

文章编号:1009-2722(2018)12-0001-13

构造活动对海底峡谷地貌形态的影响

赵家斌, 钟广法*

(同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:海底峡谷是大陆边缘最重要的地貌形态之一,是沉积物和陆源有机质向深海搬运的主要通道,在深海重力流沉积、全球碳循环、生物多样性、油气-水合物资源勘探及海底工程设施安全运营等方面的研究中具有重要意义。大量研究发现,海底峡谷常发育于构造活动较强烈的地区,其形成和演化与构造变形之间存在密切的关联。在文献调研基础上,着重就构造活动对海底峡谷地貌的控制作用进行综述。总结了 5 种与构造变形有关的海底峡谷平面分布端元模式,分别为限制型、转向型、偏转型、阻挡型及横向切穿型海底峡谷。分析了局部坡度变化对峡谷内部地貌特征的影响:构造变形引起的局部地形坡度增大会导致海底峡谷内部侵蚀作用的加剧与裂点的形成;局部地形坡度减小容易引起天然堤和决口扇的形成;坡度的变化还会引起峡谷弯曲度的动态响应。

关键词:海底峡谷;地貌形态;构造变形;坡度;弯曲度;大陆边缘

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.12001

海底峡谷是发育于海底窄而深的长条形负地貌,其成因主要与浊流侵蚀及海底滑坡等因素有关^[1-4]。全球共有约 5 849 条大型海底峡谷,主要分布于主动和被动大陆边缘,是大陆边缘重要的地貌形态之一^[5]。海底峡谷是陆地和浅海沉积物及有机质向深海搬运的主要通道,在沉积物输移、全球碳循环及深海生物多样性研究等方面具有重要意义^[6-13]。充填于海底峡谷中的砂质沉积物是潜在的油气及天然气水合物储层,具有重要的经济地质意义^[14,15]。此外,海底峡谷中的浊流、海底滑坡等重力搬运过程对包括海底电缆、海上钻井平台在内的海底工程设施的安全运营构成潜在的威胁^[16-19]。因

此,对海底峡谷的研究受到了学术界、工业界乃至国际政界的高度关注。

海底峡谷常发育于构造变形比较强烈的区域,例如尼日尔河三角洲^[20-23]、下刚果盆地^[24-26]、尼罗河三角洲^[27,28]、墨西哥湾^[29-32]、南海南部文莱深水区^[33]与巴巴多斯增生楔^[34]等。构造活动对海底峡谷的发育具有重要的影响,从多个方面控制了海底峡谷的形成与演变,包括海底峡谷地貌形态、峡谷内部侵蚀与沉积作用的交替及沉积物的分布等^[22,25-27,34-36]。国际上有关海底峡谷的文献很多,但相关的综述性文章不多^[25,27,32,35,36]。多数文献侧重于海底峡谷本身的地貌形态、沉积充填特征及时空演化方面的描述,对海底峡谷形成演化的控制因素探索较少,而后者对全面理解海底峡谷的成因及地貌-沉积特征至关重要。影响海底峡谷发育的因素很多,如构造活动、海平面变化、古气候、沉积物供应等,而构造无疑是其中最重要的一个控制因素。本文在文献调研基础上,从峡谷的平面形态和内部地貌特征两方面,就构造变形对峡谷地貌的控制作用进行综述。

收稿日期:2018-09-19

基金项目:国家自然科学基金(91528304,41676029)

作者简介:赵家斌(1993—),男,硕士,主要从事地震数据解释方面的研究工作。E-mail:carlosdom@163.com

* 通讯作者:钟广法(1964—),男,博士,教授,博导,主要从事地震、测井解释和沉积学方面的研究工作。E-mail:gfz@tongji.edu.cn

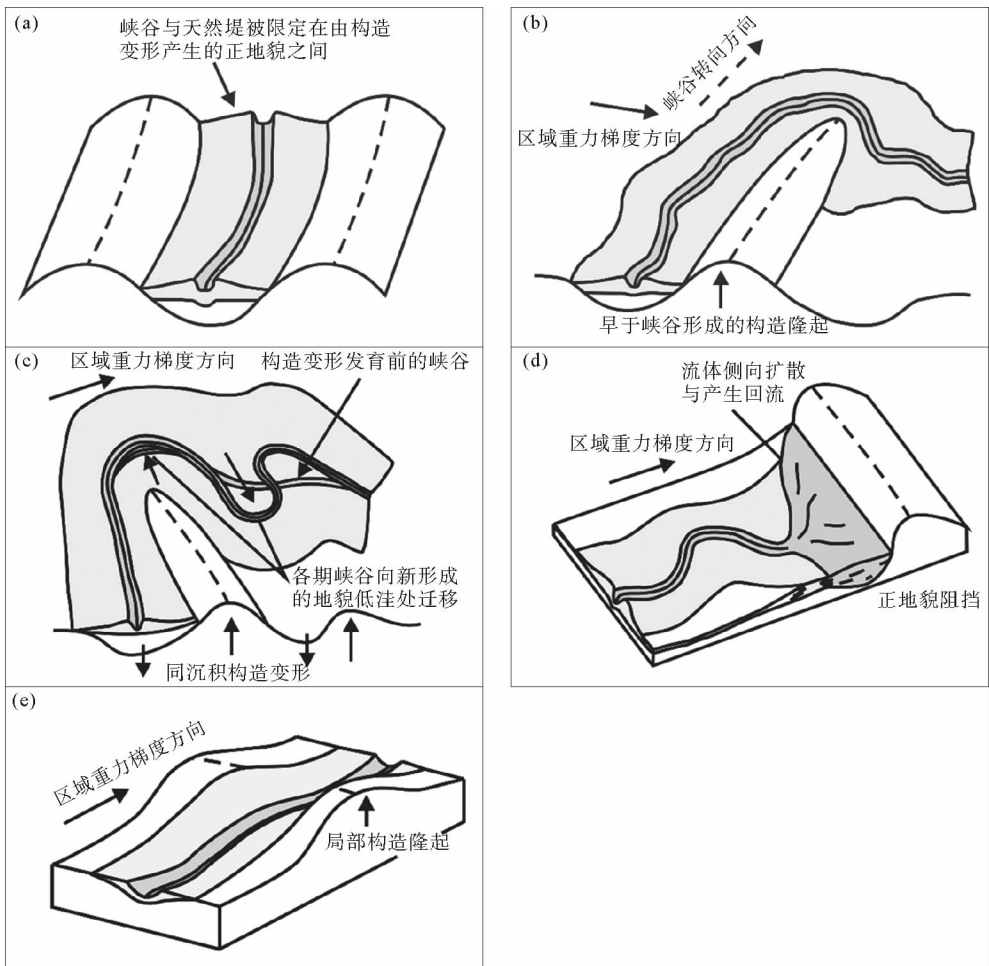
1 构造活动对海底峡谷平面分布的影响

构造变形对海底峡谷最直观的影响是改变海底峡谷的形态及平面分布。Smith^[32]将构造变形区沉积物的平面分布总结为2种模式:迂回连通走廊型(connected tortuous corridors)和梯级微盆地型(cascades of silled sub-basins),后者即前人提出的“充填—溢出”模式^[37-40]。构造活动对海底峡谷最直接的影响是导致其流向发生改变,同时海底峡谷也可以直接切穿构造变形带^[36]。Clark和Cartwright^[27,35]进一步将构造活动引起的海底峡谷方向的改变细分为限制(confine-

ment)、转向(diversion)、偏转(deflection)和阻挡(blocking)四大类型。在前人研究成果基础上,笔者根据构造变形与海底峡谷之间相互作用的结果,将海底峡谷划分为以下5种端元类型(图1),分别为构造限制型海底峡谷、构造转向型海底峡谷、构造偏转型海底峡谷、构造阻挡型海底峡谷及横向切穿型海底峡谷。实际海底峡谷可以包含2种或2种以上端元类型。

