

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019111101

海山对深水底流沉积过程及演化的影响研究进展

王星星^{1,2}, 蔡峰^{1,2}, 吴能友^{1,2}, 李清^{1,2}, 孙治雷^{1,2}, 吴林强³

1. 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071
2. 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 青岛 266071
3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

摘要: 海山是广泛分布于深水区的一种构造地貌类型, 底流则是一种长期存在于深水区的沉积动力, 故二者之间将会不可避免地发生相互作用, 对深水沉积过程及其演化具有不可忽略的控制作用。通过归纳总结全球海山区底流沉积过程研究成果, 指出在海山的直接或间接作用下, 深水底流沉积动力受到影响, 流动路径发生改变, 产生次级底流沉积动力, 同时也可影响生物群落分布, 进而导致海山区沉积地貌及岩相表现出独特的平面展布特征。随着海山区底流沉积动力和沉积地貌背景的垂向演变, 不同时期底流沉积过程及其响应也有所差异。因此, 海山区底流沉积动力复杂且具特殊性, 造就了不同于开阔陆坡背景下的底流沉积地貌和岩相特征及时空分布规律, 其对深海盆地构造和古海洋演化的指示意义也与开阔陆坡底流沉积体系有所不同。目前有关海山与底流沉积过程之间的耦合关系研究程度还相对较低, 极大地限制着深水资源勘探和地质灾害预测, 这一问题有必要在未来深水沉积学研究中给予重点关注。

关键词: 海山; 底流; 沉积过程; 沉积演化; 耦合关系

中图分类号: P736.2 文献标识码: A

Research progress in seamount influence on depositional processes and evolution of deep-water bottom currents

WANG Xingxing^{1,2}, CAI Feng^{1,2}, WU Nengyou^{1,2}, LI Qing^{1,2}, SUN Zhilei^{1,2}, WU Linqiang³

1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China
3. Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China

Abstract: Seamount is a kind of tectonic geomorphological features widely distributed in the deep sea around the world, where bottom currents persistently exist, thus the interactions between seamounts and bottom currents are very common and will bring about non-negligible influence on deep-water sedimentation and their evolution. This study summarized the global researches on the deep water sedimentation by bottom currents around seamounts, suggesting that deep-water bottom-current hydrodynamics would change under the direct or indirect influence of seamounts, including the changing in flow paths, generation of secondary bottom currents, and variation in ecosystems. Consequently, deep-water sedimentary morphologies and lithofacies would display special distribution patterns. With the evolution of bottom-current hydrodynamics and sedimentary morphologies, deep water sedimentation processes and associated responses would change as well. In summary, bottom currents are complex and special around seamounts, resulting in sedimentary morphologies and lithofacies features as well as distribution patterns differing from those on the open slope. Thus, the sedimentary morphologies and lithofacies formed under bottom currents around seamounts have very particular implications for basin structures and palaeoceanography evolution. However, there is still lack of study concerning the coupling relationship between seamounts and deep water sedimentation processes, greatly limiting deep-sea resource exploration and geo-hazard study, thus more attention is required to be paid to the relationships in the future research of deep-water sedimentology.

Key words: seamount; bottom current; sedimentary processes; sedimentary evolution; coupling relationship

海山是广泛分布于海洋中的一种重要构造地貌类型, 全球仅高度超过 100 m 以上的海山数量约 25 000 个^[1-2]。目前, 研究发现海山不仅在宏观上影

响沉积可容空间的分布、规模以及沉积物的搬运路径^[3], 而且在微观尺度上影响深水沉积动力(尤其是深水重力流和底流, 如温盐环流、内波等)的产生、

资助项目: 国家重点研发计划“冷泉系统发育的地质条件及控制作用”(2018YFC0310001); 国家自然科学基金重点项目“西太平洋地球系统多圈层相互作用”(91858208); 中国地质调查局海洋地质调查专项项目(DD20190819)

作者简介: 王星星(1991—), 男, 博士, 主要从事深水沉积学方面的研究工作, E-mail: Xingx_Wang@hotmail.com

收稿日期: 2019-11-11; **改回日期:** 2020-01-10 周立君编辑

强度以及传播路径,进而对深水区的沉积演化过程产生重要的控制作用^[4-7]。

在深水区众多的底流作用中,温盐环流作用尤为普遍和重要,曾被海洋地质学家 Heezen 等认为是一种长期存在于大陆边缘、沿陆坡等深线流动的沉积动力,并将其称之为“等深流”(contour current),它们通常对深水沉积物进行侵蚀、悬浮及再搬运,进而对深水地貌产生塑造作用^[8]。但“等深流”这一概念自提出之后,在物理海洋学界一直饱受争议,目前的观测结果也表明温盐环流并非严格按照等深线流动^[9-10]。因此,笔者认为将沿陆坡流动的温盐环流称为底流可能更为合理。诚然,深水区还包括其他沉积动力,如内波、内潮汐、海底风暴等,目前广义的底流也将其包含在内^[11]。由于本文将重点讨论长期沿陆坡流动的温盐环流与海山之间的相互作用,因此,下文所涉及到的底流沉积过程主要是针对温盐环流为主的底流沉积过程。

底流沉积是深水陆坡重要的组成部分,遍布全球各个陆缘^[3,11-12](图1)。由于底流沉积具有相对较高的沉积速率,其通常被作为揭示高分辨率的古气候、古海洋以及构造演化信息的重要介质^[13];与此同时,目前的全球研究也显示,底流沉积不仅仅局限于细粒沉积,在相对高流速底流背景下,也可形成砂质(甚至砾质)底流沉积,并且长期受强底流筛析改造的砂质沉积物,分选性较好,泥质含量低,横向—垂向连通性较好,是一种潜在的深水油气储层^[14-15]。

底流沉积动力(主要包括整体强度、变化程度、流速、流向等参数)对地球内、外动力作用(如断裂、岩浆活动、海平面变化、气候变化等)的响应较为敏感,特别是在复杂地形条件背景下,底流沉积在时空上表现出显著的差异性,进而影响陆缘的沉积演化过程和深水油气储层的形成分布^[11]。

鉴于全球广泛分布的海山和长期存在的底流作用,探讨深水地区海山与底流沉积过程之间的耦合关系,对于揭示全球不同陆缘地区沉积演化过程以及油气资源勘探均具有积极意义。近年来,国内外学者已就这一问题展开了研究,取得了一定的进展^[4-6],但与深水重力流沉积相比^[16-17],目前关于深水底流沉积的研究程度还相对较低,尤其是海山对底流沉积过程及演化的影响研究显得比较薄弱^[6]。因此,本文通过分析全球各地区海山与底流沉积过程之间耦合关系,归纳总结海山对底流沉积演化过程的影响机制,指出其重要意义,以期引起更为广泛的研究;与此同时,本文也对其存在的问题进行初步评述,以期为后续研究提供方向。

