

文章编号:1009-2722(2018)04-0008-08

美国加州蒙特利湾浊积扇和流道上的沉积物波

付建军¹, 庄振业¹, 曹立华¹, 陈昌翔¹, 杨顺良², 赵东波²

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 福建海洋研究所, 厦门 361013)

摘要:蒙特利峡谷穿过陆架和陆坡,于谷口外(水深约 2 900 m)发育了 95 600 km² 的浊积扇。峡谷底滩地和扇面上均发育大面积的深水沉积物波底形。扇上沉积物波的特征有:波高为 30~100 m,波长 1~2 km;在笔直流道段,波峰垂直或斜交于流道延伸,而在弯曲流道段,波峰平行于流道延伸;波两侧不对称,迎流侧长而背流侧短,有向上游迁移的趋势;由夹细砂层的粉砂质黏土组成,顶部均为 30~50 cm 的黏土薄层披覆。推断为晚更新世—早全新世的低海平面时期发育的残留沉积物波。峡谷底主流道两侧也发育沉积物波,其形态类似于扇面上的波,但尺度较小,波峰呈波状或新月形延伸,由夹粗砂、小砾石层的砂质粉砂层组成,推断为晚全新世海平面上升时期的沉积。现代高海平面时期,陆源物质较多沉积于近岸和陆架,浊流下泄时,大部分碎屑物质沉积于峡谷底滩地上,只有少部分极细颗粒物沉积于浊积扇和扇上沉积物波之上。

关键词:陆坡;浊积扇;峡谷;流道;沉积物波

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.04002

美国加利福尼亚州中部的蒙特利湾位于洛杉矶岸外,它是一个向太平洋开敞且宽缓的浅水海湾,外缘水深约 60~120 m,120~250 m 水深为较陡的上部大陆坡。分布有垂直于岸的 3 条峡谷,自北向南分别为先锋(Pioneer)、阿松森(Ascension)和蒙特利(Monterey)峡谷,它们分别与陆上的相应河流连接,并在其下游经过一段陡坡侵蚀后分别发育了 3 片浊积扇(图 1):先锋扇独立于北部,阿松森扇最小,并入于蒙特利扇北部,蒙特利扇最大,约 95 600 km²[1]。

蒙特利扇上分布大面积的浊流型沉积物波。深海沉积物波是海洋地质研究的新课题[2],其与

深海油气平台、管道等海底工程的稳定性有关,还可通过高分辨率地震剖面来推断沉积物波中油气资源的存在。蒙特利扇上的沉积物波具有典型性,既有峡谷流道型沉积物波,又发育扇上溢堤型沉积物波,自 20 世纪 80 年代至今一直受到许多学者的关注[3-11]。

笔者拟根据各家的调查研究资料综合该两类沉积物波的沉积特征,分析其形成演化规律,探讨其应用价值。

1 地质环境

蒙特利湾陆架水深较浅,向西开敞,在地质构造上位于北美板块和太平洋板块的接合带上,顺岸断层较多,垂直构造运动在陆缘带形成若干坡折和垂直海岸的水下沟谷,蒙特利峡谷系统和浊积扇即其中之一。蒙特利峡谷长约 90 km,共分

收稿日期:2018-01-06

基金项目:福建省海岛与海岸带管理技术研究重点实验室项目(CIMTS-2016-01)