1.1 构造限制型海底峡谷

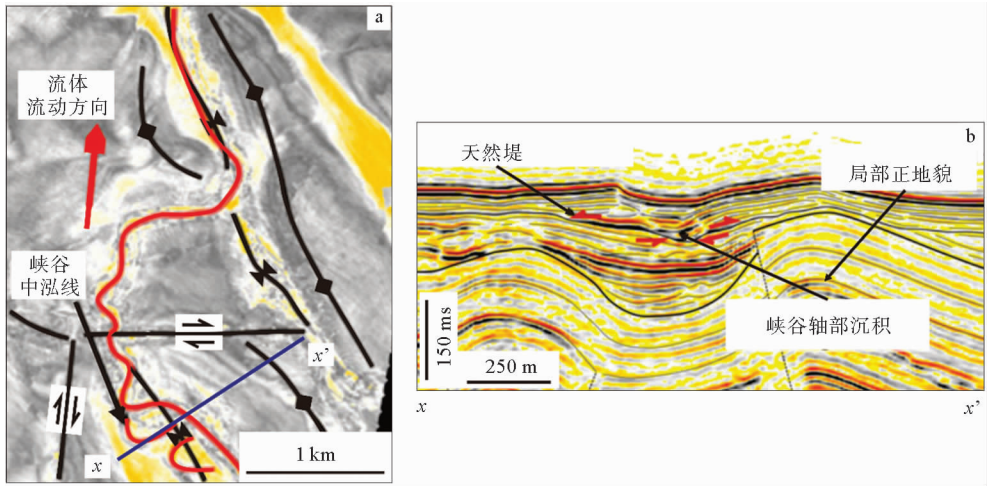
构造限制型海底峡谷被限定在由构造变形产生的相邻2个正地貌单元之间(图1a,2)。Pirmez等^[20]发现,发育于尼日尔河三角洲前缘斜坡上的海底峡谷在流经由两排大型背斜夹持的谷地时,



(a)构造限制型海底峡谷;(b)构造转向型海底;(c)构造偏转型海底;(d)构造阻挡型海底;(e)横向切穿型海底(a—d 据文献^[27])

图1 与构造变形有关的海底峡谷平面分布的端元类型

Fig. 1 End members of planar distribution of submarine canyons related to tectonic deformation



(a) 振幅切片揭示的被限定在相邻两个背斜之间的海底峡谷;(b) 横切构造限制型海底峡谷的二维地震剖面,剖面位置见图 2a

图 2 东地中海 Levant 地区的构造限制型海底峡谷(据文献[27])

Fig. 2 A submarine canyon laterally confined by structure relief in the Levant Basin, Eastern Mediterranean Sea (from reference [27])

流体下切侵蚀能力增强,峡谷深度增大。Clark 和 Cartwright^[27]在对 Levant 盆地海底峡谷系统的研究中发现,峡谷流经逆冲褶皱带时主要沿长条形负地貌发育,难以发生横向迁移,峡谷的弯曲度普遍较小(图 2)。Liu 等^[41]在对台湾西南陆坡区高屏峡谷的研究中发现,该峡谷中游从 22°03' N 至 21°35' N 长约 70 km 的峡谷段,被严格限制在逆冲褶皱带内 2 个相邻背斜脊之间。Gee 和 Gawthorpe^[26]分析了安哥拉近海陆坡区域盐构造控制下的海底峡谷系统的演化过程,发现当峡谷流经盐墙遮挡的狭窄区域时,多条峡谷向该区域汇聚,流体的流速增大,侵蚀能力明显增强。Morgan^[42]发现位于尼日尔河深水三角洲逆冲褶皱带上的海底峡谷被限制在逆冲褶皱之间断层调节带形成的断槽中发育。Cronin^[43]指出,断槽的发育会导致海底峡谷的长度增加,使得陆源物质向更远的深水盆地搬运。Alexander^[44]利用水槽实验模拟海底地貌对浊流流向与沉积过程的影响,证实了当海底峡谷两侧被正向构造限制时,其内部的浊流难以侧向扩散,沉积物被转移至更远的区域。

1.2 构造转向型海底峡谷

构造转向型海底峡谷是指峡谷行进路径前方被先于峡谷形成的正向构造遮挡,导致峡谷

走向发生改变,通常沿着地势最低洼的方向发育(图 1b,3)。这是构造变形区域最常见的一种海底峡谷类型。Cronin^[43]对比发育于西班牙东南部 Tabernas 盆地内的上中新世古峡谷与发育于现今海底的 Almeria 峡谷,发现海底峡谷上游走向与陆坡倾向一致,在流经走向与海底峡谷流向斜交的断层时,峡谷发生转向,改沿斜向断槽发育,其中古峡谷的走向经历了约 60°的转向;现今海底峡谷的转向幅度更大,接近 90°。Anderson 等^[45]在安哥拉下刚果盆地南部发现了一组峡谷,它们在中新世早期进入研究区南部—NW—SE 向地堑时,峡谷走向在地堑内部南北向断层的影响下,由上游的 NE—SW 向转变为近南北向,进一步往下游方向,当峡谷离开断层发育区域后,其走向又重新转变为 NE—SW 向。Ferry 等^[25]报道了下刚果盆地内由规模较小的正断层引起的峡谷转向,转向位置位于正断层上盘距断崖 50 m 处,转向后峡谷的流向与断层倾向一致。Cross 等^[28]发现尼罗河深水三角洲海底峡谷在流经断层末端时发生小角度偏转,同时峡谷的弯曲度也出现小幅度增大。Liu 等^[41]发现,高屏峡谷在 22°03' N 附近流经一大型褶皱逆冲断层带时,峡谷沿逆冲褶皱带内长条形负地貌发育,其走向出现了近 90°的转向,由垂直于等深线方向转变为平行于等深线方向;

此外,向下游离开该褶皱带后,峡谷在遭遇断弯背斜时发育转向,呈连续弯曲的平面分布特征。Twichell 和 Roberts^[46]对美国东部海域海底峡谷地貌形态的研究表明,Baltimore 和 Wilmington 2 条峡谷上游的走向为 NW—SE 向,垂直于陆坡走向;下游因受构造海脊的阻挡,峡谷走向转为东西向。Huyghe 等^[34]、Clark 和 Cartwright^[27]、Jolly 等^[47]分别在巴巴多斯增生楔南部、东地中海 Levant 盆地与尼日尔河深水三角洲发现,背斜的发育会导致海底峡谷走向发生偏转,海底峡谷通常环绕背斜倾伏端发育。此外,Wood 和 Spansky^[48]、Viana 等^[49]、Broucke 等^[24]分别在西印度群岛特立尼达东部沿岸、巴西南部被动大陆边缘及下刚果盆地发现,与底辟构造有关的局部小型正地貌也会导致海底峡谷走向发生轻

微偏转,峡谷的弯曲度轻微增大;靠近底辟一侧,越岸沉积被正地貌阻挡,难以横向扩散,该侧天然堤的宽度较小^[48]。Soreghan 等^[50]、Gupta 等^[51]、Anderson 等^[45]、Ronghe 和 Surarat^[52]在东非裂谷南缘、埃及西奈尔半岛苏伊士海湾、安哥拉下刚果盆地与泰国 Suphan Buri 盆地发现,多条倾向相同的正断层之间的断层调节带(relay ramp)是沉积物搬运的主要通道,浊流流经这些区域时向调节带的倾向方向偏转。Alexander^[44]利用水槽实验模拟浊流路径上小型正地貌的阻挡效应,结果显示高密度浊流流经小型障碍物时流体会发生转向,环绕小型障碍物边缘流动。Athmer 等^[53]通过数值模拟论证了浊流流经断层调节带时,浊流走向将发生偏转,沿重力梯度最大的方向进入盆地内部。