1 海山对底流沉积动力的影响

1.1 海山对底流沉积动力的直接影响

海山对底流最直接的作用主要体现在对流速(包括方向与大小)和涡旋两方面产生影响。实验

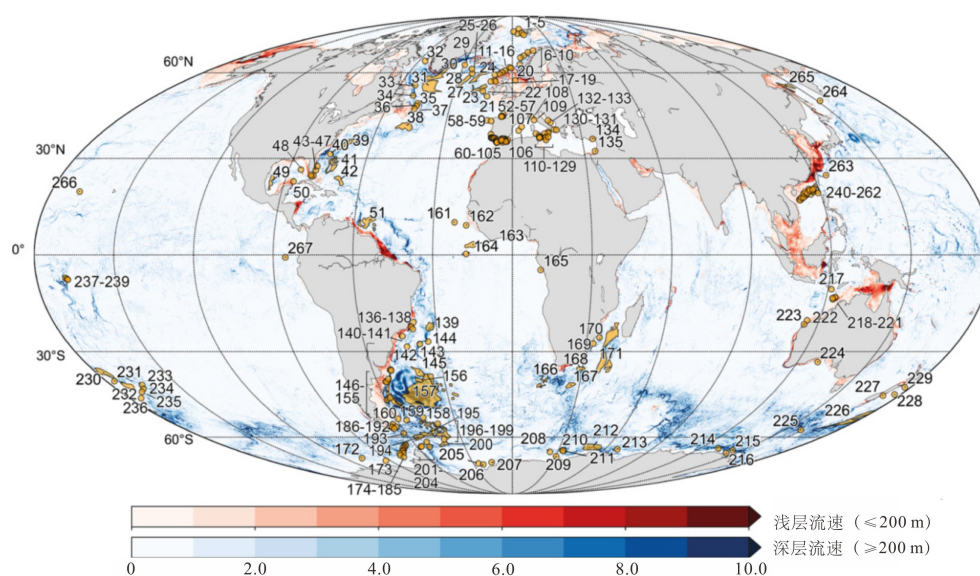


图1 全球底流沉积与底流年平均流速分布叠合图

数字代表全球底流沉积统计实例序号,统计数据见文献[12]。

Fig.1 Global distribution of bottom currents superimposed with annually mean flow velocity

The numbers indicate the sites for the case studies on bottom current around the world, modified from reference [12].

室的模拟研究^[18-19]与野外的实测资料(如北太平洋的 Emperor Seamount Chain^[20])均表明,温盐环流会在流经海山时发生相互作用,改变流场结构特征。不同形态的海山,所对应的流场结构也有所差异。由于科氏力作用的存在,流经海山的底流流场结构一般表现出不对称性,即在北(南)半球,顺流向下流方向观察,海山左(右)侧的底流动力更强;与此同时,由于流场不对称结构的存在,流经海山的底流会发生一定的回流作用并被局限于海山区,从而形成了反气旋式涡流泰勒柱^[21](图2)。泰勒柱的形成受科氏力影响较大,一般随着纬度的减小,对应流场的不对称性逐渐减弱,泰勒柱也向赤道附近逐渐消失。但是,随着流速的增大,位于海山顶部的泰勒柱也会随之发生“逃逸”^[21]。实验室模拟结果显示,海山与底流之间的交互作用主要取决于罗斯贝波数($R_0=u_0/fD$),其中 u_0 代表平均流速, f 代表科氏力参数, D 代表海山直径。随着 R_0 的不断增大,流经海山的底流流场结构会有所差异,逐渐由完全附着流态向背风坡附着涡旋和涡旋脱落状态转变^[19](图3)。对于特定地区的特定海山,所对应的 f 与 D 均是确定的,此时海山区的流场结构变化主要取决于底流流速的变化。受海水层化结构的影响,高程较大的海山将会在不同的水深层段受到不同水团的影响,所对应的沉积动力(流速, u_0)随之不同,与此同时海山规模(D)向上也逐渐变小,最终导致不同水深层段所对应的沉积动力有所差异,例如 Roden 通过对加州西侧 Fieberling 海山群地区的研究发现,不同水深层段底流性质(如温盐、速度大小与方向等参数)存在差异,这使得底流—海山之间的交互作用在不同的水深层段也随之表现出不同特征^[22]。

由于全球大部分陆缘地区的海山呈群分布,而非孤立分布,因此, Zhang 和 Boyer 通过实验室模拟分析了多个相邻海山对底流沉积动力的影响。模拟结果表明,多个海山所构成的海山群与孤立海山对底流所造成的影响在总体上表现出一定的相似性,两种情况均是随着 R_0 的增大,流场中的涡旋由附着状态向脱落状态转变^[4]。但是,二者之间也还存有一定的差异,海山群的空间分布对底流沉积动力影响较大,一般随着海山之间的距离、海山的分布、底流的流速和流向等参数的变化,海山群区所对应的流场特征也随之发生改变(图3B, C, D)。例如,当两海山之间连线与底流流向呈 45° 夹角时,随着流速的减小,流场特征逐渐由波状形态向滞留状态、气旋和反气旋式涡旋链状态转变(图3B, C);当海山之间距离相对较大时,海山彼此之间的相互影响减弱,表现为两个独立的海山-底流作用体系,但是这种情况下脱落的涡旋之间表现出较为复杂的相互作用;当海山中心连线与流线夹角呈 -45° 时,仅在流速为0时表现出与夹角为 45° 时不同的流场结构。此外, Roden 的研究指出,当海山根部之间距离相对较小,而上部距离较大时,垂向上的流场结构不同:底流下部将很少穿过海山间隙,而是将海山群作为一整体绕行而过;而上部底流在流经海山群时表现出复杂流态,其中包括流经海山间隙的喷射流^[23]。

1.2 海山对底流沉积动力的间接影响

海山不仅可以对深水底流沉积动力产生直接影响,还可以通过诱发其他类型的海洋动力(如内波、中尺度涡等)来间接影响深水底流的沉积动力。在正压潮作用下,海山附近的底流会随着潮流

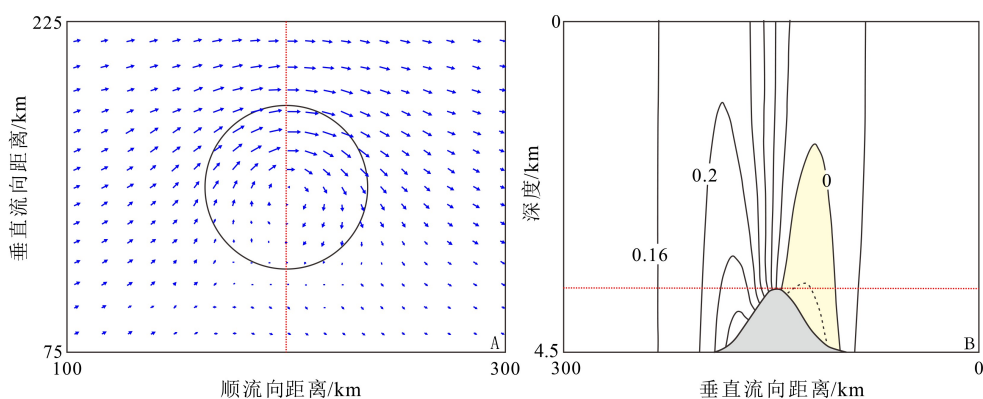


图2 对称海山附近底流流速平面分布(A)和垂直流向纵剖面(B)

B中流速单位为m/s,黄色指示反向流速(据文献[21]修改)。

Fig.2 Plan view(A) and vertical cross-channel section(B) for the flow velocity distribution of bottom currents flowing through the axisymmetric hill (The velocity unit in B is m/s, the yellow indicates negative velocity) (Modified from references [21]).