作者简介:付建军(1991—),男,在读硕士,主要从事海洋地质研究。E-mail:18354223809@163.com

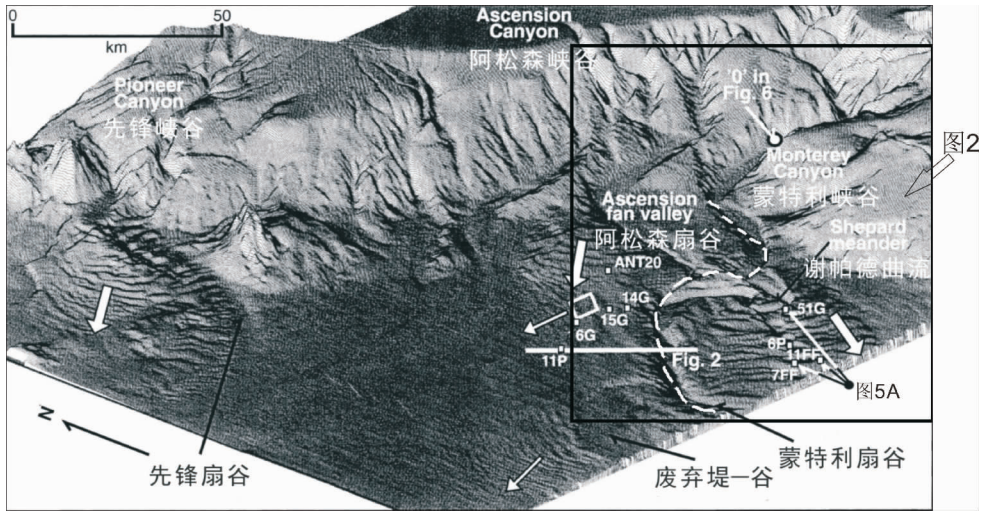


图 1 蒙特利湾、浊积扇和流道平面图(据文献[12])

Fig. 1 A planform of Monterey Bay, turbidite fan and channels(from reference [12])

为 3 段。峡谷头段始于蒙特利湾外陆架,水深范围为 20~250 m(图 3)。谷底相对宽阔,来自 4 条河流的沉积物在谷底滩地上发育了大片的峡谷浊流型沉积物波。中段峡谷的水深范围为 250~2 900 m,其穿过陆坡,为侵蚀型峡谷。当水深超

过 2 900 m 后,蒙特利峡谷扩展为扇上流道,并发育形成了约 95 600 km² 的蒙特利扇(图 2),扇面上普遍发育溢堤型沉积物波(图 1)。蒙特利扇在水深约 4 700 m 处并入深海平原,扇上流道亦逐渐消失。

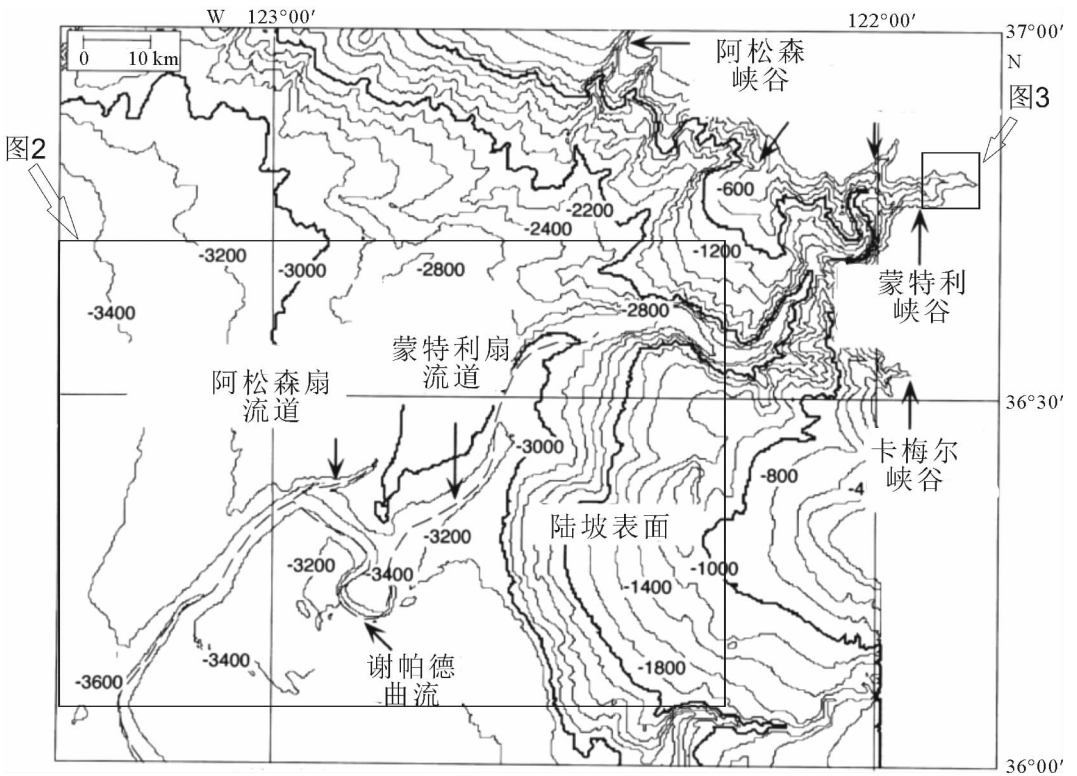


图 2 蒙特利峡谷—扇系统的水深图(据文献[6])

Fig. 2 Bathymetric map of Monterey Canyon-fan system(from reference [6])