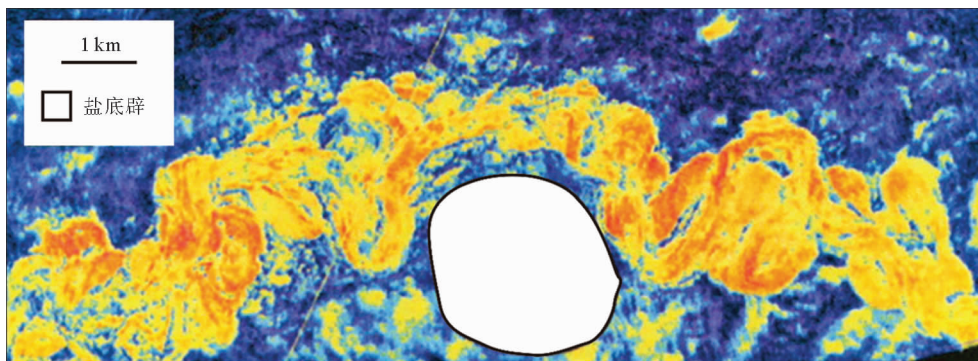


图3 均方根振幅切片揭示的构造转向型海底峡谷(据文献[35])

Fig. 3 A deflected submarine canyon shown in the root-mean-square amplitude slice (from reference [35])

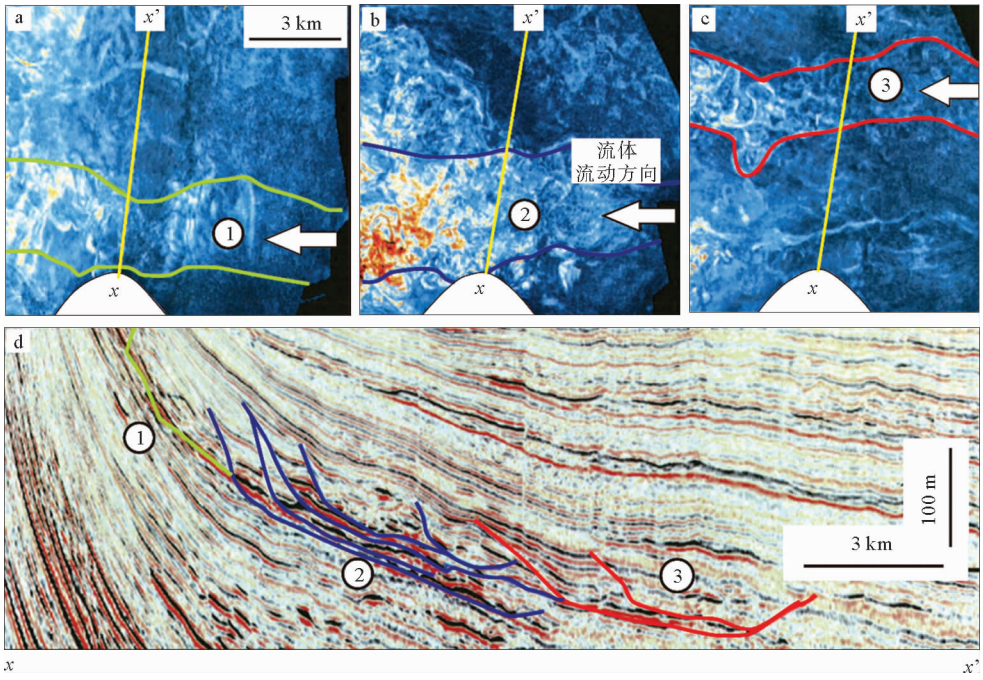
1.3 构造偏转型海底峡谷

构造偏转型海底峡谷是指在生长性构造活动的影响下,峡谷的位置持续向新形成的地势低洼部位发生迁移(图1c,4)。Gee 和 Gawthorpe^[26]、Kane^[54]等对安哥拉近海陆坡区和墨西哥湾 Magnolia 深水油田的研究表明,持续生长的盐底辟会导致海底峡谷的位置逐渐向远离底辟构造的方向迁移。Clark 和 Cartwright^[27]在 Levant 盆地内发现,持续活动的逆冲推覆构造控制了海底峡谷的走向,导致其持续向新形成的地势低洼处偏转,峡谷一侧发育侧向加积体,另一侧侵蚀过程持续发育;部分峡谷由于偏转幅度剧烈,浊流在偏转位

置冲决天然堤,形成新的决口水道。Kane 等^[55]对比了发育于尼罗河深水扇与英国 Craven 盆地的海底峡谷,发现同沉积正断层的发育对峡谷的走向产生了持续的影响,海底峡谷通常沿生长正断层活动形成的断槽发育,随着生长正断层的持续活动,海底峡谷的位置也逐渐发生迁移。

1.4 构造阻挡型海底峡谷

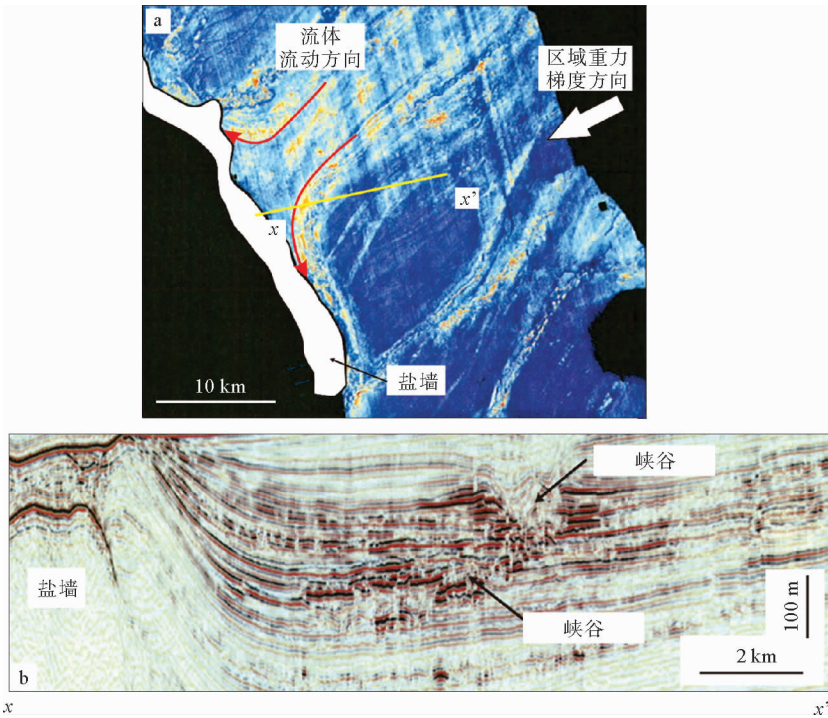
构造阻挡型海底峡谷是指大型正地貌构成峡谷前方的阻挡,导致峡谷浊流侧向扩散并产生回流,构造阻挡逆流侧沉积厚度增加,并逐渐向横向延伸(图1d,5)。Smith^[32]、Pirmez 等^[20]基于对墨西哥湾深水海底峡谷的研究,提出当峡谷中的



(a—c)顺层均方根振幅切片揭示的逐渐远离生长性正向构造的构造偏转型海底峡谷；
 (d)横切构造偏转型海底峡谷的二维地震剖面，剖面位置见图 4(a—c)

图 4 构造偏转型海底峡谷(据文献[35])

Fig. 4 A submarine canyon progressively shifting away from an adjacent growing structure (from reference [35])



(a)均方根振幅切片揭示的被大型盐墙阻挡的构造阻挡型海底峡谷；(b)横切构造阻挡型海底峡谷的二维地震剖面，剖面位置见图 5a

图 5 构造阻挡型海底峡谷(据文献[35])

