释,需要运用“从源到汇”的系统思想进行审视,同时要特别重视对地质背景的认识和理解。

显然,作为特殊的海底地貌单元的深水峡谷体系研究不仅可以提供丰富的古气候、海平面变化和区域构造演化史信息,大大深化大陆边缘源—汇系统的认识,而且可以为深水区有利储层预测及油气勘探提供有力的支持。

参考文献:

- [1] Cronin B T, Akhmetzhanov A M, Mazzini A, et al. Morphology, evolution and fill: Implications for sand and mud distribution in filling deep-water canyons and slope channel complexes [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 179(1/2): 71-97.
- [2] 苏明, 李俊良, 姜涛, 等. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 85-93.
- [3] 吴时国, 坂本泉. 菲律宾海钱洲深海峡谷沉积作用与发育演化 [J]. *科学通报*, 2001, 46(增刊1): 84-88.
- [4] Forel F A. *Leravins sous-lacustre des fleuves glaciaires* [J]. *C. r. hebdomadaire des seances Acad. Sci. Paris*, 1885, 191: 725-728.
- [5] Forel F A. *Leravins sous-lacustre de Rhône dans le lac Léman* [J]. *Bulletin de la Société Vaudoise de Science Naturelle*, 1887, 23: 85-107.
- [6] Signorini R. Determinazione del senso di sedimentazione degli strati nelle formazioni arenacee dell'Appennino settentrionale [J]. *Bollettino Della Società Geologica Italiana*, 1936, 55: 259-267.
- [7] Kuenen Ph H, Migliorini C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J]. *Journal of Geology*, 1950, 58(2): 91-127.
- [8] Laursen J, Normark W R. Late Quaternary evolution of the San Antonio submarine canyon in the central Chile forearc (33°S) [J]. *Marine Geology*, 2002, 188(3/4): 365-390.
- [9] McHugh C M G, Damuth J E, Mountain G S. Cenozoic mass transport facies and their correlation with relative sea level change, New Jersey continental margin [J]. *Marine Geology*, 2002, 184(3/4): 295-334.
- [10] Antobreh A A, Krastel S. Morphology seismic characteristics and development of Cap Timiris Canyon, offshore Mauritania: A newly discovered canyon preserved off a major arid climatic region [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(1): 37-59.
- [11] Murray J, Renard A F. Report on deep-sea deposits based on specimens collected during the voyage of H. M. S. Challenger in the years 1872-1876 [M]. London: Government Printer, Challenger Reports, 1891: 525.
- [12] Maslin M, Vilela C, Mikkelsen N, et al. Causes of catastrophic sediment failures of the Amazon Fan [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(20/21): 2180-2193.
- [13] ZTMhlsdorff C, Wien K, Stuut J B W, et al. Late Quaternary sedimentation within a submarine channel-levee system offshore Cap Timiris, Mauritania [J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1/4): 217-234.
- [14] Piper D J W, Shaw J, Skene K I. Stratigraphic and sedimento-