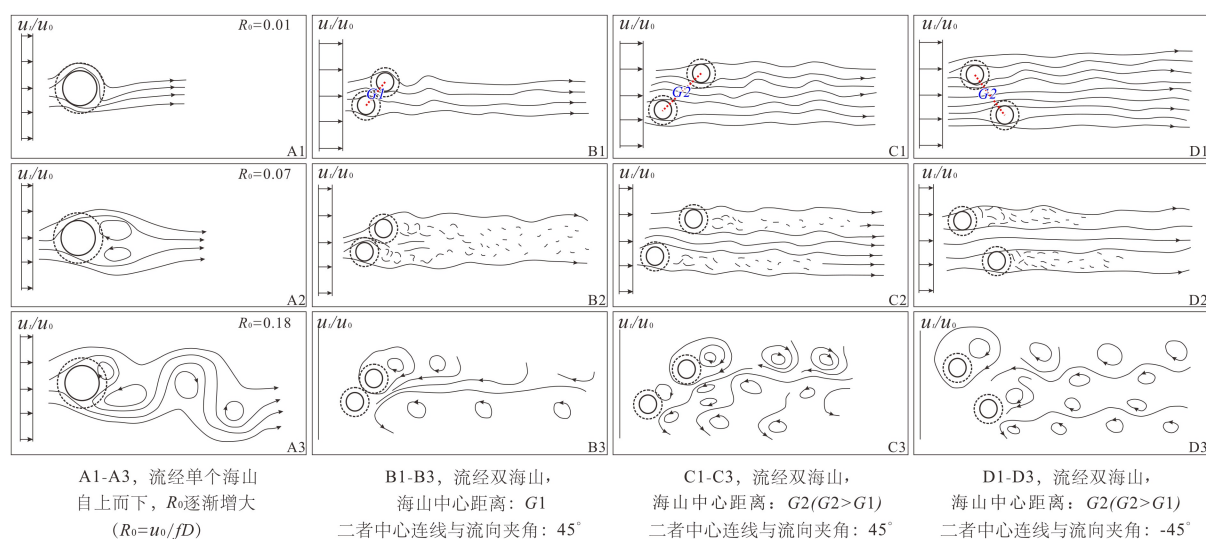


图 3 流经海山的底流流场特征图

u_t 代表随时间变化的实际流速, u_0 代表平均流速, f 为科氏力参数, 约为 $10^{-4}/s$, D 为海山底部直径 (据文献 [4, 19] 修改)。

Fig.3 Diagrams showing the flow-field features of bottom currents flowing through seamounts

u_t indicates the actual flow velocity varied with time, u_0 indicates the mean flow velocity, f is the Coriolis parameter, $\sim 10^{-4}/s$,

D represents the seamount diameter at the seamount base (modified from references [4, 19]).

作用发生一定程度的增强或减弱, 对应流速最大可以达到 40 cm/s 以上 [24-26], 尤其是在走向垂直于底流流向的伸长状海山/海岭地区 [27]; 与此同时, 底流在流经海山地区时, 也可以激发内波/内潮 [28]、背风波 (lee waves) [29] 以及海山俘获波 (seamount-trapped waves) 等作用 [30-31], 这些次生的海洋动力也会对地区沉积动力产生影响。

全球海洋中还广泛发育直径为 $10 \sim 500 \text{ km}$ 、水平旋转且持续时间较长 (可达数天至数月) 的中尺度涡旋, 它们对深水底流速度场具有重要影响 [32-36]。Thran 等对全球的底流沉积分布进行了统计分析, 结果表明, 漂积体主要是在间歇性地高流速时期所形成, 而中尺度涡旋则是底流流速波动的关键因素之一 [12]。值得注意的是, 中尺度涡旋在海山、海脊地区 (如大洋中脊, 西南印度洋脊以及南海东沙陆坡区), 更易于激发沉积动力更强的亚中尺度涡旋对底床沉积物进行再悬浮和搬运, 同时也有助于深水物质随底流进行长距离搬运, 进而对深水底流沉积过程产生重要影响 [7, 12, 34-36] (图 4 和 5)。

因此, 不论是海洋上层由气候变化所导致的中尺度涡, 亦或是潮汐作用及其与复杂地形作用所产生的次生动力, 均会对海山区的底流作用产生影响; 加之科氏力的影响, 海山附近的底流活动变得较为复杂。总体来看, 随着不同地区的海山规模、形态及分布的变化, 地区之间的底流流场也是不尽相同的 (表 1), 这使得我们在参考前人所建立的深水沉积动力模式时一定要对其前提假设条件予以

谨慎明确 [4, 22, 37], 而不能直接照搬模式。

2 海山对底流沉积地貌形成展布的影响

沉积地貌是深水沉积动力的响应结果, 长期以来, 学者们通过对水文观测结果与地貌参数之间的耦合关系进行分析 (如文献 [39-40]), 探讨深水地貌的形成过程, 力图揭示底流沉积地貌与沉积动力之间的半定量-定量关系 [5] (图 6), 据此通过地貌参数去估算无水文观测地区的底流流速或者古海洋动力信息。由前述分析可知, 海山区底流沉积动力较为复杂, 这就导致毗邻海山地区的地貌类型、特征及时空分布也较为复杂。一般来说, 海山迎流一侧底流流速有所增强, 主要表现为侵蚀地貌特征, 而下游一侧则是底流的“阴影区”, 对应相对较低的流速, 主要发育伸长状和丘状漂积体, 因此, 根据该特征可以辅助分析古海洋环流的流动方向 [4, 5, 41] (图 6B-D); 对于海山两侧, 底流沉积动力相对较强, 因而多表现为侵蚀水道, 并且在科氏力的作用下, 海山两侧的等深流沉积动力不一, 在流速较高一侧底流水道特征更为显著 (图 6A), 如北大西洋的 Rosemary 海台 [40]、南海北部一统暗沙 [42]; 对于多海山发育地区, 海山之间主要发育限制型漂积体, 其两翼毗邻海山内缘多表现为底流水道, 而外缘则以漂积体为主 [38]; 在潮汐作用下, 流经海山的底流所激发的内波、背风波、海山俘获波等次生海洋动力作用也可以对海山顶部造成一定的侵蚀; 此外,