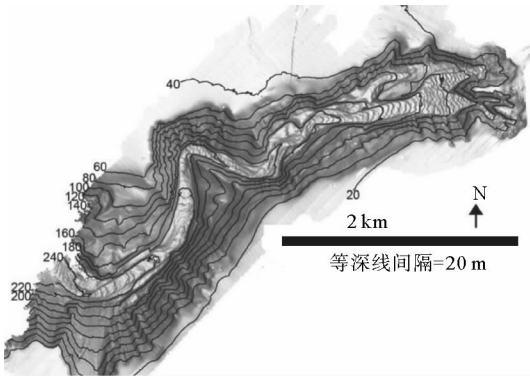


图3 蒙特利峡谷头部水深图(据文献[13])

Fig. 3 Bathymetric map of upper Monterey Canyon
(from reference [13])

峡谷内水体受不正规半日潮控制,形成的往复潮流足以将细砂以下的细粒沉积物运输出峡谷^[13],大量粗砂、小砾石等粗粒碎屑沉积于谷底滩地。

蒙特利峡谷和浊积扇的主要物源包括蒙特利河等入湾河流及峡谷壁的滑塌,蒙特利河4条支流在莫斯兰丁港附近汇入峡谷,年均输沙量约300 000 m³。遇到洪水和风暴潮,峡谷上部的浊流流速可达190 cm/s^[13]。如此高的流速导致悬浮物浓度剧增,加之谷壁和谷底沉积物的滑塌,导致峡谷流道中浊流的泛滥和浊积扇上流道的漫溢,诱发峡谷流道型和扇上溢堤型2种沉积物波的发育。

2 沉积物波的形态特征和分布

按照沉积物波的分布位置,可将浊流型沉积物波分成2种类型:①浊积扇上的沉积物波,通常称为流道溢堤型沉积物波;②峡谷内的沉积物波,称为峡谷流道型沉积物波。峡谷内浊流不发育扇体,沉积物波分布于谷内。以下分别介绍扇上和谷内沉积物波的沉积特征。

2.1 浊积扇上的沉积物波

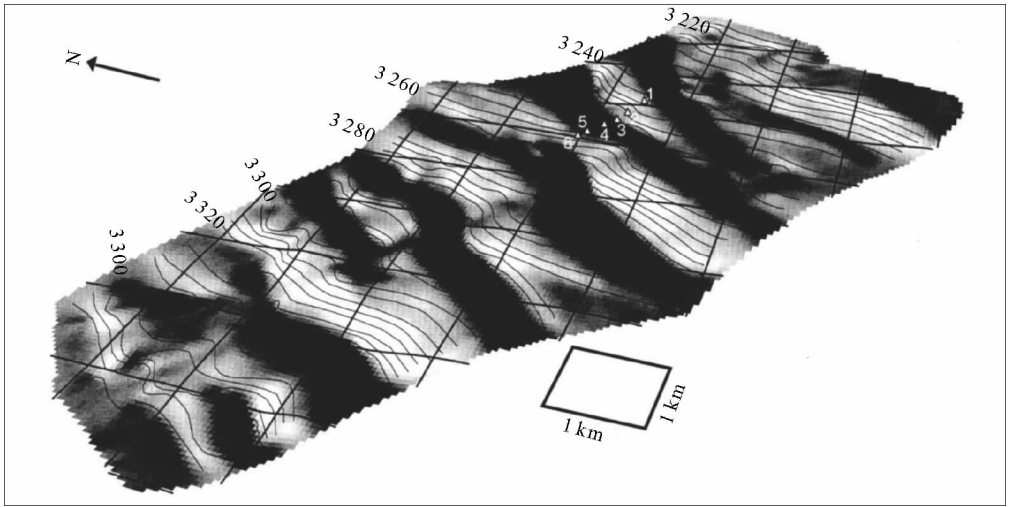
大约在2 900 m水深附近,海底由陡变缓,蒙特利峡谷浊流摆脱峡谷的束缚,流道开始扩宽、分叉和弯曲,并形成扇体。蒙特利浊积扇上普遍分布大尺度的沉积物波,按成因均属于流道溢堤型