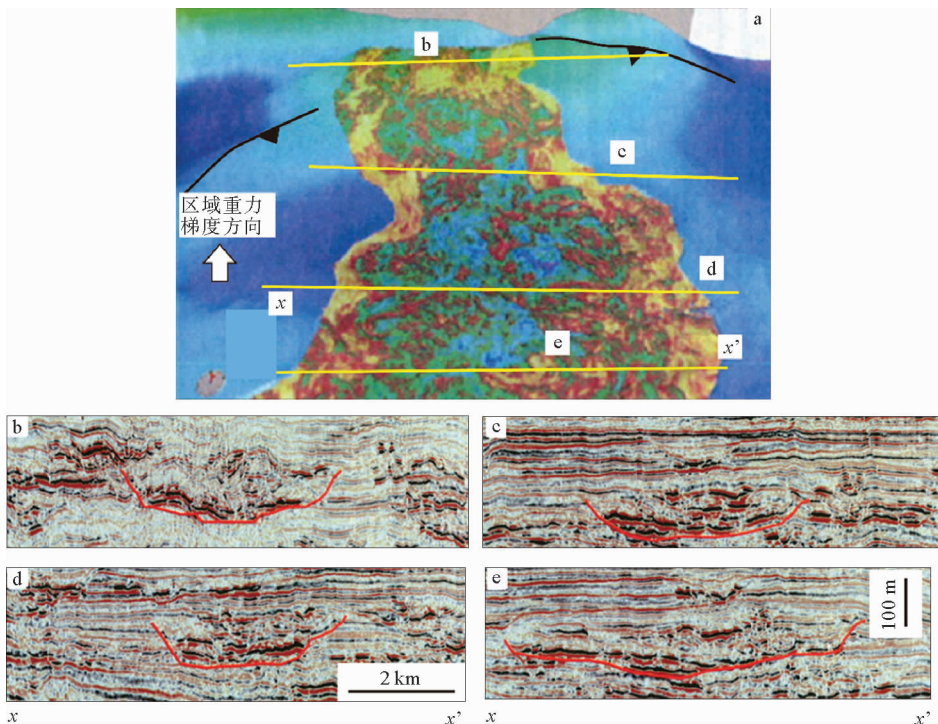
Fig. 5 A submarine canyon blocked by a large salt structure (from reference [35])

浊流遇到盐丘等正地貌阻挡时,浊流物质快速沉积,并形成回流,导致陆坡上局部的负地貌被沉积物快速填平。Demyttenaere 等^[33]在南海南部文莱深水区中也发现了海底峡谷被页岩脊阻挡和偏转的现象。Haughton^[56]在对西班牙 Tabernas 盆地内古海底峡谷浊流沉积的研究中发现,与斜滑断层有关的局部正地貌阻挡浊流前进并形成回流,后者快速沉积在盆地内部形成了大型的浊积席状体。Cross 等^[28]在对尼日尔深水扇的研究中发现,断层的活动导致正断层下盘(上升盘)局部抬起构造正地貌,当规模较小的浊流垂直于断层走向流经这些正地貌单元时,浊流携带的沉积物往往发生快速沉积,形成一系列朵叶体。Bursik 和 Woods^[57]通过水槽模拟实验证实,被大型正地貌阻挡时,浊流侧向扩散,并形成向上游的回流,浊流沉积厚度快速增大。

1.5 横向切穿型海底峡谷

横向切穿型海底峡谷是指海底峡谷顺坡流经平行或斜交陆坡走向的构造变形区域时,峡谷走

向未发生明显改变,仍大致沿着原方向持续行进,峡谷切穿下伏构造变形区域(图 1e, 6, 7)。Anderson 等^[45]的研究表明,下刚果盆地南部中新世晚期走向为 NE—SW 向的海底峡谷向南流经 NW—SE 向地堑时,切穿地堑内部的南北向断层。该区域北侧, Broucke 等^[24]在中新世晚期地层中也发现了 NE—SW 向海底峡谷切穿 NNW 向背斜的实例。Morgan^[42]、Jolly 等^[47]发现尼日尔河深水三角洲上的部分海底峡谷沿陆坡倾向发育,切穿逆冲推覆构造形成的局部正地貌。Gee 和 Gawthorpe^[26]发现安哥拉近海陆坡海底峡谷切穿走向与之高角度斜交的生长背斜,峡谷下游走向小幅度偏转,沿垂直背斜枢纽的方向行进。Mayall 等^[35]在对发育于多个地区的横向切穿型海底峡谷进行分析后提出,当峡谷浊流流经构造高地时,浊流侵蚀能力增强,导致下切深度增大、宽深比减小(图 6)。此外,前人基于对墨西哥湾深水区沉积过程的研究,提出了“充填—溢出”沉积模式^[32,37-40](图 7)。盐构造或其他构造活动导致四周具有地貌阻挡的微型盆地的形成。浊流携



(a)均方根振幅切片揭示的切穿正向构造的海底峡谷;(b—e)横向切穿型海底峡谷的二维地震剖面,剖面位置见图 6a

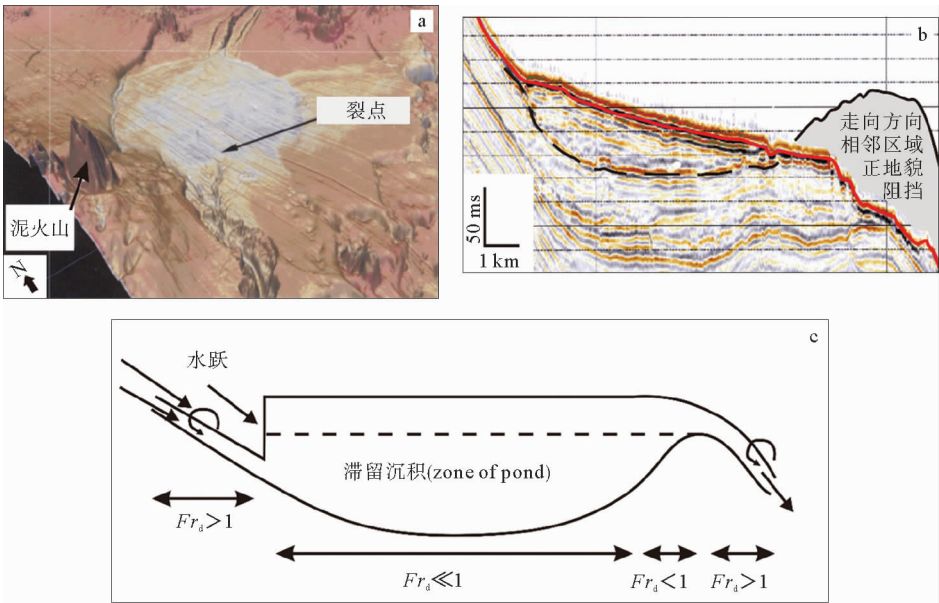
图 6 横向切穿型海底峡谷(据文献[35])

Fig. 6 A submarine canyon cutting across a positive structure (from reference [35])

带的沉积物首先充填上游的微型盆地,当上游微型盆地充填完毕后,后续的浊流及其携带的沉积物路过该盆地,继续向下游行进,依次充填后续的微型盆地。该流出过程伴随着对微型盆地边缘的侵蚀,浊流侵蚀能力增强,峡谷深度增大^[23](图 7),是切穿型作用的另一种类型。Lamb 等^[58]、Toniolo 等^[59]分别通过水槽实验和数值计算对“充填—溢出”沉积模式进行模拟,指出浊流在进入微型盆地时,在坡折处形成水跃(hydraulic jump),流态由超临界流转变为亚临界流,浊流流速急剧降低,悬浮沉积物快速堆积。而微型盆地下游翼正地貌的阻挡导致浊流沉积在微型盆地内部聚集。滞留在微型盆地中的沉积物具有微弱的正粒序特征。尽管随着沉积作用的持续进行,浊流中沉积物浓度减少,但仍维持着较高流速,它们在越过下游正地貌时,对正地貌仍具有一定的侵