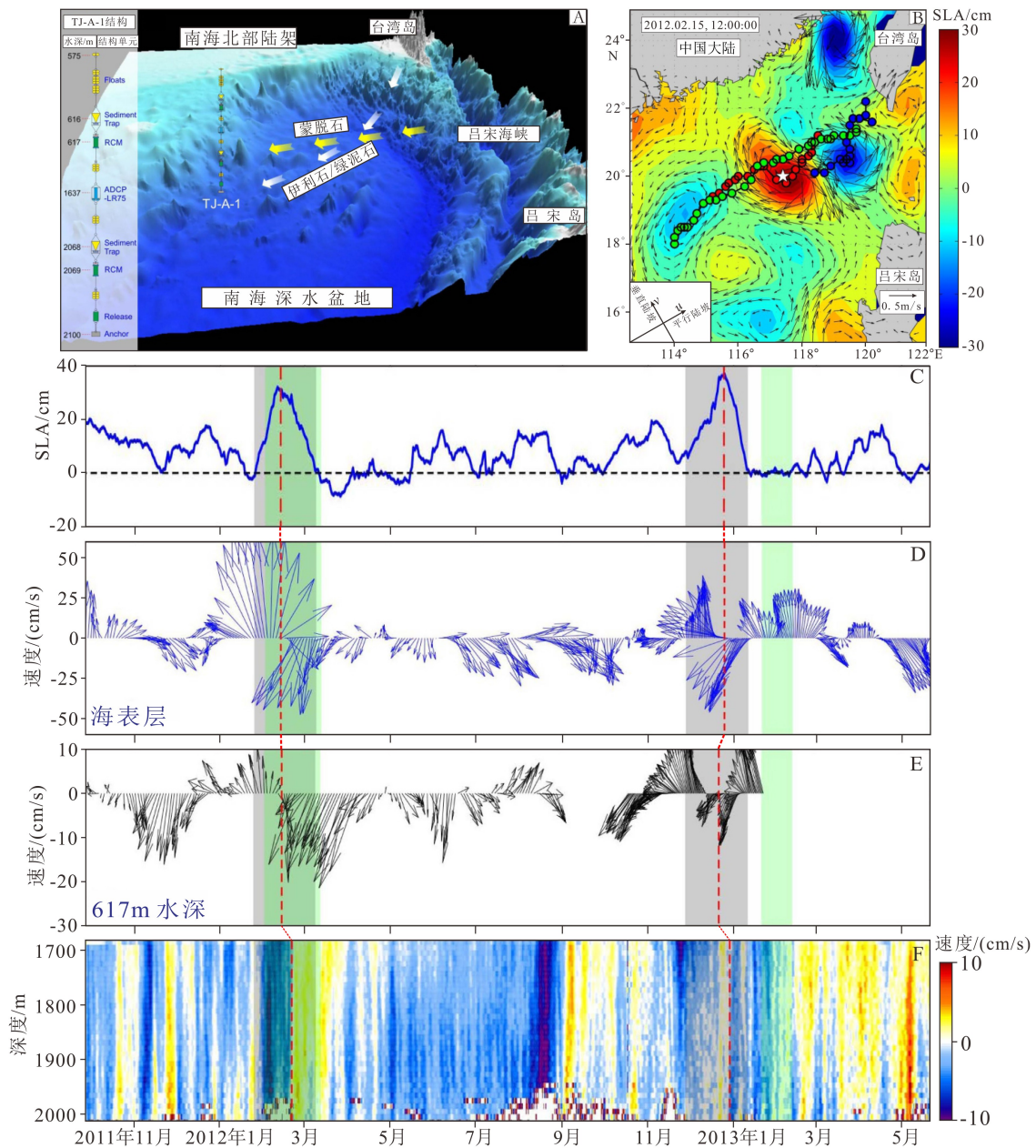


图4 南海北部地貌图 (A) 和南海北部海平面异常 (SLA) 与表层流速度平面分布图 (B) 及南海东沙陆坡地区 TJ-A-1 站原位观测结果 (C-F) [35]

Fig.4 (A) Bathymetric map for the northern South China Sea; (B) Map of sea level anomaly (SLA) with surface geostrophic current velocity; (C-F) In-situ observed results at the site TJ-A-1 on the Dongsha slope, South China Sea [35]

由于底流对海山根部侵蚀作用的长期效应,其也可能导致山体的不稳定而形成海山滑坡[40]。

然而,目前对深水地区的长期观测数据还较少,极大地限制了对海山地区沉积动力特征的系统认识,使得海山周围沉积地貌的成因模式还存在有争议,如 Howe 等对 Rosemary Bank 海山展开进一步的研究后指出,Robert 等提出的涡旋模型并不能解释该地区海山周围底流水道的演化与持续,而是认为该地区水道主要是受西北向底流的侵蚀所形成[39-40]。当前所建立的深水沉积地貌成因模式大多是仅考

虑单一类型沉积动力,并且源于不同地区之间的模式具有较大的差异性[6]。此外,目前关于海山对底流沉积过程的影响模式,多数还局限于定性讨论影响的存在性,而缺少机理性分析深入探讨海山形态规模特征对底流沉积过程的影响机制。

3 海山对底流沉积岩性展布规律的影响

据全球不同陆缘地区底流沉积物的岩性分析结果可知,深水底流沉积的粒径范围较广,从泥质

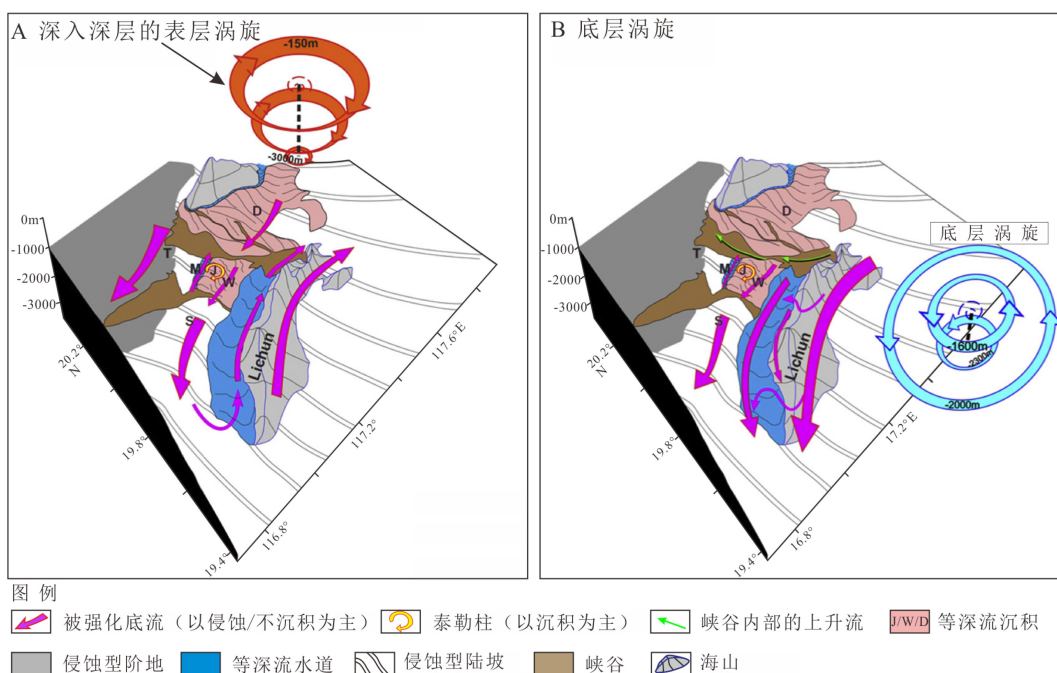


图 5 流经海山区的中尺度涡旋所导致的底流的流场分布示意图

A 指示深入深层的表层涡旋情形, B 指示底层涡旋情形 (据文献 [7] 修改)。

Fig.5 Diagram for the flow patterns influenced by mesoscale eddies passing through seamount

A indicates the scenario dominated by surface deep-reaching eddy, B indicates the scenario dominated by bottom eddy (modified from reference [7]).

