



东海北部陆坡上缘沟的地形特征和成因探讨

刘阿成, 郭伟其, 陈新玺, 张 杰, 唐建忠, 李嘉柠, 秦 威

Topography characteristics and the origination of valleys at the upper edge of continental slope in the northern East China Sea

LIU Acheng, GUO Weiqi, CHEN Xinxi, ZHANG Jie, TANG Jianzhong, LI Jianing, and QIN Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023101101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海北部陆坡30 ka以来的沉积环境演变

Sedimentary environmental evolution for the past 30 ka of the northern continental slope of the South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 14-21

南海北部陆坡神狐海域SH-CL38站位的粒度特征及沉积记录

Sediment grain size characteristics of the Core SH-CL38 in the Shenhu area on the northern continental slope of the South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 90-100

南海北部海域中东部陆架坡折带类型与迁移演化及成因

Types and migration of shelf-breaks in the central and eastern parts of the Northern South China Sea and their origin
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 1-11

南海西北部莺琼陆坡36.6 ka以来的浊流沉积

Turbidite records since 36.6 ka at the Yingqiong continental slope in the northwest of South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 15-24

海盆沉积“源-汇”系统分析：南海北部珠江海谷-西北次海盆第四纪深水浊积扇

“Source to sink” analysis of a sea basin: The Quaternary deepwater turbidite fan system in Pearl River Valley-Northwest subbasin, Northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 1-12

南海北部陵水陆坡重力流沉积调查与分析

Investigation of gravity flow deposits on the Lingshui slope of the northern South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 25-35



关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘阿成, 郭伟其, 陈新玺, 等. 东海北部陆坡上缘沟的地形特征和成因探讨 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(2): 22-30.

LIU Acheng, GUO Weiqi, CHEN Xinxi, et al. Topography characteristics and the origination of valleys at the upper edge of continental slope in the northern East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(2): 22-30.

东海北部陆坡上缘沟的地形特征和成因探讨

刘阿成^{1,2}, 郭伟其¹, 陈新玺¹, 张杰³, 唐建忠¹, 李嘉柠⁴, 秦威⁴

1. 上海东海海洋工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200137

2. 自然资源部东海海域海岛中心, 上海 200136

3. 自然资源部东海调查中心, 上海 200137

4. 华能(浙江)能源开发有限公司清洁能源分公司, 杭州 310000

摘要: 东海陆坡上缘区处于东海陆架与冲绳海槽两大地貌单元的过渡带, 对其地形特征及成因的研究, 对于深入理解两单元相互作用和晚更新世晚期的海平面变化有重要意义。多波束测深和浅地层剖面调查揭示了东海北部陆坡上缘沟, 平均距离陆架坡折线约 7 km, 走向为 NNE-SSW, 分为单沟和双沟(局部), 宽约 400~1600 m, 沟深一般为 20~25 m, 单沟的等深线顺直, 沟底地形平缓, 双沟的地形比较复杂, 发育顺坡次级沟、沟底频繁起伏等。浅地层剖面揭示上部 10~15 m 为向东倾斜的前积反射结构, 属于晚更新世晚期的古长江三角洲前积层。静力触探试验表明海底表层为松散的粉砂质砂, 往下 3 m 为粉砂/黏土与砂的互层。侧扫声呐影像显示海底沙波发育, 波高约 0.5 m, 波长 6~9 m。推断陆坡上缘沟的位置和走向受陆坡正断层的影响; 结合沉积物¹⁴C 测年和海平面变化曲线, 推测沟主要形成于 17.4~14.5 kaBP, 也就是末次盛冰期海平面回升的初期阶段, 为滨浅海环境, 受潮流的冲刷侵蚀所致, 为断裂冲沟; 双沟内复杂的海底地形与滑坡有关。实测 200 m 等深线主要位于陆坡上缘沟内, 北部处于沟的东侧附近, 与沟相交; 两者走向相近, 与区域构造的影响有关。

关键词: 陆坡; 断裂冲沟; 正断层; 古长江三角洲; 东海北部

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023101101

Topography characteristics and the origination of valleys at the upper edge of continental slope in the northern East China Sea

LIU Acheng^{1,2}, GUO Weiqi¹, CHEN Xinxi¹, ZHANG Jie³, TANG Jianzhong¹, LI Jianing⁴, QIN Wei⁴

1. Shanghai East Sea Marine Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd, Shanghai 200137, China

2. East China Sea Area and Island Centre, Ministry of Natural Resource, Shanghai 200136, China

3. East China Sea Survey Centre, Ministry of Natural Resource, Shanghai 200137, China

4. Clean Energy Branch of Huaneng (Zhejiang) Energy Development Co. LTD

Abstract: The upper edge of the continental slope of the East China Sea is a transitional zone between two main geomorphological units: the continental shelf of the sea and Okinawa Trough. Research into its geomorphological characteristics and origination is meaningful for better understanding the interaction between these two units, and the sea level changes during the late period of Late Pleistocene. Multibeam sounding and subbottom profile surveys revealed sea bottom valleys at the upper edge of the continental slope in the northern East China Sea. The valleys extend in NNE-SSW direction in quasi-parallel to the continental shelf break with an average distance of about 7 km. The depth of the slope break is about 150 m on average. It is also generally parallel to normal faults in the continental slope. They can be subdivided into single valleys and locally double-valleys. The later ones consist of a main west valley and an auxiliary east valley with an interval about 2km. All the valleys have a higher west slope and a lower east one, 400~1600 m wide and 20~25 m deep in general. The single valleys have straight depth contours and gentle bottom topography, while the double-valleys have rather complicated topography, with minor gullies cutting down valley slopes and frequently uneven bottom and so on. Subbottom profiles across the west valley show the upper 10~15m strata having parallel reflection waves, forming an eastward-dipping structure, which is the paleo-Changjiang prodelta of the late period of Late Pleistocene. Cone penetration test (CPT) measurements of 3m deep at 170 m depth west of the west valley are interpreted as surficial loose silty sands, and interbedded silt/clay with sands downward. Side-scan sonar images near the CPT site showed sea bottom sandwaves with amplitude about 0.5 m

资助项目: 华能集团总部科技项目“基于深远海的海上风电选址和支撑技术研究”(HNKJ20-H66)