蚀作用(图 7c)。

在构造变形强烈的区域,同一海底峡谷的不同部位常发育不同的峡谷地貌端元类型。以高屏峡谷为例^[41],峡谷上游自高屏溪河口向西南方向延伸,沿陆坡倾向切穿发育小型褶皱的陆架与上陆坡区域,为横向切穿型;峡谷中游自 22°03'N 至 21°35'N,走向经历急转,沿着逆冲褶皱形成的长条形负地貌前进,与陆坡倾向垂直,依次为构造转向型与构造限制型;峡谷下游离开大型褶皱带后,在小型断弯背斜之间的低洼处行进,峡谷弯曲度增大,呈构造转向型。此外,同一峡谷不同时期内所发育的峡谷类型也不尽相同。Broucke 等^[24]与 Anderson 等^[45]在下刚果盆地发现,中新世早期,多条峡谷在断层、背斜等构造变形的影响下发育转向特征;中新世晚期,这些峡谷倾向于切穿区域内的构造变形,发育横向切穿型海底峡谷。



(a)微型盆地的海底多波束测深地貌图(据文献[32]);(b)沿深泓线纵向切过微型盆地的地震剖面(据文献[32]);
(c)“充填—溢出”模式示意图(据文献[59])

图 7 陆坡微型盆地“充填—溢出”沉积模式

Fig. 7 ‘Fill and spill’ depositional model for mini-basins on a continental slope

1.6 控制因素

海底峡谷平面形态对构造变形的响应受控于多种因素,包括构造变形时间与海底峡谷发育时间之间的关系,同沉积构造变形速率与海底峡谷

形成速率之间的关系,以及构造变形的数量与规模等^[22,24,27,35,36,45,47]。

早于峡谷发育的构造变形可能引起海底峡谷单次转向,而同沉积构造变形事件将导致海底地貌形态的连续变化,各期峡谷平面分布倾向于形

成持续迁移的构造偏转型^[35,36]。海底峡谷早于构造变形发育时,长条形负地貌已经形成,此时峡谷倾向于沿着该负地貌切穿后期发育的构造变形^[36]。

峡谷形成速率与同沉积构造变形速率之间的比值是决定峡谷地貌形态特征最主要的因素,决定了海底峡谷形成过程中受构造活动影响的程度^[24,27,35,36,45,47]。峡谷形成速率(the rate of channel development)包括峡谷轴部的下切侵蚀速率与两侧天然堤沉积速率^[35]。当峡谷形成速率高于构造变形速率时,构造变形形成的容纳空间不足以为浊流的流动提供新的路径,此时强烈的下切侵蚀作用导致海底峡谷趋向于切过褶皱、断层等构造地貌单元,峡谷走向基本不受下伏构造变形的影响,以横向切穿型峡谷为主。反之,当构造变形速率较大时,构造作用形成了较大的容纳空间,此时峡谷的走向容易发生偏转以适应新的海底地貌形态,形成构造限制型、构造转向型、构造偏转型和构造阻挡型等峡谷类型^[24,27,35,36,45,47]。

峡谷受地貌变形影响的程度也与构造变形产生的正向地貌单元的数量和规模有关^[35,36]。单个独立的正地貌对峡谷走向的影响较小,多个正地貌构造单元可以导致海底峡谷数千米以上的侧向迁移^[35,36];位于峡谷两侧的多组正地貌起到限制峡谷的作用^[35]。规模较小的浊流在流经大型正地貌阻挡时,浊流产生回流与侧向扩散,内部悬浮颗粒快速沉积,形成浊积席状体或滞留沉积^[28,32,36,37-39,47,56]。反之,当浊流规模相对于正地貌阻挡较大时,局部地形变化易被沉积物快速填平,发育横向切穿型海底峡谷^[31,36]。Kneller等^[60]利用水槽模拟实验,通过改变障碍物的形状、规模与走向等参数模拟多种障碍物类型,证实了障碍物的形状、走向和相对于浊流流体的规模共同决定峡谷平面分布的观点。

2 构造活动对海底峡谷内部地貌形态的影响

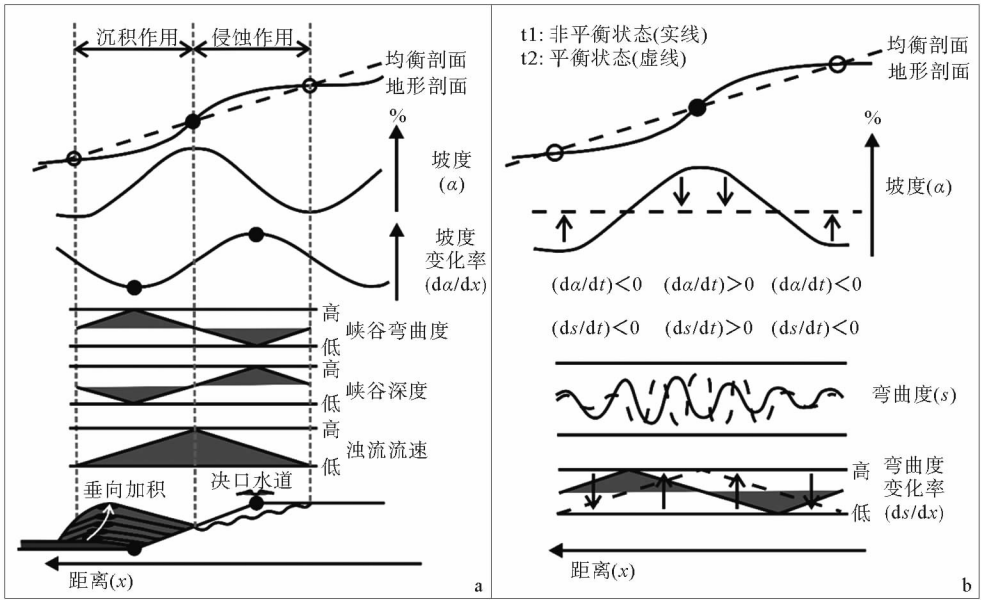
褶皱、断层、底辟等一系列构造变形将改变局部地形坡度。前人基于均衡剖面概念对海底峡谷内部地貌参数与纵剖面坡度之间的关系进行了分

析^[20,25-26],认为构造变形造成容纳空间的重新调整,使得海底峡谷的平衡状态被打破,重力流的侵蚀与沉积作用发生改变,海底峡谷内部地貌形态也随之调整以适应新的地形坡度。

容纳空间是控制海底峡谷地貌形态与沉积过程的重要因素。与地表河流系统类似,海底峡谷容纳空间被定义为介于海底与峡谷均衡剖面之间的空间^[20,61]。均衡剖面(equilibrium profile)是一个参考面,该界面代表沉积作用的上边界和侵蚀作用的下边界^[62]。对于海底峡谷系统,其均衡剖面的形态一般为上凹状,坡度自上游向下游逐渐减小。均衡剖面的形态受控于流体参数,包括流体厚度、流体密度、悬浮沉积物颗粒的粒径等^[62,63];同时,海平面变化、沉积物供给以及构造活动等外部因素也对均衡剖面的形态产生影响^[61,64]。当海底地形高出均衡剖面时,沉积物不稳定,发育侵蚀作用,反之则发育沉积作用^[20,61]。海底峡谷演化过程中,上述侵蚀与沉积过程的交替将导致峡谷纵剖面向均衡剖面逼近^[20]。