表 1 海山对底流沉积动力影响

Table 1 Seamount influences on bottom-current dynamics

影响因素	对底流沉积动力的影响
海山形态、规模	(1) 相比于圆锥形海山, 伸长状海山更容易导致底流沉积动力增强, 并且增强幅度与海山高度呈正相关 ^[27] ; (2) 底流沉积动力随坡度的增大而有所增强 ^[14] , 故坡度较陡的海山受到的侵蚀作用更强; (3) 当海山高程较大时, 将导致海山周围斜坡在垂向上受到不同底流的影响, 所对应的底流沉积动力与沉积响应也有所差异;
底流流向与伸长状海山走向的关系	(1) 垂直: 迎流一侧底流强度更大, 易于造成侵蚀; 背流一侧易于激发内波作用继续向前传播 ^[6] ; (2) 平行: 底流顺坡侵蚀, 尤其在坡脚处底流强度相对较大, 易于形成底流沟道 ^[38] ; (3) 斜交: 底流流向易于发生改变, 平行海山走向分量可沿斜坡走向进行侵蚀 ^[38] ;
海山群空间分布	随着海山间中心连线的距离和走向的改变, 海山区底流沉积动力也随之发生改变。但是, 目前该方面研究程度还相对较低, 主要集中在早期的数值模拟研究方面 ^[4] , 还需要展开进一步的研究。

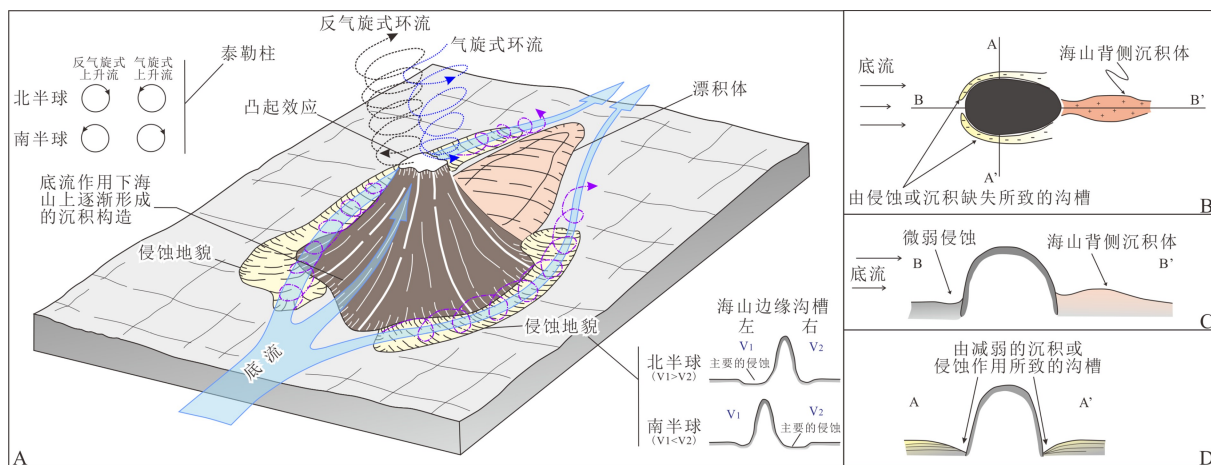


图 6 海山附近底流沉积动力及沉积地貌分布模式图 (A) 和海山附近底流沉积地貌平面以及横、纵剖面示意图 (B—D) ^[5]

Fig.6 (A) Schematic block diagram showing the distribution of sedimentary dynamics and the associated morphologies near seamount,

(B-D) Horizontal, longitudinal and cross profiles showing the contourite morphologies near seamount^[5]

到砾质沉积均有发育,其形成分布直接受控于底流强度和物源供给两方面,这二者通常对冰期-间冰期旋回和深水地貌变化表现出较为敏感响应^[41]。随着冰期-间冰期旋回变化,季风气候与海平面随之而发生改变,进而影响海洋沉积动力结构(如水团结构、流速等)和能够输入深水区的粗粒沉积物组分含量,最终导致深水底流沉积岩性发生变化,如乌拉圭陆坡地区^[43]。而对于来自地貌的影响而言,其主要是通过控制局部底流沉积动力而影响相应的岩性分布,在海底地形突变处(如海山)表现尤为突出。海山区的底流沉积动力随着远离海山而总体减弱,因此,细粒沉积(泥质和粉砂质)为主的漂积体主要是分布在海山外缘;而紧邻海山/海岭周缘发育的底流水道中,沉积物粒度相对较粗,可以见到砂质,甚至砾质沉积,如Cadiz湾地区的底流水道^[44]。长期的底流侵蚀作用也会导致海山陡峻的山体发生滑塌,从而使得海山周缘的底流水道中也可见到碎屑角砾的夹层^[40]。对于海山顶部,温盐环流、潮汐与海山的相互作用下所产生的内波、内潮、海山俘获波等多种沉积动力较强的次生底流,使得海山顶部受到侵蚀,泥质沉积相对较少,通常可以见到筛选程度较高的砂质沉积,尤其是生物碎屑砂,如有孔虫砂^[45-47]。与此同时,在海山周缘较强的底流沉积动力作用下,底床沉积物发生再悬浮而产生深水泥质雾状层,这些雾状层为海山周缘或底流下游的泥质漂积体的发育提供了必要的物质条件^[48]。此外,目前已有大量的研究结果证实,底流可以对早期重力流沉积进行改造,形成底流改造砂,如加的斯湾^[44]、南海珠江峡谷上游^[49]。据此可以推断,海山周缘斜坡坡度较大,易于在底流、构造活动的作用下发生滑塌,进而在海山坡脚处形成重力流沉积,这些重力流沉积随后易于被加强后的底流进行改造,其中的细粒沉积物受到筛析,最终形成底流改造砂,笔者已在东沙陆坡海山区发现相关证据(图7)。砂质底流沉积也在近年来受到石油公司越来越多的关注,成为未来深水油气勘探开发的一个潜在方向^[44]。然而,目前关于底流沉积岩性在空间上的展布模式研究较少,还需要对其展开进一步的探讨。

与此同时,受海山周围沉积动力的影响,相应的沉积物供给与分布也受到影响,尤其是对内源生物碎屑,以及来源于海底冷泉、热液的化学成因物质^[34]。由底流和海山相互作用所形成的泰勒柱可以在海山上持续相对较长的时间,其可以对水体中温-盐扩散、营养物质以及一些形体较小的生

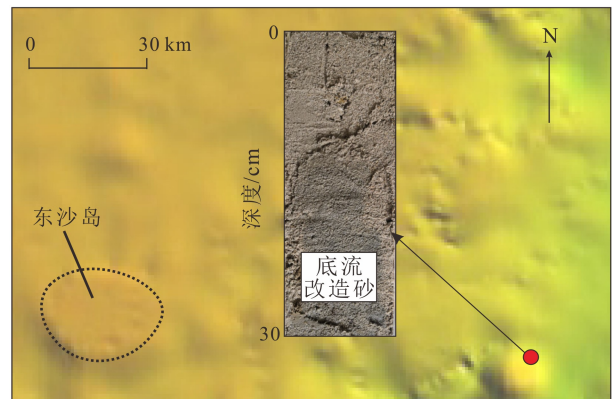


图7 东沙陆坡海山区底流改造砂

Fig.7 Reworked sands under bottom currents around the seamount on the Dongsha Slope

物群落造成“围限”作用(图8),对于生物群落的分布以及水体之间的交换均具有重要影响^[20,50-51],因此该过程可能是控制深水区生物碎屑分布的一个重要作用,富含生物碎屑的沉积体对于深水天然气水合物的成藏具有积极的意义,例如韩国Ulleung盆地和我国南海北部地区的高饱和度水合物藏多数是发育于该种类型的储层中^[52-53],但是这种储层具体的形成机制目前尚不明确。此外,目前的观测结果业已证实,深水底流可以随着中尺度涡旋的移动对热液喷口喷出物质进行再搬运沉积,如东太平洋洋隆地区^[34];对于冷泉和热液同时发育的地区,二者之间可以发生相互作用,而底流很可能是二者联系的重要纽带之一,如我国东海的冲绳海槽^[54]。从冷泉和热液所喷出海底的物质中含有大量的生命必须元素,这些元素随着底流的搬运并在下游地区沉积,进而对深海生物群落以及生物基因流的分布也会产生重要影响,因此,对于海山区底流沉积动力的理解对于深海生命的起源研究也有着重要意义^[34]。