作者简介: 刘阿成(1950—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事海洋地质地球物理研究和海洋工程勘测研究, E-mail: lac2004@163.com

收稿日期: 2023-10-11; 改回日期: 2024-04-08. 文凤英编辑

and wave length of 6~9 m. It is inferred that the location and layout of the valleys were affected by normal faults in the continental slope related to the third phase of the Okinawa Trough expansion. Taking into account the shell ^{14}C dating of nearby borehole samples and sea level change curves, the valleys were formed mainly during 17.4~14.5 kaBP, which is the early stage of sea level rising after the last glacial maximum (LGM), when the area was in offshore-shallow sea environment and underwent tidal current scouring. Therefore, these valleys are fault-scouring valleys. The complicated topography of the double-valleys was related to submarine landslides of paleo-Changjiang predelta deposits. The measured 200 m depth contour lines of sea bottom are mostly within the west valley but partly to the east of the valley, resulting in the intersection of each other; and their similar stretching directions were considered to be resulted from the regional tectonic framework.

Key words: continental slope; fault-scouring valleys; normal faults; paleo-Changjiang delta; the northern East China Sea

东海陆坡介于宽广的东海陆架与冲绳海槽之间,也是冲绳海槽西坡(图 1)。冲绳海槽是琉球岛弧的弧后裂谷盆地,处于扩张初期,其发育与菲律宾海板块向西俯冲于欧亚板块之下,引起陆壳张裂有关^[1-5]。扩张运动造就了冲绳海槽内众多海底峡谷、海山、洼地和台地等构造地貌,对海槽的海底地形地貌形态产生了影响。海底峡谷地形特征显著,很多从陆架外缘延伸到海槽底部,横切陆坡^[1-2, 4, 6-7]。陆坡上缘区作为两大地貌单元(陆架与陆坡)的过

渡带,地貌部位和地理位置特殊,研究者关注到其海底坡度由缓变陡的显著变化,而对于进一步的地形地貌特征和区域性差异的认识还缺乏研究。范奉鑫和林美华^[8]根据东海北部的浅地层和同步海底地形测线,得出陆坡上缘沟位于陆架坡折线附近,两者平行(称其为陆架外缘沟),走向 NNE,断续延伸长达 150 km,水深 160~230 m,沟深 12~55 m,宽 0.3~2.3 km^[8],但是对于沟的研究还很少,诸如对于沟的水深/地形特征、成因和年代等缺乏了解。

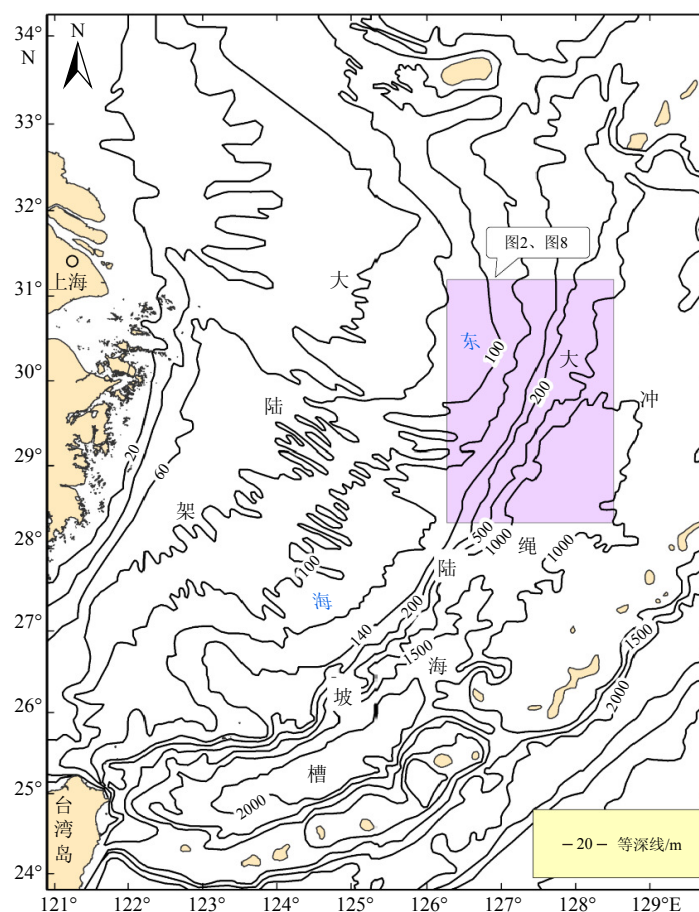


图 1 东海地形图

据文献 [1] 修改。

Fig.1 Topography of the East China Sea

Modified from reference [1].

本文主要根据多波束测深资料,分析陆坡上缘沟的地形形态特征,探讨沟的成因和发育过程,这对于增进认识冲绳海槽扩张运动对陆坡上部地形地貌的影响是有意义的,对于我国深远海工程也有指导意义。

1 区域地质概况

东海陆架平均宽达 415 km,地形平缓;陆坡位于陆架东(南)侧,长约 1 000 km,宽约 40~50 km,呈狭长弧形向东南凸出、倾斜,水深为 200~1 000 m;总体上,冲绳海槽北部走向为 NNE-SSW,南部转为近 E-W^[1]。陆坡坡脚水深自北向南逐渐加深,北段约 800 m,中段约 1 000 m,南段最大水深已接近 2 000 m^[9](图 1)。冲绳海槽北部的张裂可以分成三幕, I 幕为中一晚中新世, II 幕为早更新世, III 幕为晚更新世至现在^[3-4]。研究区位于东海北部,横跨陆坡上部和陆架外缘海域(图 1、图 2)。坡折线是陆架与陆坡的海底地形分界线,由西向东跨越坡折线后海底地形明显变陡。

东海陆坡由于断裂发育,导致大量形成海底峡谷、阶梯式台地等地貌;以 28°N 为界,北部陆坡相对较宽,地形较为平缓,平均坡度约 1°^[1,3]。陆坡上部为简单斜坡带,从坡折线至水深 250~350 m,其中在 28°03'~31°35'N 海域(研究区位于该范围内,图 1 和图 2),为堆积型陆坡斜坡,覆盖松散沉积物,主要为晚更新世低海面时期古长江等河流携带泥沙进入冲绳海槽;陆架外部区域海底为陆架侵蚀-堆积平原,是冰后期海进以来遭受侵蚀作用形成的残留地貌,表层沉积物以细砂为主^[1]。