沉积物波。沉积物波波峰笔直或弯曲延伸数十千米,笔直流道外的沉积物波通常互相平行且垂直或斜交于流道。急弯处流道外侧的沉积物波平行流道延伸,如图1中的谢帕德曲流东侧的沉积物波。据Mchugh等^[6]的测量数据,扇上笔直流道的右侧堤坝普遍高于左侧(高差约40~190 m),这是由于科里奥利力对浊流的影响所致;弯曲流道的外侧堤坝普遍高于内侧堤坝约80~150 m,这是由于在弯曲流道段,离心力对浊流的影响强于科里奥利力。弯曲流道外侧发育的溢堤沉积物波的尺度同样较大,波长达3 km,波高30~100 m^[1]。扇上其他沉积物波的波高仅为数米至数十米,波长1~2 km。自扇上流道的上游向下游,沉积物波的波高由大逐渐变小,在扇外缘,波逐渐消失^[14]。沉积物波的两侧不对称,迎流侧更为平缓,沉积层较厚,有时是背流侧厚度的2~3倍。

Normark等^[3]根据地震剖面和重力取样岩心特征统计了蒙特利扇上流道西侧20 km²扇面上若干个沉积物波(图4)。根据图4得到该区域沉积物波的平均波长为2 270 m,迎流侧长1 170 m,背流侧长1 090 m。扇上沉积物波的粒度组成较细,均以粉砂质黏土为主,FF1-FF6浅层岩心显示,有些沉积物波的迎流侧和波峰夹1~2 cm厚的细砂或粗粉砂夹层(图5A),同时显示沉积物波的迎流侧厚于背流侧,这表明波向上游迁移(图5B)。

2.2 峡谷内的沉积物波

90 km长的蒙特利峡谷是该浊流的主流道,谷肩宽约1 000~2 000 m,最大谷深190 m,谷底坡度1.5°~7°。谷底宽窄不一,窄处仅30 m,宽处300~500 m,谷底的台地和流道两侧均分布大面积的沉积物波,其在成因上与扇上沉积物波类似,但在形态上却具有更小的尺度,波峰呈波状或新月形。Smith等^[13]于2002—2003年对其上部4 km峡谷的沉积物波作了多次定位观测,认为峡谷沉积物波的波高仅为2~5 m,波长36~46 m,且随着底坡坡度的增大而减小,波峰垂直于流道波状延伸约100~350 m(图6A、B)。波两翼不对称,迎流侧坡度较缓,背流侧坡度较陡,在形态上类似于水流沙波向下游迁移的趋势,但实际相反。



注:白点为钻孔,黑色为迎流侧,白色为背流侧。

图 4 流道北侧一部分沉积物波的分布图(据文献[12],位置见图 1)

Fig. 4 The distribution map of partial sediment waves on the northern channel (from reference [12], see Fig. 1 for location of sediment waves)

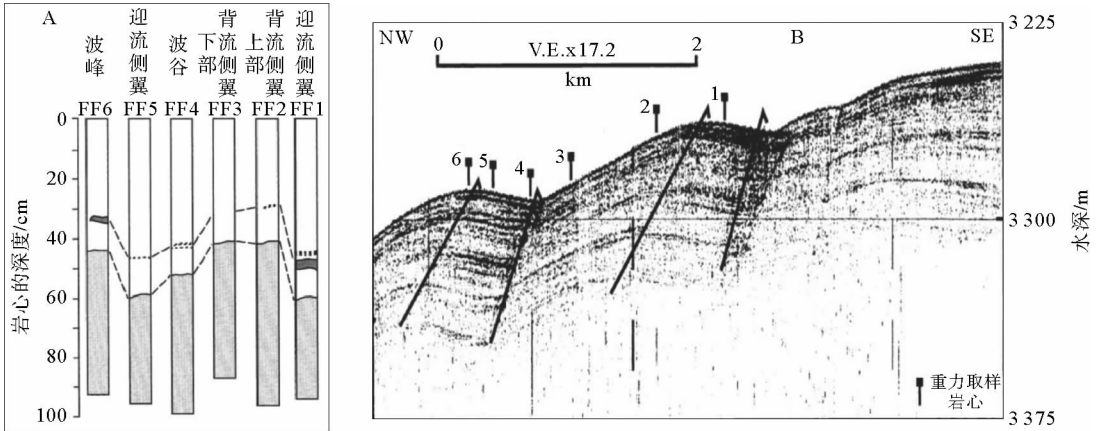
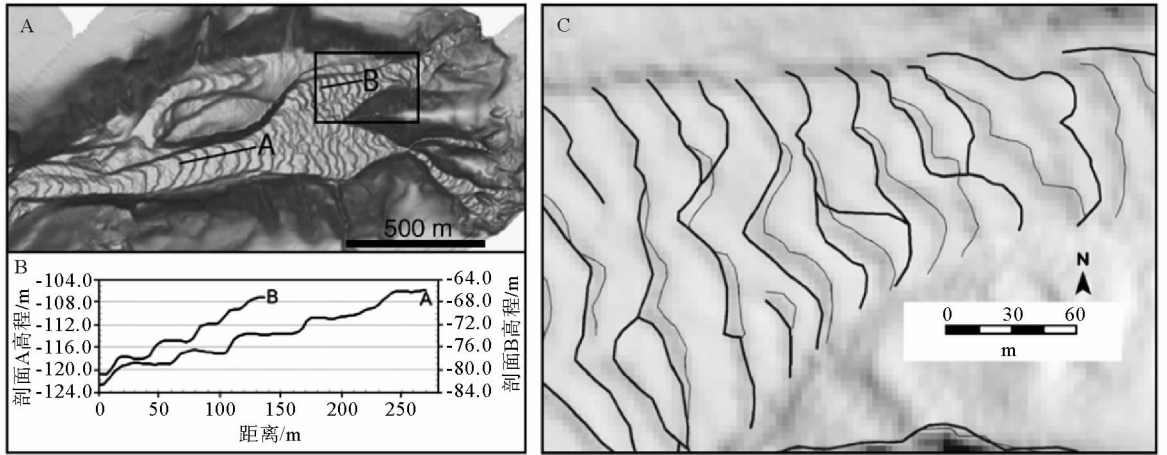