2.1 局部地形坡度增大导致侵蚀作用加剧与裂点的形成

底辟、背斜、断层等构造活动导致区域地形坡度增大。Ferry等^[25]对晚中新世下刚果盆地海底峡谷浊流体系的研究表明,地形坡度增大的区域,峡谷的侵蚀能力也增加。峡谷侵蚀能力最强处通常位于陆坡坡度增大最剧烈的部位。地形坡度最大的区域,浊流流速最快,容易形成决口水道(图8a)。Broucke等^[24]、Huyghe等^[34]分别在下刚果盆地和巴巴多斯增生楔南部的研究中发现,浊流在穿越大型背斜时,其侵蚀能力突然增强,峡谷深度明显增大。Wood和Mige-Spansky^[48]在对位于西印度群岛特立尼达东部沿岸的海底峡谷体系进行研究后发现,区域构造抬升时期,峡谷头部的溯源侵蚀也持续发育。Pirmez等^[20]在对发育于尼日尔河三角洲的海底峡谷进行研究时发现,一组与陆坡倾向一致的正断层导致局部地形坡度增大,峡谷下切侵蚀能力增强,在峡谷纵剖面上形成了一系列向断层倾向相反方向逆流迁移的裂点(knickpoint)。Heiniö和Davies^[23]对尼日尔河三角洲海底峡谷演化过程的研究认为,裂点的形成与迁移是海底峡谷流经局部构造抬升区域时重



(a) 构造应力持续作用时,海底峡谷各项内部地貌参数随纵向坡度变化示意图;(b)地形剖面向均衡剖面趋近过程中(构造应力减弱或者消失),峡谷弯曲度变化示意图

图 8 构造变形引起的海底峡谷纵向坡度变化对峡谷内部地貌形态的影响(据文献[25])

Fig. 8 Geomorphic response of submarine canyons to longitudinal tilting (from reference [25])

要的演化过程。“裂点”是指峡谷纵剖面上地形坡度突然增加的区域,最早由 Gardner 等^[61]在对地表河流的研究中提出。褶皱、逆冲断层、底辟等局部正地貌的发育均可导致峡谷纵剖面上裂点的形成。在局部正地貌的上游方向,重力流流速降低,粗颗粒沉积物快速沉积;下游方向上,重力流流速增加,加剧流体对基底的侵蚀。裂点的规模随时间逐渐增大,并向上游迁移。迁移过程中,地形坡降逐渐减小,峡谷纵剖面逐渐向均衡剖面靠拢。

2.2 局部地形坡度减小导致天然堤和决口扇的形成

地形坡度较小的区域有利于越岸沉积的发育。Wood 和 Spansky^[48]对特立尼达东部沿岸的海底峡谷体系进行的地震地貌学分析认为,较平缓的地形有利于越岸沉积的发育,从而导致峡谷两侧天然堤的形成。Ferry 等^[25]与 Clark 和 Cartwright 等^[27]分别基于下刚果盆地和东地中海 Levant 盆地海底峡谷天然堤发育位置的分析认为,地形坡度减小的低洼部位,浊流的流速骤减,沉积作用占主导,天然堤发育,多期浊流成因的天然堤沉积呈垂向加积趋势(图 8a)。此外,

Ferry 等^[25]还发现,地形坡度骤减的区域与决口扇发育部位一致(图 8a),而决口扇的发育则与水跃有关。在坡度骤减的区域,浊流从高流速的超临界流转变为低流速的亚临界流^[38]。浊流中粗颗粒物质快速沉积,形成决口扇。Pirmez 等^[20]在对发育于尼日尔河三角洲、亚马逊三角洲下方陆坡深水区、墨西哥湾西部陆坡及西地中海罗讷河三角洲等多个区域的海底峡谷进行对比分析后认为,地形坡度较小的区域、粒径较细的沉积物与较陡的地形坡降有利于形成天然堤水道复合体;反之,较粗粒的沉积物与较平缓的地形更有利于扇体的发育。

2.3 峡谷弯曲度对坡度变化的动态响应

海底峡谷的弯曲度是指沿深泓线测量的峡谷长度与峡谷两端直线距离的比值,也是峡谷两端连线的峡谷坡度(valley slope)与峡谷沿深泓线纵剖面的平均坡度或水道坡度(channel slope)之比^[65]。前人利用旁扫声呐、多波束测深与三维反射地震等多种地球物理方法,对全球多个海底峡谷及海底地层中古峡谷的弯曲度进行测算,认为海底峡谷的弯曲度与区域坡度之间具有复杂的关

联^[20,22,25,65-67]。Flood 和 Damuth^[65]对发育在亚马逊深水扇上的海底峡谷各项地貌参数进行定量研究发现,在水深大于 3 000 m 的区域,地形坡度范围在 $0.4^{\circ}\sim 2.0^{\circ}$ 之间,峡谷弯曲度随坡度的增加逐渐增大。Wood 和 Spansky^[48]发现西印度群岛特立尼达东部海底地形坡度介于 $0^{\circ}\sim 12.5^{\circ}$ 之间,在这一范围内,海底峡谷弯曲度与地形坡降呈正相关关系,区域坡度越大,峡谷弯曲度越大。Deptuck 等^[21]对尼日尔河三角洲陆坡西侧更新世发育的 Benin-major 峡谷进行分析,发现峡谷下游在构造抬升的影响下,地形坡度从 10° 快速增大至约 20° ,峡谷弯曲度显著减小。Clark 等^[66]对发育于不同区域的 16 条海底峡谷的分析认为,对单条海底峡谷而言,峡谷的弯曲度随坡度减小而增加,达到最大峰值后逐渐减小,该峰值对不同峡谷不尽相同。Ferry 等^[25]就峡谷弯曲度与地形坡度之间的关系进行深入讨论,认为峡谷弯曲度的变化是对局部地形坡度梯度(slope gradient)的响应,即地形坡度沿纵剖面的变化率(方向为下游方向),而非地形坡度的绝对值(图 8a)。当构造应力持续作用于陆坡时,地形坡度梯度较大的区域,峡谷侵蚀能力增强,峡谷的弯曲度减小(图 1a)。当作用于陆坡的构造应力减弱或者消失时,区域地形逐渐向平衡剖面靠拢。原来局部地形坡度较大处的坡度逐渐减小,峡谷纵剖面平均坡度随之减小,而峡谷坡度保持不变,于是峡谷的弯曲度逐渐增大,此时地形坡度较大部位峡谷弯曲度也较大(图 8b)。Flood 和 Damuth^[65]等对构造应力减弱时峡谷演化过程作了进一步的解释,指出海底峡谷弯曲度随坡度的变化是峡谷纵剖面向均衡剖面趋近的主要机制。区域地形坡度略大于基准面的坡度时,峡谷通过弯曲度的增大延长峡谷长度,使峡谷纵剖面坡度减小,向均衡剖面靠拢。当区域坡度持续增大,过大的峡谷弯曲度导致峡谷处于不稳定的状态,过大的流体速度使峡谷弯道处发育大量决口水道,导致地貌形态呈辫状。这种关系与前人在地表河流与坡度之间的关系相类似^[68,69]。

3 结论

构造活动包括断层、褶皱、底辟等对海底峡谷的形成与演化具有重要影响,它们通过改变海底

地貌形态控制海底峡谷的平面展布及峡谷地貌参数的变化。

根据构造变形与海底峡谷之间相互作用的结果,将海底峡谷划分为构造限制型、构造转向型、构造偏转型、构造阻挡型与横向切穿型 5 种端元类型。实际中,同一峡谷在不同部位可以表现为不同的端元类型,同一区域的峡谷在不同时期其平面展布形态也存在差异。构造变形时间与海底峡谷发育时间之间的先后关系、同沉积构造变形速率与海底峡谷形成速率之间的比值以及构造变形的数量与规模等多种因素控制了海底峡谷平面分布形态在多种端元模式之间的转换。