2 资料和方法

本文主要基于多波束测深资料,结合浅地层剖面、静力触探(Cone penetration test, CPT)和侧扫声呐调查资料进行研究。调查区为 4 个长条形海域,跨越坡折,各长约 40 km,陆架端宽 0.6~1.3 km,陆坡端宽 1.2~2.2 km,多波束测深全覆盖,在图 3c 所在海域,沿双沟(见下文)走向,测深延伸约 10 km,各宽约 1 km(图 2),沿测区走向布置浅地层剖面/侧扫声呐测线 5 条、CPT 试验 3 站。测深采用 EM302 多波束测深仪,浅地层剖面/侧扫声呐为 EdgeTech2000-DSS 一体机,其中浅地层剖面频率为 100/400 kHz。CPT 为 Neptune3000,海上作业时,CPT 系统由电缆与调查船相连接,系统的水下单元

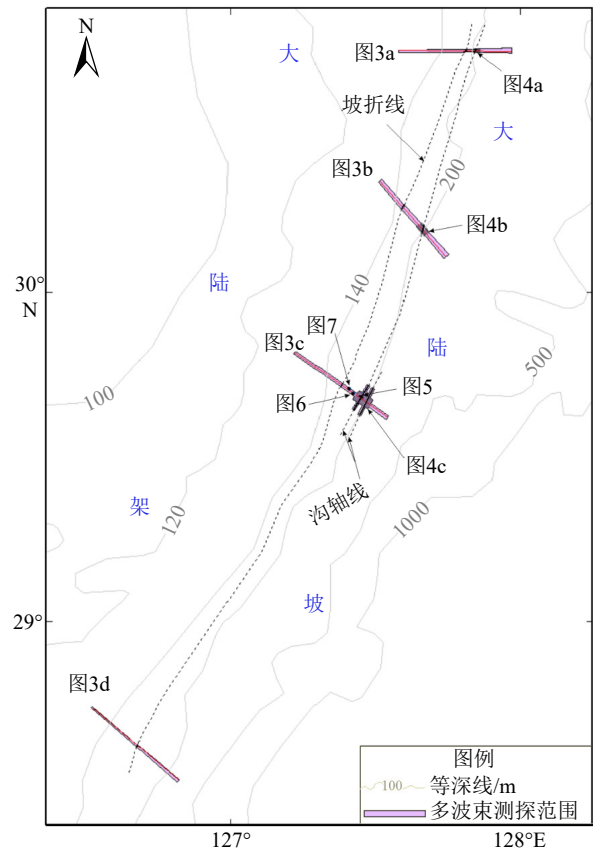


图 2 调查海域及主要地貌位置图

等深线图据图 1,黑色短实线表示实测坡折和沟轴线,黑色虚线为推测的坡折和沟轴线。

Fig.2 Locations of survey areas and main geomorphology

Isobath lines are based on Fig.1. Solid short black lines indicate measured slope breaks and valley axes. Dashed lines are inferred ones.

座底后,自动将圆锥形探头插入海床至设计深度,获得连续的沉积物锥尖阻力、不排水剪切强度等力学参数,用于土类判别和土层划分等。

3 结果

3.1 陆坡上缘沟的地貌部位

陆坡坡折的平均水深约 150 m(图 3a-d),陆坡上缘沟位于坡折东侧,沟西坡顶距离坡折约 3~9 km,平均约 7 km。在坡折以西,海底平缓地向东(南)倾斜,局部稍有起伏,平均坡度约 2'~3',在坡折以东,坡度增加到平均 20'~30'以上。东海北部陆坡上缘沟处于 29°N 以北海底^[8],图 3d 处于该纬线之南(图 2),未见陆坡上缘沟。

3.2 陆坡上缘沟的地形特征

陆坡上缘沟有单沟(图 3a-b)和双沟(图 3c),双

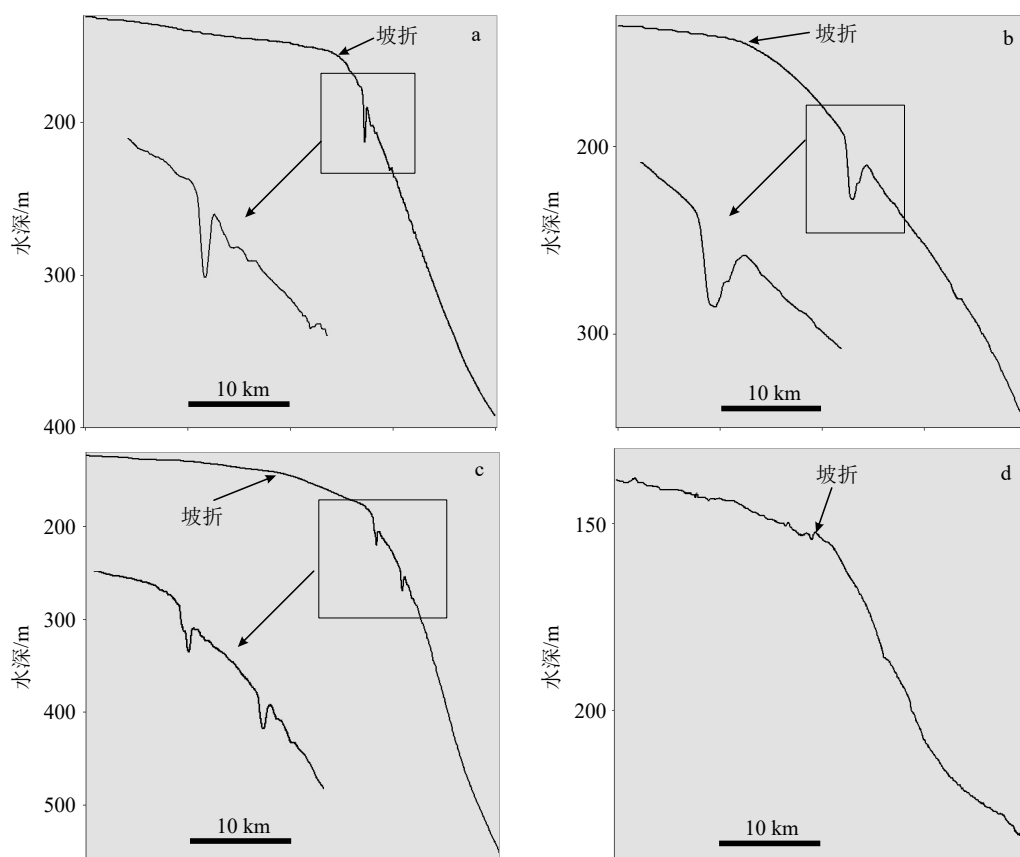


图 3 典型海底地形断面
位置见图 2。

Fig.3 Typical sections of sea bottom topography

Locations are shown in Fig.2, hereinafter.