4 海山对底流沉积层序长期演化的影响

鉴于深水底流作用的长期存在,其随地球内(构造)、外(气候)动力变化的响应,可以在地层中得到记录。尤其当底流受海山地形影响时,所对应的沉积响应较地貌平缓地区有所放大,发育更为典型的等深流沉积特征,进而可以有效地指示盆地构造、气候以及古海洋等方面的演化历史信息^[6,11]。值得注意的是,根据发育期次,海山可以分为两种类型:形成之后不再活动的海山;形成之后仍继续间歇性喷发的海山。两种类型海山对底流沉积演

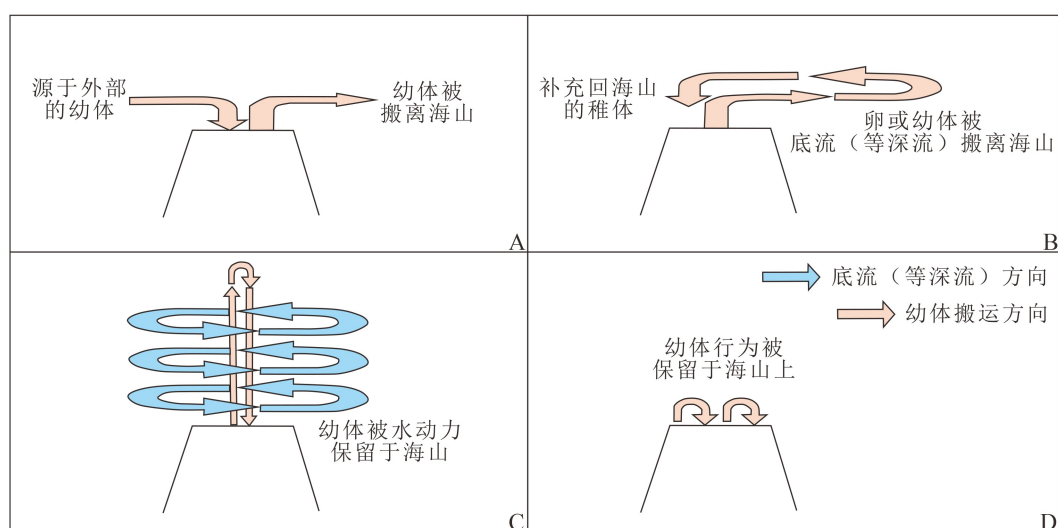


图 8 海山之上受水动力影响的生物群落补充过程示意图^[51]

Fig.8 The diagram showing the hydrodynamics-influenced recruitment of species populations living on seamount^[51]

化的影响也有所不同。

对于前者而言,海山会随着后续沉积作用而逐渐被覆盖,从而使其规模减小,形态改变,对底流沉积过程的影响势必也会发生改变。Chen 等对南海西沙海槽附近的海山与底流沉积演化过程进行了探讨,结果表明,在海山的影响下,早期底流沉积表现为“漂积体-水道复合体”特征,且壕塹主要是分布在海山左侧(向下游方向看),但随着海山不断埋藏,会在早期水道的基础上继续发育底流水道,并在其间沉积限制型漂积体^[55](图 9)。该演化模式较好地揭示了单个海山对底流沉积层序演化的影响,但其主要是基于垂直流向的二维剖面所得到的演化模式,尚未揭示其他方向的剖面模式,忽略了海山形态规模在三维空间上的变化,同时也未对比不同形貌海山所对应的底流沉积演化过程。

对于后者而言,海山间接性地喷发可以使得海山高度在随周围沉积充填而减小时得到适时地“恢复”,保证其长期矗立在海底表面之上。在该作用下,海山周缘的底流沉积动力也将会表现出长期的旋回性,即随海山埋藏而减小,但随海山的再次喷发抬升,其动力会得到一定回弹,从而使得海山周缘的底流水道和显著的丘状底流漂积体发育时期也会相对较长,并且底流水道中可能夹有海山侧缘滑塌沉积体。Cadiz 湾南部 Pen Duick 地区的底流沉积演化过程就与该地区的泥火山喷发和海脊的构造抬升活动具有动态的耦合关系^[56],由此推测岩浆火山区也极有可能发育类似的耦合过程。因此,对于该类型海山周缘的底流水道的发育很可能会表现为多期次逐渐减弱的旋回式发育特征,这主要

是受控于海山间歇性地喷发抬升,而不能将其归咎于海洋环流背景的周期性变化。但截止目前,该类型海山与底流沉积演化之间的耦合关系研究还相对较少,在一定程度上限制了我们对盆地构造和古海洋演化历史的准确把握。

5 结论与展望

深水底流作用在海山地貌条件下复杂多变,其对海底地貌的塑造、沉积物(包括化学成因物质)的分配以及长期的层序演化产生重要影响。因此,深水海山区的底流沉积作用在深水沉积演化过程的研究中具有不可忽略的地位。但是,目前关于海山与底流之间的相互作用研究还相对较少。本文通过系统总结分析全球海山区底流沉积动力及其相关沉积演化过程,主要取得以下四点认识:

(1)海山对底流沉积动力的影响作用可以分为直接和间接两种方式。前者是通过地貌作用直接导致底流发生流线改变、流速加强及涡旋产生作用;后者则是通过海山区潮流、中尺度涡旋及其所伴生的内波、内潮和背风波等其他动力的作用,来间接影响底流的沉积动力。

(2)海山区的底流沉积动力复杂多变,使得相应底流沉积地貌的形成分布也受到影。海山上游区和顺底流流向的海山两侧沉积动力较强,多表现为侵蚀地貌,但在科氏力的作用下,海山两侧侵蚀程度有所差异;海山外缘沉积动力减弱,以漂积体为主;海山背流一侧表现为沉积动力的“阴影区”,也以丘状沉积为主;由于底流在潮汐作用下流