构造作用引起地形坡度发生变化,会导致海底峡谷均衡剖面发生调整,峡谷内部重力流的侵蚀与沉积作用发生改变,从而导致海底峡谷内部地貌形态的调整。局部坡度增大区域,侵蚀作用发育,峡谷深度增大,易形成决口水道;局部坡度变缓区域,沉积作用占据主导,有利于天然堤与决口扇的发育。此外,构造引起地形坡度变化还会导致海底峡谷弯曲度的变化。在构造应力持续作用时期,海底峡谷的弯曲度与峡谷纵剖面地形坡度的变化率呈负相关。在构造应力减弱时期,海底峡谷弯曲度的变化是峡谷纵剖面向均衡剖面调整的重要机制。

参考文献:

- [1] Shepard F P. Submarine Geology[M]. New York: Harper & Row, 1963.
- [2] Shepard F P. Submarine canyons[J]. Earth Science Reviews, 1972, 8(1): 1-12.
- [3] Shepard F P. Submarine canyons: Multiple causes and long-time persistence[J]. Aapg Bulletin, 1981, 65(6): 1062-1077.
- [4] Nittrouer C A, Wright L D. Transport of particles across continental shelves[J]. Reviews of Geophysics, 1994, 32(1): 85-113.
- [5] 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): 69-86.
- [6] Shepard F P, Dill R F. Submarine canyons and other sea valleys[M]. Chicago: Rand McNally & Co., 1966.
- [7] Martín J, Palanques A, Puig P. Composition and variability of downward particulate matter fluxes in the Palamós submarine canyon (NW Mediterranean)[J]. Journal of Ma-

- rine Systems, 2006, 60(1): 75-97.
- [8] Puig P, Palanques A, Martín J. Contemporary sediment-transport processes in submarine canyons. [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2014, 6(1): 53-67.
- [9] Sparkes R B, Lin I T, Hovius N, et al. Redistribution of multi-phase particulate organic carbon in a marine shelf and canyon system during an exceptional river flood: Effects of Typhoon Morakot on the Gaoping River-Canyon system [J]. *Marine Geology*, 2015, 363(1): 191-201.
- [10] Liu J T, Hsu R T, Hung J J, et al. From the highest to the deepest: The Gaoping River-Gaoping Submarine Canyon dispersal system[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153(1): 274-300.
- [11] Yoklavich M M, Greene H G, Cailliet G M, et al. Habitat associations of deep-water rockfishes in a submarine canyon: An example of a natural refuge[J]. *Fishery Bulletin*, 2000, 98(3): 625-641.
- [12] Brodeur R D. Habitat-specific distribution of Pacific ocean perch (*Sebastes alutus*) in Pribilof Canyon, Bering Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2001, 21(3): 207-224.
- [13] Leo F C D, Smith C R, Rowden A A, et al. Submarine canyons: hotspots of benthic biomass and productivity in the deep sea[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2010, 277(1695): 2783-2792.
- [14] Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): deep-water processes and facies models—a critical perspective[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 285-342.
- [15] Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(3): 367-388.
- [16] Kullenberg B. Remarks on the Grand banks turbidity current[J]. *Deep Sea Research*, 1954, 1(4): 203-210.
- [17] Krause D C, White W C, Piper D J W, et al. Turbidity currents and cable breaks in the western New Britain Trench[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1970, 81(7): 2153-2160.
- [18] Canals M, Lastras G, Urgeles R, et al. Slope failure dynamics and impacts from sea floor and shallow sub-sea floor geophysical data: case studies from the COSTA project[J]. *Marine Geology*, 2004, 213(1): 9-72.
- [19] Lee H J, Locat J, Desgagnés P, et al. Submarine mass movements on continental margins[C]// Nittrouer C A, Austin J A, Field M E, et al. *Continental Margin Sedimentation: From Sediment Transport to Sequence Stratigraphy*. IAS Spec. Publ., 37. United Kingdom: Blackwell Publishing, 2007: 213-274.
- [20] Pirmez C, Beaubouef R T, Friedmann S J, et al. Equilibrium profile and baselevel in submarine channels: Examples from Late Pleistocene systems and implications for the architecture of deepwater reservoirs [M] // *Deep-Water Reservoirs of the World: 20th Annual*. 2000: 782-805.
- [21] Deptuck M E, Steffens G S, Barton M, et al. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 649-676.
- [22] 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 & Petroleum Geology*, 2007, 24(6): 406-433.
- [23] Heiniö P, Davies R J. Knickpoint migration in submarine channels in response to fold growth, western Niger Delta [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2007, 24(6): 434-449.
- [24] Broucke O, Temple F, Rouby D, et al. The role of deformation processes on the geometry of mud-dominated turbiditic systems, Oligocene and Lower-Middle Miocene of the Lower Congo basin (West African Margin) [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2004, 21(3): 327-348.
- [25] Ferry J N, Mulder T, Parize O, et al. Concept of equilibrium profile in deep-water turbidite system: effects of local physiographic changes on the nature of sedimentary process and the geometries of deposits[J]. *Geological Society London Special Publications*, 2005, 244(1): 181-193.
- [26] Gee M J R, Gawthorpe R L. Submarine channels controlled by salt tectonics: Examples from 3D seismic data offshore Angola[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2006, 23(4): 443-458.
- [27] Clark I R, Cartwright J A. Interactions between submarine channel systems and deformation in deepwater fold belts: Examples from the Levant Basin, Eastern Mediterranean sea[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2009, 26(8): 1465-1482.
- [28] Cross N E, Cunningham A, Cook R J, et al. Three-dimensional seismic geomorphology of a deep-water channel slope system: the Sequoia field, offshore west Nile Delta, Egypt[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(8): 1063-1086.
- [29] Rowan M G, Weimer P. Salt-sediment interaction, northern Green Canyon and Ewing Bank (offshore Louisiana), northern Gulf of Mexico[J]. *Aapg Bulletin American Association of Petroleum Geologists*, 1998, 82(5): 1055-1082.
- [30] Mallarino G, Beaubouef R T, Droxler A W, et al. Sea level influence on the nature and timing of a minibasin sedimentary fill (northwestern slope of the Gulf of Mexico) [J]. *Aapg Bulletin*, 2006, 90(7): 1089-1119.
- [31] Winker C D, Booth J R. Sedimentary dynamics of the salt-