沟有东、西两条, 平行相距约 2 km, 单沟的海底地形比较简单, 双沟则相当复杂。

3.2.1 沟的断面特征

受陆坡海底倾斜地形的影响, 沟的横断面都是西(北)坡高, 东(南)坡低, 呈不对称“V”形或“W”形。单沟的宽度变化较大, 窄的 400~500 m, 宽的 1100~1600 m, 双沟的沟宽度一般为 400~500 m, 宽的 700~800 m。西坡(包括单沟和双沟之西沟)高约 30~35 m, 东坡高 20~25 m, 沟深 20~25 m, 但是双沟中的东沟之西坡高度降为 20~25 m, 东坡降为 10~20 m, 沟深 10~20 m; 沟的西坡坡度一般为 5°~10°, 在西沟最陡可达 25°, 东坡坡度约 4°~10°, 局部 15°, 缓的稍大于 1°。沟的典型断面特征见图 3a-c。

3.2.2 沟的平面特征

沟的走向总体为 NNE-SSW, 局部为近 NE (图 4a-c), 基本平行坡折线(图 2), 西坡顶部大体沿 180~195 m 等深线延伸, (东)北段最浅, 中段最深, (西)南段(即西沟)较浅。对于东坡顶部, 北段和中段各沿 190 m 和 210 m 等深线延伸, 而南段的等深

线延伸性差, 多呈排列不齐的系列圈闭, 大小约为 100~200 m, 坡顶呈浑圆“城垛”状特征, “垛口”高差小于 5 m, 圈闭顶部水深约 205 m, 总体走向为 NNE 向。双沟中的东沟, 其西坡顶部约沿 245 m 等深线, 而东坡顶部等深线呈圈闭状, 但排列性较好, 圈闭顶部水深约 253 m, 呈扁长形, 长约 300~500 m, 一般高差小于 5 m, 个体走向为 N-NE 向, 总体走向为 NNE 向。

总体上, 单沟的等深线顺直、密集、相互平行, 西坡由于较陡, 这些特征更明显, 沟轴线(深泓线)的连续性和方向性稳定, 沟底地形平缓(图 4a-b); 北段的轴部水深为 200~213 m; 中段水深 225~230 m; 南段双沟的海底地形比较复杂, 西沟又甚于东沟(图 4c)。西沟的等深线密集, 弯曲多变, 沟坡等深线不规则地伸缩, 形成顺坡次级沟地形, 宽 100~400 m, 长 300~500 m; 沟底水深一般在 215~225 m 之间频繁起伏, 形成大量地形圈闭, 排列较乱, 局部上凸较甚, 水深不到 200 m, 将沟轴线错断, 偏移可达 150~250 m, 导致凹坑成断续串珠状排列; 受沟底凸起影响, 形成沟中沟, 横断面呈“W”形

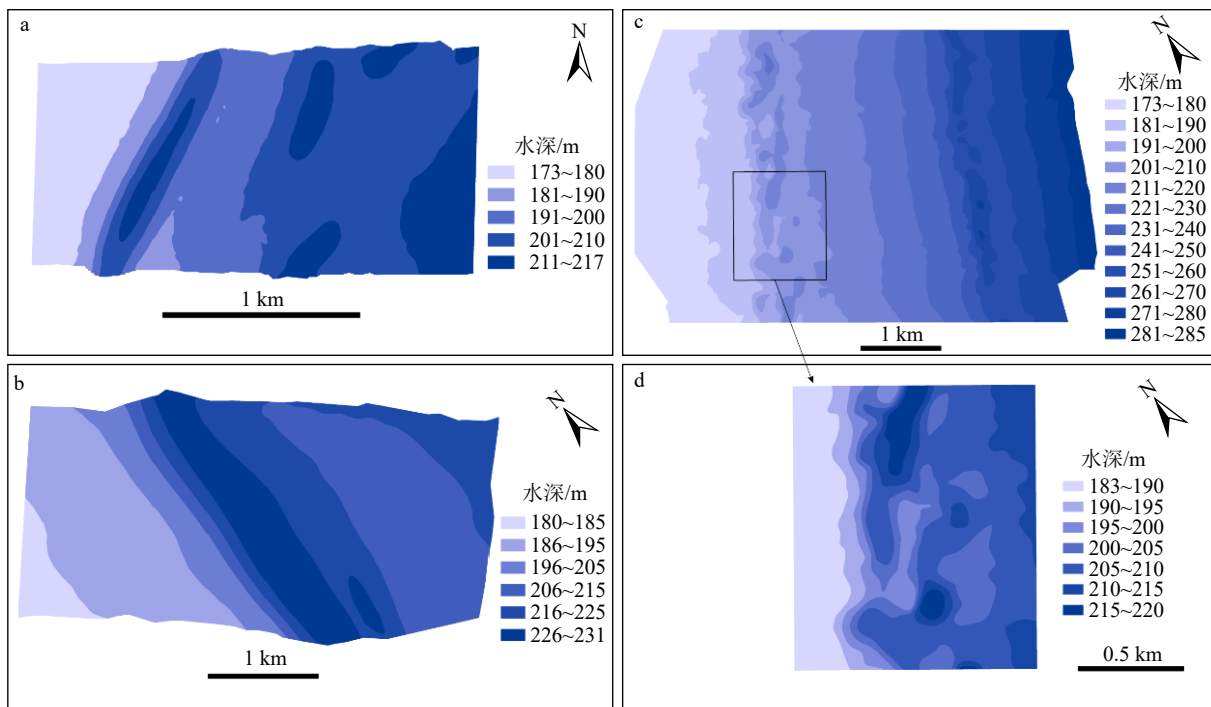


图4 多波束测深显示的沟的地形简图

a, b: 单沟, c: 双沟, d: 西沟局部放大。

Fig.4 Simplified topography of valleys interpreted by data of multibeam sounding

a and b: Single valleys, c: double-valleys, d: enlarged part of the west valley of double-valleys.