图 5 (A) 沉积物波的重力钻孔岩心 FF1—FF6, 显示其迎流侧厚于背流侧; (B) FF1—FF6 钻孔所在的地震剖面图, 显示波向上游迁移(据文献[12], 钻孔位置见图 3)

Fig. 5 (A) Gravity drilling cores FF1-FF6 of sediment wave, which shows that the stoss side is thicker than the lee side. (B) Seismic cross profile of FF1-FF6 drilling, which shows that sediment waves migrated up slope (from reference [12], See Fig. 3 for location of drilling position)

据 Smith 等^[13]提供的 2002—2003 年的定位测量结果:在 24 h 内沉积物波的波峰位置没有变化,而在 6 个月内,原剖面上的沉积物波显著增大。2002 年 9 月,平均波长 36 m,波高 2 m;2003 年 3 月,平均波长 46 m,平均波高 4~5 m。波峰位置显示在 32 d 内,沉积物波向上游迁移的距离为 0

至 5~8 m,最大迁移距离为 22 m(图 6c),虽然 Xu 等^[9]将其解释为沉积物波的叠置,但其结果仍是向上游迁移,这说明浊流通过迎流侧的“优先沉积效应”^[15],使得迎流侧的沉积厚度大于背流侧的沉积厚度,与水流逆行沙波向上游迁移在形式上相同而机理却不同。



(A)位置图;(B)定位观测区沉积物波剖面;(C)32 d内波峰向上游迁移

图6 蒙特利峡谷上部4 km的沉积物波(据文献[11])

Fig. 6 Sediment waves of upper 4 km of Monterey Canyon(from reference [11])

3 成因机理解释

3.1 沉积物波的形成和发育

蒙特利浊积扇上和峡谷中均分布大面积的沉积物波底形,其主要特征之一是向上游迁移(图4~6)。为什么沉积物波不随流而向下游迁移?曾有不同的解释。Wynn等^[16]曾提供一种水流沙波系列的逆行沙波观点。诚然,在形态上浊流沉积物波与水流中的逆行沙波类似,但其成因却大不相同。因为逆行沙波是在牵引流中^[17],流速过大,当弗劳德数(Fr)超过1.3时,沙波顶泥沙顺高流速直接落到前一沙波的迎流侧上,导致沙波向上游迁移^[18]。浊流沉积物波是重力流系列波,其本身含有大量的悬浮物质。浊流在地震、洪水、风暴和滑坡等作用下间断性下泄^[19],下泄时浊流发生漫溢,从而快速沉积到流道以外,形成一条粗粒沉积脊,即初始沉积物波^[20]。在初始波的迎流侧上,浊流流速降低,流内的悬浮物质立即沉降,许多物质首先落于初始波的迎流侧上。又因迎流侧先于背流侧沉积(按斯托克斯定律,悬浮物质沉降速率随时间由大变小),同一次浊流过程其迎流侧获得的沉积必大于背流侧。即上述深海沉积物的优先沉积效应,这即是浊流沉积物波溢堤假说的核心含义。