- logical evidence for late Wisconsinan sub-glacial outburst floods to Laurentian Fan[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 246(1): 101-119.
- [15] Toucanne S, Zaragosi S, Bourill J F, et al. Activity of the turbidite levees of the Celtic-Armorican margin (Bay of Biscay) during the last 30,000 years: Imprints of the last European deglaciation and Heinrich events[J]. *Marine Geology*, 2008, 247(1/2): 84-103.
- [16] Kevin T P, Jordi C. Mass-transport complexes (MTCs) and tectonic control on basin-floor submarine fans, Middle Eocene, south Spanish Pyrenees[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75: 761-783.
- [17] Babonneau N, Savoye B, Cremer B, et al. Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(4): 445-467.
- [18] Mayall M, Lonergan L, Bowman A, et al. The response of turbidite slope channels to growth-induced seabed topography[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 2010, 94(7): 1011-1030.
- [19] Jobe Z R, Lowe D R, Uchytel S J. Two fundamentally different types of submarine canyons along the continental margin of Equatorial Guinea[J]. 2010, 28(3): 843-860.
- [20] Harris P T, Whiteway T. Global distribution of large submarine canyons geomorphic differences between active and passive continental margins[J]. *Marine Geology*, 2011, 285(1/4): 69-86.
- [21] Baas J H, McCaffrey W D, Knipe R J. The deep-water architecture knowledge base: Towards an objective comparison of deep-marine sedimentary systems[J]. *Petroleum Geoscience*, 2005, 11(4): 309-320.
- [22] 李铁刚, 曹奇原, 李安春, 等. 从源到汇: 大陆边缘的沉积作用[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(5): 713-721.
- [23] Deptuck M E, Sylvester Z, Pirmez C, et al. Migration-aggradation history and 3-D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Benin-major Canyon, western Niger Delta slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6/9): 406-433.
- [24] Mayall M, Stewart I. The architecture of turbidite slope channels[C] // Weimer P, Slatt R M, Coleman J L, et al. Global deep-water reservoirs: Gulf coast section SEPM foundation 20th annual Bob F Perkins research conference. Tulsa: SEPM, 2000: 578-586.
- [25] Mayall M, Jones E, Casey M. Turbidite channel reservoirs: Key elements in facies prediction and effective development[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(8): 821-841.
- [26] Smith D P, Kvitek R, Iampietro P J, et al. Twenty-nine months of geomorphic change in upper Monterey Canyon (2002-2005) [J]. *Marine Geology*, 2007, 236: 79-94.
- [27] Liu J T, Liu K J, Huang J C. The effect of a submarine canyon on the river sediment dispersal and inner shelf sediment movements in southern Taiwan[J]. *Marine Geology*, 2002, 181(4): 357-386.
- [28] Lee I H, Lien R C, Liu J T, et al. Turbulent mixing and internal tides in Gaoping (Kaoping) Submarine Canyon, Taiwan[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 76(4): 383-396.
- [29] Peakall J, Amosa K J, Keevil G M, et al. Flow processes and sedimentation in submarine channel bends[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6/9): 470-486.
- [30] Shepard F P, Dill R F. Submarine canyons and other sea valleys [M]. Chicago: Rand McNally, 1966: 381.
- [31] Twichell D C, Roberts D G. Morphology, distribution, and development of submarine canyons on the United States Atlantic continental slope between Hudson and Baltimore Canyons[J]. *Geology*, 1982, 10(8): 408-412.
- [32] Farre J A, McGregor B A, Ryan W B F. Breaching the shelf-break: Passage from youthful to mature phase in submarine canyon evolution[C] // Stanley D J, Moore T G. The shelf break: Critical interface on continental margins, SEPM Special Publication No. 33. Tulsa: SEPM, 1983: 25-39.
- [33] Monaco A, Courp T, Heussner S, et al. Seasonality and composition of particulate fluxes during ECOMARGE-1, western Gulf of Lions[J]. *Continental Shelf Research*, 1990, 10(9/11): 959-987.
- [34] Mullenbach B L, Nittrouer C A. Rapid deposition of fluvial sediment in the Eel Canyon, northern California[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(16): 2191-2212.
- [35] Liu J T, Lin H. Sediment dynamics in a submarine canyon: A case of river-sea interaction[J]. *Marine Geology*, 2004, 207(1/4): 55-81.
- [36] Galloway W E, Dingus W F, Paige R E. Seismic and depositional facies of Paleocene - Eocene Wilcox Group submarine canyon fills, Northwest Gulf Coast, U. S. A [C] // Weimer P, Link M H. Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems. New York: Springer Verlag, 1991: 247-271.
- [37] Shanmugam G. Deep-marine tidal bottom currents and their reworked sands in modern and ancient submarine canyons[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(5): 471-491.
- [38] Goodwin R H, Prior D B. Geometry and depositional sequences of the Mississippi Canyon, Gulf of Mexico[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1989, 59(2): 318-329.
- [39] Kottke B, Schwenk T, Breitzke M, et al. Acoustic facies and depositional processes in the upper submarine canyon Swath of No Ground (Bay of Bengal)[J]. *Deep Sea Research Part II*, 2003, 50(5): 979-1001.
- [40] Green A, Uken R. Submarine landsliding and canyon evolution on the northern KwaZulu-Natal continental shelf, South Africa, SW Indian Ocean[J]. *Marine Geology*, 2008, 254: 152-170.
- [41] He Y L, Xie X N, Kneller B C, et al. Architecture and controlling factors of canyon fills on the shelf margin in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea[J/OL]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, doi:10.1016/j.marpetgeo.2012.03.002.

Research Reviews of Submarine Canyons System and Its Geological Significance

Mao Kainan, Xie Xinong

(Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education,
China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Submarine canyons are developed extensively on the continental margin, which are important conduits for sediments transporting from shallow area to deep water. In recent years, with the further development of science and technology and the growth of human demand to the deep sea energy, submarine canyon research has become one of the hot topics in the study of the marine geology. Based on comprehensive utilization of side-scan sonar, submarine anchor system, seismic data and deepwater drilling, submarine canyons have been studied from all dimensions, which mainly includes: geomorphology of the canyons morphology description; deep-sea in situ observation technology on modern canyon deposition; physical and numerical modeling technique to reappear the sedimentary evolution process of the canyon; detailed internal architecture analysis, depositional evolution of the canyon; and summary of depositional model and formation origins of the canyon, etc. Hence, submarine canyon, as one of the most important depositional systems, would not only provide a wealth of information about paleo-climate, sea-level changes and regional tectonic evolutionary history but also serve as one of the important oil and gas reservoirs, which has the important instruction significance for deep water oil and gas exploration.

Key words: submarine canyon; morphology; sedimentary model; situ observation; physical and numerical modeling; origin

(上接第 20 页)

Isotope Ages and Significance of Nanhuaian Chang'an Formation in the Southeastern Yangtze Craton

Sun Haiqing¹, Huang Jianzhong¹, Du Yuansheng², Luo Lai¹, Wu hao³

(1. Hunan Institute of the Geological Survey, Changsha 410116, China;

2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3. Chengdu Institute of the Geology and Mineral Resources, CS, Chengdu 610081, China)

Abstract: Chang'an Formation in the southeastern Yangtze, craton confirmed a ice-source clastic deposit. It is important that it's dating accurately to understand South China Neoproterozoic glaciations and evolution. As limit of dating techniques and test objects scarcity, age of Chang'an Formation has been rarely reported. The author recently discovered tuff mezzanine, magmatic zircon in lower Chang'an Formation in Bixi area, central Hunan. By LA-ICP-MS and SHRIMP U-Pb isotope chronology study, the results show that the zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ weighted average age of 751 ± 5 , 764 ± 10 Ma. Comprehensive analysis of the latest relevant stratigraphic age, Chang'an Formation can compare the age and the Northwest Territories, Australia Sturtian glaciation. The sedimentary cycle analysis showed that bottom of Chang'an Formation are typical gravity sediments. The age of the lower boundary of the Chang'an Formation is more appropriate 760 Ma.

Key words: Chang'an Formation; isotope age; Nanhuaian; southeastern Yangtze craton