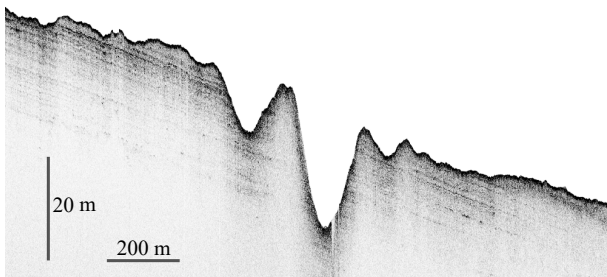


图5 横切西沟的浅地层剖面

Fig.5 Subbottom profile across the west valley

(图4c-d、图5);地形总体走向为NNE。东沟的等深线变化相对较弱,沟轴线连续性较好,水深在260~275 m之间凹凸变化,凹坑呈长串珠状排列。从地形特征上判断,西沟为主沟,东沟为副沟,西沟较长,可达约150 km^[8]。双沟的实测长度超过10 km,沿程特征未见明显变化,因此东沟向两端的延伸长度尚难确定。

3.3 西沟的浅地层剖面特征

图5浅地层剖面横切双沟中的西沟,剖面上部10~15 m记录比较清晰,反射波平行,连续性较好,振幅中等—较强,为向东倾斜(斜交)前积反射结构,是三角洲前积层的标志性结构,为晚更新世低

海面时期的古长江三角洲沉积^[7,9-11],也可能包括古黄河泥沙^[11]。倾斜前积层向东延伸不远,过渡为无反射结构,向西朝陆架方向厚度减薄;海底因侵蚀凹凸起伏,在图5剖面的左端,可以清晰地看到顶部的斜层理(反射波)被小洼坑中断,陆坡上缘沟深切入三角洲前积层。在东、西两条沟之间,海底分布有小片基岩区,与周边海底面基本齐平。局部剖面的沟坡有滑动迹象。

3.4 浅表层沉积物和海底微地貌

在研究区,常规的重力柱状和蚌式底质采样困难,与水深较深、底质较粗、海底倾斜等因素有关,因此CPT成为了解海底沉积物性质的有效手段。图6的CPT曲线是在西沟西侧的陆坡海底取得的,水深170 m,插入深度3 m,沉积物的锥尖阻力(tip resistance, TR)和不排水剪切强度(undrained shear strength, USS)跳跃或波动变化。除了表层厚约10 cm沉积物的TR和USS均为零外,TR变化范围为0.30~2.50 MPa, USS为0~115 kPa。锥尖阻力与岩性有关,砂性土的锥尖阻力大,黏性土的锥尖阻力小,随着锥尖阻力的增大,岩性由黏性土向砂性土变化^[12-14]。图6解译为表层为松散的粉砂质砂,往下为粉砂/黏土与砂的互层,与浅地层剖面的三角洲

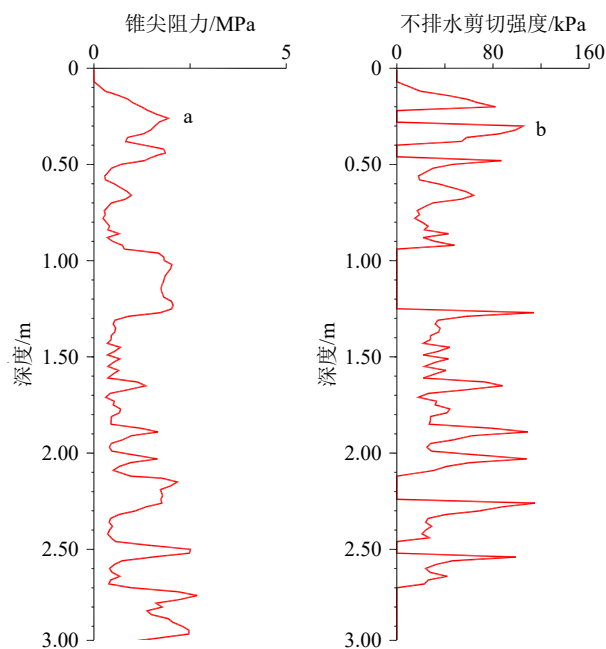


图 6 静力触探试验记录曲线
a: 锥尖阻力, b: 不排水抗剪强度。

Fig.6 CPT record curves

a: Tip resistance, b: undrained shear strength.

层理相对应,也与古三角洲钻孔揭示的岩性特征相近,这种层理的形成与长江洪、枯季流量和泥沙含量的变化有关系^[10]。该站附近的侧扫声呐记录显示(图 7),海底沙波发育,波高约 0.5 m,波长 6~9 m,波峰走向 N-NNE 向,体现了底流对海底微地貌的塑造作用。黑潮是冲绳海槽的主要水体,具有流速强、流量大的特点,主流沿陆架坡折带向东北流动,并跨过 200 m 等深线侵入陆架^[15-16],沙波的走向与流向基本垂直^[17],推断沙波的形成与黑潮向西流入陆架有关。沙波的存在表明底质以砂为主^[17],与 CPT 结果吻合,也与前人资料相符^[1, 18]。底质类型与现在的沉积环境不符^[18-20],原始沉积物为古长江三角洲前积层^[8, 10-11],晚更新世末期海平面上升后,研究区处于滨浅海环境,受潮流冲刷和波浪淘洗作用,细颗粒泥沙被带走,留下相对较粗的成为残留沉积物(残留砂),这与浅地层剖面的顶面特征(图 5)是互相印证的。