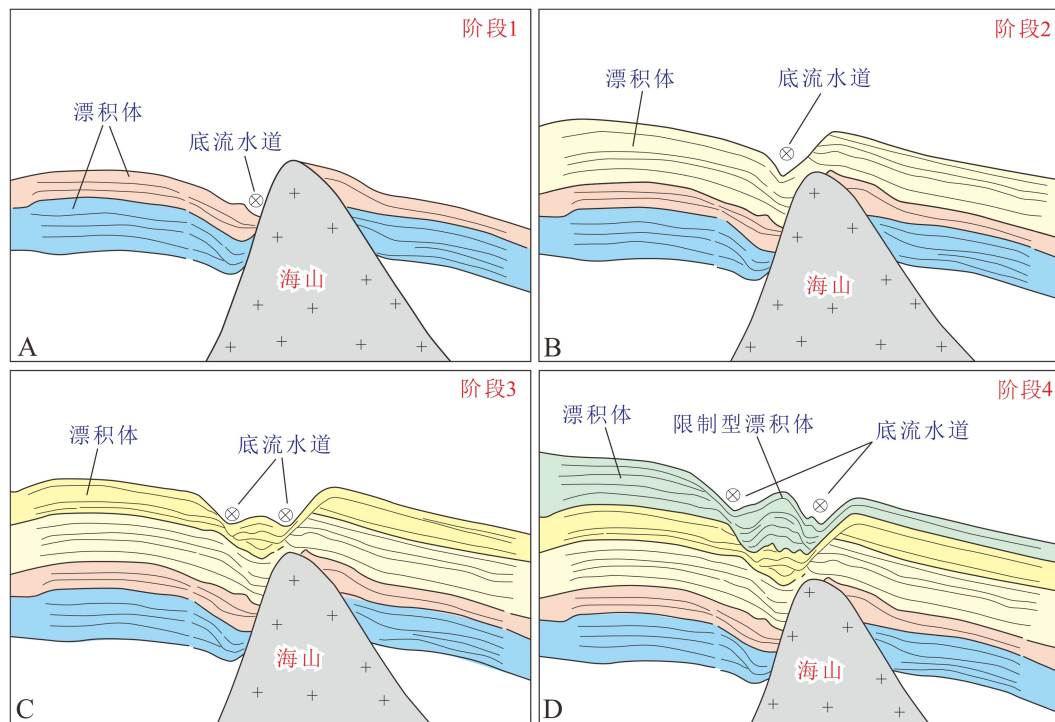


图9 海山区底流沉积层序演化过程示意图^[55]

Fig.9 Diagram showing the bottom current sequence evolution around a seamount^[55]

经海山顶部时易于触发内波等较强的次生沉积动力,其可以对海山顶部造成一定的侵蚀。

(3)海山区的沉积物展布与沉积动力强弱分布具有较好的对应关系,强底流区对应的沉积物粒度相对更粗,是底流改造砂富集的潜在地区。与此同时,海山区特殊的沉积动力分布会对水体中营养物质分布产生影响,进而在一定程度上对生物群落以及生物基因流的展布具有控制作用,其响应最终在深水沉积物中有所体现,海山区的生物碎屑富集可能在很大程度上受控于该区域底流流场结构与强度。

(4)对于稳定和间歇性喷发抬升的两种类型海山,其周缘底流沉积层序的演化过程具有不同的响应特征。如果底流强度变化较小,稳定海山周缘的等深水道规模向上逐渐减小,而对间歇性喷发抬升的海山周缘底流水道而言,其会随着间歇性地抬升而发生沉积动力的强弱变化,垂向上可能会表现为多期次规模减小的旋回样式。

综上所述,在海山地貌背景下,底流沉积过程及其所对应的沉积地貌和岩性的空间分布较为复杂,与开阔地貌背景下的底流沉积响应具有显著的差异,导致古海洋动力演化的认识存在多解性,进而限制了我们目前对深水资源和地质灾害的预测,而要解决这一问题,揭示深水底流沉积过程与海山之间的耦合关系则显得十分必要。随着近年来深

海观测技术的快速发展,现代深海沉积动力特征得到了更为直观的认识,其可以为揭示深水底流沉积演化过程与海山等地貌之间的耦合机制提供有效的数据支撑,基于此所建立的沉积响应模式将对于地质历史时期的深水沉积演化具有积极的类比和借鉴意义。因此,未来的深水沉积学研究需要与物理海洋学紧密结合。

参考文献 (References)

- [1] Wessel P, Sandwell D T, Kim S S. The global seamount census [J]. *Oceanography*, 2010, 23(1): 24-33.
- [2] Kim S S, Wessel P. New global seamount census from altimetry-derived gravity data [J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 186(2): 615-631.
- [3] Hernández-Molina F J, Soto M, Piola A R, et al. Depositional system along the Uruguayan continental margin: sedimentary, oceanographic and paleoceanographic implications [J]. *Marine Geology*, 2016, 378: 333-349.
- [4] Zhang X, Boyer D L. Current deflections in the vicinity of multiple seamounts [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1991, 21(8): 1122-1138.
- [5] Hernández-Molina F J, Larter R D, Rebesco M, et al. Miocene reversal of bottom water flow along the Pacific Margin of the Antarctic Peninsula: stratigraphic evidence from a contourite sedimentary tail [J]. *Marine Geology*, 2006, 228(1-4): 93-116.

- [6] Turnewitsch R, Falahat S, Nycander J, et al. Deep-sea fluid and sediment dynamics—Influence of hill-to seamount-scale seafloor topography [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 127: 203-241.
- [7] Chen H, Zhang W, Xie X, et al. Sediment dynamics driven by contour currents and mesoscale eddies along continental slope: A case study of the northern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2019, 409: 48-66.
- [8] Heezen B C, Hollister C D. Deep sea current evidence from abyssal sediments [J]. *Marine Geology*, 1964, 1(2): 141-174.
- [9] Zenk M. Abyssal and Contour Currents[M]//Rebesco M, Camerlenghi A, eds. *Contourites*. Amsterdam, Elsevier, 2008: 37-57.
- [10] 赵玉龙, 刘志飞. 等积体在全球大洋中的空间分布及其古环境意义—国际大洋钻探计划对全球等深流沉积研究的贡献[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(12): 1287-1296. [ZHAO Yulong, LIU Zhifei. Spatial distribution of contourites in global ocean and its paleoclimatic significance - The contribution of international ocean drilling to the studies of contourites [J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(12): 1287-1296.]
- [11] 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.
- [12] Thran A C, Dutkiewicz A, Spence P, et al. Controls on the global distribution of contourite drifts: Insights from an eddy-resolving ocean model [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 489: 228-240.
- [13] Knutz P C. Paleooceanographic significance of contourite drifts[M]// In: Rebesco M, Camerlenghi A (Eds.). *Contourites*. Developments in Sedimentology, 60. Elsevier, Amsterdam, 2008: 511-535.
- [14] Viana A R, Almeida W Jr, Nunes M C V, et al. The economic importance of contourites [J]. *Geological Society of London Special Publication*, 2007, 276(1): 1-23.
- [15] Brackenridge R E, Stow D A V, Hernández-Molina F J, et al. Textural characteristics and facies of sand-rich contourite depositional systems [J]. *Sedimentology*, 2018, 65(7): 2223-2252.
- [16] Hodgson D M. Distribution and origin of hybrid beds in sand-rich submarine fans of the Tanqua depocentre, Karoo Basin, South Africa [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 1940-1956.
- [17] Jobe Z, Sylvester Z, Pittaluga M B, et al. Facies architecture of submarine channel deposits on the western Niger Delta slope: Implications for grain-size and density stratification in turbidity currents [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017, 122: 473-491.
- [18] Taylor G I. Experiments on the motion of solid bodies in rotating fluids [J]. *Proceedings of the Royal Society*, 1923, 104: 213-218.
- [19] Boyer D L, Zhang X. Motion of oscillatory currents past isolated topography [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1990, 20(9): 1425-1448.
- [20] Bograd S J, Rabinovich A B, LeBlond P H, et al. Observations of seamount - attached eddies in the North Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C6): 12441-12456.
- [21] Chapman D C, Haidvogel D B. Formation of Taylor caps over a tall isolated seamount in a stratified ocean [J]. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, 1992, 62: 31-65.
- [22] Roden G I. Effects of seamount chains on ocean circulation and thermohaline structure[C]//In: Keating B H, et al. (Ed.). *Seamounts, Islands and Atolls AGU Geophys. Monograph*, 1987, 96: 335-354.
- [23] Roden G I. Mesoscale flow and thermohaline structure around Fieberling Seamount [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(C9): 16653-16672.
- [24] Chapman D C. Enhanced subinertial diurnal tides over isolated topographic features [J]. *Deep-sea Research*, 1989, 36: 815-824.
- [25] Genin A, Noble M, Lonsdale P F. Tidal currents and anticyclonic motions on two North Pacific seamounts [J]. *Deep-sea Research*, 1989, 36(12): 1803-1815.
- [26] Noble M, Mullineaux L S. Internal tidal currents over the summit of cross seamount [J]. *Deep-sea research*, 1989, 36: 1791-1802.
- [27] Holloway P E, Merrifield M A. Internal tide generation by seamounts, ridges, and islands [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C11): 25937-25951.
- [28] Kasahara A. A mechanism of deep-ocean mixing due to near-inertial waves generated by flow over bottom topography [J]. *Dyn Atmos. Oceans*, 2010, 49: 124-140.
- [29] Gill A E. *Atmosphere-Ocean Dynamics*[M]. Academic Press, San Diego, 1982: 662.
- [30] Zhang X, Boye D L. Laboratory study of rotating, stratified, oscillatory flow over a seamount [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1993, 23(6): 1122-1141.
- [31] Goldner D R, Chapman D C. Flow and particle motion induced above a tall seamount by steady and tidal background currents [J]. *Deep-sea Research*, 1997, 144(5): 719-744.
- [32] 刘长建, 庄伟, 夏华永, 等. 2009-2010年冬季南海东北部中尺度过程观测[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 8-16. [LIU Changjian, ZHUANG Wei, XIA Huayong, et al. Mesoscale observation in the northeast South China Sea during winter 2009-2010 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(1): 8-16.]
- [33] 魏泽勋, 郑全安, 杨永增, 等. 中国物理海洋学研究70年:发展历程、学术成就概览[J]. *海洋学报*, 2019, 41(10): 23-64. [WEI Zexun, ZHENG Quanan, YANG Yongzeng, et al. Physical oceanography research in China over past 70 years: Overview of development history and academic achievements [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 41(10): 23-64.]
- [34] Adams D K, McGillicuddy D J, Zamudio L, et al. Surface-generated mesoscale eddies transport deep-sea products from hydrothermal vents [J]. *Science*, 2011, 332(6029): 580-583.
- [35] Zhang Y W, Liu Z F, Zhao Y L, et al. Mesoscale eddies transport deep-sea sediments [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5937.
- [36] Zhao Y, Liu Z, Zhang Y, et al. In situ observation of contour currents in the northern South China Sea: Applications for deepwater sediment transport [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 430: 477-485.
- [37] Rogerson M, Schonfeld J, Leng M J, et al. Qualitative and quantitative approaches in palaeohydrography: a case study from core-top parameters in the Gulf of Cadiz [J]. *Marine Geology*, 2011, 280(1): 150-167.
- [38] García M, Hernández-Molina F J, Llave E, et al. Contourite erosive features caused by the Mediterranean Outflow Water in the Gulf of