地质时期里,浊流多次下泄,多次向初始沉积物波的两翼加积,迎流侧总厚于背流侧,导致波的向上游迁移。虽然蒙特利浊积扇和峡谷底滩地上的沉积物波在形态和组成物质上均有差别,但在成因上均出一说。

3.2 沉积物波的时空解释

大部分海底峡谷是深切陆架和陆坡的侵蚀型物质通道,陆缘物质通过峡谷输运到谷口以外的海底扇上,浊流是物质流,当物质丰富和浊流强烈(流速高、流量大)时,就冲切挖掘谷底,快速将悬移物质输送至谷口以外的扇上,导致扇体扩张,其上的沉积物波也随之增大和伸展。若陆缘物质欠缺,或浊流悬浮浓度较低,大量物质就沉积于谷底,在谷底发育谷内沉积物波,而扇区则不能加积。Jobe等^[21]和Lonergan等^[22]将前者称为谷外扇和扇上沉积物波,称后者为谷中和谷中沉积物波。两种波的沉积过程互有牵连,但显示时空差异。蒙特利浊流系统既有谷内沉积物波,又发育扇上沉积物波。两种波形态相同,发育阶段却各具差异。

根据谢帕德曲流(位于图2蒙特利浊积扇上主流道东侧)流道两侧的振动活塞钻孔ANT20、14G、15G、16G和11P等岩心的分析(图7),全新统与更新统的色变(下层为黄色,向上变为灰色)不整合界面¹⁴C年龄为12 400 aBP,该界面以上

的 4~5 m 厚的地层均具清晰的沉积物波层,由近水平的粗、细砂质黏土层组成,夹粗、细砂薄层,按粒度和砂夹层分析,不整合界面以上,砂夹层自下而上由多变少,黏土层不断增多,特别是各岩心(图 7)上部的 30~50 cm 地层均为黏土层,无任何砂的夹层,说明扇的沉积作用和沉积率不断降低,现代浊流下泄物质基本只沉积于谷底滩地,而扇上沉积只限于极细粒的悬浮黏土颗粒(图 7),且沉积率极低,而峡谷内的现代浊流沉积物却含砂质甚至砾质。说明蒙特利扇目前已处于衰败阶段,其上的沉积物波虽然比峡谷沉积物波具有更大的尺度,但已成为残留沉积物波。

的黏土组成)和流道两侧略高于流道的滩地沉积物波。台地系统说明峡谷过去曾经历高位沉积和强烈冲切侵蚀时期。按浊流沉积规律,高浓度和高流速的下泄浊流既能形成高位沉积物,又能靠物质流冲切挖掘谷底。现代仍有浊流下泄,而且按定位观测,下泄浊流流速高达 190 cm/s,谷底流道仍发生溢堤并发育现代滩地沉积物波,该沉积物波以粗粒为主,说明只有极细粒黏土才可顺流输运到扇上。Smith 等^[10]认为现代峡谷处于沉积—侵蚀时期,仅经历了几千年。笔者认为其应当起始于全新世晚期。

按地层不整合界面的出现时间(12 600 a BP),蒙特利浊积扇和扇上沉积物波主要的堆积发育时期应是晚更新世到早全新世,这时正值盛冰期—冰消期的过渡时期,海平面降低达到 130 m 左右,至冰消期有一定的抬升。在低海平面时期,陆源物质多堆积于陆架外缘或陆坡上部,为高浓度、高流速浊流的形成提供了有利条件,其同样是蒙特利扇峡谷台地的冲切—沉积期和扇体(包括沉积物波)的快速发育期。中—晚更新世是冰后期的海平面上升期,大量陆源物质沉积于近岸和陆架,偶尔下泄的浊流物质必然少于低海平面时期,故是峡谷滩地沉积物波的形成发育期和扇体的衰败沉积期。

4 结论

蒙特利浊积扇系统包括 60~250 m 水深的宽阔峡谷段,250~2 900 m 水深的侵蚀 V 形谷段和 2 900~4 700 m 水深的浊积扇流道段。峡谷谷底滩地和扇面上均发育大面积的沉积物波底形。峡谷底宽窄相间,宽阔峡谷段的谷底流道两侧滩地上分布大片沉积物波,波高 2~4 m,波长 30~50 m,波峰相互平行,垂直或斜交于流道,呈波状或新月形延伸,由含有砾石且夹粗、中砂层的砂质粉砂组成。一次定位观测显示,谷底沉积物波在 32 天的观测期内向上游迁移约 0~8 m。