4 讨论

4.1 沟的构造活动因素

冲绳海槽原本为陆壳性质,由于菲律宾海板块向欧亚板块俯冲引起陆壳拉张变薄、断陷等,形成冲绳海槽^[1-5],海槽西坡即为东海陆坡(图 1),因此陆

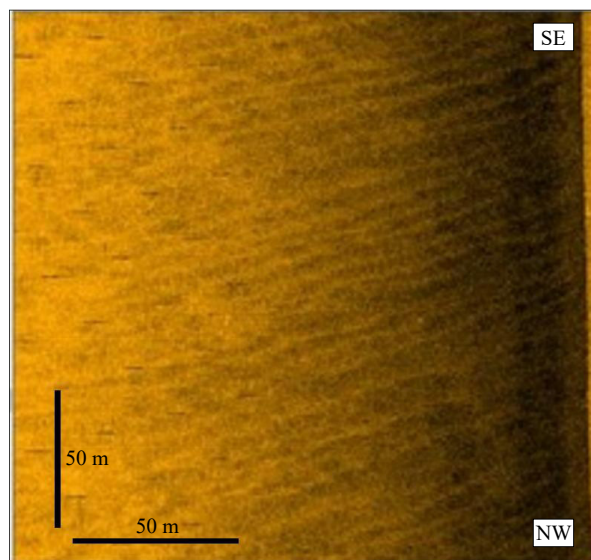


图 7 沙波的侧扫声呐影像图

Fig.7 Side scan sonar images of sandwaves

坡上缘沟的发育从大的构造背景上与海槽的扩张运动有关。冲绳海槽北部至今处于张裂之中,北部陆坡被系列高角度正断层切割,倾向 SE,在晚更新世以来的沉积层中可见微小断距的断层^[4, 6];很多为继承性正断层,越向上断距越小^[7]。辛立国等^[21]根据地震剖面判读,密集的直立正断层使陆架外缘与陆坡上部区域在末次盛冰期(last glacial maximum, LGM)后发生沉降至今,水深 150 m 附近及以深区域下沉至少 30 m。陆坡断裂多沿 NE-NNE 向展布^[22],也就是沿陆坡走向,与本文陆坡上缘沟的延伸方向(图 2)基本相同,而且沟正好处于 150 m 等深线东侧附近,推测沟的位置和走向受冲绳海槽 III 幕断裂的影响。断裂破坏了地层的连续性和结构,造成滑动面和软弱面等,有利于在潮流冲刷作用下沿构造面形成侵蚀性负地形。双沟的地形主要特征相似,可能与两条同期发生的(小)断层有关。范奉鑫和林美华^[8]认为东海陆坡的上缘和下缘均受 NNE 向断裂带的控制,断裂是陆坡上缘沟的基础因素。

4.2 沟的成因和发育过程

在晚更新世晚期的低海面时期,东海陆架几次裸露成陆,最低的海岸线位于坡折线附近^[10-11, 21],古长江口向东(南)延伸由此注入冲绳海槽,在陆坡上部形成至少两期海退古三角洲^[7-8, 10-11]。根据钻孔贝壳的¹⁴C 测年,古三角洲年代为约 42~28 kaBP^[10],陆坡上缘沟切割了三角洲前积层(图 5),其发育年代应在三角洲之后,即晚于 28 kaBP。可以根据晚更新世晚期的海平面变化曲线^[21, 23-25]进一步探讨古三

角洲和沟的形成年代。在约 22.0~19.5 kaBP 期间海平面降到最低,海岸线位于坡折线附近(经海底沉降校正后,当时的海平面低于现在 120 m^[21]),是陆坡上部古长江三角洲前积层的主要形成期,因此陆坡上缘沟的发育晚于 19.5 kaBP;至约 18.8 kaBP,海平面缓慢地上升到约 115 m 的高度,根据海底地形推算,古长江口(海岸线)向西退缩约 40~50 km,陆坡上缘的三角洲堆积过程基本结束;到约 17.4 kaBP 时海平面上升至约 100 m 高度,并且基本稳定至约 14.5 kaBP,古长江口累计向西退缩约 80~110 km,长江入海泥沙堆积在外陆架区,造成陆坡上缘区缺少泥沙供给,又处于滨浅海环境,潮流对海底的冲刷作用较强,受海槽西边界(陆坡)的约束,流向基本上为 NE-NNE 向,形成陆坡上缘沟;而后出现与融冰有关的海平面跃升(melt-water pulses, MWP)^[26]的 MWP-1A 事件,在约 13.4 kaBP,海平面快速上升到约 70 m 的高度,已靠近内陆架位置,陆坡上缘沟区水深在 100~200 m 以上,接近现在的沉积环境,海洋动力(海流)对于海底的冲刷侵蚀作用已相当微弱。综合起来推断,陆坡上缘沟主要形成于 17.4~14.5 kaBP 期间(图 8),即末次盛冰期海平面回升的初期阶段,因此,其发育与晚更新世末期的海平面变化直接相关,主要由潮流冲刷塑造。

陈珊珊等^[27]根据东海北部 SHD-1 孔(29°55'16''N、126°02'56''E,水深 84.1 m,孔深 150.4 m)和过钻孔的电火花震源地震剖面,研究了外陆架晚更新世地层与沉积环境演变;地震剖面上部划分为 4 个地震单元,自下而上为 SU4—SU1,结合 SHD-1 孔的同位素测年等资料, SU4 和 SU3 为两期海平面下降时期发育的水下三角洲,钻孔年龄分别为 74.8~63.1 kaBP 和 43.5 kaBP(分属于 MIS 4 和 MIS 3 期), SU2 年龄约为 22.5 kaBP(MIS 2),为陆相地层, SU1 年龄约为 13.1 kaBP(MIS 1),为全新世海相沉积; SU4 的水下三角洲分布范围有限,而 SU3 的水下三角洲范围十分广阔,最大厚度可达 60 m,在典型地震剖面上可见 SU3 单元从外陆架延伸进入陆坡上缘。上述地层层序和沉积环境演变与本文推断的三角洲前积层(图 5)的发育年代吻合。在 MIS 4 与 MIS 3 期间,海平面呈波动下降趋势,最低在现海面下约 80 m^[23-24],进入 MIS 2(约 27~13 kaBP)海平面强烈下降,至约 20 kaBP 低于现今约 120 m,古长江泥沙由沉积于外陆架转而注入冲绳海槽(陆坡上部),形成同属于 SU3 单元^[27]的三角洲体系,但是年代(年龄)上由西向东趋于年轻:在 SHD-1 孔为 MIS 3^[27],至陆坡上缘(图 5)为 MIS 2,即出现地层单

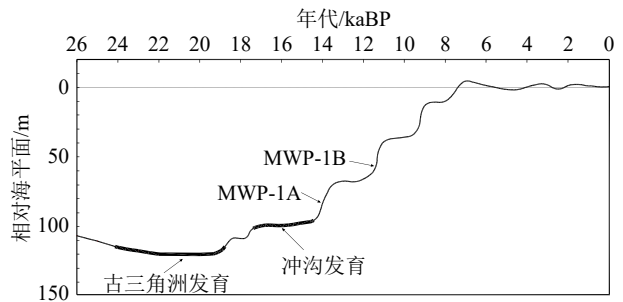


图 8 海平面变化与古三角洲及冲沟发育年代示意图
海平面曲线据文献 [21, 24-25] 绘制。

Fig.8 Sea level change and developmental periods of paleo-delta and scouring valleys

Sea level change curve is compiled from references [21, 24-25].