- Cadiz: Quaternary tectonic and oceanographic implications [J]. *Marine Geology*, 2009, 257(1-4): 24-40.
- [39] Roberts D G, Hogg N G, Bishop D G, et al. Sediment distribution around moated seamounts in the Rockall Trough [J]. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1974, 21(3): 175-184.
- [40] Howe J A, Stoker M S, Masson D G, et al. Seabed morphology and the bottom-current pathways around Rosemary Bank seamount, northern Rockall Trough, North Atlantic [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(2): 165-181.
- [41] Davies T A, Laughton A S. Sedimentary Processes in the North Atlantic [C]// In: Laughton A S, Berggren W A (Eds.). Initial Reports of Deep Sea Drilling Project, 12. U.S. Government Printing Office, Washington D C, 1972: 905-934.
- [42] 陈慧, 解习农, 毛凯楠. 南海北缘一统暗沙附近深水等深流沉积体系特征[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2015, 40(4): 733-743. [CHEN Hui, XIE Xinong, MAO Kainan. Deep-water contourite depositional system in vicinity of Yi'tong Shoal on Northern Margin of the South China Sea [J]. *Earth Science – Journal of China University of Geoscience*, 2015, 40(4): 733-743.]
- [43] Hernández-Molina F J, Campbell S, Badalini G, et al. Large bedforms on contourite terraces: Sedimentary and conceptual implications [J]. *Geology*, 2018, 46(1): 27-30.
- [44] Stow D A V, Hernández-Molina F J, Llave E, et al. The Cadiz Contourite Channel: Sandy contourites, bedforms and dynamic current interaction [J]. *Marine Geology*, 2013, 343: 99-114.
- [45] Pratt R M. Great meteor seamount [J]. *Deep-sea Research*, 1963, 10: 17-25.
- [46] Karig D E, Peterson M N A, Shor G G. Sediment-capped guyots in the Mid-Pacific Mountains [J]. *Deep-Sea Research*, 1970, 17: 373-378.
- [47] Levin L A, Nittrouer C A. Textural characteristics of sediments on deep seamounts in the eastern Pacific Ocean between 10°N and 30°N [C]// In: Keating B, Fryer P, Batiza R, et al(eds). Geophysical Monograph 43. American Geophysical Union, Washington, 1987: 187-203.
- [48] Thiéblemont A, Hernández-Molina F J, Miramontes E, et al. Contourite depositional systems along the Mozambique channel: The interplay between bottom currents and sedimentary processes [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2019, 147: 79-99.
- [49] Wang X, Zhuo H, Wang Y, et al. Controls of contour currents on intra-canyon mixed sedimentary processes: Insights from the Pearl River Canyon, northern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2018, 406: 193-213.
- [50] Richardson P L. Anticyclonic eddies generated near Corner Rise seamounts [J]. *Journal of Marine Research*, 1980, 38: 673-686.
- [51] Rogers A D. The Biology of seamounts [J]. *Advances in Marine Biology*, 1994, 30(1): 305-350.
- [52] Bank J J, Kim D H, Chun J H. Gas hydrate occurrences and their relation to host sediment properties: Results from second Uleung Basin Gas hydrate drilling expedition, East Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 21-29.
- [53] 陈芳, 苏新, 陆红锋, 等. 南海神狐海域有孔虫与高饱和度水合物的储存关系[J]. *地球科学*, 2013, 38(5): 907-915. [CHEN Fang, SU Xin, LU Hongfeng, et al. Relations between biogenic component (Foraminifera) and Highly saturated gas hydrates distribution from Shenhu Area, Northern South China Sea [J]. *Earth Science – Journal of China University of Geoscience*, 2013, 38(5): 907-915.]
- [54] 吴能友, 孙治雷, 卢建国, 等. 冲绳海槽海底冷泉-热液系统相互作用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(5): 23-35. [WU Nengyou, SUN Zhilei, LU Jianguo, et al. Interaction between seafloor cold seeps and adjacent hydrothermal activities in the Okinawa Trough [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(5): 23-35.]
- [55] Chen H, Xie X, Van Rooij D, et al. Depositional characteristics and processes of alongslope currents related to a seamount on the northwestern margin of the Northwest Sub-Basin, South China Sea [J]. *Marine Geology*, 2014, 355: 36-53.
- [56] Vandorpe T, Van Rooij D, De Haas H. Stratigraphy and paleoceanography of a topography-controlled contourite drift in the Pen Duick area, southern Gulf of Cádiz [J]. *Marine Geology*, 2014, 349: 136-151.