扇面上发育溢堤型沉积物波,其尺度较大,波高 10~100 m,波长 50~2 000 m。在笔直流道段,波峰垂直或斜交于流道延伸;在弯曲流道段,波峰平行于流道延伸。波两翼不对称,迎流侧较长、平缓且更厚,背流侧较短、较陡且更薄,显示向

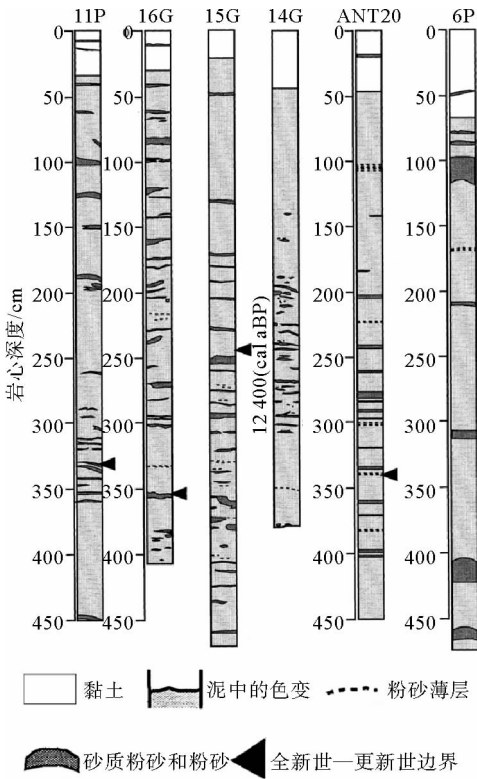


图 7 蒙特利扇上的活塞钻探岩心的粒度及砂夹层状况(据文献[12],岩心位置见图 1)

Fig. 7 Grain size and interbedded sand of piston drilling cores on Monterey fan.

(from reference [12], See Fig. 1 for core location)

峡谷是一个非常活跃的沉积物输运系统,蒙特利峡谷记录了全新世以来复杂的冲刷切割、堆积充填和沉积—侵蚀历史。现代峡谷底上分布有几乎半胶结的台地(高达 20 m,由含有砂、小砾石

上游迁移。沉积物波波高在流道下游方向上逐渐减小,直至消失。由夹细砂薄层的粗、细粉砂质黏土组成,上覆有30~50 cm厚的黏土泥层,该沉积扇应为盛冰期(低海平面时期)发育的残留扇体(和沉积物波),现已进入衰败阶段。

蒙特利峡谷内浊流的物质来源主要是河流输沙(300 000 m³/a)及峡谷壁和谷底的滑塌。根据地层对比和定位观测资料分析,在晚更新世的低海平面时期,浊流物质来源丰富,频繁下泄,发育形成了浊积扇和扇上的沉积物波。在全新世晚期,浊流物源较少,浊流物质多沉积于峡谷底,只有极细粒黏土质悬浮物可以运移至沉积扇上,故扇上沉积物波的形成发育时期应早于谷内沉积物波,且现代蒙特利浊积扇呈萎缩发育阶段。

参考文献:

- [1] Normark W R, Carlson P R. Giant submarine canyons: Is size any clue to their importance in the rock record? [C]// Special Papers-Geological Society of America, 2003: 175-190.
- [2] 钟广法,李前裕,郝沪军,等.深水沉积物波及其在南海研究之现状[J].地球科学进展,2007,22(9):907-913.
- [3] Normark W R, Hess G R, Stow D A V, et al. Sediment waves on the Monterey Fan levee: a preliminary physical interpretation[J]. Marine Geology, 1980,37(1/2):1-18.
- [4] Greene H G, Hicks K R. Ascension-Monterey canyon system: history and development[M]. Bakersfield: Pacific Section of AAPG,1990:229-250.
- [5] McGann M. Paleoenvironmental analysis of latest Quaternary levee deposits of Monterey fan, central California continental margin: Foraminifers and pollen, core S3-15G[R]. Menlo Park: US Geological Survey,1990.
- [6] Mchugh C M G, Ryan W B F. Sedimentary features associated with channel overbank flow: examples from the Monterey Fan[J]. Marine Geology, 2000,163(1/4):199-215.
- [7] Greene H G, Maher N M, Paull C K. Physiography of the Monterey Bay National Marine Sanctuary and implications about continental margin development[J]. Marine Geology, 2002,181(1):55-82.
- [8] Paull C K, Mitts P, Ussler W, et al. Trail of sand in upper Monterey Canyon: offshore California[J]. Geological Society of America Bulletin, 2005,117(9/10):1134-1145.
- [9] Xu J P, Noble M A, Rosenfeld L K. In-situ measurements of velocity structure within turbidity currents[J]. Geophysical Research Letters, 2004,31(9):L09311.
- [10] 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(1):79-94.
- [11] Cartigny M J B, Postma G, van den Berg J H, et al. A comparative study of sediment waves and cyclic steps based on geometries, internal structures and numerical modeling[J]. Marine Geology, 2011,280(1):40-56.
- [12] Normark W R, Piper D J W, Posamentier H, et al. Variability in form and growth of sediment waves on turbidite channel levees[J]. Marine Geology, 2002,192(1):23-58.
- [13] Smith D P, Ruiz G, Kvitek R, et al. Semiannual patterns of erosion and deposition in upper Monterey Canyon from serial multibeam bathymetry[J]. Geological Society of America Bulletin, 2005,117(9/10):1123-1133.
- [14] Lee H J, Syvitski J P M, Parker G, et al. Distinguishing sediment waves from slope failure deposits: field examples, including the "Humboldt slide", and modelling results[J]. Marine Geology,2002,192(1):79-104.
- [15] Oiwane H, Ikehara M, Suganuma Y, et al. Sediment waves on the Conrad Rise, Southern Indian Ocean: Implications for the migration history of the Antarctic Circumpolar Current[J]. Marine Geology, 2014,348:27-36.
- [16] Wynn R B, Stow D A V. Classification and characterisation of deep-water sediment waves[J]. Marine Geology, 2002,192(1): 7-22.
- [17] 钱宁,万兆惠.泥沙运动动力学[M].北京:科学出版社,2003.
- [18] Allen J R L. Sedimentary structures: their character and physical basis[M]. New York: Elsevier,1982.
- [19] Rebesco M, Hernández-Molina F J, Van Rooij D, et al. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: state-of-the-art and future considerations[J]. Marine Geology,2014,352:111-154.
- [20] Symons W O, Sumner E J, Talling P J, et al. Large-scale sediment waves and scours on the modern seafloor and their implications for the prevalence of supercritical flows [J]. Marine Geology,2016,371:130-148.
- [21] Jobe Z R, Lowe D R, Uchytel S J. Two fundamentally different types of submarine canyons along the continental margin of Equatorial Guinea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011,28(3):843-860.
- [22] Lonergan L, Jamin N H, Jackson C A L, et al. U-shaped slope gully systems and sediment waves on the passive margin of Gabon (West Africa)[J]. Marine Geology, 2013,337:80-97.

SEDIMENT WAVES ON THE TURBIDITE FAN AND CHANNEL IN MONTEREY BAY, CALIFORNIA, USA

FU Jianjun¹, ZHUANG Zhenye¹, CAO Lihua¹, CHEN Changxiang¹,
YANG Shunliang², ZHAO Dongbo²

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Ocean Research Institution, Fujian Province, Xiamen 361013, China)

Abstract: The Monterey canyon, which is a well known canyon system in California, USA about 90 km long, cuts through the shelf and the continental slope and forms a turbidite fan of 95600 km² at the canyon mouth of about 2 900 m in depth. The bottom of the canyon and the fan is decorated with large areas of deep-water sediment waves. The sediment wave on the fan is about 30 ~ 100 m in height, with a wavelength of 1~2 km. In the straight channel, the wave crests are perpendicular or oblique to the channel axis, while in the curved channel, the crests are parallel to the channel axis. Waves are asymmetrical with longer stoss side and shorter lee side, indicating a moving up slope. The sand wave consists of silty clay with fine sand intercalations, and the top is covered by a thin layer of clay with a thickness of 30~50 cm. It is supposed to be a residual sediment wave developed during the Late Pleistocene to the Early Holocene at low sea level. Sediment waves are also developed on both sides of the main channel. They are similar to those on the fan, but small in scale. Wave crests are wavy or crescent-shaped. They are composed of sandy silt deposits with coarse sand and small gravel intercalations. It is supposed to be deposited during late Holocene when sea level was rising. For the meantime, sea level is high, most of the terrigenous sediments deposited in nearshore water and on continental shelf. Turbidity flow was discharged on the bottom of the canyon. Only few extremely fine grained materials were deposited on turbidite fan to form sediment waves.

Key words: continental slope; turbidite fan; canyon; channel; sediment wave