元的穿时现象。

东海陆坡海域地震活动频繁^[28],研究区海底坡度较大,而且在陆坡上缘区覆盖有较厚的晚更新世古长江三角洲前积层(图 5),海底容易失稳,造成滑坡、崩塌等。范奉鑫等^[11]的浅地层剖面揭示古三角洲以东的陆坡上部普遍存在滑坡现象,如陆坡上缘沟的东侧海底。在图 4a 中,沟的东侧海底起伏,可能就是这种滑坡现象的海底地形表现。在研究区的浅地层剖面中,沟坡局部也有滑动迹象。滑坡既可以造成顺坡次级沟,滑体堆积在沟底又会形成地形凸起,造成沟底起伏,因此推断双沟的复杂地形与滑坡有关系。Hu 等^[28]根据多波束测量地形图,在东海陆坡辨识出小至 0.06 km²的滑坡,本文顺坡次级沟与其大小相当,也可以作为滑坡的佐证。由此可见,这些沟主要与断裂和潮流冲刷有关,本文称为断裂冲沟。

4.3 断裂冲沟与实测 200 m 等深线的关系

200 m 等深线是边缘海重要的海底地形特征线,一般将 200 m 等深线作为陆架坡折线^[2,9]。在研究黑潮对东海的影响时,实际上也将 200 m 等深线作为东海陆架与冲绳海槽(陆坡)的分界线^[15-16]。吴自银等^[9]根据多源海底水深数据融合并编程计算后发现,东海坡折的平均深度为 200 m,但在较多海底断面上水深小于 200 m。陈珊珊等^[27]得出东海北部陆架坡折水深为 150~200 m。研究区的坡折平均水深约为 150 m(图 3a-d),实测 200 m 等深线与陆坡上缘沟均在坡折东侧(图 3a-c),两者的相对关系如何呢?在北段(图 4a),沟呈长扁舟状,最大水深 213 m,局部形成闭合的 200 m 等深线,但是东坡顶部水深约 190 m,因此陆坡 200 m 等深线位于沟的东侧下方海底,距离沟轴线一般约 400 m。在中段(图 4b)

和南段(西沟, 图 4c), 沟的最大水深为 230 m, 而且东坡顶部水深分别为 210 m 和 205 m, 200 m 等深线位于沟的西坡, 与沟轴线一般相距 200~300 m。因此, 200 m 等深线主要位于陆坡上缘沟内, 北部处于沟的东侧, 与沟相交。总体上两者的走向相近, 体现了区域构造对地形地貌的影响。

5 结论

(1) 东海北部陆坡上缘区发育海底沟, 基本平行坡折线, 距离坡折线平均约 7 km; 分为单沟和双沟(局部), 宽约 400~1 600 m, 沟深约 20~25 m。单沟的等深线顺直, 沟底地形平缓, 双沟的地形比较复杂, 发育顺坡次级沟, 沟底频繁起伏等。

(2) 推断陆坡上缘沟的位置和走向受陆坡正断层的影响, 沟主要形成于 17.4~14.5 kaBP, 即末次盛冰期海平面回升的初期阶段, 研究区处于滨浅海环境, 在潮流的冲刷作用下形成, 为断裂冲沟。双沟内复杂的海底地形与古长江三角洲前积层的滑坡等地质作用有关。

(3) 实测 200 m 等深线主要位于陆坡上缘沟内, 北部处于沟外东侧, 与沟相交, 两者走向相近, 与区域构造的影响有关系。

致谢: 焦安志协助清绘图件, 在此表示衷心的感谢。

参考文献 (References)