- dominated continental slope, Gulf of Mexico; integration of observations from the seafloor, near-surface, and deep subsurface[C]//Sepm, Research Conference. 2000; 1059-1086.
- [32] Smith R. Silled sub-basins to connected tortuous corridors: sediment distribution systems on topographically complex sub-aqueous slopes[J]. Geological Society London Special Publications, 2004, 222(1): 23-43.
- [33] Demyttenaere R, Tromp J P, Ibrahim A, et al. Brunei deep water exploration: from sea floor images and shallow seismic analogues to depositional models in a slope turbidite setting[M]// Deep-Water Reservoirs of the World; 20th Annual. 2000; 304-317.
- [34] Huyghe P, Foata M, Deville E, et al. Channel profiles through the active thrust front of the southern Barbados prism[J]. Geology, 2006, 32(5): 429-432.
- [35] Clark I R, Cartwright J A. Key controls on submarine channel development in structurally active settings[J]. Marine & Petroleum Geology, 2011, 28(7): 1333-1349.
- [36] Mayall M, Lonergan L, Bowman A, et al. The response of turbidite slope channels to growth-induced seabed topography[J]. Aapg Bulletin, 2010, 94(7): 1011-1030.
- [37] Satterfield W M, Behrens E W. A Late Quaternary canyon/channel system, northwest Gulf of Mexico continental slope[J]. Marine Geology, 1990, 92(1): 51-67.
- [38] Badalini G, Kneller B, Winker C D. Architecture and processes in the late pleistocene brazos-trinity turbidite system, Gulf of Mexico continental slope[M]// Deep-Water Reservoirs of the World; 20th Annual. 2000.
- [39] Beaubouef R T, Friedmann S J. High resolution seismic/sequence stratigraphic framework for the evolution of pleistocene intra slope basins, Western Gulf of Mexico; Depositional Models and Reservoir Analogs[M]// Deep-Water Reservoirs of the World; 20th Annual. 2000; 40-60.
- [40] Sinclair H D, Tomasso M. Depositional evolution of confined turbidite basins[J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72(4): 451-456.
- [41] Liu C S, Lundberg N, Reed D L, et al. Morphological and seismic characteristics of the Kaoping Submarine Canyon[J]. Marine Geology, 1993, 111(1/2): 93-108.
- [42] Morgan R. Structural controls on the positioning of submarine channels on the lower slopes of the Niger Delta[J]. Geological Society London Memoirs, 2004, 29(1): 45-52.
- [43] Cronin B T. Structurally-controlled deep sea channel courses; examples from the Miocene of southeast Spain and the Alboran Sea, southwest Mediterranean[J]. Geological Society London Special Publications, 1995, 94(1): 115-135.
- [44] Alexander S M J. Observations on experimental, non-channelized, high-Concentration turbidity currents and variations in deposits around obstacles[J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, 64(4): 899-909.
- [45] Anderson J E, Cartwright J, Drysdall S J, et al. Controls on turbidite sand deposition during gravity-driven extension of a passive margin; examples from Miocene sediments in Block 4, Angola[J]. Marine & Petroleum Geology, 2000, 17(10): 1165-1203.
- [46] 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.
- [47] Jolly B A, Lonergan L, Whittaker A C. Growth history of fault-related folds and interaction with seabed channels in the toe-thrust region of the deep-water Niger delta[J]. Marine & Petroleum Geology, 2016, 70(5): 58-76.
- [48] Wood L J, Mize-Spansky K L. Quantitative seismic geomorphology of a Quaternary leveed-channel system, offshore eastern Trinidad and Tobago, northeastern South America[J]. Aapg Bulletin, 2009, 93(1): 101-125.
- [49] Viana A, Figueiredo A G Jr, Faugères J C, et al. The Sao Tomé deep-sea turbidite system (Southern Brazil Basin): Cenozoic seismic stratigraphy and sedimentary processes[J]. Aapg Bulletin, 2003, 87(5): 873-894.
- [50] Soreghan M J, Scholz C A, Wells J T. Coarse-grained, deep-water sedimentation along a border fault margin of Lake Malawi, Africa; seismic stratigraphic analysis[J]. Journal of Sedimentary Research, 1999, 69(4): 832-846.
- [51] Gupta, Underhill, Sharp, et al. Role of fault interactions in controlling synrift sediment dispersal patterns; Miocene, Abu Alaqa Group, Suez Rift, Sinai, Egypt[J]. Basin Research, 1999, 11(2): 167-189.
- [52] Ronghe S, Surarat K. Acoustic impedance interpretation for sand distribution adjacent to a rift boundary fault, Suphan Buri Basin, Thailand[J]. Aapg Bulletin, 2002, 86(10): 1753-1771.
- [53] Athmer W, Groenenberg R M, Luthi S M, et al. Relay ramps as pathways for turbidity currents: a study combining analogue sandbox experiments and numerical flow simulations[J]. Sedimentology, 2010, 57(3): 806-823.
- [54] Kane I A, Mcgee D T, Jobe Z R. Halokinetic effects on submarine channel equilibrium profiles and implications for facies architecture; conceptual model illustrated with a case study from Magnolia Field, Gulf of Mexico[J]. Geological Society London Special Publications, 2012, 363(1): 289-302.
- [55] Kane I A, Catterall V, McCaffrey W D, et al. Submarine channel response to intrabasinal tectonics; The influence of lateral tilt[J]. Aapg Bulletin, 2010, 94(2): 189-219.

- [56] Houghton P D W. Evolving turbidite systems on a deforming basin floor, Tabernas, SE Spain[J]. *Sedimentology*, 2010, 47(3): 497-518.
- [57] Bursik M I, Woods A W. The effects of topography on sedimentation from particle-laden turbulent density currents[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(1): 53-63.
- [58] Lamb M P, Toniolo H, Parker G. Trapping of sustained turbidity currents by intraslope minibasins[J]. *Sedimentology*, 2010, 53(1): 147-160.
- [59] Toniolo H, Lamb M, Parker G. Depositional turbidity currents in diapiric minibasins on the continental slope: formulation and theory[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 76(5): 783-797.
- [60] Kneller B. Beyond the turbidite paradigm: physical models for deposition of turbidites and their implications for reservoir prediction[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1995, 94(1): 31-49.
- [61] Gardner T W. Experimental study of knickpoint and longitudinal profile evolution in cohesive, homogeneous material[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94(5): 664-672.
- [62] Kneller B. The influence of flow parameters on turbidite slope channel architecture[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 901-910.
- [63] Wheeler H E. Baselevel, Lithosphere Surface, and Time-Stratigraphy[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1964, 75(7): 599-609.
- [64] Samuel A, Kneller B, Raslan S, et al. Prolific deep-marine slope channels of the Nile Delta, Egypt[J]. *Aapg Bulletin*, 2003, 87(4): 541-560.
- [65] Flood R D, Damuth J E. Quantitative characteristics of sinuous distributary channels on the Amazon Deep-Sea Fan[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1987, 98(6): 728-738.
- [66] Clark J D, Kenyon N H, Pickering K T. Quantitative analysis of the geometry of submarine channels: Implications for the classification of submarine fans[J]. *Geology*, 1992, 20(7): 633.
- [67] Pirmez C, Flood R D. Morphology and structure of Amazon Channel[C]// *Proceedings of the Ocean Drilling Program Initial Reports*. 1995, 155: 23-45.
- [68] Schumm S A, Khan H R. Experimental study of channel patterns [J]. *Nature*, 1971, 233(5319): 407-409.
- [69] Wescott. Geomorphic thresholds and complex response of fluvial systems—Some implications for sequence stratigraphy[J]. *Aapg Bulletin*, 1993, 77(7): 1208-1218.

A REVIEW ON GEOMORPHIC RESPONSE OF SUBMARINE CANYONS TO TECTONIC DEFORMATION

ZHAO Jiabin, ZHONG Guangfa*

(Tongji University, State Key Laboratory of Marine Geology, Shanghai 200092, China)

Abstract: The submarine canyon is one of the most important morphological features on the continental margin, which acts as major conduits for transporting organic matters and sediments from the continent and continental shelves into the deep sea. They are significant for the researches of deep-water gravity flows, global carbon circulation, deep-sea biodiversity, petroleum and gas hydrate exploration and submarine engineering etc. Submarine canyons commonly occur on continental margins influenced by tectonic deformation. This paper presents a brief review on the geomorphic responses of submarine canyons to tectonic deformation. Five end members in terms of planar distribution of submarine canyons related to tectonic deformation are summarized, i. e. tectonically confined, diverted, deflected, blocked, and cutting-across submarine canyons, respectively. The interaction between submarine canyons and variations in longitudinal gradient induced by structural deformation is also analyzed. Increase in slope gradient may cause enhanced erosion of the gravity flows and the development of knick-points within the canyons, whereas levees and frontal splays tend to occur as slope gradient decreases. Channel sinuosity is the dynamic response to the changes in slope gradient.

Key words: submarine canyon; tectonic deformation; geomorphic response; slope gradient; sinuosity; continental margin