- [1] 杨文达, 崔征科, 张异彪. 东海地质与矿产 [M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 65-87, 98-103, 467-475. [YANG Wenda, CUI Zhengke, ZHANG Yibiao. Geology and Ores in the East China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2010: 65-87, 98-103, 467-475.]
- [2] 刘忠臣, 陈义兰, 丁继胜, 等. 东海海底地形分区特征和成因研究 [J]. 海洋科学进展, 2003, 21(2): 160-173. [LIU Zhongchen, CHEN Yilan, DING Jisheng, et al. Study on zoned characteristics and formation cause of the East China Sea submarine topography[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21(2): 160-173.]
- [3] Sibuet J C, Hsu S K, Shyu C T, et al. Structural and kinematic evolutions of the Okinawa Trough Backarc Basin[M]/Taylor B. Backarc Basins: Tectonics and Magmatism. New York: Springer, 1995: 343-379.
- [4] 吴白银, 王小波, 金翔龙, 等. 冲绳海槽弧后扩张证据及关键问题探讨 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 67-76. [WU Ziyin, WANG Xiaobo, JIN Xianglong, et al. The evidences of the backarc spreading and discussion on the key issues in the Okinawa Trough[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(3): 67-76.]
- [5] Gungor A, Lee G H, Kim H J, et al. Structural characteristics of the northern Okinawa Trough and adjacent areas from regional seismic reflection data: geologic and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 2012, 522-523: 198-207.
- [6] 马秀冬, 李萍, 徐元芹, 等. 冲绳海槽中段海底灾害地质类型及海底稳定性评价 [J]. 海洋科学进展, 2018, 36(1): 79-87. [MA Xiudong, LI Ping, XU Yuanqin, et al. Submarine geohazards types and seabed stability evaluation of the middle part of the Okinawa trough[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(1): 79-87.]
- [7] 陈珊珊, 王中波, 张勇, 等. 东海北部外陆架及邻区灾害地质体特征及成因研究 [J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1512-1529. [CHEN Shanshan, WANG Zhongbo, ZHANG Yong, et al. Characteristics and origin of disaster geological bodies in the northern outer shelf of the East China Sea and its adjacent areas[J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1512-1529.]
- [8] 范奉鑫, 林美华. 东海北部陆架外缘的边缘沟、坎 [J]. 海洋与湖沼, 1999(3): 53-56. [FAN Fengxin, LIN Meihua. Marginal gully and scarp on the outer continental shelf margin of the East China Sea[J]. *Marine Sciences*, 1999(3): 53-56.]
- [9] 吴白银, 李家彪, 金翔龙, 等. 冲绳海槽海底地形地貌界限特征及影响因素 [J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(7): 1477-1487. [WU Ziyin, LI Jiabiao, JIN Xianglong, et al. Distribution, features, and influence factors of the submarine topographic boundaries of the Okinawa Trough[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(8): 1885-1896.]
- [10] 袁迎如. 东海大陆架外部的晚更新世晚期长江河口 [J]. 海洋学报, 1992, 14(6): 85-91. [YUAN Yingru. Changjiang estuary in outer shelf of East China Sea during the late period of the Late Pleistocene[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(6): 85-91.]
- [11] 范奉鑫, 阎军, 陈长安, 等. 冲绳海槽北部西坡的古三角洲沉积 [J]. 海洋科学集刊, 2007(48): 42-54. [FAN Fengxin, YAN Jun, CHEN Changan, et al. Paleo-delta deposition in the west slope of the northern Okinawa Trough[J]. *Studia Marina Sinica*, 2007(48): 42-54.]
- [12] Robertson P K. Soil classification using the cone penetration test[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, 27(1): 151-158.
- [13] 陈培雄, 潘国富, 陈小玲. 海底浅表层不同土类静力触探参数与物理力学性质对比研究 [J]. 海洋通报, 2009, 28(6): 118-121. [CHEN Peixiong, PAN Guofu, CHEN Xiaoling. Correlative analyses of cone penetration test parameters and physicommechanical properties for different seabed soil types[J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(6): 118-121.]
- [14] 陈小玲, 陈培雄, 陈锡士, 等. 海底管线区浅表层土孔压静力触探参数特征及应用 [J]. 海洋科学, 2012, 36(3): 8-12. [CHEN Xiaoling, CHEN Peixiong, CHEN Xitu, et al. Characteristics of pore pressure static cone penetration test parameters and its application of surface soil in pipeline laying areas[J]. *Marine Sciences*, 2012, 36(3): 8-12.]
- [15] 杨德周, 许灵静, 尹宝树, 等. 黑潮跨陆架入侵东海年际变化的数值模拟 [J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1318-1327. [YANG Dezhou, XU Lingjing, YIN Baoshu, et al. Numerical study on inter-annual variation of cross-shelf intrusion of Kuroshio into East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, 48(6): 1318-1327.]
- [16] 吴白银, 温珍河. 中国近海海洋地质 [M]. 北京: 科学出版社, 2021: 36-37. [WU Ziyin, WEN Zhenhe. *Marine Geology of China Seas*[M]. Beijing: Science Press, 2021: 36-37.]

- [17] 刘振夏, 夏东兴. 中国近海潮流沉积沙体 [M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 46-52. [LIU Zhenxia, XIA Dongxing. Tidal Sands in the China Seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004: 46-52.]
- [18] 梅西, 李学杰, 密蓓蓓, 等. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式 [J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1447-1462. [MEI Xi, LI Xuejie, MI Beibei, et al. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments[J]. Geology in China, 2020, 47(5): 1447-1462.]
- [19] Iseki K, Okamura K, Kiyomoto Y. Seasonality and composition of downward particulate fluxes at the continental shelf and Okinawa Trough in the East China Sea[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(2): 457-473.
- [20] Katayama H, Watanabe Y. The Huanghe and Changjiang contribution to seasonal variability in terrigenous particulate load to the Okinawa Trough[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(2): 475-485.
- [21] 辛立国, 李广雪, 李西双, 等. 中国东海 2 万年来海平面变化分析 [J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36(5): 699-704, 698. [XIN Ligu, LI Guangxue, LI Xisuang, et al. Analysis of sea-level variation in the East China Sea since the Last Glacial Maximum[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(5): 699-704,698.]
- [22] 张异彪, 刘峰, 杨文达. 中国矿产地质志-东海卷 [M]. 北京: 地质出版社, 2022: 35-36. [ZHANG Yibiao, LIU Feng, YANG Wenda. Geology of Mineral Resources in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2022: 35-36.]
- [23] Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E, et al. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1-3): 295-305.
- [24] 王利波, 李军, 陈正新, 等. 晚更新世以来台湾浅滩西部地层结构与古环境演化 [J]. 沉积学报, 2014, 32(6): 1089-1099. [WANG Libo, LI Jun, CHEN Zhengxin, et al. Late Pleistocene and Holocene stratigraphy and paleo-environmental evolution in the western Taiwan shoal[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1089-1099.]
- [25] 周劲佳, 吴自银, 马胜中, 等. 台湾海峡晚更新世以来的高分辨率地震地层学研究 [J]. 海洋学报, 2016, 38(9): 76-88. [ZHOU Mengjia, WU Ziyin, MA Shengzhong, et al. High resolution seismic stratigraphy research in the Taiwan Strait since late Pleistocene[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(9): 76-88.]
- [26] Liu J P, Milliman J D. Reconsidering melt-water pulses 1A and 1B: global impacts of rapid sea-level rise[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2004, 3(2): 183-190.
- [27] 陈珊珊, 王中波, 陆凯, 等. 东海北部外陆架 MIS 6 以来的沉积地层格架及古环境演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(6): 124-137. [CHEN Shanshan, WANG Zhongbo, LU Kai, et al. Sedimentary stratigraphic framework and palaeoenvironmental evolution of the northern outer shelf of East China Sea since MIS 6[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(6): 124-137.]
- [28] Hu G H, Yan T, Liu Z X, et al. Size distribution of submarine landslides along the middle continental slope of the East China Sea[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2009, 8(4): 322-326.